



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

**FACULDADE DE ENGENHARIA – CÂMPUS ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

VICENTE DE PAULA GONÇALVES JUNIOR

**CONTRIBUIÇÃO EXPERIMENTAL PARA O ESTUDO DE ONDAS DE
LAMA EVOLUINDO EM CANAL**

Ilha Solteira

2019



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

VICENTE DE PAULA GONÇALVES JUNIOR

**CONTRIBUIÇÃO EXPERIMENTAL PARA O ESTUDO DE ONDAS DE
LAMA EVOLUINDO EM CANAL**

Dissertação apresentada como parte do pré-requisito para obtenção do título de mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM, na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Câmpus de Ilha Solteira.

Área de Conhecimento: Ciências
Térmicas

Geraldo de Freitas Maciel
Orientador

Ilha Solteira

2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

G573c Gonçalves Junior, Vicente de Paula.
Contribuição experimental para o estudo de ondas de lama evoluindo em canal / Vicente de Paula Gonçalves Junior. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019
107 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciências Térmicas, 2019

Orientador: Geraldo de Freitas Maciel

Inclui bibliografia

1. *Roll waves*. 2. Experimentos. 3. Fluidos não Newtonianos. 4. Estabilizantes químicos.


Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Contribuição Experimental para o Estudo de Ondas de Lama evoluindo em Canal

AUTOR: VICENTE DE PAULO GONÇALVES JUNIOR

ORIENTADOR: GERALDO DE FREITAS MACIEL

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. MARCIA REGINA DE MOURA AOUADA
Departamento de Física e Química / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. ANDRÉ DAMIANI ROCHA
Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas / Universidade Federal do ABC

Ilha Solteira, 21 de agosto de 2019

“Dedico este trabalho aos meus pais por terem acreditado nos meus sonhos e me deram forças para chegar ao porto almejado”.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS pelo fôlego de vida que tem me concedido pela SUA palavra que me serve de alavanca em horas de desespero.

Aos meus pais, Márcia Rosa e Vicente de Paula que além de depositarem confiança em mim, foram paciosos, me poupando de preocupações nos momentos difíceis, para que eu pudesse me concentrar no término deste trabalho.

A minha namorada Thais, que foi minha companheira sempre falando palavras animadoras na qual ficou gravada em memória “Você vai conseguir!”.

A minha família adquirida nesse processo: Clarice Dantas, João Dantas, Valéria, Alexandra, Cláudia, Adriano, Rosinei, Joilson e Fátima, que me deram força e apoio e sempre se mostraram esperançosos pelo bom resultado dessa pesquisa.

Aos colegas de trabalho, João Batista, Caio, Yuri, Renan, João Tardivel, Thainá, Evandro, Fabiana e André, que acompanharam de perto o desenvolver do trabalho, dando total apoio nas árduas campanhas experimentais, além de serem ótimas pessoas em momentos de lazer.

Aos meus amigos e irmãos de consideração, Leonardo, Lucas, Anderson e Lucas Gomes, pelos quais terei sempre admiração, carinho e respeito, e que se mostraram presentes em horas que tive necessidade.

Ao meu orientador Geraldo de Freitas Maciel, pesquisador fantástico que despertou em mim o interesse pela pesquisa, orientando com seriedade e comprometimento e se mostrando disponível no tirar das dúvidas. E pela eterna paciência.

Aos técnicos do departamento de Engenharia Civil pelo suporte e auxílio no desenvolvimento das atividades experimentais. Em especial, ao laboratório de Hidrologia e Hidrometria pelo espaço cedido para a instalação do aparato experimental.

À FAPESP pelo financiamento e aquisição dos equipamentos utilizados na pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação Engenharia Mecânica pelo acolhimento, notadamente aos seus professores e agentes administrativos.

Enfim agradeço pela rica oportunidade de estar contribuindo com o meio técnico científico.

RESUMO

Esta pesquisa tem como principal objetivo verificar experimentalmente a presença de instabilidades na superfície livre de escoamentos lamosos, em canal com 10 metros de comprimento. Estes escoamentos, quando em condições favoráveis de vazão e inclinação, podem constituir um domínio favorável à geração de *roll waves*, instabilidades que evoluem adquirindo característica periódica e que se propagam com amplitudes, comprimentos e velocidade de propagação bem definidas. O fluido teste utilizado nos ensaios foi uma mistura de água+argila caulínica (representativo do material lamoso em desastres naturais), confeccionada com uma concentração em volume de 25% e caracterizada reologicamente pelo modelo de Herschel Bulkley. Foram testados dois surfactantes (estabilizantes químicos), Tween 80 e goma xantana, para estabilizar os parâmetros reológicos da mistura, tendo a goma xantana garantido maior tempo de estabilização. A aferição da superfície livre foi realizada por meio de sistema não-intrusivo (transdutor ultrassônico), que se mostrou eficiente para aferição de ondas íngremes e de pequenas amplitudes. Os resultados de ensaios experimentais exploratórios foram confrontados com o modelo matemático 1D desenvolvido pelo grupo de pesquisa.

Palavra-Chave: *Roll waves*. Experimentos. Fluidos não newtonianos. Estabilizantes químicos.

ABSTRACT

This project has as main objective to experimentally verify the presence of instabilities in the free surface of muddy flows in a ten meter long channel. These flows, when situated under favorable flow and slope conditions may constitute a favorable domain for the generation of *roll waves*, instabilities that evolve acquiring periodic characteristics and propagate itself with well-defined amplitudes, lengths and velocity. The test fluid used in the experiment was a mixture between water + kaolinitic clay (representative of the muddy material in natural disasters), made with a 25% volume concentration and rheologically characterized by the Herschel Bulkley model. Two surfactants (chemical stabilizers), Tween 80 and xanthan gum, were tested to stabilize the rheological parameters of the mixture, with the xanthan gum ensuring longer stabilization time. The free surface measurement was performed using a non-intrusive system (ultrasonic transducer), which proved to be efficient for the measurement of steep waves with small amplitudes. The results of exploratory experimental tests were compared with the 1D mathematical model developed by the research group.

Palavra-Chave – *Roll waves*. Experiments. Non Newtonian Fluid. Chemical Stabilizers.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Exemplos de surgimento de <i>roll waves</i> em ambiente de laboratório e na natureza. (a) <i>Roll Waves</i> com imposição de frequência em glicerina pura; (b) <i>Roll waves</i> naturais evoluindo em escoamento lamoso; (c) <i>Roll waves</i> em mudflow em Gully Jia na China; (d) <i>Roll wave</i> em água, ocorrendo em córrego na Bolívia. | 16 |
| Figura 2: (a) Deslizamento em nova Friburgo (RJ,2011); (b) Escoamento de lama de rejeitos da barragem de Fundão atingindo o distrito de Bento Rodrigues (MG,2015). (c) Megadesastre ocorrido em Brumadinho (MG,2019)..... | 17 |
| Figura 3: Esquema de classificação dos fluidos segundo comportamento reológico. | 27 |
| Figura 4: Reograma de diferentes tipos de fluidos. | 32 |
| Figura 5: Estrutura da camada 1:1 da caulinita, com uma folha de tetraedros de SiO ₄ e outra de octaedros de Al ₂ (Si ₂ O ₅) (OH) ₄ | 36 |
| Figura 6: Arranjo de partícula argilo mineral: (A) disperso-defloculado; (B) Disperso-floculado | 38 |
| Figura 7: Representação esquemática de uma molécula de tensoativo..... | 40 |
| Figura 8: - Esquema do campo de medição da frente de onda ultrassônica e o ângulo de inclinação da superfície livre..... | 43 |
| Figura 9: (a) Fotografia do aparato experimental e (b) Fluxograma de funcionamento do sistema. | 44 |
| Figura 10: (a) Canal de grandes dimensões com fundo de PVC lateral de vidro; (b) macaco hidráulico sendo utilizado para variar a declividade do canal. | 46 |
| Figura 11: Reservatório - sucção/recalque..... | 47 |
| Figura 12: Sistema de perturbação locado no canal de ensaio | 48 |
| Figura 13: (a) gerador de sinais; (b)osciloscópio..... | 48 |
| Figura 14: Sistema de medição de nível fixado sobre as paredes laterais do canal. | 49 |
| Figura 15: Aparato experimental de calibração para transdutor ultrassônico. | 51 |
| Figura 16: Relação de calibração dos sensores ultrassônicos, com as respectivas equações | 52 |
| Figura 17: (a) Reograma de Herschel Bulkley para o fluido teste; (b) Bloco padrão utilizado nos ensaios..... | 54 |
| Figura 18: (a) Reômetro R/S utilizado para aferir a reologia do fluido teste; (b) Spindle CC-45..... | 55 |

| | |
|---|----|
| Figura 19: Aferição de velocidade superficial através do sensor de barreira | 59 |
| Figura 20: (a) Perfil das <i>Roll Waves</i> com sinal filtrado, (b) Espectro de onda | 60 |
| Figura 21: (a) Curva de fluxo da mistura água+argila caulínica analisadas em intervalos de 24h e (b) Parâmetros reológicos de Herschel Bulkley. | 64 |
| Figura 22: (a) Curva de fluxo da mistura água+argila caulínica+tensoativo, analisadas em intervalos de 24h e (b) Parâmetros reológicos de Herschel Bulkley. | 65 |
| Figura 23: Resultado experimental de amplitude de onda com canal inclinado em 6,2° e vazão de 2,03l/s, rotação de 350 rpm, sinais obtidos pelos sensores 1 (a 5,350 m da entrada do canal) e 2 (a 5,935 m da entrada do canal). | 67 |
| Figura 24: Resultado experimental de amplitude de onda sendo geradas de forma “natural” com canal inclinado em 6,2° e vazão de 2,16 l/s, registradas pelo sensor 1 e 2, (b) Espectro de frequência do sinal processado para inclinação de 6,2° e rotação da bomba de 500 rpm. | 70 |
| Figura 25: Comparativo entre as ondas geradas para vazões de 2,06 e 3,16 l/s, com os respectivos números de Froude 2,25 e 3,14. | 73 |
| Figura 26: Comparações entre os resultados experimentais e os resultados do modelo matemático 1D. | 75 |
| Figura 27: (a) Curva de fluxo da mistura água+argila caulínica analisados em intervalos de 9 dias para concentração de 10% de argila caulínica (b) Parâmetros reológicos obtidos das curvas de fluxo. | 79 |
| Figura 28: Resultado experimental de amplitude de onda sendo geradas de forma “natural” com canal inclinado em 9,2° e vazão de 2,90 l/s, registradas pelos sensores 1 e 2, (b) Espectro de frequência do sinal processado para inclinação de 9,2° e rotação da bomba de 350 rpm. | 80 |
| Figura 29: (a) Curva de fluxo do fluido teste água+argila caulínica+goma xantana durante procedimento experimental. (b) Parâmetros reológicos obtidos das curvas de fluxo. | 82 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1: – Incertezas das medições das propriedades do escoamento para terceira campanha experimental. | 57 |
| Tabela 2: Tabela de dados das propriedades do fluido para inclinação 6,2°, 350 rpm. | 66 |
| Tabela 3: Tabela de dados das propriedades <i>roll waves</i> para inclinação de 6,2° e rotação de 350 rpm..... | 69 |
| Tabela 4: Tabela de dados das propriedades do fluido para inclinação 6,2° e 500rpm..... | 69 |
| Tabela 5: Tabela de parâmetros de onda, para inclinação 6,2° e 500rpm..... | 72 |
| Tabela 6: Comparações dos resultados experimentais com modelo matemático 1D. | 76 |
| Tabela 7: Tabela de propriedades do fluido para inclinação 9,2° e 350rpm. | 80 |
| Tabela 8: Tabela de parâmetros de onda, para inclinação 9,2° e 350 rpm. | 81 |
| Tabela 9 Rotação imposta com as respectivas vazões | 103 |
| Tabela 10: Tabela de propriedades de <i>roll wave</i> na inclinação 6,2° | 105 |

PREÂMBULO

Esta proposta surge da motivação de se investigar mais detalhadamente os escoamentos com superfície livre de fluidos hiperconcentrados, de reologia não-newtoniana, presentes em desastres e catástrofes naturais, mais especificamente em corridas de lama. A título de exemplo, temos o desastre ocorrido na região Serrana do Rio de Janeiro (2011), e os mega desastres de Mariana/MG (2015), devido ao rompimento da barragem de Fundão, da mineradora Samarco e recentemente o rompimento da barragem da Mina do Feijão em Brumadinho/MG (2019). Vale ressaltar que as corridas de lama acarretam prejuízos econômicos, sociais e ambientais, e, quase sempre, perdas de vidas e vítimas, cujas consequências podem ser potencializadas quando da presença de instabilidades (efeitos pulsantes, ondas) na superfície livre. Tais ondas na literatura são denominadas de *roll waves*.

Na temática de riscos e catástrofes, o grupo de pesquisa RMVP (Reologia de Materiais Viscosos e Viscoplasticos) da FE de Ilha Solteira tem envidado esforços na elaboração de modelos matemáticos, numéricos e experimentais de corridas de lamas, visando compreender os mecanismos de geração de *roll waves*. No que se refere a trabalhos experimentais sobre *roll waves* (principalmente em reologia não newtoniana), ainda há uma grande lacuna na literatura, pelo fato da dificuldade em controlar sua formação e propagação e, por conseguinte, sua medição.

Dentro do grupo de pesquisa, Santos (2003) desenvolveu inicialmente um estudo teórico-experimental para determinação de leis de atrito em canal, em considerando a reologia não newtoniana do fluido escoante. O autor realizou ensaios dinâmicos com lamas escoando em canal inclinado de 10m de comprimento, onde pôde observar eventual surgimento de *roll waves*. Com intuito de caracterizar melhor o fenômeno, o grupo de pesquisa investiu, paralelamente, na construção de um canaleta de declividade variável, contendo 3 m de comprimento, utilizando como fluido teste o gel de Carbopol (fluido com propriedades reológicas idênticas às das lamas de pés de barragens, corridas de lama e de rejeitos). O aparato experimental, concebido, de baixo custo e testado, apresentou boa funcionalidade (FIROTT (2012) E CUNHA (2013)).

Havendo, entretanto, a necessidade de caracterizar melhor o fenômeno *roll wave* em escoamentos lamosos propriamente ditos, ou seja, em condições

semelhantes à realidade, o objetivo principal desta pesquisa foi realizar experimentos com lamas, utilizando o aparato experimental já existente (canal de 10 m de comprimento e de declividade variável), implementando melhorias em todo o aparato, notadamente no sistema de perturbação do escoamento base e no sistema de medição da superfície livre, o que possibilitou gerar, controlar e medir *roll waves* estabilizadas, assim como aferir as propriedades das mesmas (amplitude, período e velocidade de propagação), com maior precisão, o que demandou, para o fluido teste utilizado, uma pesquisa adicional referente ao uso de estabilizantes químicos que garantissem, no decorrer do tempo, permanência das propriedades reológicas do fluido.

A dissertação em tela traz mais uma contribuição experimental e metodológica para o estudo de *roll waves*, preenchendo uma lacuna ainda existente na literatura. Os resultados experimentais do fenômeno em lamas, apresentados nessa dissertação, ainda que iniciais (escassos), já nos permitem, de forma exploratória e inequívoca, identificar consonância com a teoria e a literatura no assunto.

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 15 |
| 2 | OBJETIVO | 19 |
| 3 | ESTADO DA ARTE DE <i>ROLL WAVES</i> NA VERTENTE EXPERIMENTAL | 20 |
| 4 | CONSIDERAÇÕES GERAIS..... | 25 |
| 4.1 | REOLOGIA..... | 25 |
| 4.1.1 | Classificação dos modelos reológicos..... | 26 |
| 4.1.2 | Fluidos Newtonianos | 27 |
| 4.1.3 | Fluidos não-newtonianos | 28 |
| 4.2 | CRITÉRIOS DE FORMAÇÃO DE <i>ROLL WAVE</i> | 32 |
| 4.3 | DESCRIÇÃO DO FLUIDO TESTE UTILIZADO NO TRABALHO..... | 35 |
| 4.3.1 | Argilominerais | 35 |
| 4.3.1.1 | <i>Caulinita</i> | 36 |
| 4.3.2 | Floculação x Defloculação..... | 37 |
| 5 | ESTABILIZANTES QUÍMICOS..... | 39 |
| 5.1 | GOMA XANTANA..... | 39 |
| 5.2 | TWEEN 80 | 40 |
| 6 | TÉCNICAS DE MEDIÇÃO NÃO INTRUSIVAS DE ESCOAMENTO COM SUPERFÍCIE LIVRE | 41 |
| 6.1 | TÉCNICA ULTRASSÔNICA | 41 |
| 7 | MATERIAIS E MÉTODOS | 44 |
| 7.1 | APARATO EXPERIMENTAL E FLUXOGRAMA DO SISTEMA | 44 |
| 7.1.1 | Canal em estrutura metálica..... | 45 |
| 7.1.2 | Reservatório – sistema sucção e recalque..... | 46 |
| 7.1.3 | Sistema de perturbação | 47 |
| 7.1.4 | Sistema de medição de nível e vazão do canal..... | 49 |

| | | |
|---------|--|------------|
| 7.1.5 | Calibração do sensor ultrassônico | 50 |
| 7.1.6 | Características físico-químicas e reometria do fluido teste | 52 |
| 7.1.7 | Condições de inclinação e vazão no canal..... | 56 |
| 7.2 | PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS. | 56 |
| 8 | RESULTADOS..... | 60 |
| 8.1 | PRIMEIRA CAMPANHA EXPERIMENTAL..... | 60 |
| 8.2 | SEGUNDA CAMPANHA EXPERIMENTAL | 62 |
| 8.2.1 | Estabilização da mistura água+argila caulínica utilizando tensoativo Tween 80..... | 62 |
| 8.2.2 | Resultados e discussão da segunda campanha..... | 66 |
| 8.2.2.1 | <i>Influência do número de Froude do escoamento nos parâmetros de onda</i> | <i>72</i> |
| 8.2.3 | Comparação com modelo matemático 1D..... | 74 |
| 8.3 | TERCEIRA CAMPANHA EXPERIMENTAL (ESTABILIZAÇÃO SISTEMÁTICA DO FLUIDO TESTE)..... | 77 |
| 8.3.1 | Estabilização da mistura água+argila caulínica utilizando goma xantana..... | 77 |
| 8.3.2 | Resultados e discussão da terceira campanha | 80 |
| 9 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 83 |
| 10 | PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS..... | 85 |
| | REFERÊNCIAS..... | 87 |
| | APÊNDICE A: ESTUDO DA ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DO FLUIDO TESTE ÁGUA+ARGILA CAULÍNICA+TWEEN80 | 92 |
| | APÊNDICE B: ESTUDO DA ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DO FLUIDO TESTE ÁGUA+ARGILA CAULÍNICA+GOMA XANTANA..... | 97 |
| | APÊNDICE C: CONDIÇÕES FAVORÁVEIS À GERAÇÃO DAS <i>ROLL WAVES</i>..... | 101 |
| | APÊNDICE D: RELAÇÃO ROTAÇÃO-VAZÃO | 103 |

| | |
|--|------------|
| APÊNDICE E: ANÁLISES DAS PROPRIEDADES DAS <i>ROLL WAVES</i> | |
| AFERIDAS | 105 |
| APÊNDICE F: DESENHO COMPUTACIONAL DO APARATO | |
| EXPERIMENTAL | 107 |

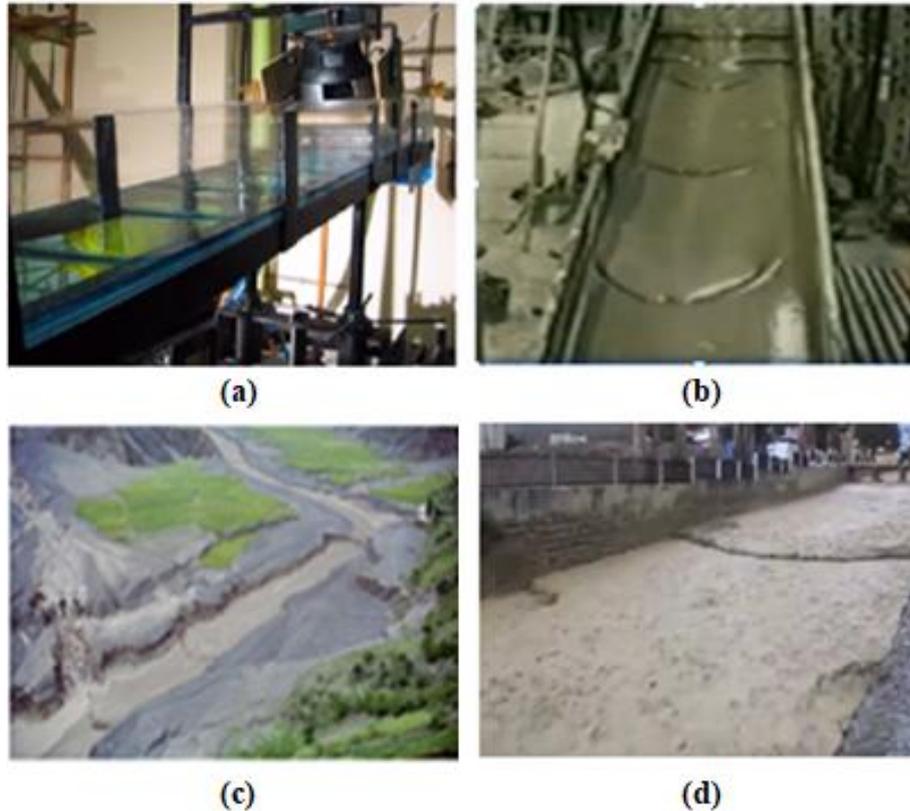
1 INTRODUÇÃO

No Brasil, especialmente na região sudeste registra-se os maiores índices de precipitação, e a cada estação chuvosa, vários eventos catastróficos, como enxurradas, inundações e deslizamentos de terra, ocasionam grande prejuízo social, econômico e ambiental. Movimento de massa como deslizamentos e corridas de lama causam risco eminente de morte a populações que se encontram em áreas mais vulneráveis, e assim, mais favoráveis à ocorrência de eventos extremos. Ademais, fatores topográficos, dinâmicos e característicos da reologia do material em movimento são decisórios na evolução das frentes e, alguns casos, na geração de ondas (*roll waves*) na superfície livre desses deslizamentos e corridas.

Roll waves são ondas de comprimento, amplitude e velocidade bem definidos, que tendem a se propagar sob forma de um trem de ondas e que, ao atingir áreas com pouca infra-estrutura, potencializam os danos, quando não, geram vítimas. Ferreira (2013) salienta que essas instabilidades normalmente ocorrem em superfícies inclinadas favoráveis à sua propagação, podendo ser geradas e desenvolvidas tanto em fluidos de reologia newtoniana, como não newtoniana, em regime pulsado ou naturalmente. Esse fenômeno acontece na tentativa de equilibrar as forças inerciais do fluido, devido à ação da força peso (força de corpo), com as forças viscosas e de atrito, que surgem contrariamente ao escoamento.

Se *roll waves* surgem em escoamentos naturais, figuram também, no âmbito industrial, em gasodutos (AYDIN *et al.*, 2015; GASPARI, 2013) ou até mesmo em artérias humanas devido a oscilações de pressão, conforme estudado por Pedley *et al.*, (1980). Diante de diferentes aplicações, pode-se dizer que o estudo do fenômeno *roll wave* é de largo espectro e de interesse ambiental, industrial e também na área médica. Na Figura 1 podem-se observar ondas do tipo *roll waves* produzidas em condições controladas de laboratório ou na natureza.

Figura 1: Exemplos de surgimento de *roll wave* sem ambiente de laboratório e na natureza. (a) *Roll Waves* com imposição de frequência em glicerina pura; (b) *Roll waves* naturais evoluindo em escoamento lamoso; (c) *Roll waves* em mudflow em Gully Jia na China; (d) *Roll wave* em água, ocorrendo em córrego na Bolívia.



Fonte: (a) Acervo digital-Grupo RMVP; (b) Laboratório ex-Cemagref – Grenoble (1994); (c) Arai (2013), (d) Ponce (2014).

Ainda na nossa memória coletiva, os acidentes da região serrana do Rio de Janeiro (AMPERJ, 2011) e rompimentos de barragens de rejeito, como de Mariana e Brumadinho (Correio 2015 e 2019), alertam a comunidade científica em também investigar tal sorte de acidente. Na Figura 2 pode-se observar, na encosta, domínio propício à formação do fenômeno, assim como sua capacidade de submersão ou engolimento em escoamentos lamosos.

Figura 2: (a) Deslizamento em nova Friburgo (RJ,2011); (b) Escoamento de lama de rejeitos da barragem de Fundão atingindo o distrito de Bento Rodrigues (MG,2015). (c) Megadesastre ocorrido em Brumadinho (MG,2019)



(a)



(b)



(c)

Fonte: (a) Correio (2012); (b) Corpo de Bombeiros / divulgação (2015); (c) Pimentel/AFP (2019).

Se deslizamentos de terra e corridas vêm sendo monitorados e pesquisados, ainda que de forma tímida no país, com ações mitigadoras ainda pouco eficazes, dados de eventuais efeitos causados por *roll waves* são ainda de forte desconhecimento da própria comunidade técnica, sequer tem sido pauta de campanha de monitoramento ou inspeção. De fato, ainda são escassos os dados na literatura, devido à dificuldade em se controlar a formação dessas instabilidades e medi-las, quando de sua geração e propagação na natureza. No entanto, países como Nova Zelândia, China, Suíça, Itália e Áustria confirmam o surgimento de frentes e trens de ondas desse tipo em escoamento detriticos e/ou lamosos (FERREIRA, 2013). Vários registros em bacias de drenagem, como em Acquabona, na Itália, Barcelonnette, no Alpes Franceses (França/Itália), Dawinalpe, na Áustria, essa monitorada pela *University of Natural Resources and Life Science* etc. têm oferecido possibilidade de exploração de dados do fenômeno (BERTI *et al.*, 1999; BERTI *et al.*, 2000; ARAI, 2013).

Dentro desse contexto diversos trabalhos matemáticos e numéricos vêm sendo desenvolvidos, na busca de melhor representar o fenômeno *roll wave* em eventuais casos na natureza (escoamentos naturais). Recentemente, Fiorot *et al.*, 2018, usou o modelo matemático 1D para estimar as propriedades das *roll waves* que ocorreram em Acquabona (BERTI *et al.*, 1998), e obtiveram erros da ordem de 13% com referência a amplitudes de onda medidas no campo. Vale ressaltar que se trata do mesmo modelo matemático 1 D utilizado nessa dissertação de mestrado para comparar os resultados simulados com os experimentais obtidos em laboratório.

É sabido que na vertente experimental, em se tratando de fluidos lamosos e de reologia complexa, ainda são poucos os trabalhos experimentais sobre *roll waves* presentes na literatura (da ordem de 7 trabalhos em 10 anos). Buscando suprir essa lacuna, a proposta em tela propõe medir os principais parâmetros de onda (amplitude, comprimento e velocidade de propagação) em escoamento de natureza lamosa, controlando sistematicamente as propriedades físico-químicas do fluido escoante.

2 OBJETIVO

Visando contribuir no campo experimental do fenômeno, sem perda de vista de sua aplicação em problemas de engenharia, objetiva-se, principalmente, gerar, controlar e medir *roll waves* evoluindo em fluidos lamosos em canal experimental de 10 m de comprimento, usando como sistema de medição transdutores ultrassônicos.

Os objetivos específicos podem ser enumerados da seguinte maneira:

- Implementar melhorias no canal de 10 m e de declividade variável;
- Analisar os efeitos de tensoativo e biopolímero para a estabilização química da mistura de água+argila caulínica utilizada como fluido teste;
- Gerar e medir as amplitudes das *roll waves* em sua forma estável e comparar com modelo numérico 1D.

3 ESTADO DA ARTE DE *ROLL WAVES* NA VERTENTE EXPERIMENTAL

Ondas do tipo *roll wave* foram observadas e registradas pela primeira vez por Cornish (1910), em um longo canal aberto de concreto em Merlingen na Suíça. O autor descreveu essas ondas como longas, de frente bem íngremes e de alto nível energético, mencionando diversos rios e condutos na Europa em que essas ondas estariam aptas a se formar. Em seu livro (*Waves of the Sea and Other Water Waves in 1910*) documenta-se a natureza catastrófica do fenômeno, tal como sua ocorrência em canais artificiais após precipitação intensa.

Brock (1969) inicia suas pesquisas como pioneiro no eixo experimental, sobre a formação de *roll waves* em escoamento turbulento (água) ($F_r = 3,2$ e $Re = 10^4$). O autor utilizou dois canais: um de seção retangular de 39,6 m de comprimento com declividades de 5,2% e 8,5%, e outro canal menor, de 24,4 m de comprimento com inclinação de 1,2%, ambos com largura de 0,1157 m. As medições foram feitas para o canal mais longo com fundo liso, e para o canal mais curto com fundo rugoso (areia com diâmetro médio de 0,6 mm). As profundidades dos escoamentos em regime uniforme se encontravam entre 5 e 8 mm. Para medição de nível, o autor fez o uso de técnica do tipo intrusiva (medidor de pressão). Foram introduzidas na entrada do canal perturbações a determinadas frequências para se obter as *roll waves*. O autor salienta que os perfis das *roll waves* sempre continham três partes essenciais: primeiro, um súbito aumento da profundidade, isto é, surgiam ondas com frentes bem acentuadas; seguido de uma zona contínua onde a profundidade aumentava progressivamente; e por fim, uma zona lentamente decrescente, até chegar a um novo salto hidráulico.

Dentro do eixo experimental temos o significativo trabalho de Liu e Gollub (1994), os autores visualizaram o fenômeno em um plano de 2 m de comprimento por 0,5 m de largura, em inclinações de 4° a 10° . O fluido teste utilizado nos experimentos foi uma mistura de água + glicerina, com concentração de 54% (concentração em massa). Para aquisição de dados, os autores fizeram o uso de técnica não intrusiva (fotoluminescência). Visualizaram a formação de *roll waves* em regime laminar, com perturbação imposta ao escoamento de 1,5 e 3 HZ..

Schonfield (1996) utilizando como fluido de trabalho o silicone analisou como as características de ondas (amplitude, comprimento e celeridade), divergiam ao adicionar material de características distintas no escoamento. O autor salienta que

punderam ser vistas as *roll waves* nitidamente, ele as descreve como ondas de característica pulsantes. Para quantificar as instabilidades, o autor dispôs do uso de métodos ópticos (laser e sensores fotônicos). A configuração experimental do autor consistia em dois canais, o primeiro contendo 2 m de comprimento e 0,60 m de largura, e o segundo era maior, contendo 6 m de comprimento e 0,1 m de largura. A montante do canal havia um compartimento que era preenchido com fluido teste (silicone), ao abrir a comporta, o fluido escoava pelo canal gerando as instabilidades naturalmente.

Ainda no eixo experimental vale citar o trabalho de Coussot (1994), que visualizou a formação natural de *roll waves* (sem dispositivo que perturbasse o escoamento), em um canal de seção retangular contendo 0,60 m de largura, 8 m de comprimento, e declividade variável entre 3 e 27%. O fluido escoante não newtoniano (água+argila), com concentração em volume variando entre 20,5 a 26,5%, apresentou boa adequação ao modelo reológico de Herschel-Bulkley a 3 parâmetros (tensão limite de escoamento, índice de consistência e índice de escoamento). A configuração do experimento consistia em um sistema de recirculação, que mantinha o fluido em escoamento. Mesmo não havendo frequências de perturbação sobre o escoamento base, o autor observou pequenas ondas que se formavam a montante do canal sobre a superfície livre, e que iam se estabilizando ao se desenvolverem para jusante. Ainda que o autor não tivesse medido aquelas ondas, este deixou importantes contribuições quanto ao critério de formação de *roll wave*, determinando uma condição mínima de existência do fenômeno baseado no número de Froude ($Fr > Fr_{\min}$). Seguindo essa análise teórica, o autor pôde observar que abaixo do número de Froude mínimo (Fr_{\min}) não ocorreria o surgimento de onda.

Forterre e Pouliquen (2003) visualizaram a formação de *roll waves* em escoamento que apresentam reologia complexa (grânulos de areia e vidro). O aparato experimental utilizado pelos autores consistia em um plano de declividade variável com fundo de vidro, contendo 2 m de comprimento e 0,35 m de largura. Uma comporta fixada a montante ficava responsável em manter o fluxo constante. Para visualização do fenômeno foi emitido uma perturbação na superfície livre (um fino jato de ar), este gerado por 3 alto falantes embutidos em um bocal bidimensional (montado a 30 cm da saída da comporta). A frequência e amplitude dessa perturbação eram controladas a partir de um gerador de função de baixa frequência.

A deformação da superfície livre proporcionada pelo jato de ar era da ordem de 0,25 mm e as frequências impostas variavam entre 1 a 20 Hz. Para medir com precisão as ondas geradas, os autores fizeram o uso de técnica não intrusiva (absorção luminosa), alinhado por fotodetectores separados entre si (60 cm). As ondas surgiam a montante do plano (com número de Fr acima de 0,57 e $\theta = 24^\circ$) com deformações bidimensionais e, rapidamente, ao longo do plano, se amplificavam transformando em frentes rápidas como um “trem de ondas”. O comprimento entre dois “saltos hidráulicos móveis” era da ordem de 20 cm, comprimento muito grande quando se comparado com a profundidade do escoamento (cerca de 5 mm).

Em situação similar, buscando sempre evitar e/ou mitigar desastres provocados por fluxo de detritos (*debris flow*), temos o trabalho de Armanini e Recchia (2006), que visualizaram a formação natural de *roll waves*, em fluido não newtoniano (água+material granular). Os experimentos foram realizados em um canal de 12 m de comprimento e 0.20 m de largura; antes de iniciar os testes, uma camada de 0,10 m de espessura de material granular fora assentada no canal, visando relacionar os mecanismos de transporte de sedimentos e a propagação de ondas na superfície. Para aquisição de dados, os autores fizeram uso de técnicas ópticas e mediram amplitude, comprimento e celeridade de onda, obtendo melhores resultados para as vazões de 1,13 e 1,43 l/s, com os respectivos números de Froude (F_r) de 2,42 e 2,91.

Dentro do grupo RMVP¹, utilizando fluido newtoniano altamente viscoso (glicerina pura), temos o trabalho de Fiorot (2012), que desenvolveu um aparato experimental para a geração, de forma controlada, do fenômeno *roll waves*. O aparato consiste em um canal de declividade variável contendo 3 m de comprimento, 0,30 m de largura, fixado sobre uma mesa inercial (livre de vibrações externas), dotado de sistema de perturbação localizado a montante do canal, cuja função é emitir uma lâmina de ar de forma controlada, a fim de gerar as perturbações sobre o escoamento base. Para detectar o nível da lâmina presente no escoamento, foi acoplado um sistema de aquisição computadorizado e um sistema de medição, composto por fotodetectores alinhados com um diodo-laser (técnica não intrusiva). O procedimento experimental adotado pelo autor foi fixar a

¹ Reologia de Materiais Viscosos e Viscoplasticos

inclinação em 8° (domínio onde se pôde observar a propagação de instabilidades, qual seja, $Fr > 1/\sqrt{3}$). A vazão foi mantida em 0,75 l/s, $F_r = 0,83$, com frequência de perturbação constante de 3 Hz. Esse processo se repetiu para as vazões de 0,96 l/s, $F_r = 0,92$ e 1,14 l/s, $F_r = 0,98$, respectivamente.

Conforme o doutoramento de Cunha (2013), que fazendo o uso do mesmo aparato experimental proposto por Fiorot (2012), visualizou-se a formação de onda em fluido não newtoniano (gel de Carbopol 960). Para medição de nível, o autor fez o uso dos métodos ópticos (absorção luminosa) e ultrassônico (modo pulso-eco). Maciel *et al.*, (2018), ao comparar os dois métodos de medição (ultrassom e laser), para o mesmo fenômeno, concluiu que ambos apresentam boa performance, mediante complexidade do fenômeno e presença de frentes íngremes (ondas em formato de “dentes de serra”). Os erros experimentais, com ambas as técnicas, ficaram limitados em 8,15%, conforme o denso trabalho de Cunha (2018).

Ainda se tratando de aferições de *roll wave*, temos o trabalho de Tamburrino e Ihle (2013), onde os autores visualizaram o surgimento de onda em regime laminar de fluido binghamiano (mistura água + argila bentonita) nas concentrações de 4, 6, 8 e 10%. A configuração experimental consiste em um plano de declividade variável indo de 11° a 33° , contendo 2 m de comprimento por 1 m de largura. A evolução da superfície foi medida usando dois feixes de laser (técnica não intrusiva), o primeiro alinhado com a coordenada central descendente (paralela à componente principal do campo de velocidade) e, o segundo para a direção do fluxo principal. A linha de laser no segundo caso foi colocada 27,5 cm a montante do plano inclinado. As ondas geradas foram registradas por uma câmera FOR-A UFC 300 CCD de 512x512 pixels.

Arai (2013) realizou uma modelagem matemática/experimental do fenômeno *roll waves* em escoamento detrítico. O material utilizado nos experimentos era composto de partículas de carvão, matéria não coesiva, com granulometria média de 0,50 mm e massa específica de 1410 kg/m^3 (semelhante aos escoamentos lamosos). O aparato experimental utilizado pelo autor consiste em uma rampa de declividade variável podendo inclinar até 5° , com 28 m de comprimento e 0,1m de largura. Neste estudo foi possível visualizar ondas entre as inclinações de $0,5^\circ$ até 3° , com vazão no canal entre 1,63 até 2,95 l/s e profundidade de escoamento de 1,5 até 4 cm. Além da abordagem matemática e experimental o autor traz em seus

trabalhos eventuais dados/casos do surgimento de *roll waves* em escoamentos detríticos na natureza, fornecidos pelo *Institute of Mountain Risk Engineering*, localizado na bacia de Dawinalpe no Rio Senna em Viena na Áustria.

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

Zhao *et al.*, (2015) visualizaram a formação natural de onda em fluidos não newtoniano (água+solo peneirado) em um canal contendo 8 m de comprimento e 0,50 m de largura, com fundo de acrílico. Os autores investigaram os efeitos da sedimentação granular que devido à influência das *roll waves*, provocavam erosões no fundo do canal. Os experimentos foram realizados para inclinação fixa em 9° (inclinação comum nos declives da China), variou-se a vazão de 1 a 3 l/s, e obtiveram profundidade de escoamento máxima de 5,32 mm. Para medição da superfície livre, os autores fizeram o uso de técnicas do tipo não intrusivas (sonda de nível digital, SX40-A).

Recentemente Miao *et al.*, (2017) visualizaram a propagação natural de *roll waves* em fluido newtoniano (água), em regime turbulento. Os experimentos foram realizados em um canal com laterais e fundo de vidro, contendo 11 m de comprimento e 0,5 m de largura. Os autores trabalharam com vazões específicas (unitárias) entre 0,167 a 0,530 l/s/m, e inclinação fixada em 3° . Para medição de nível no canal, foram utilizados 2 sensores ultrassônicos de 15 ms (tempo que o sensor pudesse captar a mudança do nível do escoamento provocado pela frente de onda). Os principais parâmetros de onda tais como velocidade de propagação, comprimento e amplitude foram obtidas experimentalmente, porém os autores fazem uma análise do aparato experimental, e não das características de onda, propriamente ditas.

4 CONSIDERAÇÕES GERAIS

4.1 REOLOGIA

O estudo da reologia empregado no âmbito da pesquisa sobre catástrofes naturais tem ganhando bastante aplicabilidade, dado que as propriedades reológicas dos fluidos constituem, junto à dinâmica do escoamento, um fator decisório na geração de instabilidade. O grupo de pesquisa tem empregado esforços na caracterização reológica de fluidos presentes em eventos do tipo rompimento de barragens e movimento de massa (MINUSSI, 2007; SANTOS, 2003; FIOROT, 2012; CUNHA, 2013; FERREIRA *et al.*, 2018).

Durante esses eventos é comum observar que o fluido escoante apresenta características plásticas de elevada viscosidade, comportamento esse que motiva o uso da reologia, para determinação de valores dos parâmetros de concepção tais como: tensão e deformação e modelo reológico do fluido escoante.

Bingham (1929) sendo o pioneiro neste conceito definiu a reologia como a ciência que analisa o comportamento de um material, quando o mesmo é submetido à aplicação de uma tensão cisalhante em um determinado período de tempo, o que significa dizer, que a reologia descreve a deformação de um corpo sob a influência de tensões. Corpos, neste contexto, podem ser sólidos, líquidos ou gases.

Em sólidos e líquidos perfeitos² (isotrópicos), a deformação independe da direção de aplicação da solicitação mecânica e a relação entre a tensão aplicada e a deformação resultante é aparentemente simples. No caso dos sólidos elásticos, Hooke propôs em 1976, que estes materiais deformam-se proporcionalmente à carga aplicada. Newton, por sua vez, definiu o comportamento dos líquidos perfeitos, estabelecendo que sua deformação total seja proporcional tanto ao esforço mecânico (tensão) como também ao tempo durante o qual essa solicitação é aplicada.

Entretanto, a maioria dos materiais de interesse tecnológico apresenta propriedades reológicas intermediárias entre “sólidos ideais” e os “líquidos ideais”, e de maior complexidade (OLIVEIRA *et al.*, 2000). Assim a reologia se refere, especialmente, ao comportamento da matéria que não pode ser descrito pelos

² Newtoniano

modelos lineares simples (Hooke e Newton). Alguns desses “desvios” de comportamento são devidos à presença de partículas coloidais no fluido e consequente influência de suas propriedades de superfície.

Mello (2014) salienta que caracterização reológica de movimentos de massa como corridas de lama é complexa por dois motivos cruciais, sendo o primeiro que os solos durante a movimentação de massa passam do estado sólido, com comportamento elástico, para um estado fluido, e durante esse processo o comportamento reológico apresenta grandes alterações. Outro motivo é que o solo é um material constituído por faixas granulométricas, que interagem entre si e podem ser constantemente modificados durante o escoamento.

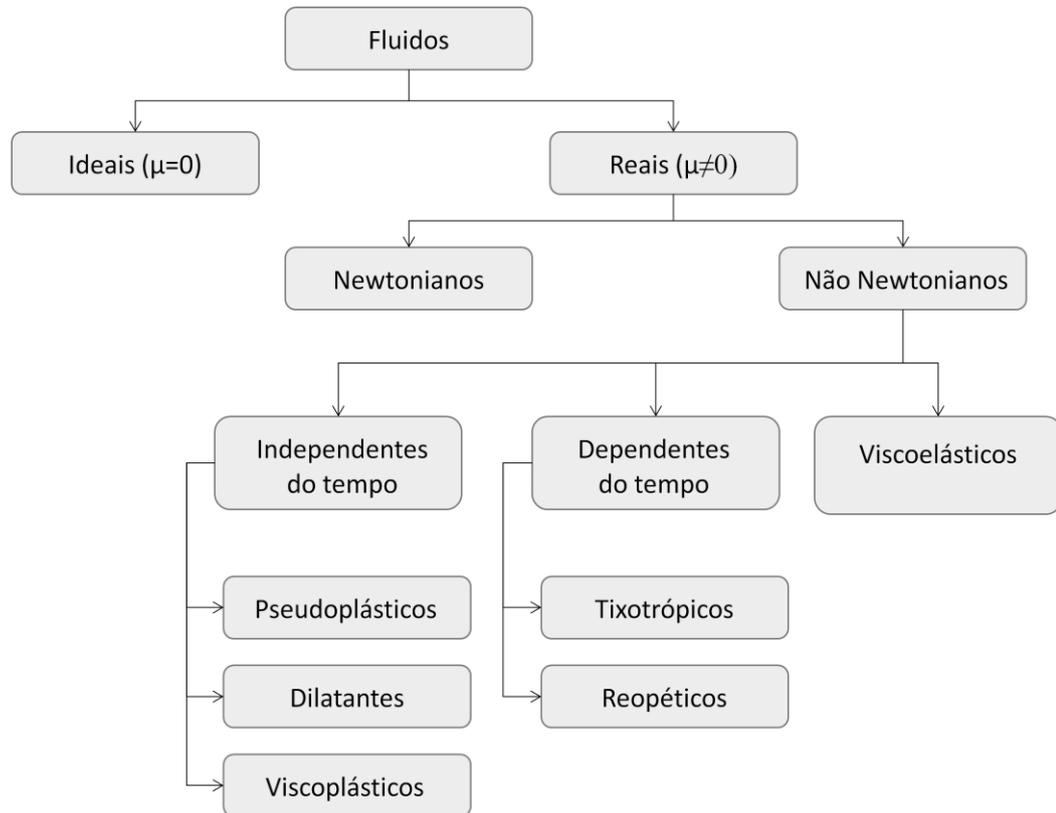
Independente do grau de complexidade envolvido, o comportamento reológico dos materiais é usualmente descrito através de relações matemáticas entre a tensão aplicada e sua respectiva deformação ou fluxo, além de suas variações em relação ao tempo. Tais relações, conhecidas como “equações de estado reológico”, tornam-se cada vez mais abrangentes e complexas à medida que os componentes se desviam da idealidade (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

De um modo geral, a reologia, como ciência, estuda as correlações entre tensões e deformações, abordam o comportamento de fluidos homogêneos, dentre os quais se destacam os líquidos, suspensões de partículas e emulsões. O comportamento dos sólidos, por outro lado, é normalmente abordado nos campos do conhecimento relacionados com a resistência dos materiais.

4.1.1 Classificação dos modelos reológicos

Os fluidos em geral são classificados em newtonianos e não-newtonianos, sendo os não-newtonianos divididos em três categorias: independentes do tempo, dependentes do tempo, viscoelásticos, como demonstrado na Figura (3).

Figura 3: Esquema de classificação dos fluidos segundo comportamento reológico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2 Fluidos Newtonianos

O modelo reológico mais simples que se tem é o do fluido Newtoniano, em que a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de deformação. Desta forma, sua representação gráfica é linear. Devido ao fato da curva de fluxo ser uma reta, a razão de todos os pares de valores de tensão e taxa de deformação pertencente a essa reta é constante. Isso significa que a viscosidade não é afetada ao longo dessa reta, em outras palavras a viscosidade não sofre variações por mudanças na taxa de deformação.

Devido à essa relação constante, a viscosidade é denominada como absoluta para esse tipo característico de fluido. Os exemplos mais comuns de fluidos Newtonianos são a água, o ar, as soluções salinas, a glicerina, óleo mineral, etc.

Ferreira (2007) salienta que, o que determina se um fluido apresenta características Newtonianas ou não é a concentração de sólidos, sendo essa concentração baixa, o fluido tende a apresentar características newtonianas, já com o

aumento dessas concentrações pode ocorrer aumento da viscosidade, assim distanciando mais do modelo newtoniano. O modelo matemático para fluidos Newtoniano é apresentado pela equação 1.

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1)$$

Em que: τ : Tensão de cisalhamento [Pa]

μ : Viscosidade dinâmica ou absoluta [Pa.s]

$\frac{\partial u}{\partial y}$: Gradiente de velocidade ou taxa de deformação [s^{-1}].

4.1.3 Fluidos não-newtonianos

São aqueles cuja viscosidade varia com o grau da taxa de deformação aplicada, assim como a duração da mesma, quando dependentes do tempo. Esse tipo peculiar de fluido não apresenta relação única entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação.

Nestes fluidos, a viscosidade depende de vários outros fatores, como: estrutura da substância, forma de preparo, tempo de repouso, entre outras características que proporcionam a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação não serem constantes (LAHOUD; CAMPOS, 2009).

Os não newtonianos podem ser divididos em diferentes grupos: dependentes do tempo (tixotrópicos, reopéticos) ou não dependentes (pseudoplásticos, dilatante e viscoplásticos), e os viscoelásticos.

Diversos modelos foram propostos para descrever as relações entre a tensão de cisalhamento com a taxa de deformação.

A equação de estado reológico mais utilizado para descrever o comportamento pseudoplástico e dilatante das suspensões foi proposta por Ostwald (1925), o autor constatou ao examinar determinados fluidos, que estes exibiam comportamentos diferentes dos previstos por Newton. O fluido observado por Ostwald apresentava uma relação entre tensão de cisalhamento versus taxa de deformação não linear, podendo ser adequadamente representado pelo modelo exponencial.

Os fluidos que obedecem este modelo são conhecidos como fluidos da Lei das Potências (*Power Law*). Desta forma Ostwald propôs um modelo que pode ser descrito matematicamente pela equação 2.

$$\tau = \mu_n \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n \quad (2)$$

O parâmetro n representa o índice de escoamento do fluido, este parâmetro que proporciona o quanto o modelo se distancia do newtoniano. Para $n < 1$ tem-se um fluido pseudoplástico e para $n > 1$ um fluido dilatante.

Como mostra o reograma (Fig.4) a curva típica de um fluido pseudoplástico indica que a viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa e/ou da tensão de cisalhamento. Essa característica peculiar é compreendida pelo fato de que, quando uma tensão é exercida sobre o fluido as moléculas tendem a se orientar no sentido da força aplicada, assim seguindo uma proporcionalidade, quanto maior for essa força, maior será a ordenação das moléculas, conseqüentemente, menor será a viscosidade.

Scharamm (2006) salienta que para uma grande gama de fluidos pseudoplásticos o efeito do cisalhamento é reversível, depois de certo tempo, os fluidos pseudoplásticos recuperam sua viscosidade original isso quando o cisalhamento é reduzido ou interrompido. O mesmo autor ressalta que as cadeias moleculares retornam ao seu estado natural (desordenadas), e as moléculas se reagrupam devido ao movimento Browniano³.

Seguindo um conceito inverso dos pseudoplásticos, os fluidos que apresentam comportamento dilatante têm como principal característica o acréscimo da viscosidade aparente à medida que se eleva a taxa e/ou a tensão de cisalhamento aplicada. Veja representação gráfica no reograma (Fig.4).

Este comportamento é característico de fluidos altamente concentrados, onde as partículas encontram-se muito bem empacotadas e bastantes próximas umas das outras. Sendo assim, o líquido intersticial responsável por reduzir o atrito entre as partículas, perde sua funcionalidade, possibilitando as partículas atritarem um às

³O movimento Browniano é um fenômeno pelo qual partículas pequenas suspensas em um fluido tendem a se mover em caminhos pseudoaleatório através do fluido, mesmo se o fluido em questão estiver em repouso.

outras, o que resulta em um aumento da viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento.

Existem fluidos que se comportam como um sólido até que uma tensão mínima seja exercida para que o mesmo escoe. Esses tipos de fluidos são dispersões que em repouso podem formar uma rede intermolecular mantida por forças ligantes (forças polares, ligações de Van der Waals, etc.). Somente quando as forças externas são fortes o suficiente para superar as forças de ligação, é que a matéria irá escoar (SCHRAMM, 2006)

Um fluido que apresenta tais características é o fluido denominado na literatura de bingamiano, o qual, depois de vencida uma tensão crítica de escoamento, mantém uma relação linear entre tensão de cisalhamento e de taxa de deformação, como representado no reograma (Fig.4). A expressão matemática para fluidos Bingamianos é descrita pela equação 3.

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_c + \mu_B \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \tau > \tau_c \\ \frac{\partial u}{\partial y} &= 0, \quad \tau < \tau_c \end{aligned} \quad (3)$$

Em que: τ_c : Tensão limite de escoamento ou rigidez inicial [Pa];

μ_B : Viscosidade plástica [Pa.s].

Vários outros modelos têm sido propostos para representar diferentes tipos de comportamento do escoamento, como o modelo de Herschel e Bulkley (1926). Também chamado de Bingham generalizado, esse modelo descreve o comportamento de um fluido que necessita de uma tensão inicial (τ_c) para começar escoar e apresenta uma relação não linear entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação.

O modelo reológico de Herschel-Bulkley é considerado o mais completo em comparação com os demais, uma vez que sua equação engloba três parâmetros. O modelo representado na equação 4.

$$\tau = \tau_c + k_n \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n, \tau > \tau_c \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0, \tau < \tau_c.$$

Em que: τ_c : Tensão limite de escoamento ou rigidez inicial [Pa];

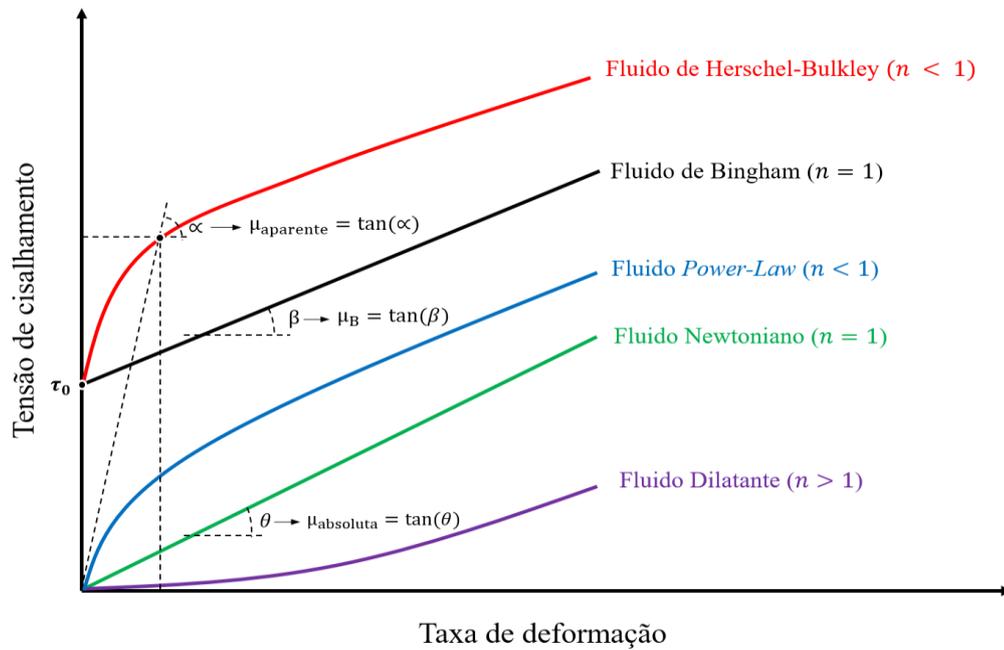
k_n : Índice de consistência [Pa.sⁿ];

n : Índice de escoamento

Tendo como base ensaios reológicos, diversos pesquisadores determinaram que as lamas encontradas nas corridas, em rompimentos de barragens de rejeito, ainda que constituídos de material extremamente variado, indo de materiais densos e muitos viscosos a fluidos não tão consistentes assim como as águas barrentas, são fluidos de reologia não newtoniana que se ajustam bem ao modelo reológico de Herschel Bulkley (COSSOUT *et al.*, 1993, 1998; COSSOUT; PIAU, 1994; COSSOUT; BOYER, 1995). Coussot (1994) e Maciel (2009) salientam que a presença de grãos na fase sólida do sistema, mesmo em quantidade reduzida (concentração entre 3% a 5% em volume), aumenta muito a viscosidade, e quanto maior a concentração de sólidos, mais o comportamento reológico se desvia do modelo newtoniano

Ferreira (2007) descreve que a modelagem de um escoamento necessita da escolha de um modelo reológico apropriado ao tipo de fluido que será estudado. A Figura (4) mostra a representação gráfica das curvas típicas de tensão *versus* taxa de deformação para os modelos reológicos supracitados.

Figura 4: Reograma de diferentes tipos de fluidos.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.2 CRITÉRIOS DE FORMAÇÃO DE *ROLL WAVE*

Os critérios estabelecidos para formação de onda estão relacionados à dinâmica do escoamento e à natureza reológica do fluido escoante. No tocante à dinâmica do escoamento, o parâmetro adimensional essencial para condição de geração de instabilidades, em canais abertos, é descrito pelo número de Froude (Fr), sendo um parâmetro associado com os efeitos de inércia e gravitacionais. Essa condição necessária para geração de onda foi proposta primeiramente por Jeffreys (1925), que a partir da análise de estabilidade linear das equações de águas rasas, determinou um critério de geração de *roll wave*, mostrando que as ondas são geradas para um número de Froude superior a 2 ($Fr > 2$).

Trabalhos subsequentes, em reologia não newtoniana, foram redefinido o critério de geração (NG; MEI, 1994; LIU; MEI, 1994; COSSOUT, 1994; MACIEL 2001). O mais recente trabalho que se tem notícia na literatura é o de Toniati (2018) que estabeleceu critério de geração de *roll waves* em escoamento laminar de fluido de Herschel Bulkley, evoluindo em fluido poroso. Das correlações de Toniati (2018), em considerando porosidade nula no fundo ($\gamma = 0$), tem-se o domínio definido para o

surgimento de *roll wave* para as condições experimentais utilizadas nessa dissertação, conforme as equações 5, 6 e 7.

$$Fr > Fr_{min} = \frac{\vartheta}{\sqrt{\varphi^2 - 2\alpha\varphi\vartheta + \alpha\vartheta^2}} \quad (5)$$

$$\vartheta(n, C^*) = n(1 - C^*) \quad (6)$$

$$\varphi(n, C^*) = \frac{(n + 1)(2n + 1)}{(n + 1 + nC^*)} \quad (7)$$

Em que: $Fr = \bar{u}_0 / \sqrt{gh_o \cos\theta}$ o número de Froude do escoamento, \bar{u}_0 a velocidade média do escoamento em regime uniforme (calculada pela equação 8), g aceleração da gravidade, h_o a profundidade do escoamento uniforme e θ inclinação do canal. Já o Fr_{min} é função de ϑ , φ e α , sendo ϑ e φ função de (n e C^*), onde C^* é um adimensional dado por $C^* = \tau_c / (h_o \rho g \sin(\theta))$, sendo (τ_c) a tensão limite de escoamento, n o índice de escoamento do fluido, ρ a massa específica do fluido e α o coeficiente de distribuição de velocidade calculado pela equação 9.

$$\bar{u}_0 = \frac{n}{n + 1} \left(\frac{\rho g \sin(\theta) z_0^{(n+1)}}{k_n} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{n + 1 + nC^*}{2n + 1} \right) \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{(2n + 1)}{(3n + 2)} \frac{[2(n + 1)^2 h + C^*(4n + 3)n]}{[(n + 1)^2 h + 2(n + 1)nC^* + n^2(C^*)^2]} \quad (9)$$

Em que z_0 é a profundidade do escoamento na região cisalhada calculada pela equação 10.

$$z_0 = h_o - \frac{\tau_c}{\rho g \sin(\theta)} \quad (10)$$

Pode-se também calcular a velocidade média pela equação 11 a partir da velocidade superficial (u_s) do escoamento em regime uniforme, essa aferida experimentalmente com erros da ordem de 15% (levando em consideração a

precisão dos instrumentos utilizados e erro do operador) conforme Ferreira *et al.*, (2018). Ademais a equação 11 se torna mais apropriada em relação à equação 8, devido à eliminação do parâmetro índice de consistência (k_n), onde o mesmo é obtido experimentalmente por meio de ensaios reológicos, que traz incerteza na medida.

$$\bar{u}_0 = u_s \left(\frac{2n + 1}{n + 1 + nC^*} \right) \quad (11)$$

Outra condição também estabelecida a partir de análise de estabilidade linear espacial foi desenvolvida por (Ferreira *et al.*, 2014) que junto a do $F_r > F_{rmin}$ constituem condições necessárias e suficientes para a geração do fenômeno. A condição de Ferreira (2014) estabelece um domínio de frequências de perturbação para geração e propagação de *roll waves* (Equações 12 e 13).

$$f < f_c = \frac{|\omega_c| \bar{u}}{2\pi h_o} \quad (12)$$

$$\omega_c = \frac{1}{2\alpha} \sqrt{\left(\alpha - \frac{1}{Fr^2} \right) \vartheta^2 - 2\alpha\vartheta\varphi} \quad (13)$$

As perturbações que geram *roll waves* (forçadas) podem ser impostas e controladas, o que tem sido feito experimentalmente (Fiorot *et al.*, (2013); Maciel *et al.*, (2017); Miao *et al.*, (2017) Ferreira *et al.*, (2018)), ou pode ocorrer naturalmente, neste caso, essas ondas são denominadas de *roll wave* naturais (sem perturbação imposta por algum dispositivo externo).

Como já citado, as *roll waves* naturais ou forçadas podem surgir nas corridas de lamelas após deslizamentos, corridas, ruptura de barragem e em tubos fechados, como em padrões de escoamento bifásico (efeito de golfadas), entre outros. No tocante às *roll waves* naturais, não se diz haver uma frequência dominante sobre o escoamento, mas deve haver certamente uma banda de frequência aleatórias agindo. Cabe salientar a carência de resultados de *roll waves* mesmo produzidas em condições de laboratório, sobretudo as *roll waves* naturais de padrão aleatório.

4.3 DESCRIÇÃO DO FLUIDO TESTE UTILIZADO NO TRABALHO

O tema *roll wave* com enfoque em desastres e catástrofes naturais tem sido explorado, no Brasil, pelo grupo RMVP (FIOROT, 2012; CUNHA, 2013; MACIEL *et al.*, 2017; MACIEL *et al.*, 2018). Todos esses trabalhos utilizaram como fluido teste o gel de Carbopol 960, como melhor representação reológica de materiais lamosos. Com intuito de caracterizar melhor o fenômeno *roll wave* em condições próximas à realidade, efetuou-se, para esta dissertação, a mistura de água+argila caulínica como fluido teste. Os mecanismos de dispersão e características físico-químicas do argilo-mineral propriamente dito serão descritos nos itens 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3.

4.3.1 Argilominerais

Entende-se por argila como termo petrográfico para designar uma rocha, e também como um termo para designar uma faixa de dimensões de partículas na análise mecânica de rochas sedimentares e solos (SANTOS, 1992). O mesmo autor salienta que todas as argilas são constituídas essencialmente por partículas cristalinas extremamente pequenas de um número restrito de minerais conhecidos como argilominerais.

Uma argila qualquer pode ser composta por partículas de um argilomeneral ou por uma mistura de diversos argilominerais. Quimicamente, os argilominerais são compostos por silicatos hidratados de alumínio e ferro e outros elementos em baixo teor. As argilas de uma maneira geral são materiais de textura terrosa e de baixa granulometria, que desenvolve certa plasticidade quando disperso em meio aquoso, formando sistemas coloidais.

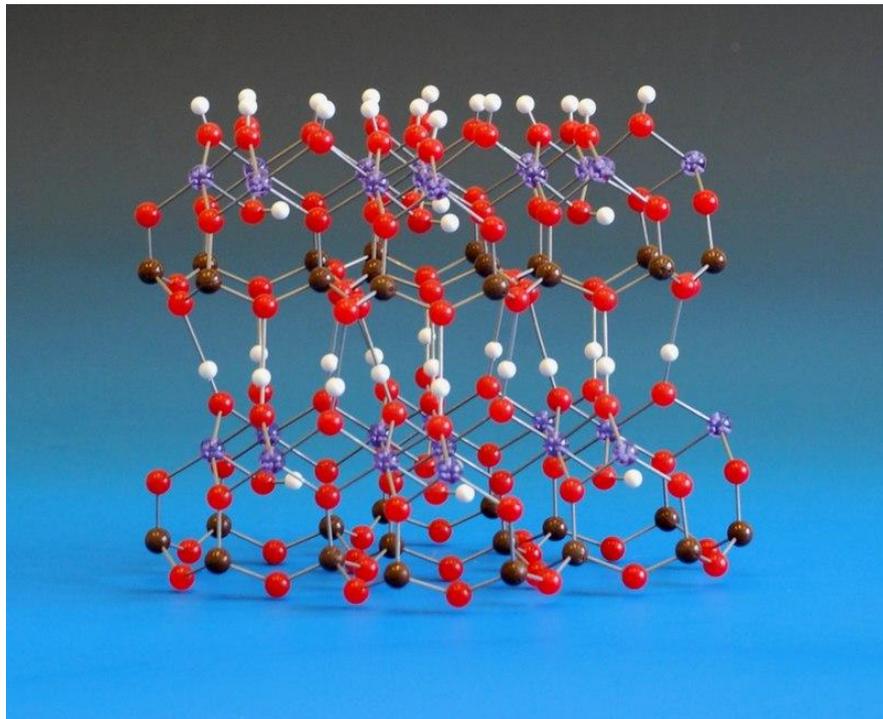
Análises químicas de argilas mostram que são constituídas essencialmente por silício, alumínio, e, frequentemente, por quantidades apreciáveis de ferro e de metais alcalinos e alcalino-terrosos (SANTOS,1992). Shiroma (2012) salienta que esse minério pode ser chamado de colóides por poderem ser dispersas em fluido, formando “dispersões ou soluções coloidais⁴”. A viscosidade desse sistema disperso é apreciavelmente influenciada pelas partículas anisométricas (tamanho desigual) que compõem esse tipo de sistema.

⁴Cada partícula coloidal é composta por 10^3 até 10^9 átomos, sendo que, esses átomos podem formar partículas esféricas anisométricas, fibras (como celulose) ou placas (como a maioria dos argilo-minerais).

4.3.1.1 Caulinita

O argilomineral caulinita é um silício-aluminato com estruturas em camadas (ou lamelar), formado pelo empilhamento regular de camadas constituídas por uma folha de tetraedros de óxido de silício (SiO_4), ordenados em forma hexagonal, e uma folha de octaedros de hidróxido de alumínio ($\text{Al}_2(\text{OH})_6$) ligadas entre si por oxigênios em comuns (MENEZES *et al.*, 2014). A Figura 5 ilustra as folhas de tetraedros e octaedros dentro da camada de caulinita

Figura 5: Estrutura da camada 1:1 da caulinita, com uma folha de tetraedros de SiO_4 e outra de octaedros de $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$.



Fonte: Whittaker(2019).

Esse material sedimentar apresenta granulometria muito fina (mais 70% de partículas da ordem de $2\ \mu\text{m}$) e sua cor pode variar entre branca, creme, cinza e preto. Comumente é acompanhado de matéria orgânica (colóide protetor e ligante entre lamelas), fator imprescindível para o aumento da plasticidade (SENNA, 2003).

A caulinita é proveniente de solo que se formou, por alteração, em climas quentes e úmidos, apresentando baixos valores de limite de liquidez e plasticidade,

tendo massa específica (seca) variando entre 2,60 g/cm³ e 2,68 g/cm³ (SANTOS 2003).

É sabido que esse tipo de argila apresenta, em sua composição, grande teor de óxido de alumínio (da ordem 31%) que é tido um material liofóbico⁵, assim ao adicioná-lo à água em forma de pó, as partículas se atraem mutuamente, resultando em uma suspensão floculada (BURITI *et al.*, 2018). Essa suspensão floculada muda por completo a reologia das soluções argilosas acarretando efeitos indesejados, um deles a diminuição da viscosidade, entre outros parâmetros reológicos.

No tocante à geração do fenômeno *roll wave*, o efeito da floculação torna-se um sério problema, pois o sistema água+argila caulinita nesse estado caminha para desordem de um ponto de vista químico. Sendo assim, o fluido nessa condição apresenta uma solução de duas fases (água suspensa com argilo mineral decantado no fundo), perdendo as características plásticas da mistura, propiciando a um escoamento em regime mais turbulento.

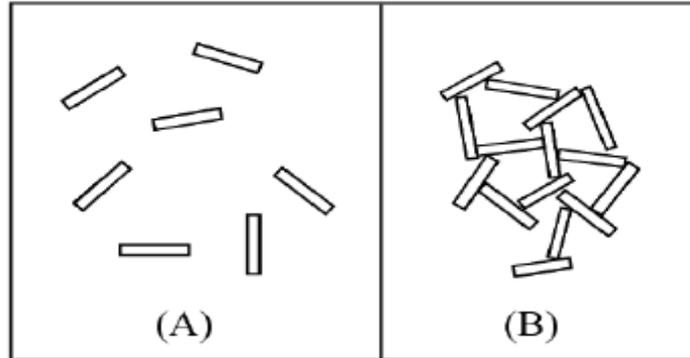
4.3.2 Floculação x Defloculação

Segundo Buriti (2018), a floculação consiste na formação de aglomerados de partículas individuais devido à força de atração (Van der Waals), sendo produzida pela neutralização de cargas negativas das partículas de argilomineral.

A defloculação, por outro lado, é um estado de dispersão de um sólido em um líquido, na qual, a partícula sólida se mantém geometricamente independente e não associada às partículas adjacentes (SHIROMA, 2012). As partículas de argilomineral podem se apresentar em quatro estados diferentes, sendo os mais comuns: (A) disperso-defloculado e (B) disperso-floculado, conforme a Figura (6)

⁵ Material que possui baixa energia de interação com a água.

Figura 6: Arranjo de partícula argilo mineral: (A) disperso-defloculado; (B) Disperso-floculado



Fonte: Mello (2014).

No estado disperso-defloculado (A), as partículas do argilomineral aparecem em dispersão (não aglomeradas), isso acontece, pois as forças de atração entre as partículas são mínimas, em consequência há um aumento da área superficial, resultando no aumento da viscosidade plástica. Apresentando características inversas, no estado disperso-floculado (B) há uma redução da área superficial, uma vez que as partículas do argilomineral exibem forças atrativas mais fortes, possibilitando se aglomerar, resultando então, na diminuição da viscosidade plástica (SHIROMA, 2012).

Misturas de água+argila caulínica inicialmente aparentam estar no estado disperso-floculado, e com o tempo (24 h) de repouso, as partículas se aglomeram e se sedimentam, apresentando comportamento disperso-floculado. Esse efeito como supracitado resulta na diminuição da viscosidade e conseqüentemente das boas propriedades plásticas (tensão crítica, índice de consistência), que para o estudo em tela, é um fator crítico para formação de onda. Uma maneira alternativa de corrigir esse efeito indesejado é adição de surfactantes na mistura (Tween 80), ou adição de biopolímero (goma xantana), que funcionam como estabilizantes da mistura argilosa. No capítulo 7 nas seções 1 e 2 será abordado o emprego desses estabilizantes na mistura argilosa.

5 ESTABILIZANTES QUÍMICOS

5.1 GOMA XANTANA

A Goma Xantana ($C_{35}H_{49}O_{29}$) é um polissacarídeo⁶ obtido naturalmente pela fermentação da bactéria *Xanthomonas Campestris*, que sintetiza a goma para evitar sua desidratação. O seu uso abrange diversos seguimentos sendo comumente utilizada como aditivo na indústria farmacêutica e alimentícia como estabilizante, espessante e emulsificante. Sendo também aplicada a inúmeros produtos em diferentes segmentos, cosméticos (Zague, 2007), e petroquímicos (BRANDÃO, 2012, SENA; FARIAS, 2015; SOUZA *et al.*, 2017).

O interesse do uso da goma deve-se às suas propriedades físico químicas, que superam todas as dos outros polissacarídeos disponíveis no mercado (goma guar, alginato de sódio, carboximetilcelulose). Dentre estas propriedades destacam-se a sua elevada viscosidade em baixas concentrações, bem como sua estabilidade em ampla faixa de temperatura (10 a 90 °C) e de pH (pH < 11 e < 25), (GARCÍA-OCHOA *et al.*, 2000).

Como supracitado o uso do biopolímero goma xantana tem se destacado na indústria do petróleo, servindo como aditivo para estabilidade química em fluidos de perfuração a base de argila. A título de exemplo temos o significativo trabalho de Souza *et al.*, 2017, que partindo de uma concentração inicial (em massa) de 0,5% de goma xantana, obteve a estabilidade química da mistura água+argila do tipo bentonita. Nessa mesma linha outro trabalho em destaque temos a tese de doutorado de Brandão (2012), que a partir da fermentação da glicerina residual do biodiesel, obteve a goma xantana com as características idênticas das obtidas pela fermentação da bactéria *Xanthomonas Campestris*. Análises reológicas realizados pelo autor mostraram que a mistura água+goma xantana+argila apresentou resultados de leituras reológicas (força gel, viscosidade aparente, viscosidade plástica) bastante promissores para o uso como estabilizante químico em fluidos de perfuração.

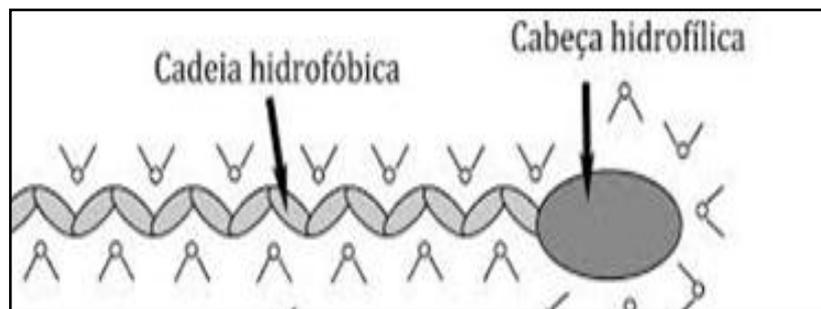
⁶ Carbohidratos composto por grande quantidade de moléculas de monossacarídeos

Seguindo esse contexto inspirado no trabalho de Souza *et al.*, (2017) essa dissertação de mestrado irá abordar o uso do biopolímero goma xantana como estabilizante químico para o fluido teste (água+argila caulínica), na geração de *roll waves* em sua forma estável.

5.2 TWEEN 80

O tensoativo Tween 80 é um surfactante referente a uma classe de compostos anfifílicos, devido à presença de grupos apolares (hidrofóbicos) e grupos polares (hidrofílicos) em uma mesma molécula, como mostradas na Figura 7.

Figura 7: Representação esquemática de uma molécula de tensoativo



Fonte: Galgano(2012).

Com essas características os tensoativo são substâncias muito importantes no ramo da química. Isso é devido à sua característica de possuir afinidade tanto por água quanto por óleo, podendo então ser um conciliador de mistura para dois líquidos imiscíveis.

Os tensoativo em geral figuram entre produtos mais versáteis na indústria da química. Suas propriedades os tornam adequados para uma ampla gama de aplicações industriais, como: detergência, emulsificação, dispersão de fases, entre outros (GALGANO, 2012). Também ainda que de forma tímida prefigura o uso de tensoativo, para a estabilização química para fluido de perfuração de poços a base de argila (GONÇALVES,2018).

Assim como a goma xantana, nesta dissertação foi avaliado o uso do tensoativo Tween 80, com intuito de adquirir melhor estabilidade química do fluido teste, para a geração do fenômeno *roll wave*. A avaliação de quais estabilizantes obteve melhor desempenho é descrita nos tópicos 8.2.1 e 8.3.1.

6 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO NÃO INTRUSIVAS DE ESCOAMENTO COM SUPERFÍCIE LIVRE

A medição de escoamentos é uma tarefa bastante complexa, especialmente quando nesses estão presentes instabilidades.

Com o constante avanço tecnológico, uma variedade de técnicas de medição vem evoluindo, a título de exemplo temos a ultrassônica e a fotônica. Tais técnicas apresentam grandes vantagens em relação às técnicas clássicas, como sensores capacitivos, pressão, agulha de contato, etc.

Existe uma variedade de técnicas de medição, no entanto, observam-se nessas técnicas certas limitações que precisam ser superadas. Com intuito de investigar novas técnicas de medição, pesquisas têm sido desenvolvidas para buscar medidas alternativas que apresentem características vantajosas como não intrusividade e acurácia.

Quanto às técnicas de medição, elas podem ser classificadas de acordo com a perturbação que o elemento transdutor introduz na medida. De um modo geral, eles podem ser intrusivos e não intrusivos. As técnicas que apresentam sensores intrusivos, o elemento transdutor fica em contato com escoamento e torna-se um obstáculo limitando a aplicabilidade desse tipo de sensor. No caso das técnicas de sensores não intrusivos, não existe o contato entre o fluido e o sensor de medição. Isso se torna uma grande vantagem, principalmente quando almeja-se mensurar fenômenos físicos de pequenas amplitudes, nos quais, qualquer interação com escoamento pode acarretar erros consideráveis.

Para medição de escoamento em superfície livre, inúmeros são as técnicas aplicadas, cuja escolha vai depender do nível de precisão e sensibilidade exigidas.

Para que não ocorresse interação com escoamento fez-se uso, nesse trabalho, de sensores ultrassônicos, técnica que se mostrou eficiente em aferir frentes de ondas, como demonstrado em trabalhos anteriores do grupo de pesquisa (FIOROT, 2012, CUNHA 2013, MACIEL *et al.*, 2017, FERREIRA *et al.*, 2018).

6.1 TÉCNICA ULTRASSÔNICA

Métodos ultrassônicos são vastamente utilizados em diversas áreas, seja na medicina, engenharia ou biologia. Trata-se, portanto, de uma poderosa ferramenta

de obtenção de dados que utiliza ondas ultrassônicas, (imperceptíveis ao ouvido humano 20 KHZ) como parâmetro para determinar propriedades físico-químicas de um anteparo.

O princípio de funcionamento do equipamento de ultra-som é, basicamente, enviar ondas mecânicas e aguardar durante um determinado tempo para que elas retornem. O tempo que uma onda enviada leva para retornar é o dobro do tempo que a onda gasta para atingir o anteparo a uma velocidade que depende do meio de propagação.

Todos os tipos de medições ultrassônicas ocorrem por meio de transdutores, responsáveis pela geração da onda ultrassônica. O transdutor de ultra-som é um dispositivo capaz de converter energia elétrica em energia mecânica numa faixa de frequência ultra e, mutuamente, de converter energia mecânica em energia elétrica. Esse tipo de sensor pode ser usado como dispositivo de detecção sem contato (não intrusivo), permitindo detectar de maneira precisa e confiável objetos de materiais, cores, texturas e formas distintas.

O elemento ativo do transdutor de ultra-som geralmente consiste em material piezoelétrico, podendo adquirir diferentes formatos. O material piezoelétrico altera sua forma física quando excitado por um campo elétrico, provocando vibrações mecânicas, as quais produzem ondas de pressão sonora que se propagam por um meio de transmissão (BRONZINO, 1995). 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 se propagam em todas as direções e também na direção do transdutor emissor. Seguindo esse princípio, é possível, por meio desses sensores, visualizar estruturas internas ou estimar o fluxo de um líquido em escoamento em tubulações, ou canais abertos, por exemplo.

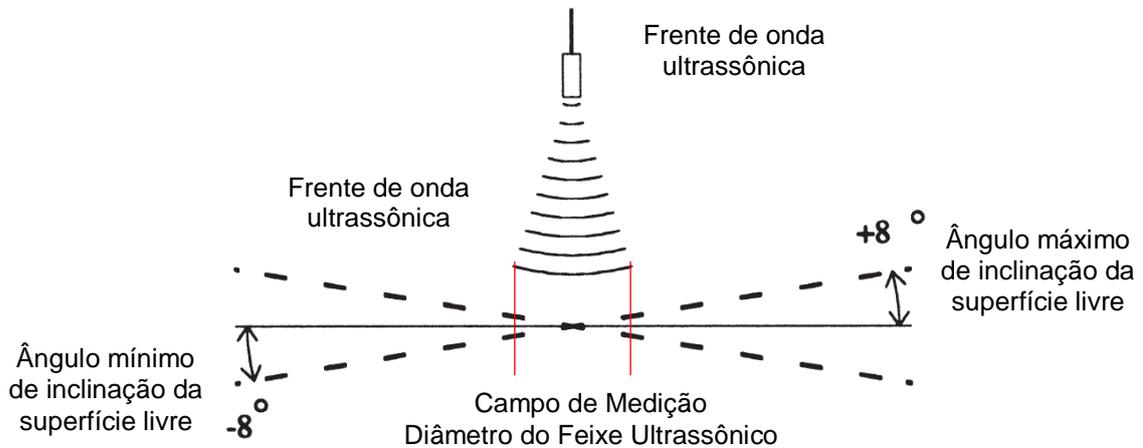
Em se tratando de aferições de *roll waves*, Cunha (2013) utilizou essa técnica no modo pulso eco⁷ para aferir *roll wave* em um escoamento de fluido translúcido (gel de Carbopol 960), e o instrumento de medição apresentou bom desempenho. Outros trabalhos do grupo de pesquisa também fizeram uso de sensores ultrassônicos para aferição de *roll waves*, com bom desempenho tanto para o gel de

⁷Técnica que consiste em uma frente de onda de velocidade constante e valor conhecido serem emitida e recebida dentro de um intervalo de tempo, assim, sabendo o tempo necessário para percorrer a distância entre o transdutor e o anteparo a ser medido, é possível determinar a distância deste até o transdutor.

carbopol (MACIEL *et al.*, 2017, MACIEL *et al.*, 2018) quanto para fluidos lamosos (FERREIRA *et al.*, 2018).

No entanto Cunha (2018) evidenciou que havia certas limitações do transdutor ultrassônico referente à sua utilização em aferir o fenômeno em regiões de alta declividade da superfície livre, que acarretava desvio do feixe de ultrassom comprometendo o seu retorno ao transdutor e, conseqüentemente medidas imprecisas. Segundo as especificações técnicas da MigatronCorp (2018), a superfície a ser aferida não pode ter um valor de inclinação maior que 8 graus em relação a linha horizontal conforme elucidada a Figura 8.

Figura 8: - Esquema do campo de medição da frente de onda ultrassônica e o ângulo de inclinação da superfície livre.



Fonte: Adaptado de Cunha (2018).

7 MATERIAIS E MÉTODOS

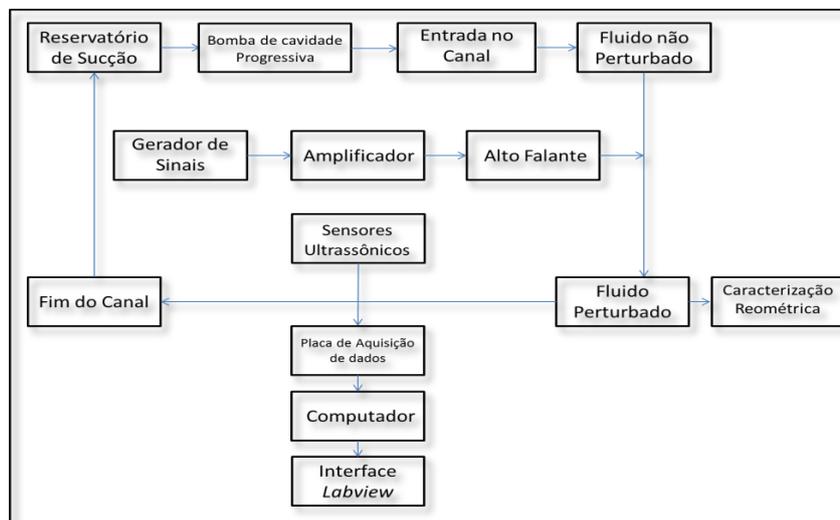
7.1 APARATO EXPERIMENTAL E FLUXOGRAMA DO SISTEMA

Os materiais utilizados e a metodologia perseguida são clássicos e baseados na experimentação física, e em resultados teóricos de domínio do grupo de pesquisa. O esquema de funcionamento e utilização de todo aparato experimental, para medição de *roll wave*, é mostrado na Figura 9.

Figura 9: (a) Fotografia do aparato experimental e (b) Fluxograma de funcionamento do sistema.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O aparato experimental (Fig.9) consiste em um canal de declividade variável (1) de 10 m de comprimento, com um sistema de bombeamento (2) (vazão controlada por meio de inversor de frequência), com propósito de transportar o fluido do reservatório (3) até a extremidade superior da rampa (4). Na parte superior do canal foi adaptado um sistema de perturbação, formado por dispositivos que impulsionam uma lâmina de ar sobre o fluido, perturbando o escoamento de forma controlada, a fim de gerar as ondas. Um sistema de aquisição de dados, composto por sensores ultrassônicos, juntamente com uma placa de aquisição e um computador, armazenavam os dados relativos às características das ondas geradas. O aparato experimental é composto por diversos conjuntos e segmentos, cada um construído separadamente, tendo como princípio de projeto a melhor forma de interação e conexão. Nos itens 7.1.1 ao 7.5 serão detalhadas as dimensões de cada componente.

7.1.1 Canal em estrutura metálica

O conjunto consiste de um canal de seção retangular com fundo de policloreto de vinil (PVC) e as laterais de vidro de 12 mm de espessura, montada sobre um estrutura metálica de sustentação (Fig.10).

Figura 10: (a) Canal de grandes dimensões com fundo de PVC lateral de vidro; (b) macaco hidráulico sendo utilizado para variar a declividade do canal.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Com 10 m de comprimento e 0,60 m de largura total, a estrutura está apoiada em um pilar central a cerca de 3 m de altura do solo. O canal foi subdividido ao meio, ao longo de seu comprimento, por uma chapa de ferro, formando dois canais de aproximadamente 0,30 m cada. Para variar a declividade do canal, utiliza-se um macaco hidráulico fixado em uma base no pilar central. A Figura 10 mostra a configuração desse conjunto.

7.1.2 Reservatório – sistema sucção e recalque

O subsistema consiste em um reservatório com volume máximo de 1,5 m³, ao qual foi adaptada uma tubulação de policloreto de vinil (PVC) de 4.1/2" de diâmetro interno e comprimento de 1,5 m, até chegar à sucção da bomba. A sucção e recalque do fluido do reservatório até o canal a 3 m de altura foi assegurado por uma bomba de cavidade progressiva (deslocamento positivo) da marca WEATHERFORD modelo HF-80L, com pressão de recalque de 6 Kgf/cm², própria para fluidos com elevada viscosidade. Na saída da bomba, foi utilizada uma tubulação de recalque de

3" de diâmetro interno, com 13 m de comprimento, até chegar ao topo do canal. Pode-se observar na Figura 11 a configuração do sistema.

Figura 11: Reservatório - sucção/recalque.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

7.1.3 Sistema de perturbação

Foi montado um sistema de perturbação (alto-falante instalado em uma caixa de formato em V) móvel, apoiado nas laterais do canal, a montante. O subsistema consiste na associação de um gerador de sinais, modelo GF-550 marca Instrutherm, acoplado a um amplificador modelo T 400, classe de operação D, interligado a um alto-falante, modelo TS-W258D4, específico para baixas frequências, tendo como função perturbar o escoamento de forma controlada, emitindo uma lâmina de ar sobre o escoamento base, gerando eventuais *roll waves*.

O suporte do sistema de perturbação foi projetado de maneira a permitir seu deslocamento vertical, aproximando-o e afastando-o do escoamento, e também movimento rotacional, permitindo que a lâmina de ar incida, perpendicularmente, no escoamento. Pode-se observar esse sistema na Figura 12.

Figura 12: Sistema de perturbação localizado no canal de ensaio



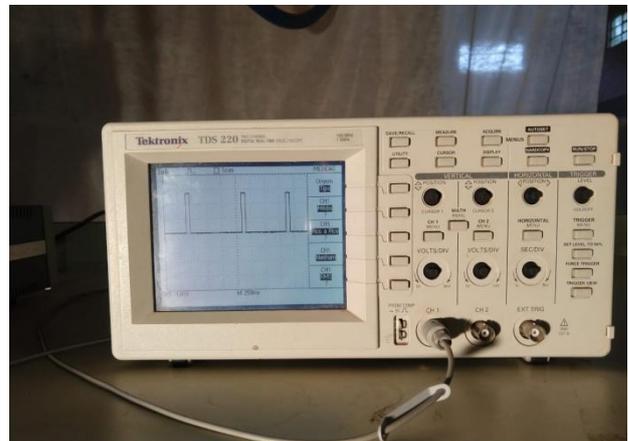
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O sinal emitido é fornecido pelo gerador de sinais (Figura 13 a) em seleção de onda quadrada, de forma que este sinal seja semelhante a um pulso. No painel do gerador de sinais também é possível controlar a amplitude e a frequência de oscilação do sinal. O uso do gerador de sinais é ligado ao osciloscópio, conforme Figura 12 b, no qual pode-se visualizar as formas de seleção de onda.

Figura 13: (a) gerador de sinais; (b) osciloscópio



(a)



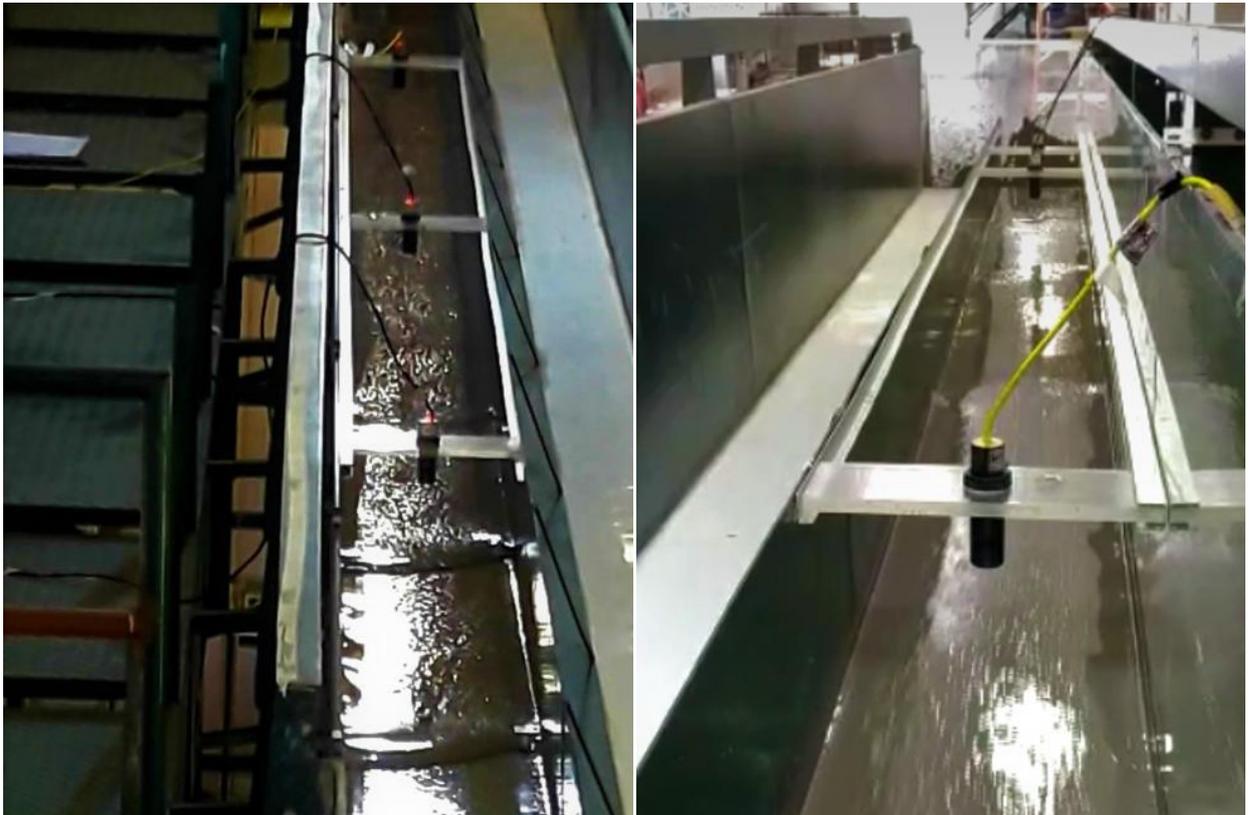
(b)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

7.1.4 Sistema de medição de nível e vazão do canal

O sistema de vazão do canal é controlado por meio da instalação de um inversor de frequência, da marca WEG modelo CW 09, que permite o controle preciso das rotações do motor e, conseqüentemente, da bomba. O sistema de medição de nível no canal é feito através de um transdutor ultrassônico, de baixo tempo de resposta (16 ms), modelo RPS – 401A, alimentado por uma fonte de tensão variável, sendo ajustada em 24 V. O transdutor foi acoplado aos trilhos, estes fixados nas laterais do canal, o que permite percorrer com os sensores realizando medições onde as ondas se formam mais nitidamente. O ajuste de distância do transdutor até o fundo do canal é feito através de um sistema (rosca e porca) em torno do próprio transdutor. Na Figura 14 pode-se observar o conjunto (suporte, transdutor) fixado ao canal.

Figura 14: Sistema de medição de nível fixado sobre as paredes laterais do canal.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A vazão foi determinada pelo método gravimétrico e a partir da velocidade média do escoamento, conhecida a área molhada. Devido às grandes dimensões, sobretudo da mangueira pela qual o fluxo de lama retornava ao reservatório inferior, obtivemos medidas de vazão com erros significativos pelo método gravimétrico, que foram descartados neste cenário. Optou-se então em aferir a velocidade superficial do escoamento que, acoplada a dados de reologia do fluido lamoso, nos permitiu estimar, com boa precisão, a velocidade média. Em posse da lâmina normal (regime não perturbado) obtida com o ultrassom, calculou-se a área molhada e assim a vazão em trânsito (FERREIRA *et al.*, 2018). A velocidade superficial foi determinada por meio da média de 10 aferições, a partir de dois pontos fixos do canal e a cronometragem do tempo de viagem de um flutuador na superfície livre do escoamento uniforme.

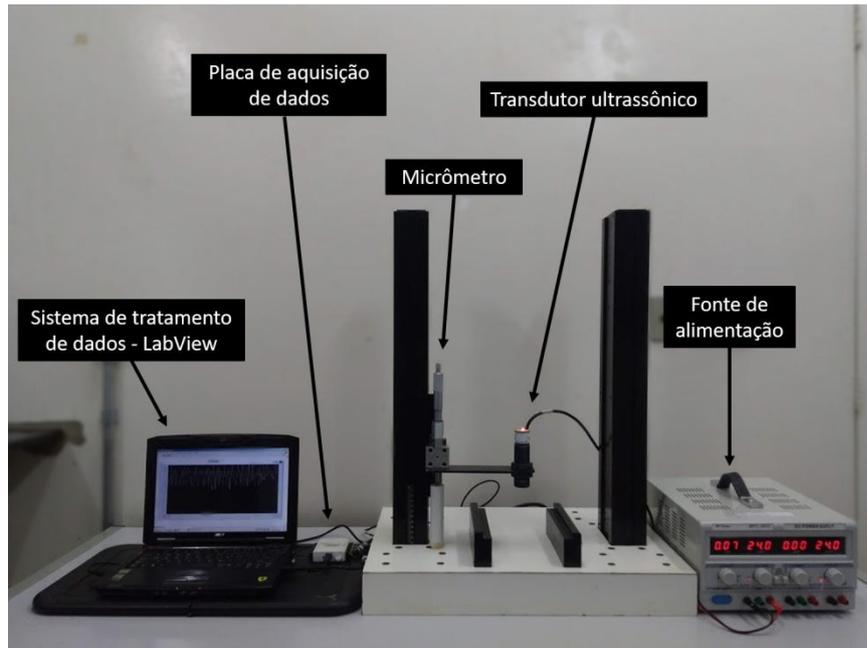
7.1.5 Calibração do sensor ultrassônico

O método utilizado para calibração do sensor ultrassônico foi por auto-reciprocidade, qual seja, método no qual a sensibilidade do transdutor é determinada a partir de um sinal ultra-sônico gerado e recebido pelo transdutor, após a reflexão em um alvo. A calibração foi realizada na sala de reologia do LH2⁸ – FE - Unesp.

O aparato para calibração foi montado sobre uma mesa inercial (livre de vibrações externas) como mostrado na Figura 15. A geração e aquisição de dados foram realizadas utilizando uma placa de aquisição modelo USB-6009 da *National Instruments*. Uma fonte de tensão variável foi utilizada, para acionar o transdutor ultrassônico com tensão fixa de 24 V.

⁸ Laboratório de Hidrologia e Hidrometria

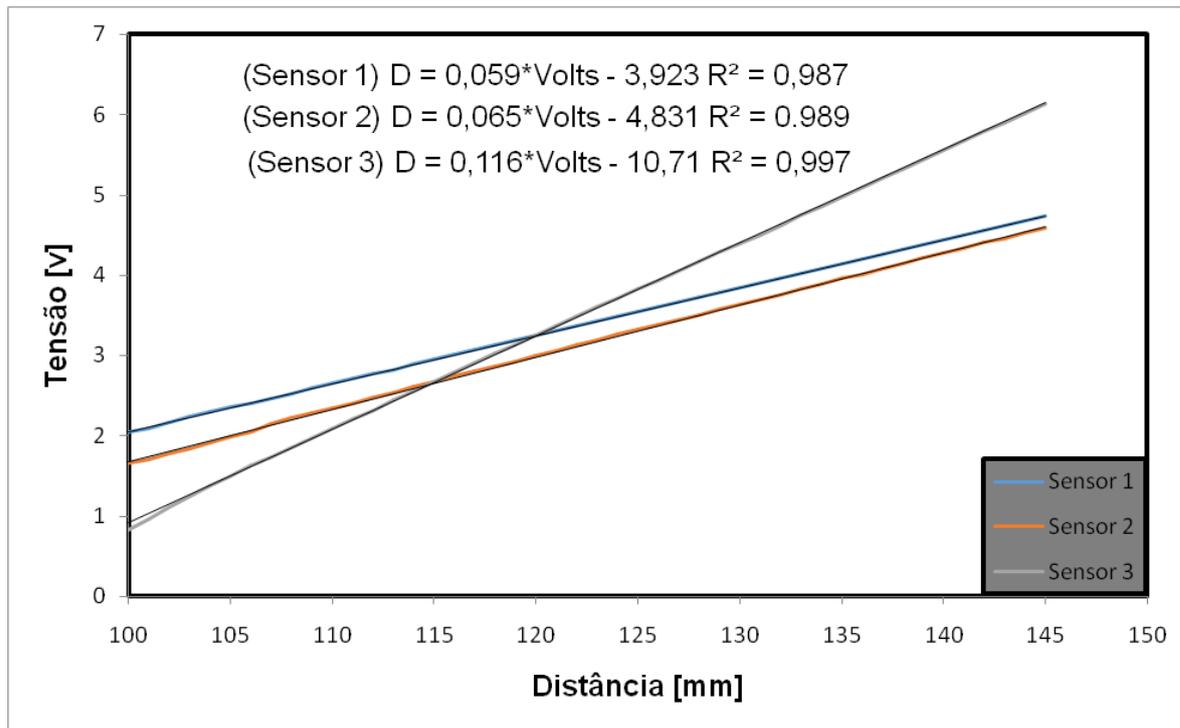
Figura 15: Aparato experimental de calibração para transdutor ultrassônico.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Assim, utilizando o aparato de calibração, variava-se a distância em passos de 1 mm ajustado por um micrômetro, e, a cada novo milímetro, registrava-se um valor em tensão. Dessa forma foi construído um gráfico (distância x tensão) que exibiu comportamento linear, como mostra a Figura 16.

Figura 16: Relação de calibração dos sensores ultrassônicos, com as respectivas equações



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A equação da reta foi então utilizada para transformar todo sinal (em volts) aferido pelo ultrassom no canal, sobre a superfície livre do escoamento, em altura, nível (em mm). A Figura 16 mostra que o sensor ultrassônico apresentou proporcionalidade entre o sinal gerado e a grandeza física. Sabe-se que quanto maior for a aderência [R^2], mais fidedigna é a resposta do sensor.

7.1.6 Características físico-químicas e reometria do fluido teste

As características da argila utilizada nos ensaios, fornecida pela Empresa Mineradora, são apresentadas no Quadro 1.

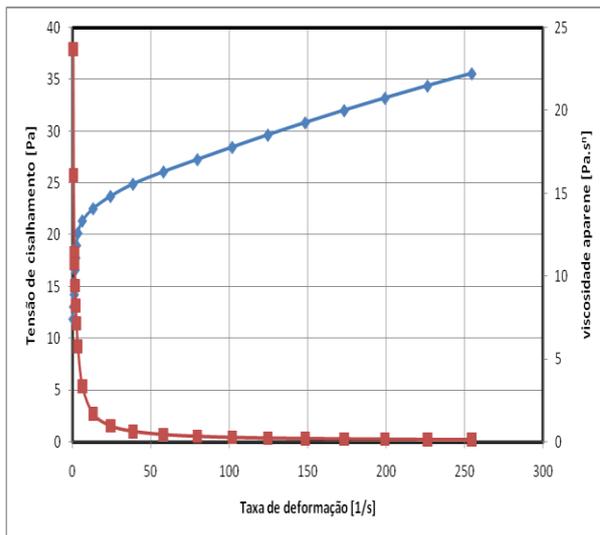
Quadro 1: Características físico-química do argilo mineral utilizado nos ensaios.

| | |
|--|---|
| <u>Procedência:</u> Minasolo Comércio e Representações LTDA - Comercialização, Representação e industrialização por terceiros de minérios e abrasivos. | |
| <u>Extração:</u> Minas Gerais - Brasil - N/referência - 200 e MIN – 325 | |
| <u>Minério:</u> Argila caulínica refratária tipo (Ball Clay) | |
| <u>Análise química típica %</u> | |
| SiO ₂ | 51,33% |
| Al ₂ O | 31,76% |
| Fe ₂ O ₃ | 1,12% |
| TiO ₂ | 1,04% |
| CaO | 0,25% |
| MgO | 0,25% |
| K ₂ O | 0,48% |
| Na ₂ O | 0,02% |
| ZrO ₂ | 0,03% |
| P ₂ O ₅ | 0,07% |
| BaO | 0,03% |
| <u>Outras características:</u> | |
| Massa específica real (seca): | 2,614 g/cm ³ |
| Massa específica aparente moída: | 0,40 a 0,55 g/cm ³ (malha 325) |
| Partículas abaixo de 5 microns: | 70% |
| Absorção de água: | 9 a 10% |
| Cor : | cinza |
| Umidade a 105°C: | Máximo 5% |
| Retenção 325 (0,045mm): | Máximo 3% |

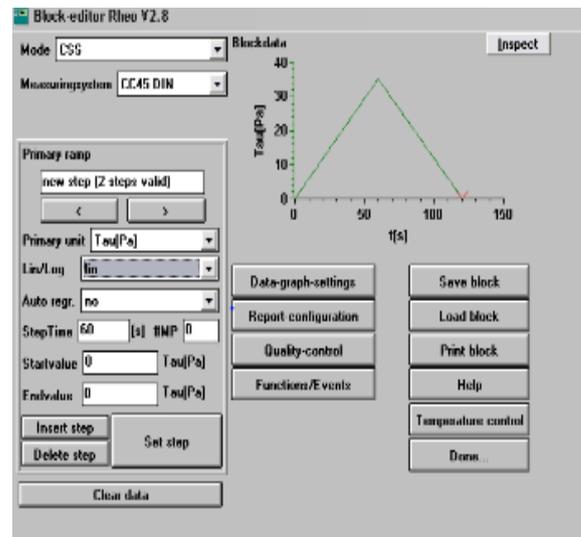
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Neste trabalho foram confeccionados 650 litros do fluido teste (água+argila caulínica) para uma concentração de 25 m/v% (concentração em volume), concentração esta na faixa de trabalhos na literatura (COSSOUT, 1994). Com as análises reológicas feitas, pôde-se observar que o fluido teste é pseudoplástico ($n < 1$), ou seja, a viscosidade aparente do fluido diminui com o aumento da taxa de deformação. A Figura 17 mostra a curva de fluxo da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação do fluido teste. Os ensaios reométrico apontaram para um fluido de características Herschel-Bulkley com os seguintes valores dos parâmetros: $\tau_c = 7,39 [Pa]$, $K_n = 1.13 [Pa \cdot s^n]$, $n = 0,52$, e massa específica $\rho = 1320 [kg/m^3]$. A Figura 17a mostra a curva de fluxo do fluido analisado, juntamente com o bloco de cisalhamento definido para o ensaio reométrico Fig.17b

Figura 17: (a) Reograma de Herschel Bulkley para o fluido teste; (b) Bloco padrão utilizado nos ensaios.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O reômetro utilizado nos ensaios foi o R/S Rheometer, que forneceu parâmetros para vários modelos reológicos, com opções de fixar tensão de cisalhamento ou taxa de deformação (*shear stress* e *shear rate*) e, com o banho térmico, controlar a temperatura do ensaio. Utilizou-se, associado ao reômetro, o software Rheo 2000 que forneceu avaliações estatísticas e curvas de fluxo mais

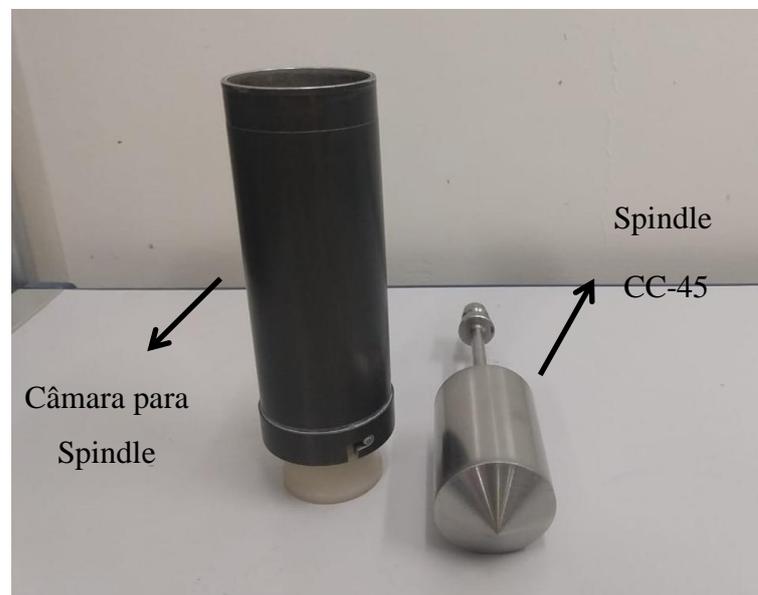
indicadas para aquele ensaio, cabendo ao pesquisador uma análise mais refinada e crítica dos resultados.

A geometria escolhida para o ensaio foi do tipo cilindros coaxiais (CC45), conforme ilustra a Figura 18b. Essa geometria foi escolhida devido à característica do material a ser analisada, argila caulínica com granulometria da ordem de $2\ \mu\text{m}$, qual seja, material extremamente fino que não tem dificuldade de ser cisalhado no “gap” (folga) entre o spindle e o copo assemelhando-se, pois, ao clássico escoamento de Couette.

Figura 18: (a) Reômetro R/S utilizado para aferir a reologia do fluido teste; (b) Spindle CC-45



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

7.1.7 Condições de inclinação e vazão no canal

Segundo Ferreira (2007) e Maciel *et al.*, (2013) existem condições necessárias e suficientes para a geração de *roll waves*. Nesse sentido, deve-se analisar o comportamento do fluido em relação ao número de Froude ($F_r > F_{rmin}$) e a frequência ($f < f_c$) de perturbação, além da inclinação do canal e reologia do fluido.

Amparados nesses critérios de geração, e partindo da reologia inicial da mistura, foi possível estabelecer uma configuração experimental (inclinação, vazão e frequência) de operação do aparato. Entretanto, vale lembrar que por conta das condições as quais o fluido está sujeito (altas taxas de deformação, variação de temperatura, umidade, perda de material em singularidades, etc.), suas propriedades (massa específica e viscosidade) podem variar, o que irá acarretar em uma mudança dos valores dos adimensionais do escoamento (Froude, Reynolds). Figuras ilustrativas são apresentadas no Apêndice C dessa dissertação.

Assim posto, a configuração preliminar do aparato experimental, nas condições de inclinação de 6,2° e 9,2° e vazão de 2,03 e 3,16 l/s nas rotações de 350 e 500 rpm respectivamente, garantiria a realização e geração de *roll waves*, uma vez que os critérios de geração (item 4.2) eram atendidos.

7.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os experimentos dessa dissertação foram divididas em campanhas, ao todo foram 3 (três) grandes campanhas, sendo que o insucesso da primeira campanha serviu de experiência e norteador das demais.

As incertezas das medidas foram estimadas levando-se em consideração a precisão dos instrumentos utilizados (cronômetro $\pm 0,2$ s e ultrassom $\pm 0,3$ mm) e tempo de reação do operador, conforme apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: – Incertezas das medições das propriedades do escoamento para terceira campanha experimental.

| Primeira Campanha experimental | | | | | | |
|--------------------------------|----------------|----------------|--------------------------|-------------------|---------------------------------|------------------|
| Casos | Inclinação [°] | Rotações [rpm] | Vel. Superf. u_s [m/s] | Vazão [l/s] | Lâmina do escoamento h_0 [m] | Número de Froude |
| 1 | 6,2 | 400 | $1,12 \pm 15\%$ | $1,89 \pm 16,4\%$ | 0,0056 | 4,80 |
| Segunda Campanha experimental | | | | | | |
| Casos | Inclinação [°] | Rotações [rpm] | Vel. Superf. u_s [m/s] | Vazão [l/s] | Lâmina do escoamento h_0 [m] | Número de Froude |
| 1 | 6,2 | 350 | $0,79 \pm 5,10\%$ | $2,03 \pm 6,11\%$ | 0,01026 | 2,25 |
| 2 | 6,2 | 500 | $1,12 \pm 7,18\%$ | $3,16 \pm 8,19\%$ | 0,01060 | 3,15 |
| Terceira Campanha experimental | | | | | | |
| Casos | Inclinação [°] | Rotações [rpm] | Vel. Superf. u_s [m/s] | Vazão [l/s] | Lâmina do escoamento. h_0 [m] | Número de Froude |
| 1 | (9,2) | 350 | $0,97 \pm 1,2\%$ | $2,90 \pm 2,4\%$ | 0,01055 | 3,03 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Na primeira campanha experimental os experimentos foram realizados em temperatura ambiente de 30 °C, com o canal inclinado em 6,2° e rotação da bomba hidráulica em 400 rpm conforme Tabela 1, nessa campanha foram usados dois sensores ultrassônicos, um locado a montante, responsável por aferir a lâmina do escoamento e outro mais a jusante, responsável por aferir as instabilidades (ondas) geradas.

Na segunda campanha os experimentos foram realizados nas inclinações de 6,2° e 9,2°, com bomba hidráulica nas rotações de 350 e 500 rpm conforme Tabela 1. Inicialmente, determinaram-se as propriedades reológicas do escoamento do fluido não newtoniano (mistura de água e argila caulínica em concentração volumétrica total de 25%) em regime uniforme, quais sejam: lâmina uniforme (h_0) (via ultrassom); velocidade superficial (u_s) (via flutuadores).

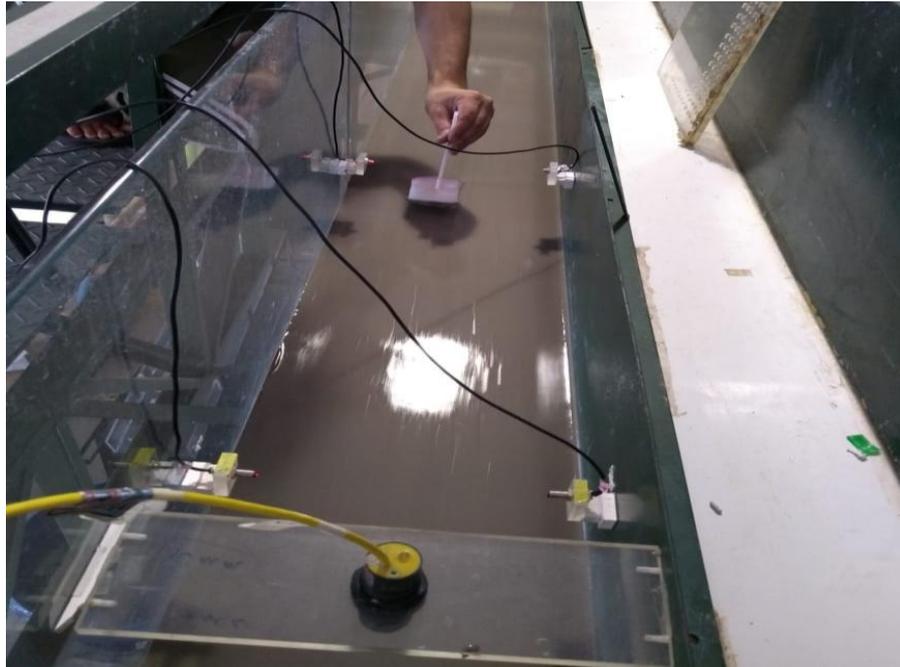
A velocidade superficial foi determinada por meio de flutuadores e média aritmética de dez aferições, de estações fixas e cronometragem do tempo de viagem de um flutuador na superfície livre. Feitas as aferições de velocidade, pôde-se calcular a velocidade média ao longo da profundidade do escoamento utilizando o modelo matemático apresentado por Maciel *et al.*, (2017), equação 8 ou 11.

Foram utilizados três sensores ultrassônicos (calibração Fig.15) para medir a superfície livre, o 1º sensor ficou locado a montante do canal, sendo esse com função exclusiva para aferir a lâmina do escoamento base uniforme. Teve-se o cuidado para que esse sensor não captasse nenhum tipo de instabilidade, sendo que, em certos casos, pôde-se observar a formação natural de *roll wave* a partir de 4,8 m de comprimento de pista. Os outros dois sensores ficaram responsáveis por aferir as *roll waves* geradas (amplitude de onda) e, conhecendo-se a distância entre os sensores, pôde-se calcular experimentalmente a velocidade de propagação da onda. As *roll waves* foram geradas naturalmente (*roll waves* naturais) para inclinação de 6,2°, ou seja, sem a imposição de uma frequência de perturbação e *roll waves* forçadas na inclinação de 9,2°.

No intuito de investigar técnicas alternativas de medição de vazão, fez-se, durante a terceira campanha experimental, o uso de sensores infravermelhos para aferir a velocidade superficial e conseqüentemente a vazão do escoamento. A fim de se obter maior agilidade e precisão no cálculo de vazão, minimizou-se o uso de instrumentos convencionais (trena, régua, cronômetro) por serem fontes de erros.

Assim, a configuração do sistema consistiu em dois pares de sensores, cada par composto por um transmissor e um receptor, sendo um conjunto locado a montante, outro um pouco mais a jusante do canal (distância conhecida). O transmissor emite feixes de infravermelho de um ponto e recebe esses sinais de outro, e quando esse feixe é interrompido (por um flutuador de haste alongada), uma rotina elaborada em Labview aciona um temporizador, sendo o mesmo cessado quando o outro sensor é interrompido. Na Figura 19 é ilustrado o procedimento.

Figura 19: Aferição de velocidade superficial através do sensor de barreira



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na terceira campanha é apresentado um caso para medição de *roll waves* naturais, com fluido teste quimicamente já estabilizado, cujas incertezas das medições foram descritos na Tabela 1.

8 RESULTADOS

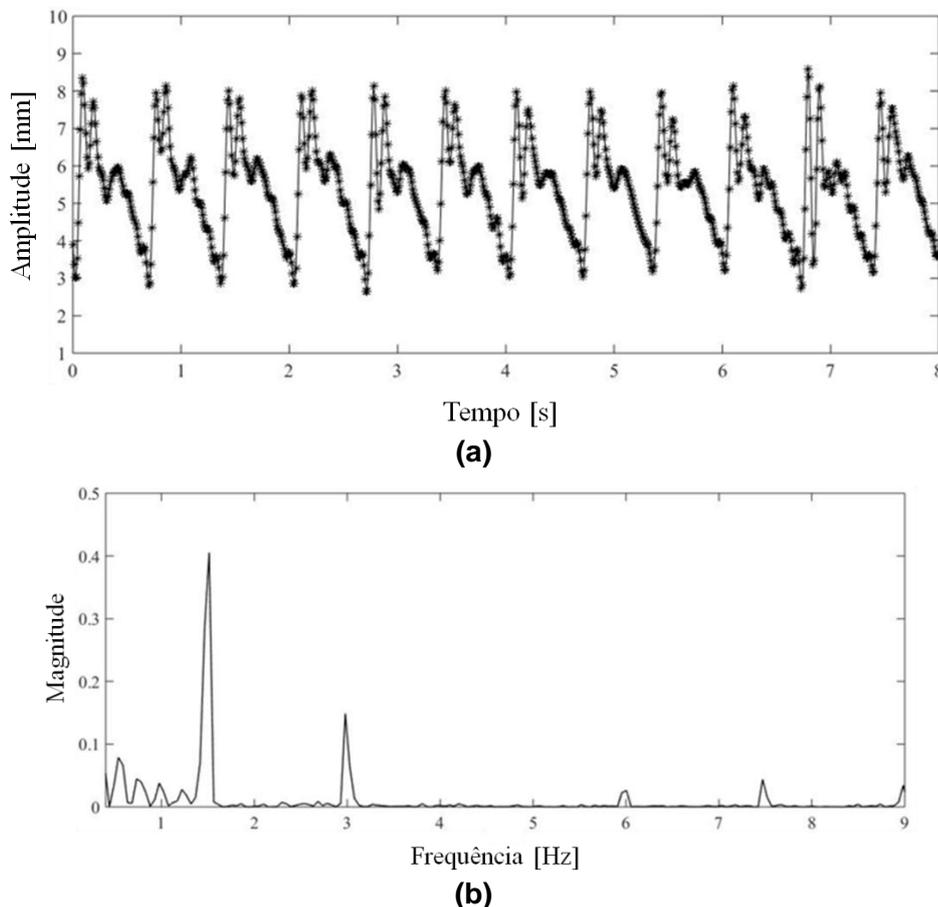
8.1 PRIMEIRA CAMPANHA EXPERIMENTAL

Como resultado preliminar, apresenta-se, nesta dissertação, uma 1ª tentativa de geração de *roll wave* evoluindo em canal de grandes dimensões.

Os ensaios foram realizados com o canal inclinado em $6,2^\circ$. Para a bomba com rotação de 400 rpm, a vazão medida foi de $1,89 \text{ l/s}$, na concentração de argila de $c_v = 25\%$ em volume.

Inicialmente mediu-se a lâmina do escoamento em regime uniforme ($h_0 = 0,0056 \text{ m}$), em seguida o escoamento foi perturbado e a aferição da *roll wave* foi realizada a 8,34 m da perturbação, de forma a garantir a aferição de *roll wave* sem sua forma estável, em amplitude e comprimento, a uma frequência de perturbação de 1,5 Hz. Os resultados obtidos na primeira bateria de ensaios são mostrados na Figura 20.

Figura 20: (a) Perfil das *Roll Waves* com sinal filtrado, (b) Espectro de onda



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Através da Figura 20 pode-se observar que as ondas obtidas apresentam características de *roll waves*, ondas bem íngremes, com formas mais verticalizadas, com períodos (comprimentos) e amplitudes bem definidas, típicas ondas de choque, em conformidade com os resultados observados por Maciel *et al.*, (2017) em experimentos com gel de carbopol, fluido também do tipo Herschel Bulkley, e também faz a alusão ao clássico trabalho de Brock (1696). Destaca-se também o surgimento de frequências oportunistas na região lentamente decrescente da onda (em sua descida), fenômeno também observado nos experimentos de Ng e Mei (1994). Essas frequências são oriundas de ondas de diferentes períodos que se sobressaem (atropelam) umas as outras, significando que as ondas mostradas na Fig. 20 não chegaram completamente à estabilidade.

Sabe-se que a dinâmica dos escoamentos de fluidos não newtonianos está sistematicamente atrelada às propriedades reológicas do fluido. Seguindo esse contexto, a perda das propriedades plásticas, seja devido ao processo de bombeamento ou devido a não estabilidade química da mistura, podem influenciar na reologia e, por conseguinte, nos principais parâmetros de onda (amplitude e comprimento e velocidade de propagação).

Inesperadamente, o fluido utilizado nos experimentos veio perder suas propriedades plásticas, ao longo do tempo. Devido ao grande volume da mistura (650 l), e a dificuldade de mantê-lo em constante agitação, a solução argilosa veio a se desestabilizar quimicamente, fazendo com que se distanciasse do modelo reológico de Herschel Bulkley em função do tempo. Ensaio reológicos realizados (dias após os ensaios) apontaram a perda dos valores dos parâmetros reológicos da mistura (tensão limite, índice de consistência). Ademais, com essas características, e devido às elevadas rotações do sistema de bombeamento, o escoamento ficou mais propício ao regime turbulento, o que dificultava a formação de um padrão de escoamento uniforme laminar, impossibilitando realizar ensaios, dentro dos propósitos inicialmente estabelecidos.

Como plano de ação de modo a reverter tal comportamento indesejável, investiu-se no uso do tensoativo Tween 80 na composição do fluido, que tem como propriedade formar sistemas micelares. Assim, foram confeccionadas várias amostras da solução água+argila caulínica, às quais foram adicionadas diferentes concentrações do tensoativo Tween 80. Durante intervalo de dias, foram realizados ensaios reológicos das misturas, objetivando acompanhar os efeitos estabilizantes

do tensoativo sobre os parâmetros reológicos e avaliar a melhor concentração do tensoativo na mistura. Os resultados obtidos encontram-se no Apêndice A desse documento.

8.2 SEGUNDA CAMPANHA EXPERIMENTAL

Tendo em vista o relativo insucesso da primeira campanha experimental, envidaram-se esforços para suprir a problemática em questão. Experimentos anteriores realizados mostraram que o fluido lamoso confeccionado (mistura água+argila caulínica) perdia abruptamente suas propriedades reológicas em questão de horas, isto é, em um momento era preparada a mistura com aproximadamente 650 litros de lama e, horas depois, durante o decorrer do experimento, o fluido apresentava uma camada de lâmina d'água significativa na superfície da mistura. Desta forma, durante o processo era possível observar uma intensa sedimentação (floculação) de argila no fundo do reservatório.

Nessa segunda campanha experimental foram propostos novos ensaios a serem realizados nas mesmas condições de inclinação e vazão da primeira campanha. Os resultados aqui expostos têm como diferencial o cuidado sistemático com o fluido escoante, para que não houvesse a desestabilização química da mistura, com propósito de manter sua característica plástica.

8.2.1 Estabilização da mistura água+argila caulínica utilizando tensoativo Tween 80.

Quando uma molécula de tensoativo é dissolvida em água, a presença da parte hidrofóbica causa uma distorção da estrutura da água, o que contribui com a variação da energia livre do sistema (Gibbs Duhem⁹) Galgano (2012). O mesmo autor salienta no tocante à concentração de tensoativo em solução, se a mesma for aumentada, as moléculas presentes na solução se associam formando micelas, de forma a diminuir a energia do sistema, sendo assim as reações químicas acontecem espontaneamente (ΔG negativo).

⁹ Energia que descreve as variações do potencial químico associadas aos diferentes componentes de um sistema ($dG = -SdT + VdP$)

Na problemática em questão, o tensoativo tem como principal função facilitar a interação do argilomineral com a água, impedindo que o mesmo interaja com si próprio, formando uma mistura homogênea, evitando que a mesma entre no estado de floculação onde se apresentam duas fases (água + argila).

Seguindo esse contexto, nessa etapa foi verificada a influência do tensoativo Tween 80 no processo de estabilização da mistura argilosa. Devido à carência/inexistência de tais informações na literatura, o autor dessa dissertação fez diversas baterias de ensaios reométricos, em diferentes concentrações de tensoativo. O objetivo era encontrar uma concentração “ótima”, a qual, depois de dispersa em água, formasse um sistema homogêneo e apresentasse parâmetros reológicos favoráveis à geração do fenômeno *roll wave*. Deve-se salientar que nesse capítulo a estabilização química da mistura é somente para gerar o fenômeno, os resultados apresentados referente à estabilização não servem de norte para outras aplicações de caráter industrial. Nesse mesmo capítulo na seção 5 será feito uma abordagem geral, que poderia nortear e ser aproveitada em aplicações industriais.

A concentração de argila se manteve a mesma (25% em volume), e variou-se a concentração de tensoativo entre 0,125 a 1% (Concentração em massa) uma vez sabendo que concentrações maiores do que essas apresentaram efeitos plastificantes, em volume de mistura fixo em 1 litro. Com as amostras preparadas, ensaios reológicos diários foram feitos, com propósito de observar quaisquer variações dos parâmetros reológicos de Herschel Bulkley, decisivos nas características do fenômeno estudado.

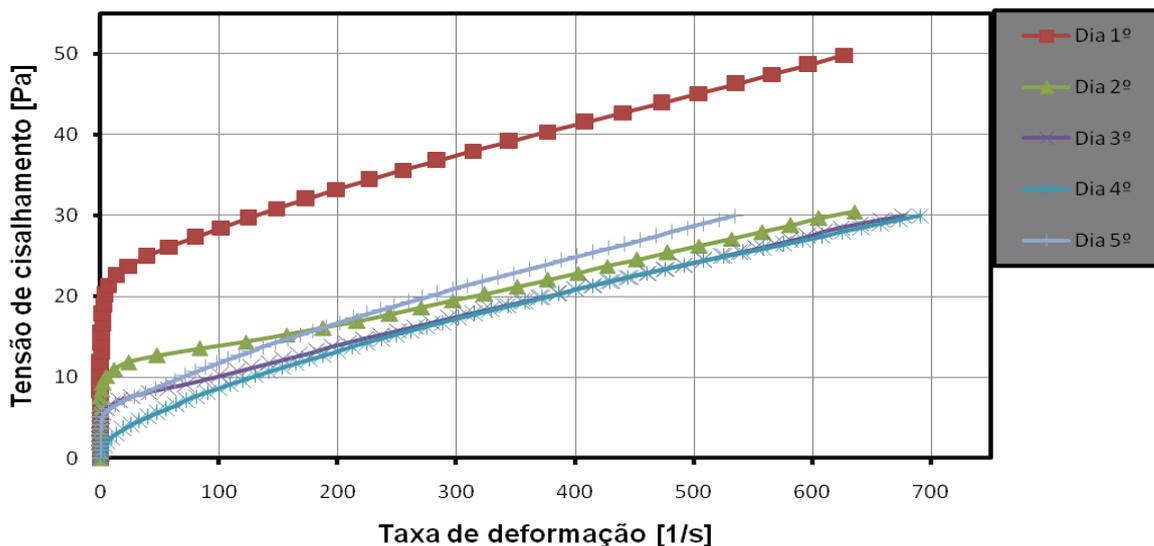
Ao todo foram analisadas 4 amostras, 1, 0,5, 0,25 e 0,125% de concentração de tensoativo Tween 80. Os resultados nas concentrações 1 e 0,5% apontaram um grande efeito viscosificante (ver resultados em Apêndice A). Esse efeito fazia com que o índice de consistência da mistura apresentasse um acréscimo, provocando efeito indesejado no tocante à geração de *roll wave*, devido às condições específicas que devem ser impostas no aparato experimental (inclinação, vazão) para gerar o fenômeno.

Sendo assim, as concentrações que se mostraram eficientes, e ao mesmo tempo satisfaziam as condições para geração do fenômeno, foram as de 0,25 e 0,125%, pois as mesmas apontaram menores alterações no índice de consistência (viscosificante), e os parâmetros reológicos obtidos nessas amostras não caíram

abruptamente de um dia para outro, quando comparados com mistura sem nenhuma adição de tensoativo.

Além disso, os parâmetros reológicos obtidos nessas concentrações se mostraram favoráveis para a geração do fenômeno, dentro das condições propostas pelo aparato experimental (ver gráficos de geração de *roll wave* no apêndice C). A Figura 22 mostra a boa eficiência do tensoativo (mesmo em baixas concentrações), quando comparados com uma mistura sem qualquer adição de surfactante (Fig.21).

Figura 21: (a) Curva de fluxo da mistura água+argila caulínica analisadas em intervalos de 24 h e (b) Parâmetros reológicos de Herschel Bulkley.



(a)

| Dias de repouso | τ_c [Pa] | k_n [Pa. s ⁿ] | n |
|-----------------|---------------|-----------------------------|------|
| 1 | 12,98 | 3,10 | 0,36 |
| 2 | 9,66 | 0,08 | 0,83 |
| 3 | 5,73 | 0,08 | 0,87 |
| 4 | 0,43 | 0,42 | 0,64 |
| 5 | 0 | 4,32 | 0,26 |

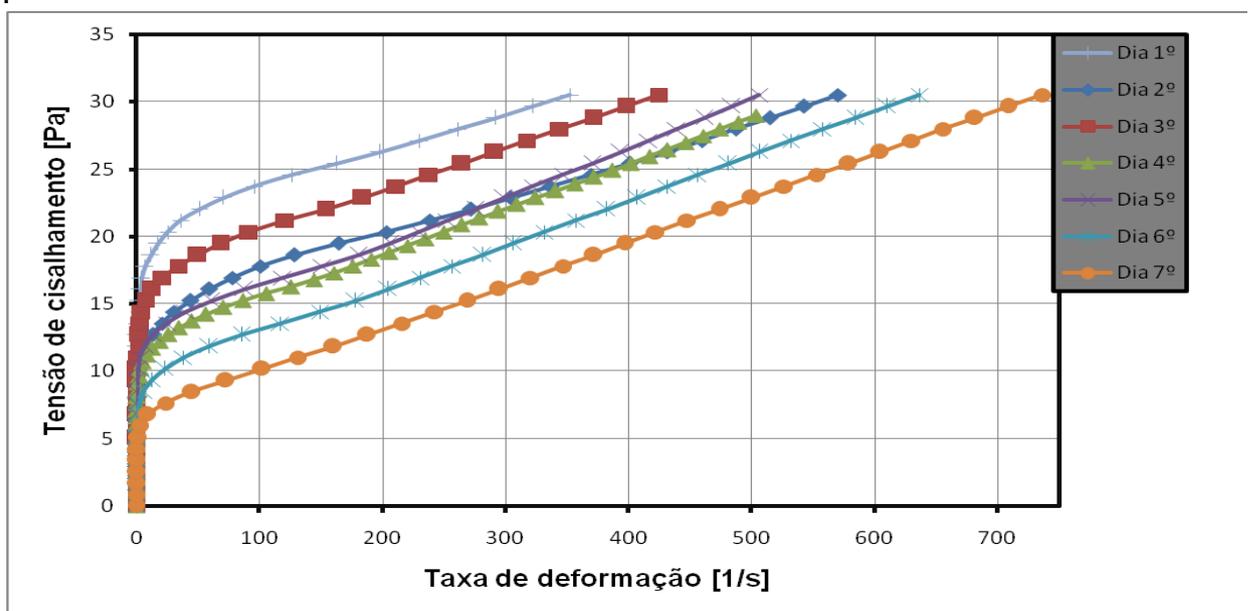
(b)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A partir da Figura 21 verifica-se a forte queda dos parâmetros reológicos da solução. No intervalo de 3 dias as propriedades reológicas caíam abruptamente,

perdendo completamente as características viscoplásticas. Isso aconteceu devido ao fato que o argilomineral caulinita em geral possui sua estrutura eletrônica superficial balanceada (cargas superficiais balanceadas), sendo assim a caulinita não é um bom viscosificante, ou seja, ela perde rapidamente suas propriedades reológicas com o passar do tempo. Ademais, ressalta-se que a solução argilosa apresentando tais parâmetros torna difícil a geração de *roll wave* como apresentado nos resultados preliminares (Fig 19). A Figura 22 apresenta a curva de fluxo da solução argilosa já com adição do tensoativo Tween 80 na concentração de 0,25%.

Figura 22: (a) Curva de fluxo da mistura água+argila caulínica+tensoativo, analisadas em intervalos de 24 h e (b) Parâmetros reológicos de Herschel Bulkley



(a)

| Dias de repouso | τ_c [Pa] | k_n [Pa.s ⁿ] | n |
|-----------------|---------------|----------------------------|------|
| 1 | 11,25 | 3,28 | 0,29 |
| 2 | 10,88 | 0,83 | 0,49 |
| 3 | 8,45 | 1,35 | 0,41 |
| 4 | 11,29 | 1,22 | 0,44 |
| 5 | 9,69 | 0,24 | 0,68 |
| 6 | 11,25 | 0,11 | 0,81 |
| 7 | 7,75 | 0,16 | 0,74 |

(b)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os resultados (Fig.22) mostram a influência do tensoativo na mistura argilosa, com melhor eficiência em manter as propriedades reológicas da solução, quando comparado com mistura sem adição do tensoativo. Vale salientar que o argilomineral caulinita possui ligação entre as unidades (SiO_4 e Al_2O_6) suficiente firme para não permitir a penetração de moléculas de água entre elas, sendo assim o tensoativo Tween 80 funciona como um “facilitador” para a boa interação entre a água e a caulinita.

Nota-se que durante o intervalo de 4 dias houve poucas variações dos parâmetros reológicos, principalmente da tensão limite, e entre os dias 2 e 4 as variações do índice de consistência também foram mínimas. Assim evidenciou-se que o tensoativo Tween 80 se manteve eficiente para um prazo relativo e suficiente para realizar o experimento. Com o fluido teste estabilizado quimicamente, novos ensaios puderam ser realizados, com propósito de obter *roll wave* em sua forma estável.

8.2.2 Resultados e discussão da segunda campanha

Como primeiro resultado dessa segunda campanha experimental, manteve-se o canal inclinado em $6,2^\circ$, 2,03 l/s, com lâmina de escoamento uniforme de 10,26 mm, conforme (Tab.1). A partir dessas condições, puderam ser vistas *roll waves* naturais evoluindo no canal (sem perturbação imposta).

As propriedades reológicas foram aferidas, a partir das amostras coletadas do fluxo de lama em trânsito no canal, juntamente com as instabilidades sendo geradas. A Tabela 2 mostra as propriedades reológicas do fluido aferidas.

Tabela 2: Tabela de dados das propriedades do fluido para inclinação $6,2^\circ$, 350rpm.

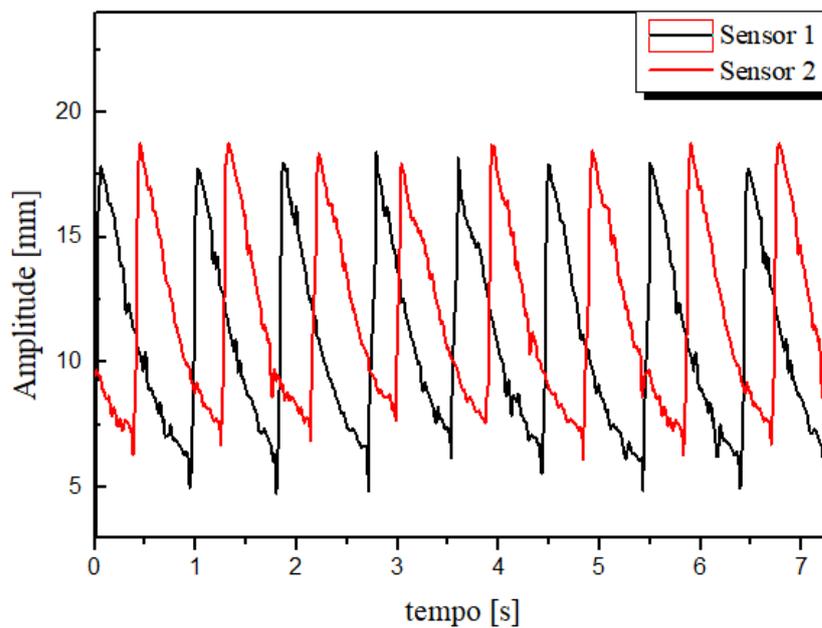
| Propriedades do fluido teste | | | | |
|--|--------------------------------------|--|---|--|
| Massa específica [kg/m³] | Tensão Crítica [Pa] | Índice de consistência [Pa.sⁿ] | Índice de escoamento [-] | Taxa de deformação [s⁻¹] |
| 1320,8 | 6,03 | 2,33 | 0,32 | 80 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

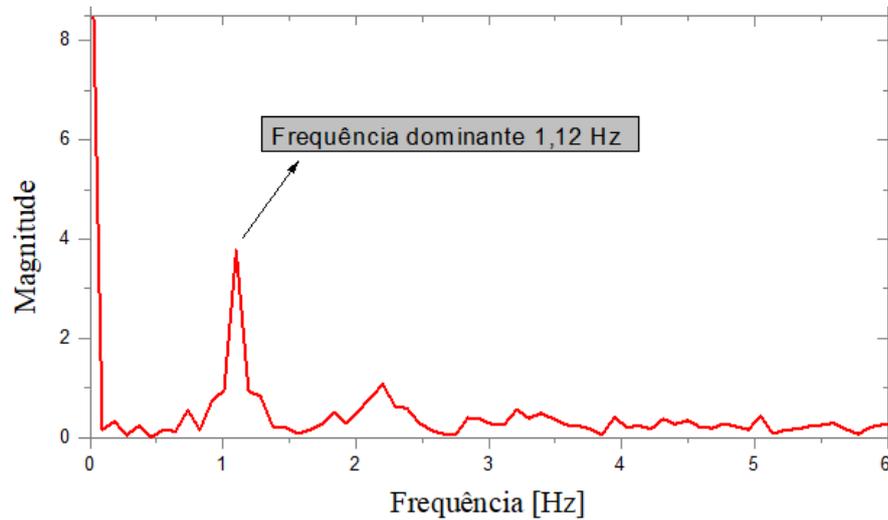
No tocante à reologia, a mesma foi aferida pelo reômetro descrito no Capítulo 6, seção 6.2, e o filtro realizado em cada ensaio seguiu procedimento estabelecido pelo autor dessa dissertação. Analisava-se a região de baixa rotação do reômetro, eliminando os pontos que estavam dispersos, geralmente em taxas de deformação entre 0.5 e 1.5 s^{-1} . Outro critério adotado foi baseado na real deformação de trabalho, na qual, o fluido experimentava durante o escoamento (du/dh). Nesse caso exposto, o escoamento atingiu taxa de deformação de trabalho de 80 s^{-1} . Sendo assim, a região explorada da curva de fluxo do fluido escoante, a partir da qual os parâmetros reológicos foram estimados, foi a de $1 \leq du/dh \leq 80 \text{ s}^{-1}$.

A Figura 23 apresenta uma sequência de 8 ondas com formato e padrão definido (amplitude, comprimento e celeridade) em domínio temporal registradas pelos sensores 1 e 2.

Figura 23: Resultado experimental de amplitude de onda com canal inclinado em $6,2^\circ$ e vazão de $2,03 \text{ l/s}$, rotação de 350 rpm , sinais obtidos pelos sensores 1 (a $5,350 \text{ m}$ da entrada do canal) e 2 (a $5,935 \text{ m}$ da entrada do canal).



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A partir da Figura 23 pôde-se observar que as *roll waves* naturais são também ondas bem íngremes, típicas ondas de choque, assim como as *roll waves* geradas a partir de uma perturbação imposta, conforme observado por Maciel *et al.*, (2017).

A Figura 23 elucida também uma pequena divergência quanto à amplitude de onda, onde mostra-se que as amplitudes medidas pelo sensor 2 apresentam-se levemente maiores do que as do sensor 1 (da ordem de 0,9 mm). Esse efeito físico acontece uma vez que as ondas registradas pelo sensor 1 ainda estavam se estabilizando. Já o sensor 2 (distanciado de 585 mm do sensor 1), forte provavelmente, teria registrado as ondas já estabilizadas.

Deve-se ressaltar que o número de Froude do escoamento uniforme $F_r = 2,25$ é superior ao número de Froude mínimo $F_{rmin} = 0,17$ necessário para geração de *roll wave* (MACIEL *et al.*, 2013).

No tocante às *roll waves* naturais, tais instabilidades podem ter sido geradas, a partir de vibrações/frequências no aparato experimental ou alguma perturbação externa, seja ela proporcionada pelo sistema de recalque, ou até mesmo proveniente de estruturas anexadas ao canal (escada de acesso, treliças de sustentação etc.). Também como grande efeito contribuinte para a geração/evolução do fenômeno foi o comprimento de canal de 10 m, onde tais instabilidades encontram comprimento de pista suficiente para evoluírem (MONTUORI, 1963; DI CRISTO; VACCA, 2010).

A frequência dita dominante do escoamento foi determinada a partir da transformada de Fourier referente aos dados experimentais, por meio do espectro de onda, como mostra a Figura 23b.

Quanto ao espectro de onda, verifica-se que as ondas obtidas neste caso foram geradas por uma frequência dominante de aproximadamente 1,12 Hz, sendo essa inferior à frequência de corte ($f < f_c$) determinada para esse caso 1 como $f_c = 4,62 \text{ Hz}$, em conformidade ao critério estabelecido por Ferreira *et al.*, (2014) para geração de *roll waves*. A Tabela 3 contém as propriedades das *roll waves* naturais medidas.

Tabela 3: Tabela de dados das propriedades *roll waves* para inclinação de 6,2° e rotação de 350 rpm

| Propriedades das <i>Roll waves</i> | | | |
|---|----------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| Velocidade de propagação $U(m/s)$ | Amplitude $h(m)$ | Comprimento $\lambda(m)$ | Período $T(s)$ |
| 1,44 ± 6,3% | 0,0106 ± 0,8% | 1,28 ± 6,05% | 0,89 ± 0,5% |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Neste ensaio, a velocidade de propagação da onda para essa rotação não foi calculada, pois as ondas registradas pelo sensor 1 ainda não estavam totalmente estabilizadas em amplitude.

Ainda na mesma inclinação de 6,2°, agora com acréscimo de rotação, também puderam ser vistas *roll waves* naturais evoluindo no canal. Nesse ensaio, a rotação da bomba foi de 500 rpm, atingindo vazão de 3,16 l/s e lâmina do escoamento uniforme de 10,24 mm, conforme Tabela 1.

As propriedades reológicas foram aferidas, a partir das amostras coletadas do fluxo de lama em trânsito no canal, juntamente com as instabilidades sendo geradas. A Tabela 4 apresenta as propriedades reológicas do fluido aferidas.

Tabela 4: Tabela de dados das propriedades do fluido para inclinação 6,2° e 500rpm.

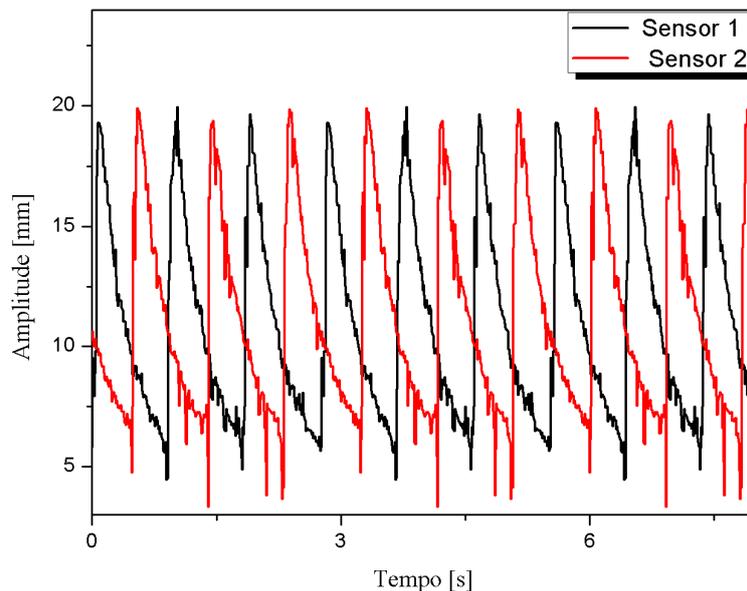
| Propriedades do fluido teste | | | | |
|---|--------------------------------------|---|--|---|
| Massa específica [kg/m ³] | Tensão Crítica [Pa] | Índice de consistência [Pa.s ⁿ] | Índice de escoamento [-] | Taxa de deformação [s ⁻¹] |
| 1320,8 | 5,59 | 2,87 | 0,29 | 200 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

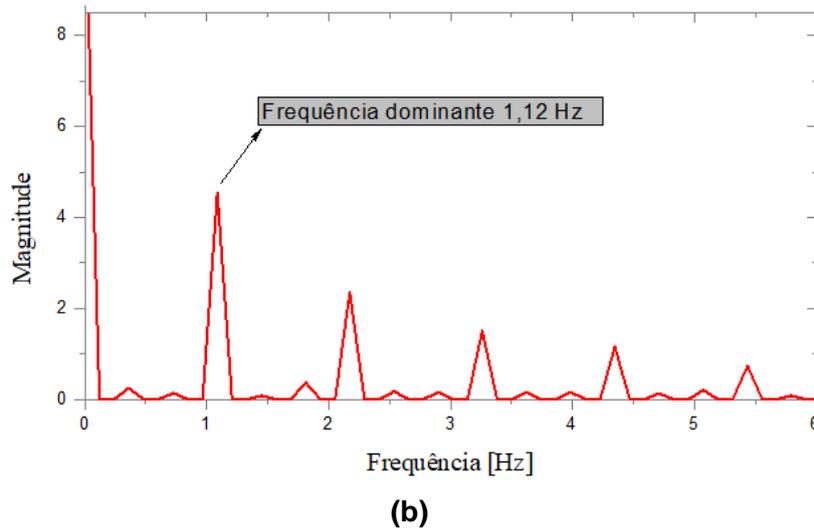
O filtro utilizado para obter o valor numérico dos parâmetros reológicos seguiu a mesma metodologia para o primeiro caso, porém com valores de taxa de deformação de trabalho maiores, devido ao aumento da rotação da bomba hidráulica (350 rpm para 500 rpm) que, por conseguinte, aumenta a velocidade superficial do escoamento. Sendo assim os dados foram filtrados em taxa de deformação, analisando na curva de fluxo a região entre $1 \leq du/dh \leq 200 \text{ s}^{-1}$. Ressalta-se que os parâmetros reológicos são extremamente sensíveis, uma vez que quaisquer alterações na taxa de deformação acarretam variações significativas daqueles parâmetros.

A Figura 24 apresenta uma sequência de 9 ondas com formato e padrão definidos (amplitude, comprimento e celeridade) em domínio temporal, registradas pelos sensores 1 e 2.

Figura 24: Resultado experimental de amplitude de onda sendo geradas de forma “natural” com canal inclinado em $6,2^\circ$ e vazão de $2,16 \text{ l/s}$, registradas pelo sensor 1 e 2, (b) Espectro de frequência do sinal processado para inclinação de $6,2^\circ$ e rotação da bomba de 500 rpm.



(a)



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A partir da Figura 24a pôde-se observar que a onda gerada naquelas condições possuía as mesmas características descritas pela literatura. Deve-se ressaltar que o número de Froude do escoamento uniforme $F_r = 3,17$ é superior ao número de Froude mínimo ($F_{r_{min}} = 0,13$) necessário para geração de *roll wave* (MACIEL *et al.*, 2013).

Cabe salientar que o padrão (formato) das ondas com as condições de inclinação e vazão propostas ($6,2^\circ$, $3,16$ l/s), apresenta perfis mais estáveis quando comparados com o padrão de onda na rotação de 350 rpm. Neste caso, os períodos e as amplitudes se mantiveram uniformes (estáveis) tanto para as medidas do sensor 1 quanto sensor 2. O sucesso desse ensaio é atribuído ao aumento de rotação da bomba hidráulica que, acarretou no aumento da vazão em 55,6% em relação ao experimento realizado com a rotação da bomba em 350 rpm. .

Quanto ao espectro da onda (Fig. 24b), verifica-se que as ondas obtidas neste caso apresentam espectros de frequências da mesma ordem do caso anterior, e foram geradas por uma frequência dominante de aproximadamente $1,12$ Hz, sendo essa também inferior à frequência de corte ($f < f_c$) determinadas para este caso ($f_c = 4,96$ Hz).

O espectro da onda na rotação de 500 rpm (Fig.24b) apresenta um padrão definido, com surgimento de harmônicas múltiplas da frequência dominante, sendo que a energia de cada uma dessas harmônicas decai à medida em que as mesmas se distanciam da frequência dominante. A Tabela 5 contém as propriedades do fluido e das *roll waves* medidas

Tabela 5: Tabela de parâmetros de onda, para inclinação 6,2° e 500 rpm.

| Propriedades das <i>roll waves</i> | | | |
|---|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Velocidade de propagação $U(m/s)$ | Amplitude $h (m)$ | Comprimento $\lambda (m)$ | Período $T(s)$ |
| 1,29 ± 7,18% | 0,013 ± 0,6% | 1,15 ± 7,1% | 0,89 ± 0,6 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Como supracitado, o aumento da rotação proporcionou maior estabilidade no tocante aos parâmetros de onda (amplitude, comprimento, velocidade de propagação), e, por conseguinte nos perfis das *roll waves* os perfis mais estáveis. Sendo assim, nesse experimento, foi possível determinar mais um parâmetro importante de onda, que é a velocidade de propagação. A velocidade de propagação da onda foi calculada analisando no domínio temporal, onde se verificou o tempo percorrido pela mesma (estável em amplitude), passando pelos sensores 1 e 2 de distância conhecida. Também essa velocidade pode ser estimada a partir da equação 14.

$$U = 1 + \frac{1}{F_r} \quad (14)$$

Em que:

U = Velocidade de propagação da *roll wave* [m/s]

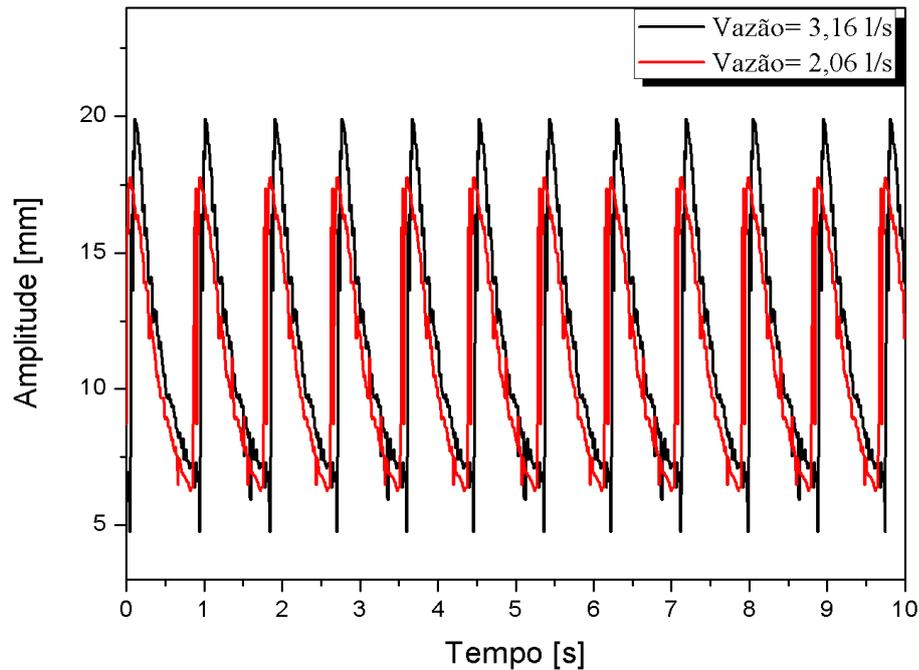
F_r = Número de Froude do escoamento.

Deve-se ressaltar que o valor de velocidade de propagação da onda calculado experimentalmente foi 15% maior do que o valor de velocidade superficial, resultado que está em consonância com trabalhos na literatura (THOMAS, 1937; BROCK, 1969)

8.2.2.1 Influência do número de Froude do escoamento nos parâmetros de onda

Uma comparação pertinente a se fazer é analisar a influência da vazão e do número de Froude sobre o perfil das *roll waves* geradas para os dois experimentos mostrados (350 rpm e 500 rpm) como ilustra a Figura 25.

Figura 25: Comparativo entre as ondas geradas para vazões de 2,06 e 3,16 l/s, com os respectivos números de Froude 2,25 e 3,14.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A partir dos resultados (Fig. 25), pôde-se observar que com aumento da rotação da bomba, aumentou-se o número de Froude e, visivelmente, um aumento de amplitude da onda (da ordem de 3 mm), resultados que estão em consonância com os da literatura (CUNHA,2013).

Ademais, ressalta-se que as ondas geradas apresentam uma leve perda de sinal na região de descida em ambas as rotações, essa perda é atribuída à dificuldade do próprio transdutor ultrassônico em medir essa região da onda, região onde o perfil está em uma zona lentamente decrescente, se preparando para um novo salto hidráulico, ou seja, como se a superfície nessa região não estivesse totalmente definida. Mesmo com essa pequena perda de sinal, o transdutor ultrassônico se mostrou eficiente em medir amplitudes diminutas de onda de 10 e 13 mm. Cunha (2013) utilizando o mesmo sistema de medição mediu amplitudes menores do que essas, da ordem de 3 mm, mostrando que esse modo de sistema de medição é bastante eficiente como sistema não intrusivo, e caracterização do fenômeno sistema óptico (fotônica), também utilizado pelo grupo de pesquisa, tem remediado esse tipo de problema.

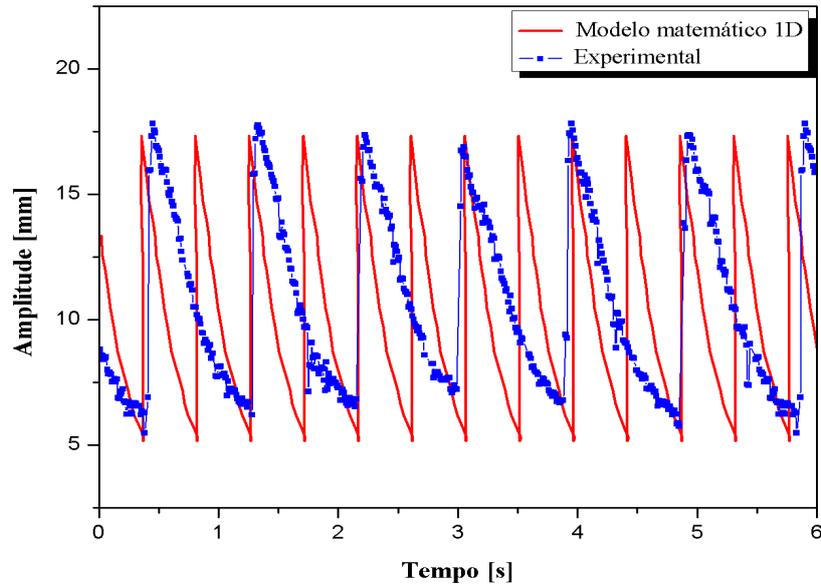
8.2.3 Comparação com modelo matemático 1D

Neste item são apresentadas as comparações dos resultados experimentais com um modelo matemático (1D) estabelecido e desenvolvido pelo grupo de pesquisa a partir das equações de águas rasas (*shallow water equations*), com modelo reológico de Herschel Bulkley na parte viscosa do tensor de tensões. O modelo de 1ª ordem é capaz de fornecer a parte contínua da solução da equação da *roll wave*, cujo trem de ondas é formado quando da junção das partes contínuas, por choques, aplicando conservação da massa e quantidade de movimento através do choque (condições de Rankine Hugoniot). Trata-se do mesmo modelo utilizado por Maciel *et al.*, (2017) e Ferreira *et al.*, (2018) para simular *roll wave* geradas em gel de carbopol e fluido lamoso respectivamente. Os resultados do modelo matemático foram obtidos a partir de simulações numéricas utilizando o software Matlab.

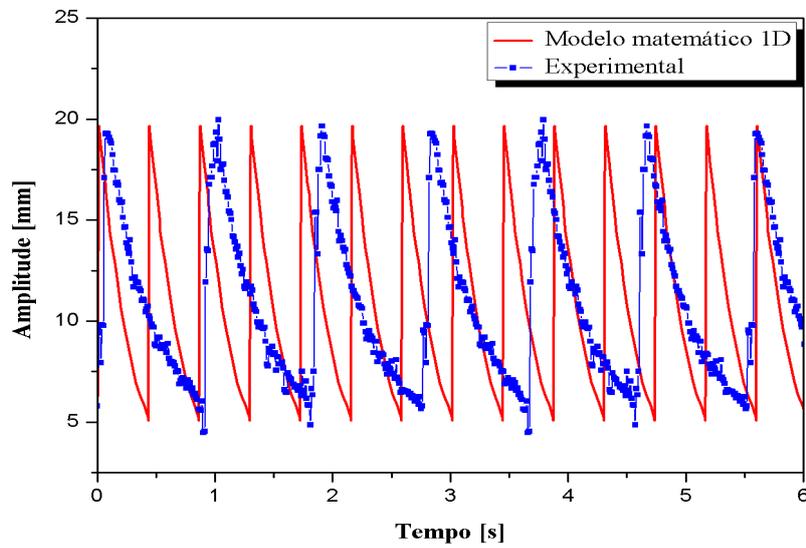
O modelo 1D exige como parâmetro de entrada a inclinação do canal (θ), as propriedades reológicas do fluido (τ_c, k_n, n), lâmina do escoamento uniforme (h_0) e o número de Froude (F_r) do escoamento base que, por sua vez, depende da velocidade média do escoamento (\bar{u}). Esse modelo fornece como parâmetros de saída: a amplitude da *roll wave* (h), velocidade de propagação da *roll wave* (U), período (T) e comprimento de onda (λ).

Na Figura 26 (a e b) são apresentadas as comparações entre os resultados experimentais e o modelo matemático 1D, referentes a segunda campanha experimental, casos 1 (inclinação $6,2^\circ$ vazão 2,06 l/s, 350 rpm) e 2 (inclinação $6,2^\circ$ vazão 3,12 l/s 500 rpm), respectivamente.

Figura 26: Comparações entre os resultados experimentais e os resultados do modelo matemático 1D.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Na tabela 6 são apresentadas as comparações quantitativas referentes aos resultados apresentados na (Fig.26).

Em que: U é a velocidade de propagação da *roll wave*, h é a amplitude, λ é o comprimento de onda e T o período.

Tabela 6: Comparações dos resultados experimentais com modelo matemático 1D.

| Propriedades das <i>roll waves</i> | Caso 1 | | | Caso 2 | | |
|--|-----------------------------|----------------------|-------------|---------------------------|----------------------|-------------|
| | Resultados experimentais | Modelo matemático | Erro [%] | Resultado experimental | Modelo matemático | Erro [%] |
| U [m/s] | 1,44 | 1,10 | 30,90 | 1,29 | 1,45 | 11,03 |
| h [m] | 0,0106 | 0,0119 | 12 | 0,013 | 0,0139 | 6,92 |
| λ (m) | 1,28 | 0,50 | 60,9 | 1,15 | 0,63 | 45,22 |
| T (s) | 0,89 | 0,47 | 47,19 | 0,89 | 0,44 | 50,5 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Através da Figura 26, pode-se observar que os resultados experimentais estão condizente com os resultados do modelo matemático 1D em relação ao perfil íngreme das ondas. Quanto à amplitude das *roll waves* naturais, observou-se que experimentalmente houve pequenas variações nas amplitudes e o modelo matemático 1D forneceu amplitudes de ondas constantes, observando-se, no entanto, erros da ordem 12% (caso 1) e de 6,92% (caso 2)

Quanto ao período das *roll waves*, podem-se observar erros elevados tanto para o Caso 1 quanto para o Caso 2, de 47,19% e 50,5 %, respectivamente. Isto pode ser explicado devido à limitação do modelo matemático (1D) em simular *roll wave* em escoamentos laminares com número de Reynolds de 486,95 e 916,12, para os Casos 1 e 2, respectivamente. Maciel *et al.*, (2017) observaram erros menores do que 10% para número de Reynolds de 12,8. Além disso, a imposição do choque para a resolução do modelo matemático 1D também pode ter levado a erros no cálculo do período de ondas, pois nos dois casos as profundidades mínimas para as *roll waves* foram impostas (do experimento) e os períodos e comprimentos das ondas foram calculados.

8.3 TERCEIRA CAMPANHA EXPERIMENTAL (ESTABILIZAÇÃO SISTEMÁTICA DO FLUIDO TESTE).

Mesmo com o relativo sucesso da segunda campanha experimental, no tocante à geração do fenômeno *roll wave*, persistia certa incerteza na eficiência do tensoativo para estabilização da solução argilosa, para um grande intervalo de tempo (dias). No resultado apresentado no Capítulo 7.2.2 fica evidente a forte contribuição do tensoativo para geração do fenômeno, pois o mesmo promoveu efeito estabilizante à mistura, porém em curto prazo.

Após o intervalo de 4 dias a solução argilosa não se manteve mais com as mesmas propriedades iniciais, no entanto os experimentos da segunda campanha foram realizados quando a mistura ainda estava com as propriedades reológicas estáveis. Agora nessa 3ª campanha, fez-se um estudo para encontrar um estabilizante alternativo que pudesse ter, de fato, maior eficiência, no tocante à estabilização química dos parâmetros reológicos da mistura argilosa, e assim realizar novos experimentos.

Essa etapa trouxe, portanto, uma contribuição significativa para a pesquisa, pois é de grande interesse, no meio industrial, manter as propriedades viscoplásticas das soluções à base de argila, como na engenharia do petróleo (para fluidos de perfuração), na indústria da cerâmica em aplicações comerciais, etc.

8.3.1 Estabilização da mistura água+argila caulínica utilizando goma xantana

É sabido que as soluções argilosas são misturas complexas que, de um ponto de vista químico, podem assumir aspectos de suspensão, dispersão coloidal ou emulsão. Isso acontece, pois a grande maioria das partículas com dimensões coloidais apresenta carga superficial residual. No caso dos argilominerais, essa carga é resultado das substituições isomórficas, quando dispersas num líquido polar (água), a carga superficial dessas partículas pode ser eletricamente neutralizada através de contra-íons existentes na solução, formando a conhecida dupla camada elétrica (SOUZA *et al.*, 2017).

De modo simplificado, a dupla camada elétrica é composta por uma camada fixa de íons (mais fortemente ligados à superfície) e uma camada difusa de íons

(menos fortemente ligada). Uma vez em equilíbrio, todas as partículas do sistema adquirem a mesma carga superficial, assim sendo, é o processo de repulsão eletrostática o fator responsável pela manutenção da estabilidade do sistema.

Assim exposto, nessa etapa da pesquisa fez-se o uso de um biopolímero para estabilização do fluido teste, conhecido na literatura por goma xantana. A goma xantana é utilizada na indústria do petróleo e tem por função aumentar a viscosidade de fluidos de perfuração de base aquosa, trazendo maior estabilidade à mistura e evitando o estado defloculação, ou seja, traz um aspecto homogêneo para mistura evitando que a água se dissocie da argila.

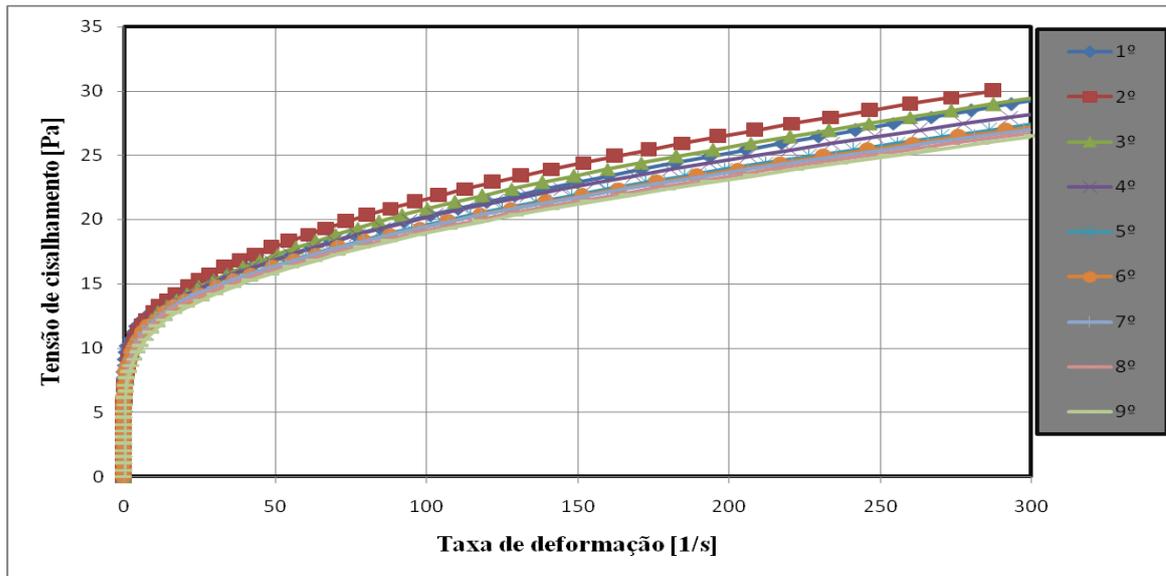
Inicialmente foram realizados testes para encontrar a concentração ideal do biopolímero que garantisse eficiência quanto à estabilidade da solução argilosa na concentração de sólido de 25% em volume.

No preparo das amostras evidenciou-se o quão minucioso deve ser a adição de goma xantana na mistura. Mesmo em concentrações baixas (5 g em 1 litro), a solução argilosa apresentava aspecto de “massa” de difícil agitação e quase impossível de escoar. Após várias tentativas, foi verificado que a partir de concentração de 0,5 g de goma xantana por litro resultava em estabilização (relativa) química do fluido, resultados que se encontram no Apêndice C dessa dissertação.

Constatada a grande eficiência do biopolímero, e pensando no consumo de argila que iria ser gasto para tornar a fazer os experimentos (375 kg de argila para um volume de 650 l), foram investidos testes para encontrar a concentração ideal de argilomineral, que após a adição do biopolímero, reproduzisse uma mistura com certa fluidez, cujos parâmetros reológicos fossem próximos dos ensaios realizados na segunda campanha.

Após tentativas, foi evidenciado que na concentração de 10% de água+argila caulínica, e 0,5% de goma xantana, a mistura argilosa mantinha as propriedades estáveis e dentro da região de geração de *roll waves*. A Figura 27 elucida o ótimo desempenho do estabilizante, na mistura utilizada nos experimentos. No apêndice C é mostrado mais detalhadamente o procedimento de mistura, e as tentativas até chegar na concentração de sólidos ideal.

Figura 27: (a) Curva de fluxo da mistura água+argila caulínica analisados em intervalos de 9 dias para concentração de 10% de argila caulínica (b) Parâmetros reológicos obtidos das curvas de fluxo.



(a)

| Dias de repouso | τ_c [Pa] | k_n [Pa.s ⁿ] | n |
|-----------------|---------------|----------------------------|------|
| 1º | 9,65 | 0,88 | 0,54 |
| 2º | 6,41 | 2,44 | 0,39 |
| 3º | 6,93 | 1,98 | 0,42 |
| 4º | 6,94 | 2,04 | 0,40 |
| 5º | 6,05 | 2,33 | 0,38 |
| 6º | 6,56 | 2,10 | 0,39 |
| 7º | 6,36 | 2,29 | 0,39 |
| 8º | 6,70 | 1,98 | 0,40 |
| 9º | 4,75 | 2,89 | 0,34 |

(b)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 27a pode-se observar que as curvas de fluxos estão praticamente sobrepostas umas às outras, e os parâmetros reológicos se mantiveram estáveis durante intervalo de dias como mostra na Figura 27b, comprovando a boa eficácia do biopolímero. Ressalta-se que o biopolímero tem forte contribuição no tocante à redução de sólidos na mistura, sendo que para obter os parâmetros reológicos da mesma ordem de misturas anteriores, nessa bateria houve uma redução de 50% de argila.

8.3.2 Resultados e discussão da terceira campanha

O resultado que acompanha essa terceira campanha experimental é mostrado com o canal inclinado em $9,2^\circ$, com valor de vazão de 2,90 l/s e uma lâmina de escoamento uniforme de 10,55 mm conforme Tabela 1.

As propriedades reológicas foram aferidas, a partir das amostras coletadas do fluxo de lama em trânsito no canal, juntamente com as instabilidades sendo geradas. A Tabela 7 apresenta as propriedades reológicas do fluido aferidas.

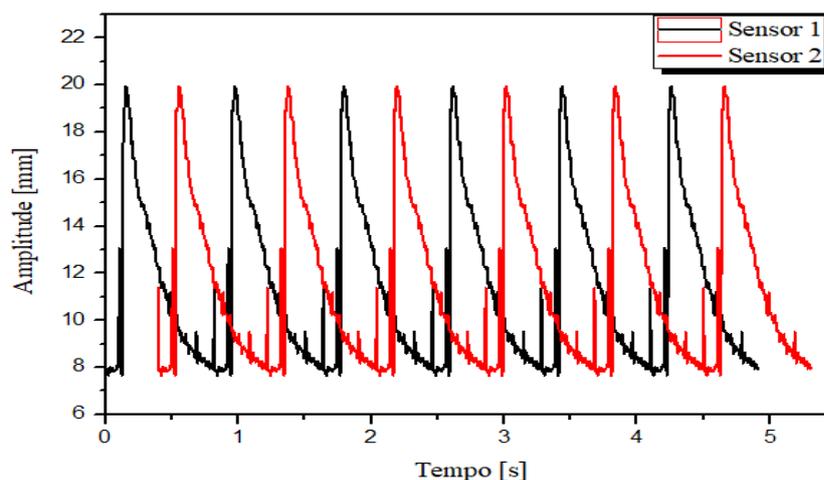
Tabela 7: Tabela de propriedades do fluido para inclinação $9,2^\circ$ e 350 rpm.

| Propriedades do fluido teste | | | |
|--|------------------------|---|--------------------------------|
| Massa específica [kg/m ³] | Tensão Crítica [Pa] | Índice de consistência [Pa.s ⁿ] | Índice de escoamento [-] |
| 1100 | 5,8 | 1,94 | 0,32 |

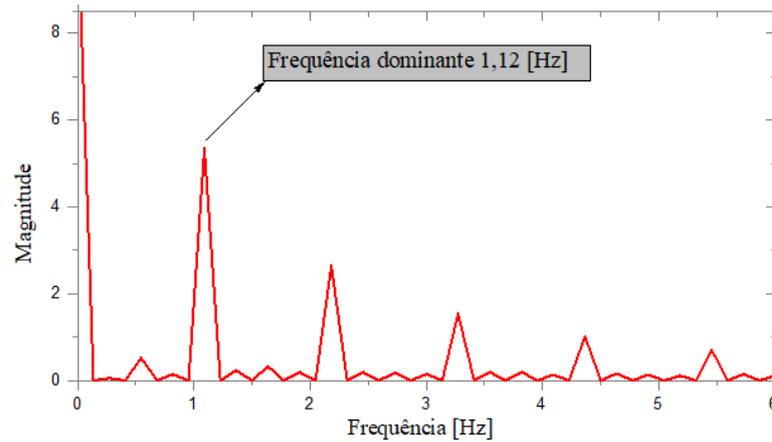
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

A partir dessas condições, foram observadas *roll waves* naturais evoluindo a jusante do canal. A Figura 28 apresenta uma sequência de 6 ondas com formato e padrão definido (amplitude, comprimento e celeridade) no domínio temporal e seus respectivos espectros, registrados pelos sensores 1 e 2.

Figura 28: Resultado experimental de amplitude de onda sendo geradas de forma “natural” com canal inclinado em $9,2^\circ$ e vazão de 2,90 l/s, registradas pelos sensores 1 e 2, (b) Espectro de frequência do sinal processado para inclinação de $9,2^\circ$ e rotação da bomba de 350 rpm.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A partir da Figura 28a pode-se observar que as ondas geradas nessa condição possuem as mesmas características dos ensaios anteriores, com frentes bem acentuadas e padrão definido, ondas no formato “dente de serra”. Ademais, as ondas geradas estão em conformidade com os critérios de geração, sendo o número de Froude do escoamento uniforme ($F_r = 3,13$) superior ao número de Froude mínimo ($F_r = 0,20$) necessário para geração de *roll waves* (Maciel *et al.*, (2013).

Quanto ao espectro de onda (Fig. 28b), o mesmo apresentou frequência de 1,12 Hz, abaixo da frequência de corte $f_c = 4,26$, resultado este em conformidade com os critérios estabelecidos por (FERREIRA 2011). A Tabela 8 contém as propriedades das *roll waves* no qual o fenômeno foi gerado.

Tabela 8: Tabela de parâmetros de onda, para inclinação $9,2^\circ$ e 350 rpm.

| Propriedades das <i>Roll Waves</i> | | | |
|---|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Velocidade de propagação $U(m/s)$ | Amplitude h médio (m) | Comprimento λ (m) | Período $T(s)$ |
| $1,24 \pm 1,5\%$ | $0,0125 \pm 0,6\%$ | $1,11 \pm 1,30\%$ | $0,92 \pm 0,5\%$ |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

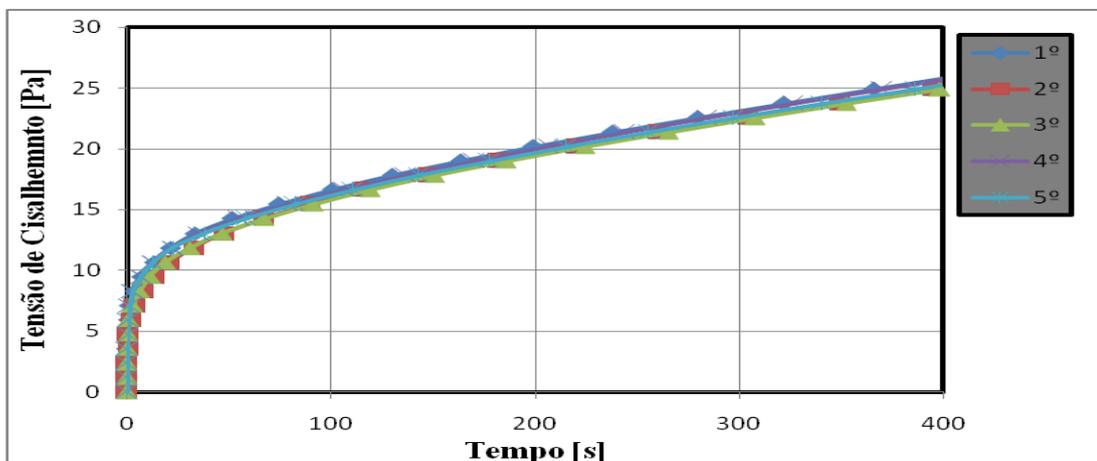
Como elucidado na Tabela 8, mesmo com a redução da concentração de sólidos de 25% para 10%, os parâmetros reológicos se mantiveram da mesma ordem dos

ensaios anteriores. A única variação considerável, e já esperada, foi da massa específica de 1320 para 1100 kg/m³, redução atribuída à concentração.

Vale observar que com o fluido quimicamente estabilizado, as amplitudes e período de ondas estiveram constantes durante os 5 segundos de experimento, para o qual foi possível calcular todos os parâmetros de onda.

Os procedimentos adotados para obter os parâmetros reológicos e a velocidade de propagação da onda foram os mesmos adotados pela segunda campanha experimental. Nesse experimento os parâmetros reológicos se mantiveram estáveis durante toda bateria de ensaio como mostra a Figura 29.

Figura 29: (a) Curva de fluxo do fluido teste água+argila caulínica+goma xantana durante procedimento experimental. (b) Parâmetros reológicos obtidos das curvas de fluxo.



(a)

| τ_c [Pa] | k_n [Pa. s ⁿ] | n |
|---------------|-----------------------------|----------|
| 4,54 | 0,92 | 0,53 |
| 4,33 | 0,70 | 0,57 |
| 4,18 | 0,86 | 0,53 |
| 4,41 | 0,98 | 0,52 |
| 4,69 | 0,78 | 0,55 |

(b)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Assim, fecha-se a terceira campanha experimental, tendo atingido o objetivo em realizar ensaios de *roll waves* estáveis com fluido teste estável ao longo do tempo.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No que tange à geração do fenômeno *roll wave*, o aparato experimental (canal de 10 m) mostrou-se eficiente, possibilitando gerar o fenômeno em condições controladas de laboratório, seja sob a ação de perturbações forçadas, seja na ausência destas (*roll waves* naturais). Isso foi possível, uma vez que as instabilidades geradas encontravam comprimento suficiente de canal para se desenvolverem, atingindo sua forma estável em amplitude, comprimento e velocidade de propagação. O aparato experimental também possibilitou a realização de ensaios dinâmicos em diferentes cenários (inclinação e vazão), permitindo explorar adimensionais de interesse; Reynolds, Froude; e a boa faixa de frequências geradoras de *roll waves*.

Além da ação exploratória do canal, pré existente no Laboratório, melhorias e adequação à geração e controle do fenômeno, um desafio significativo foi identificar e testar a química estabilizadora da mistura lamosa que não perdesse, ao longo do tempo, suas propriedades reológicas e que atendesse, para as condições de laboratório (canal, bomba, gerador de sinal, alto-falante), às condições de geração do fenômeno.

Como apresentado na dissertação, o fluido teste padrão (água+argila caulínica) apresentou comportamento característico não newtoniano de Herschel Bulkley, porém com estabilização química comprometida, qual seja em curto espaço de tempo perdia propriedades viscoplásticas, que influenciavam diretamente na dinâmica do escoamento.

Como apresentado nos resultados, ficou evidente a forte contribuição do tensoativo Tween 80 na estabilização da mistura água + argila para realizar os experimentos. Porém no longo prazo, o tensoativo também não se mostrou totalmente eficiente, havendo queda (ainda que mais gradual) das propriedades reológicas da mistura, o que levou a se investir em outro surfactante – a goma xantana.

Quanto ao biopolímero (goma xantana), obteve-se maior eficiência no tocante à estabilização química da mistura, quando comparado com tensoativo Tween 80. Como elucidam os resultados da Figura 26, a goma xantana estabilizou a mistura argilosa durante cerca de 9 dias, e durante o experimento as propriedades reológicas do fluido se mantiveram praticamente estáveis. Pode-se observar que

quanto maior for a concentração de sólidos da mistura, mais sensível é a adição de goma xantana, como mostram os resultados no Apêndice B.

Quanto às amplitudes de onda (Fig 25), observou-se que com aumento da rotação da bomba (vazão), as *roll waves* apresentaram maiores amplitudes, resultados que estão em consonância com a literatura (Cunha 2013).

Quanto ao sistema de quantificação de dados, o sistema ultrassônico mostrou bom desempenho em aferir as frentes íngremes das ondas, medindo amplitudes diminutas (10 a 13 mm), sem perdas significativas do fenômeno, com erros da ordem de $\pm 0,2$ mm. Na mesma direção, quanto ao sensor de barreira utilizado para aferir a velocidade superficial e conseqüentemente a vazão do escoamento na terceira campanha, se mostrou bastante eficiente, pois o mesmo registrava valores de tensão a cada 0,01 s. Ademais, ressalta-se que o uso do sensor de barreira minimiza o uso de instrumentos convencionais como cronômetros, os quais acarretam maiores erros de medidas da ordem 0,2 s, que se somam aos erros advindos do operador (tempo de reação).

A modelagem numérica, proposta por Ferreira (2013) mostrou-se eficiente nas confrontações numérico-experimentais dos principais parâmetros de onda, principalmente em relação à amplitude, com erros inferiores a 13%. Em contrapartida, quanto ao período de onda, obtivemos erros consideráveis, o que poderia estar atrelado à limitação do modelo em analisar escoamentos (mesmo em regime laminar) com números de Reynolds mais expressivos na faixa de 400 a 1000. Ressalta-se que dados obtidos por Cunha (2013) mostraram bom ajuste numérico-experimental tanto em amplitude como em período para ensaios com número de Reynolds da ordem de 13.

Por fim, a metodologia exposta na dissertação deixa um caminho promissor para a realização de novos experimentos com escoamentos laminares, sobretudo a partir da definição de uma mistura quimicamente estável e garantidora das propriedades reológicas do fluido teste por um período razoável de tempo.

10 PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se a continuação deste trabalho através de abordagem experimental e comparativa com dados teóricos e numéricos, amparados na metodologia desenvolvida nesse trabalho.

Para tanto, seriam recomendadas as seguintes ações em prol da geração e controle de *roll waves*:

1º Melhorias na estrutura do canal – Devido à grande estrutura do canal de 10 m de comprimento sobre pilar central, vibrações provenientes das subestruturas (escada de acesso, treliças de sustentação etc.), acopladas ao canal têm influenciado na dinâmica do escoamento. Assim é proposto desacoplar (isolar) o canal de ensaios de toda estrutura de sustentação, e rebaixá-lo de alguns metros e criar dois novos pontos de apoio (montante com pistão, jusante com pivotagem);

2º Melhorias no sistema de declividade do canal – Deve-se adaptar um novo atuador hidráulico, com comprimento de haste suficiente para explorar inclinações mais íngremes;

3º Modificação do sistema de perturbação – recomenda-se projetar um amplificador de sinal dedicado e específico (de baixa frequência) para movimentar a bobina do alto-falante, a fim de se obter um comportamento mais próximo possível de um sinal pulso com maior potência, haja vista que recentemente o Grupo adquiriu um osciloscópio/gerador de sinal de alta performance, o que possibilitará melhor controle das frequências de perturbação impostas.

4º Mudança na sucção da bomba hidráulica e reservatório do fluido teste – Devido ao volume do reservatório que abriga o fluido teste (1,5 m³), em conjunto com elevada cota de sucção da bomba, grandes quantidades (volumes) do fluido teste devem ser confeccionados, para que possa manter a bomba em operação (afogada). Pensando nessa problemática, deverá ser projetado outro reservatório cerca de 6 a 8 vezes menor e readaptar o sistema de sucção da bomba hidráulica nesse novo reservatório;

5º Otimização da mistura do fluido teste – Devido à difícil interação entre a água e o biopolímero goma xantana, deve-se projetar um misturador mecânico compatível com novo volume do reservatório;

6º Adicionar material particulado na mistura - Com intuito de caracterizar o fenômeno *roll waves* em condições semelhantes, às corridas de lamas, sugerem-se

novas misturas com água+argila+areia+goma xantana, atentando-se à necessidade de garantia de estabilidade dos parâmetros reológicos ao longo do tempo, assim como, a influência do material inerte nas propriedades das *roll waves*;

7º Testar novamente a adequabilidade do modelo matemático/numérico 1D às *roll waves* geradas nos fluidos supracitados.

REFERÊNCIAS

- ARAI, M.; HUEBLE, J.; KAITNA, R. Occurrence conditions of *roll waves* for three grainfluid models and comparison with results from experiments and field observation. **Geophysical Journal Internation**, Lausanne, v. 195. n. 3, p. 1464-1480, 2013
- ARMANINI, A.; RECCHIA, N. Experimental analysis of *roll waves* in overconcentrated flow. *In: INTERPRAEVENT: Disaster Mitigation os Debris Flow, Slope Failures and Landslides*. Niigata: [s.n], 2006.
- AYDIN, T. B.; TORRES, C. F.; KARAMI, H.; PEREYRA, E.; SARICA, C. On the characteristics of the *roll waves* in gas-liquid stratifies-wavy flow: A two-dimensional perspective. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Philadelphia,v. 65, p. 90-102, 2016
- BERTI, M.; GENEVOIS, R.; SIMONI, A.; TECCA, P. R. Field observations of a debris flow event in the dolomites. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 29, n. 3-4, p. 265–274, 1999
- BERTI, M.; GENEVOIS, R.; LAHUSEN, R.; SIMONI, A.; TECCA, P. R. Debris flo monitoring in the acquabona watershed on the dolomites (italian alps). **Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere**, Amsterdam, v. 25,n. 9, p. 707–715, 2000.
- BRAGHIN, F.; CAZZULANI, G.; CINQUEMANI, S.; RESTA, F. Potential of FBG sensors for vibration control in smart structures. *In:IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONICS (ICM)*, 2013,Vicenza. **Proceedings [...]** Amsterdam: IEEE, 2013. 186-191.
- BRETAS, R. S.; D'ÁVILA, M. A. **Reologia de polímeros fundidos**. São Carlos: UFSCar, 2000. 257 p.
- BROCK, R. R. Development of roll-wave trains in open channels. **Journal Hydraulics Division**, New York, v. 95, p. 1401–1427, 1969.
- BRONZINO, J. D. **Biomedical engineering and instrumentation: basic concepts and applications**. Boston: PWS Engineering, 1995. 481p.
- CASTRO, A. L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. 2007. 303 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- CORNISH, V. **Waves of the sea and other waves**. London: Fisher Unwin, 1910.p. 303.
- COUSSOT, P. Steady, laminar, flow of concentrated mud suspensions in open channel. **Journal of Hydraulic Engineering**, New York, v. 32, n. 4, p. 535–559, 1994.

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

COUSSOT, P.; LAIGLE, D.; ARATTANO, M.; DEGANUTTI, A.; MARCHI, L. Direct determination of rheological characteristics of debris flow. **Journal of Hydraulic Engineering- ASCE**, Sacramento, v.124, n. 8, p 865-868, 1998.

CUNHA, E. F. **Implementação de aparato experimental para medição de instabilidades tipo roll waves em fluidos não-newtonianos**. 2013. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Ilha Solteira, 2013.

D'AVILA, M. A.; BRETAS, R. E. S. **Reologia de polímero fundidos**. 2. ed. São Carlos: Editora UFSCar, 2005. 257p.

DE BRITO BURITI, Bruna Michele Arruda et al. Influência do Silicato de Sódio na purificação de Argila Bentonítica por tratamento de hidrociclonagem. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, [s. l.], v. 12, n. 2, 2018.

EDWARDS, A. N.; GRAY, J. M. N. T. Erosion–deposition waves in shallow granular free-surface flows. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge, v. 762, p. 35–67, 2015.

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

FERREIRA, F.; MACIEL, G.; CUNHA, E.; GONÇALVES JUNIOR, V.; PERES, C. Medição de instabilidades na superfície livre de escoamentos laminares. *In*: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRAULICA, 18., Buenos Aires. **Anais [...]** Buenos Aires: [s. n.], 2018. p. 294-303.

FERREIRA, F.; MACIEL, G.; FIOROT, G.; CUNHA, E. Numerical analysis of roll waves generation on non-Newtonian fluids flowing down an inclined plane. *In*: **ADVANCED materials research**. [S. l.]: Trans Tech Publications, 2014. p. 160-167.

FIOROT, G. H. **Mitigação de riscos e catástrofes naturais**: análise numérico experimental de Roll waves evoluindo em canais inclinados. 2012. 187 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- Unesp, Ilha Solteira, 2012.

FIOROT, G.; FERREIRA, F. O.; DUPONT, P.; MACIEL, G. Roll-Waves Mathematical Model as a Risk-Assessment Tool: Case Study of Acquabona Catchment. **Journal of Hydraulic Engineering**, Reston, v. 144, 2018.

FORTERRE, Y.; POULIQUEN, O. Long-surface-wave instability in dense granular flows. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge, v. 486, p.21-50, 2003.

GALGANO, P. D. **Líquidos iônicos tensoativos**: correlação entre estrutura molecular e propriedades micelares de cloretos de 1, 3-dialquilimidazólio. 2012. Tese (Doutorado) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

GASPARI, E. F. **Simulação numérica de roll waves em canais fechados**. 2013 180 f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Petróleo) – Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 2013.

GRAEFF, O.; VALVERDE, Y. **Instituto superior do ministério público (AMPERJ):** diagnostico sobre eventos naturais extremos ocorridos no vale do Cuiabá. Brasília, DF: Embraero,2011

HERSCHEL, W. H.; BULKLEY, R. Model for time dependent behavior of fluids. In: PROC. **American Society of Testing Materials**. [S. l.: s. n.]: 1926. p. 621-629.

JEFFREYS, H. The flow of water in an inclined channel of rectangular section. **Phil Magazine**, Cambridge, v. 49, n. 293, p. 793-807, 1925.

LIU, J.; GOLLUB, J. P. Solitary wave dynamics of film flows. **Physics of Fluids**, New York, v. 6, n. 5, p. 1702–1712, 1994.

MACIEL, G. F. et al. Experimental apparatus for *roll wave* measurements and comparison with a 1D mathematical model. **Journal of Hydraulic Engineering**, Reston, v. 11, p. 100-130, 2017.

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

MACIEL, G. F.; SANTOS, H. K.; FERREIRA, F. O. Rheological analysis of water clay compositions in order to investigate mudflows developing in canals. **J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.**, Heidelberg, v. 31, n. 1, p. 64-74, 2009.

MACIEL, G. F.; CUNHA, E. F.; SAO, Y. T.; TONIATI, A.; FIOROT, G. H.; FERREIRA, F. O.; KITANO, C.; GONÇALVES, JUNIOR, V.P. Non-intrusive techniques to measure roll waves level evolving in a flume. In: RIVER FLOW-NINTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLUVIAL HYDRAULICS, 2018, Lyon. **Proceedings [...]** Lyon: [s. n.], 2018.

MELO, D. F. M. **Comportamento reológico de solos sujeitos a corridas de lama por liquefação estática**. 2014. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Argilas plásticas do tipo “Ball Clay”. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande, v. 9, n. 3, p. 118-124, 2014.

MINUSSI, R. B. **Rompimento de barreiras: análise experimental e numérica na previsão de velocidades de propagação de frentes de material hiperconcentrado**. 2007. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

MONTUORI, C. Discussion: stability aspect of flow in open channels. **Journal of the Hydraulics Division**, New York, v. 89, p. 264–273, 1963.

OLIVEIRA, I. R. *et al.* **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte, 2000. 195 p.

OSTWALD, W. About the rate function of the viscosity of dispersed systems. **Kolloid Z**, Heidelberg, v. 36, p. 99-117, 1925.

NG, C. O.; MEI, C. C. *Roll waves on a layer of fluid mud modelled as a power law fluid*. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge, v. 263, p. 151-184, 1994.

PEDLEY, T. J. BENSON, T. J. NEREM, R. M. Assesment of wall shear stress un arteries, applied to the coronary circulation. **Cardiovascular Research**, Oxford, v. 14, n. 10, p.v568-576, 1980.

SANTOS, F. L. **Estudo teórico-experimental em via de determinação de lei de atrito em escoamentos de fluidos hiperconcentrados**. 2003. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2003.

SANTOS, P.S. **Tecnologia de argilas aplicada às argilas brasileiras**. São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 1992. v. 1, 340p.

SENNA, J. A. *et al.* **Caracterização de argilas de utilização na indústria cerâmica por espectroscopia de reflectância**. [S. l.: s. n.], 2003.

SOUZA, G. S. de; LUPORINI, S.; RIGOLI, I. C. Caracterização reológica de suspensões argilosas salinas com goma xantana para fluidos de perfuração de poços de petróleo. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, p. 1-14, 2017.

SCHONFELD, B. **Roll waves in granular flows and debris flows**. Quebec: McGill University, 1996.

SCHRAMM, G. **Reologia e reometria: fundamentos teóricos e práticos**. São Paulo: Artliber, 2006. p. 234.

SHIROMA, P. H. **Estudo do comportamento reológico de suspensões aquosas de bentonita e CMC: influência da concentração do NaCl**. 2012. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 2012.

TAMBURRINO, A.; IHLE, C. F. *Roll wave appearance in bentonite suspensions flowing down inclined planes*. **Journal of Hydraulic Research**, Abingdon, v.51, n.3, p. 330–335, 2013

TONIATI, A. L. **Escoamentos pulsantes com superfície livre**: caracterização e sua ação em fundo de canais. [S. l.: s. n.], 2018.

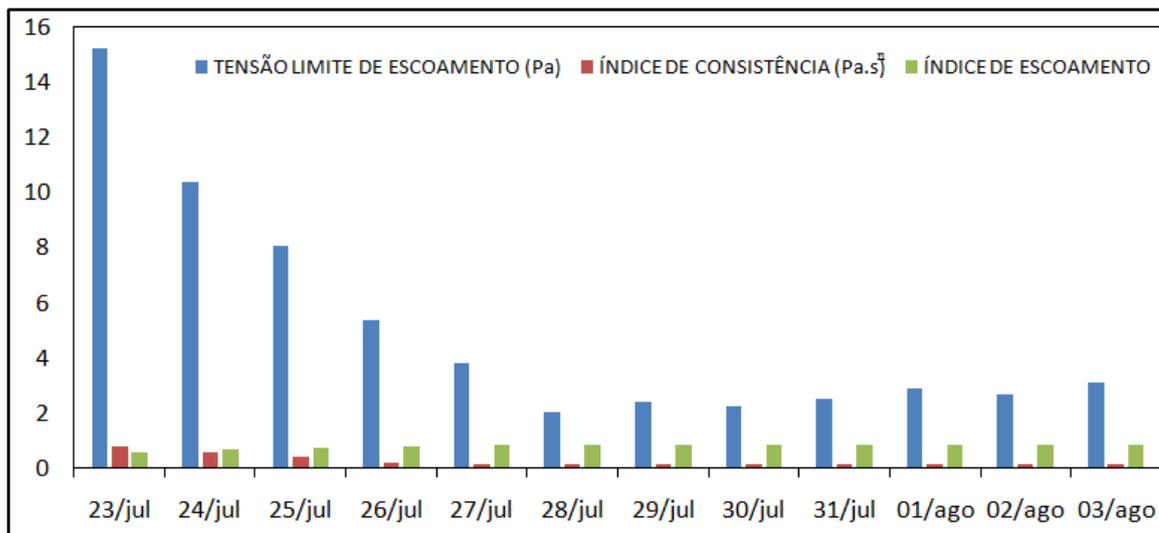
YANG, M.; GONG, J.; ZHANG, K.; FAN, D.; ZHAO, Y.; WANG, H. Establishment and experiment of ultrasonic measuring system for characteristic parameters of *roll waves* on slope surface. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, Beijing, v. 33, n. 3, p. 134–139, 2017. ISSN 1002-6819.

ZHAO, C.; GAO, J.; ZHANG, M.; ZHANG, T.; WANG, F. Response of *roll wave* to suspended load and hydraulics of overland flow on steep slope. **Catena**, Amsterdam, v. 133, p. 394–402, 2015.

APÊNDICE A: Estudo da estabilização química do fluido teste Água+argila caulínica+Tween80

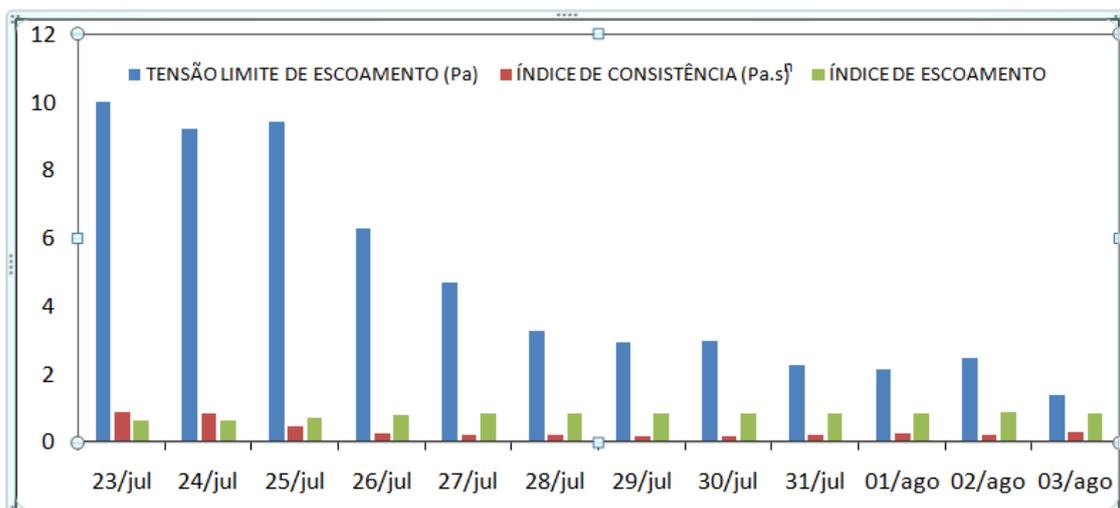
Os resultados apresentados nessa etapa são concernentes à adição de diferentes concentrações do tensoativo Tween 80 (em massa), em diferentes amostras. Cada amostra apresenta um volume de 0,5 l de água+argila caulínica com concentração em volume de 25%.

Figura A1: Mistura água comum + argila caulínica.



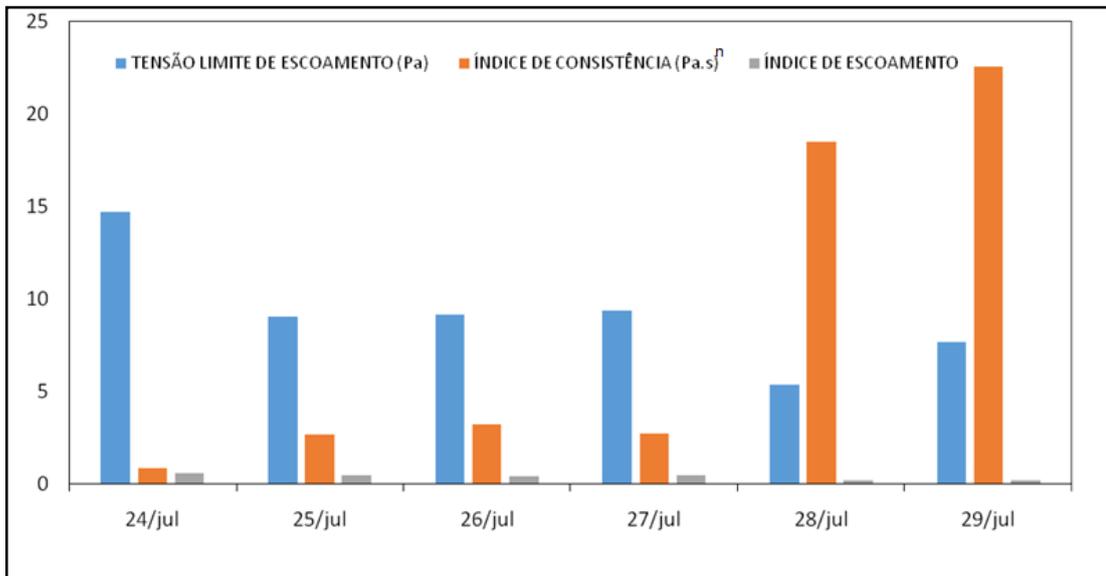
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura A2: Mistura água deionizada + argila caulínica.



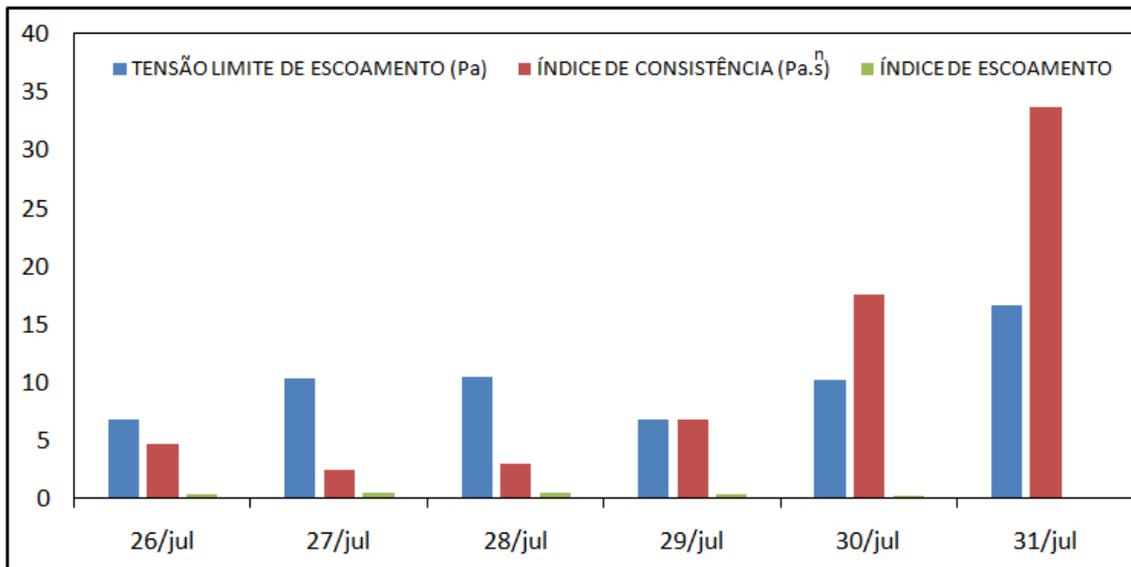
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura A3: Mistura água comum + argila caulínica + 1% Tween 80.



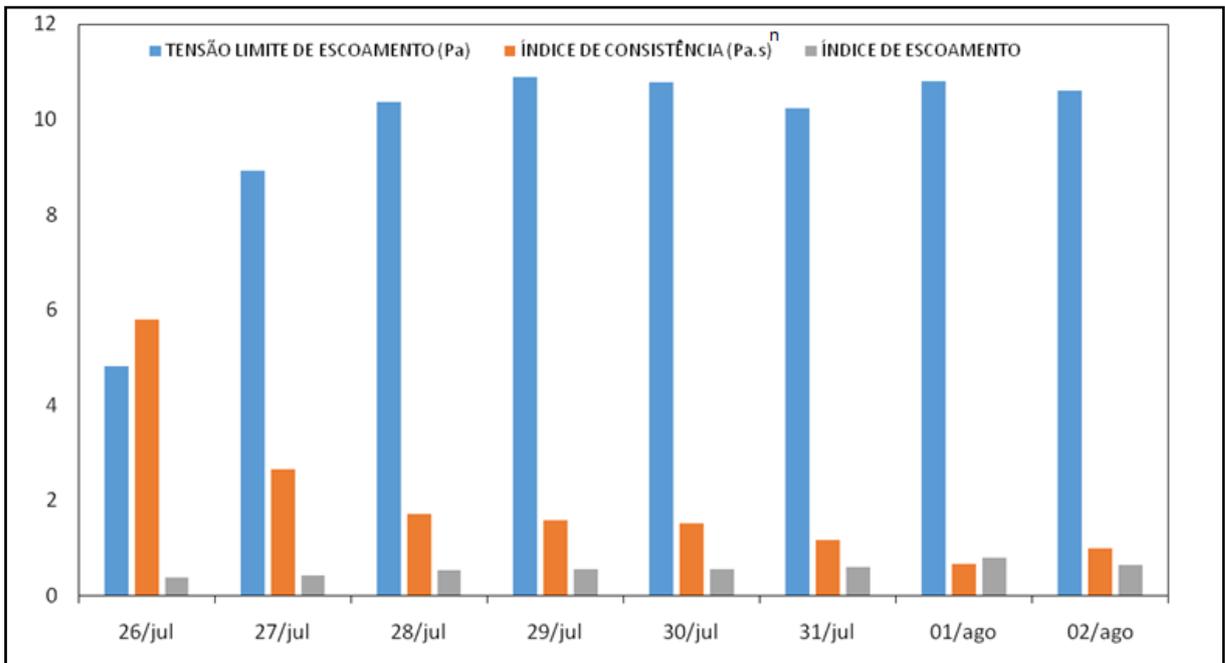
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura A4: Mistura água + argila caulínica + 0,5% Tween 80.



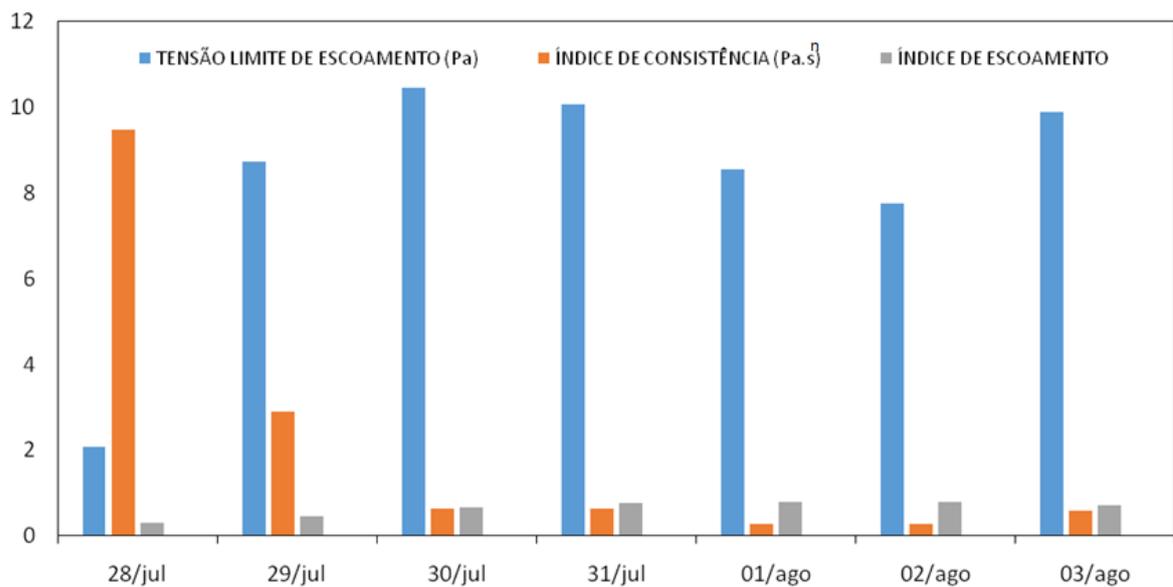
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura A5: Mistura água + argila caulínica + 0,25% Tween 80.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

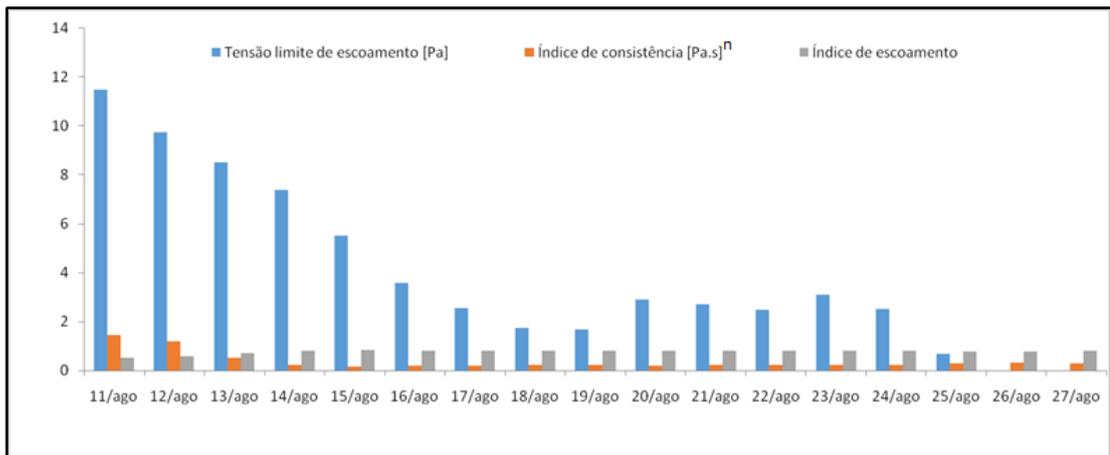
Figura A6: Mistura água comum + argila caulínica + 0,125% Tween 80



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

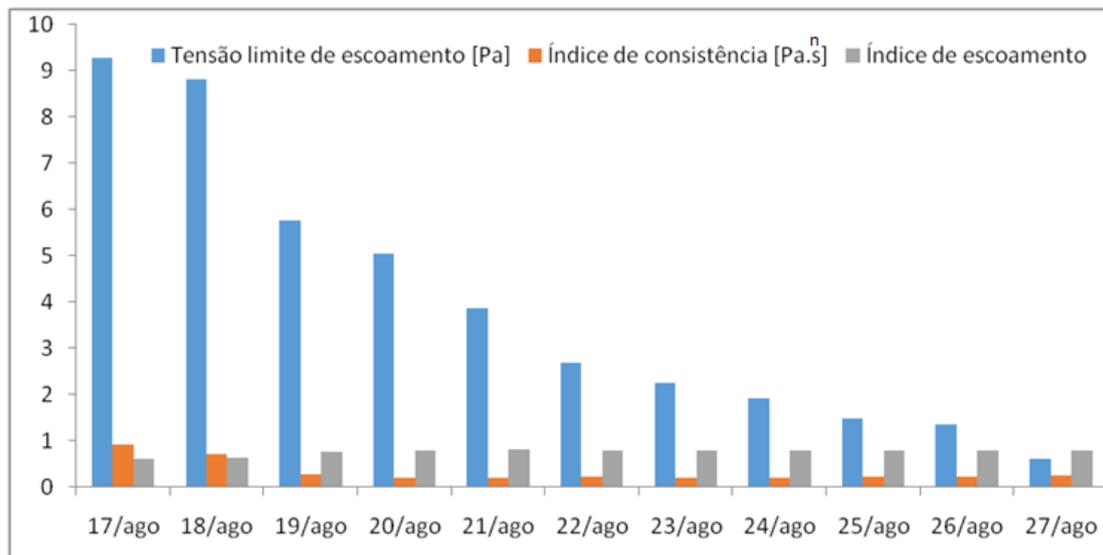
Os resultados apresentados nessa etapa são concernentes às concentrações de 0,0625, 0,125 e 0,25% do tensoativo Tween 80 para um volume de 4,5 l de água mais argila caulínica

Figura A7: Mistura água comum + argila caulínica + 0,0625% Tween 80.



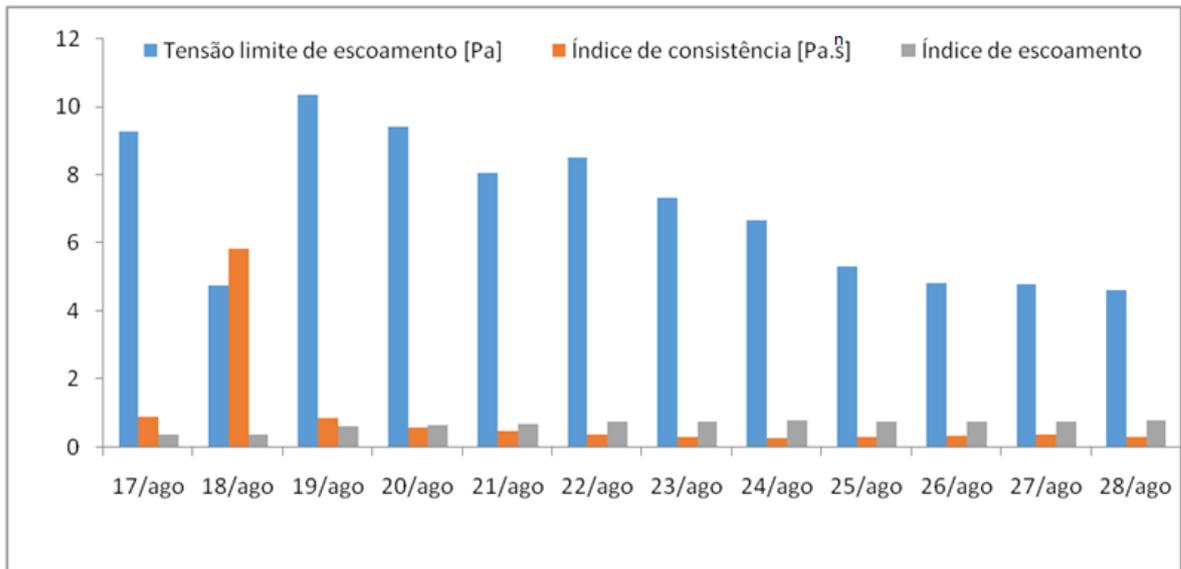
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura A8: Mistura água comum + argila caulínica + 0,125% Tween 80.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura A9: Água comum + argila caulínica + 0,25% Tween 80.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

APÊNDICE B: Estudo da estabilização química do fluido teste água+argila caulínica+goma xantana.

Com objetivo de aumentar o tempo de Estabilização da mistura argilosa, foi investido nessa etapa o uso do biopolímero goma xantana. O procedimento de mistura, e as sucessivas tentativas afim de se encontrar a concentração ideal do biopolímero são, descritos nesse Apêndice. O fluido teste foi a mistura de água+argila caulínica na concentração de água+argila caulínica em 25% em volume.

Procedimento de mistura: Inicialmente as soluções foram preparadas com concentrações de goma xantana de 0,5% (em massa). A temperatura também foi mantida constante em 24 °C. O valor da concentração de 0,5% foi amparado no trabalho de Souza *et al.*, (2017), onde o autor utilizou, uma mesma confecção porém em argilas do tipo bentonita.

Os componentes foram adicionados em um béquer com volume de 1 l, sob agitação a uma velocidade constante de 1.500 rpm em um agitador mecânico do tipo Prolab. Inicialmente foi adicionada em pequenas quantidades, a goma xantana em água deionizada durante 5 minutos. Após a adição de goma xantana, aguardou-se sob agitação por mais 5 minutos para maximizar a hidratação do polímero.

Após a hidratação da goma xantana, ainda sob agitação, por mais 5 minutos, foi adicionada, em pequenas quantidades, a massa correspondente de argila caulínica, por mais ainda 5 minutos para a homogeneização do sistema

Na concentração de goma xantana proposta Inicialmente de 0,5%, não surtiu efeito como esperado, assim como mostra a Figura B1.

Figura B1: Aspecto da mistura água+argila+0,5% de goma xantana

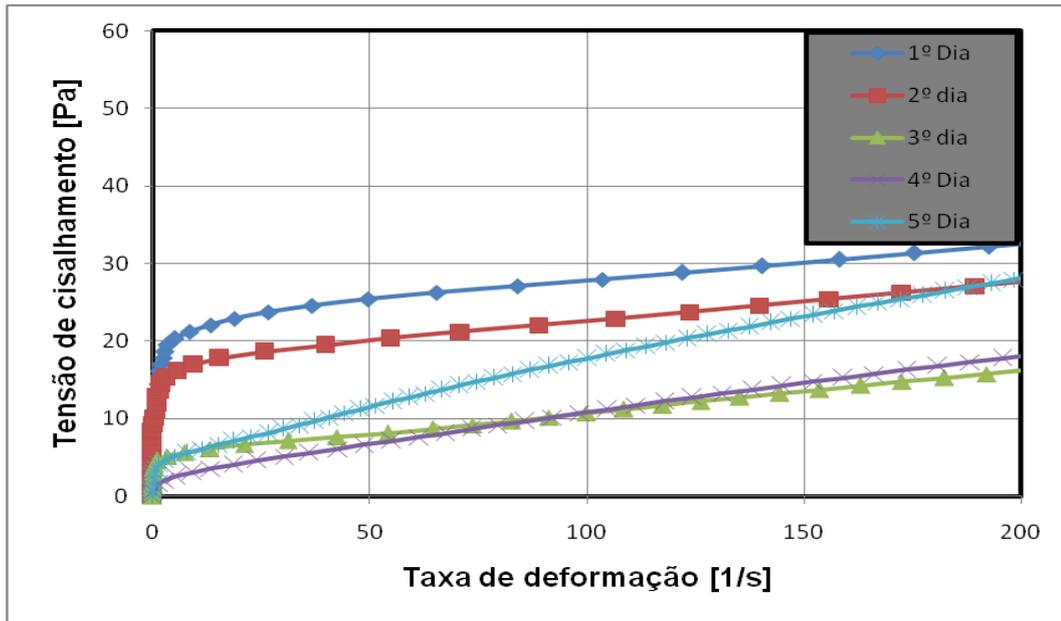


Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Como mostra Fig. B1 vê-se o quão sensível é atingir o ponto de ótima estabilidade da mistura. Mesmo em concentrações baixas (entre 0,5% até 0,2%) de goma xantana, a mistura argilosa apresentou efeito de “massa”, impossível de fazer aferição reométrica, tampouco realizar os experimentos. Esse efeito nos mostra a grande diferença entre as classes de argila, para as quais, Souza *et.al.*, (2017) obtiveram sucesso no tocante à estabilidade química (bentonita), utilizando a mesma concentração proposta de 0,5% em massa.

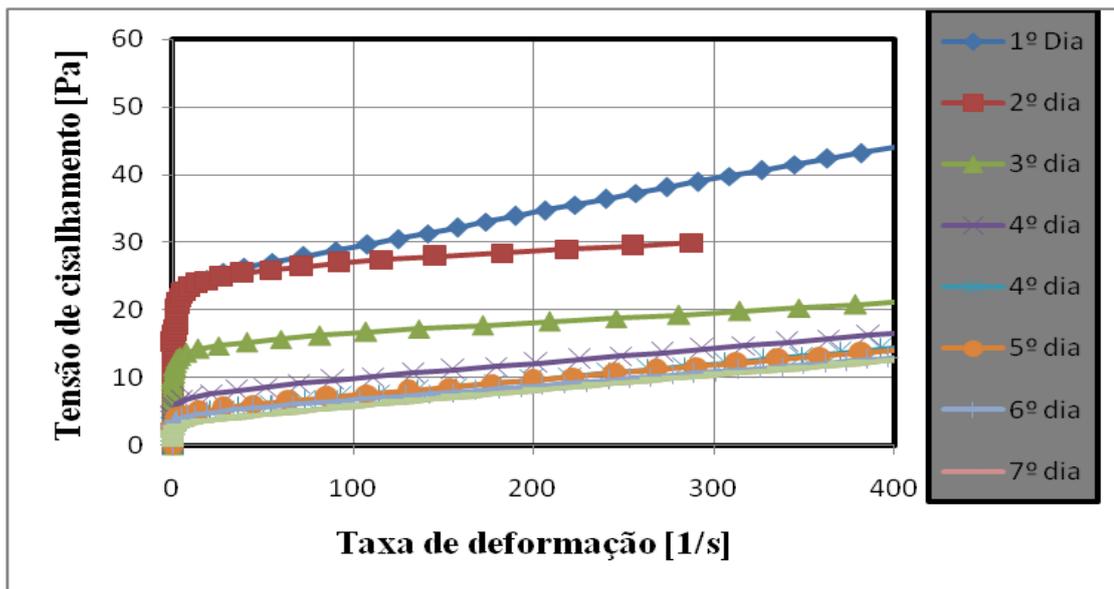
Devido ao insucesso na concentração de 0,5%, novos ensaios foram realizados, visando encontrar a concentração ideal que pudesse estabilizar a solução argilosa. As diversas tentativas se encontram nas Figuras B2, B3, B4

Figura B2: Curva de fluxo para mistura água+argila caulínica na concentração de 25%, e adição de 0,07 g de goma xantana.



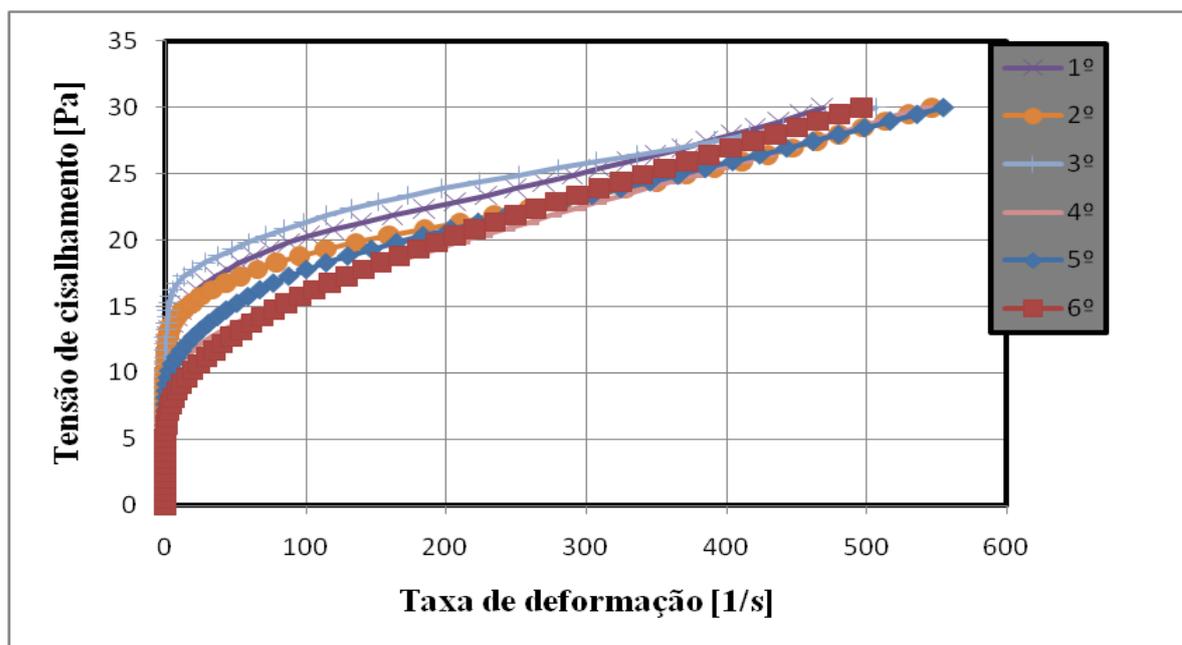
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura B3: Curva de fluxo para mistura água+argila caulínica na concentração de 25%, e adição de 0,4 g de goma xantana.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura B4: Curva de fluxo para mistura água+argila caulínica na concentração de 25%, e adição de 0,5 g de goma xantana.

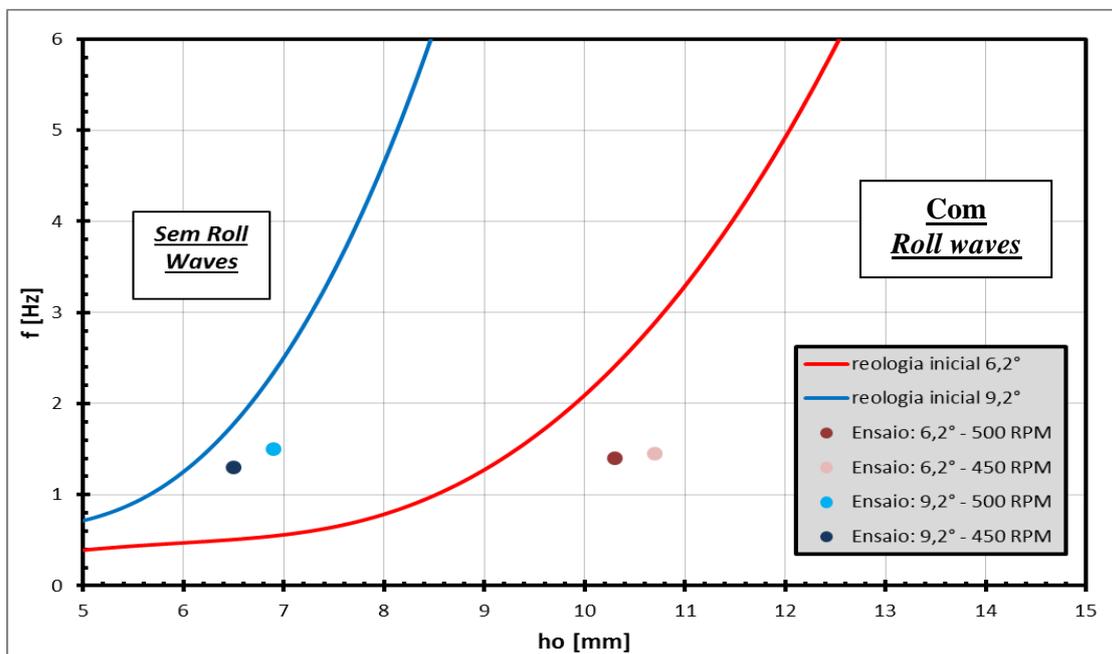


Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Como mostra na Figura B4, vimos que o fluido teste se manteve estável na concentração de 0,5 g (por litro) de goma xantana, no intervalo de 6 dias.

APÊNDICE C: Condições favoráveis à geração das *roll waves*

Figura C1: Gráfico que relaciona frequência mínima de perturbação com a lâmina do escoamento em regime uniforme, curva azul para o aparato experimental em 9,2 e curva vermelha para 6,2°.

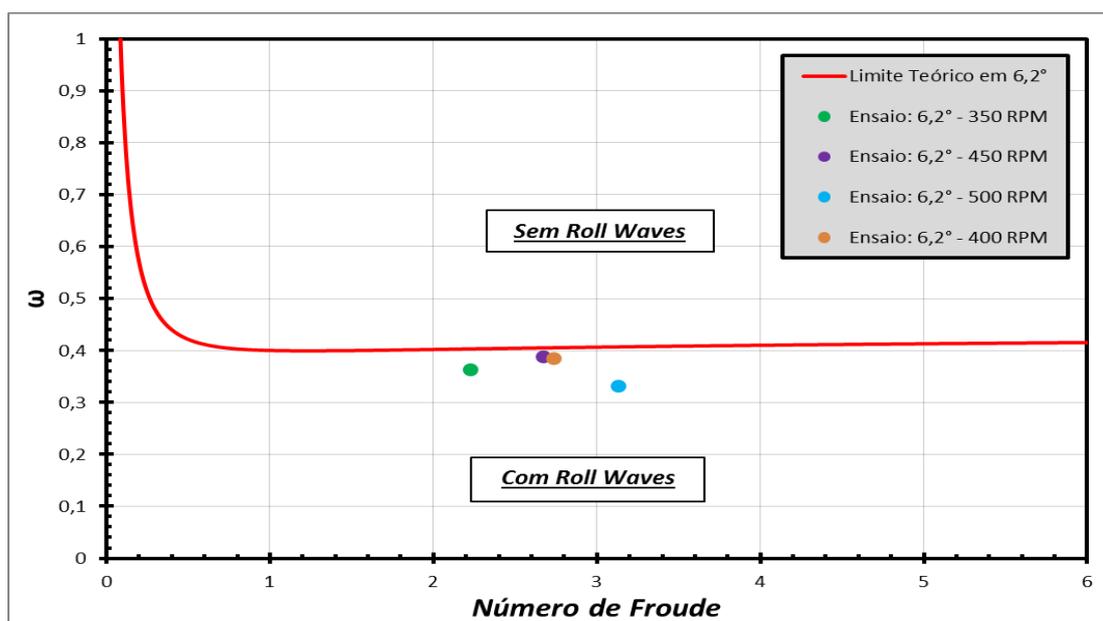


Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Na Figura C1 pode-se observar que os pontos representam as frequências impostas no experimento, sendo elas localizadas abaixo das curvas. Essas curvas foram plotados com a reologia inicial determinada e com as equações fornecidas em Maciel *et al.*, 2013, criando-se então intervalos de frequência em que será possível gerar as *roll waves*.

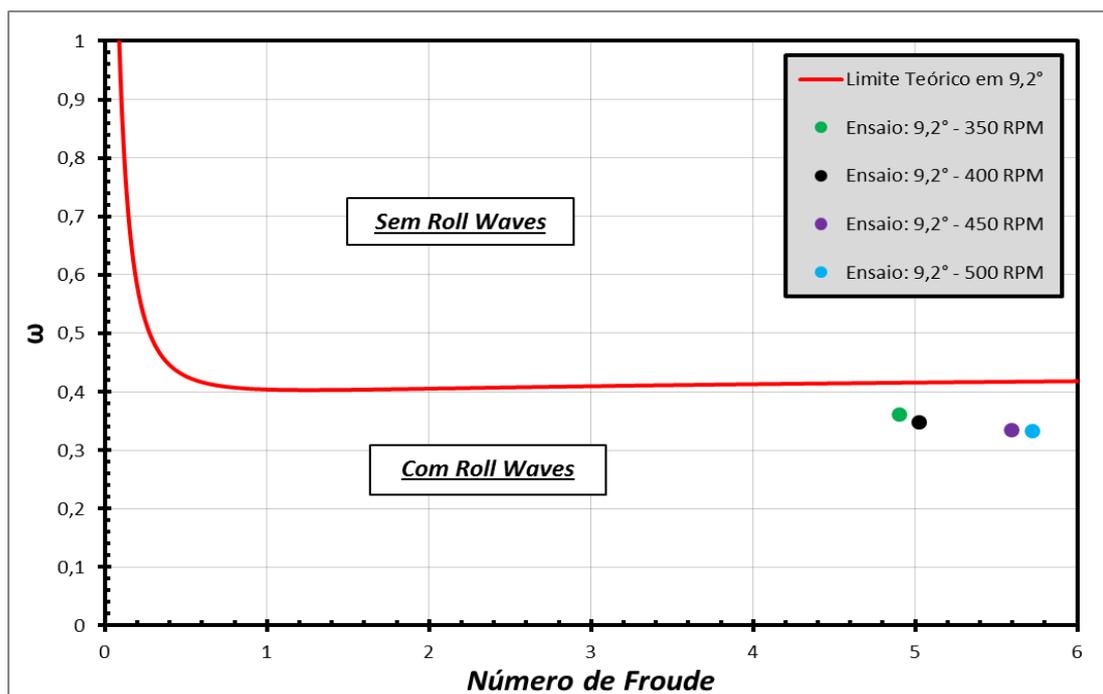
Nas Figura C2 e C3 vê-se a influência da frequência e do número de Froude, para os limites teóricos nas inclinações de 6,2° e 9,2° respectivamente. Os pontos representam os valores para o experimento e se encontram abaixo da curva onde é possível gerar as *roll waves*.

Figura C2: Gráfico que relaciona as frequências das perturbações com o número de Froude, na inclinação de $6,2^\circ$



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura C3: Gráfico que relaciona as frequências das perturbações com o número de Froude na inclinação de $9,2^\circ$



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

APÊNDICE D:Relação rotação-vazão

A curva rotação/vazão só foi possível ser obtida na terceira campanha experimental devido à necessidade/urgência em se fazer os experimentos quando o fluido ainda estava estabilizado. Como a vazão depende apenas do número de rotações da bomba, foi possível detectar a curva de vazão da bomba em função do número de rotações imposto pelo inversor de frequência.

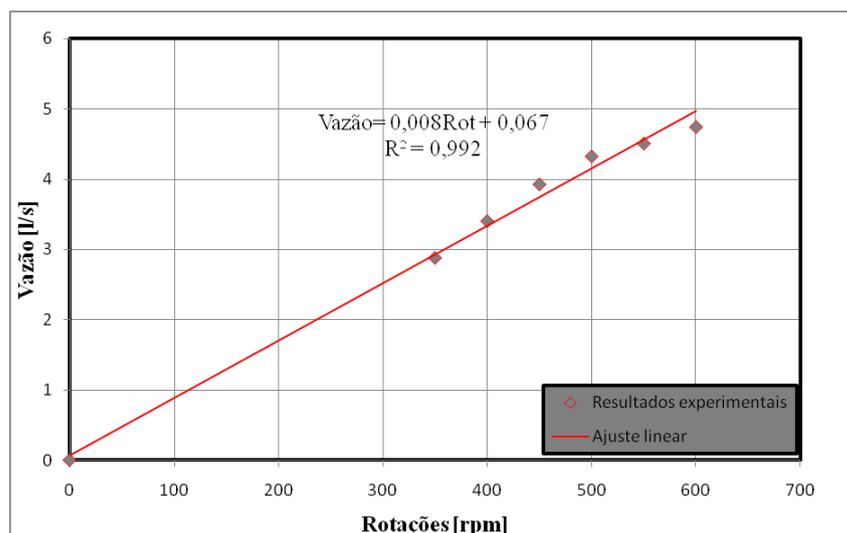
Tabela 9 Rotação imposta com as respectivas vazões

| Número de rotações | Vazão média (l/s) |
|--------------------|-------------------|
| 350 | 2,88 |
| 400 | 3,40 |
| 450 | 3,92 |
| 500 | 4,32 |
| 550 | 4,50 |
| 600 | 4,74 |

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

A partir da tabela 9, a seguinte relação linear foi ajustada, gerando a equação geral para vazão como mostra a Figura D1. Com isso fica caracterizada a relação entre rotações da bomba e a vazão fornecida por ela, garantido desvio máximo de 6,5% para as medidas de vazão.

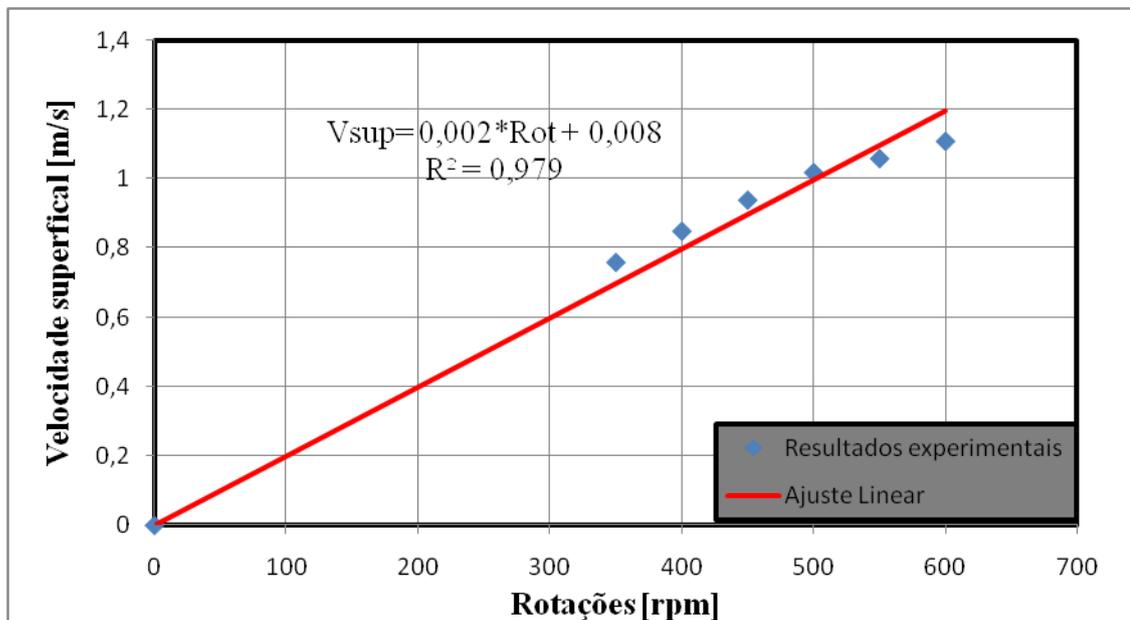
Figura D1: Resultados experimentais obtidos a partir do ensaio de vazão no canal experimental.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura D2 mostra os dados de velocidade superficial do escoamento, com canal inclinado em 6,2°.

Figura D2: Gráfico que relaciona velocidade superficial em função da rotação da bomba



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

APÊNDICE E: Análises das propriedades das *roll waves* aferidas

Os dados apresentados nesse tópico são concernentes a inclinação de 6,2 graus. Na Tabela 10 são apresentadas as propriedades do escoamento em regime uniforme e as amplitudes das ondas aferidas, para *roll waves* naturais.

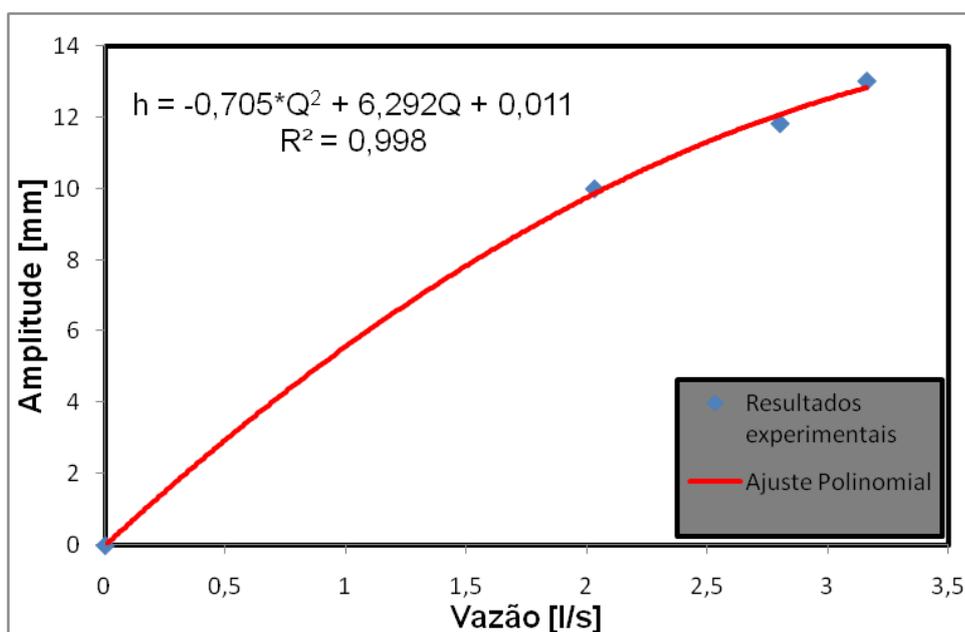
Tabela 10: Tabela de propriedades de *roll wave* na inclinação 6,2°

| Rotação da bomba [rpm] | Vazão [m³/s] | Velocidade média [m/s] | Velocidade superficial [m/s] | Número de Froude | Lâmina do escoamento h_0 [m] | Amplitude [mm] |
|------------------------|--------------|------------------------|------------------------------|------------------|--------------------------------|----------------|
| 350 | 2,03 | 0,71 | 0,79 | 2,21 | 10,06 | 10,02 |
| 450 | 2,80 | 0,88 | 1,01 | 2,74 | 10,48 | 11,83 |
| 500 | 3,16 | 1,03 | 1,12 | 3,15 | 10,93 | 13,02 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

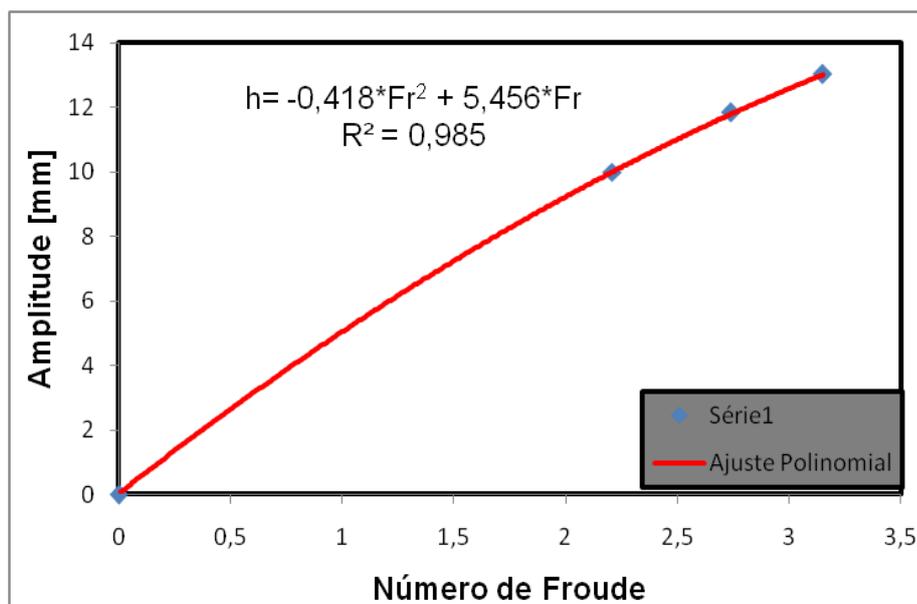
A partir dos dados experimentais procura-se estabelecer equações empíricas da amplitude de onda em função das propriedades do escoamento.

Figura E1: Gráfico que apresenta a relação da amplitude das *roll waves* em função da vazão da bomba hidráulica



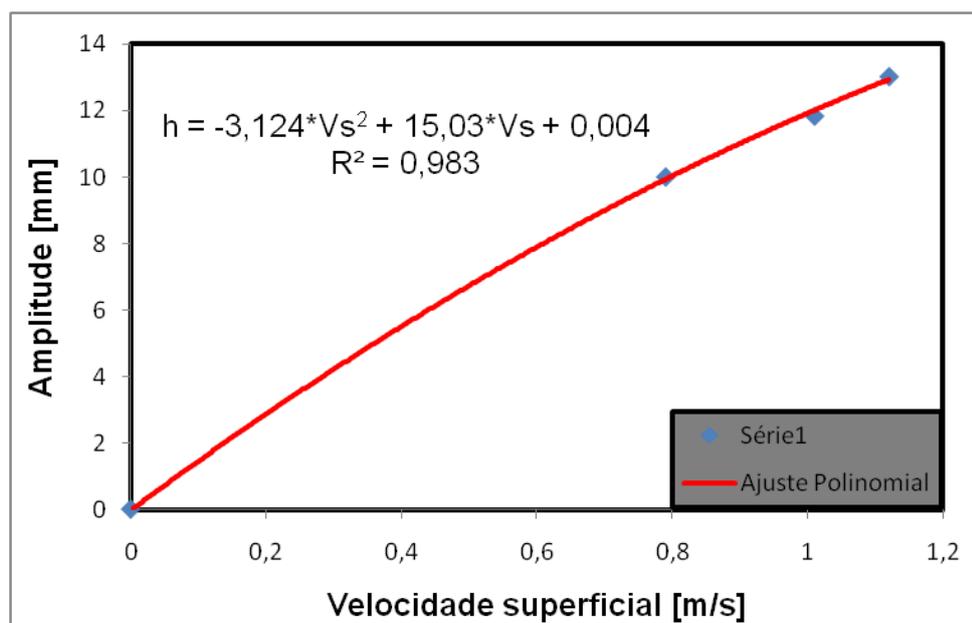
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura E2: Gráfico que relaciona amplitude de onda em função do número de Froude do escoamento.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

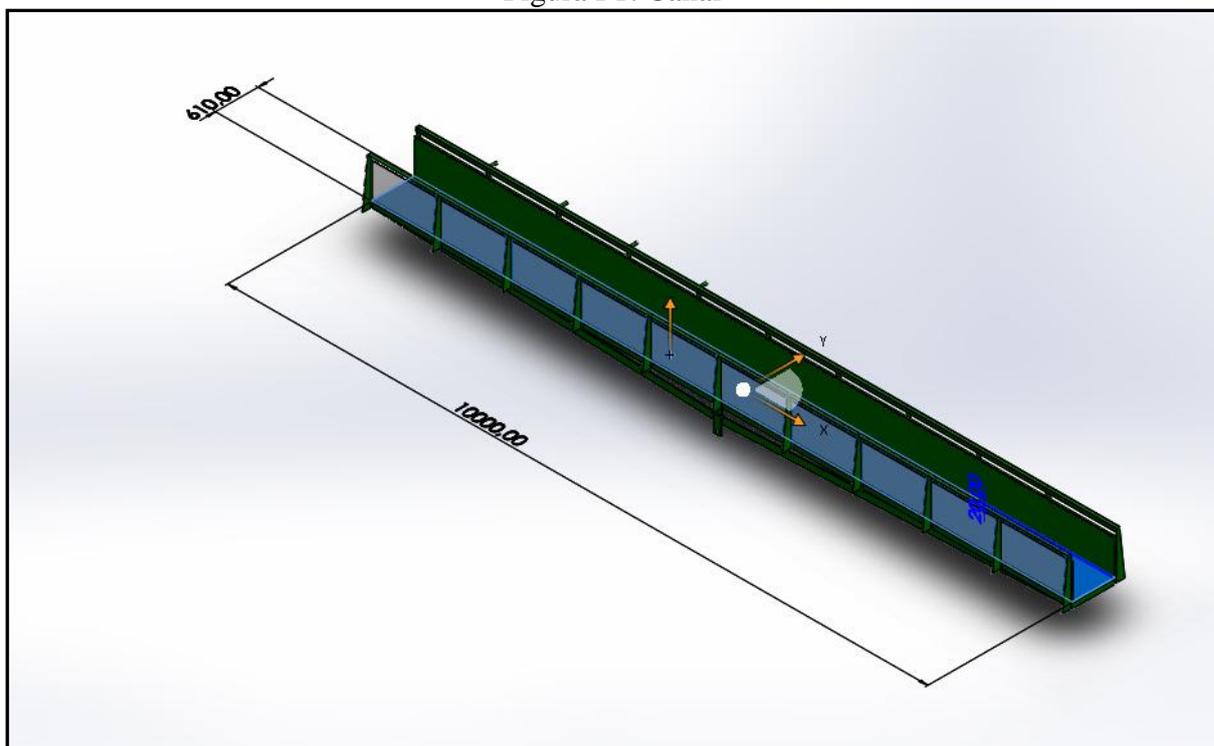
Figura E3: Gráfico que relaciona amplitude de onda em função da velocidade superficial do escoamento.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

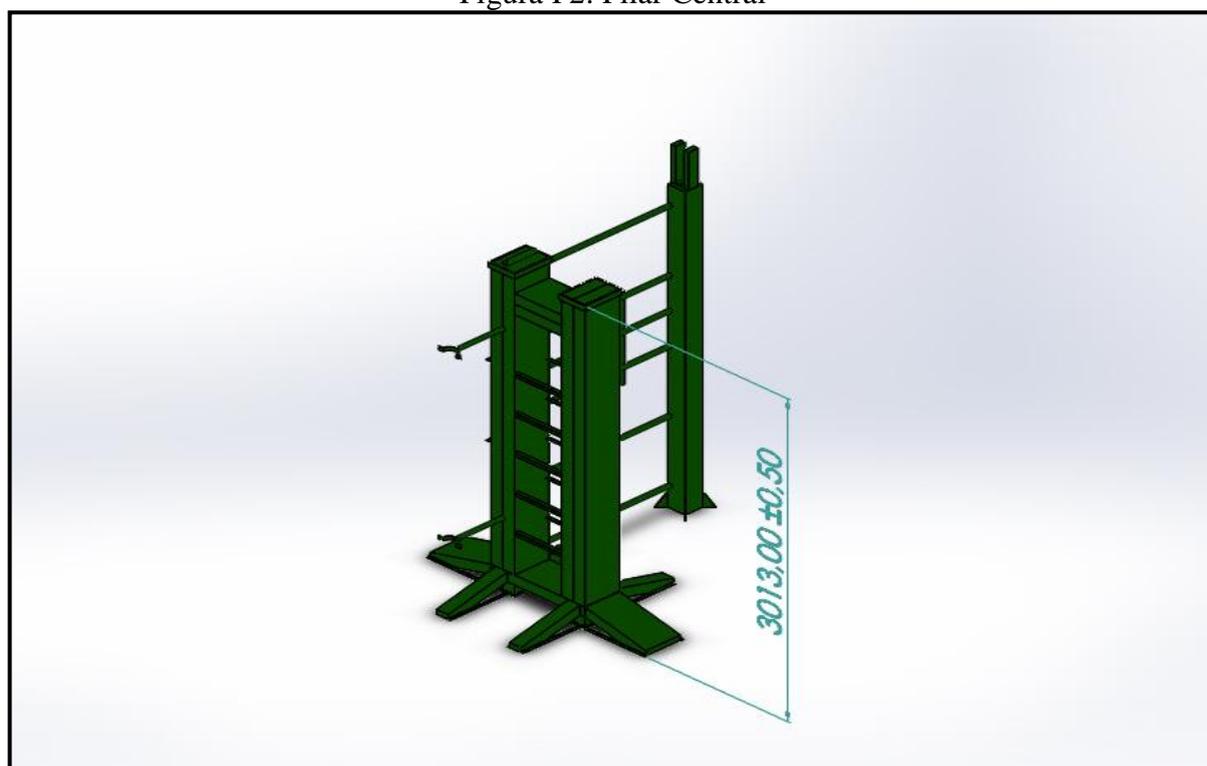
APÊNDICE F: Desenho Computacional do Aparato Experimental

Figura F1: Canal



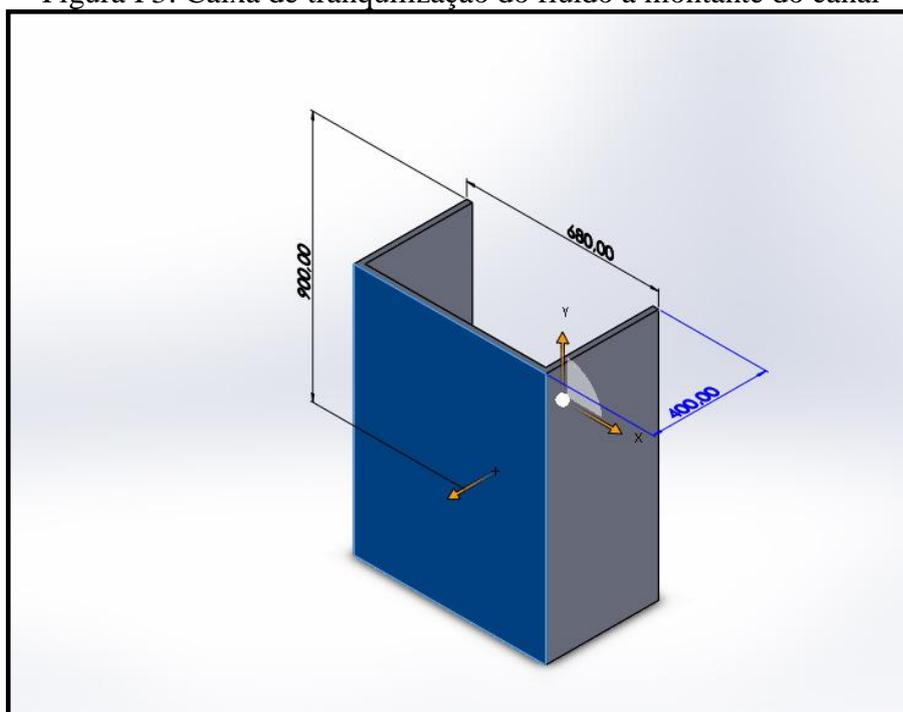
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura F2: Pilar Central



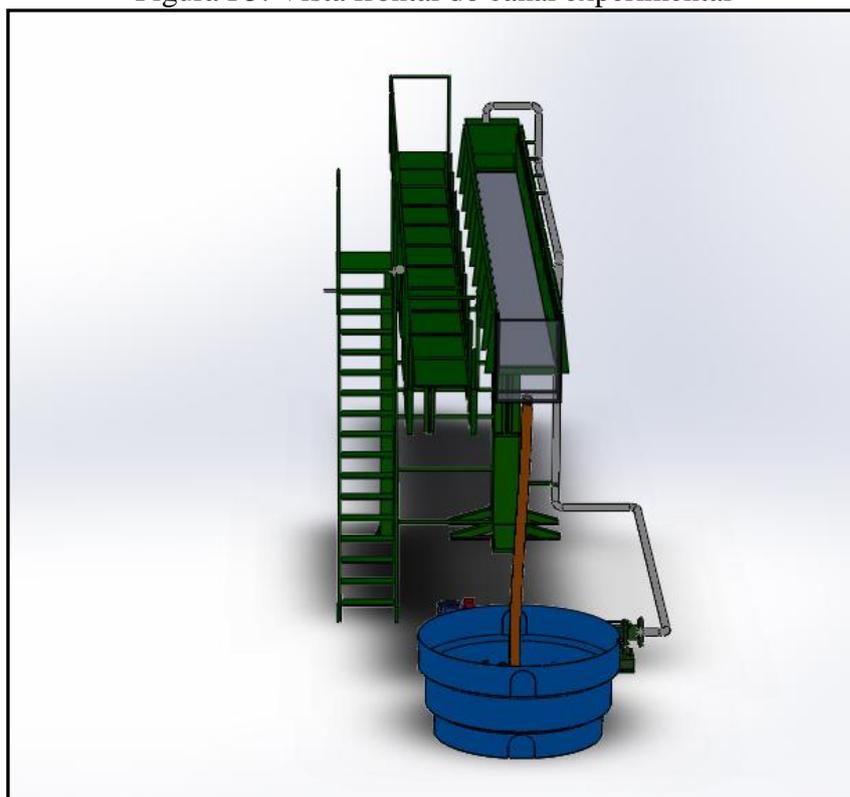
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura F3: Caixa de tranquilização do fluido a montante do canal



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura F5: Vista frontal do canal experimental



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura F6: Canal experimental de 10 m de comprimento



Fonte: Elaborado pelo próprio autor