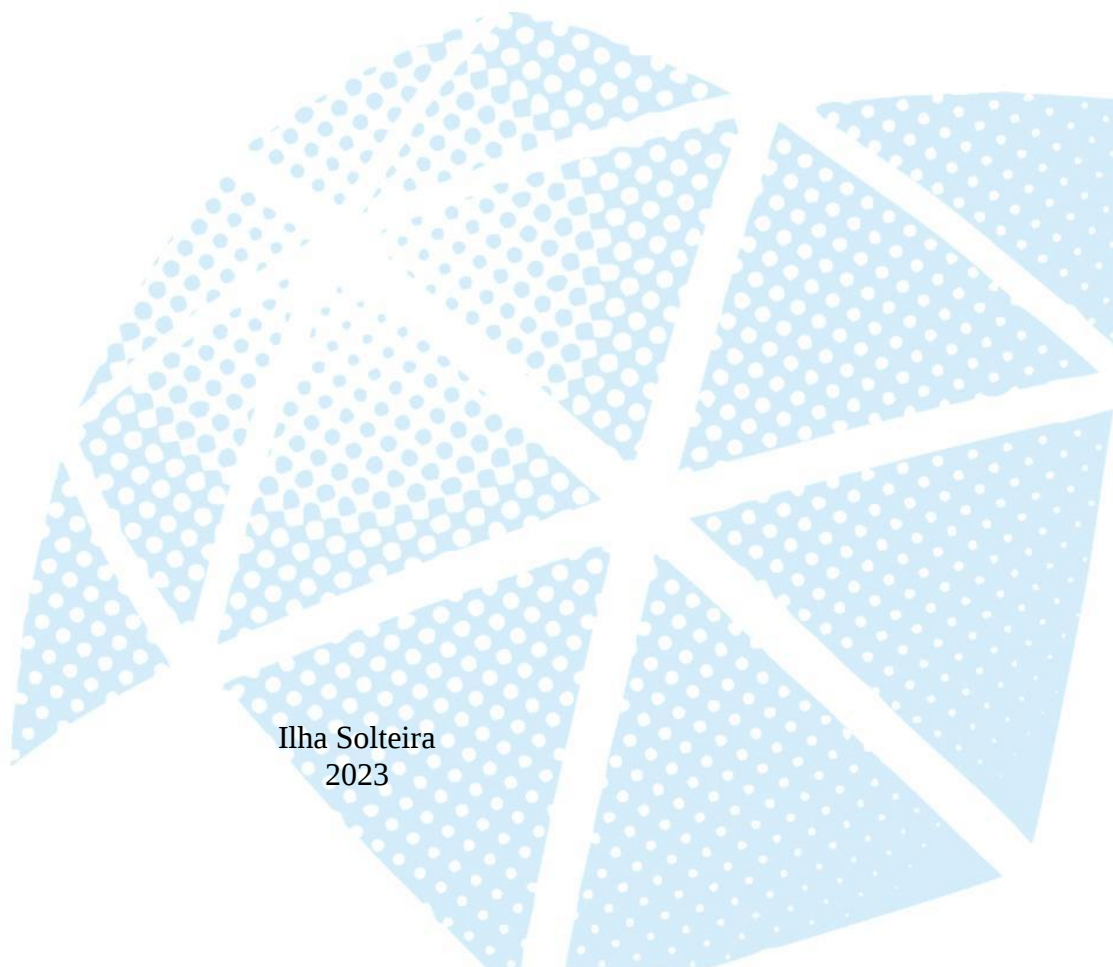


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

JOÃO BATISTA PEREIRA

**VELOCIMETRIA E AVANÇO DE FRENTES DE ESCOAMENTO DE FLUIDO
VISCOPLÁSTICO EM CANAL E PLANO INCLINADO**



Ilha Solteira
2023

JOÃO BATISTA PEREIRA

**VELOCIMETRIA E AVANÇO DE FRENTES DE ESCOAMENTO DE FLUIDO
VISCOPLÁSTICO EM CANAL E PLANO INCLINADO**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de
Ilha Solteira - UNESP, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Doutor em Engenharia
Mecânica.

Área de Concentração: Ciências Térmicas.

Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel
Orientador

Ilha Solteira
2023

FICHA CATALOGRAFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Elaborada por Amanda Sertori dos Santos - CRB-8/9061

P436v Pereira, João Batista.
Velocimetria e avanço de frentes de escoamento de fluido viscoplástico em canal e plano inclinado / João Batista Pereira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
168 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciências Térmicas, 2023

Orientador: Geraldo de Freitas Maciel

Inclui bibliografia

1. Experimentação física. 2. Perfil de velocidade. 3. Velocimetria por imagem. 4. Ruptura de barragem. 5. Fluidos não newtonianos.

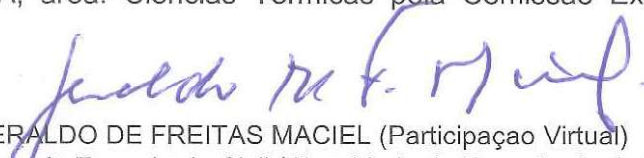
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: VELOCIMETRIA E AVANÇO DE FRENTES DE ESCOAMENTO DE FLUIDO VISCOPLÁSTICO EM CANAL E PLANO INCLINADO

AUTOR: JOÃO BATISTA PEREIRA

ORIENTADOR: GERALDO DE FREITAS MACIEL

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



Prof. Dr. GERALDO DE FREITAS MACIEL (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP

Documento assinado digitalmente
 **DIOGO ELIAS DA VINHA ANDRADE**
Data: 28/08/2023 16:18:53-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. DIOGO ELIAS DA VINHA ANDRADE (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Documento assinado digitalmente
 **WALDYR LOPES DE OLIVEIRA FILHO**
Data: 28/08/2023 19:51:55-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. WALDYR LOPES DE OLIVEIRA FILHO (Participação Virtual)
Diretoria / Walna Consultoria LTDA.

Documento assinado digitalmente
 **RAFAEL MANICA**
Data: 30/08/2023 09:37:21-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. RAFAEL MANICA (Participação Virtual)
Departamento de Hidromecânica e Hidrologia / Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS



Prof. Dr. LEANDRO OLIVEIRA SALVIANO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Ilha Solteira, 23 de agosto de 2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força, proteção e sabedoria ao longo desta caminhada.

Aos meus pais, por todo amor, incentivo e por sempre acreditarem em mim. À minha esposa, pela paciência, compreensão, apoio constante e por compartilhar comigo cada etapa desta jornada.

Aos colegas e amigos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, meu sincero agradecimento.

Registro minha gratidão ao meu orientador, Prof. Geraldo de Freitas Maciel, pela orientação, confiança, dedicação e pelos ensinamentos que foram fundamentais para minha formação acadêmica e científica.

Agradeço também aos professores e pesquisadores que colaboraram com discussões, sugestões e apoio durante a execução deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, à UNESP, ao Laboratório de Engenharia Civil e ao Laboratório de Hidrologia e Hidrometria (LH²), pelo suporte institucional, infraestrutura e ambiente de pesquisa que possibilitaram o desenvolvimento deste estudo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado (Processo nº 88887.605302/2021-00).

Aos membros da banca examinadora pela disponibilidade e pelas valiosas contribuições.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, fizeram parte desta etapa da minha vida. Muito obrigado.

*“Nada na vida deve ser temido, apenas compreendido.
Agora é hora de compreender mais, para temer
menos.”*

(Marie Curie)

RESUMO

Impactos produzidos por desastres de toda natureza sobre a sociedade não têm sua gênese apenas no ambiente, mas são construídos na confluência das diversidades do ambiente, com as escolhas da sociedade e da tecnologia. Ainda que problemática complexa, dentre os desastres “naturais”, as rupturas de barragem, em particular as de rejeitos, têm ganhado destaque pela produção de frentes lamosas (*mudflows*), que não só têm causado danos a infraestruturas civis, mas sobretudo ceifado vidas humanas e causado impactos ambientais sem precedentes. Faz-se, assim, necessário o conhecimento mais aprofundado desse tipo de escoamento acerca de profundidades, campo de velocidade, vazões, tensões de arrasto no fundo, bem como alcances das frentes de natureza viscoplástica. Neste contexto, esta tese de pesquisa básica/aplicada tem a finalidade de proporcionar maior conhecimento a respeito de escoamentos de fluidos viscoplásticos com característica lamosa no que diz respeito às suas propriedades dinâmicas evoluindo em canal e plano inclinado. Para isso foram desenvolvidas duas metodologias experimentais. A primeira baseada na técnica *Space Time Image Velocimetry* (STIV) e como alternativa ao método de velocimetria PIV (*Particle Image Velocimetry*), possibilitando a obtenção do perfil de velocidade longitudinal ao longo da profundidade de fluidos viscoplásticos em laboratório e implementada a partir do desenvolvimento de um algoritmo próprio com base na geração de imagens espaço-temporal (imagem STI - *Space Time-Image*). Já a segunda consistiu na concepção, montagem e automação de aparato experimental de ruptura de barragem (*dam break*), seguido pela geração e medição de escoamentos a partir de diferentes cenários de ruptura (diferentes velocidades de abertura de comporta, liberação instantânea e gradual segundo estágios de abertura, configuração de canal e plano inclinado), de forma a explicitar a importância do efeito da liberação de material em um evento tipo *dam break*. As duas metodologias experimentais desenvolvidas se mostraram capazes de gerar e medir os escoamentos viscoplásticos (perfis de velocidade, vazão e alcances). Os resultados de perfis de velocidade indicaram fortes efeitos de fundo e de paredes laterais à medida que se aumenta a tensão limite de escoamento e viscosidade, evidenciando-se maior distanciamento do modelo teórico, com base na teoria da lubrificação. Os experimentos de *dam-break* evidenciaram forte dependência dos alcances com relação à velocidade de abertura da comporta nos instantes iniciais, sendo os alcances finais mais dependentes das características reológicas do fluido; também se constatou que a forma de liberação de material (formação de brecha) apresenta significativa influência sobre os hidrogramas de ruptura e desenvolvimento temporal dos alcances; por fim efeitos de inércia tornam-se mais atuantes com a redução do número de Herschel-Bulkley (materiais de maior fluidez) associada à condição de liberação instantânea de material. Além da vertente experimental, foi empregada a modelagem numérica a fim de realizar a confrontação numérica-experimental e identificar a capacidade dos modelos em retratar os diferentes efeitos considerados nos experimentos físicos. A modelagem numérica foi realizada por meio do *software* ANSYS Fluent 14.5 e forneceu resultados com boa concordância aos experimentos físicos de medição de perfil de velocidade ao longo da profundidade, já em situações de liberação de material (*dam break*) houve boa concordância com os resultados do desenvolvimento inicial do alcance, no entanto, com maiores discrepâncias na fase de redução de velocidade do escoamento.

Palavras-chave: experimentação física; perfil de velocidade; velocimetria por imagem; ruptura de barragem; fluidos não Newtonianos.

ABSTRACT

Impacts caused by natural disasters are not only a product of the environment, but of a confluence of environmental diversities directly affected by the choices of the ruling society and technology. The occurrence of “natural disasters”, especially those involving the failure of tailings dams, recently stood out in the news due to the ensuing mudflows, which resulted in unprecedented environmental impacts with serious damage to civil infrastructure and the death of countless people. In this sense, further analyses concerning this kind of flow became imperative. Notably, from an engineering point of view, it is crucial to study their depths, velocity fields, discharges, and bottom drag coefficients, as well as the runout distance of viscoplastic front. Therefore, the aim of this work is to provide a theoretical/practical analysis of viscoplastic fluids of muddy consistency evolving in a channel or in an inclined plane. To do so, two distinct experimental methodologies were developed. The first method essentially employed the Space Time Image Velocimetry (STIV) for obtaining the longitudinal velocity profile along the flow depths of viscoplastic fluids. In order to carry out the study, an algorithm was developed with basis on the generated Space-Time Images (STI). The second method consisted in designing, assembling and automating an experimental apparatus capable of reproducing and measuring dam-breaks and their subsequential flows. Moreover, the apparatus was also able to reproduce different scenarios with distinct gate-opening velocities, different type of releases (instantaneous/gradual), and varied channel/inclined plane configurations. Both methodologies were able to reproduce and measure the viscoplastic flows (along with their velocity profiles, discharges and runout distance). The obtained velocity profiles indicated strong effects both at the bottom and at the walls of the channel/inclined plane. Such effect increased as the rheological properties of the fluid also increased, showing a greater distance from the proposed theoretical model. The dam-breaks experiments showed a strong displacement dependence on the gate-opening velocity especially in the initial moments. Final displacements, on the other hand, were more dependent on the fluid rheology. The type of release (breach formation) also influenced the rupture hydrographs and the temporal development of the displacements. Lastly, inertial effects become more active with a reduction of the Herschel-Bulkley number (materials with higher fluidity), especially when the material was instantaneously released. The numerical modeling carried out by the ANSYS Fluent 14.5 software provided results in good agreement with the experiments concerning the velocity profiles along the depth. The software was also able to provide results in good agreement with the ones observed immediately after dam-break. On the other hand, greater discrepancies were observed as the flow velocity was reduced.

Keywords: physical experiments; velocity profile; image velocimetry; dam-break; non-Newtonian fluids.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Número de desastres naturais e mortes decorrentes desses eventos no Brasil no período de 1948 a julho de 2023.	1
Figura 1.2 - Falhas de barragem de rejeitos registradas entre 1940 e 2020.	2
Figura 2.1 - Cisalhamento simples de um escoamento viscoso em regime laminar.	9
Figura 2.2 - Curvas de fluxos de fluido Newtoniano e não newtoniano avaliados em reômetro R/S Brookfield disponível no Laboratório de Hidrologia e Hidrometria da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Unesp.	14
Figura 2.3 - Características de escoamento de fluido viscoplástico Herschel-Bulkley avaliado no Capítulo 3: (a) perfil de velocidade e (b) taxa de deformação.	17
Figura 3.1 - Esquematização de um escoamento com superfície livre sobre plano inclinado.	23
Figura 3.2 - Comportamento de escoamento de fluido viscoplástico segundo modelo de fluido Herschel-Bulkley: velocidade ao longo da profundidade do escoamento em pontos verdes (Equação 3.3) e velocidade média do escoamento representada pela linha pontilhada vermelha (Equação 3.6).	25
Figura 3.3 - Caracterização reológica: (a) protocolo de caracterização empregado e (b) curva de fluxo ascendente obtida para os ensaios C9 e C17 com, respectivamente, incertezas de 6,5% e 7,6 %.	28
Figura 3.4 - Configuração do aparato experimental empregado.	29
Figura 3.5 - Esquematização do aparato experimental: (a) bomba helicoidal, (b) tanque de armazenamento, (c) canal retangular de 3,0 x 0,30 x 0,15 m, (d) sensor ultrassom e (e) câmera de medição.	29
Figura 3.6 - Ilustração do princípio de funcionamento da técnica STIV.	32
Figura 3.7 - Procedimento para definição da velocidade do escoamento a partir da geração de imagem STI e obtenção automática das estrias por meio da Transformada Wavelet Contínua 2D (CWT). Código desenvolvido em Matlab e uso do software Image J na definição da resolução da imagem.	34
Figura 3.8 - Comportamento de visualização dos microtraçadores no experimento C ₁₇ segundo taxa de captura de: (a) 30 fps e (b) 270 fps. Linha pontilhada em laranja representa os limites do escoamento (linha superior a superfície livre e linha inferior o fundo do canal).	35
Figura 3.9 - Esquematização da técnica de velocimetria empregada.	37
Figura 3.10 - Fluxograma de execução do experimento de caracterização de perfil de velocidade.	37

Figura 3.11 - Análise do escoamento a partir da técnica de velocimetria desenvolvida: (a) alturas de interesse para definição da velocidade e (b) imagem STI gerada para a altura 34 mm.....	39
Figura 3.12 - Perfis de velocidade obtidos a partir da metodologia implantada (STI) para os experimentos <i>C1</i> , <i>C2</i> , <i>C3</i> e <i>C4</i> e $\theta = 4^\circ$. Barras de erro em cinza indicam as incertezas das medidas (na faixa de 1,70% para as profundidades e 4,10 % para as velocidades).	43
Figura 3.13 - Perfis de velocidade obtidos a partir da metodologia implantada (STI) para os experimentos <i>C5</i> , <i>C6</i> , <i>C7</i> e <i>C8</i> e $\theta = 6^\circ$. Barras de erro em cinza indicam as incertezas das medidas (na faixa de 1,4 a 2,3% para as profundidades e de 4,05 a 4,10% para as velocidades).	43
Figura 3.14 - Perfis de velocidade obtidos a partir da metodologia implantada (STI) para os experimentos <i>C9</i> , <i>C10</i> , <i>C11</i> e <i>C12</i> e $\theta = 8^\circ$. Barras de erro em cinza indicam as incertezas das medidas (na faixa de 1,70% para as profundidades e de 4,17% para as velocidades).	44
Figura 3.15 - Perfis de velocidade obtidos a partir da metodologia implantada (STI) para os experimentos <i>C13</i> , <i>C14</i> , <i>C15</i> e <i>C16</i> e $\theta = 10^\circ$. Barras de erro em cinza indicam as incertezas das medidas (na faixa de 1,70% para as profundidades e de 4,17% para as velocidades).	44
Figura 3.16 - Perfis de velocidade obtidos a partir da metodologia implantada (STI) para os experimentos <i>C17</i> e <i>C18</i> e $\theta = 8^\circ$. Barras de erro em cinza indicam as incertezas das medidas (na faixa de 1,70% para as profundidades e de 4,17% para as velocidades).....	45
Figura 3.17 - Confrontação experimental-teórica: experimentos <i>C13</i> , <i>C14</i> , <i>C15</i> e <i>C16</i> e $\theta = 10^\circ$. Linha pontilhada apresenta modelo teórico com $u(y = 0) = u_{exp}$	47
Figura 3.18 - Perfil de velocidade experimental do experimento <i>C17</i> com análise detalhada na região próxima ao fundo ($0 \leq y < 2$ mm). Linha pontilhada apresenta modelo teórico com $u(y = 0) = u_{exp}$	48
Figura 3.19 - Confrontação experimental-teórica: experimentos <i>C17</i> e <i>C18</i> e $\theta = 8^\circ$. Linha pontilhada apresenta modelo teórico com $u(y = 0) = u_{exp}$	49
Figura 3.20 - Perfis de velocidade medidos em diferentes posições do canal: experimentos <i>C17</i> e $\theta = 8^\circ$. Barra de erro na faixa de 4% para as medidas de velocidades e 1,7% para as alturas.	50
Figura 3.21 - Perfis de velocidade medidos em diferentes posições do canal: experimentos <i>C18</i> e $\theta = 8^\circ$. Barra de erro na faixa de 4% para as medidas de velocidades e 1,7% para as alturas.	51

Figura 3.22 - Comportamento de velocidade na seção transversal do escoamento: experimentos C17 e $\theta = 8^\circ$. Dados experimentais foram interpolados e representados segundo valores médios neste mapa de cores.	52
Figura 3.23 - Comportamento de velocidade na seção transversal do escoamento: experimentos C18 e $\theta = 8^\circ$. Dados experimentais foram interpolados e representados segundo valores médios neste mapa de cores.	52
Figura 3.24 - Comportamento da tensão de cisalhamento ao longo da profundidade do escoamento para o experimento C17 and $\theta = 8^\circ$ segundo resultado experimental de perfil de velocidade e modelo teórico considerando deslizamento. Linha pontilhada cinza com scatter azul representa tensão de cisalhamento a partir do perfil de velocidade experimental e linha pontilhada cinza com scatter preto representa perfil de velocidade experimental; linha contínua azul representa tensão de cisalhamento teórica considerando deslizamento e linha contínua preta representa perfil de velocidade teórica com deslizamento.	55
Figura 3.25 - Curvas de fluxo calculadas a partir dos perfis de velocidade (representadas pelos pontos e barras de incertezas) para os géis de carbopol de concentração mássica de: (a) 0,13% e (b) 0,17%. A linha pontilhada representa a curva de fluxo, segundo parâmetros médios, medida a partir do reômetro e a área em cinza a incerteza de medição da curva de fluxo via reômetro.....	56
Figura 4.1 - Aparato experimental de <i>dam break</i> : configuração final. Situação na condição de canal e comporta com movimento descendente.	60
Figura 4.2 - Curva granulométrica dos materiais empregados na produção de lama.....	62
Figura 4.3 - Protocolo de ensaio reométrico empregado para: (a) gel de carbopol e (b) lama.....	63
Figura 4.4 - Projeto executivo da mesa de sustentação.	65
Figura 4.5 - Projeto executivo do plano inclinado.....	66
Figura 4.6 - Configuração de canal inclinado: suporte empregado para fixação das paredes do canal.....	67
Figura 4.7 - Projeto executivo dos módulos de retenção: (a) ascendente e (b) descendente....	67
Figura 4.8 - Ilustração da troca de módulos de retenção do aparato de dam break.....	68
Figura 4.9 - Posicionamento do sistema de movimentação do plano inclinado e detalhamento do sistema de inclinação.	69
Figura 4.10 - Projeto executivo do sistema de movimentação da comporta: posicionamento e descrição de seus elementos.	70
Figura 4.11 - Configuração experimental de câmeras empregadas: (a) câmera Lumix FH8 (Panasonic), (b) câmera Cyber-Shot DSC-W800 (Sony) e (c) câmera GS3 FLIR. A imagem	

apresenta aparato experimental na configuração de canal e comporta com movimento descendente – experimento representativo com gel de carbopol C ₁₇ segundo canal na posição horizontal e descida da comporta em estágio único.	71
Figura 4.12 - Método de velocimetria a partir da imagem STI adaptado e implantado para avaliar a velocidade da frente viscoplástica resultante da ruptura de barragem. A imagem STI apresentada contém a informação espaço-temporal da frente ao longo da linha amarela e na altura da posição da linha amarela. Experimento C1-CI-4.....	72
Figura 4.13 - Comparação de curvas de alcance obtidas a partir do software <i>Tracker</i> e pela imagem espaço-temporal (STI). θ indica a inclinação do canal.....	73
Figura 4.14 - Representação do comportamento de movimentação da comporta avaliados neste projeto: (a) abertura instantânea e (b) abertura gradual.....	77
Figura 4.15 - Momentos característicos dos experimentos de <i>dam-break</i> : (a) posicionamento da malha de referência no centro do aparato, em contato com a comporta e (b) frente viscoplástica avançando sobre canal inclinado (Experimento C2-CI-4 - de abertura gradual (comporta de movimento descendente e 2 estágios de abertura).....	77
Figura 4.16 - Fluxograma de execução do experimento de <i>dam-break</i>	78
Figura 4.17 - Evolução do nível de fluido no interior do reservatório: possibilidade de avaliação de hidrogramas unitários das rupturas.	79
Figura 4.18 - Fluxograma retratando a obtenção dos hidrogramas de ruptura.....	80
Figura 4.19 - Alcance final da frente xF no tempo final de análise para os experimentos: (a) C3-CI-4 (fluido-teste C ₁₇), (b) C19-CI-4 (fluido-teste C ₃₁), (c) C11-PI-4 (fluido-teste C ₁₇) e (d) C28-PI-4 (fluido-teste C ₃₁).	85
Figura 4.20 - Alcance da frente xF ao longo do tempo t para a géis de carbopol C _{0,17} segundo comporta de abertura gradual e diferentes velocidades de levantamento (linha inteira - velocidade máxima e linha pontilha - velocidade mínima) evoluindo em: (a) plano inclinado e (b) canal inclinado. Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.	86
Figura 4.21 - Alcance da frente xF ao longo do tempo t para a géis de carbopol C _{0,25} segundo comporta de abertura gradual (presença de estágios de abertura – linhas vermelha, azul e roxa) e diferentes velocidades de levantamento para escoamento evoluindo em: (a) plano inclinado e (b) canal inclinado. Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.	87

Figura 4.22 - Alcance final da frente x_F para todas as configurações experimentais conduzidas com o gel de carbopol C_0,17. Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.....	89
Figura 4.23 - Alcance final da frente x_F para todas as configurações experimentais conduzidas com o gel de carbopol C_0,31. Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.....	90
Figura 4.24 - Hidrogramas de <i>dam-break</i> de géis de carbopol de concentração C_0,17, com diferentes estágios de abertura, segundo as velocidades de comporta: (a) $V_{m\acute{a}x}$ e (b) $V_{m\acute{i}n}$. 91	
Figura 4.25 - Hidrogramas de <i>dam-break</i> de géis de carbopol de concentração C_0,25, com diferentes estágios de abertura, segundo as velocidades de comporta: (a) $V_{m\acute{a}x}$ e (b) $V_{m\acute{i}n}$. 92	
Figura 4.26 - Comportamento de alcance, vazão e velocidade da frente no experimento C9-CI-4: gel de concentração C_0,25 e 1 estágio de abertura da comporta.....	93
Figura 4.27 - Comportamento de alcance, vazão e velocidade da frente no experimento C4-CI-4: gel de concentração C_0,17 e 5 estágios de abertura da comporta.	94
Figura 4.28 - Alcance final da frente x_F no tempo final de análise para os experimentos conduzidos com lama de concentração C_28 e canal a 0°: (a) L1-0, (b) L2-0, (c) L3-0 e (d) L4-0.	97
Figura 4.29 - Alcance da frente x_F ao longo do tempo t para a lama L_AA_28 segundo comporta de abertura instantânea (comporta ascendente - linha verde) e abertura gradual (presença de estágios de abertura – linhas vermelha, azul e roxa) para três inclinações do canal inclinado: (a) 0°, (b) 1° e (c) 2°. Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.....	99
Figura 4.30 - Alcance da frente x_F ao longo do tempo t para a lama L_AA_31 segundo comporta de abertura instantânea (comporta ascendente - linha verde) e abertura gradual (presença de estágios de abertura – linhas vermelha, azul e roxa) para duas inclinações do canal inclinado: (a) 4° e (b) 6°. Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.....	100
Figura 4.31 - Alcance da frente x_F ao longo do tempo t para a lama L_AAA_28_0.5A segundo comporta de abertura instantânea (comporta ascendente - linha verde) e abertura gradual (presença de estágios de abertura – linhas vermelha, azul e roxa) para duas inclinações do canal inclinado: (a) 0°, (b) 4° e (c) 6°. Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.....	101

Figura 4.32 - Alcance da frente x_F ao longo do tempo t para a lama L_AAA_28_0.25A segundo comporta de abertura instantânea (comporta ascendente - linha verde) e abertura gradual (presença de estágios de abertura – linhas vermelha, azul e roxa) para duas inclinações do canal inclinado: (a) 0° , (b) 4° e (c) 6° . Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.....	102
Figura 4.33 - Curvas de fluxo das lamas caulínicas avaliadas: efeito de reopexia identificado.	103
Figura 4.34 - Alcance final da frente x_F para todas as configurações experimentais conduzidas com lama L_AA_28. Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.....	104
Figura 4.35 - Alcance final da frente x_F para todas as configurações experimentais conduzidas com lama L_AA_31. Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.....	105
Figura 4.36 - Alcance final da frente x_F para todas as configurações experimentais conduzidas com lama L_AAA_28_0.5A. Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.....	105
Figura 4.37 - Alcance final da frente x_F para todas as configurações experimentais conduzidas com lama L_AAA_28_0.25A. Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.....	106
Figura 4.38 - Adimensional de inércia (I) em função do número de Herschel-Bulkley (HB). A linha verde pontilhada indica o ajuste exponencial empregado e a região sombreada, limita por linhas pontilhadas laranjas, indica a incerteza do modelo de ajuste.....	107
Figura 4.39 - Adimensional de alcance final (x_{FI}) em função do número de Herschel-Bulkley (HB). A linha verde pontilhada indica o ajuste segundo lei de potência empregado e a região sombreada indica a incerteza do modelo de ajuste.....	108
Figura 5.1 - Esquema de funcionamento da técnica <i>Layering</i>	114
Figura 5.2 - Esquema em corte longitudinal do canal empregado nos experimentos físicos. Dimensões e condições de contorno de cada segmento são indicadas.....	116
Figura 5.3 - Esquema da malhagem com maior refinamento na região do escoamento.	117
Figura 5.4 - Esquema em corte longitudinal do canal empregado nos experimentos físicos. Dimensões e condições de contorno de cada segmento são indicadas.....	118
Figura 5.5 - Perfis de velocidade analítico (linha contínua) e numéricos (pontos dispersos) para fluido Newtoniano (caso N).....	120

Figura 5.6 - Perfis de velocidade analítico (linha contínua) e numéricos (pontos dispersos) para fluido lei de potência (caso <i>LP</i>).	120
Figura 5.7 - Perfis de velocidade analítico (linha contínua), numéricos (pontos dispersos coloridos) e experimentais (pontos dispersos quadrados cinzas) para fluido Herschel-Bulkley. Soluções analíticas e numéricas consideram a condição de não deslizamento no fundo.	121
Figura 5.8 - Perfis de velocidade analítico (linha contínua), numéricos (pontos dispersos coloridos) e experimentais (pontos dispersos quadrados cinzas) para fluido Herschel-Bulkley. Soluções analíticas e numéricas consideram o efeito de deslizamento no fundo.	122
Figura 5.9 - Confrontação numérico-experimental para experimentos conduzidos em canal inclinado com géis de carbopol e diferentes estágios de abertura de comporta.	123
Figura 5.10 - Confrontação numérico-experimental para experimentos conduzidos em canal inclinado com géis de carbopol e diferentes estágios de abertura de comporta.	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Precisão dos equipamentos empregados.	40
Tabela 3.2 - Incerteza dos parâmetros medidos.	40
Tabela 3.3 - Valores médios das propriedades medidas e calculadas nos experimentos conduzidos.	42
Tabela 3.4 - Comparação de vazões segundo diferentes métodos de obtenção.	53
Tabela 4.1 - Características dos fluidos-testes empregados. Massa específica em termos de valor médio.	62
Tabela 4.2 - Configurações experimentais analisadas para escoamento <i>dam-break</i> de géis de carbopol C _{0.17} e C _{0.25} . Para esses experimentos foram avaliados escoamento a partir de comporta de movimento descendente (abertura gradual).	75
Tabela 4.3 - Configurações experimentais analisadas para escoamento <i>dam-break</i> de lamas caulínicas de suspensão água-argila (L_AA_28 e L_AA_31) e de suspensão água-argila-areia industrial (L_AAA_28_0.5A e L_AAA_28_0.25A). Para esses experimentos foram avaliados escoamentos a partir de comporta ascendente (abertura instantânea) e descendente (abertura gradual), apenas para canal inclinado.	76
Tabela 4.6 - Resultados experimentais de experimentos de <i>dam-break</i> realizados com géis de carbopol. Consultar a Tabela 4.2 para verificação das configurações experimentais empregadas.	84
Tabela 4.7 - Resultados experimentais de experimentos de <i>dam-break</i> realizados com lamas caulínicas. Consultar a Tabela 4.3 para verificação das configurações experimentais empregadas.	95
Tabela 5.1 - Dados do escoamento (velocidade média de entrada U_0 , profundidade normal h_0 e declividade do canal θ) e do fluido escoante (tensão limite de escoamento τ_c , índice de consistência Kn , índice de escoamento n e massa específica ρ).	117
Tabela 5.2 - Dados do ensaio (velocidade de descida da comporta VD , estágio de abertura e inclinação do canal θ) e dos fluidos-teste (tensão limite de escoamento τ_c , índice de consistência Kn , índice de escoamento n e massa específica ρ).	119

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	ABRANGÊNCIA E JUSTIFICATIVA DO ESTUDO.....	1
1.1	OBJETIVOS.....	4
1.2	ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	5
2	ESTADO DA ARTE E CONTRIBUIÇÃO DESTE TRABALHO	7
2.1	REOLOGIA DE FLUIDOS	7
2.2	ASPECTOS CONCEITUAIS	7
2.2.1	Taxa de deformação	8
2.3	MODELOS REOLÓGICOS	10
2.3.1	Fluidos newtonianos.....	10
2.3.2	Fluidos não newtonianos	11
2.3.3	Reologia de fluidos viscoplásticos	15
2.3.4	Existência do plug	17
2.4	EXPERIMENTAÇÃO FÍSICA DE ESCOAMENTOS DE FLUIDOS NÃO NEWTONIANOS COM SUPERFÍCIE LIVRE	18
2.5	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	20
3	ESCOAMENTOS VISCOPLÁSTICOS EM CANAL INCLINADO: MEDIÇÃO DE PERFIL DE VELOCIDADE A PARTIR DE VELOCIMETRIA POR IMAGEM..	21
3.1	INTRODUÇÃO.....	21
3.1.1	MODELO DA LUBRIFICAÇÃO: DESENVOLVIMENTO DO PERFIL DE VELOCIDADE	22
3.2	OBJETIVO	25
3.3	METODOLOGIA	25
3.3.1	Fluido-teste	26
3.3.2	Caracterização reológica	27
3.3.3	Aparato experimental e medição do escoamento	28
3.3.3.1	Sistema de circulação e bombeamento de fluido	29
3.3.3.2	Gerador de plano laser.....	30
3.3.4	Técnicas de medição empregada	31
3.3.4.1	Medição de profundidade e velocidade superficial	31

3.3.4.2	Velocimetria: técnica STIV	31
3.3.4.3	Câmera de medição de escoamento.....	35
3.3.5	Visão geral dos experimentos.....	36
3.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
3.4.1	Resultados globais dos experimentos.....	41
3.4.2	Confrontação experimental-teórica de perfis de velocidade	46
3.4.3	Influência das paredes laterais no perfil de velocidade da seção transversal.....	50
3.4.4	Curvas de fluxo: reconstrução por meio de medições de perfil de velocidade	54
3.5	CONCLUSÃO.....	57
4	ESCOAMENTOS VISCOPLÁSTICOS EVOLUINDO EM PLANO E CANAL INCLINADO A PARTIR DE “RUPTURA DE BARRAGEM”	58
4.1	INTRODUÇÃO.....	58
4.2	OBJETIVO	60
4.3	METODOLOGIA	60
4.3.1	Fluido-teste	61
4.3.2	Caracterização reológica	63
4.3.3	Aparato experimental de dam break.....	64
4.3.3.1	Mesa de sustentação	65
4.3.3.2	Plano e canal inclinado.....	66
4.3.3.3	Módulos de retenção	67
4.3.3.4	Sistema de movimentação	69
4.3.4	Técnicas de medição empregada.....	70
4.3.4.1	Medição de profundidade: câmeras.....	70
4.3.4.2	Medição de evolução das frentes viscoplásticas: imagem STI	72
4.3.5	Visão geral dos experimentos de dam-break.....	74
4.3.6	Análise dimensional	81
4.4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	83
4.4.1	Experimentos de dam-break: géis de carbopol.....	84
4.4.2	Hidrogramas de ruptura para escoamentos de géis de carbopol	90
4.4.3	Experimentos de dam-break: lamas	94
4.4.4	Leituras interpretativas de escoamentos dam-break a partir de adimensionais.....	106
4.5	CONCLUSÃO.....	109

5	ABORDAGEM NUMÉRICA DE ESCOAMENTOS VISCOPLÁSTICOS EVOLUINDO EM CANAL INCLINADO E A PARTIR ESCOAMENTO TIPO RUPTURA DE BARRAGEM	111
5.1	METODOLOGIA	111
5.1.1	Rastreamento de superfície livre	112
5.1.2	Regularização da viscosidade aparente	113
5.1.3	Malha dinâmica	113
5.1.4	Detalhamento das simulações numéricas	114
5.2	DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS CONDUZIDOS	115
5.2.1	Escoamentos viscoplásticos evoluindo em canal inclinado	115
5.2.2	Escoamentos viscoplásticos evoluindo em canal inclinado a partir da liberação de material (dam-break)	118
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	120
5.3.1	Perfis de velocidade ao longo da profundidade de escoamentos viscoplásticos evoluindo em canal inclinado	120
5.3.2	Evolução de alcances ao longo de canal	123
5.4	CONCLUSÃO.....	125
6	CONCLUSÕES GERAIS E PERSPECTIVAS.....	127
6.1	CONCLUSÕES.....	128
6.1.1	Medição de perfil de velocidade a partir de técnica de velocimetria	128
6.1.2	Escoamentos de natureza viscoplástica em situação de dam-break	129
6.1.3	Confrontação numérico-experimental de escoamentos viscoplásticos	131
6.2	PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS	133
6.3	PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA	134
	REFERÊNCIAS	136
	APÊNDICE A – MÉTODO PARA OBTENÇÃO AUTOMÁTICA DA INCLINAÇÃO DE IMAGENS STI.....	145

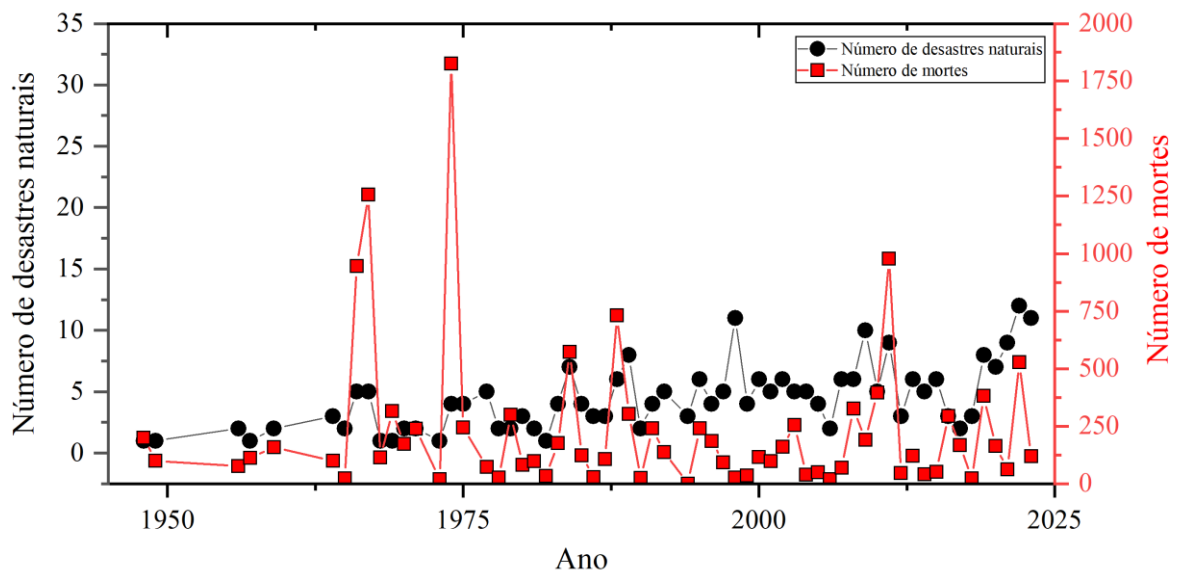
1 INTRODUÇÃO

1.1 ABRANGÊNCIA E JUSTIFICATIVA DO ESTUDO

Nos últimos anos desastres naturais relacionados à movimentação gravitacional de massa, podendo citar as corridas de lama (*mudflows*), corridas de detritos (*debris flows*) e deslizamentos de terra (*landslides*), têm estado atrelados às mudanças climáticas, têm sido mais frequentes e intensos devido à ação antrópica, o que tem custado cifras extraordinárias aos países pelos danos materiais e perda de vidas registrados (MACIEL et al., 2021; KHURANA et al., 2022). No caso particular dos rompimentos de barragens, estes têm ganhado maior atenção em função de seu potencial destrutivo, por causar mortes e impactos ambientais significativos a jusante da obra.

Desastres naturais afetam diretamente o meio ambiente e a população brasileira de muitos estados tem sofrido seus efeitos. Em particular as pessoas que ocupam áreas de risco em regiões de encosta, ou planícies de inundação. Dados do EM-DAT mostram o impacto do desastre natural sobre o Brasil e a tendência de aumento de eventos dessa natureza (Figura 1.1).

Figura 1.1 - Número de desastres naturais e mortes decorrentes desses eventos no Brasil no período de 1948 a julho de 2023.



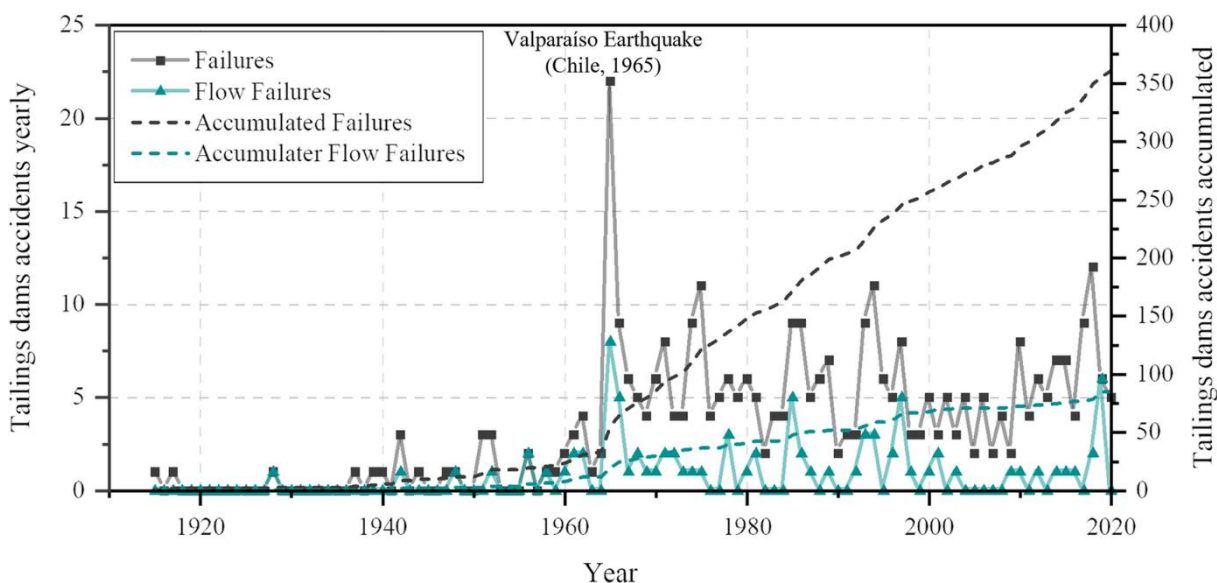
Fonte: adaptado de CRED, EM-DAT. The emergency events database, in: Cent. Res. Epidemiol. Disasters, 2023.

Nesse contexto de desastres naturais, a problemática tratada nesta pesquisa esteve associada à temática de ruptura de barragens, especificamente acerca do resultado

hidrodinâmico dos movimentos de massa gerados a partir da ruptura. De forma simplificada e motivacional, trouxe-se à discussão o problema de ruptura de barragens de aproveitamentos múltiplos, de diques de retenção e, mais particularmente, o rompimento de barragens de rejeitos. Nesses eventos, são liberados volumes extraordinários de material (hidrogramas de ruptura), de forma súbita ou gradual, e em dinâmica dependente do processo de evolução das brechas, produzindo fluxos de natureza laminar ou turbulenta, com material predominantemente não newtoniano. Adiciona-se, portanto, ao complexo fenômeno da ruptura, a necessidade de tratar um escoamento de fluido não newtoniano, quase sempre com presença de tensão limite de escoamento e viscosidade dependente da taxa de deformação.

Em relação aos eventos de *dam-break* em barragens de rejeito, Bowker e Chambers (2015) apontaram que ao longo de 70 anos (entre 1940 e 2010) cerca de 214 falhas ocorreram, sendo que 31% (67) desses eventos foram de natureza grave e muito grave. Entretanto, 63% das 52 falhas ocorridas entre 1990 e 2010 foram de natureza grave e muito grave, indicando frequência crescente de eventos mais danosos nos últimos anos. A partir da Figura 1.2 verifica-se a ocorrência de falhas de barragens de rejeitos, no mundo, entre 1940 e 2020, e os eventos em que houve escoamento de rejeitos. Nota-se aumento de acidentes a partir de 1960, período que coincide com o aumento número de barragens.

Figura 1.2 - Falhas de barragem de rejeitos registradas entre 1940 e 2020.



Fonte: (HALABI et al., 2022).

Dados os avanços em termos de caracterização de materiais e emprego de conceitos de reologia, estudos das últimas décadas têm buscado entendimento desses eventos considerando

as características em termos de taxa de deformação e tensão cisalhamento, bem como de outros fenômenos (tixotropia, reopexia, viscoelasticidade, granulometria, etc.). A necessidade da reologia em avaliar escoamentos *dam-break* tem se tornado cada vez mais evidente. No Brasil a Agência Nacional de Mineração (ANM) publicou a Resolução N° 95, de 07 de fevereiro de 2022, a qual exige em estudos de dano potencial a avaliação de deslocamento da frente de onda considerando minimamente modelos 2D que considerem a caracterização geotécnica e a reologia dos rejeitos (BRASIL, 2022).

Do ponto hidrodinâmico, os modelos geralmente utilizados em estudos de ondas de cheia ou propagação de hidrogramas de ruptura são pautados na validade das equações *shallow water* (*long domain*, tipo Barré de *Saint-Venant*), ainda que as acelerações verticais sejam significativas na zona do acidente. Mais recentemente, a literatura tem apresentado tentativas de modelagem para fluidos hiperconcentrados e não newtonianos utilizando alguns artifícios e ou arranjos, como o do “pseudoManning” (HEC-RAS), em alusão ao coeficiente de rugosidade de Manning (MACHADO, 2017), assim como outros modelos que possibilitam levar em consideração a não newtoniedade do fluido por meio de equações do movimento promediadas na vertical ou equações completas (HEC-RAS 6.3, RiverFlow2D, DELFT3D, FLDWAV, FLUENT, FLOW-3D, OPENFOAM, MPS, DualSPHysics, etc). De fato, tem-se avançado, ainda que lentamente, sobretudo na escola brasileira, acerca desses assuntos, mas ainda dependentes de modelos ou *softwares* estrangeiros pautados em diferenças finitas, elementos finitos, volumes finitos, técnicas lagrangeanas ou associação de CFD (*Computational Fluids Dynamics*) com elementos discretos (DEM), conforme Li e Zhao (2018). Se tal fato pode ser minimizado em função dos novos dispositivos *free* e *open sources* de alguns *softwares*, vemos com preocupação a falta de trabalhos de natureza experimental e leitura mais crítica desses assuntos, que constituem ainda lacunas do nosso conhecimento e com repercussões nas práticas de engenharia.

Deve-se, portanto, investir em modelos de reologia não newtoniana para escoamentos com superfície livre em regime laminar, e ainda mais para os regimes de transição do laminar-turbulento e turbulento propriamente dito (domínios estes ainda de “relativo desconhecimento” ou “fragilidade teórica” e consequente inexistência de boa prática de engenharia) na “esfera” dos escoamentos de fluidos não newtonianos com superfície livre, sobretudo no caso de escoamentos naturais.

Ademais, sem qualquer pretensão de esgotar o assunto, a discussão não para aqui, haja vista a distinção teórica proposta, já há 40 anos, por Jeyapalan et al. (1983), entre reologias características de rejeitos fosfatados (baixo peso específico, próximo ao peso específico da

água) e outros tipos de rejeitos, diferenciando a susceptibilidade deles em gerar fluxos turbulentos e laminares respectivamente. Fato este contestado por Vick (1984) que afirma que, teoricamente, todos os tipos de reservatórios que contêm rejeitos possuem também um lago de tamanho variável e, nesse sentido, não fica claro a que ponto a quantidade de água reservada dominaria a natureza do escoamento do rejeito, de maneira a provocar sua propagação laminar ou turbulenta. Vale registrar que simulações numéricas 3D de rupturas de barragem têm indicado a presença de regiões de regime turbulento no escoamento (TRAVIS et al., 2012; WANG et al., 2018; SÃO, 2018; YU et al., 2020).

Assim posto, o caráter desta pesquisa, ainda que eminentemente experimental e complementada por meio teste numéricos, se insere na interface da pesquisa básica e aplicada, procurou simular e analisar aspectos específicos e hidrodinâmicos quando da evolução espaço-temporal de fluidos não newtonianos (lamas e géis de carbopol, em regime laminar) em canais e planos inclinados, sob condições controladas de laboratório. Outrossim, a influência dos diversos cenários de ruptura sobre os alcances (*runout*) de frentes viscoplásticas, bem como o perfil de velocidade ao longo da profundidade do escoamento foram tratados neste trabalho.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desta tese é determinar, em nível de laboratório (situação controlada), e utilizando equipamentos de precisão, perfil vertical de velocidade de escoamento viscoplástico, e obter a evolução temporal de alcance de frentes de materiais viscoplásticos (géis de carbopol e lamas caulíníticas) produzidas pela movimentação vertical de uma comporta (para cima e para baixo com relação ao fundo do canal), de forma “gradual” e “instantânea”, tipo ruptura de barragem.

Assim, a proposta está pautada três grandes vertentes que se complementam, cujos **Objetivos Específicos** são:

1ª vertente - inferir em canal o perfil de velocidade de escoamentos de fluidos viscoplásticos, em regime permanente, e determinar o perfil da componente longitudinal da velocidade ao longo da profundidade por meio da **implantação de metodologia própria baseada em imagem espaço temporal STI** (*Space-Time Image*);

2ª vertente - estudar, em canal e plano inclinado, concebido, desenvolvido e implementado para este estudo, o avanço de frentes viscoplásticas em regime não permanente, **buscando avaliar o comportamento de alcance (*runout*, $t \rightarrow \infty$) e de hidrogramas unitários, para o caso de**

abertura gradual (formação de brechas) segundo diferentes velocidades de abertura da comporta, seja subindo, seja descendo;

3ª vertente - confrontação e análise numérico-experimental de resultados de perfis de velocidade (da 1ª vertente) e de alcances (da 2ª vertente) de frentes viscoplásticas.

1.2 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

A Tese de Doutorado aqui apresentada é composta por seis (6) Capítulos, conforme apresentados a seguir:

No Capítulo 1 é apresentada a introdução do trabalho, expondo os elementos de justificativa e motivação do estudo acerca das características dinâmicas de fluidos não newtonianos evoluindo em canal e plano inclinado, além dos objetivos almejados.

O Capítulo 2 apresenta, de forma sucinta, as definições e aspectos conceituais, a importância e aplicações da Reologia de fluidos não newtonianos na caracterização de escoamentos laminares, bem como os estudos mais recentes e significativos em termos de avaliação de escoamentos viscoplásticos, tanto com relação à medição de perfis de velocidade quanto à evolução espaço-temporal de frentes produzidas pela liberação de material.

O Capítulo 3 explora a obtenção do perfil de velocidade ao longo da profundidade de escoamentos de fluidos de comportamento reológico de Herschel-Bulkley, em regime permanente e sob hipótese de escoamento unidirecional. Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento de metodologia própria de velocimetria por imagem (baseada na técnica *STIV*), bem como do aparato experimental empregado, além dos resultados obtidos para diferentes condições experimentais de vazão, inclinação e característica reológica do fluido escoante. Os resultados obtidos são confrontados com o modelo teórico - teoria da lubrificação, demonstrando a operacionalidade e assertividade da técnica empregada.

O Capítulo 4 apresenta o aparato desenvolvido para realizar automaticamente simulações físicas de *dam-break*. Nele são descritos todos os sistemas que compõem o aparato e o seu funcionamento em termos de automação de abertura de comporta e inclinação de canal e plano inclinado. Os resultados apresentados evidenciam a capacidade do aparato em possibilitar escoamentos advindos de ruptura de barragem e, segundo as análises de alcance e velocidade das frentes produzidas, bem como o cruzamento dos efeitos de velocidade de abertura de comporta e imposição de estágios de abertura, verificando efeitos de inércia atuando sobre os escoamentos e diferenças significativas, em termo da evolução do alcance nos tempos

iniciais da ruptura, quando se emprega abertura instantânea ou gradual para gerar escoamento tipo *dam-break*.

O Capítulo 5 realiza uma análise numérica, de forma pontual, de alguns dos experimentos físicos conduzidos nos Capítulos 3 e 4. Foi empregado o software *ANSYS Fluent* 14.5, o qual utiliza as equações governantes da dinâmica dos fluidos discretizadas pelo método dos volumes finitos. A confrontação dos resultados numéricos com os experimentais permitiu identificar proximidade entre os resultados, corroborando a modelagem numérica empregada. Os resultados numéricos foram capazes de retratar algumas observações experimentais apontadas no Capítulo 3 (presença de deslizamento de parede em escoamentos de elevada tensão limite de escoamento) e Capítulo 4 (atenuação da evolução temporal nos alcances produzidos a partir de imposição de abertura gradual de comporta).

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões globais do trabalho de tese em termos de análise de velocimetria, escoamento tipo *dam-break* e análise numérica, bem como elenca possibilidades futuras de análise sobre escoamentos de natureza viscoplástica. Encerra-se o capítulo com as produções técnico-científica atreladas ao doutoramento.

2 ESTADO DA ARTE E CONTRIBUIÇÃO DESTE TRABALHO

Neste capítulo são abordados diferentes aspectos que compõem o estudo de escoamentos de natureza não newtoniana. Primeiramente, uma revisão sobre a reologia de fluidos é apresentada, focando o modelo reológico de Herschel-Bulkley e a existência da transição entre região cisalhada e não cisalhada em escoamentos dessa natureza. Por fim, são apresentados alguns dos principais estudos experimentais realizados com fluidos de natureza viscoplástica, de forma a possibilitar enquadrar as contribuições deste estudo.

2.1 REOLOGIA DE FLUIDOS

A reologia é a ciência que busca analisar as respostas de um material, quando este sofre a aplicação de uma tensão ou deformação, apresentando um campo elevado de possíveis aplicações, podendo estudar o comportamento de materiais em diferentes estados - sólido, líquido ou gasoso.

As possibilidades de aplicação da reologia são amplas, da hemoreologia, passando pela indústria farmacêutica, química, petroquímica, mineração, etc, à indústria da construção civil. Diversos produtos atualmente têm seu desenvolvimento atrelado à sua caracterização reológica, com destaque para os polímeros e plásticos, bem como materiais de base cimentícia, sobretudo os concretos autoadensáveis (CAA), aos materiais lamosos provenientes da mineração, com o propósito de minimizar os impactos da atividade mineradora (LONG et al., 2017; BOGER, 2013).

O comportamento reológico é visto segundo a relação entre forças e deformações, a qual pode ser representada por uma formulação matemática chamada de equação de estado reológico ou equação constitutiva, permitindo assim a obtenção das propriedades reológicas do material (MALKIN; ISAYEV, 2012).

2.2 ASPECTOS CONCEITUAIS

A correta compreensão da reologia dos materiais requer o conhecimento de duas grandezas: a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, e a relação que elas podem estabelecer. Para que o material escoe é necessário que vários de seus elementos estejam sob a ação de forças. Na prática, as forças que atuam em um elemento fluido são divididas em duas classes. Na primeira classe encontram-se as forças de superfície, ditas forças de curto alcance,

enquanto na segunda classe, são vistas as forças de corpo, aquelas que atuam sob longo alcance como, por exemplo, força gravitacional ou eletromagnética.

Considerando um elemento de superfície dS de uma parcela de fluido, as forças de superfície podem ser vistas segundo tensões atuantes, tanto tangenciais (de cisalhamento) quanto normais, podendo ser escrita conforme a Equação 2.1.

$$dF = \sigma \cdot n dS \quad (2.1)$$

sendo σ (ou σ_{ij} , em notação indicial) um tensor simétrico ($\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$), conhecido como tensor de tensões, cuja contração com o vetor unitário n representa as forças de superfície em contato.

Estando o fluido em repouso, o tensor de tensões é escrito conforme a Equação 2.2.

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} \quad (2.2)$$

sendo p o campo escalar de pressão associado ao tensor esférico δ_{ij} (Delta de Kronecker).

Estando o fluido em movimento, o tensor de tensões é escrito conforme Equação 2.3.

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \tau_{ij} \quad (2.3)$$

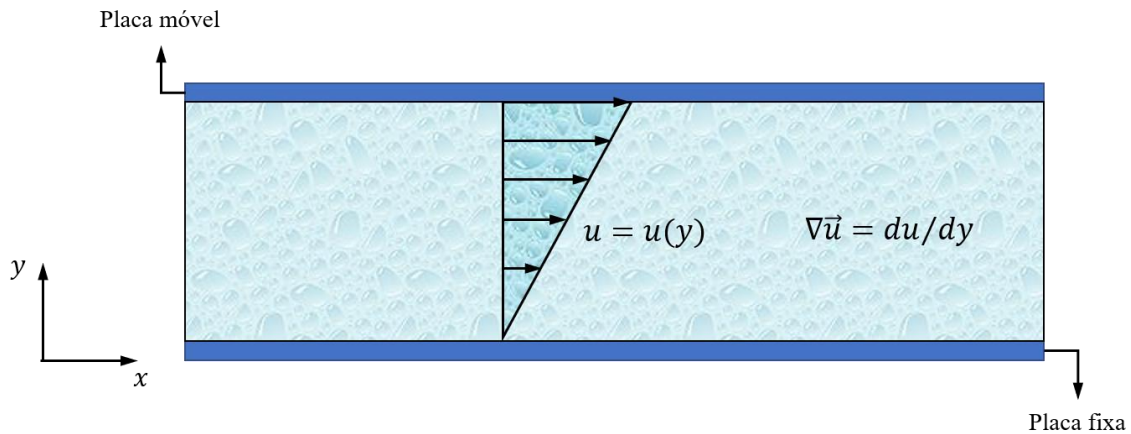
sendo $p\delta_{ij}$ a parte isotrópica, conhecida como parcela esférica do tensor de tensões, associada à pressão, e τ_{ij} parte anisotrópica, também conhecida como parcela desviadora do tensor de tensões, associada à viscosidade do fluido.

2.2.1 Taxa de deformação

Sob a ação das tensões descritas, um material sofrerá deformações, possibilitando com isso o seu escoamento. Considerando um fluido viscoso posicionado entre duas placas infinitas, separadas verticalmente por um espaço (h), faz-se com que uma das placas se mova com uma dada velocidade pela imposição de uma força tangencial, enquanto a outra é mantida parada, conforme Figura 2.1. Devido à condição de viscosidade do fluido e ao movimento da placa, as

partículas irão se deformar, sendo que a quantidade de movimento será transferida ao longo da camada de fluido em função do efeito viscoso (processo difusivo).

Figura 2.1 - Cisalhamento simples de um escoamento viscoso em regime laminar.



Fonte: próprio autor.

A taxa de deformação ($\dot{\gamma}$) ou de cisalhamento, ao longo da camada de fluido, caracteriza o cisalhamento do fluido, e corresponde ao gradiente de velocidade $\nabla \vec{u}$ das partículas em movimento, conforme Equação 2.4.

$$\dot{\gamma} = \nabla \vec{u} \quad (2.4)$$

sendo ∇ o operador Nabla e $\vec{u}$ o campo de velocidade do escoamento.

A consideração descrita pela Figura 2.1 ilustra um fluido sob cisalhamento simples, neste caso, a taxa de deformação tem apenas uma componente, conforme Equação 2.5.

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.5)$$

No caso geral, a taxa de deformação, segundo notação indicial, é descrita pela Equação 2.6.

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (2.6)$$

A partir do modelo de Newton (escoamento viscoso entre placas paralelas), ilustrado pela Figura 2.1, verificou-se que a viscosidade dinâmica é uma constante de proporcionalidade de primeira ordem que relaciona a tensão de cisalhamento com a taxa de deformação. A viscosidade, por indicar a facilidade de escoamento contínuo sob a ação de uma tensão de cisalhamento externo, pode ser considerada a principal propriedade reológica de um fluido.

2.3 MODELOS REOLÓGICOS

Os fluidos são classificados de acordo com o seu comportamento reológico, a partir da relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação, em **newtonianos** e **não newtonianos**.

2.3.1 Fluidos newtonianos

O comportamento de fluido newtoniano em experimentos conduzidos a temperatura e pressão constantes apresenta, de acordo com Barnes et al. (1989), quatro características, a saber:

- a) A viscosidade por cisalhamento não varia com a taxa de deformação por cisalhamento;
- b) A viscosidade é constante em relação ao tempo de cisalhamento e a tensão no fluido cai para zero imediatamente após a interrupção do cisalhamento. Em qualquer cisalhamento subsequente, por mais longo que seja o período de repouso entre as medições, a viscosidade é a mesma medida anteriormente;
- c) A única tensão gerada no escoamento por cisalhamento simples é a tensão de cisalhamento, sendo as duas diferenças de tensões normais iguais a zero;
- d) As viscosidades medidas em diferentes tipos de deformação estão sempre em proporção simples entre si, assim, por exemplo, a viscosidade medida em um fluxo extensional uniaxial é sempre três vezes o valor medido em fluxo de cisalhamento simples.

Considerando um fluido newtoniano, a parcela desviadora do tensor de tensões, Equação 2.3, sob condição de fluido incompressível ($\nabla \cdot \vec{u} = 0$) e viscosidade constante, pode ser reescrita de acordo com a Equação 2.7.

$$\tau_{ij} = 2\mu D_{ij} \quad (2.7)$$

sendo μ a viscosidade dinâmica do fluido (constante) e D_{ij} o tensor taxa de deformação.

Ao avaliar o tensor taxa de deformação D_{ij} , definido como a parte simétrica do gradiente de velocidade $\nabla \vec{u}$, e considerando fluido incompressível, conclui-se que apenas termos referentes ao efeito de cisalhamento devem ser considerados, conforme Equação 2.8.

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.8)$$

Finalmente, pode-se concluir que o tensor de tensões σ_{ij} , para fluidos newtonianos e incompressíveis, é dado pela Equação 2.9.

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.9)$$

Em condições de cisalhamento simples e regime permanente, o modelo de tensão de cisalhamento, de um fluido newtoniano, é simplificado de acordo com a Equação 2.10.

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} = \mu \dot{\gamma} \quad (2.10)$$

sendo τ a tensão de cisalhamento, μ coeficiente de viscosidade absoluto/dinâmico e $\dot{\gamma}$ a taxa de deformação.

2.3.2 Fluidos não newtonianos

Se o fluido não respeitar qualquer uma das quatro condições enumeradas no item 2.3.1, ele deve ser considerado não newtoniano. Diversos os fluidos que apresentam tal comportamento, como por exemplo os polímeros, termoplásticos, fluidos de perfuração, lamas oriundas de barragens, tintas, concreto fresco, fluidos biológicos, etc (IRGENS, 2008).

Em se tratando de fluidos não newtonianos, a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação deve ser vista de maneira completa, estabelecendo a definição de dois conceitos relacionados à viscosidade: a viscosidade aparente (inclinação de uma reta passando na origem) e no binômio $(\tau, \dot{\gamma})$ e a viscosidade diferencial, conforme as Equações 2.11 e 2.12, respectivamente.

$$\mu_{ap} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.11)$$

$$\mu_{dif} = \frac{d\tau}{d\dot{\gamma}} \quad (2.12)$$

sendo μ_{ap} a viscosidade aparente e μ_{dif} a viscosidade diferencial.

Além da viscosidade, há um outro importante parâmetro reológico, a tensão limite de escoamento. Segundo Dinkgreve et al. (2016), existem materiais que escoam apenas quando uma tensão crítica é excedida. Essa tensão crítica é chamada de tensão limite de escoamento (τ_0). Deve-se esclarecer que vários estudos indicam que materiais com tensão limite de escoamento podem ser classificados em duas categorias: simples e tixotrópicos. Materiais com tensão limite de escoamento “simples” são aqueles cuja viscosidade depende apenas da taxa de cisalhamento, sendo a tensão limite de escoamento bem definida e, portanto, creditada como uma propriedade do material. Já em materiais tixotrópicos, a tensão limite de escoamento não depende apenas da taxa de cisalhamento, mas também do histórico de deformação da amostra, implicando que para esses materiais a tensão limite de escoamento não é uma propriedade fixa, mas que evolui ao longo do tempo devido às mudanças estruturais internas. Nessa tese, a análise foi realizada a partir de regime estacionário, considerando unicamente a tensão limite de escoamento simples.

Segundo Cheng (1986), a tensão limite de escoamento, em suspensões, é fruto das aglomerações das partículas, as quais formam uma estrutura espacial rígida. Dessa forma, tais estruturas se rompem apenas quando o nível de tensão aplicado supera a tensão limite de escoamento.

A forma mais simples de desenvolver os modelos não newtonianos é por meio do modelo não newtoniano generalizado, o qual permite o uso das mesmas expressões de fluidos Newtonianos, mas tendo a viscosidade como função do segundo invariante da taxa de deformação. Assim, neste trabalho serão apresentados apenas modelos não newtonianos generalizados, considerando fluidos puramente viscosos e independentes do tempo, de forma que a parcela desviadora do tensor de tensões pode ser escrita segundo a Equação 2.13.

$$\tau_{ij} = \frac{\tau_0}{\sqrt{-D_{II}}} D_{ij} + F(\sqrt{-D_{II}}) D_{ij} \quad (2.13)$$

sendo τ_{ij} a parcela desviadora do tensor de tensões, τ_0 a tensão limite de escoamento, D_{ij} o tensor taxa de deformação, D_{II} o segundo invariante do tensor taxa de deformação e F uma função contínua positiva que tende para zero quando D_{II} tende para zero.

Os modelos reológicos de fluidos não newtonianos comumente empregados são os modelos de Bingham, Power-Law e de Herschel-Bulkley, conforme Equações de 2.14 a 2.19.

- Modelo Power-Law (Lei de Potência)

$$\tau_0 = 0; \quad F(\sqrt{-D_{II}}) = \frac{2^n K_n}{(\sqrt{-D_{II}})^{1-n}} \quad (2.14)$$

$$\tau_{ij} = \frac{2^n K_n}{(\sqrt{-D_{II}})^{1-n}} D_{ij} \quad (2.15)$$

- Modelo de Bingham

$$\tau_0 \neq 0; \quad F(\sqrt{-D_{II}}) = 2\mu_\beta \quad (2.16)$$

$$\tau_{ij} = \frac{\tau_0}{\sqrt{-D_{II}}} D_{ij} + 2\mu_\beta D_{ij} \quad (2.17)$$

sendo τ_0 a tensão limite de escoamento e μ_β a viscosidade plástica.

- Modelo de Herschel-Bulkley

$$\tau_0 \neq 0; \quad F(\sqrt{-D_{II}}) = \frac{2^n K_n}{(\sqrt{-D_{II}})^{1-n}} \quad (2.18)$$

$$\tau_{ij} = \frac{\tau_0}{\sqrt{-D_{II}}} D_{ij} + \frac{2^n K_n}{(\sqrt{-D_{II}})^{1-n}} D_{ij} \quad (2.19)$$

sendo n o índice de escoamento e K_n o índice de consistência.

Considerando situações em que o fluido está sujeito ao cisalhamento simples, os modelos reológicos apresentados anteriormente são definidos de maneira simples, conforme Equações de 2.20 a 2.22. idem

- Modelo Power-Law (Lei de Potência)

$$\tau = K_n \dot{\gamma}^n \quad (2.20)$$

- Modelo de Bingham

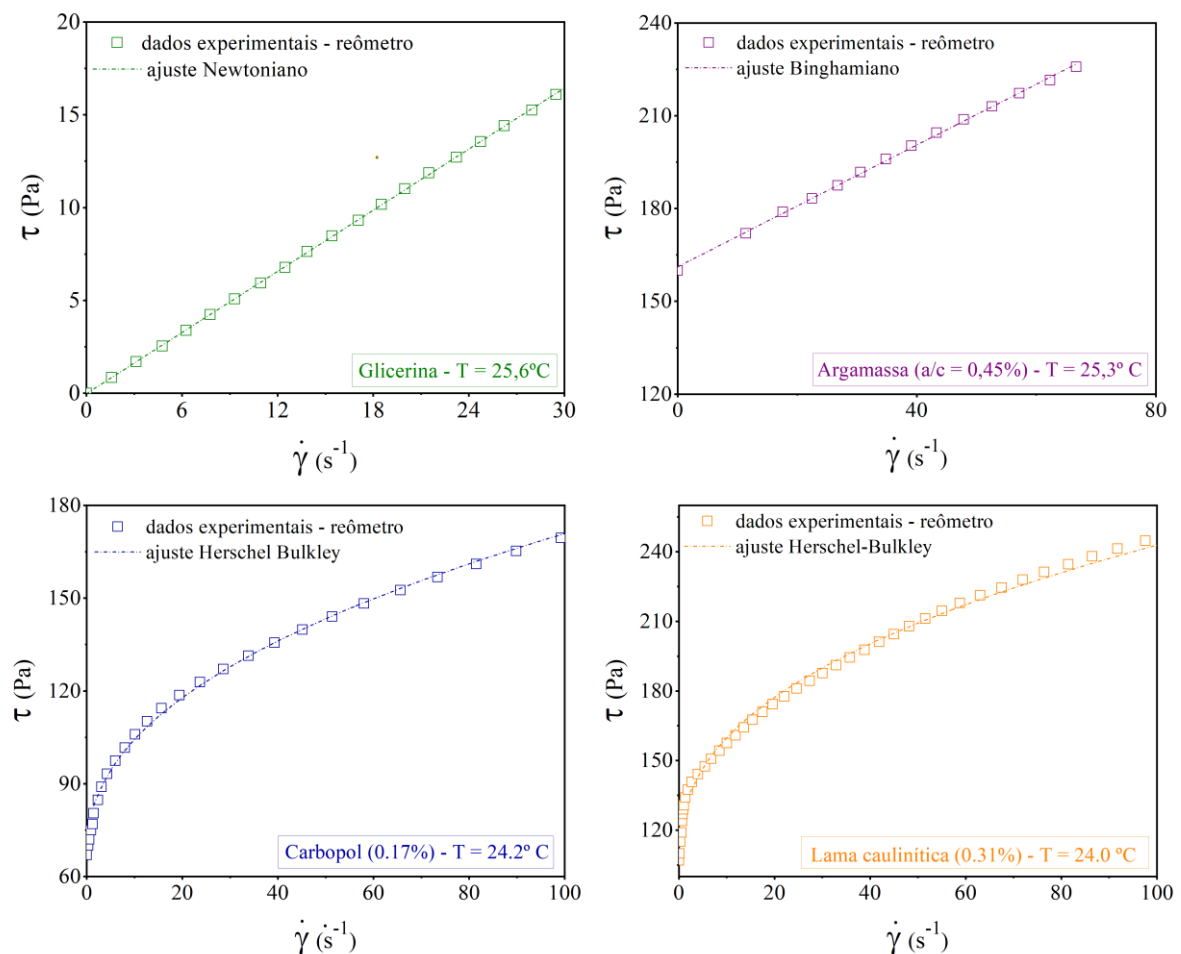
$$\tau = \tau_0 + \mu_\beta \dot{\gamma} \quad (2.21)$$

- Modelo de Herschel-Bulkley

$$\tau = \tau_0 + K_n \dot{\gamma}^n \quad (2.22)$$

Pode-se apresentar o comportamento dos fluidos Newtonianos e não newtonianos, sob cisalhamento simples, a partir de uma curva conhecida como curva de fluxo ou reograma, a qual relaciona taxa de deformação e tensão de cisalhamento, conforme Figura 2.2.

Figura 2.2 - Curvas de fluxos de fluido Newtoniano e não newtoniano avaliados em reômetro R/S Brookfield disponível no Laboratório de Hidrologia e Hidrometria da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Unesp.



Fonte: próprio autor.

Na Figura 2.2 é possível identificar a relação linear entre taxa de deformação e tensão de escoamento para os fluidos glicerina e argamassa. Entretanto, a diferença entre esses dois fluidos está na presença da tensão limite de escoamento para a argamassa. Assim, a argamassa, ainda que apresente relação linear entre τ e $\dot{\gamma}$ (como o caso da glicerina), é caracterizada a partir modelo não newtoniano de Bingham em função de apresentar a tensão limite de escoamento. A análise das curvas de fluxo do carbopol e lama caulínica permite identificar uma relação não linear entre τ e $\dot{\gamma}$, indicando fluido de natureza não newtoniana.

2.3.3 Reologia de fluidos viscoplásticos

Em situações de escoamentos naturais, com superfície livre, como corridas de lamas e de detritos, os materiais envolvidos se caracterizam pela existência de comportamento reológico de maior complexidade com presença de tensão limite de escoamento, quando comparados a um escoamento de água (COUSSOT et al. 1998; ANCEY, 2007).

A presença da tensão limite não é algo raro, estando presente em diferentes materiais que fazem parte da vivência humana como, por exemplo, a tinta aplicada nas edificações, os materiais cimentícios empregados nas construções (concretos, argamassas e pastas cimentícias), a pasta de dente utilizada diariamente, a qual apenas escoar a partir de uma dada tensão aplicada, permanecendo sólida sobre a escova, os cremes cosméticos aplicados na pele, a maionese empregada nos lanches e os géis.

A composição característica dos materiais advindos de movimentos gravitacionais de massas, como as lamas, é caracterizada pela suspensão de partículas de base mineralógica (argila, areias de granulometria estendida e outros particulados, ainda que grossos) em água (BARDOU et al., 2003; OVARLEZ et al., 2015). O comportamento reológico de tais materiais é regido por modelos ditos não newtonianos, especificamente o de Herschel-Bulkley (HUANG e GARCIA, 1998; COUSSOT, 2014), mesmo em situações de baixa concentração como relatado por Maciel et al. (2009). Tal modelo se caracteriza pela relação não linear entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação, além de presença de tensão limite de escoamento e viscosidade aparente.

É importante destacar que a reologia dos materiais não se resume, em termos de complexidade, à presença de viscoplasticidade, ainda mais quando se trata de materiais naturais do tipo mistura de água e partículas sólidas de diferentes tamanhos. Nessa situação, efeitos como viscoelasticidade, tixotropia, reopexia mudanças térmicas, de pH, concentração,

heterogeneidade das camadas de material, etc. passam a compor análises adicionais para bem caracterizar o material e o escoamento (COUSSOT; PIAU, 1994; BOGER, 2013).

Em termos de efeitos reológicos presentes em suspensões de escoamentos naturais, a tixotropia é um fenômeno já verificado em diferentes estudos e com efeitos sobre o escoamento já conhecido (CHANSON; JARNY; COUSSOT, 2006; COUSSOT et al., 2002; HUYNH; ROUSSEL; COUSSOT, 2005). Basicamente, a tixotropia é uma característica do fluido que resulta na quebra de sua microestrutura quando sob taxas de deformação e no retorno às suas características iniciais quando não submetido a cisalhamento. Pode ainda ocorrer o fenômeno de reopexia, este visto com menor frequência em materiais de rejeito, entretanto com consequências desastrosas (BOGER, 2009) por implicar no aumento de viscosidade em função da taxa de cisalhamento e do tempo de aplicação (HACKLEY; FERRARIS, 2001). Os resultados reológicos das lamas, suspensões de argila caulínica com e sem adição de areia, produzidas neste trabalho identificaram material de comportamento reopético e são melhores discutidos na Subseção 4.4.3.

Em situação com presença de superfície livre, a complexidade de escoamentos naturais também é afetada pela coexistência de zonas cisalhadas (níveis de tensão acima da tensão limite de escoamento) e não cisalhadas (níveis de tensão abaixo da tensão limite de escoamento), o que pode influenciar o surgimento de tensões normais no material (PIAU, 1996; BALMFORTH e CRASTER, 1999). Baseado em todas as características presentes em escoamentos naturais pode-se afirmar que os modelos e formulações a serem empregados devem ser os mais completos possíveis, ainda que alguns mecanismos envolvidos em tais escoamentos não estejam completamente respondidos e continuam a ser explorados.

Em situação de experimentação física costuma-se fazer uso de fluidos viscoplásticos reologicamente semelhantes aos materiais encontrados em escoamentos naturais. Na literatura, inúmeros são os trabalhos que retratam escoamentos viscoplásticos, buscando avaliar escoamentos naturais, a partir do uso do gel de Carbopol (PIAU; DEBIANE, 2005; MINUSSI; MACIEL, 2012; CHAMBON et al., 2014).

O gel de carbopol é um fluido viscoplástico de características reológicas semelhantes às lamas encontradas em pés de barragens e corridas de lamas, sendo sua produção realizada a partir de um polímero acrílico hidrossolúvel. Assim como as lamas, o gel de carbopol, a partir de determinadas concentrações, apresenta tensão limite de escoamento e tem o modelo de Herschel-Bulkley como representativo de suas características reológicas (PIAU, 2007; BALMFORTH et al., 2014). Por produzir um meio translúcido, o uso de gel de carbopol como

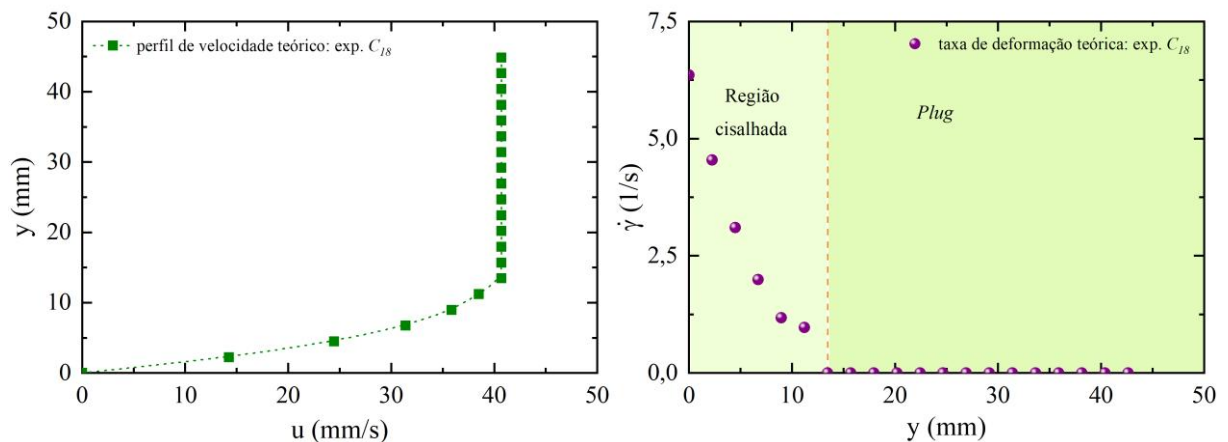
fluido-teste é interessante para análises de velocimetria que fazem uso de plano laser e emprego de microtraçadores dispersos no fluido.

No contexto de avaliação de escoamentos viscoplásticos, foram estudados, nesta pesquisa, dois tipos de fluidos, os géis de carbopol e as lamas produzidas a partir da mistura de água com argilas caulíníticas, ambos de natureza viscoplástica e de comportamento reológico ajustado pelo modelo Herschel-Bulkley.

2.3.4 Existência do *plug*

Em escoamentos com fluidos reologicamente aderentes ao modelo Herschel-Bulkley com superfície livre há a presença, na proximidade da superfície livre do escoamento, do *plug*. O *plug* é a região do escoamento em que não há o cisalhamento do fluido, com isso não há a deformação. Nessa região a velocidade do escoamento é máxima e constante, como pode visualizado a partir da Figura 2.3.

Figura 2.3 - Características de escoamento de fluido viscoplástico Herschel-Bulkley avaliado no Capítulo 3: (a) perfil de velocidade e (b) taxa de deformação.



Fonte: próprio autor.

Conforme pode-se visualizar a partir da Figura 2.3, a região do *plug* é marcada pela uniformidade da velocidade e não deformação do fluido, ainda que Balmforth e Craster (1999) tenham mostrado que a região do *plug* é ligeiramente cisalhada na situação em que o escoamento não é perfeitamente uniforme e, por isso, deveria ser mais corretamente chamada de *pseudo-plug*.

2.4 EXPERIMENTAÇÃO FÍSICA DE ESCOAMENTOS DE FLUIDOS NÃO NEWTONIANOS COM SUPERFÍCIE LIVRE

Problemas relacionados à liberação de volume finito e represado de material viscoplástico com uma superfície livre podem ser vistos em diferentes aplicações, seja em processos industriais, como testes que avaliam a consistência de materiais como, por exemplo, o *slump test* e teste da calha na engenharia civil (PEREIRA; MACIEL, 2021; PEREIRA et al., 2022; GAO; FOURIE, 2015), seja em escoamentos naturais, caso de corridas de lamas e de detritos (COCHARD e ANCEY, 2009).

Quando da avaliação desse tipo de material em escoamento, torna-se necessário o uso de modelos apropriados para descrever o comportamento dinâmico envolvido. Neste contexto, o uso de modelos de reologia não newtoniana, basicamente o de Bingham e de Herschel-Bulkley, tem-se mostrado capaz de bem descrever, de forma completa, o comportamento complexo desse tipo de material (BALMFORTH, 2014).

Mesmo que escoamentos com superfície livre, relacionados a fluidos viscoplásticos, sejam encontrados em diferentes aplicações, o seu completo entendimento ainda requer estudos e reflexões. Não obstante, nos últimos anos, estudos de natureza experimental, matemática e numérica têm sido realizados nessa direção a fim de definir modelos capazes de fornecer leis de alcance (*runout*) e de mapeamento desses escoamentos (COUSSOT et al., 1996; BALMFORTH et al., 2006; COCHARD; ANCEY, 2009; SARAMITO et al., 2013; AZIMI, 2016; BATES; ANCEY, 2017; LIU, 2018).

Questões como campo de velocidade e forma da frente, em escoamentos dessa natureza, continuam a ser investigados e debatidos, sendo que a obtenção de dados acerca desse tipo de escoamento requer a realização de experimentos físicos de elevada qualidade e controle, necessitando de equipamentos de alto desempenho, tanto para medição de lâminas de fluido e velocidade de escoamento, quanto para a caracterização reológica do fluido, uma vez que tais informações são de extrema importância para a modelagem numérica e futuras tomadas de decisão (na esfera de gestão de riscos, determinação de zonas de auto-salvamento, etc).

No que diz respeito à realização de experimentos físicos de fluidos não newtonianos relacionados a escoamentos naturais é possível encontrar nos últimos anos, mesmo que em pouco número, aparatos experimentais de elevada performance que vêm a contribuir para o entendimento desses fenômenos.

A fim de avaliar o escoamento de fluidos não newtonianos (suspensão de bentonita e água), de comportamento tixotrópico, quando de um rompimento de barreira, Chanson et al.

(2006) utilizaram um canal retangular e, por meio de câmera ultra-rápida e sistema a laser, avaliaram o comportamento de escoamento em termos de sua forma, lâmina de fluido e seu alcance.

Cochard e Ancey (2009) desenvolveram um plano inclinado, monitorado por câmera, com um reservatório superior, e definiram uma técnica de processamento de imagens para avaliação de escoamento viscoplástico. Considerando modelo reológico de Herschel-Bulkley e as informações oriundas do escoamento no plano inclinado, os autores verificaram comportamento de avanço para escoamento em diferentes inclinações e com diferentes parâmetros reológicos.

Na mesma direção, Chambon et al. (2009) desenvolveram um aparato experimental, baseado em um plano inclinado com o fundo móvel (esteira), a fim de gerar escoamento confinado e estacionário de fluido viscoplástico. A partir de câmera digital e instrumentação (sensores ultrassônicos) foi possível avaliar a forma da superfície livre e as alturas das lâminas de fluido (escoamento de uma lama caulínica).

Tendo como temática rompimento de barragem, Minussi e Maciel (2012) desenvolveram um trabalho experimental físico considerando fluido viscoplástico - gel de Carbopol 940. Os autores avaliaram a evolução da frente e a distância de parada (*runout*) do escoamento em um canal retangular, segundo diferentes características reológicas do fluido teste utilizado. No entanto não realizaram medida das profundidades do escoamento, tampouco o controle da abertura da comporta.

Alguns trabalhos têm perseguido a obtenção do perfil de velocidade ao longo da profundidade de escoamentos viscoplásticos, sendo que tal informação mostra-se como crucial para o desenvolvimento de modelos numéricos, os quais necessitam de informações rigorosas de velocidade média e vazão. Nesse sentido, Ancey et al. (2012) desenvolveram um canal inclinado, composto por reservatório e câmeras ultra-rápidas, a partir do qual, utilizando da técnica *PIV* (*Particle Image Velocimetry*), obtiveram perfis de velocidade de escoamento viscoplástico em um dado ponto do canal.

Destaca-se também o trabalho de Freydier et al. (2017), no qual os autores buscaram definir, com elevada precisão, o perfil de velocidade ao longo da profundidade de um escoamento viscoplástico estacionário, com superfície livre, em um canal inclinado. Para o desenvolvimento daquele trabalho, os autores utilizaram o mesmo aparato desenvolvido por Chambon et al. (2009), realizando melhorias no sistema de medição com a implementação da técnica *PIV* para medição de perfil de velocidade, bem como uso de uma técnica alternativa de

velocimetria conhecida por *STIV* (*Space-Time Image Velocimetry*), a qual foi desenvolvida para medição de velocidades superficiais de rios (Fujita, 2007).

Em termos de experimentos de laboratório, deve-se citar o trabalho desenvolvido por Liu (2018). A partir do objetivo de verificar o parâmetro de liberação de material sobre o comportamento de escoamentos, o autor empregou, em um canal horizontal, estágios de abertura da comporta, simulando efeitos de brecha, e verificando o efeito do volume de fluido liberado sobre os hidrogramas de ruptura. Como será constatado no Capítulo 4, este trabalho constatou comportamento semelhante ao identificado por Liu (2018), no que diz respeito à liberação de material, verificando, adicionalmente, atuação de velocidades de abertura e da geometria a jusante do reservatório.

Ainda que os experimentos em laboratório não sejam capazes de capturar a real complexidade envolvida em escoamentos naturais (BAKER, 1996), o controle sobre parâmetros específicos permite verificar o comportamento de condições específicas, como por exemplo, teor de sólidos, inclinação da superfície, rugosidade do fundo, velocidade e forma de liberação do material (SAKANO, 2022). Nessa direção, experimentos de campo, como aqueles executados por Ochiai et al., 2004, Ochiai et al., 2007, Springman et al., 2009 e PAIK et al., 2012, possibilitam manter a complexidade real de um escoamento natural e reduzir as distorções dos parâmetros envolvidos em uma corrida de massa, como por exemplo, sedimentação, colisão e atrito entre partículas (ANCEY, 2007; IVERSON et al., 2010).

2.5 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

De forma geral, o desenvolvimento de trabalhos de vertente experimental física vem subsidiar o desenvolvimento dos modelos numéricos e matemáticos, os quais necessitam de dados para que possam ter sua validade, desempenho e uso atestados e melhorados. Entretanto, é imprescindível que os dados obtidos experimentalmente sejam de elevada qualidade, provenientes de equipamentos de alta resolução seguindo elevado rigor experimental, principalmente os dados de parâmetros reológicos, os quais apresentam dificuldades de medição nos equipamentos de reometria clássica, isto em função de restrições do equipamento e/ou ocorrências de efeitos complexos presentes em fluidos viscoplásticos (como por exemplo tixotropia, dilatância e viscoelasticidade), e, até mesmo, da habilidade e conhecimento do operador, isto sem adentrarmos nos chamados protocolos de ensaio. Reside aí a necessidade da confecção de aparatos experimentais próprios, dedicados e de nosso controle, em termos de reometria do fluido e hidrodinâmica medida.

3 ESCOAMENTOS VISCOPLÁSTICOS EM CANAL INCLINADO: MEDIÇÃO DE PERFIL DE VELOCIDADE A PARTIR DE VELOCIMETRIA POR IMAGEM

3.1 INTRODUÇÃO

A problemática acerca de escoamentos naturais com superfície livre, em particular as corridas de lama, tem ganhado destaque, principalmente em virtude das frequentes rupturas de barragem (OWEN et al., 2020), em particular, as barragens de rejeitos. Nesse contexto, há de se evidenciar a natureza predominantemente não newtoniana do fluido, por conseguinte, sua reologia de comportamento distinto da água.

O entendimento desse tipo de escoamento requer informações acerca da reologia do fluido, das profundidades, campo de velocidade, vazões e tensões de cisalhamento no fundo, bem como alcance das frentes produzidas. O uso de modelos de reologia não newtoniana, basicamente o de Bingham e de Herschel-Bulkley, tem-se mostrado capaz de descrever, de forma satisfatória, o comportamento desse tipo de material (BALMFORTH et al., 2014), ainda que efeitos viscoelásticos pareçam ganhar importância, junto às propriedades reológicas características como tensão limite de escoamento e viscosidade aparente (SAKANO, 2022).

Escoamentos viscoplásticos de natureza não newtoniana estão presentes em diferentes aplicações, porém, lacunas acerca de seu completo entendimento continuam abertas e disponíveis para novos estudos. Nesse sentido, estudos de diferentes naturezas têm sido conduzidos a fim de buscar maior entendimento sobre a dinâmica de escoamento e seus impactos sobre leis de alcance e mancha de inundação de escoamentos naturais (BALMFORTH et al., 2006; COCHARD; ANCEY, 2009; SARAMITO et al., 2013; AZIMI, 2016; BATES; ANCEY, 2017).

Mais recentemente, alguns trabalhos têm perseguido a obtenção do perfil vertical de velocidade (ANCEY et al., 2012; FREYDIER et al., 2017), uma vez que tal informação mostra-se crucial para o desenvolvimento/validação de modelos teóricos e numéricos, os quais necessitam de dados precisos com relação à velocidade média e vazão.

Ao longo dos últimos anos diferentes mecanismos de velocimetria têm sido desenvolvidos e aprimorados a fim de caracterizar campos de velocidade, seja em laboratório ou em campo. Dentre elas pode-se citar instrumentos acústicos de retroespalhamento (ABIs), tomografia acústica de espaço-tempo, velocimetria laser-Doppler, velocimetria por imagens, radar de alta frequência, boias de deriva e o método de diluição (ABERLE et al., 2017), além dos métodos tradicionais como o flutuador e molinete.

Uma abordagem experimental clássica e já consolidada, quando da medição de perfis de velocidade, é o uso da técnica PIV (*Particle Image Velocimetry*) a qual tem sido empregada há mais de 30 anos (PATALANO et al., 2017) e cuja boa exatidão, faixa de 0,2 a 2%, a torna ainda mais vantajosa para avaliações quantitativas (TRUE; CRIMALDI, 2019; DE PAULA; AZEVEDO, 2012). Essa técnica, de caráter não intrusivo e adequada a fluidos translúcidos, necessita de um conjunto de equipamentos e exige o uso de pequenos traçadores dispersos no escoamento. A análise por PIV exige, além de uma câmera (esta com sensores CCD ou CMOS), um sistema gerador de laser e uma unidade sincronizadora laser/câmera, os quais trabalham de forma integrada e sincronizada, o que eleva o custo de sua aplicação.

Nesse contexto, este trabalho visa aprofundar-se no entendimento do comportamento da dinâmica de escoamentos de natureza viscoplástica, por meio da caracterização do perfil de velocidade de fluido ao longo de sua profundidade. Para isso, foi desenvolvida uma metodologia experimental, a qual é baseada na técnica de velocimetria *STIV* (*Space-Time Image Velocimetry*) - utilizada na medição de velocidade superficial de rios (FUJITA et al., 2007). Tal metodologia foi implementada com alternativa à técnica PIV, tendo seu desenvolvimento baseado na análise de imagens espaço-temporal do escoamento por meio da função CWT 2D (Transformada *Wavelet* Contínua). Ademais, para efeito comparativo, um modelo teórico baseado na teoria da lubrificação, considerando fluido viscoplástico de reologia mais aderente ao modelo de Herschel-Bulkley foi utilizado.

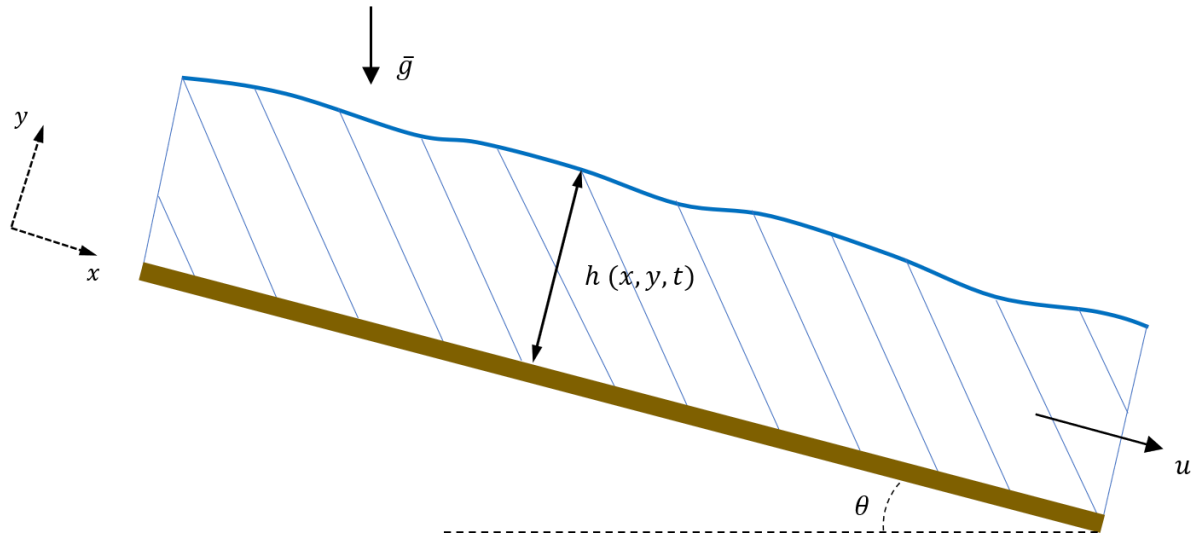
3.1.1 MODELO DA LUBRIFICAÇÃO: DESENVOLVIMENTO DO PERFIL DE VELOCIDADE

Os modelos matemáticos que representam a dinâmica de um escoamento são baseados nas equações da continuidade e da quantidade de movimento (equações de Cauchy), cujo desenvolvimento está atrelado às simplificações empregadas.

Para o desenvolvimento das equações representativas da dinâmica de escoamento com superfície livre será considerada uma camada de fluido homogêneo, de massa específica ρ , se deslocando sobre um plano inclinado de ângulo θ em relação à horizontal (Figura 3.1). A altura do escoamento é dado por $h(x, y, t)$ e as componentes de velocidade longitudinal e vertical são denominadas $u(x, y, t)$ e $v(x, y, t)$. O eixo longitudinal, na direção do escoamento, é dado por x e o eixo y , perpendicular ao eixo x , é direcionado para cima, partindo do fundo do canal. Assim, o fundo do canal representa a linha reta com equação $y = 0$. Adota-se o escoamento como bidimensional (2D) e atuação de campo gravitacional $g = (g \sin \theta, -g \cos \theta)$.

O cálculo do perfil de velocidade teórica pode ser desenvolvido conforme a teoria da lubrificação. A expressão para o perfil de velocidade é baseada em escoamentos de fluidos de natureza não newtoniana ajustados segundo o modelo reológico de Herschel-Bulkley, em regime permanente e uniforme em canal inclinado, sob a hipótese de plano infinito, ou seja $H/L \ll 1$ (H representa a escala de comprimento na direção vertical e L a largura do canal).

Figura 3.1 - Esquemática de um escoamento com superfície livre sobre plano inclinado.



Fonte: Próprio autor.

No regime de lubrificação, a dinâmica do fluxo é dominada pelo equilíbrio entre a força gravitacional (gravidade g), pressão p e a tensão de cisalhamento σ_{xy} . Em termos de tensão de cisalhamento ao longo da profundidade do escoamento, a Equação 3.1 pode ser empregada (CHAMBON et al., 2014; FERREIRA, 2013).

$$\sigma_{xy} = \rho g \sin \theta (h - y) \quad (3.1)$$

Os fluidos viscoplásticos apresentam uma região não cisalhada (*plug*) em que $\sigma_{xy} \leq \tau_0$. Tal região está localizada na parcela mais próxima à superfície livre do escoamento.

A altura do *plug* h_p é dada pela Equação 3.2 (FERREIRA, 2013).

$$h_p = \frac{\tau_0}{\rho g \sin \theta} \quad (3.2)$$

A partir das equações de balanço de quantidade de movimento nas direções x e y , e considerando modelo reológico segundo ajuste Herschel-Bulkley sob cisalhamento simples, a velocidade ao longo da profundidade do escoamento - $u(y)$, assumindo que não há deslizamento de parede ($u_{(y=0)} = 0$), pode ser obtida pela Equação 3.3 (CHAMBON et al., 2014; FERREIRA, 2013).

$$u(y) = \begin{cases} u_p \left[1 - (1 - y/y_0)^{(n+1)/n} \right] & \text{se } y < y_0 \\ u_p & \text{se } y \geq y_0 \end{cases} \quad (3.3)$$

sendo u_p a velocidade do *plug*; n o índice de escoamento; $y_0 = h - h_p$ a altura da lâmina cisalhada no escoamento.

$$u_p = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\rho g \sin \theta}{K_n} \right)^{1/n} y_0^{(n+1)/n} \quad (3.4)$$

em que n é o índice de consistência.

A partir da integração do perfil de velocidade ao longo da profundidade do escoamento ($\int_0^h u dy$), assumindo $u \gg v$, é possível obter a expressão da vazão específica (q), conforme Equação 3.5:

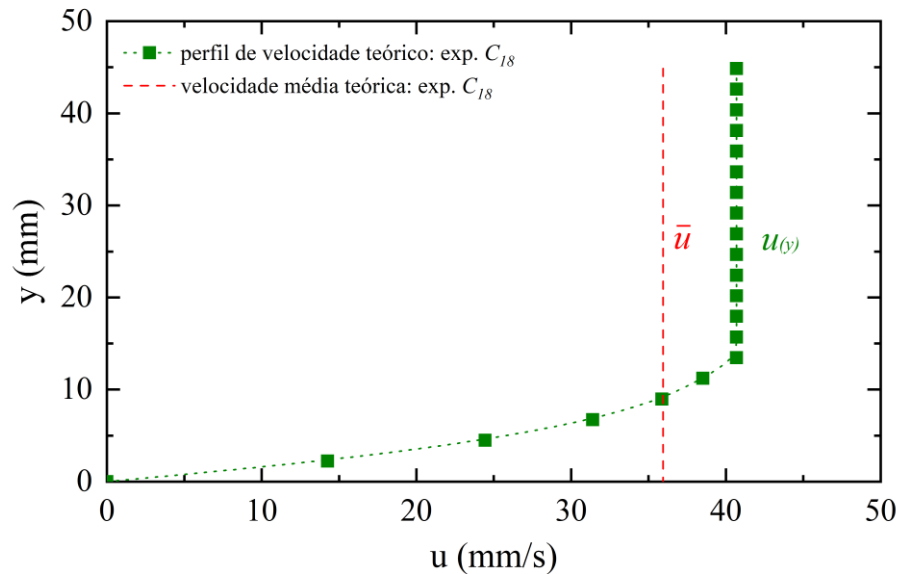
$$q = \frac{n}{2n+1} \left(\frac{\rho g \sin \theta}{K_n} \right)^{1/n} y_0^{(n+1)/n} \left(h + \frac{n}{n+1} h_p \right) \quad (3.5)$$

Sabendo que a vazão específica pode ser expressa como $q = h\bar{u}$, então a velocidade média do escoamento ($\bar{u}$) pode ser obtida conforme Equação 3.6:

$$\bar{u} = \frac{1}{h} \frac{n}{2n+1} \left(\frac{\rho g \sin \theta}{K_n} \right)^{1/n} y_0^{(n+1)/n} \left(h + \frac{n}{n+1} h_p \right) \quad (3.6)$$

A Figura 3.2 ilustra o resultado teórico do perfil de velocidade (aplicação da Equação 3.3) e velocidade média (Equação 3.6) do experimento C_{18} realizado com gel de carbopol em canal com inclinação de 8° e vazão de 0,75 l/s.

Figura 3.2 - Comportamento de escoamento de fluido viscoplástico segundo modelo de fluido Herschel-Bulkley: velocidade ao longo da profundidade do escoamento em pontos verdes (Equação 3.3) e velocidade média do escoamento representada pela linha pontilhada vermelha (Equação 3.6).



3.2 OBJETIVO

O objetivo deste capítulo é apresentar e contribuir para o estabelecimento de uma metodologia experimental, de fácil instalação e manuseio, bem como no desenvolvimento de um mecanismo simples e robusto de tratamento de imagem, com o intuito de caracterizar o perfil de velocidade longitudinal ao longo da profundidade de escoamentos de fluidos viscoplásticos em condições controladas de laboratório.

3.3 METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido na busca de uma metodologia experimental de velocimetria por imagem. Dessa forma, este projeto de tese implementou um sistema experimental de medição constituído por diferentes sistemas, cada um com uma função específica e determinada, cujo resultado final é o perfil de velocidade ao longo da profundidade do escoamento.

3.3.1 Fluido-teste

A fim de garantir características adequadas em termos de qualidade e reprodutibilidade de experimentos deve-se empregar fluido-teste de natureza estável, com reologia controlada ao longo do tempo e de bom aspecto visual. Assim, voltado à natureza deste trabalho no que diz respeito à avaliação de escoamento de materiais envolvidos em processos industriais e desastres naturais, deve-se garantir que a reologia do fluido-teste empregado seja representativa desses materiais, especialmente as propriedades viscoplásticas.

O material usado neste trabalho que apresenta todas essas características é o gel de carbopol 996, bastante representativo reologicamente dos materiais presentes em aplicação de engenharia (PIAU, 2007; FREYDIER et al., 2017, MINUSSI; MACIEL, 2012), sendo adequadamente modelado reologicamente pelo modelo pseudoplástico de Herschel-Bulkley ($n < 1$). O gel de carbopol 996 é definido como uma solução de água e polímero acrílico hidrossolúvel carbopol 996, cujas propriedades reológicas variam de acordo com o solvente utilizado, pH da mistura e a concentração de polímero (BOGER; WALTERS, 2012; PEREIRA et al., 2022).

O preparo do gel de carbopol seguiu parcialmente o protocolo descrito e utilizado por Minussi (2007) e Pereira (2018). Basicamente, o pó de carbopol 996 foi adicionado em água deionizada a 70 °C e a mistura foi agitada por meio de um misturador a fim de promover sua dispersão (MINUSSI, 2007 e PEREIRA, 2018 realizaram a mistura manualmente), nessa fase foram acrescentadas microesferas de vidro de granulometria na faixa de 10 a 50 µm na proporção de $1,5 \times 10^{-5}$ g/g de gel de carbopol, e, para finalizar, após 12 h de repouso em banho térmico, a mistura foi neutralizada com hidróxido de sódio (NaOH). Após a neutralização, a mistura foi mantida em banho térmico por mais 12 h, sendo posteriormente resfriada e mantida por 2 dias em temperatura ambiente antes de ser empregada nos experimentos.

A fim de verificar o comportamento de escoamento segundo diferentes características de velocidade e altura de lâmina foram produzidos géis de carbopol com diferentes propriedades reológicas (tensão limite de escoamento, índice de escoamento e índice de consistência), dessa forma duas concentrações em massa foram produzidas e avaliadas: 0,13% 0,17%.

3.3.2 Caracterização reológica

A curva de fluxo do fluido teste foi obtida a partir de reometria clássica empregando um reômetro de cilindros coaxiais da marca Brookfield R/S, com controle de taxa de deformação e tensão de cisalhamento, com uso do sistema de medição Vane 40/20 com quatro lâminas (diâmetro do copo D_c de 55,0 mm, diâmetro do vane D_v de 20,0 mm and altura do vane H_v de 40,0 mm) e spindle CC-45 (diâmetro do copo D_a de 48,8 mm, diâmetro do *spindle* D_i de 45,0 mm and altura do *spindle* L de 67.5 mm). Em função das características de aplicação do *spindle* CC-45 (associado a menores níveis de viscosidade e tensão limite de escoamento), este foi empregado na análise do gel de carbopol $C_m = 0,13\%$, enquanto a geometria Vane foi utilizada para o fluido teste $C_m = 0,17\%$.

Durante o experimento, com fluido escoando no canal de medição, uma amostra era coletada para caracterização reológica, a qual ocorreu em ambiente com temperatura controlada na faixa de $24 \pm 1,2$ °C. O procedimento de medição reológica consistiu na imposição de dois estágios de taxa de deformação e a respectiva medição da tensão de cisalhamento (Figura 3.3.a). A taxa mínima de deformação definida no protocolo de ensaio foi de 1 s^{-1} e a taxa de medição ao longo da rampa ascendente e descende foi de um ponto a cada quatro segundos de medição.

Para cada concentração mássica e configuração experimental do canal, foram realizados três ensaios reométricos, e cada um forneceu uma curva de fluxo ajustada ao modelo reológico de Herschel-Bulkley. O modelo de Herschel-Bulkley fornece uma representação adequada das curvas de escoamento em estado estacionário; no entanto, ele simplifica significativamente o comportamento reológico próximo ao limiar da tensão limite de escoamento. Nessa região, efeitos tixotrópicos podem levar a variações na tensão limite de escoamento (COUSSOT et al., 2002). Além disso, o modelo de Herschel-Bulkley não é capaz de representar propriedades influenciadas pelas possíveis características viscoelásticas do material. Apesar dessas limitações, esse modelo é amplamente representativo, do ponto de vista reológico, dos materiais presentes em aplicações de engenharia (PIAU, 2007; MINUSSI e MACIEL, 2012; FREYDIER et al., 2017).

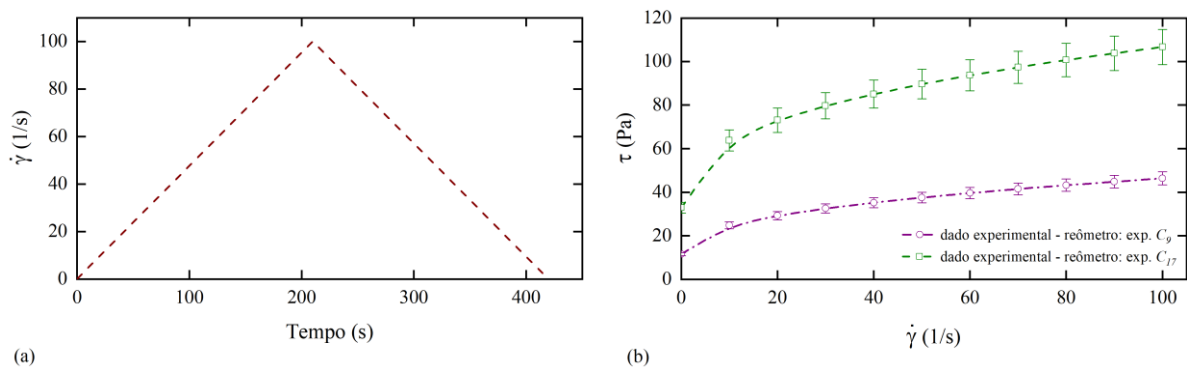
A análise das curvas de fluxo não indicou presença de efeitos tixotrópicos para as concentrações dos géis de carbopol avaliados, já o comportamento de viscoelasticidades não foi avaliado, ficando as análises restritas ao comportamento de tensão limite de escoamento, índice de consistência, índice de escoamento e viscosidade aparente.

A análise da curva de fluxo e obtenção da tensão limite de escoamento (τ_0), bem como dos parâmetros índice de consistência (K_n) e de escoamento (n), foram feitas segundo o ajuste

dos dados medidos ao modelo reológico de Herschel-Bulkley, conforme Equação 3.7, considerando o ramo ascendente da curva de fluxo e taxa de deformação na faixa de $1 < \dot{\gamma} < 100 \text{ s}^{-1}$.

$$\tau = \tau_0 + K_n \dot{\gamma}^n \quad (3.7)$$

Figura 3.3 - Caracterização reológica: (a) protocolo de caracterização empregado e (b) curva de fluxo ascendente obtida para os ensaios C_9 e C_{17} com, respectivamente, incertezas de 6,5% e 7,6 %.



Fonte: Próprio autor.

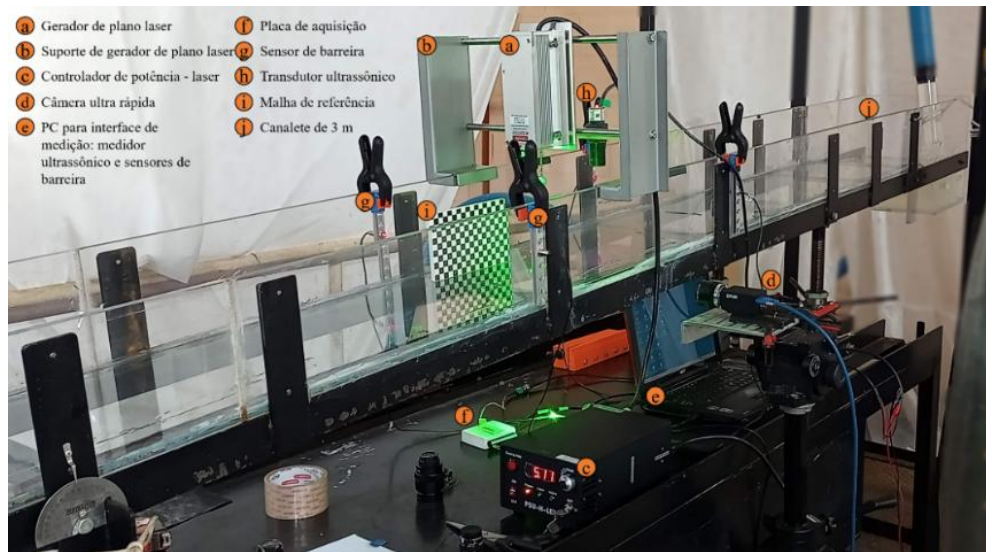
Os resultados da caracterização reológica do fluido-teste de cada experimento, em termos dos parâmetros reológicos τ_0 , K_n e n , além das medidas de massa específica, estas realizadas a partir de volume conhecido, são apresentados, segundo valores médios, posteriormente.

3.3.3 Aparato experimental e medição do escoamento

Para o desenvolvimento da técnica de velocimetria inspirada no método *STIV* (*Space-Time Image Velocimetry*) foi utilizado um canal retangular de 3 m de comprimento e um sistema de bombeamento e circulação, além de sistemas de medição de escoamento implementados com uso de sensores ultrassônicos, plano laser e câmera de alta velocidade (Figura 3.4).

A Figura 3.4 apresenta a configuração experimental, destacando a disposição do canal, a fonte de alimentação do laser, a câmera empregada, o transdutor ultrassônico e o sensor de barreira utilizado para a medição da velocidade superficial. Também está representada a malha de referência empregada na definição da resolução espacial dos experimentos. Esses elementos foram organizados de forma a garantir a precisão das medições e a correta caracterização do perfil de velocidade ao longo do escoamento.

Figura 3.4 - Configuração do aparato experimental empregado.

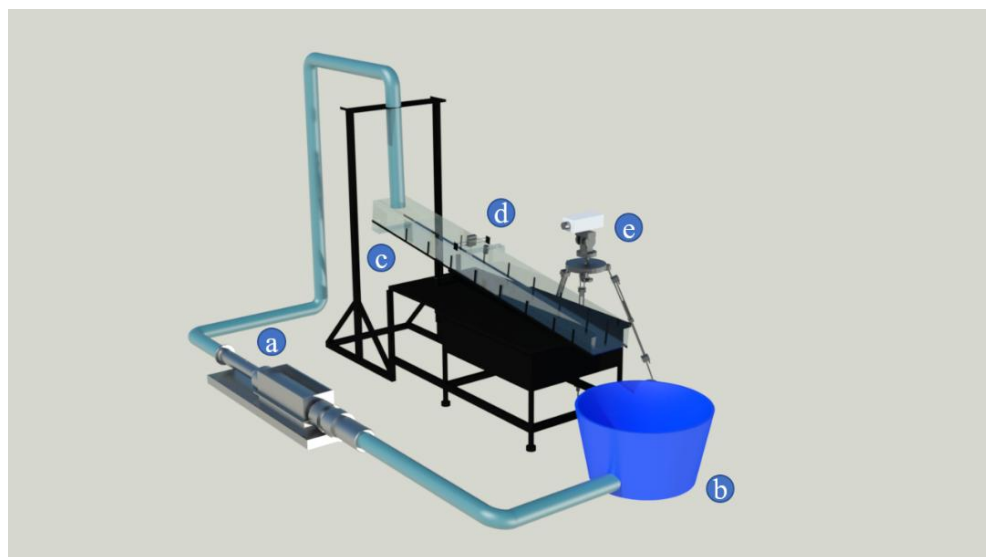


Fonte: Próprio autor.

3.3.3.1 Sistema de circulação e bombeamento de fluido

O escoamento ocorreu em um canal inclinado, de inclinação variável, de 3 metros de comprimento e 30 centímetros de largura a partir do uso de um sistema de sucção e recalque (uso de bomba hidráulica de cavidade progressiva), indicada para fluidos viscosos, já implantado e operacional no laboratório de realização deste trabalho (MACIEL et al., 2017), conforme Figura 3.5.

Figura 3.5 - Esquematização do aparato experimental: (a) bomba helicoidal, (b) tanque de armazenamento, (c) canal retangular de 3,0 x 0,30 x 0,15 m, (d) sensor ultrassom e (e) câmera de medição.



Fonte: Próprio autor.

O sistema de bombeamento e circulação mostrou-se adequado, sobretudo por gerar baixa agitação do fluido e também pelos baixos níveis de ruídos transferidos ao escoamento. Uma consideração importante nos testes de velocimetria é a necessidade de extinção de bolhas de ar geradas, no interior do gel de carbopol, no momento em que o fluido sai do canal e chega ao reservatório inferior (tanque de armazenamento). Para atenuar a geração de bolha foi construído um dispositivo em PVC de comprimento de aproximadamente 1 m e superfície semi-esférica, o qual foi acoplado no final do canal e conectado ao reservatório, eliminando a queda do material diretamente para o reservatório inferior. O dispositivo implementado foi capaz de reduzir as bolhas e contribuiu para a obtenção de imagens do escoamento sem os ruídos advindos do brilho das bolhas.

Com relação ao fluido teste empregado (gel de carbopol) e seu armazenamento, foi utilizado um reservatório inferior de 250 litros de capacidade. É importante destacar que foram produzidos 180 litros de gel de carbopol para a realização dos experimentos e que tal fluido manteve suas propriedades reológicas controladas por semanas (presença de tampa no reservatório inferior e sua vedação possibilitaram a maior conservação do fluido).

3.3.3.2 Gerador de plano laser

O gerador de plano laser se caracteriza como um sistema de geração (uso de lentes específicas para gerar plano de espessura na faixa de 1 a 2 mm) e controle da intensidade do plano luminoso. Esse sistema é de extrema importância para técnica de velocimetria desenvolvida, é a partir de tal plano luminoso que o movimento do escoamento, a partir de microtraçadores de esfera de vidro, é registrado e analisado.

Em função da elevada largura do canal (30 cm) e necessidade de captar região luminosa após espessa camada de fluido, optou-se por gerador de plano de laser de alta potência, especificamente laser contínuo de estado sólido de cor verde (532 nm) e potência de 2,5 W. Testes iniciais com gerador de laser de potência de 450 mW demonstraram necessidade de elevada luminosidade para bons resultados. Para acoplar o gerador de plano laser ao canal foi desenvolvido um suporte específico, o qual permite o acoplamento do plano laser em diferentes posições ao longo do comprimento do canal e ainda possibilita sua movimentação ao longo da seção transversal do canal.

3.3.4 Técnicas de medição empregada

3.3.4.1 *Medição de profundidade e velocidade superficial*

Para a medição da profundidade do escoamento foi empregado transdutor ultrassônico baseado na técnica pulso-eco. Especificamente, foi utilizado transdutor de modelo RPS-401A, o qual foi incorporado à cadeia de medição após o levantamento de sua curva de calibração. É importante relatar a obtenção da curva de calibração dos transdutores ultrassônicos a partir de correlação com medidas feitas com micrômetro, possibilitando medições rigorosas.

Já a medição das velocidades superficiais foi realizada utilizando sensores de barreira a laser (modelo M8 de saída NPN). Tal dispositivo é composto de um transmissor e um receptor laser e o uso de dois desses dispositivos permitiu registrar o tempo de um dado deslocamento de um traçador colocado na superfície do escoamento (isopor), de forma a obter a velocidade superficial do escoamento.

Para o registro dos dados de profundidade e velocidade superficial, advindos dos transdutores ultrassônicos e sensores de barreira a laser, foi utilizada uma placa de aquisição (modelo USB-6009 da *National Instruments*), configurada a partir do *software LabView*, através do supervisor de aquisição de dados, possibilitando tanto a visualização como a aquisição e armazenamento (gravação) no momento dos ensaios, de todos os dados aferidos.

3.3.4.2 *Velocimetria: técnica STIV*

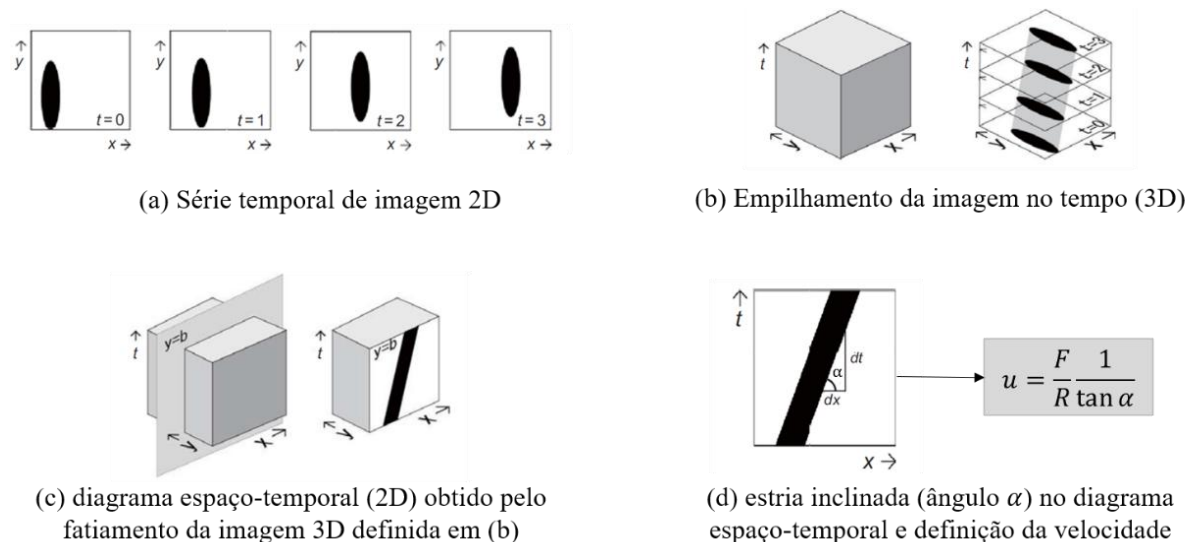
Uma abordagem corriqueira e já estabelecida quando da medição de perfis de velocidade, é o uso da técnica PIV (*Particle Image Velocimetry*), cujo uso em laboratórios de hidráulica é uma realidade há anos (PATALANO et al., 2017). Essa técnica, de caráter não intrusivo e adequada a fluidos translúcidos, necessita de um conjunto de equipamentos e exige o uso de pequenos traçadores dispersos no escoamento. Basicamente, a técnica PIV funciona a partir da iluminação de uma região longitudinal do escoamento por meio de um feixe laser; simultaneamente a isso, uma câmera capta imagens frontais do plano iluminado pelo feixe, sendo a análise do perfil de velocidade obtida por meio da interpretação dos deslocamentos das partículas dispersas no escoamento. A análise por PIV exige, além de uma câmera (esta com sensores CCD - *Charged Coupled Device*), um sistema gerador de laser e uma unidade sincronizadora laser/câmera, os quais trabalham de forma integrada e sincronizada.

Visando obter perfis de velocidade sem o emprego da técnica PIV, foi utilizada uma técnica alternativa, a técnica *STIV*, adaptando-a para uso em canais de laboratório. A técnica

STIV é baseada na análise espaço-temporal de séries de imagens, e seu desenvolvimento foi realizado por Fujita et al. (2007) para medição de velocidades superficiais de rios. A aplicação dessa técnica pode ser realizada tanto em problemas ditos 2D (uma dimensão espacial + tempo), quanto em 3D (duas dimensões espaciais + tempo). Analisando um problema 2D, a técnica STIV pode ser explicada da seguinte forma: ao considerar uma região de velocidade unidirecional, é possível, a partir de captura de imagens de tal região, construir, para cada linha ao longo de um comprimento x das imagens do escoamento, um diagrama espaço-temporal, também chamada de imagem STI (*Space Time Image*). A imagem STI é obtida a partir do empilhamento dos níveis de brilho registrados ao longo de tal comprimento nos diferentes tempos de captura.

Em função da velocidade ao longo daquele comprimento ser constante, será observado, no diagrama espaço-temporal, estrias paralelas inclinadas. Tais estrias inclinadas indicam a advecção da intensidade do brilho da imagem ao longo do segmento de linha analisado. A partir do ângulo observado no diagrama espaço temporal (inclinação das estrias paralelas) e utilizando-se de informações da resolução da imagem e taxa de frame, torna-se possível definir a velocidade ao longo do comprimento x definido. Ao realizar esse procedimento, ilustrado na Figura 3.6, ao longo da profundidade do fluido, é possível obter o perfil de velocidade do fluido ao longo da profundidade.

Figura 3.6 - Ilustração do princípio de funcionamento da técnica STIV.



Fonte: Adaptado de Tsubaki (2017).

De forma geral, a obtenção da velocidade do escoamento ocorre a partir da definição da inclinação das estrias a partir da Equação 3.8:

$$u = \frac{F}{R} (\tan \alpha)^{-1} \quad (3.8)$$

em que $\alpha \neq 0$ é a inclinação da estria, F (pixel/s) é a taxa de amostragem da captura e R (pixel/mm) é a resolução da imagem.

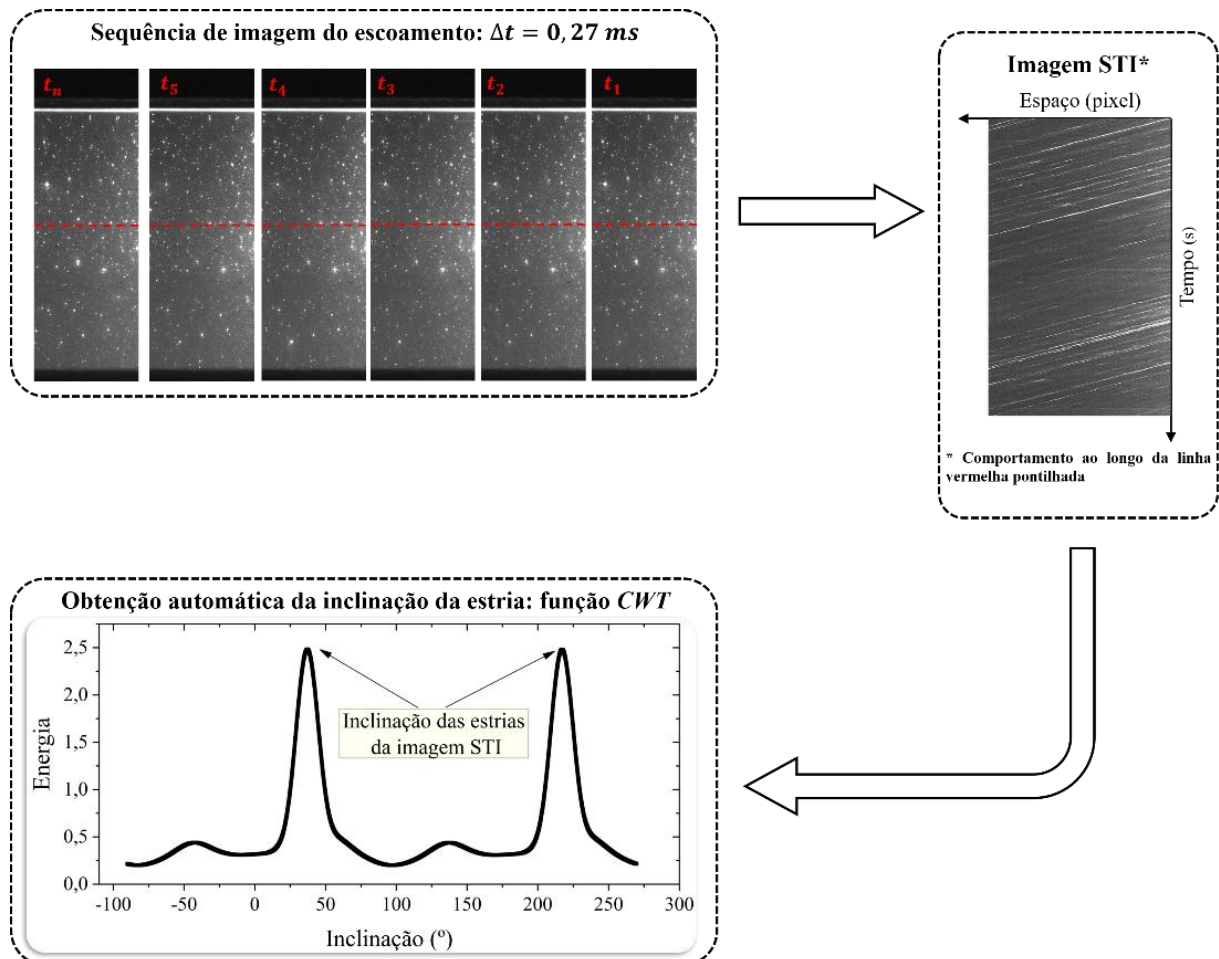
O método *STIV* tem-se mostrado capaz de avaliar perfis de velocidade superficiais de rios com elevado rigor, com resultados semelhantes àqueles medidos com técnicas clássicas como o ADCP, ondas de rádio e até mesmo a técnica de imagem LSPIV (ABERLE et al., 2017). Recentemente, foi criado o sistema *KU-STIV* (FUJITA et al., 2017), o qual constitui-se em um *software* que aplica os conceitos da técnica *STIV* em imagens, a fim de fornecer características de escoamento em rios (velocidade superficial e vazão).

O *software* *KU-STIV* tem sido adotado por muitos consultores de recursos hídricos e escritórios de recursos hídricos do Ministério da Terra, Infraestrutura, Transporte e Turismo do Japão, isso em função de sua análise possibilitar de forma mais rápida e segura, quando comparado aos métodos já estabelecidos, a obtenção de velocidades e vazões de rios. Mais recentemente (FUJITA et al., 2017), a técnica *STIV* foi utilizada para medição de vazão de três estações de rios na bacia do rio Densu, em Gana, demonstrando resultados compatíveis com os métodos tradicionais e facilidade em ser aplicada em campo.

Quando do uso da técnica *STIV* na medição de perfis de velocidade ao longo da profundidade do escoamento, resultados semelhantes ou até melhores que aqueles medidos a partir da técnica PIV foram obtidos por Freydier et al. (2017), o qual analisou o comportamento de fluidos viscoplásticos escoando sobre uma correia transportadora de velocidade constante e contrária ao sentido de escoamento (mecanismo empregado para obtenção de “escoamento parado”). Freydier et al. (2017) destacam um confronto de medidas de perfis de velocidade ao longo da profundidade de um canal realizado segundo as técnicas PIV e *STIV*; segundo os autores, a técnica PIV apresenta limitações nas regiões de máximos gradientes de velocidade (fundo do canal) e na interface de fluido/ar (topo do escoamento), entretanto tais regiões não apresentam grande interferência na obtenção de dados quando se usa a técnica *STIV*. Em direção ao verificado por Freydier et al. (2017), os resultados desta pesquisa (Seção 3.4) atestam a capacidade da técnica *STIV* em análise de velocidade ao longo de toda a profundidade do escoamento, com destaque para seu bom desempenho na superfície livre e no fundo do escoamento.

Para este trabalho, a técnica *STIV* foi adaptada para a obtenção de perfil de velocidade ao longo da profundidade de escoamento e uma nova ferramenta de análise da imagem STI foi desenvolvida. O escoamento foi monitorado a partir de uma câmera ultrarrápida (detalhes do equipamento são apresentados na Subseção 3.3.4.3) a uma taxa de aproximadamente 270 *fps*. Os vídeos capturados nos experimentos foram avaliados a partir de sua análise quadro a quadro, sendo que 500 imagens foram utilizadas para as análises (representando aproximadamente 1,85 s de escoamento). Em função dos experimentos serem avaliados em regime permanente, a janela temporal empregada (≈ 2 s de medição) mostrou-se suficiente para as medições.

Figura 3.7 - Procedimento para definição da velocidade do escoamento a partir da geração de imagem STI e obtenção automática das estrias por meio da Transformada Wavelet Contínua 2D (CWT). Código desenvolvido em Matlab e uso do software Image J na definição da resolução da imagem.



Fonte: Próprio autor.

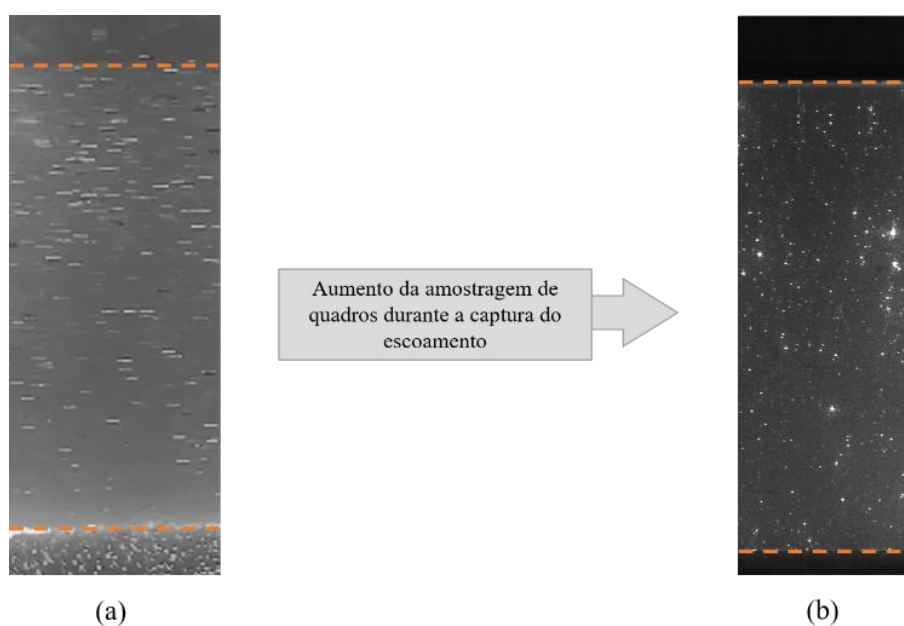
Para aumentar o rigor da obtenção da velocidade do escoamento, foi proposto o emprego da Transformada de *Wavelet* Contínua 2D (CWT) (ANTOINE et al., 2008) na definição da inclinação α das estrias. Para o uso da CWT, cujo código foi implementado no Matlab, foi

desenvolvido uma análise de energia associada ao emprego da função *wavelet*, de forma que a construção de uma curva associando energia e inclinação da imagem STI (Figura 3.7) permitiu a definição da inclinação das estrias a partir do ponto de maior energia (brilho do traçador).

3.3.4.3 Câmera de medição de escoamento

A técnica de velocimetria desenvolvida, além de necessitar de um gerador de plano laser, necessita de uma câmera que permita a regulação manual de seu foco e possibilite obtenção de imagens segundo uma elevada taxa de amostragem (*fps* – *frames per second*). Ainda que avaliações segundo baixo *fps* sejam possíveis ($fps < 100$), em casos de escoamentos de elevada velocidade, as imagens resultantes da técnica de velocimetria desenvolvida podem apresentar deficiências e aumentar os erros durante as análises (Figura 3.8).

Figura 3.8 - Comportamento de visualização dos microtraçadores no experimento C_{17} segundo taxa de captura de: (a) 30 fps e (b) 270 fps. Linha pontilhada em laranja representa os limites do escoamento (linha superior a superfície livre e linha inferior o fundo do canal).



Fonte: Próprio autor.

Tendo em vista as necessidades em termos de visualização do escoamento, o sistema de medição por câmera empregou duas câmeras ao longo do desenvolvimento da pesquisa: inicialmente foi utilizada a câmera ultrarrápida *Olympus i-speed 2*, porém em função da deficiência em termos de iluminação do plano laser (inicialmente de 450 mW) e perda de luz

das gravações com o aumento da amostragem da câmera, os resultados de perfil de velocidade no centro do canal apresentavam maior dificuldade de análise; em um segundo momento da pesquisa empregou-se a câmera GS3 FLIR de *fps* variável de acordo com o quadro amostrado e lente de 30 mm, além de uso de gerador de plano laser e maior potência (2,5 W).

A dimensão dos quadros de filmagem foi definida de forma a captar toda a espessura do escoamento. Para a definição da escala das imagens na fase de processamento de dados foi utilizada uma malha de quadrados de 10 x 10 mm. A câmera empregada gerou imagens de elevada qualidade (resolução espacial de 83 $\mu\text{m}/\text{pixel}$) e contribuiu significativamente para a qualidade dos resultados dos perfis de velocidade, entretanto sua elevada performance exigiu o uso de um computador robusto.

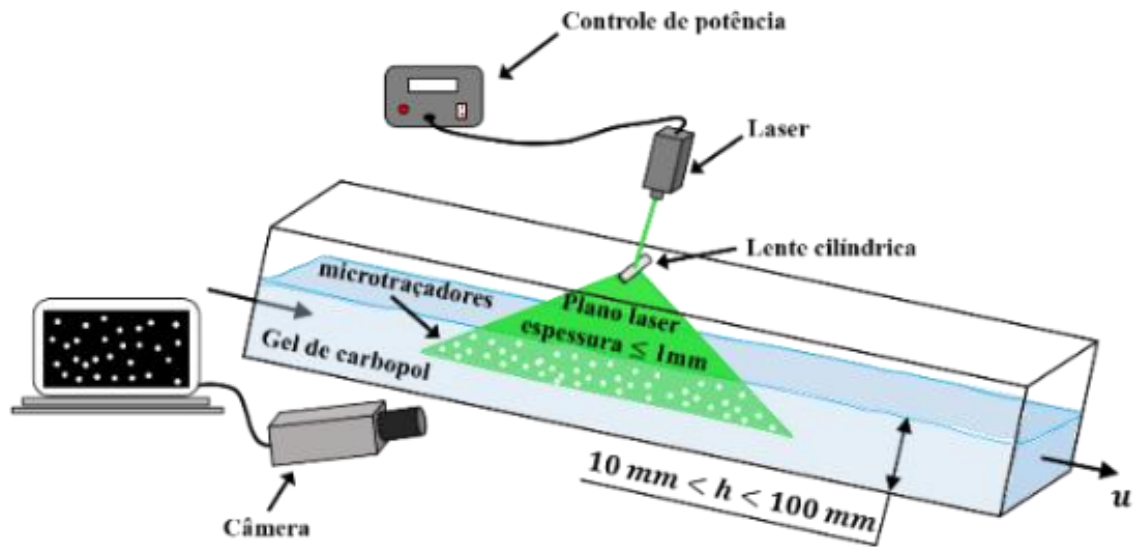
3.3.5 Visão geral dos experimentos

Para a realização do experimento foram utilizados gel de carbopol (em diferentes concentrações mássicas); um canal inclinável com 30 cm de largura e suficientemente longo para garantir regime uniforme; um sistema de bombeamento (bomba helicoidal controlada por inversor de frequência e tubulação); uma câmera ultrarrápida (*Grasshopper3* GS3 FLIR), com lente de 35 mm, colocada a uma distância da parede do canal tal qual possibilitasse vídeos com imagens focadas e de boa qualidade; um gerador de plano laser (potência de 2,5 W e comprimento de onda de 532 nm) para iluminar a região de interesse e destacar os traçadores (microesferas de vidro de granulometria na faixa de 10 a 50 μm) na filmagem; um sensor ultrassônico para a medição da profundidade do escoamento com maior precisão; um sensor de barreira para obtenção da velocidade superficial; um plano com marcações para referência e calibração das imagens; e um reômetro (Brookfield R/S, de controle de taxa de deformação e tensão de cisalhamento) para a medição dos parâmetros reológicos. A Figura 3.9 ilustra o emprego da metodologia de velocimetria.

Os ensaios foram realizados para diferentes configurações de inclinação, a saber 4°, 6°, 8° e 10°, segundo diferentes vazões de escoamento (de 0,20 L/s a 0,83 L/s); o uso de tais configurações de inclinação e rotação tem como objetivo verificar diferentes condições de velocidade e alturas de lâmina do escoamento. O início do experimento ocorreu após o escoamento atingir o regime uniforme (mantida a configuração de rotação por cerca de 10 minutos e verificado a constância da altura do escoamento em diferentes pontos do canal, exceto nos trechos de entrada e saída), nessa condição as seguintes informações foram obtidas: vazão do escoamento (Q) a partir do método gravimétrico e determinação do fluxo de massa - total de

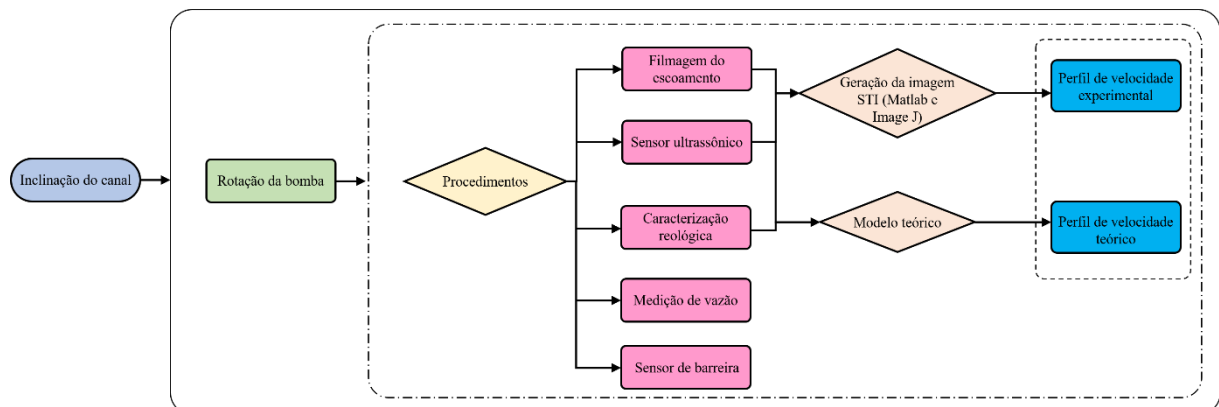
10 repetições; profundidade do escoamento uniforme (H) por meio dos transdutores ultrassônicos - total de 10 repetições; velocidade média do escoamento (V) segundo relação entre a vazão (uso do método gravimétrico) e seção transversal do canal - total de 10 repetições; velocidade superficial (u_s) usando sensores de barreira instalados em duas seções do canal - total de 10. A Figura 3.10 ilustra o fluxograma da realização do experimento.

Figura 3.9 - Esquematização da técnica de velocimetria empregada.



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.10 - Fluxograma de execução do experimento de caracterização de perfil de velocidade.



Fonte: Próprio autor.

Resumidamente, o procedimento experimental seguiu as seguintes etapas:

- 1 - Definição das curvas de calibração dos sensores ultrassônicos (obtenção de relação linear entre tensão e corresponde distância medida por micrômetro);
- 2 - Ajuste da inclinação do canal;

- 3 - Montagem dos equipamentos de medição ao longo do canal: colocação da câmera, do gerador de laser, do sensor ultrassônico e sensor de medição de velocidade superficial;
- 4 - Definição da seção de avaliação (anteriormente ao processo de medição, definia-se a seção em que o escoamento apresentava característica uniforme);
- 5 - Definição da seção central do canal e ajuste do plano laser nessa seção (a 15 cm da parede lateral do canal);
- 6 - Disposição de malha retangular de 10 x 10 mm na região longitudinal de interesse;
- 7 - Registro por meio da câmera de medição, já instalada, da malha de referência;
- 8 - Ativação do sistema de bombeamento e início do escoamento no canal;
- 9 - Após alguns minutos (tempo necessário para estabilização do escoamento - garantia de avaliação em regime permanente) o plano laser é acionado e realiza-se a filmagem do escoamento por 3 segundos;
- 10 - Imediatamente após a filmagem do escoamento é realizada a medição da lâmina normal do escoamento;
- 11 - Com uso de um traçador, lançado a montante do canal, mede-se a velocidade superficial do escoamento a partir de sensores de barreira;
- 12 - A partir de um balde e uma balança são realizadas medidas de fluxo mássico e posteriormente calculado o fluxo volumétrico do escoamento;
- 13 - Uma amostra do fluido é retirada do escoamento para realização da caracterização reológica e medição da massa específica;
- 14 - Finalizada a avaliação de uma certa configuração experimental, os passos de 4 a 14 são repetidos.

Como forma de maior controle sobre as medidas de lâmina do escoamento, os experimentos realizados em diferentes dias exigiram a obtenção de nova curva de calibração do sensor ultrassônico, ainda que a alimentação do sensor ultrassônico fosse feita a partir de uma fonte de tensão controlada.

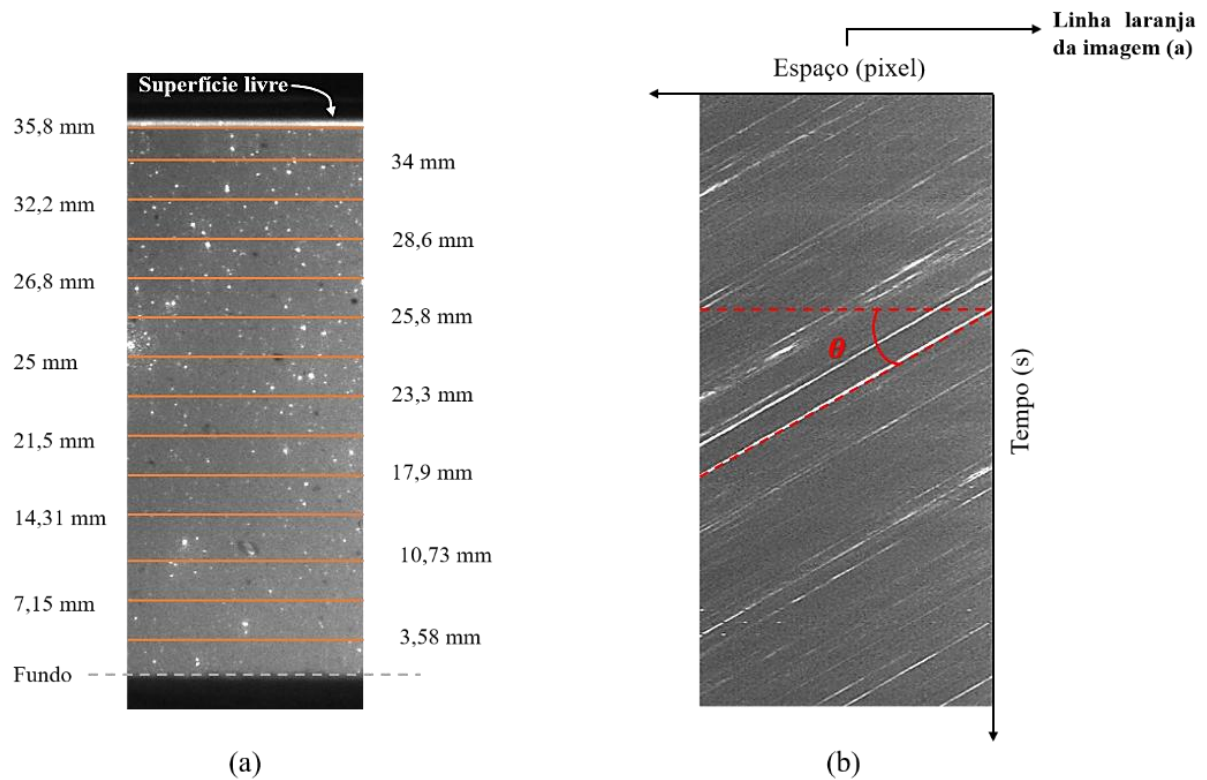
Em alguns dos experimentos o plano laser foi transladado ao longo da seção transversal do escoamento, realizando capturas a 2, 5, 10 e 15 cm da parede; esse procedimento foi realizado para verificar o comportamento bidimensional do escoamento e possíveis efeitos de borda.

A proporção de traçadores empregada possibilitou boa densidade de esferas de vidro no escoamento e evitou problemas de opacidade das imagens, além de ter contribuído para a obtenção de imagens STI de boa qualidade visual nas diferentes profundidades avaliadas, conforme Figura 3.11. A obtenção do perfil de velocidade ao longo da profundidade do

escoamento está condicionada à definição das alturas de interesse (do topo ao fundo) e geração de imagens STI em cada altura de interesse.

Realizada a filmagem do escoamento, a análise de velocimetria se baseou no uso do *software* Image J para definição da resolução das imagens e identificação do *pixel* de fundo (definido com uso da malha de referência assentada sobre o fundo do canal) e do *pixel* da superfície livre (definição a partir do sensor ultrassônico). Com as informações conhecidas em termos do fundo e superfície livre, algumas posições ao longo da profundidade do escoamento eram definidas (Figura 3.11.a) e para cada uma delas uma imagem STI era gerada (Figura 3.11.b), considerando um certo comprimento longitudinal ao longo do escoamento ($\cong 2$ cm).

Figura 3.11 - Análise do escoamento a partir da técnica de velocimetria desenvolvida: (a) alturas de interesse para definição da velocidade e (b) imagem STI gerada para a altura 34 mm.



Fonte: Próprio autor.

A partir da imagem STI obtida para cada altura do escoamento, uma avaliação com uso da função *Wavelet* foi realizada, de forma a obter, automaticamente, a inclinação das estrias presentes na imagem STI. Finalmente, com a inclinação das estrias de cada uma das imagens STI (associada a uma altura específica do escoamento), calculou-se a velocidade do escoamento na altura de interesse com base na Equação 3.9.

As incertezas das medidas obtidas foram calculadas a partir da incerteza padrão combinada, a qual utiliza a incerteza padrão do equipamento empregado (Tabela 3.1) e o desvio padrão, conforme Equação 3.3.

$$U = k \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (3.9)$$

sendo U a incerteza total, k o coeficiente de *Student*, U_A a incerteza relacionada à precisão do equipamento e U_B a incerteza advinda do desvio padrão.

Para as análises realizadas neste trabalho, foi utilizado um intervalo de confiança de 95,5% e coeficiente de *Student* de acordo com a quantidade de amostra empregada para cada experimento (PEREIRA, 2022). Considerando a precisão do equipamento e o desvio padrão dos experimentos, os erros associados aos parâmetros medidos foram estimados conforme mostrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 - Precisão dos equipamentos empregados.

Equipamento	Medida	Precisão (%)
Reômetro	Pa, Pa.s ⁿ , s ⁻¹	± 3,00*
Cronômetro digital	s	± 0,20
Balança	kg	± 0,1
Transdutor ultrassônico	mm	± 0,29
Temporizador (câmera)	s	± 0,20
Termo-higrômetro	°C	± 5,00*

* Informação obtida a partir do *datasheet* do equipamento.

Tabela 3.2 - Incerteza dos parâmetros medidos.

Parâmetro	Medida	Incerteza (%)
Profundidade (h)	mm	± 0,75
Vazão (Q)	m ³ /s	± 3,50
Massa específica (ρ)	kg/m ³	± 0,45
Velocidade média ($\bar{u}$)	m/s	± 3,70
Velocidade superficial (u_s)	m/s	± 1,10
Tensão limite de escoamento (τ_0)	Pa	± 6,30 – 8,0
Índice de consistência (K)	Pa.s ⁿ	± 4,50 – 6.10
Índice de escoamento (n)	---	± 1,5 – 3,3

O código numérico desenvolvido em Matlab e empregado para obtenção das imagens espaço-temporal e definição da inclinação das estrias é apresentado no Apêndice A desta tese.

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção está organizada segundo quatro subseções: a Subseção 3.4.1 mostra os resultados referentes aos perfis de velocidades medidos experimentalmente segundo a técnica de velocimetria empregada; a Subseção 3.4.2 apresenta a confrontação experimental-teórica dos ensaios realizados; a Subseção **Erro! Fonte de referência não encontrada.** evidencia a bidimensionalidade ao longo da seção transversal dos escoamentos avaliados, e, por fim a Subseção 3.4.4 analisa curvas de fluxo (reologia) obtidas por meio dos perfis de velocidade medidos.

3.4.1 Resultados globais dos experimentos

A partir da realização dos experimentos físicos para todas as condições de escoamento definidas, foram obtidas as imagens STI e também as propriedades reológicas, profundidade do escoamento (H) e velocidade superficial para cada experimento (u_s). Também foram calculados os números de Reynolds (Re_{HB}), considerando fluido-teste ajustado segundo modelo reológico de Herschel-Bulkley com base nos trabalhos de Haldenwang et al. (2002), conforme Equação 3.10; e o número de Froude (Fr), conforme Equação 3.11. A Tabela 3.3 reúne os dados obtidos nos experimentos.

$$Re_{HB} = \frac{8\rho V^2}{\tau_0 + k \left(\frac{2V}{R_h}\right)^2} \quad (3.10)$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gH\cos\theta}} \quad (3.11)$$

sendo V a velocidade média do escoamento e R_h o raio hidráulico calculado de acordo com $R_h = LH/(2H + L)$ em que L é a largura do canal.

As faixas de tensão limite de escoamento e inclinação empregadas nesta pesquisa são usualmente utilizadas em experimentos físicos de avaliação de escoamentos viscoplásticos (MINUSSI e MACIEL, 2012; CHAMBON et al., 2014; FREYDIER et al., 2017). No total, 18 experimentos foram realizados com diferentes inclinações de canal (θ variando 4° a 10°),

diferentes amostras de Carbopol (τ_0 variando entre 10 e 30 Pa) e diferentes vazões (Q variando de 0,20 a 0,90 L/s).

Os experimentos de C_1 a C_{16} são caracterizados por propriedades reológicas semelhantes, obtidos de gel de carbopol de concentração mássica de 0,13%. Já os experimentos C_{17} a C_{18} são experimentos complementares realizados com carbopol de concentração mássica de 0,17% e implementados para análise da bidimensionalidade ao longo da seção transversal do escoamento. Observa-se a partir da Tabela 3.3 a redução da profundidade de escoamento com o aumento da inclinação e que o aumento da vazão conduziu ao aumento das profundidades; também se verifica a característica laminar do escoamento - baixos valores de Reynolds.

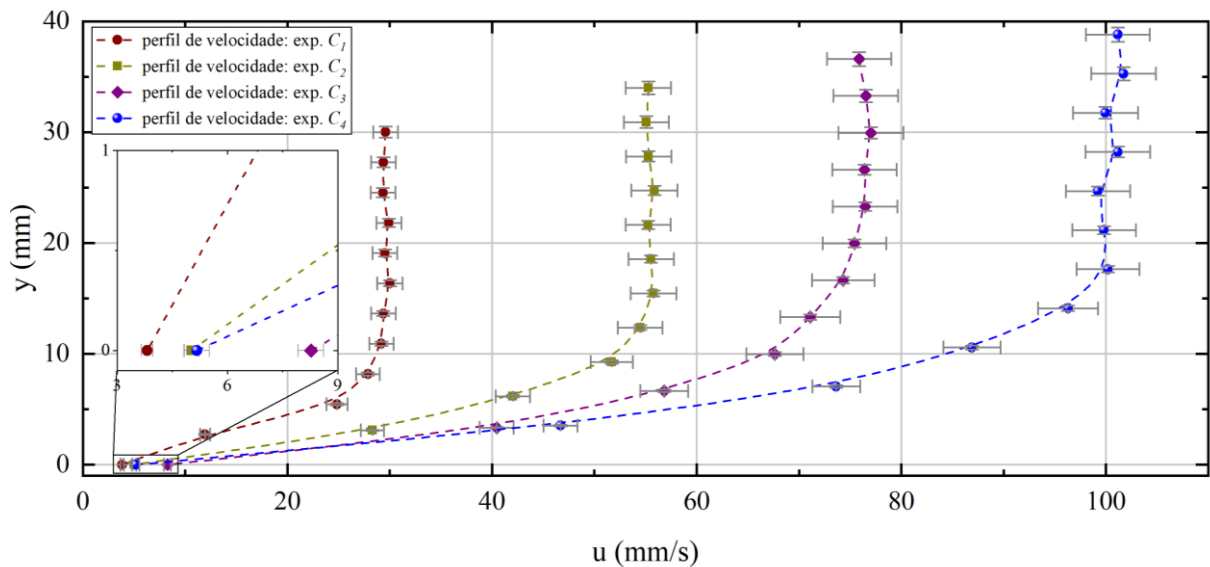
Tabela 3.3 - Valores médios das propriedades medidas e calculadas nos experimentos conduzidos.

Conc. (%)	Exp.	Q (L/s)	θ (°)	τ_0 (Pa)	K_n (Pa.s ⁿ)	n	ρ (kg/m ³)	u_s (mm/s)	V (mm/s)	H (mm)	Re_{HB}	Fr
0,13	C_1	0,20	4	11,13	4,26	0,43	1000,00	25,38	22,22	30,00	0,24	0,04
0,13	C_2	0,61	4	11,04	4,74	0,42	1000,67	45,90	40,20	34,00	1,45	0,10
0,13	C_3	0,41	4	11,26	5,05	0,42	999,33	71,12	55,56	36,60	0,60	0,06
0,13	C_4	0,87	4	10,75	5,32	0,41	1000,67	95,41	74,74	38,80	2,14	0,12
0,13	C_5	0,23	6	10,87	4,47	0,44	1000,67	38,00	33,48	22,90	0,49	0,07
0,13	C_6	0,41	6	10,61	4,24	0,49	998,67	69,10	53,39	25,60	1,15	0,11
0,13	C_7	0,63	6	10,71	4,72	0,43	998,67	99,52	76,78	27,35	2,20	0,15
0,13	C_8	0,83	6	10,83	5,09	0,42	1001,33	122,40	96,06	28,80	3,22	0,18
0,13	C_9	0,21	8	11,54	5,03	0,42	1000,67	41,21	30,57	22,90	0,38	0,06
0,13	C_{10}	0,42	8	11,62	5,08	0,42	999,33	81,65	54,69	25,60	1,11	0,11
0,13	C_{11}	0,60	8	11,17	5,64	0,41	996,67	113,09	73,13	27,35	1,84	0,14
0,13	C_{12}	0,76	8	11,05	5,93	0,40	1000,00	133,14	87,96	28,80	2,56	0,17
0,13	C_{13}	0,21	10	11,09	4,81	0,43	999,33	52,43	42,68	16,40	0,68	0,11
0,13	C_{14}	0,41	10	11,72	4,76	0,43	1000,67	95,50	73,48	18,60	1,81	0,17
0,13	C_{15}	0,60	10	11,56	5,10	0,42	1000,67	131,15	100,00	20,00	3,12	0,23
0,13	C_{16}	0,75	10	11,78	5,21	0,42	999,33	161,00	119,05	21,00	4,19	0,26
0,17	C_{17}	0,39	8	32,49	12,94	0,37	1001,93	38,27	36,34	35,77	2,08	0,06
0,17	C_{18}	0,75	8	32,88	19,93	0,36	1001,93	69,58	55,73	44,86	3,93	0,08

A Figura 3.12, Figura 3.13, Figura 3.14, Figura 3.15 e Figura 3.16 apresentam os perfis de velocidade medidos segundo as configurações experimentais propostas. De forma global, nota-se comportamento característico de fluido viscoplástico com tensão limite de escoamento ao observar os resultados de perfil de velocidade, como aqueles resultantes de desastres naturais (LE BOUTEILLER et al., 2021; SARNO et al., 2021; SANVITALE et al., 2011). Em todos os resultados de perfis de velocidade obtidos é notável a presença de região não cisalhada (*plug*)

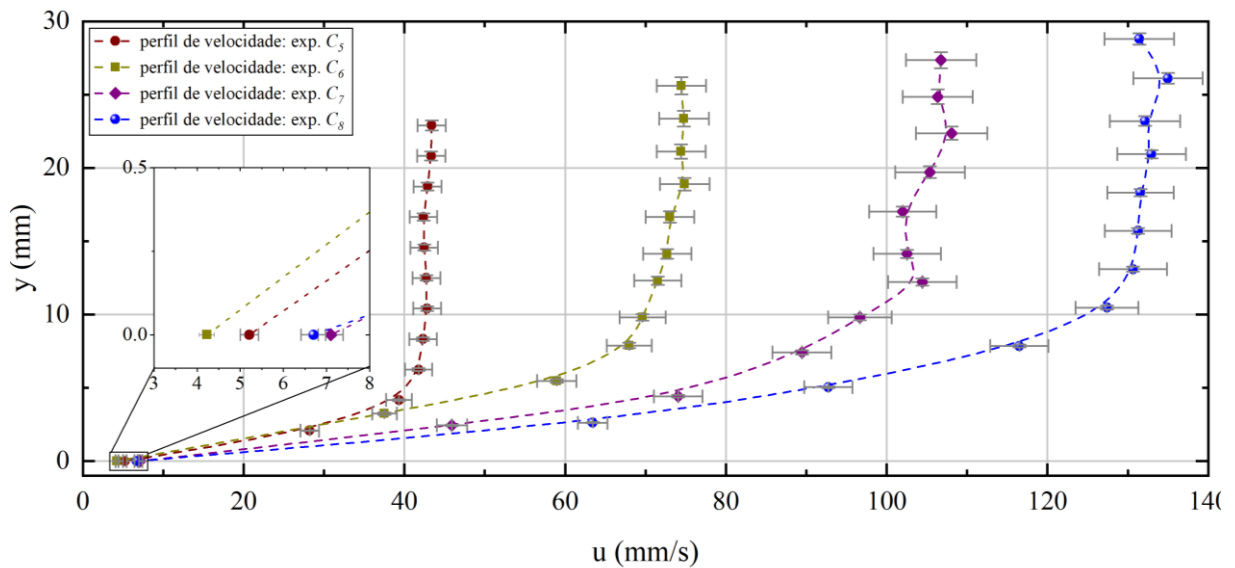
na região próxima à superfície livre e forte gradiente de velocidade à medida que se aproxima do fundo.

Figura 3.12 - Perfis de velocidade obtidos a partir da metodologia implantada (STI) para os experimentos C_1 , C_2 , C_3 e C_4 e $\theta = 4^\circ$. Barras de erro em cinza indicam as incertezas das medidas (na faixa de 1,70% para as profundidades e 4,10 % para as velocidades).



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.13 - Perfis de velocidade obtidos a partir da metodologia implantada (STI) para os experimentos C_5 , C_6 , C_7 e C_8 e $\theta = 6^\circ$. Barras de erro em cinza indicam as incertezas das medidas (na faixa de 1,4 a 2,3% para as profundidades e de 4,05 a 4,10% para as velocidades).



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.14 - Perfis de velocidade obtidos a partir da metodologia implantada (STI) para os experimentos C_9 , C_{10} , C_{11} e C_{12} e $\theta = 8^\circ$. Barras de erro em cinza indicam as incertezas das medidas (na faixa de 1,70% para as profundidades e de 4,17% para as velocidades).

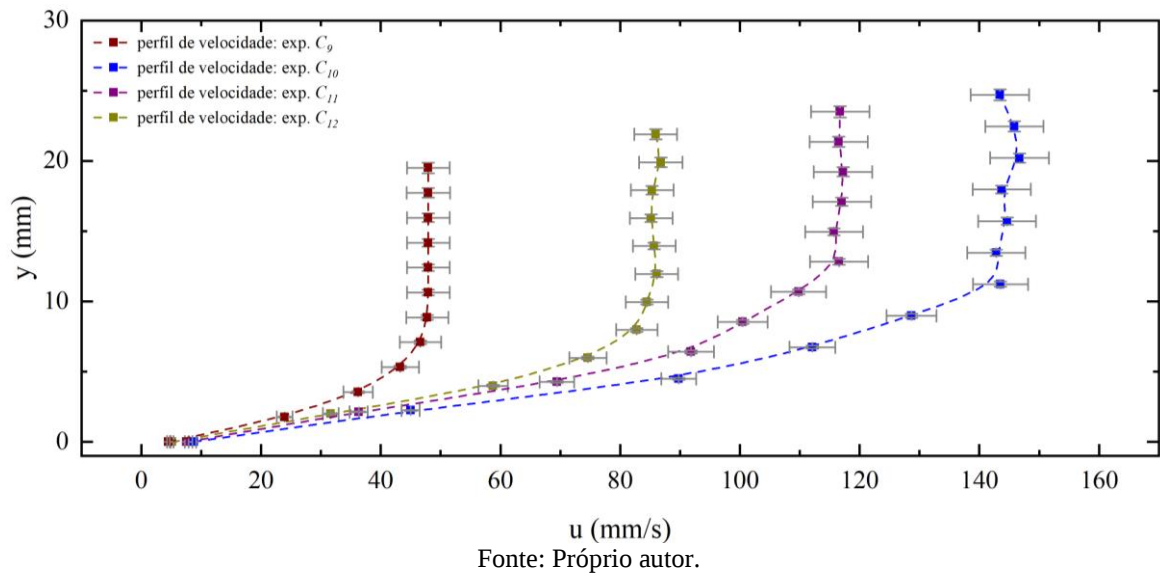


Figura 3.15 - Perfis de velocidade obtidos a partir da metodologia implantada (STI) para os experimentos C_{13} , C_{14} , C_{15} e C_{16} e $\theta = 10^\circ$. Barras de erro em cinza indicam as incertezas das medidas (na faixa de 1,70% para as profundidades e de 4,17% para as velocidades).

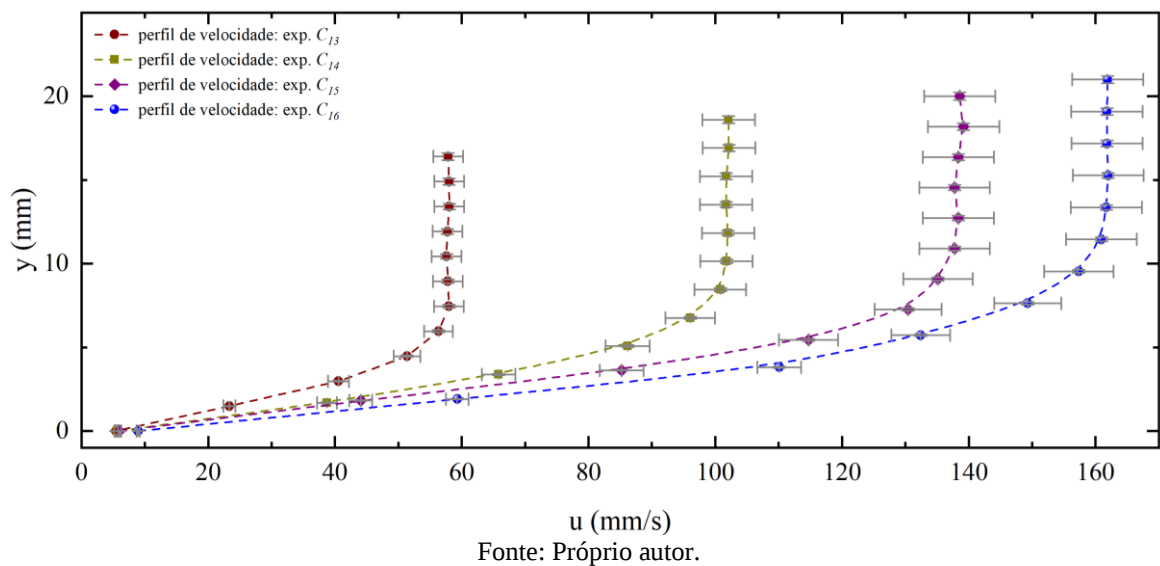
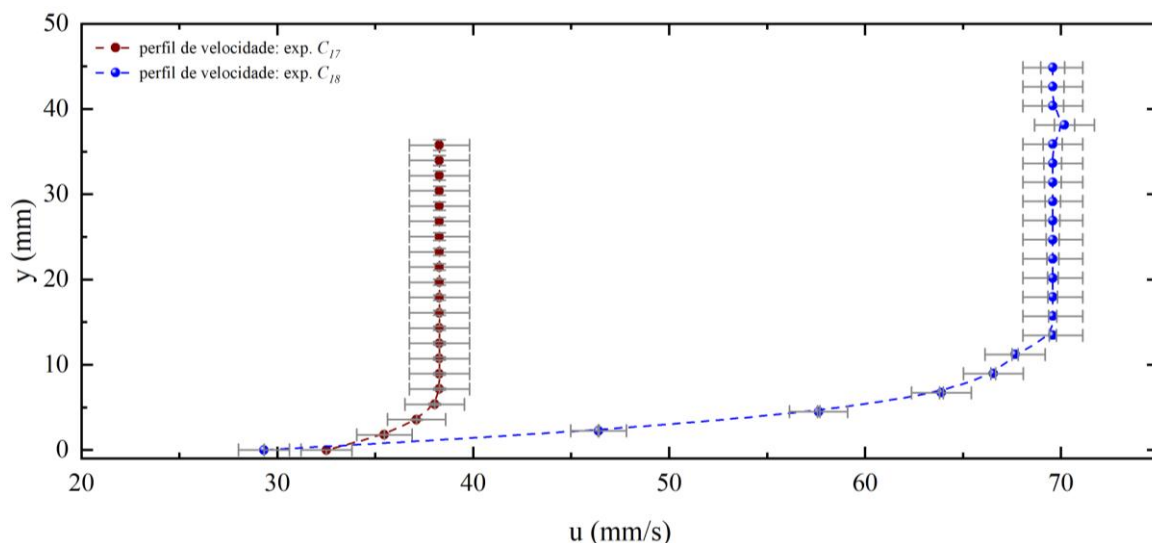


Figura 3.16 - Perfis de velocidade obtidos a partir da metodologia implantada (STI) para os experimentos C_{17} e C_{18} e $\theta = 8^\circ$. Barras de erro em cinza indicam as incertezas das medidas (na faixa de 1,70% para as profundidades e de 4,17% para as velocidades).



Fonte: Próprio autor.

Verifica-se também a unidirecionalidade do escoamento ao longo do canal, com componente de velocidade na direção y sendo desprezada, e presença ao longo de toda a espessura do escoamento de velocidade longitudinal na direção x estruturada segundo camadas (lamelas, no caso) sobrepostas, dominada pela ação da gravidade. Esse efeito pode ser confirmado ao se observar as imagens STI, conforme Figura 3.11.b. Nota-se na imagem STI a linearidade da estria, esse fato se deve à construção da dimensão espacial de tal imagem estar associada à avaliação apenas na direção longitudinal do escoamento, sempre paralelo ao fundo do canal; logo, no caso de não unidirecionalidade do escoamento, as estrias da imagem STI deveriam apresentar mudança de comportamento ao longo do diagrama espaço-tempo.

A análise da Figura 3.12, Figura 3.13, Figura 3.14, Figura 3.15 e Figura 3.16 também demonstra a presença de deslizamento de parede no escoamento. Em todos os experimentos a velocidade medida no fundo (ou muito próximo a ele) foi diferente de zero. O efeito de deslizamento se caracteriza, basicamente, como uma falta de adesão entre o material e a superfície de cisalhamento (BINGHAM, 1922) e sua presença pode implicar em erros importantes na determinação da tensão limite de escoamento e outras propriedades do escoamento durante a caracterização reológica.

As incertezas obtidas para os valores de velocidade da técnica de velocimetria se mostraram controladas ao longo das configurações experimentais, oscilando entre 4 e 5%. Nota-se, quando compara os resultados de C_1 a C_{16} como os de C_{17} a C_{18} , comportamento mais bem definido do *plug* nos últimos dois experimentos, isso ocorre em função dos níveis de velocidade

associados aos experimentos C_{17} a C_{18} serem menores, possibilitando imagens STI de melhor resolução em termos de comportamento das estrias.

3.4.2 Confrontação experimental-teórica de perfis de velocidade

A fim de realizar a confrontação dos resultados experimentais obtidos e verificar sua representatividade para o escoamento em termos da técnica de medição empregada, foi utilizado um modelo teórico baseado na teoria da lubrificação (uso das Equações 3.3 e 3.4). O modelo teórico empregado considera reologia não newtoniana, modelo reológico de ajuste Herschel-Bulkley e condições de não deslizamento de parede e canal largo (plano infinito).

Sabendo da condição de não deslizamento do modelo teórico, optou-se por alterar a condição de contorno no fundo do canal do modelo teórico, visto que todos os resultados experimentais indicaram a presença de efeito de deslizamento (escorregamento) no fundo do canal. Assim, a velocidade de fundo do modelo teórico foi alterada de $u(y=0) = 0$ para $u(y=0) = u_{desl.}$ (velocidade de deslizamento medida experimentalmente), essa alteração conduziu a um resultado teórico com a condição de deslizamento de parede, aferida experimentalmente. Assim, conhecida a nova condição de contorno no fundo do canal, o perfil de velocidade teórico passa a ser representado pela Equação 3.10:

$$u(y) = \begin{cases} u_p \left[1 - \left(1 - y/y_0 \right)^{(n+1)/n} \right] + u_{desl.} & \text{se } y < y_0 \\ u_p + u_{desl.} & \text{se } y \geq y_0 \end{cases} \quad (3.10)$$

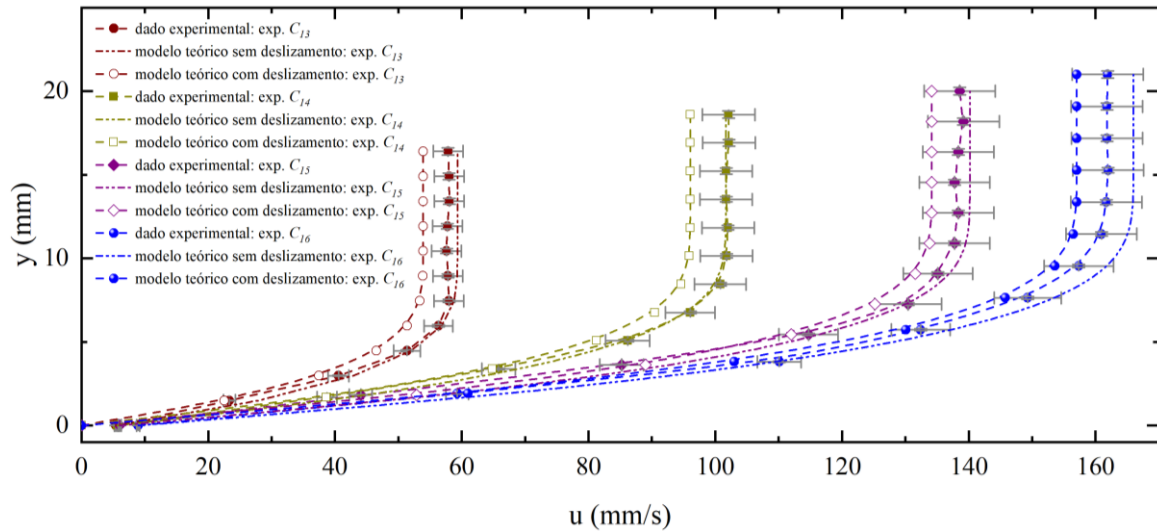
sendo u_p a velocidade do *plug* (Equação 3.4); n o índice de escoamento; $y_0 = h - h_p$ a altura da lâmina cisalhada no escoamento.

A escolha por prescrever a velocidade de fundo diferente de zero implica na alteração da condição de contorno definida para o modelo teórico, sem comprometer o emprego e validade do equacionamento (CHAMBON et al., 2014). A Figura 3.17 e Figura 3.19 ilustram a comparação entre os resultados experimentais e teóricos para a avaliação realizada na seção central do canal, considerando a análise de deslizamento de parede.

Uma discrepância de alguns mm/s é visível ao comparar os perfis de velocidade experimental e teórico em todos os experimentos realizados (principalmente nos experimentos

com maior tensão limite de escoamento e índice de consistência) demonstrando que o efeito de deslizamento no fundo conduziu à alteração de níveis de taxa de deformação e de velocidade.

Figura 3.17 - Confrontação experimental-teórica: experimentos C_{13} , C_{14} , C_{15} e C_{16} e $\theta = 10^\circ$. Linha pontilhada apresenta modelo teórico com $u(y = 0) = u_{exp.}$.

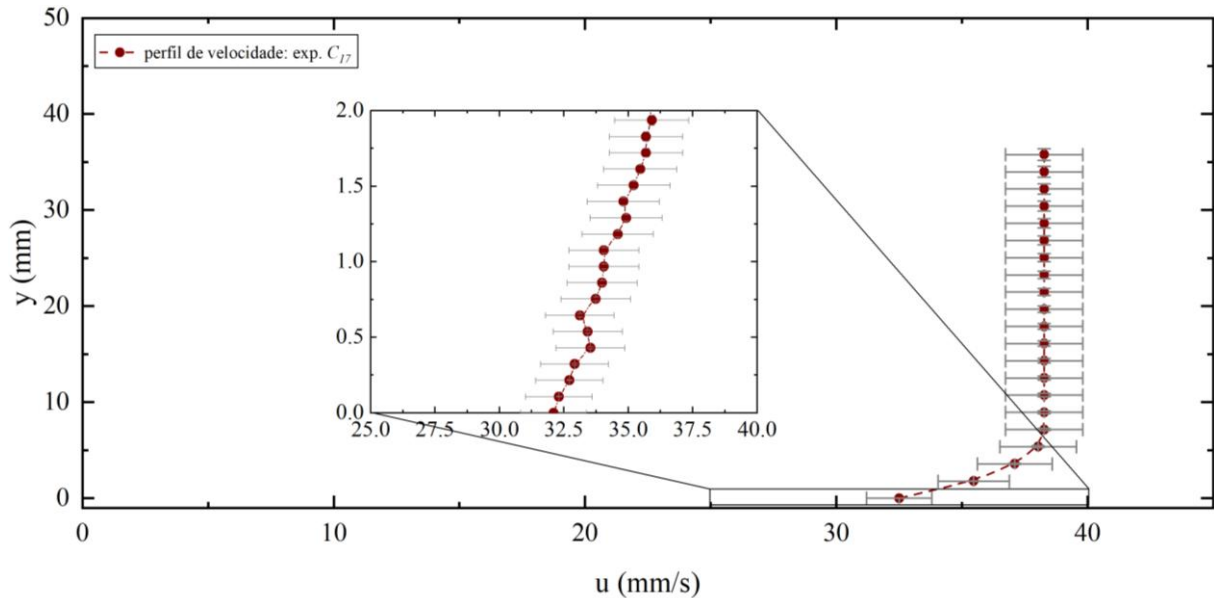


Fonte: Próprio autor.

Ainda que a definição de estar medindo em $y = 0$ possa gerar questionamentos, pode-se afirmar que tal ponto foi definido considerando as incertezas do processo de calibração de imagem e do pixel do fundo do canal. Dessa forma, ao apresentar medidas de velocidade nesse ponto pode-se considerar que tal ponto está de fato muito próximo ao fundo, ainda mais considerando a alta resolução das imagens - $83 \mu\text{m}/\text{px}$.

Uma análise mais aprofundada da região próxima ao fundo foi realizada para o experimento C_{17} . O perfil de velocidade foi verificado com incrementos de aproximadamente $0,10 \text{ mm}$, valor esse dentro da incerteza da medição, a partir de $y = 0$ até a profundidade de aproximadamente 2 mm . A Figura 3.18 ilustra o comportamento de velocidade na faixa de análise, demonstrando níveis elevados de velocidade em uma região muito próxima ao fundo, assim pode-se afirmar que o deslizamento de parede no fundo do canal ocorreu nos experimentos e que o método de velocimetria empregado é capaz de verificar com alta resolução o comportamento de escoamento na região de fundo do escoamento.

Figura 3.18 - Perfil de velocidade experimental do experimento C_{17} com análise detalhada na região próxima ao fundo ($0 \leq y < 2$ mm). Linha pontilhada apresenta modelo teórico com $u(y = 0) = u_{exp}$.



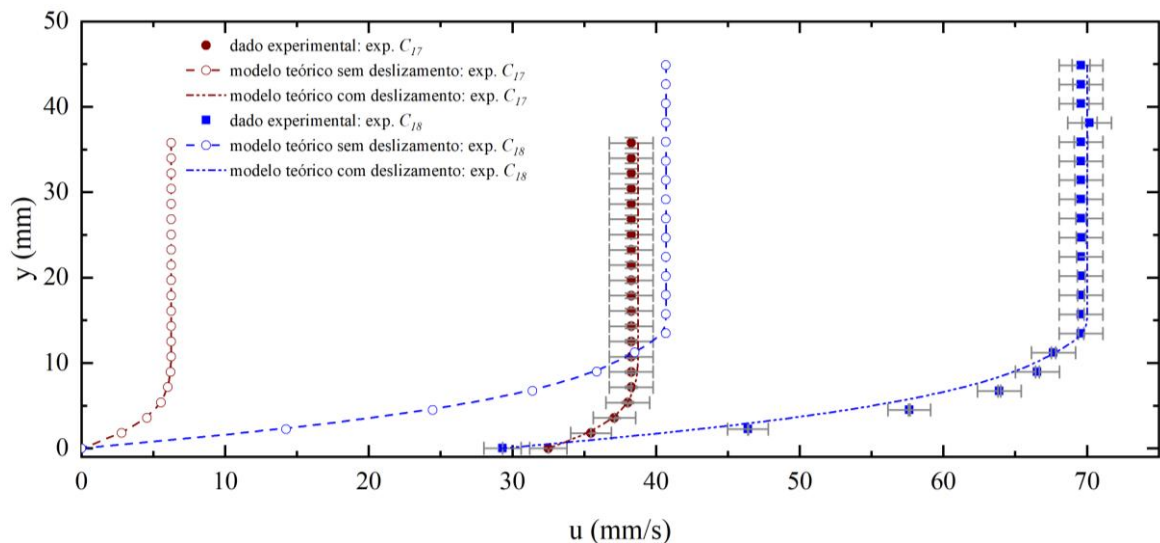
Fonte: Próprio autor.

Materiais com tensão limite de escoamento têm maior tendência a exibir diferentes tipos de heterogeneidades de fluxo (CLOITRE e BONNECAZE, 2017). Um desses fenômenos é o deslizamento, o qual pode ser visto segundo uma região de elevada deformação, sendo que a maior parte dela se concentra nas paredes de confinamento, enquanto a maior parte do material se comporta como um corpo sólido ou apresenta deformação desprezível (*plug*). Segundo Barnes (1999) e Hatzikiriakos (2015), deslizamentos presentes em dispersões de alto teor de sólidos, caso do gel de carbopol em concentrações mais altas, são classificados como deslizamento aparente, o que tem sido relatado em diferentes áreas de pesquisa (XU et al. 2017; PHILIPPOU et al., 2016; CHAMBON et al., 2014).

Ao se comparar os resultados da Figura 3.17 e Figura 3.19 é visível o maior efeito de deslizamento de parede nos experimentos C_{17} e C_{18} , ainda que todos os experimentos tenham experimentado vazões semelhantes, corroborando a suposição de que a espessura da camada de deslizamento, e consequentemente o próprio efeito de deslizamento, não é afetada pela vazão do escoamento (REINER, 1960); o fato da superfície do canal ser de vidro deve ser considerado como elemento de potencialização do efeito de deslizamento constatado. Os experimentos C_{17} e C_{18} são caracterizados pelo maior nível de tensão limite de escoamento (cerca de 3 vezes superior aos dos resultados restantes) e de índice de consistência (de 3 a 4 vezes superior), de forma que uma possível resposta para o aumento do efeito de deslizamento nesses testes seja a mudança das características reológicas do fluido, pois as características do deslizamento foram

decorrentes das propriedades da suspensão concentrada (KALYON, 2005). O aumento da espessura do *plug* (espessura do plug na faixa de 50 a 66% da camada de fluido), condição dos experimentos C_{17} e C_{18} , gerou o deslocamento acentuado da região mais viscosa do escoamento e consequente aumento de efeito de deslizamento.

Figura 3.19 - Confrontação experimental-teórica: experimentos C_{17} e C_{18} e $\theta = 8^\circ$. Linha pontilhada apresenta modelo teórico com $u(y = 0) = u_{exp}$.



Fonte: Próprio autor.

Conforme resultados apresentados na Figura 3.17 e Figura 3.19, a imposição do efeito de deslizamento ao modelo teórico conduziu a um resultado próximo ao medido experimentalmente via técnica de velocimetria empregada. Os resultados da Figura 3.19 indicam desvios máximos de 1,2% para escoamento o escoamento C_{17} e 7,2% para o C_{18} . Em todos os experimentos a técnica desenvolvida foi capaz de definir, com certa proximidade, quando comparada ao modelo teórico, a altura do *plug*, sendo os desvios encontrados na faixa de 7% a 14%.

É importante destacar que, embora a imposição da velocidade de deslizamento no perfil teórico tenha possibilitado correção das discrepâncias observadas nas regiões de *plug* e cisalhada, nota-se uma diferença entre resultados teóricos (com e sem deslizamento) e experimentais com relação à transição da região cisalhada para o *plug*. Nos perfis teóricos essa transição é brusca e rápida quando comparada ao experimental.

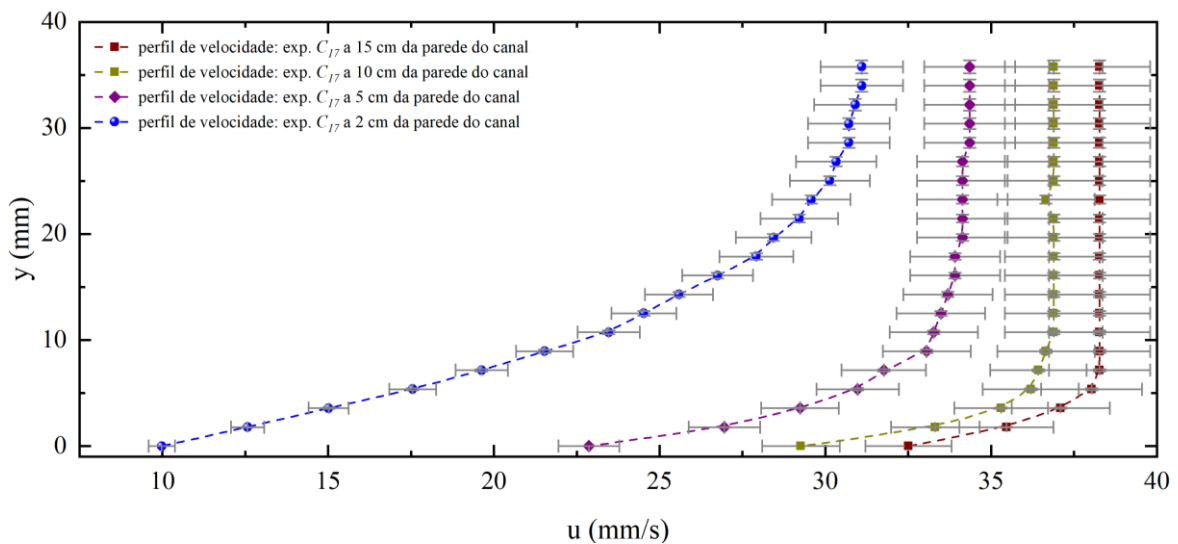
Ainda que diferenças entre os perfis de velocidade sejam visíveis, mesmo com uso do efeito de deslizamento no modelo teórico, a técnica *STIV* foi capaz de avaliar o interior de escoamentos viscoplásticos e fornecer campos de velocidade condizentes aos fluidos com

presença de tensão limite de escoamento, especificamente os reologicamente aderentes ao modelo Herschel-Bulkley. Particularmente, o método de velocidade desenvolvido foi capaz de demonstrar com elevada precisão a presença do *plug*, demonstrando boa capacidade da técnica *STIV* em avaliar regiões mais próximas à superfície livre. O método também se mostrou eficiente na análise na região próxima ao fundo do escoamento, sendo capaz de mostrar a presença de deslizamento de parede, fenômeno esse corroborado pela análise do modelo teórico com $u(y = 0) = u_{dest.}$

3.4.3 Influência das paredes laterais no perfil de velocidade da seção transversal

Os experimentos C_{17} e C_{18} foram realizados segundo avaliações em diferentes pontos da seção transversal do canal, possibilitando a caracterização do perfil de velocidade ao longo da largura do canal. Segundo os resultados obtidos (Figura 3.20 e Figura 3.21) as paredes laterais do canal influenciam as características do escoamento à medida que a distância do centro aumenta.

Figura 3.20 - Perfis de velocidade medidos em diferentes posições do canal: experimentos C_{17} e $\theta = 8^\circ$. Barra de erro na faixa de 4% para as medidas de velocidades e 1,7% para as alturas.

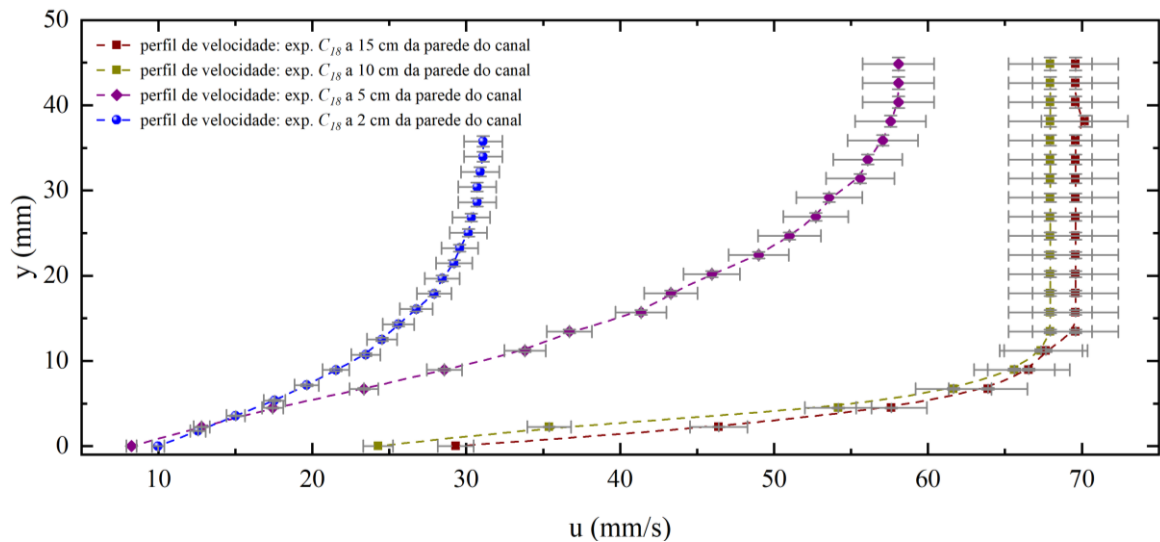


Fonte: Próprio autor.

Todos os resultados apresentados são característicos de escoamento laminar e elevada camada de *plug*. A fim de evidenciar o efeito de mudança do comportamento de velocidade ao longo da lateral do canal, a Figura 3.20 e Figura 3.21 foram produzidas a partir da interpolação dos perfis de velocidade medidos experimentalmente (Figura 3.22 e Figura 3.23) e assumindo a simetria do escoamento, de forma que a medição obtida ao longo de meia seção do canal

(pontos 2, 5, 10 e 15 cm da parede) foi tomada como verdade nas posições 20, 25 e 28 cm do canal (ver Figura 3.22 para melhor entendimento da localização dos pontos de avaliação na seção transversal do canal).

Figura 3.21 - Perfis de velocidade medidos em diferentes posições do canal: experimentos C_{18} e $\theta = 8^\circ$. Barra de erro na faixa de 4% para as medidas de velocidades e 1,7% para as alturas.



Fonte: Próprio autor.

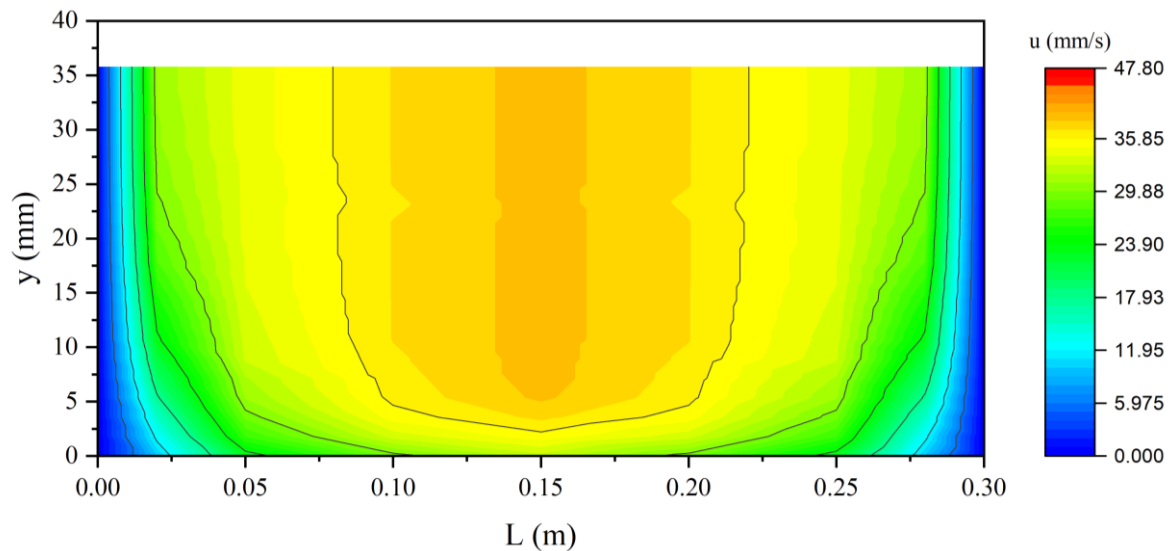
Em função da não possibilidade de obtenção do perfil de velocidade na interface entre escoamento e parede lateral foi assumida, para obtenção da Figura 3.22 e Figura 3.23, velocidade nula na parede. Entretanto, velocidades obtidas a 2 cm da parede indicam níveis elevados de deformação, de forma que é razoável considerar o efeito de deslizamento de parede também nessa região.

Nota-se claramente a redução dos níveis de velocidade quando da aproximação das paredes e fundo do canal. Algo interessante que deve vir à mente a partir dos perfis da Figura 3.22 e Figura 3.23 é a validade do emprego do modelo teórico, o qual se mostra apenas adequado para avaliar a região central do canal (de fato, a hipótese de canal largo é elemento da formulação da teoria da lubrificação), e apresenta distanciamento dos resultados experimentais à medida que tende-se à lateral do canal (efeito de borda atuante e não desprezível).

A avaliação de razão de aspecto dos experimentos C_{17} e C_{18} está faixa $0.12 < H/L < 0.15$. Essa faixa de valor indica que a hipótese de canal largo pode ainda estar comprometida. De fato, a literatura considera válida a hipótese de canal largo quando $H/L < 0.1$ (COUSSOT, 1994).

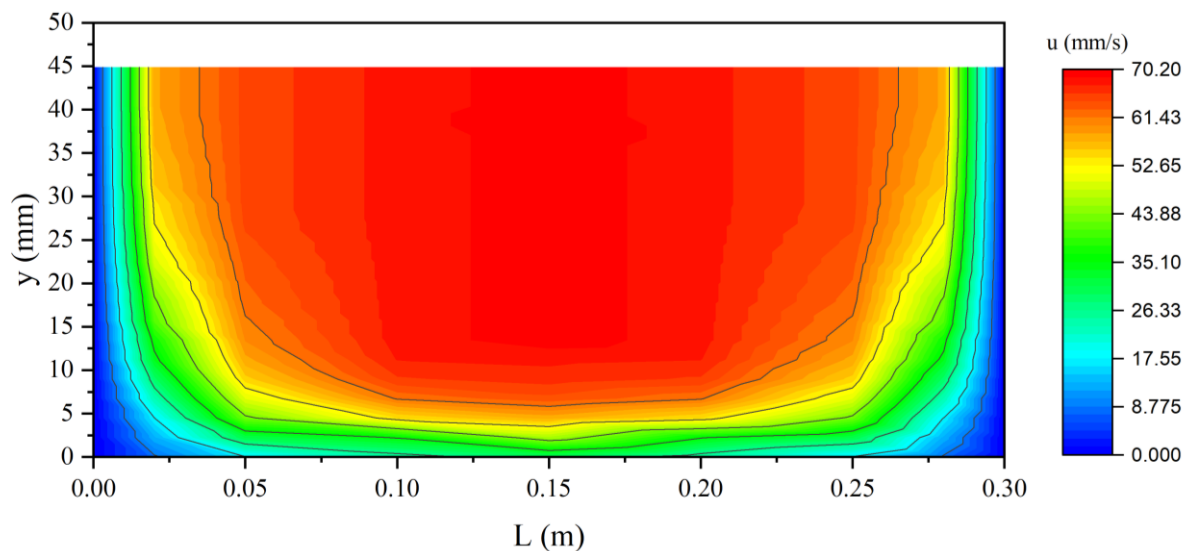
A Tabela 3.4 apresenta um comparativo de vazões, aquela medida a partir do fluxo de massa (Tabela 3.3), a calculada pela integração do perfil experimental de velocidade medido na seção central do escoamento e a obtida a partir do modelo teórico (Equação 3.5).

Figura 3.22 - Comportamento de velocidade na seção transversal do escoamento: experimentos C_{17} e $\theta = 8^\circ$. Dados experimentais foram interpolados e representados segundo valores médios neste mapa de cores.



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.23 - Comportamento de velocidade na seção transversal do escoamento: experimentos C_{18} e $\theta = 8^\circ$. Dados experimentais foram interpolados e representados segundo valores médios neste mapa de cores.



Fonte: Próprio autor.

Ao analisar o comparativo de vazões é possível verificar o bom comportamento dos resultados obtidos a partir do perfil de velocidade teórico quando comparado à vazão medida

durante os experimentos, nota-se para essa condição erros percentuais na faixa de 5 a 22%. É interessante notar que $Q_1 < Q_2$, com exceção do experimento C_2 , essa constatação está relacionada a vazão Q_2 empregar unicamente o perfil de velocidade medido no centro do canal, não considerando que tal perfil altera-se para valores menores quando a análise se encaminha para as bordas. Logo é aceitável prever que a vazão medida a partir do fluxo de massa durante o experimento será sempre maior que aquela medida unicamente com o perfil de velocidade obtido no centro do canal.

Tabela 3.4 - Comparação de vazões segundo diferentes métodos de obtenção.

Exp.	Q_1 (L/s)*	Q_2 (L/s)*	Q_3 (L/s)*	Q_4 (L/s)*
C_1	0,20	0,23	0,27	-
C_2	0,61	0,50	0,59	-
C_3	0,41	0,73	0,81	-
C_4	0,87	1,03	1,25	-
C_5	0,23	0,27	0,31	-
C_6	0,41	0,49	0,62	-
C_7	0,63	0,74	0,95	-
C_8	0,83	0,99	1,15	-
C_9	0,21	0,25	0,30	-
C_{10}	0,42	0,48	0,61	-
C_{11}	0,60	0,67	0,83	-
C_{12}	0,76	0,89	1,10	-
C_{13}	0,21	0,25	0,30	-
C_{14}	0,41	0,48	0,61	-
C_{15}	0,60	0,69	0,89	-
C_{16}	0,75	0,86	1,09	-
C_{17}	0,39	0,41	1494,72	0,396
C_{18}	0,75	0,89	1784,87	0,763

* Q_1 é a vazão medida durante o experimento (método gravimétrico); Q_2 é a vazão calculada a partir da integração do perfil de velocidade medido experimentalmente no centro do canal; Q_3 é a vazão calculada a partir da Equação 4.5 (modelo teórico); Q_4 é a vazão calculada a partir da integração do perfil de velocidade medido experimentalmente no centro do canal e em posições próximas às paredes do canal;

Ao comparar as vazões Q_2 e Q_3 é evidente o comportamento de $Q_2 < Q_3$, esse fato pode ser justificado pela vazão Q_3 , calculada pelo modelo teórico, considerar a hipótese de deslizamento de parede nulo. Assim, ao comparar perfis de velocidade teórico e experimentais, a presença de deslizamento de parede conduz a menores fluxos de volume ao longo da profundidade do escoamento. Essa constatação se confirma quando da avaliação dos experimentos de C_{14} a C_{18} , verifica-se que para esses resultados, os quais apresentam efeito de maior de deslizamento (velocidade na parede entre 6% e 75% da velocidade superficial), a diferença entre as vazões Q_2 e Q_3 são mais elevadas, com diferença percentual de cerca de 28%

para os experimentos de C_{14} a C_{16} , e superiores a 20.000% nos experimentos C_{17} a C_{18} . A grande diferença entre as vazões experimentais (Q_1 e Q_2) frente à vazão Q_3 nos experimentos C_{17} a C_{18} reforça o efeito da razão de aspecto $H/L > 0,1$ e da presença de elevado deslizamento de parede sobre o modelo teórico, invalidando seu emprego em situações dessa natureza. Por outro lado, ao verificar a vazão Q_4 (integração de perfis de velocidade medidos no centro e em posições próximas à parede) é possível concluir que $Q_4 \cong Q_1$, erros percentuais inferiores a 2%, o que indica que a melhor avaliação da vazão segundo perfis de velocidade deve ser feita considerando não somente a dinâmica do escoamento no centro do canal, mas também sua dinâmica em posições próximas às paredes do canal, em especial em situações de alto efeito de bidimensionalidade ao longo da seção transversal do escoamento.

Dessa forma, a medição de escoamentos com superfície livre de natureza viscoplástica requer cuidados e atenção em relação aos pontos de medição considerados e ainda mais quando da confrontação de regiões longe do centro do canal com modelos teóricos sob hipóteses simplificadoras. Deve-se atentar ao atendimento da relação $H/L < 0,1$ quando do emprego do modelo teórico baseado em canal sob condição de plano infinito, bem como à presença de deslizamento de parede.

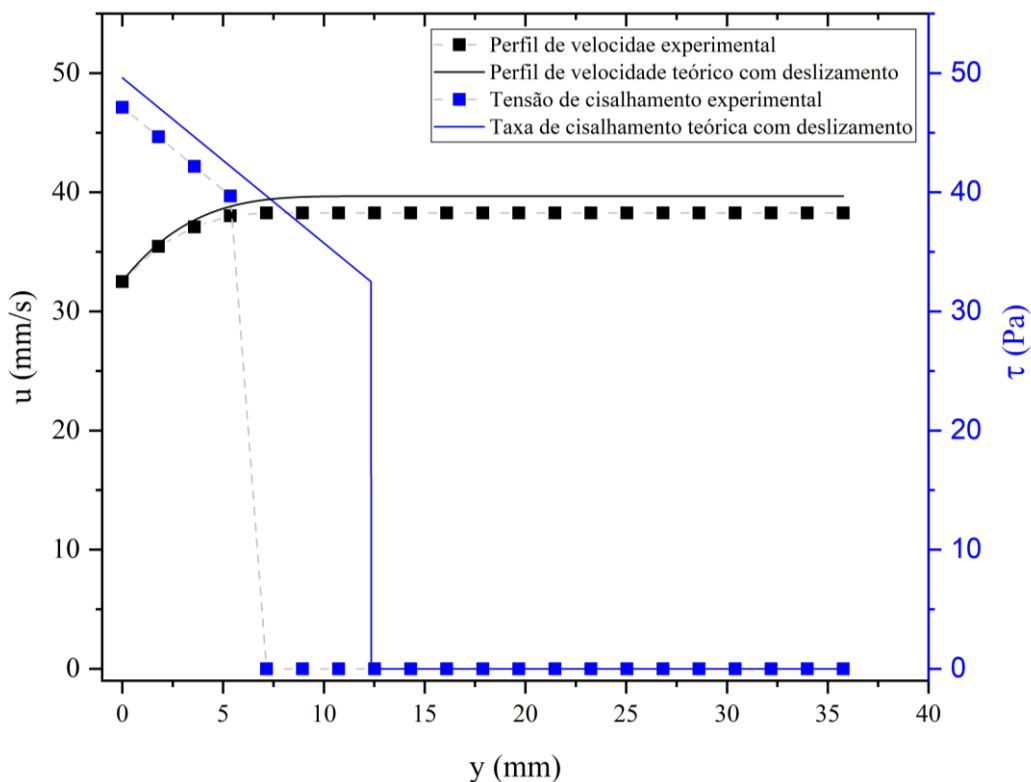
3.4.4 Curvas de fluxo: reconstrução por meio de medições de perfil de velocidade

Em função da alta resolução envolvida nas medições dos perfis de velocidade, pode-se reconstruir a relação tensão de cisalhamento versus taxa de deformação (Figura 3.25). A taxa de deformação foi definida a partir da diferenciação vertical dos perfis de velocidade ($\dot{\gamma} = |\partial_y u|$). Já a tensão de cisalhamento é calculada em cada altura do escoamento a partir da equação resultante da teoria da lubrificação (Equação 3.12), aqui lembrada:

$$\sigma_{xy} = \tau_{xy} = \rho g \sin \theta (h - y) \quad (3.12)$$

A Figura 3.24 mostra o comportamento da tensão de cisalhamento experimental, obtida a partir da Equação 3.12, como função da altura do escoamento. Tal resultado é comparado com os dados teóricos de tensão de cisalhamento. Deve-se evidenciar que a taxa de deformação do fluido é nula em $y \geq y_0$, situação que na superfície livre e região não-cisalhada de escoamentos que só se deformam com aplicação de uma tensão superior à tensão limite de escoamento, como os géis avaliados neste trabalho e materiais de mudflows.

Figura 3.24 - Comportamento da tensão de cisalhamento ao longo da profundidade do escoamento para o experimento C_{17} e $\theta = 8^\circ$ segundo resultado experimental de perfil de velocidade e modelo teórico considerando deslizamento. Linha pontilhada cinza com marcador azul representa tensão de cisalhamento a partir do perfil de velocidade experimental e linha pontilhada cinza com marcador preto representa perfil de velocidade experimental; linha contínua azul representa tensão de cisalhamento teórica considerando deslizamento e linha contínua preta representa perfil de velocidade teórica com deslizamento.

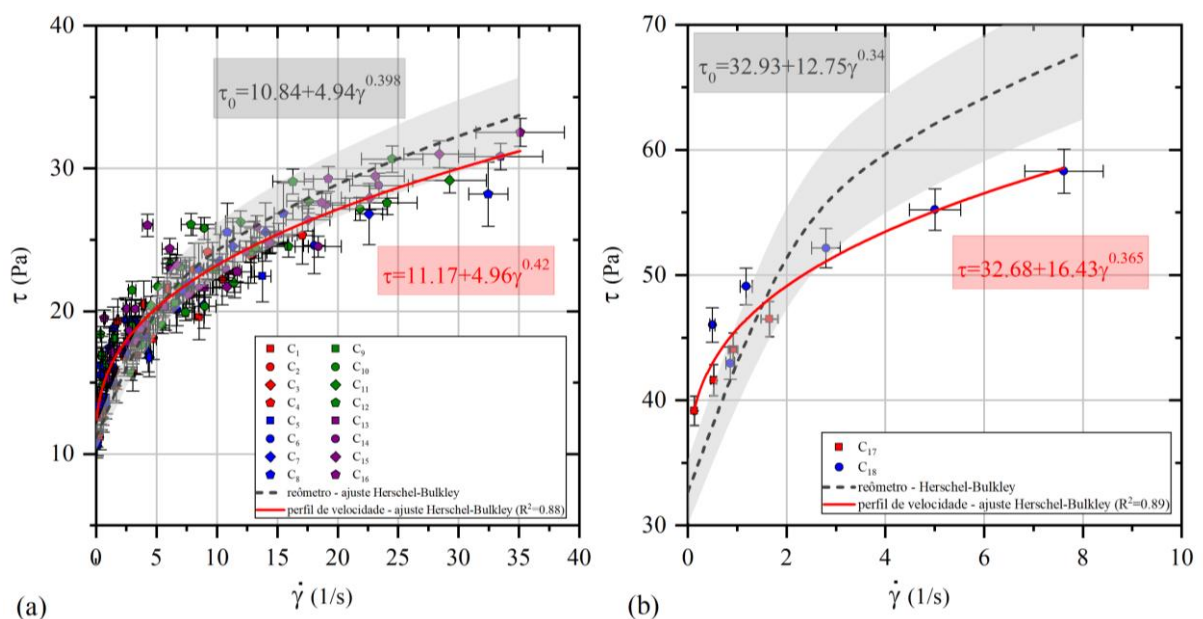


O comportamento da relação taxa de deformação e tensão de cisalhamento dos dados obtidos via perfil de velocidade indica ajuste ao modelo reológico de Herschel-Bulkley em ambos os fluidos analisados (gel de concentração 0,13% e 0,17%). Destaca-se que o uso do perfil de velocidade foi capaz de fornecer, com elevada proximidade ao definido via reômetro, a tensão limite de escoamento, para ambos os fluidos analisados (diferença percentual na faixa de 0,75% a 3,00%). Da mesma forma, os índices de escoamentos foram bem quantificados a partir do perfil de velocidade (erros percentuais inferiores a 7,50%).

Entretanto, ao avaliar o comportamento do índice de consistência do fluido-teste de concentração 0,17% observa-se uma discrepância elevada em termos desse parâmetro e seu efeito sobre a curva de fluxo. Nesse sentido, uma possibilidade em termos de avaliação de tal discrepância está associada aos níveis de taxa de deformação calculados e o efeito de deslizamento de parede sobre os níveis de velocidade, os quais são empregados para obtenção da taxa de deformação. De forma a exemplificar essa especulação, deve-se notar que para baixas

taxas de deformação há ainda na Figura 3.25.b concordância próxima aos dados do reômetro, mas à medida que se aumenta as taxas de deformação, caso de avaliação de perfis de velocidade mais próximo do fundo, as curvas de fluxo se distanciam e evidenciam discrepância das taxas de deformação. Logo, deve-se supor o efeito de deslizamento, possivelmente advindo das elevadas propriedades reológicas do fluido de concentração 0.17%, como responsável por influenciar o comportamento da curva de fluxo em termos dos níveis de taxa de cisalhamento e, por último, gerar forte efeito sobre o índice de consistência (erro percentual desse parâmetro em torno de 30% para o fluido de concentração 0,17%).

Figura 3.25 - Curvas de fluxo calculadas a partir dos perfis de velocidade (representadas pelos pontos e barras de incertezas) para os géis de carbopol de concentração mássica de: (a) 0,13% e (b) 0,17%. A linha pontilhada representa a curva de fluxo, segundo parâmetros médios, medida a partir do reômetro e a área em cinza a incerteza de medição da curva de fluxo via reômetro.



Fonte: Próprio autor.

Além disso, o emprego da curva reológica obtida em reômetro, no qual foi evitado o deslizamento de parede, como padrão de referência para definir dinâmica do escoamento, também é responsável pela maior discrepância entre curva de fluxo de reometria e curva de fluxo do perfil de velocidade.

Como possível adequação dos resultados, os autores sugerem corrigir os parâmetros reológicos obtidos a partir do perfil de velocidade, removendo a velocidade de deslizamento de todo o perfil experimental (caso se queira comparar a curva de fluxo do reômetro com o

experimento). Propõem-se ainda obter a curva de fluxo a partir do perfil de velocidade teórico, considerando o efeito de deslizamento medido (situação mais apropriada para a obtenção da “curva de fluxo real”). Contudo, deve-se esclarecer que essa avaliação em canais abertos deve ser realizada em estudos futuros, visto que as referências sobre a obtenção de parâmetros reológicos fidedignos à condição da dinâmica de escoamento com presença de deslizamento concentram-se em geometria confinada (BELAID et al., 2024; GARCÍA-BLANCO et al., 2023), o que implica de maiores verificações para definição de metodologia adequada envolvendo problemas em escoamentos sob superfície livre.

3.5 CONCLUSÃO

De forma geral, foi possível, a partir dos sistemas de medição implantados e pelo desenvolvimento de um algoritmo próprio baseado no método *STIV* (Apêndice A), definir uma metodologia simples e acessível para a obtenção de perfis de velocidade ao longo da altura de escoamentos de fluidos viscoplásticos. Os resultados dos perfis de velocidade foram satisfatórios com incertezas experimentais na faixa de 5 % e erros de 10% quando da confrontação experimental-teórica em considerando efeito de deslizamento no fundo.

Com relação à presença de efeito de deslizamento de parede, pode-se afirmar que o método de velocimetria implantado apresentou bom comportamento em avaliar a velocidade do escoamento em posições próximas ao fundo do canal, indicando sua capacidade de bem avaliar toda a espessura do escoamento.

Ainda sobre o efeito de deslizamento visualizado e medido, torna-se importante destacar como sua presença influencia o comportamento de vazão do escoamento. Assim, é necessário se atentar ao uso parcimonioso do modelo teórico baseado em hipótese de não deslizamento e condição de plano infinito a fim de se evitar prever vazões superestimadas. Por fim, verifica-se a possibilidade de obtenção da reologia do fluido a partir do perfil de velocidade ao longo da profundidade do escoamento, ainda que efeitos de escala e de fundo possam atuar sobre os resultados.

4 ESCOAMENTOS VISCOPLÁSTICOS EVOLUINDO EM PLANO E CANAL INCLINADO A PARTIR DE “RUPTURA DE BARRAGEM”

4.1 INTRODUÇÃO

Fluxos advindos da liberação de um volume finito de fluido similares ao que na literatura denominou-se qualificar como escoamento tipo ruptura de barragem (*dam-break*) são comumente observados na natureza, como em situações envolvendo escoamento de lavas, avalanches de neve, corridas de detritos e fluxos de lama (ANCEY, 2007; BALMFOORTH et al., 2007), assim como em diversas aplicações de processos industriais (PASHIAS et al., 1996; ROUSSEL; CUSSOT, 2005; ROUSSEL, 2007; GAO; FOURIE, 2015a; MACIEL et al., 2016). Com base nessa premissa, estudos associados a problemática *dam-break* têm sido desenvolvidos e com diversos fins: 1) caracterizar reologicamente os materiais envolvidos nesses escoamentos, aqui destaca-se o ensaio de abatimento de tronco de cone empregado na construção civil para avaliação da tensão limite de escoamento (FERRARIS; DE LARRARD, 1998), o teste da calha na indústria da mineração, a caixa “L” na avaliação de materiais cimentícios (ROUSSEL, 2007); o teste de Bostwick na indústria de alimentos para avaliação de consistência (PERONA, 2005; BALMFOORTH et al., 2007); 2) descrever fluxos gravitacionais envolvendo fluidos de reologia complexa, notadamente os viscoplásticos, como em corridas de lama, detritos e avalanches (CHANSON et al., 2006; COCHARD; ANCEY, 2009; FREYDIER et al., 2017; COUSSOT, 2007).

Escoamentos do tipo *dam-break*, no contexto de eventos “naturais”, são, normalmente e em sua maioria, analisados a partir do colapso repentino da contenção ou reservatório que contém o fluido, implicando em fluxos com elevada velocidade a jusante (MUCHIRI et al., 2023). Dada a natureza de geração de danos envolvida nesse tipo de escoamento, faz-se necessário diagnosticar os aspectos hidrodinâmicos dos volumes extraordinários liberados, no intuito de mitigar riscos.

Estudos têm evidenciado que a propagação do escoamento do *dam-break* na natureza é influenciada por vários fatores, entre eles, propriedades reológicas do fluido, inclinação do fundo, variações topográficas, níveis de fluido represado, e mais recentemente a instantaneidade ou não do fenômeno ruptura (velocidade de levantamento da comporta no laboratório) e forma de liberação do fluido (desenvolvimento de brechas) (GRIFFITHS, 2000; CHANSON et al., 2006; COCHARD, 2007; COCHARD; ANCEY, 2009; LIU, 2018; MOYERS-GONZALEZ; 2023). Todos esses fatores desempenham papel importante na

determinação da altura máxima do escoamento, velocidade e alcance das frentes (MUCHIRI et al., 2023). Entretanto, para os escoamentos de natureza viscoplástica, a avaliação desses efeitos sobre o escoamento tipo *dam-break* ainda está em desenvolvimento e aberta a novas discussões, não sendo muitas as investigações experimentais relatadas na literatura, trazendo tais ponderações.

Os estudos experimentais acerca de *dam-break* de fluidos viscoplásticos se concentram em análises considerando ruptura instantânea (COCHARD; ANCEY, 2009; MACIEL et al., 2012), mas deve-se atentar que, segundo Rico et al., 2008, o mecanismo de ruptura mais dominante é aquele em que a ruptura tende a aumentar gradual e sequencialmente ao longo do tempo após sua formação inicial. Dessa forma, há de se evidenciar que as diferenças na taxa de formação da ruptura (desenvolvimento da brecha) implicam sobre o comportamento de evolução, principalmente em termos temporais, dos alcances e hidrogramas do fluido liberado (LIU, 2018; CHÁCARA; OLIVEIRA FILHO, 2021). Ainda que poucos sejam os trabalhos que estejam focando na forma de ocorrência da ruptura, já se pode concluir, como será discutido na Seção 4.4, que as características desses escoamentos podem ser fortemente influenciadas pela taxa de liberação de volume de fluido.

Uma grande quantidade de pesquisas sobre escoamento tipo *dam-break*, de natureza experimental e numérica, emprega a consideração de efeitos de inércia desprezíveis em suas avaliações a fim de simplificar o desenvolvimento do problema (LIU, 2018), entretanto realizam simulações segundo uma ruptura instantânea, a qual pode impactar sobre os alcances, e especialmente sobre os hidrogramas unitários da ruptura. Na realidade, muitas barragens de rejeitos rompem de forma sequencial, com uma ruptura inicial e, após um período de tempo, a ruptura tende a aumentar. Portanto, tendo como informação a ocorrência comum e dominante de ruptura de barragem de rejeitos segundo mecanismo sequencial, ou seja, uma ruptura inicial acompanhada de seu aumento ao longo do tempo, torna-se de interesse realizar o estudo de escoamento tipo *dam-break* segundo a imposição de estágios de abertura a fim de fornecer uma base experimental e numérica para estudos futuros de rupturas de barragens de rejeitos.

Nesse contexto, este capítulo visa avaliar, sob condições controladas de laboratório, leis de evolução de frentes de materiais viscoplásticos (lamas cauliníticas e géis de carbopol) produzidas pela liberação desses materiais segundo diferentes velocidades de abertura de comporta, diferentes configurações de movimentação de comporta (abertura para cima e para baixo) e com presença de estágios de abertura. Dessa forma, este estudo explora simulações físicas de rupturas de barragens (tipo barragens de rejeitos) de forma controlada e evoluindo em plano inclinado e em canal. Para isso, todo o trabalho foi baseado no desenvolvimento de

um aparato experimental para controle da movimentação do plano inclinado e abertura da comporta. Diferentes cenários de ruptura foram avaliados de forma a identificar seus efeitos sobre os alcances (*runout*) das frentes produzidas, e também sobre os hidrogramas unitários da ruptura. Análises a partir de adimensionais, com destaque para relação do adimensional de inércia (I/τ_0) e o número de Herschel-Bulkley (HB - Bingham generalizado), demonstram a atuação do efeito de inércia advindo da situação de ruptura instantânea; também foi verificado a influência dos estágios de abertura (formação de brecha) sobre o escoamento, em especial no tempo imediatamente após a abertura e no comportamento do hidrograma unitário.

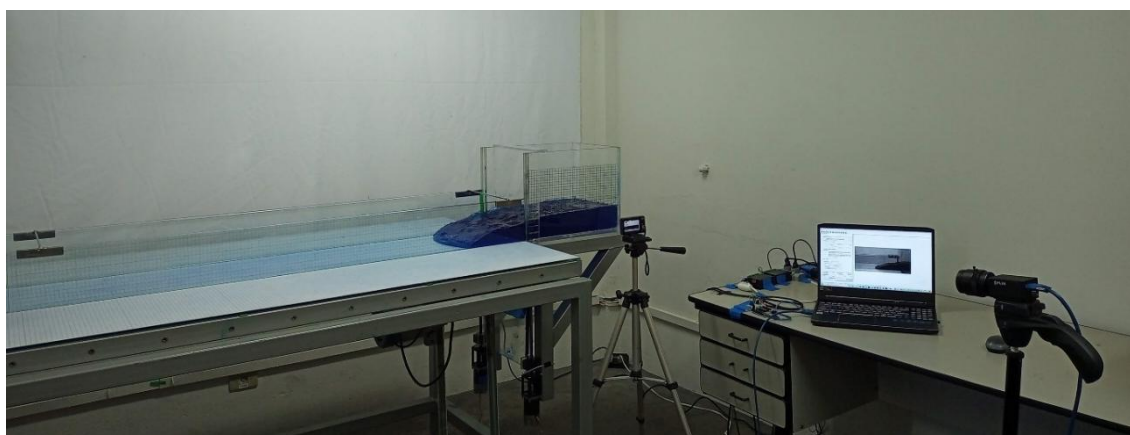
4.2 OBJETIVO

O objetivo deste capítulo é apresentar o desenvolvimento do aparato experimental de *dam-break*, e explorar resultados de alcance, velocidade e hidrogramas unitários de escoamentos sobre plano inclinado e canal inclinado, bem como as influências da velocidade da comporta e a presença de estágios de abertura da comporta sobre o desenvolvimento do escoamento.

4.3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento e implementação de experimentos de *dam-break* foi construído um aparato experimental (Figura 4.1) capaz de simular abertura controlada de comporta e permitir situação de escoamento característico de abertura instantânea e gradual (imposição de estágios de abertura).

Figura 4.1 - Aparato experimental de *dam break*: configuração final. Situação na condição de canal e comporta com movimento descendente.



Fonte: Próprio autor.

Nas subseções deste capítulo serão abordadas as características do aparato experimental, indicadas as técnicas empregadas na etapa de medição, descritos os fluidos-testes empregados e suas características reológicas e as configurações experimentais avaliadas.

4.3.1 Fluido-teste

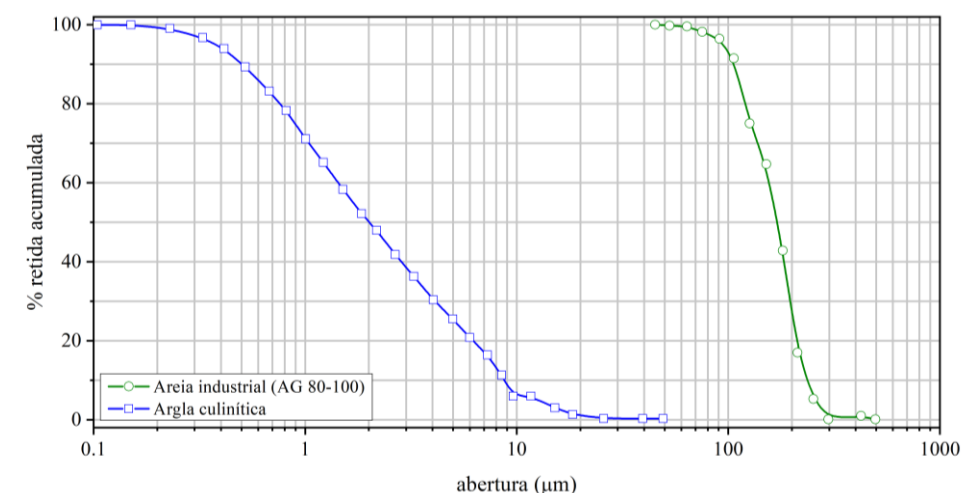
Para o desenvolvimento experimental deste trabalho, utilizou-se o Carbopol 996 na forma de pó. Esse material é definido como um polímero acrílico hidrossolúvel que ao ser neutralizado forma estruturas com maior viscosidade. A produção dos géis se deu em diferentes concentrações, em massa de carbopol (C_m), a saber: 0,17% e 0,25%. A confecção de géis com diferentes concentrações teve como objetivo obter amostras com uma ampla faixa de tensão limite de escoamento (entre 20 e 75 Pa).

O preparo do gel de carbopol seguiu os procedimentos descritos no Capítulo 3, item 3.3.1, entretanto não foram adicionados microtraçadores à mistura. Com o intuito de promover uma melhor visualização do escoamento do gel, um corante (azul de metileno) foi adicionado ao processo final de mistura. Em termos de massa específica, devido às baixas concentrações mássicas avaliadas, os resultados ficaram próximo de 1000 kg/m^3 , variando de 1005 a 1015 kg/m^3 . Os géis produzidos foram armazenados e mantidos em temperatura ambiente.

Além dos géis de carbopol, analisaram-se lamas, as quais foram preparadas a partir da mistura de argila, areia industrial (AG 80-100) e água do sistema de abastecimento do município de Ilha Solteira - SP. Utilizou-se a argila caulínica São Simão com massa específica de 2612 kg/m^3 e areia industrial (AG 80-100) de massa específica de 2640 kg/m^3 . A Figura 4.2 apresenta a curva granulométrica da argila e areia empregadas na mistura das lamas.

O preparo das lamas se deu em diferentes concentrações em volume de argila (C_v), segundo a mistura argila caulínica-água e argila caulínica-areia industrial-água. A definição da suspensão contendo areia teve como objetivo avaliar material lamoso de maior proximidade, em termos de composição de curva granulométrica, aos escoamentos lamosos advindos de rupturas de barragem de rejeito. Em termos de fluidos empregados, foram definidas 2 (duas) composições formadas pela suspensão de água e argila, de concentrações volumétricas, a saber de: 28,0% e 31,0% (mistura argila-água); e 2 (duas) composições formadas pela suspensão de água, argila e areia industrial, para este caso, fixou-se a concentração volumétrica de água e argila em 28% e acrescentou-se 50% de volume de argila para uma mistura e 25% de volume de argila para a outra.

Figura 4.2 - Curva granulométrica dos materiais empregados na produção de lama.



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 4.1 apresenta as características em termos de parâmetros médios dos fluidos analisados, géis de carbopol e lamas, as características de massa específica, nomenclatura adotada e demais informações para identificação do fluido nas análises subsequentes.

Tabela 4.1 - Características dos fluidos-testes empregados. Massa específica em termos de valor médio.

Fluido	Nomenclatura do fluido	Teor de sólidos (%) [*]	Massa específica (kg/m ³)
Gel de carbopol	C_17 [*]	0,17	1009,98
Gel de carbopol	C_25	0,25	1013,97
Lama (argila-água)	L_AA_28 [*]	28,00	1455,08
Lama (argila-água)	L_AA_31	31,00	1504,00
Lama (argila-água-areia industrial)	L_AAA_28_0.5A ^{**}	36,80	1592,11
Lama (argila-água-areia industrial)	L_AAA_28_0.25A ^{**}	33,00	1531,33

^{*} Concentração de géis de carbopol representados por concentração mássica; concentração volumétrica para as lamas;

^{**} O termo 0.5A indica presença na proporção de 50% do volume de argila e 0.25A indica proporção de areia de 25% do volume de argila.

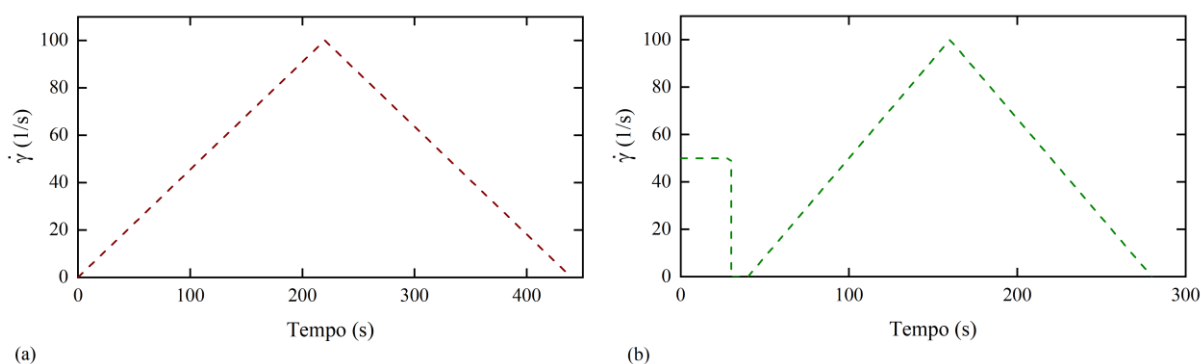
A fim de garantir elevada homogeneização das suspensões de água e argila, foi empregada agitação mecânica. Para isso, foi adaptado, a partir do uso de uma geometria de mistura do tipo âncora, acoplada a uma furadeira, um misturador de elevada energia de agitação. O processo de mistura foi realizado fixando o volume a ser produzido em 15 litros de lama. Tendo o volume de água necessário para a mistura, a argila foi adicionada ao recipiente contendo água segundo frações de aproximadamente 500 ml de pó, a cada acréscimo de argila à mistura agitava-se o material por aproximadamente 60 segundos a uma rotação de aproximadamente 1400 rpm (velocidade máxima da furadeira empregada). Finalizada o

acréscimo de toda a argila à mistura, manteve-se a agitação mecânica por 5 minutos, garantindo a dispersão dos grãos de argila e a homogeneização da suspensão. Para as lamas que foram produzidas segundo a mistura argila-areia industrial-água adicionou-se volumes fracionados de areia, garantindo sua dispersão na mistura.

4.3.2 Caracterização reológica

A caracterização reológica dos fluidos-testes analisados, géis de carbopol e lamas, foi realizada a partir de reometria clássica empregando reômetro da marca Brookfield R/S, com controle de taxa de deformação e tensão de cisalhamento, com uso do sistema de medição Vane 40/20. O procedimento de medição reológica foi distinto para o gel de carbopol e para a lama: para o gel de carbopol, o protocolo consistiu na imposição de dois estágios lineares de taxa de deformação: o primeiro crescente, de 0 a 100 s^{-1} em um período de 220 segundos, e outro decrescente, de 100 a 0 s^{-1} em um período de 220 segundos, e a respectiva medição da tensão de cisalhamento. Já para as lamas foi aplicado pré-cisalhamento à mistura antes de efetivar a medição reológica, logo o protocolo consistiu em 3 etapas: aplicação de um patamar fixo de taxa de deformação de 50 s^{-1} por 30 segundos, repouso de 10 segundos, e imposição de dois estágios lineares de taxa de deformação, um crescente, de 0 a 100 s^{-1} em um período de 120 segundos e outro decrescente, de 100 a 0 s^{-1} em um período de 120 segundos. O emprego do pré-cisalhamento teve como objetivo garantir a homogeneidade das partículas de argila em suspensão durante o início da caracterização reológica. A Figura 4.3 ilustra os protocolos de ensaios reométricos empregados.

Figura 4.3 - Protocolo de ensaio reométrico empregado para: (a) gel de carbopol e (b) lama.



Fonte: Próprio autor.

Em função das características do equipamento disponível para caracterização reológica não foram realizados ensaios oscilatórios, sendo todas as análises e resultados obtidos

associados a ensaios rotacionais. O uso de protocolo de ensaio reométrico com rampa crescente e decrescente de taxa de deformação foi empregada para analisar possível comportamento de tixotropia dos fluidos-testes.

Em relação à execução da caracterização reológica, durante a execução dos experimentos de *dam-break*, após o escoamento ter ocorrido e cessado, 3 (três) ensaios reométricos foram realizados, compondo uma análise segundo triplicata. Os dados reométricos foram ajustados ao modelo reológico de Herschel-Bulkley e, em função da limitação do reômetro empregado em termos de taxa de deformação, as curvas de fluxo foram ajustadas segundo a faixa de $3 \leq \dot{\gamma} \leq 100 \text{ s}^{-1}$.

4.3.3 Aparato experimental de *dam break*

O aparato foi desenvolvido com o objetivo de simular rupturas hipotéticas de barragem (*dam break*). Para isso foi necessário o controle rigoroso da movimentação da comporta que confina o material no reservatório. O aparato é composto de um plano inclinado, em vidro, com um reservatório, confeccionado em acrílico. Todo o aparato apresenta 2,0 m de comprimento, 1,2 m de largura e altura variável de acordo com a inclinação desejada. O plano inclinado possibilita uma ampla faixa de inclinações (de 0° a 20°) e seu movimento ocorre, de forma mecanizada. A partir da colocação de duas placas de vidro, de 1,50 m de comprimento, sobre o plano inclinado pode-se alterar a configuração do aparato, tornando-o um canal inclinado. Como elemento de ineditismo, o aparato foi desenvolvido para possibilitar um conjunto único capaz de viabilizar a análise tanto de escoamento em plano quanto em canal inclinado, além de permitir a movimentação ascendente (situação comum em experimentação física de *dam-break* – abertura instantânea) e descendente (possibilidade de simular estágios de abertura de comporta – abertura gradual; situação pouco explorada em trabalhos de experimentação física). Para aumentar o rigor de execução do experimento, a movimentação da comporta é controlada por um conjunto de motores de passo, cuja interface de controle permite definir a velocidade de elevação e rebaixamento da comporta.

O desenvolvimento do aparato foi realizado em diferentes etapas: concepção, montagem e automação. A primeira etapa, a concepção, foi desenvolvida em plataforma digital de desenho, especificamente o *Solidy Works*, nela foi definida a configuração do aparato, desde a disposição da estrutura metálica, até o posicionamento dos sistemas de movimentação do plano e comporta, bem como características de peças que passariam por usinagem e cortes específicos (comporta e reservatório). Na segunda etapa, foram realizados os cortes das peças metálicas e

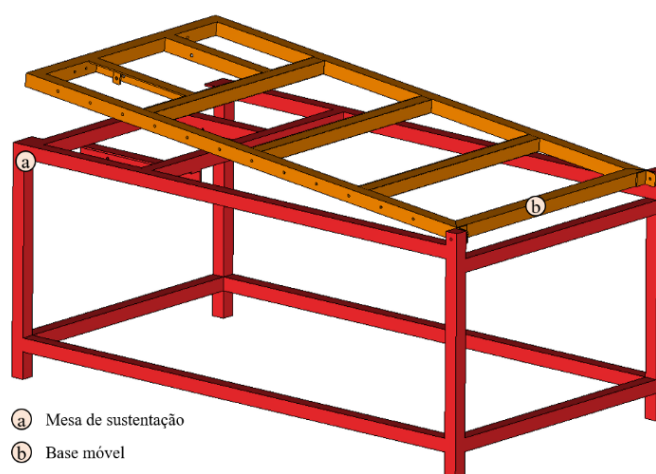
de acrílico, a usinagem de peças que iriam compor o sistema de movimentação do plano e comporta, e finalmente a montagem de todas as peças e pintura do aparato. Por fim, a terceira etapa reuniu a automação dos sistemas de movimentação do plano inclinado e a comporta.

Basicamente o aparato experimental de *dam break* é composto por uma estrutura metálica de sustentação (mesa de sustentação), a qual recebe as outras estruturas: o plano inclinado (composto por uma base de vidro) e canal inclinado (colocação de paredes de vidro sobre o canal inclinado, confinando o escoamento); os módulos de retenção (reservatório e comporta); e por fim os sistemas de movimentação, tanto da comporta quanto do plano inclinado. De forma a facilitar o entendimento do aparato criado, as Subseções de 4.3.3.1, 4.3.3.2, 4.3.3.3 e 4.3.3.4 especifica cada sistema/estrutura que compõe o equipamento, bem como suas características e peculiaridades.

4.3.3.1 Mesa de sustentação

A mesa de sustentação do aparato de *dam-break* foi confeccionada em perfil metálico retangular 50 x 50 mm e montada nas dimensões de 2,0 (comprimento) x 1,0 (largura) x 0,90 m (altura). Basicamente a estrutura se assemelha a uma mesa em termos de disposição geométrica, conforme Figura 4.4. A fim de garantir a inclinação do plano superior da mesa foi criada uma base retangular móvel, também em perfil metálico, com uma fixação do tipo pivotante em uma das extremidades da mesa. A fixação pivotante da base móvel permite a sua inclinação, e conseqüentemente possibilita a geração de um plano inclinado.

Figura 4.4 - Projeto executivo da mesa de sustentação.



Fonte: Próprio autor.

A base móvel, com possibilidade de inclinação, disposta sobre a mesa de sustentação recebeu furos para o acoplamento dos módulos de retenção. É importante já relatar que os módulos de retenção são fixados na extremidade da base móvel, garantindo que os reservatórios tenham a mesma inclinação do plano inclinado.

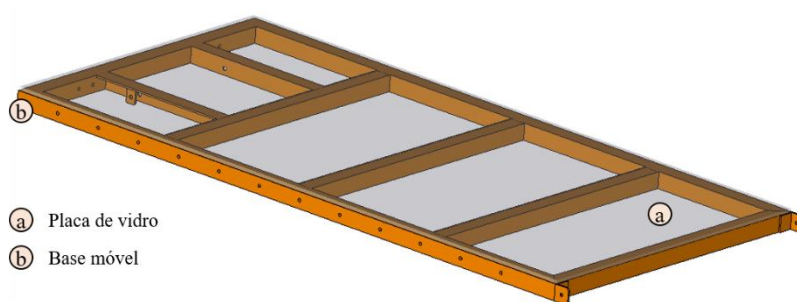
Para garantir o nivelamento da mesa de sustentação foi desenvolvido um sistema simples composto por parafusos, porcas e arruelas, os quais foram soldados nos pés da mesa de sustentação. A partir da movimentação desses parafusos pode-se alterar o nível de altura de cada uma das extremidades da mesa e com isso nivelar o aparato.

Para garantir a movimentação mecanizada da base pivotante/móvel foi instalado, abaixo dela e ligada às laterais da mesa de sustentação, um sistema mecânico composto de barras roscadas e engrenagens. Todo esse sistema foi ligado a um motor, este responsável por transferir movimento de seu eixo para as engrenagens e barras roscadas.

4.3.3.2 *Plano e canal inclinado*

O plano inclinado, conforme ilustrado pela Figura 4.5, é composto por uma placa retangular de 2,0 x 1,0 m de vidro temperado de 8 mm de espessura assentada sobre a mesa de sustentação. É importante destacar a característica móvel da base em que a placa de vidro foi assentada, de forma que um sistema de movimentação ligado à base de apoio do vidro permite sua elevação e possibilidade do plano se posicionar em diferentes inclinações (de 0 a 20°).

Figura 4.5 - Projeto executivo do plano inclinado.

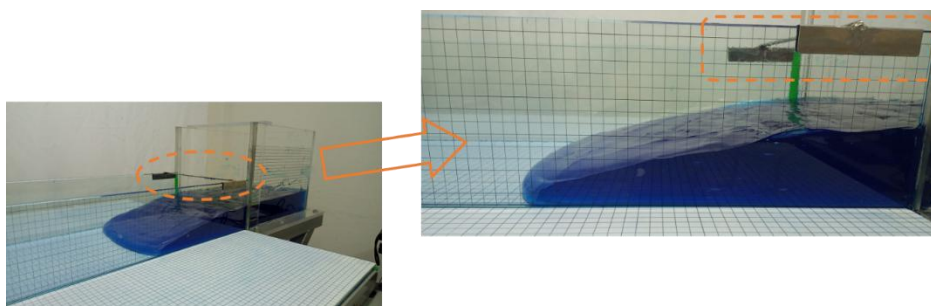


Fonte: Próprio autor.

Além da possibilidade de obtenção de um plano inclinado, é possível canalizar o escoamento por meio da colocação de duas placas de vidro, ambas de 1,5 x 0,15 m e espessura de 8 mm. As placas de vidro são fixadas sobre o plano de vidro e disposta na sequência das paredes laterais do reservatório, formado um canal de seção transversal de 30 cm de largura e 15 cm de altura. A fixação das paredes do canal foi realizada a partir de suportes na forma de

canaletas (Figura 4.6) os quais foram dispostas unindo as placas de vidro em seu topo, garantindo a vedação e perpendicularidade da parede.

Figura 4.6 - Configuração de canal inclinado: suporte empregado para fixação das paredes do canal.

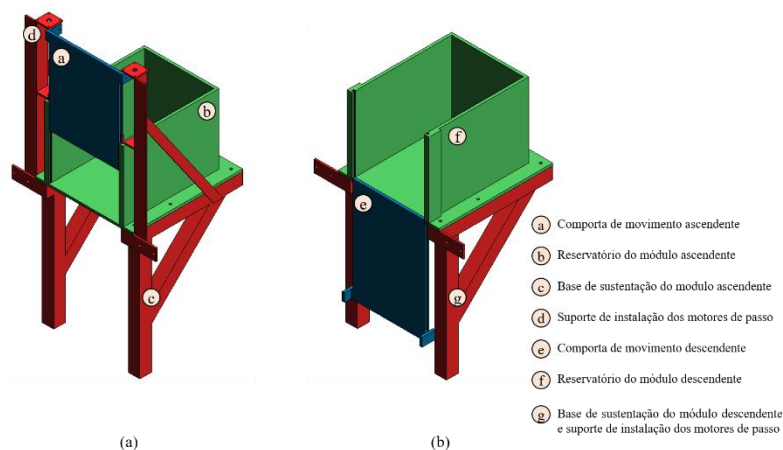


Fonte: Próprio autor.

4.3.3.3 Módulos de retenção

A fim de possibilitar um aparato de *dam-break* com duas configurações de abertura de comporta (movimento ascendente – configuração comumente empregada na literatura, e descendente – novidade deste projeto a fim de simular ruptura gradual) foi decidido pela montagem de dois módulos de retenção (Figura 4.7), os quais podem ser acoplados ao conjunto mesa de sustentação e plano inclinado (Figura 4.8).

Figura 4.7 - Projeto executivo dos módulos de retenção: (a) ascendente e (b) descendente.



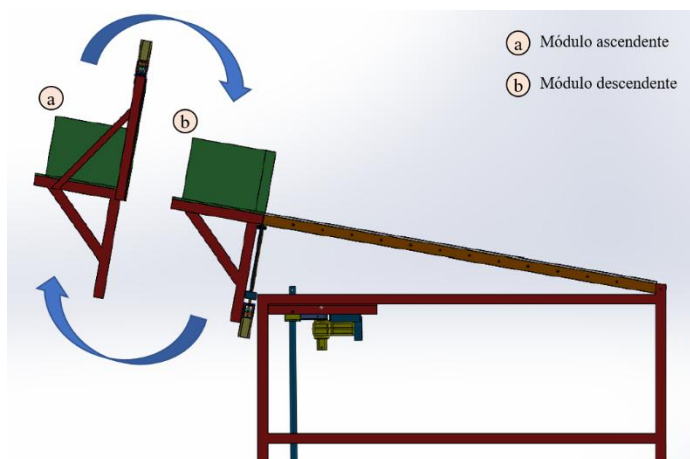
Fonte: Próprio autor.

Os módulos de retenção foram confeccionados em acrílico com as seguintes dimensões, em metros, 0,30 (altura - H) x 0,30 (largura - L) x 0,40 (comprimento - l), possibilitando um volume total de 36 litros. As peças em acrílico foram cortadas e usinadas a fim de garantir

encaixe perfeito da comporta e garantir sua movimentação vertical. Um cuidado extra foi direcionado à vedação lateral da comporta, para isso foi utilizado borracha de perfil cantoneira, a qual foi colada ao longo da lateral rebaixada da comporta possibilitando vedação na região de encaixe da comporta com a lateral do reservatório.

Para garantir o acoplamento dos reservatórios à mesa de sustentação, uma base metálica de sustentação dos reservatórios foi criada, o conjunto reservatório + base metálica recebeu o nome de módulos de retenção. Cada módulo de retenção conta com pontos para encaixe do sistema de movimentação de comporta via motores de passo e também pontos para seu encaixe na estrutura metálica que recebe a base de vidro.

Figura 4.8 - Ilustração da troca de módulos de retenção do aparato de dam break.



Fonte: Próprio autor.

É importante destacar que cada módulo de retenção foi confeccionado para proporcionar um tipo de abertura da comporta. O módulo de retenção ascendente permite apenas a elevação da comporta, tendo sua elevação de comporta estimada em aproximadamente 20 cm. Já o módulo de retenção descendente foi projetado para permitir a descida da comporta até o nível do plano inclinado, dessa forma esse conjunto apresenta um recuo da base do reservatório e estrutura metálica a fim de possibilitar a descida da comporta (nessa situação a comporta é abaixada ficando entre a mesa de sustentação e o módulo de retenção).

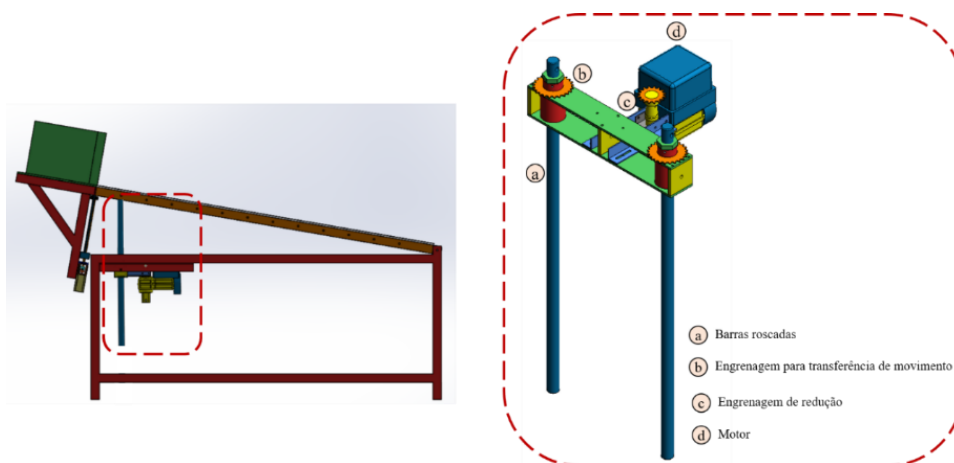
4.3.3.4 Sistema de movimentação

Plano Inclinado

A movimentação do plano inclinado foi projetada para ser executada a partir da transferência de movimento de eixo de um motor (tipo motor basculante de portão elétrico) para duas barras roscadas fixadas na base móvel/pivotante da mesa de sustentação.

Para obter esse sistema de inclinação foi montada uma estrutura composta por duas barras roscadas dispostas verticalmente abaixo do plano inclinado, conforme Figura 4.9. Essas barras roscadas apresentam suas extremidades superiores ligadas (de forma a propiciar giro) à base pivotante e são encaixadas em uma estrutura retangular composta por porcas e engrenagens dentadas, tais engrenagens são ligadas por corrente a outra engrenagem de menor diâmetro conectada ao eixo do motor. Assim, quando o eixo do motor é acionado a corrente movimenta as engrenagens ligadas às barras roscadas e estas se deslocam verticalmente elevando ou abaixando o plano inclinado.

Figura 4.9 - Posicionamento do sistema de movimentação do plano inclinado e detalhamento do sistema de inclinação.



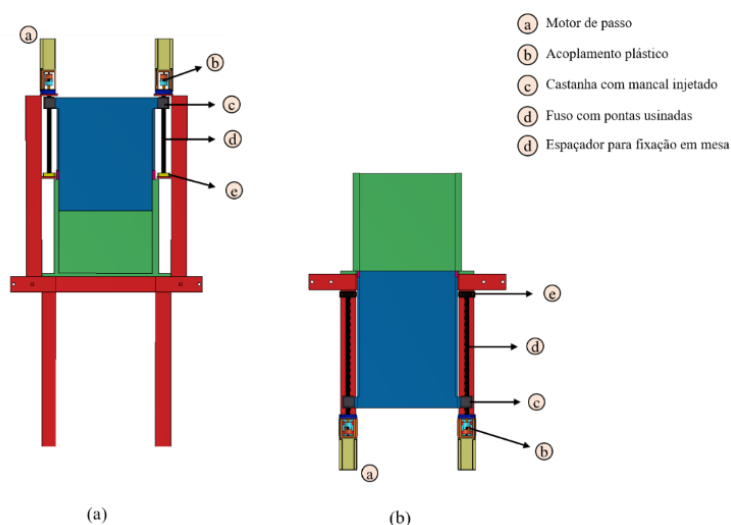
Fonte: Próprio autor.

Para garantir a inclinação do plano inclinado foi instalado, no ponto pivotante do plano inclinado, um inclinômetro para verificação do ângulo de inclinação desejado. Em função da engrenagem redutora empregada, a movimentação das barras roscadas é lenta e gradual de forma que o controle de ângulo é elevado e preciso.

Comporta dos módulos de retenção

Em função da necessidade de controle da comporta e definição de diferentes estágios de deslocamento vertical, optou-se pelo uso de um mecanismo baseado em uso de motores de passo. Os motores de passo permitem elevado controle de giro de seu eixo e foram empregados para possibilitar elevado rigor na velocidade de movimentação da comporta.

Figura 4.10 - Projeto executivo do sistema de movimentação da comporta: posicionamento e descrição de seus elementos.



Fonte: Próprio autor.

Dessa forma, o sistema de movimentação da comporta foi projetado com dois motores de passo, dispostos nas laterais do módulo de retenção e ligados, por meio de fuso roscado, às extremidades da comporta, conforme Figura 4.10. O motor de passo utilizado é de 15 kgf e quatro fios, e corrente de alimentação de 2.9 A.

Para operar os motores de passo é necessário um dispositivo eletrônico de controle, geralmente formado por um microcontrolador (está sendo utilizado Arduino UNO R3) e um circuito chamado “driver”, que alimenta o motor e supre suas necessidades de corrente elétrica (uso do driver TB 6600). A partir da interface de controle (driver e Arduino) foi possível implementar as características de abertura da comporta (tempo de abertura da comporta).

4.3.4 Técnicas de medição empregada

4.3.4.1 Medição de profundidade: câmeras

Para a medição de profundidades, bem como de velocidades e posicionamento de frentes do escoamento, foram empregadas câmeras dispostas no topo e na lateral do aparato (Figura

4.11). Três câmeras têm sido empregadas, a câmera GS3 FLIR de fps com lente de 16 mm para a captura da evolução lateral do escoamento (seu emprego se deve à avaliação do escoamento a partir de maior amostragem de imagens - $fps > 100$), uma câmera Lumix FH8 (Panasonic) de foco automático para registro da mancha de inundação (vista superior) e uma câmera Cyber-Shot DSC-W800 (Sony) de foco automático para registro da variação do nível de fluido dentro do reservatório (a captura da mudança de nível do reservatório tem como objetivo possibilitar a obtenção dos hidrogramas unitários associados aos escoamentos).

É importante destacar que foi constatado ao longo das medições a possibilidade de reduzir a taxa de amostragem de imagens para a faixa de $fps = 40$. O emprego da imagem espaço-temporal (STI) na avaliação do alcance do escoamento demonstrou a possibilidade de obtenção do alcance com elevada precisão, mesmo com baixa taxa de amostragem (discussão apresentada na Subseção 4.3.4.2), e consequente redução de tempo de processamento de imagens.

Figura 4.11 - Configuração experimental de câmeras empregadas: (a) câmera Lumix FH8 (Panasonic), (b) câmera Cyber-Shot DSC-W800 (Sony) e (c) câmera GS3 FLIR. A imagem apresenta aparato experimental na configuração de canal e comporta com movimento descendente – experimento representativo com gel de carbopol C_{17} segundo canal na posição horizontal e descida da comporta em estágio único.



Fonte: Próprio autor.

O uso de câmeras para medição requer a calibração das imagens. Para isso foi empregada uma malha de referência (quadriculado 10 x 10 mm). Assim, em todos os experimentos uma tomada contendo a malha de referência sobre o local de interesse foi

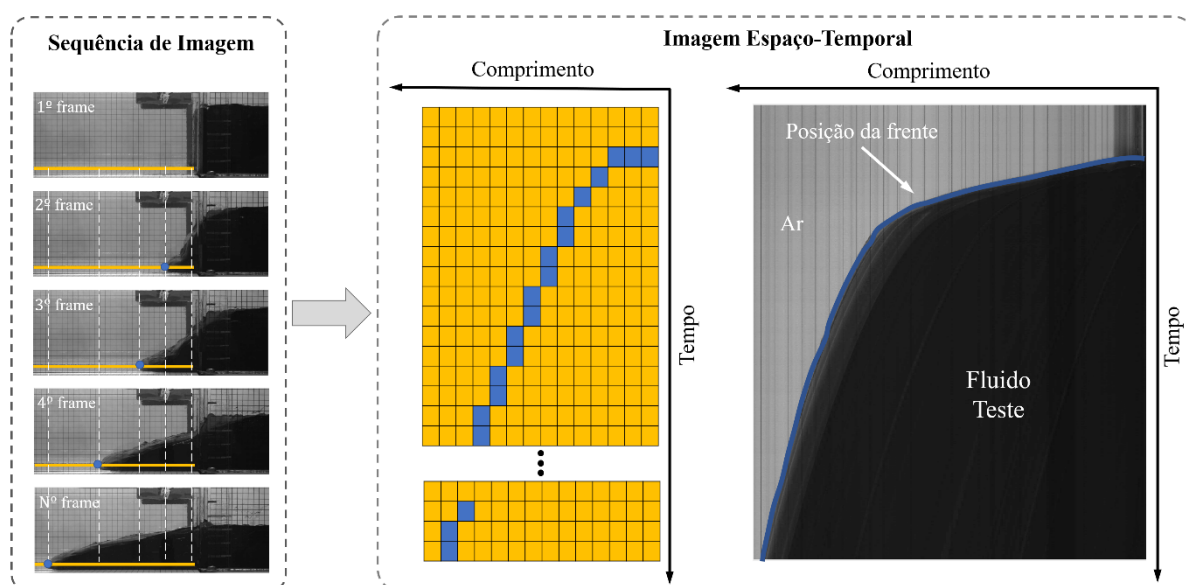
realizada. Adesivos com malha de referência foram instalados sobre o plano inclinado, parede do canal e parede do reservatório (especificamente nesse último caso a presença de referência na parede foi importante para a estimativa da vazão, via análise de imagem, após a abertura da comporta).

4.3.4.2 Medição de evolução das frentes viscoplásticas: imagem STI

A medição do alcance e velocidade das frentes escoamentos advindos de *dam-break* é comumente realizada a partir de rastreamento da fronteira do escoamento (rastrea-se a frente do escoamento) pixel a pixel, ou ainda com uso de PIV para avaliar o comportamento interno do escoamento em um ponto específico do plano/canal inclinado.

Inicialmente foi definido o uso do *software Tracker* como ferramenta de rastreo da evolução das frentes viscoplásticas produzidas, entretanto análises preliminares demonstraram dificuldades nas avaliações em tempos iniciais do escoamento (oscilações dos parâmetros rastreados), bem como elevado tempo para avaliação de completa do escoamento (entre 150 e 230 segundos).

Figura 4.12 - Método de velocimetria a partir da imagem STI adaptado e implantado para avaliar a velocidade da frente viscoplástica resultante da ruptura de barragem. A imagem STI apresentada contém a informação espaço-temporal da frente ao longo da linha amarela e na altura da posição da linha amarela. Experimento C1-CI-4.



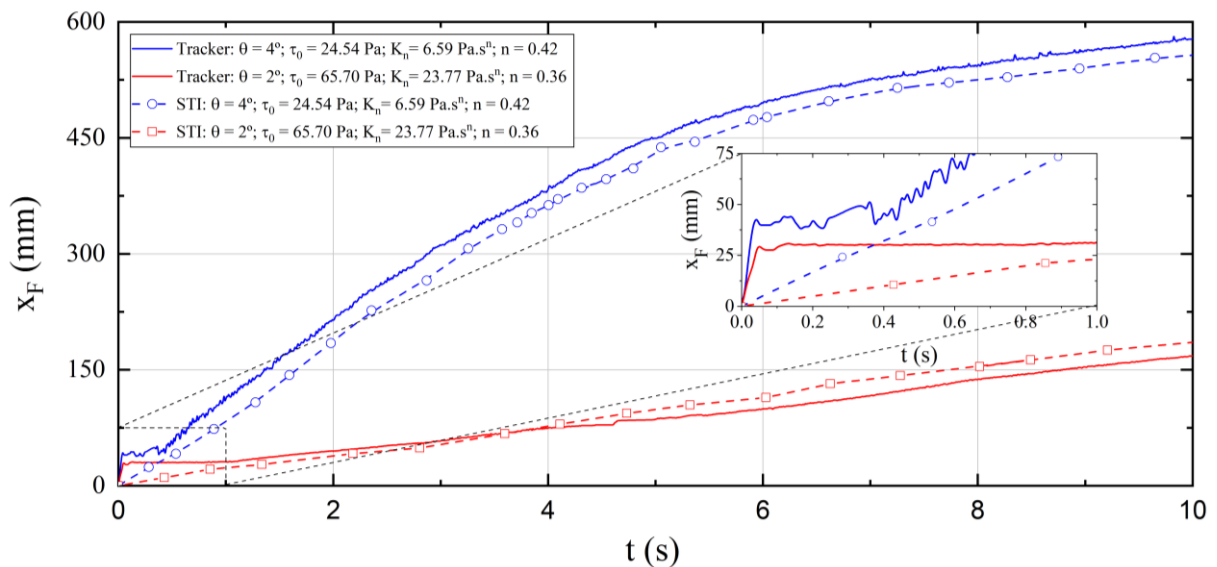
Fonte: próprio autor.

Tendo como premissa a necessidade de empregar um mecanismo de maior resolução para analisar as curvas de alcance, optou-se por empregar o método de velocimetria apresentado

no Capítulo 3 deste projeto (técnica *STIV* agora a serviço do registro espaço-temporal de frentes viscoplásticas). Nesse sentido, já há relato na literatura de emprego da técnica *STIV* na avaliação de velocidade de frentes não newtonianas evoluindo sobre plano inclinado (KIM et al., 2022).

A obtenção das imagens *STI* requer, inicialmente, a definição, ao longo do plano inclinado e canal inclinado, dos trechos longitudinais em que será avaliada o alcance da frente e a altura de interesse (essas devem estar dentro da faixa de altura da frente viscoplástica – nesta pesquisa definiu-se a altura na posição do fundo do canal como de interesse, ou seja, todos os alcances avaliados neste trabalho consideram a evolução da frente viscoplástica no contato a superfície do canal); isso possibilita a geração de uma imagem *STI* (*Space Time-Image*) que fornece registro do deslocamento da frente ao longo do tempo e espaço com elevada precisão em diferentes alturas da frente. A Figura 4.12 ilustra a aplicação do método de velocimetria à situação de ruptura de barragem, a partir da análise da imagem *STI* (obtida em código próprio desenvolvido em Matlab) via *software* ImageJ, foi possível identificar as posições ocupadas pela frente ao longo da evolução do tempo. Como resultado da análise *STI*, obteve-se informação de x_F versus t , sendo x_F o alcance da frente ao longo do tempo.

Figura 4.13 - Comparação de curvas de alcance obtidas a partir do *software Tracker* e pela imagem espaço-temporal (*STI*). θ indica a inclinação do canal.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.13 compara os resultados de curvas de alcance obtidas a partir do *software Tracker* e metodologia *STI*. A partir do emprego as imagens *STI* como ferramenta de análise

de rastreamento, verificou-se elevada precisão no acompanhamento da frente viscoplástica, em especial logo após a abertura da comporta. Esse mecanismo de análise torna possível a exploração das frentes viscoplásticas nos tempos iniciais do escoamento (informações em faixa inferior a 1 s) e em diferentes alturas, essa última análise de elevado potencial para o entendimento dos efeitos das propriedades reológicas e demais características do experimento sobre níveis de velocidade ao longo da altura da frente.

4.3.5 Visão geral dos experimentos de *dam-break*

Para a realização dos experimentos de *dam-break* foram utilizados diferentes materiais e equipamentos, conforme apresentado nas Subseções 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3 e 4.3.4. Os experimentos foram conduzidos segundo diferentes configurações do aparato - plano inclinado e canal inclinado, com diferentes inclinações (θ variando entre 0, 2, 4 e 6°), diferentes velocidades de abertura da comporta (máxima e mínima) e comporta de movimento ascendente e descendente (no caso de comporta de movimento descendente em canal inclinado foram definidos diferentes níveis de descida, com comporta descendo até o fundo em um só movimento e segundo 2, 3 e 5 estágios, com períodos de repouso variável de 10 s a 20 s).

A Tabela 4.2 e Tabela 4.3 reúnem as informações características de todas as configurações de experimentos testados, definindo: configuração do aparato (canal inclinado - CI ou plano inclinado - PI); velocidade de abertura da comporta; tipo de abertura (instantânea - comporta sobe ou gradual - comporta desce), estágio de abertura; inclinação empregada; e o fluido-teste avaliado. Os resultados dispostos na Seção 4.4 devem ser avaliados tendo como referência as configurações experimentais relatadas na Tabela 4.2 e Tabela 4.3.

O início do experimento ocorreu após a definição da inclinação de trabalho, posicionamento das câmeras (lateral e superior), enquadramento da região a ser capturada e captura da malha de referência (Figura 4.15.a) para posterior calibração. Estando a configuração experimental montada (Figura 4.14 - movimentação imposta para a comporta durante os experimentos.), o reservatório foi preenchido com o fluido teste (volume fixado em 15 L, para todos os experimentos realizados) e houve o acionamento da abertura da comporta e início da captura de imagens (Figura 4.15.b).

Tabela 4.2 - Configurações experimentais analisadas para escoamento *dam-break* de géis de carbopol C_{0,17} e C_{0,25}. Para esses experimentos foram avaliados escoamento a partir de comporta de movimento descendente (abertura gradual).

Ensaio	Fluido-teste	Configuração aparato	Inclinação (°)	Velocidade comporta (mm/s)	Posição da comporta (estágio de abertura) (mm)*
C1-CI-4	C-17	Canal inclinado	4	9,10	125 - 0
C2-CI-4	C-17	Canal inclinado	4	9,10	125 - 75 - 25 - 0
C3-CI-4	C-17	Canal inclinado	4	9,10	125 - 62,5 - 0
C4-CI-4	C-17	Canal inclinado	4	9,10	125 - 100 - 75 - 50 - 25 - 0
C5-CI-4	C-17	Canal inclinado	4	4,70	125 - 0
C6-CI-4	C-17	Canal inclinado	4	4,70	125 - 75 - 25 - 0
C7-CI-4	C-17	Canal inclinado	4	4,70	125 - 62,5 - 0
C8-CI-4	C-17	Canal inclinado	4	4,70	125 - 100 - 75 - 50 - 25 - 0
C9-PI-4	C-17	Plano inclinado	4	9,10	125 - 0
C10-PI-4	C-17	Plano inclinado	4	9,10	125 - 75 - 25 - 0
C11-PI-4	C-17	Plano inclinado	4	9,10	125 - 62,5 - 0
C12-PI-4	C-17	Plano inclinado	4	9,10	125 - 100 - 75 - 50 - 25 - 0
C13-PI-4	C-17	Plano inclinado	4	4,70	125 - 0
C14-PI-4	C-17	Plano inclinado	4	4,70	125 - 75 - 25 - 0
C15-PI-4	C-17	Plano inclinado	4	4,70	125 - 62,5 - 0
C16-PI-4	C-17	Plano inclinado	4	4,70	125 - 100 - 75 - 50 - 25 - 0
C17-CI-4	C-25	Canal inclinado	4	9,10	125 - 0
C18-CI-4	C-25	Canal inclinado	4	9,10	125 - 75 - 25 - 0
C19-CI-4	C-25	Canal inclinado	4	9,10	125 - 62,5 - 0
C20-CI-4	C-25	Canal inclinado	4	9,10	125 - 100 - 75 - 50 - 25 - 0
C21-CI-4	C-25	Canal inclinado	4	4,70	125 - 0
C22-CI-4	C-25	Canal inclinado	4	4,70	125 - 75 - 25 - 0
C23-CI-4	C-25	Canal inclinado	4	4,70	125 - 62,5 - 0
C24-CI-4	C-25	Canal inclinado	4	4,70	125 - 100 - 75 - 50 - 25 - 0
C25-PI-4	C-25	Canal inclinado	4	9,10	125 - 0
C26-PI-4	C-25	Plano inclinado	4	9,10	125 - 75 - 25 - 0
C27-PI-4	C-25	Plano inclinado	4	9,10	125 - 62,5 - 0
C28-PI-4	C-25	Plano inclinado	4	9,10	125 - 100 - 75 - 50 - 25 - 0
C29-PI-4	C-25	Plano inclinado	4	4,70	125 - 0
C30-PI-4	C-25	Plano inclinado	4	4,70	125 - 75 - 25 - 0
C31-PI-4	C-25	Plano inclinado	4	4,70	125 - 62,5 - 0
C32-PI-4	C-25	Plano inclinado	4	4,70	125 - 100 - 75 - 50 - 25 - 0

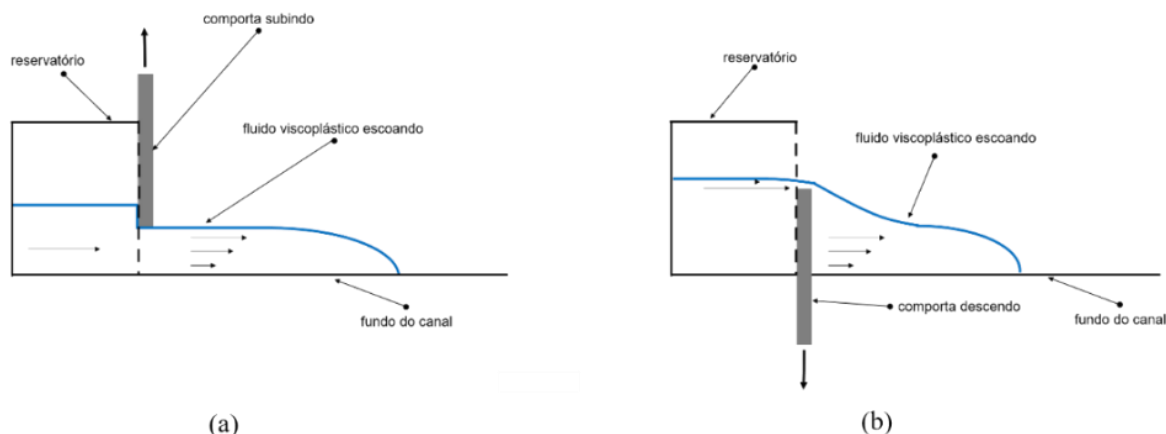
* As alturas definidas para os estágios de abertura foram fixadas considerando a posição horizontal do canal, de forma que os dados apresentados foram aproximados às condições de horizontalidade pela proximidade com tal situação (baixa inclinação $\theta = 4^\circ$). O nível máximo de fluido foi fixado em $H = 125 \text{ mm}$, de forma que a comporta se desloca para baixo até atingir $H = 0 \text{ mm}$, podendo parar em outras posições segundo um tempo de parada de 20 s.

Tabela 4.3 - Configurações experimentais analisadas para escoamento dam-break de lamas caulínicas de suspensão água-argila (L_AA_28 e L_AA_31) e de suspensão água-argila-areia industrial (L_AAA_28_0.5A e L_AAA_28_0.25A). Para esses experimentos foram avaliados escoamentos a partir de comporta ascendente (abertura instantânea) e descendente (abertura gradual), apenas para canal inclinado.

Ensaio	Fluido-teste	Configuração aparato	Inclinação (°)	Velocidade comporta (mm/s)	Posição da comporta (estágio de abertura) (mm)
L1-0	L_AA_28	Canal inclinado	0	9,10	125 - 0
L2-0	L_AA_28	Canal inclinado	0	9,10	125 - 62,5 - 0
L3-0	L_AA_28	Canal inclinado	0	9,10	125 - 100 - 75 - 50 - 25 - 0
L4-0	L_AA_28	Canal inclinado	0	9,10	Movimento ascendente
L5-1	L_AA_28	Canal inclinado	1	9,10	125 - 0
L6-1	L_AA_28	Canal inclinado	1	9,10	125 - 62,5 - 0
L7-1	L_AA_28	Canal inclinado	1	9,10	125 - 100 - 75 - 50 - 25 - 0
L8-1	L_AA_28	Canal inclinado	1	9,10	Movimento ascendente
L9-2	L_AA_28	Canal inclinado	2	9,10	125 - 0
L10-2	L_AA_28	Canal inclinado	2	9,10	125 - 62,5 - 0
L11-2	L_AA_28	Canal inclinado	2	9,10	125 - 100 - 75 - 50 - 25 - 0
L12-2	L_AA_28	Canal inclinado	2	9,10	Movimento ascendente
L13-4	L_AA_31	Canal inclinado	0	9,10	125 - 0
L14-4	L_AA_31	Canal inclinado	0	9,10	125 - 62,5 - 0
L15-4	L_AA_31	Canal inclinado	0	9,10	125 - 100 - 75 - 50 - 25 - 0
L16-4	L_AA_31	Canal inclinado	0	9,10	Movimento ascendente
L17-6	L_AA_31	Canal inclinado	1	9,10	125 - 0
L18-6	L_AA_31	Canal inclinado	1	9,10	125 - 62,5 - 0
L19-6	L_AA_31	Canal inclinado	1	9,10	125 - 100 - 75 - 50 - 25 - 0
L20-6	L_AA_31	Canal inclinado	1	9,10	Movimento ascendente
L21-0	L_AAA_28_0.5A	Canal inclinado	0	9,10	125 - 0
L22-0	L_AAA_28_0.5A	Canal inclinado	0	9,10	125 - 62,5 - 0
L23-0	L_AAA_28_0.5A	Canal inclinado	0	9,10	Movimento ascendente
L24-4	L_AAA_28_0.5A	Canal inclinado	4	9,10	125 - 0
L25-4	L_AAA_28_0.5A	Canal inclinado	4	9,10	125 - 62,5 - 0
L26-4	L_AAA_28_0.5A	Canal inclinado	4	9,10	Movimento ascendente
L27-6	L_AAA_28_0.5A	Canal inclinado	6	9,10	125 - 0
L28-6	L_AAA_28_0.5A	Canal inclinado	6	9,10	125 - 62,5 - 0
L29-6	L_AAA_28_0.5A	Canal inclinado	6	9,10	Movimento ascendente
L30-0	L_AAA_28_0.25A	Canal inclinado	0	9,10	125 - 0
L31-0	L_AAA_28_0.25A	Canal inclinado	0	9,10	125 - 62,5 - 0
L32-0	L_AAA_28_0.25A	Canal inclinado	0	9,10	Movimento ascendente
L33-4	L_AAA_28_0.25A	Canal inclinado	4	9,10	125 - 0
L34-4	L_AAA_28_0.25A	Canal inclinado	4	9,10	125 - 62,5 - 0
L35-4	L_AAA_28_0.25A	Canal inclinado	4	9,10	Movimento ascendente
L36-6	L_AAA_28_0.25A	Canal inclinado	6	9,10	125 - 0
L37-6	L_AAA_28_0.25A	Canal inclinado	6	9,10	125 - 62,5 - 0
L38-6	L_AAA_28_0.25A	Canal inclinado	6	9,10	Movimento ascendente

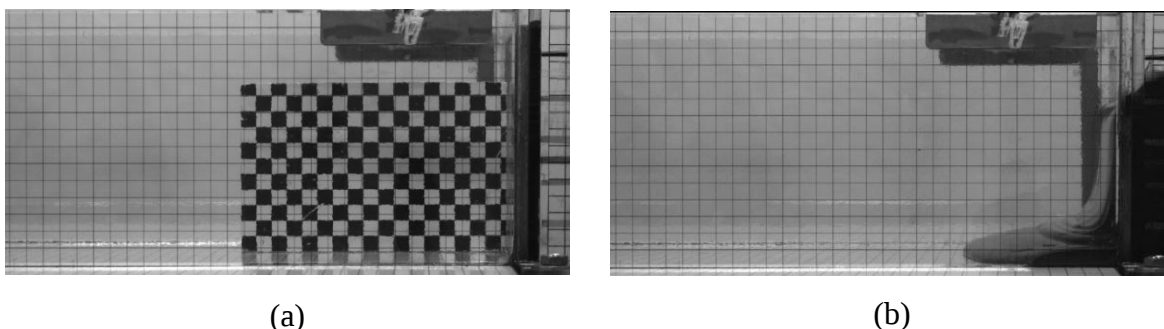
* As alturas definidas para os estágios de abertura foram fixadas considerando a posição horizontal do canal, de forma que os dados apresentados foram aproximados às condições de horizontalidade pela proximidade com tal situação. O nível máximo de fluido foi fixado em $H = 125 \text{ mm}$, de forma que a comporta se desloca para baixo até atingir $H = 0 \text{ mm}$, podendo parar em outras posições segundo um tempo de parada de 10 s (lama L_AA_28 e L_AA_31) ou 20 s (lama L_AAA_28_0.5A e L_AAA_28_0.25A).

Figura 4.14 - Representação do comportamento de movimentação da comporta avaliados neste projeto: (a) abertura instantânea e (b) abertura gradual.



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.15 - Momentos característicos dos experimentos de *dam-break*: (a) posicionamento da malha de referência no centro do aparato, em contato com a comporta e (b) frente viscoplástica avançando sobre canal inclinado (Experimento C2-CI-4 - de abertura gradual (comporta de movimento descendente e 2 estágios de abertura).



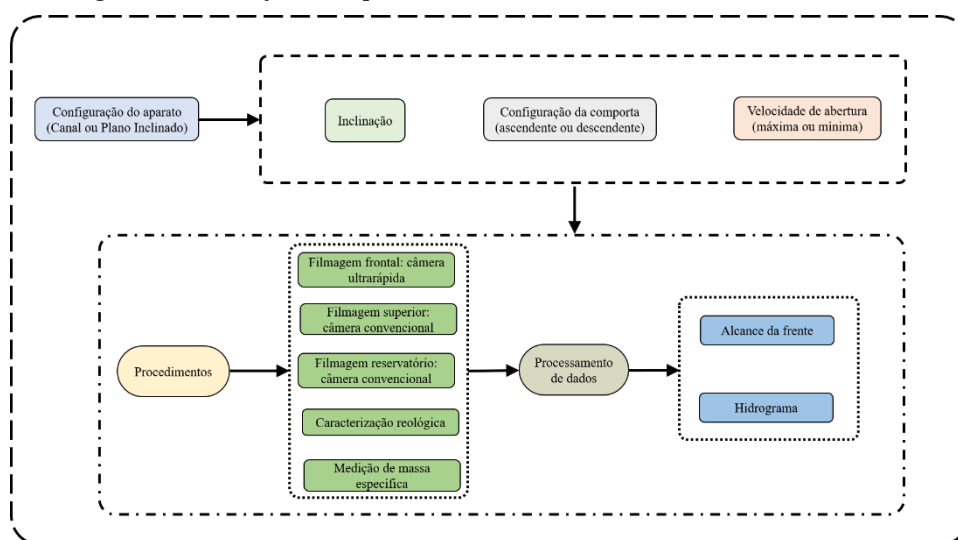
Fonte: Próprio autor.

As situações de abertura foram do tipo gradual para os géis de carbopol (descida da comporta de forma descontínua até o fundo do canal) e do tipo gradual e instantânea (comporta de movimento ascendente) para as lammas. De forma geral, os experimentos de *dam-break* foram conduzidos segundo a padronização da altura de fluido H no reservatório (volume represado fixado em todos os experimentos), com comportamento de alcance determinado para cinco situações de movimentação da comporta: movimento ascendente - comporta é elevada (dita abertura instantânea); 125 - 0 mm - comporta se desloca de $H = 125$ mm até o fundo do canal; 125 - 62,5 mm - comporta se desloca segundo 2 (dois) estágios, de $H = 125$ mm até $H = 62,5$ mm, fica em repouso por 10 s ou 20 s, de acordo com o experimento, retoma o movimento de 62,5 mm até a base do canal; 125 - 75 - 25 - 0 mm - 4 (quatro) estágios de abertura, de $H = 125$ mm até $H = 75$ mm, repouso da comporta por 20 s, retoma o movimento de 75 mm até 25 mm,

fica mais 20 s em repouso, volta a se deslocar, saindo de 75 mm e parando em 25 mm, ficando parada por 20 s, e finalmente se desloca de 25 mm até o fundo do canal; 125 - 100 - 75 - 50 - 25 - 0 mm – 5 (cinco) estágios de abertura, de $H = 125$ mm até $H = 100$ mm, repouso da comporta por 10 s ou 20 s, retomada da descida de 100 mm até 75 mm, nova parada da comporta por 10 s ou 20 s, retomada do deslocamento, saindo de 75 mm e parando em 50 mm, novamente imposição de parada por 10 s ou 20 s, deslocamento de 50 mm a 25 mm, nova parada de 10 s ou 20 s, e finalmente deslocamento de 25 mm até o fundo do canal. Todas as configurações de abertura de comporta foram impostas a fim de verificar o comportamento de alcance das frentes viscoplásticas.

Posteriormente à ocorrência do escoamento e captura dos dados, a amostra deformada foi usada para a caracterização reológica e de massa específica. A caracterização reológica e obtenção de massa específica foi realizada segundo 3 repetições. A Figura 4.16 ilustra o fluxograma da realização do experimento.

Figura 4.16 - Fluxograma de execução do experimento de *dam-break*.



Fonte: Próprio autor.

A câmera colocada frontalmente ao reservatório realizou o monitoramento do nível de fluido ao longo do experimento. A análise das imagens do reservatório foi realizada a fim de obter os hidrogramas unitários associados aos diferentes cenários de abertura de comporta e configuração de canal inclinado. As avaliações de hidrograma unitário por análise de imagem foi possível apenas para escoamentos com géis de carbopol; em função do efeito de aderência da lama na lateral do reservatório, não foi possível verificar o contorno desse fluido ao longo

do tempo no reservatório. A Figura 4.17 ilustra a avaliação conduzida a partir das imagens do reservatório no caso dos géis de carbopol.

Figura 4.17 - Evolução do nível de fluido no interior do reservatório: possibilidade de avaliação de hidrogramas unitários das rupturas.



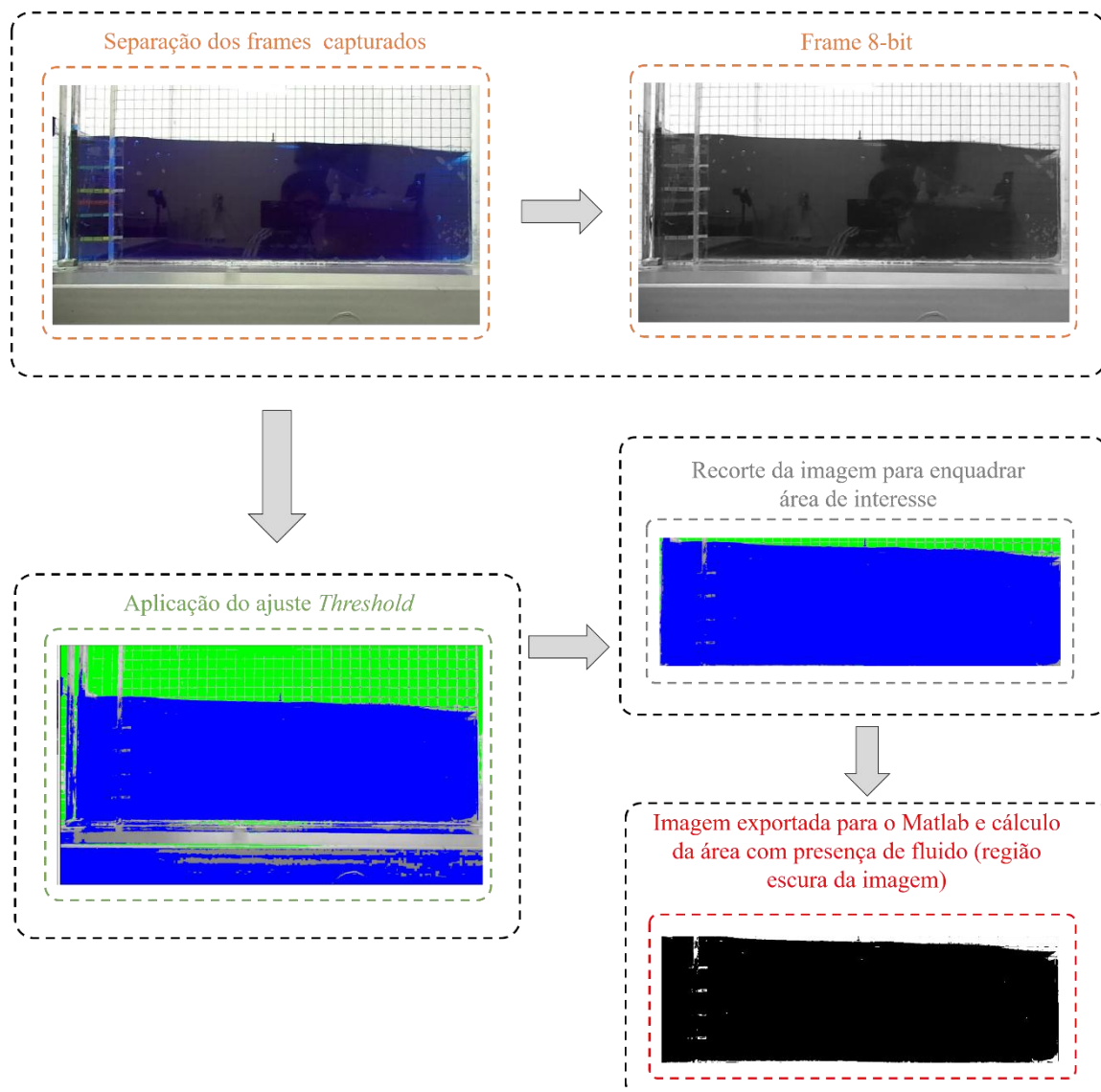
Fonte: Próprio autor.

As capturas do reservatório foram realizadas a partir de uma câmera de 30 fps de amostragem, de forma que para análise de fluxo de volume a partir dessas capturas foi necessário a aquisição das imagens *frame a frame*, o seu tratamento para definição do contorno do fluido, em contato com a lateral, na superfície livre do reservatório foi realizado a partir do *software* ImageJ. Obtido o contorno das imagens no reservatório, foi empregado um código desenvolvido em Matlab para o cálculo de área preenchida por fluido de cada uma das imagens e seus referidos tempos. Calculou-se o produto $\text{área} \times \text{largura do reservatório}$, obtendo-se o hidrograma da ruptura. Basicamente, o procedimento consistiu nas seguintes etapas:

- 1 - Importar, no ImageJ, o conjunto de imagens do reservatório representativos de seu esvaziamento;
- 2 – Tornar a imagem formato 8-bit e executar o ajuste *Threshold* a fim de distinguir a área do reservatório com fluido e vazia;
- 3 - Cortar, no ImageJ, a imagem, de forma possibilitar a visualização apenas da região contendo o fluido;
- 4 - Exportar as imagens processadas;
- 5 - Executar o código, de cálculo de área, desenvolvido em Matlab (Apêndice C) importando as imagens processadas no ImageJ;

6 - Calcular os volumes, a partir das áreas fornecidas no Matlab, para seus respectivos tempos e obter o hidrograma.

Figura 4.18 - Fluxograma retratando a obtenção dos hidrogramas de ruptura.



Fonte: Próprio autor.

A execução da rotina de análise de imagens para possibilitar a obtenção de hidrogramas unitários foi realizada a partir de automatização de tarefas no ImageJ (Importar imagens, obter contornos, recortar a área de interesse e exportar). No Matlab, o código desenvolvido permitiu a geração de um arquivo .txt contendo as informações de volume e tempo para a definição do comportamento do hidrograma unitário. A Figura 4.18 apresenta um fluxograma das etapas de tratamento de imagem para obtenção dos hidrogramas.

As incertezas das medidas obtidas foram calculadas a partir da incerteza padrão combinada, conforme Subseção 3.3.5 do Capítulo 3. Como mecanismo de definir incertezas representativas dos experimentos segundo sua replicabilidade, um experimento de *dam-break* foi executado por 3 vezes, de forma a ter parâmetros de incerteza em termos de alcance e profundidade. A precisão do reômetro, balança, malha de referência e temporizador foi definida, respectivamente, em 3,00%, 0,10%, 0,29% e 0,20 %. Como resultado, foram obtidas as incertezas de 1,53% para a profundidade h , 2,20% para a massa específica ρ , 2,61% para o alcance x_F , 4,60% para a tensão limite de escoamento τ_0 , 11,20% para o índice de consistência K_n e 4,20% para o índice de escoamento n .

4.3.6 Análise dimensional

A fim de possibilitar uma interpretação física do comportamento de escoamento envolvido nas situações de *dam-break* avaliadas, uma análise dimensional foi desenvolvida. Como parâmetros envolvidos em situações de *dam-break* foram considerados: medida do alcance do escoamento (x_F), altura de fluido no reservatório (H), altura de fluido na saída do reservatório finalizado o escoamento (h_0), comprimento da barragem (l), massa específica do fluido (ρ), viscosidade aparente (μ_{ap}), índice de consistência (K_n), tensão limite de escoamento (τ_0), velocidade da frente (V_F) e a aceleração da gravidade (g).

Então, o funcional de alcance pode ser visto conforme Equação 4.1:

$$x_F = f(H, h_0, l, \rho, \mu_{ap}, K_n, \tau_0, V_F, g) \quad (4.1)$$

O desenvolvimento da análise dimensional permitiu a obtenção de 7 adimensionais (π_n):

$$\pi_1 = \frac{h_0}{x_F} \quad (4.2)$$

$$\pi_2 = \frac{h_0}{l} \quad (4.3)$$

$$\pi_3 = \frac{h_0}{H} \quad (4.4)$$

$$\pi_4 = \frac{\rho V_F h_0}{\mu_{ap.}} \quad (4.5)$$

$$\pi_5 = \frac{V_F^2}{g h_0} \quad (4.6)$$

$$\pi_6 = \frac{\rho V_F^2}{\tau_0} \quad (4.7)$$

$$\pi_7 = \frac{\rho V_F^{2-n} h_0^n}{K_n} \quad (4.8)$$

Ainda foi possível obter um outro adimensional de interesse, para isso realizou as seguintes manipulações entre adimensionais:

$$\begin{aligned} \pi_8 &= \pi_7 \times \frac{1}{\pi_6} = \frac{\rho V_F^{2-n} h_0^n}{K_n} \times \frac{\tau_0}{\rho V_F^2} \\ \pi_8 &= \frac{\tau_0}{K_n \left(\frac{V_F}{h_0} \right)^n} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Com base nos adimensionais obtidos pode-se afirmar que os alcances em problemas *dam-break* podem ser interpretados fisicamente a partir de um funcional que inclui um adimensional de escala linear, o número de Reynolds, o número de Froude, Inércia e Bingham generalizado (será dito posteriormente número de Herschel-Bulkley – HB):

$$\frac{h_0}{x_F} = f \left(\frac{h_0}{l}, \frac{h_0}{H}, \frac{\rho V_F^{2-n} h_0^n}{K_n}, \frac{V_F^2}{g h_0}, \frac{\rho V_F^2}{\tau_0}, \frac{\tau_0}{K_n \left(\frac{V_F}{h_0} \right)^n} \right) = f \left(\frac{h_0}{l}, \frac{h_0}{H}, \text{Re}, \text{Fr}^2, \hat{I}, \text{HB} \right) \quad (4.10)$$

Considerando os adimensionais característicos do problema de *dam break*, verificados segundo análise dimensional, e que serão úteis na avaliação dos efeitos dominantes sobre a dinâmica do escoamento - contribuição viscosa, plástica e de inércia, definiu-se a formulação

do número Herschel-Bulkley com base nos três parâmetros associados ao modelo reológico de Herschel-Bulkley (tensão limite de escoamento - τ_0 , índice de consistência - K_n e índice de escoamento - n).

A relação de adimensionais envolvendo as propriedades reológicas e as características da dinâmica do escoamento contribui para estudos empíricos, principalmente aqueles desenvolvidos na área da mineração e rejeitos, estabelecendo a necessidade de considerar, além dos efeitos de reologia, os efeitos de inércia advindos da liberação do material.

Na Seção 4.4 algumas avaliações empregando adimensionais característicos do problema *dam-break* foram realizadas, com destaque para a inércia e seus efeitos associados ao comportamento de alcance e característica de abertura da comporta.

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico os resultados experimentais são analisados e discutidos. Diferentes subseções são apresentadas a fim de possibilitar análises específicas em termos de alcance, hidrogramas unitários, efeitos de velocidade de abertura de comporta e da forma de abertura (instantânea e gradual).

Na Subseção 4.4.1 são apresentados os resultados de alcance dos experimentos de *dam-break* conduzidos com géis de carbopol, sendo confrontados os comportamentos de alcance para as diferentes velocidades de abertura da comporta, bem como para a situação de canal e plano inclinado. Ainda são apresentados nessa Subseção os resultados globais em termos de caracterização reológica, parâmetros físicos e características medidas durante o escoamento.

A Subseção 4.4.2 compara hidrogramas unitários dos experimentos de *dam-break* de géis de carbopol, verificando a relação entre os alcances e os hidrogramas unitários das rupturas.

Na Subseção 4.4.3 são apresentados e discutidos os resultados globais dos experimentos de *dam-break* realizados com lama. Ainda são apresentadas as curvas de alcance para os diferentes cenários experimentais avaliados.

Por fim, a Subseção 4.4.4 analisa e discute, a partir de adimensionais característicos de problema *dam-break*, os efeitos plásticos, viscosos e de inércia atuantes a fim de melhor entender o comportamento de escoamentos viscoplásticos em regime transiente.

4.4.1 Experimentos de *dam-break*: géis de carbopol

Os experimentos de *dam-break* conduzidos com géis de carbopol foram realizados segundo única inclinação de canal e plano inclinado, verificando o comportamento de alcances produzidos segundo diferentes velocidades de abertura de comporta e diferentes estágios de abertura. A Tabela 4.4 apresenta um resumo em termos de resultados de alcances, massas específicas e caracterização reológica dos géis de carbopol.

Tabela 4.4 - Resultados experimentais de experimentos de *dam-break* realizados com géis de carbopol. Consultar a Tabela 4.2 para verificação das configurações experimentais empregadas.

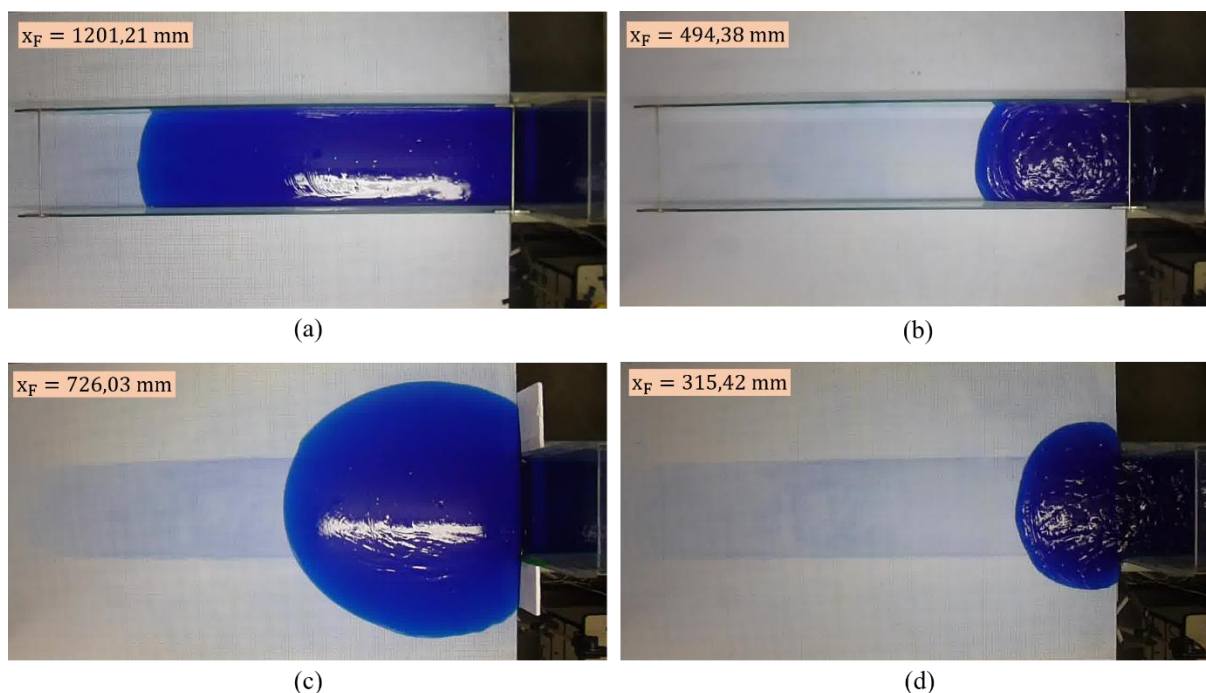
Ensaio	x_F (mm)	τ_0 (Pa)	K_n (Pa.s ⁿ)	n	ρ
C1-CI-4	1246,89	28,66	6,33	0,45	1010,72
C2-CI-4	1210,19	30,09	5,80	0,46	1010,86
C3-CI-4	1201,21	27,91	7,42	0,42	1008,53
C4-CI-4	1242,09	27,13	7,86	0,42	1009,58
C5-CI-4	1210,05	26,57	7,96	0,41	1010,10
C6-CI-4	1294,88	29,67	6,59	0,45	1011,30
C7-CI-4	1263,21	27,58	7,77	0,42	1008,71
C8-CI-4	1271,30	29,24	7,00	0,44	1010,85
C9-PI-4	726,03	28,05	4,75	0,48	1009,45
C10-PI-4	734,68	27,52	4,88	0,49	1010,05
C11-PI-4	726,03	27,04	5,91	0,45	1010,36
C12-PI-4	732,95	25,90	6,43	0,44	1009,67
C13-PI-4	740,74	25,17	5,73	0,45	1009,95
C14-PI-4	717,37	24,88	5,52	0,46	1009,72
C15-PI-4	730,35	25,16	5,47	0,46	1008,90
C16-PI-4	740,74	25,51	5,91	0,45	1010,95
C17-CI-4	484,32	66,26	25,01	0,36	1012,07
C18-CI-4	499,93	68,37	24,86	0,36	1013,24
C19-CI-4	494,38	68,28	24,94	0,36	1013,21
C20-CI-4	479,44	68,28	24,94	0,36	1014,36
C21-CI-4	482,40	74,76	20,65	0,39	1015,47
C22-CI-4	481,45	74,45	21,61	0,38	1015,14
C23-CI-4	475,05	70,04	24,27	0,37	1014,67
C24-CI-4	486,77	69,55	25,26	0,36	1013,67
C25-PI-4	295,70	68,50	21,93	0,37	1013,94
C26-PI-4	310,27	69,85	21,59	0,37	1012,24
C27-PI-4	309,42	70,24	21,35	0,37	1012,61
C28-PI-4	315,42	71,96	21,86	0,37	1013,90
C29-PI-4	322,27	65,88	23,80	0,36	1015,32
C30-PI-4	310,27	68,43	21,36	0,38	1015,04
C31-PI-4	305,99	74,46	18,14	0,41	1015,30
C32-PI-4	310,27	69,55	20,93	0,39	1013,38

Ao analisar os resultados da Tabela 4.4, os quais são uma representação em $t \rightarrow \infty$ dos experimentos, verifica-se claramente o efeito da reologia do fluido sobre os alcances – o aumento das propriedades reológicas constatadas entre os fluidos C_17 (experimentos de C1-CI-4 a C16-PI-4) e C_25 (experimentos de C17-CI-4 a C32-PI-4) atuou na redução dos alcances das frentes viscoplásticas, configurando-se como parâmetro de forte influência sobre o

comportamento de alcance; note que o aumento das propriedades reológicas implicou em redução do alcance em até 3 vezes, nesse sentido pode-se associar tal efeito à elevada alteração do índice de consistência (subiu da faixa de 7 Pa.sⁿ para cerca de 20 Pa.sⁿ) e de tensão limite de escoamento (de cerca de 25 Pa para 70 Pa).

Em termos de alcance, segundo a condição de experimento em canal e plano inclinado, ficou evidente o efeito de confinamento do escoamento sobre o alcance. Verifica-se na Tabela 4.4, bem como na Figura 4.20.a e Figura 4.21.a, que escoamentos conduzidos em canal inclinado têm característica de maior alcance quando comparados a escoamentos em plano inclinado. De fato, a condição de escoamento não confinado permite o espraioamento do material, o qual preenche maiores áreas, entretanto avança menores comprimentos quando comparado à situação de escoamento confinado (Figura 4.19).

Figura 4.19 - Alcance final da frente x_F no tempo final de análise para os experimentos: (a) C3-CI-4 (fluido-teste C_17), (b) C19-CI-4 (fluido-teste C_31), (c) C11-PI-4 (fluido-teste C_17) e (d) C28-PI-4 (fluido-teste C_31).



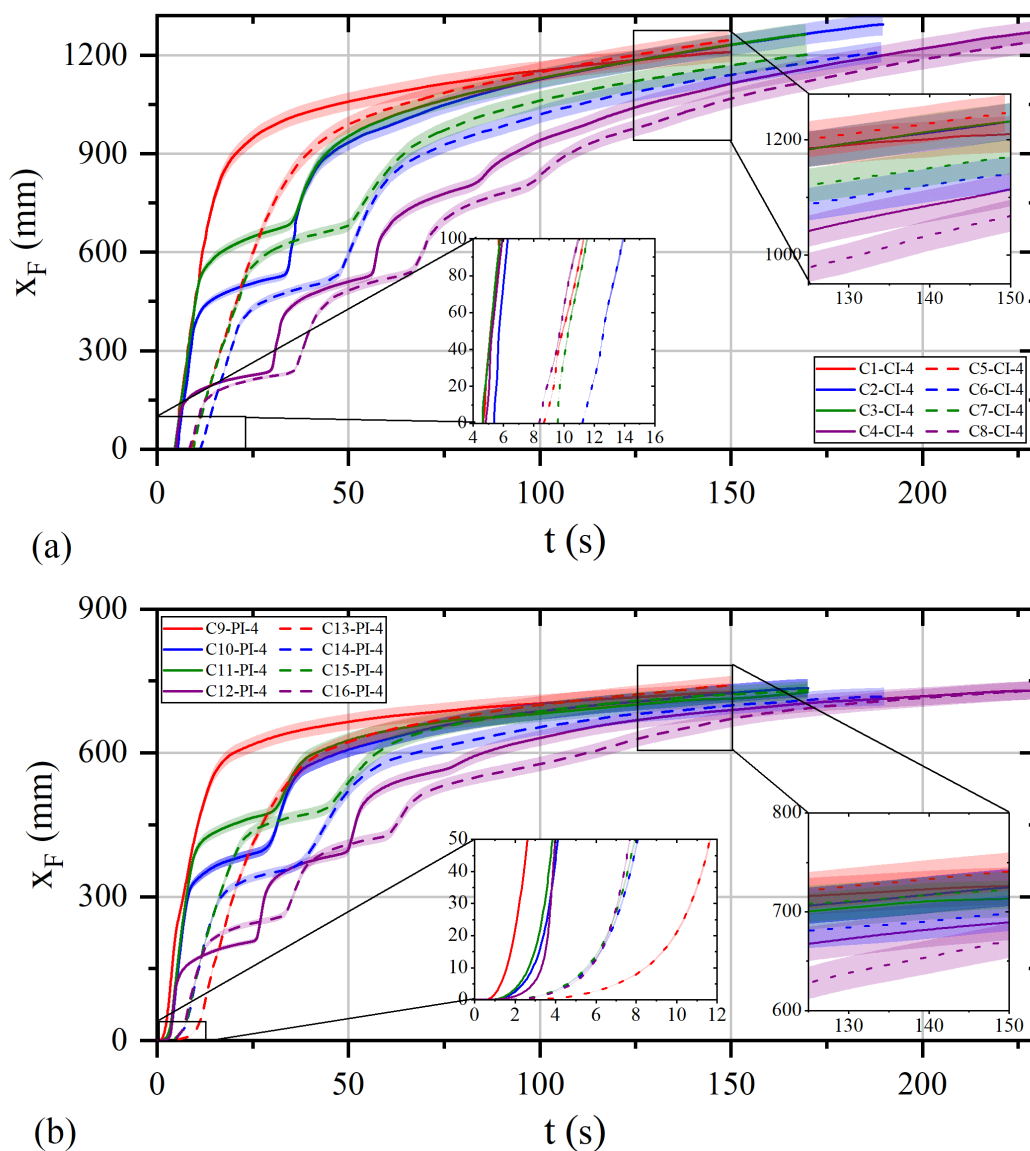
Fonte: Próprio autor.

A partir da análise de evolução temporal dos alcances de géis de carbopol, Figura 4.20 e Figura 4.21, fica mais claro a atuação dos efeitos de abertura da comporta, velocidade de abertura e condição de canal e plano inclinado.

A análise dos comportamentos de alcance verificados na Figura 4.21 deve ser verificada segundo as configurações experimentais empregadas. Primeiramente, considerando a

velocidade de abertura de comporta como elemento em análise (alcances representados pelas linhas pontilhadas das Figura 4.20 e Figura 4.21), verifica-se que seu efeito domina na fase de desenvolvimento inicial do escoamento, note que as curvas de alcance dos grupos de máxima e mínima velocidade apresentam inclinações distintas da curva inicial de alcance.

Figura 4.20 - Alcance da frente x_F ao longo do tempo t para a géis de carbopol C_0,17 segundo comporta de abertura gradual e diferentes velocidades de levantamento (linha inteira - velocidade máxima e linha pontilha - velocidade mínima) evoluindo em: (a) plano inclinado e (b) canal inclinado. Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.

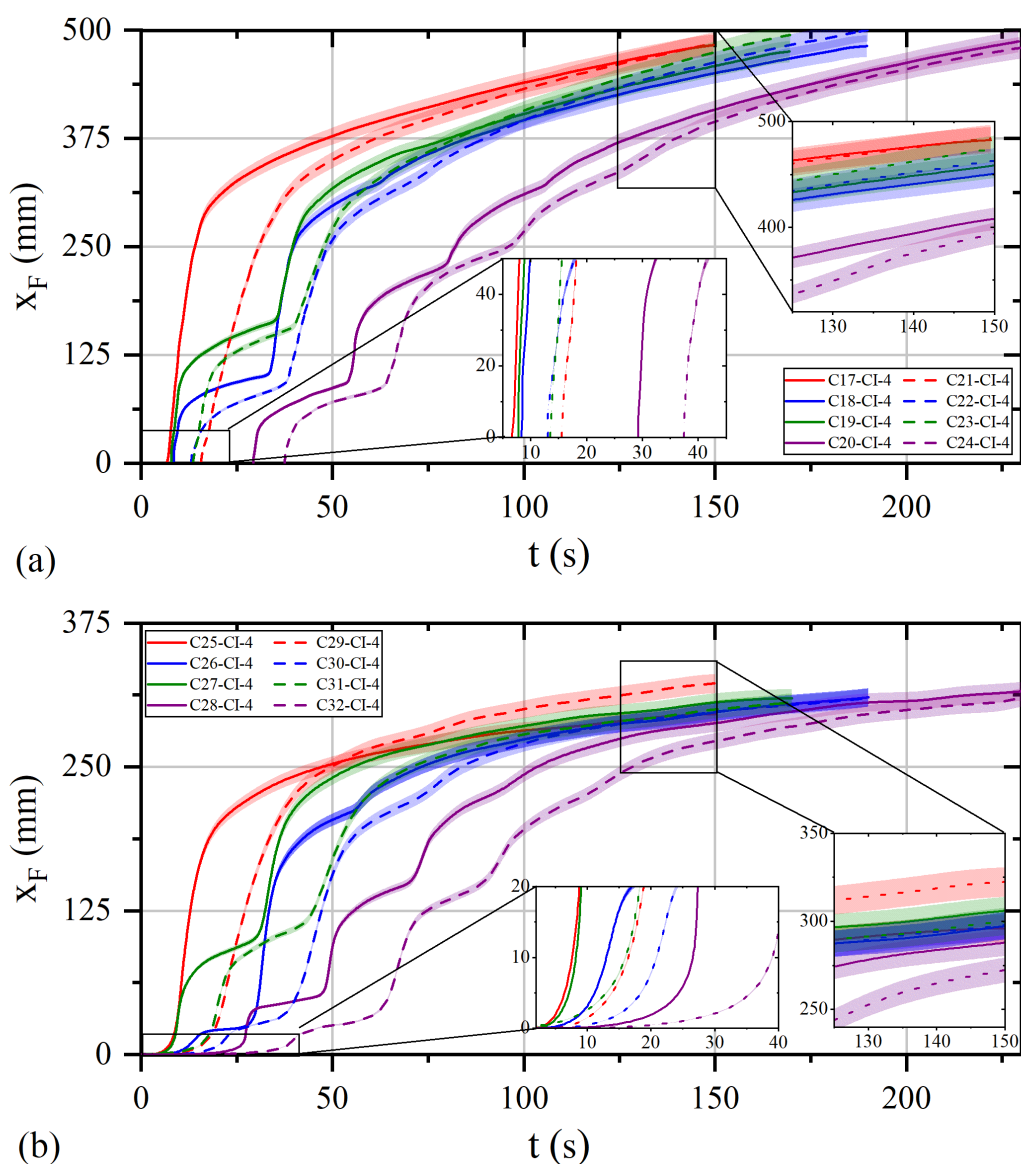


Fonte: Próprio autor.

Para o caso de velocidade máxima de abertura da comporta (linha inteira) a inclinação da curva é maior que aquela de velocidade de comporta mínima (linha pontilhada), indicando

que a velocidade da comporta tem efeito significativo sobre a fase transiente do escoamento *dam-break*. Tal constatação é feita tanto para escoamento em canal inclinado (Figura 4.20.a) quanto para escoamento em plano inclinado (Figura 4.20.b).

Figura 4.21 - Alcance da frente x_F ao longo do tempo t para a géis de carbopol C_0,25 segundo comporta de abertura gradual (presença de estágios de abertura – linhas vermelha, azul e roxa) e diferentes velocidades de levantamento para escoamento evoluindo em: (a) plano inclinado e (b) canal inclinado. Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.



Fonte: Próprio autor.

Ao avaliar o efeito de abertura da comporta confrontando os dois fluidos-testes em análise, nota-se que o fluido de menores propriedades reológicas (menor tensão limite de escoamento, índice de consistência e índice de escoamento) é aquele que apresenta maior

sensibilidade ao levantamento da comporta. O confronto da evolução temporal dos alcances, nos tempos iniciais, demonstra que as curvas de alcance, de diferentes velocidades, apresentam maior afastamento em termos de taxas de variação do alcance ao longo tempo para o fluido de concentração C_0.17, ou seja, nos tempos iniciais de alcance nota-se evolução espaço-temporal maior para frentes advindas de fluidos de menores propriedades reológicas e com maior velocidade de levantamento da comporta.

Dessa forma, pode-se confirmar o efeito de inércia atuando nos tempos iniciais do escoamento, entretanto, considerando o alcance final (x_F), nota-se que a velocidade de abertura não atuou como efeito dominante, sendo que as propriedades reológicas atenuaram efeitos inerciais inicialmente verificados nos primeiros instantes das curvas de alcance. Note a tendência das curvas de alcance, para qualquer configuração experimental, convergir para valores da mesma ordem de grandeza quando $t > 150$ s.

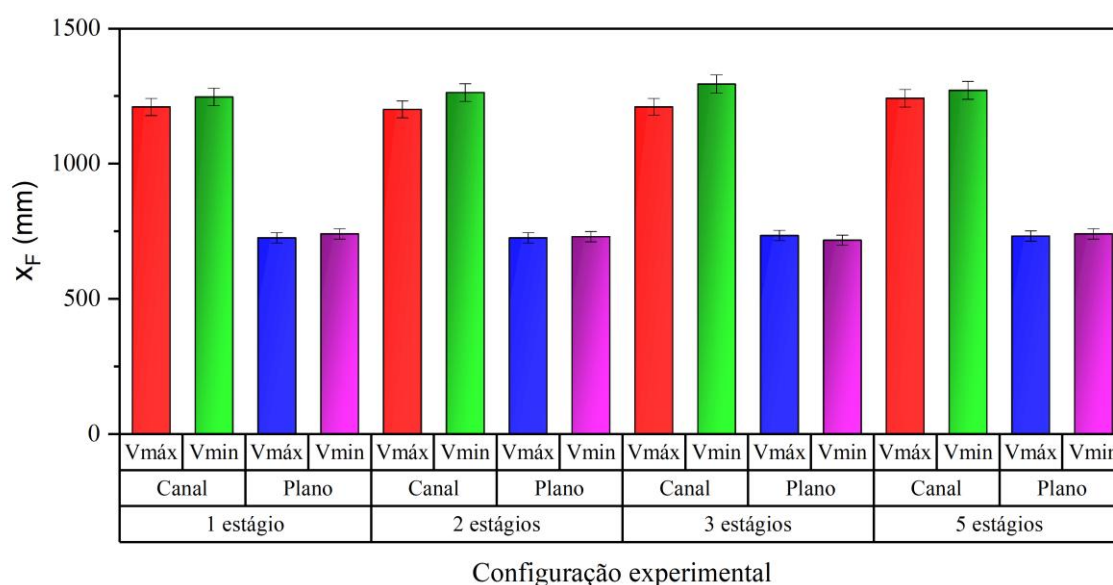
As constatações deste trabalho em termos do efeito da velocidade de abertura de comporta tem sido discutida nos últimos anos em diferentes problemas que envolvem liberação de material inicialmente confinado, nesse sentido pode-se citar trabalhos de Gao e Fourie (2015) na análise de escoamento a partir do *slump test*, bem como São (2021) em avaliações de efeitos de liberação de materiais em problemas envolvendo *slump test* e ruptura de barragem. Esses autores identificaram, assim como neste trabalho, atuação da velocidade de abertura da barreira sobre a evolução do escoamento nos tempos iniciais.

Em relação às configurações de liberação de material (presença de diferentes estágios de abertura), verifica-se a tendência do efeito sequencial de abertura em atenuar, ao longo do tempo, a evolução dos alcances. Nesse sentido, e comparando os experimentos de forma geral (diferentes velocidades de descida e fluidos-testes), identifica-se, à medida que mais estágios de abertura são empregados, que a evolução espaço-temporal das frentes viscoplásticas se torna mais lenta, tendo seu alcance final definido em tempos mais elevados. Por exemplo, comparando os experimentos C17-CI-4 e C20-CI-4 (Figura 4.21.a), em que avalia-se o mesmo fluido, segundo mesma inclinação de escoamento e mesma velocidade de abertura de comporta, diferindo apenas em termos de estágios de abertura (o primeiro experimento é de abertura única descendente, enquanto o segundo apresenta 5 estágios de abertura descendente), verifica-se que para atingir um alcance de aproximadamente 500 mm foram necessários cerca de 150 s no experimento C17-CI-4 e 230 s no experimento C20-CI-4.

Um comportamento interessante a ser discutido é quando se realiza o confronto das curvas de alcance, segundo diferentes estágios de abertura, considerando canal e plano inclinado. Nota-se que na condição de canal inclinado, para ambas as velocidades de abertura

de comporta e todos os estágios de liberação de material, os alcances, para tempos $t > 150$ s estão tendendo a uma mesma ordem de grandeza (verificar Figura 4.20.a e Figura 4.21.a), evidenciando que o alcance final, em caso de canal inclinado, é influenciado pelas propriedades reológicas, sendo que a configuração de liberação de material (gradual e sequencial) influencia diretamente as taxas de avanço da frente viscoplástica, não tendo forte efeito sobre a distância final percorrida. Esse efeito é semelhante ao verificado nos experimentos com diferentes velocidades de abertura da comporta.

Figura 4.22 - Alcance final da frente x_F para todas as configurações experimentais conduzidas com o gel de carbopol C_0,17. Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.

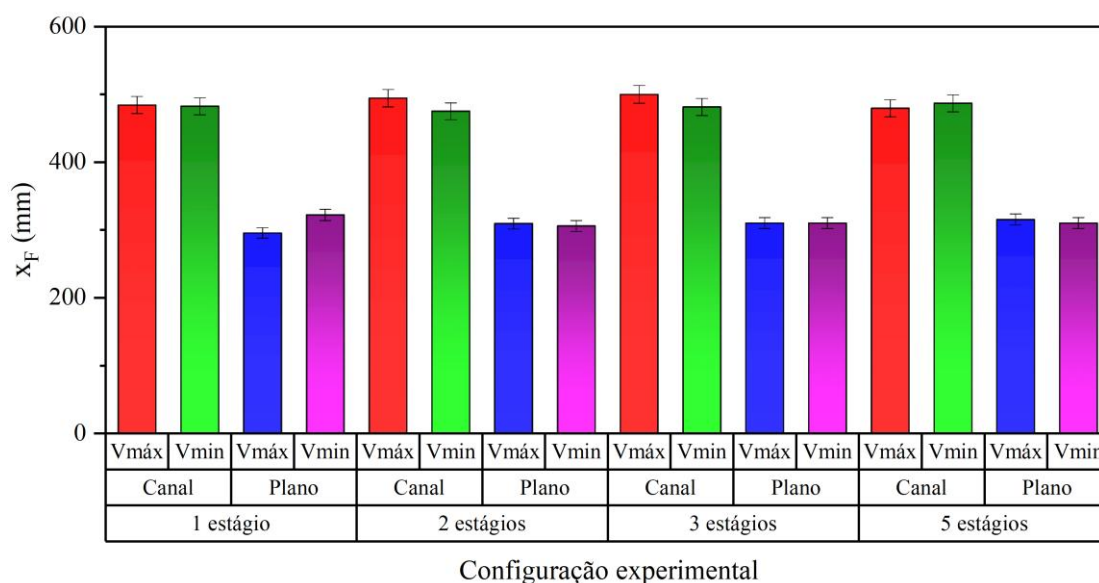


Fonte: Próprio autor.

O mesmo comportamento é verificado para escoamentos conduzidos em plano inclinado, de forma geral, os alcances finais estão tendendo a valores de ordem semelhante, indicando, também para plano inclinado, a dominância dos parâmetros reológicos sobre o alcance final. Entretanto, tanto para canal inclinado quanto plano inclinado, evidencia-se o efeito de estágios de abertura na evolução espaço-temporal das frentes viscoplásticas (verifique detalhe nos tempos iniciais na Figura 4.20 e Figura 4.21). Ainda que os alcances cheguem a valores próximos, a escala de tempo para isso acontecer apresenta dependência do estágio de abertura empregado. Quanto mais estágios de abertura envolvidos na ruptura, maior o tempo necessário para o escoamento atingir o alcance final. A Figura 4.22 e Figura 4.23 apresentam um comparativo dos alcances finais atingidos em cada experimento.

Verifica-se, a partir da Figura 4.22 e Figura 4.23, o efeito da configuração plano inclinado e canal inclinado sobre o comportamento de alcance, enquanto os efeitos de velocidade de abertura e estágios de descida da comporta se apresentam como desprezíveis sobre o comportamento final de alcance, considerando os níveis de velocidade de abertura impostos. É possível que para maiores níveis de velocidade de abertura efeitos de inércia possam atuar sobre o alcance final (GAO; FOURIE, 2015). Valores de alcance de diferentes experimentos segundo plano e canal inclinado estão dentro da faixa de erro da medida e com erros percentuais máximos na faixa de 9,00%, indicando semelhança de valores.

Figura 4.23 - Alcance final da frente x_F para todas as configurações experimentais conduzidas com o gel de carbopol C_0,31. Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.

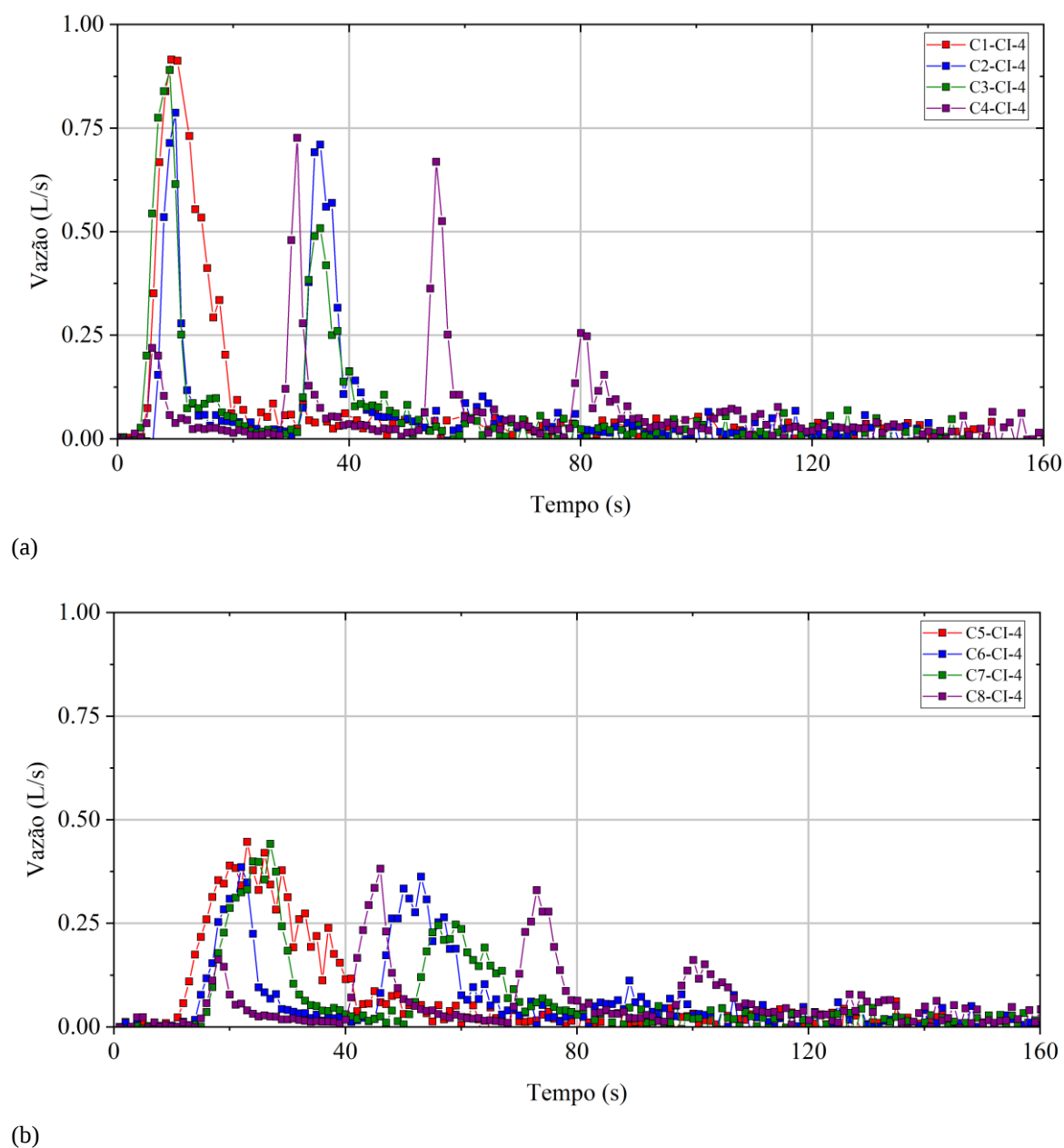


Fonte: Próprio autor.

4.4.2 Hidrogramas de ruptura para escoamentos de géis de carbopol

A partir da evolução do nível de fluido no reservatório ao longo do tempo, os hidrogramas de ruptura foram obtidos. De maneira lógica é possível identificar que a imposição de estágios de abertura atua como um efeito retardador para a saída do material do reservatório, de forma que quanto mais estágios são considerados mais energia é dissipada pelo escoamento e maior o amortecimento dos hidrogramas. A Figura 4.24 e Figura 4.25 permitem identificar o comportamento de hidrogramas obtidos para diferentes estágios de abertura da comporta segundo dois níveis de velocidade de comporta.

Figura 4.24 - Hidrogramas de *dam-break* de géis de carbopol de concentração C_0,17, com diferentes estágios de abertura, segundo as velocidades de comporta: (a) $V_{\text{máx}}$ e (b) V_{min} .

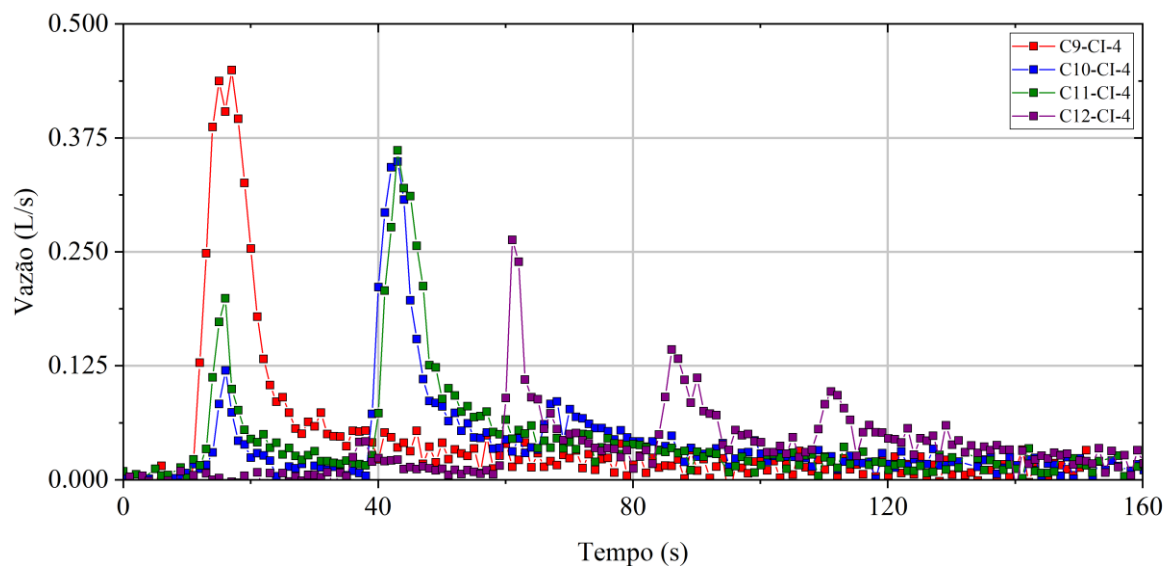


Fonte: Próprio autor.

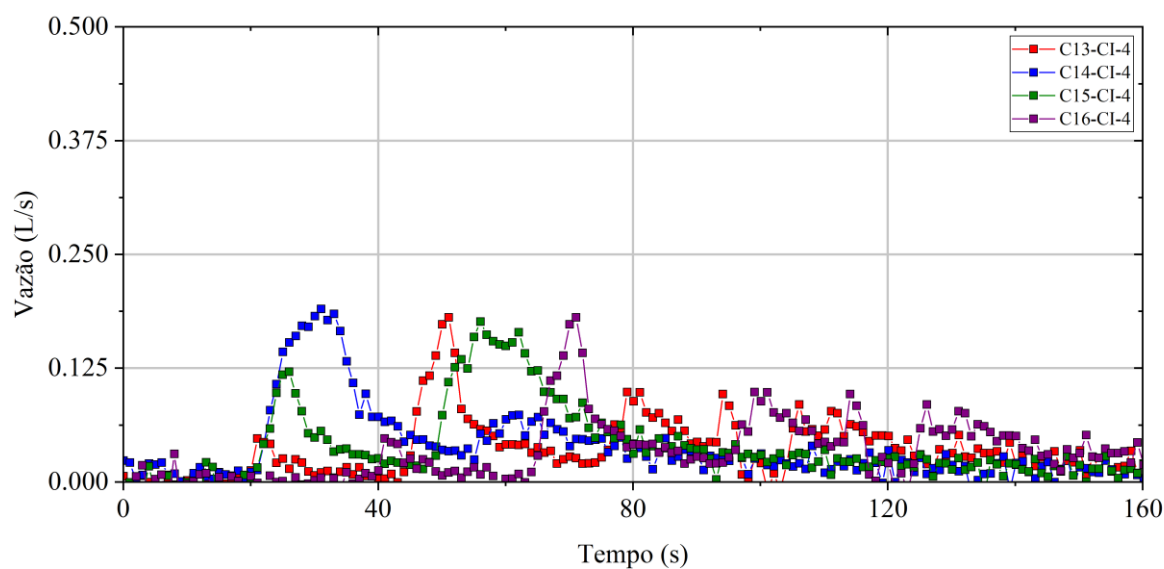
A análise da Figura 4.24 permite identificar a alteração do comportamento de hidrograma de ruptura em função do aumento do número de estágios de abertura. Os experimentos de único estágio de descida da comporta apresentam um único pico de vazão (curva de cor vermelha), caracterizado pelo máximo pico quando comparado aos experimentos com mais de 1 estágio de abertura. Experimentos realizados com 2 e 3 apresentam, respectivamente, 2 e 3 picos de vazão. Entretanto, em função da pequena carga hidrostática disponível para o último estágio de liberação dos experimentos C4-CI-4 e C8-CI-4, associado

ao efeito de viscosidade e plasticidade do material, não foi possível identificar o quinto pico de vazão associado a esses dois experimentos.

Figura 4.25 - Hidrogramas de *dam-break* de géis de carbopol de concentração C_0,25, com diferentes estágios de abertura, segundo as velocidades de comporta: (a) $V_{\text{máx}}$ e (b) V_{min} .



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor.

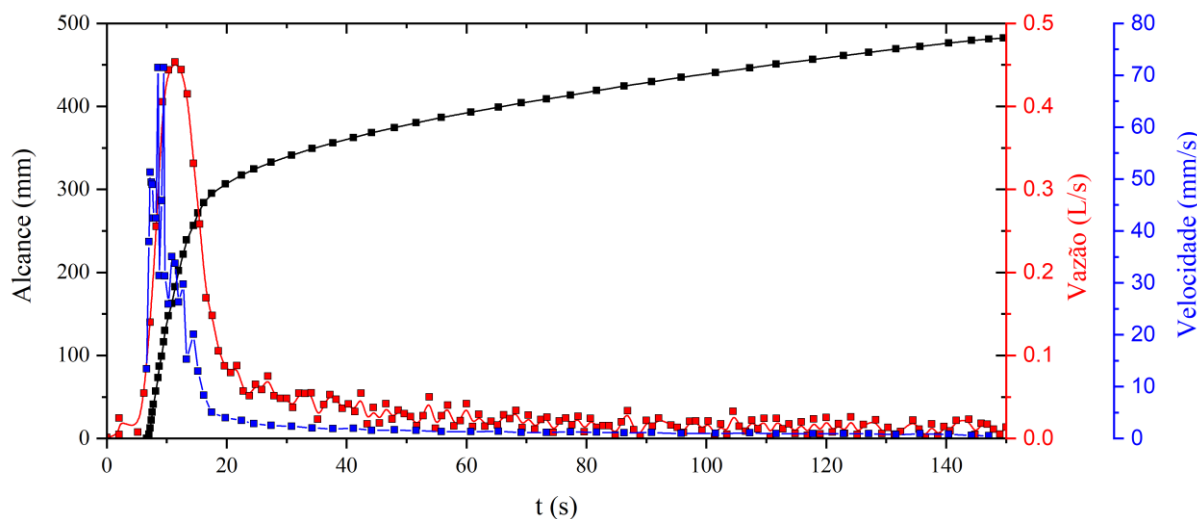
Ao comparar a Figura 4.24.a com a Figura 4.24.b, cuja única alteração foi a alteração da velocidade de movimentação da comporta, verifica-se que a redução da velocidade da comporta implicou no amortecimento dos picos de vazão. Assim, verifica-se que a condição de liberação gradual tem impacto significativo sobre os hidrogramas de ruptura. O comportamento

de redução dos picos de vazão com a imposição de estágios de abertura também é verificado no fluido de maior tensão limite de escoamento e menor viscosidade aparente (Figura 4.25), e, conforme verificado para o fluido C_0,17, a redução da velocidade da comporta também acarretou na redução dos picos de vazões.

É possível verificar a partir da Figura 4.24.a e Figura 4.24.b, considerando estágio único de descida, que o valor do pico de vazão é de aproximadamente 0,90 L/s e com a redução de velocidade da comporta, o novo pico de vazão é de 0,45, uma redução de cerca de 50%. Comportamento semelhante é verificado para o gel de carbopol C_0,25 (Figura 4.25), em que a vazão de pico passa de cerca de 0,45 L/s na condição de maior velocidade da comporta para aproximadamente 0,20 L/s.

Com base a análise conjunta do comportamento de hidrogramas segundo diferentes fluidos, velocidades de abertura da comporta e estágios de liberação de material, verifica-se o efeito da liberação do fluido e da velocidade da comporta sobre o hidrogramas, os quais se sobrepõem aos efeitos viscosos e de plasticidade do material.

Figura 4.26 - Comportamento de alcance, vazão e velocidade da frente no experimento C9-CI-4: gel de concentração C_0,25 e 1 estágio de abertura da comporta.

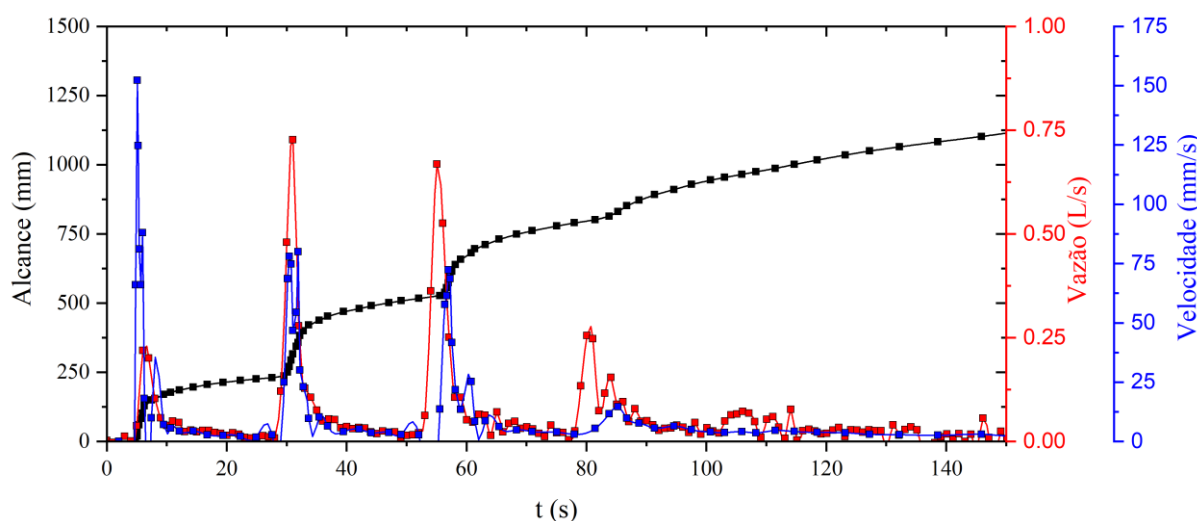


Fonte: Próprio autor.

A título de exemplo, a Figura 4.26 e Figura 4.27 reúnem, em uma mesma ilustração o comportamento de alcance, vazão e velocidade da frente (derivada da curva de alcance com relação ao tempo). Verifica-se, a partir da Figura 4.26 o desenvolvimento dos três parâmetros se iniciando em tempos semelhantes e seus parâmetros de pico (velocidade e vazão) ocorrendo no trecho em que a curva atinge o ponto a partir do qual dará início sua desaceleração.

Na Figura 4.27 é visto comportamento semelhante ao observado anteriormente, entretanto em função da maior fluidez do material é possível verificar, segundo vários estágios de abertura, o efeito sequencial de liberação de fluido sobre a evolução de alcance, vazão e velocidade da frente. Note que o quinto estágio de abertura é praticamente imperceptível em função da baixa carga hidrostática que restou (cerca de 25 mm de comporta a se deslocar).

Figura 4.27 - Comportamento de alcance, vazão e velocidade da frente no experimento C4-CI-4: gel de concentração C_0,17 e 5 estágios de abertura da comporta.



Fonte: Próprio autor.

4.4.3 Experimentos de *dam-break*: lamas

Os experimentos de *dam-break* conduzidos com lama foram realizados segundo condição de canal inclinado e velocidade fixada para a comporta ($V_{\text{comporta}} = 9,10$ mm/s), verificando o comportamento de alcances produzidos segundo abertura instantânea (situação de movimento ascendente da comporta) e diferentes estágios de abertura (comporta de movimento descendente). A Tabela 4.5 apresenta, de forma resumida, os resultados de alcance, massa específica e caracterização reológica das lamas

Ao analisar os resultados da Tabela 4.5, os quais consideram alcances finais, ou seja, já se considera escoamento parado ($t \rightarrow \infty$), verifica-se o efeito da reologia do fluido sobre os alcances. O aumento das propriedades reológicas implica na redução dos alcances finais para todas as lamas avaliadas, sendo esses parâmetros, assim como já constatado na Subseção 4.4.1, quando da análise de géis de carbopol, de forte influência sobre o comportamento de alcance final.

Tabela 4.5 - Resultados experimentais de experimentos de *dam-break* realizados com lammas caulíníticas. Consultar a Tabela 4.3 para verificação das configurações experimentais empregadas.

Ensaio	x_F (mm)	τ_0 (Pa)	K_n (Pa.s ⁿ)	n	ρ
L1-0	823,78	20,62	0,38	0,81	1463,00
L2-0	833,01	21,24	0,24	0,90	1450,00
L3-0	811,89	19,84	0,35	0,81	1454,00
L4-0	1077,63	15,57	0,51	0,74	1441,00
L5-1	964,52	26,63	0,24	0,87	1457,00
L6-1	983,24	21,09	0,21	0,90	1449,00
L7-1	963,00	21,12	0,30	0,84	1467,00
L8-1	1281,59	16,95	0,47	0,77	1460,00
L9-2	1271,98	21,87	0,19	0,89	1444,00
L10-2	1149,08	21,01	0,25	0,85	1466,00
L11-2	1214,24	21,44	0,22	0,89	1444,00
L12-2	1549,59	16,44	0,45	0,77	1466,00
L13-4	356,12	122,83	1,12	0,83	1490,00
L14-4	364,67	116,98	0,67	0,95	1513,00
L15-4	382,25	111,84	0,91	0,88	1499,00
L16-4	523,37	91,27	0,93	0,90	1512,00
L17-6	594,79	104,91	1,28	0,82	1511,00
L18-6	576,54	103,62	1,10	0,85	1499,00
L19-6	633,64	103,10	1,31	0,83	1507,00
L20-6	653,90	98,79	1,65	0,79	1501,00
L21-0	391,47	86,71	0,98	0,81	1601,00
L22-0	372,63	83,36	0,66	0,89	1582,00
L23-0	349,37	108,58	0,87	0,84	1601,00
L24-4	616,73	87,38	1,24	0,77	1591,00
L25-4	592,89	87,42	0,29	1,06	1593,00
L26-4	579,66	90,53	0,70	0,89	1592,00
L27-6	837,18	85,55	0,59	0,91	1588,00
L28-6	803,71	87,86	0,37	1,01	1596,00
L29-6	755,85	90,50	0,78	0,86	1585,00
L30-0	377,29	84,03	0,40	0,95	1535,00
L31-0	366,84	75,41	0,93	0,76	1545,00
L32-0	459,39	71,34	0,61	0,86	1531,00
L33-4	619,45	76,41	0,44	0,92	1541,00
L34-4	618,48	76,80	0,46	0,91	1522,00
L35-4	704,52	70,95	0,39	0,95	1530,00
L36-6	905,27	74,71	0,38	0,95	1516,00
L37-6	871,95	75,80	0,39	0,95	1535,00
L38-6	1066,16	68,10	0,64	0,85	1527,00

Outro comportamento interessante está relacionado à composição da lama, à medida que ocorre o aumento da concentração volumétrica da suspensão água-argila observa-se o aumento das propriedades reológicas (PEREIRA et al., 2022; COUSSOT; PIAU, 1994). A alteração da concentração de $C_v = 28\%$ para $C_v = 31\%$ provocou aumento da tensão limite de escoamento em cerca de cinco vezes, implicando diretamente na redução dos níveis de alcance finais. Já a adição de areia na suspensão água-argila promoveu um aumento das propriedades reológicas da mistura; no caso da tensão limite de escoamento, a colocação de areia possibilitou seu aumento em aproximadamente três vezes. Nota-se ainda que quanto maior a quantidade de areia acrescentada à mistura menores são as tensões limites de escoamento (verifique níveis de

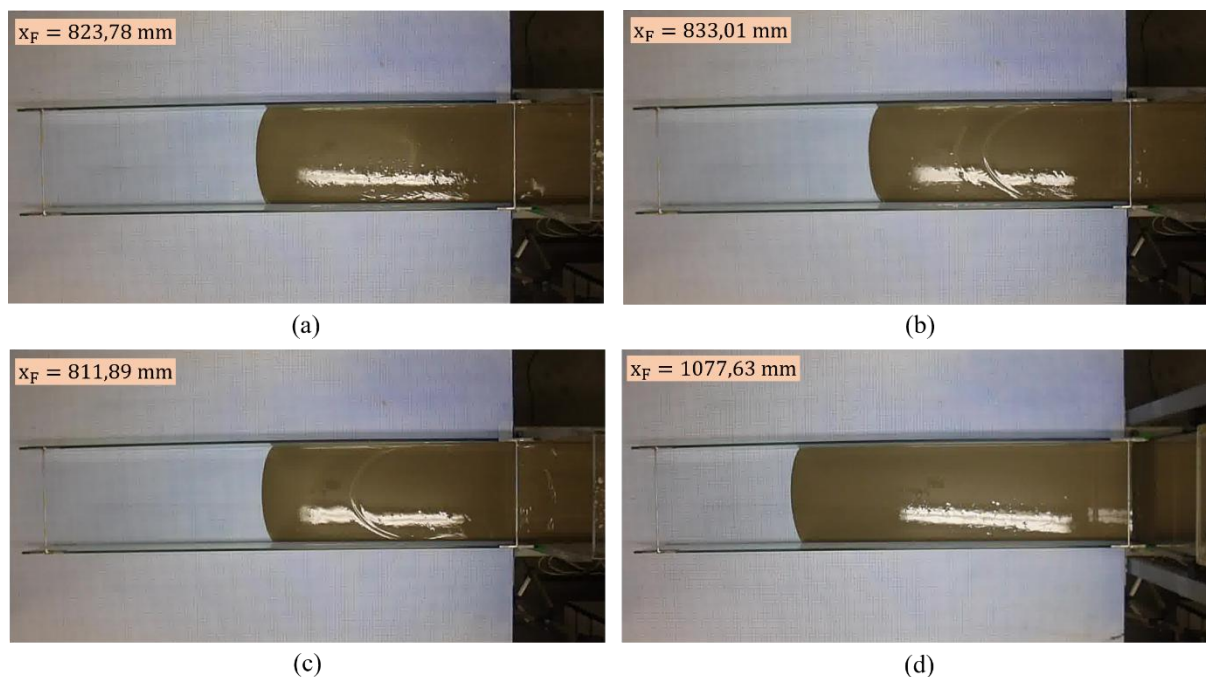
tensão limite de escoamento para os experimentos de L-21 a L-29 e de L-30 a L-38). Além da tensão limite de escoamento, verifica-se o efeito da viscosidade sobre os alcances à medida que as suspensões incorporam mais argila e areia, de forma suspensões com mais finos apresentaram aumento de viscosidade aparente e redução dos alcances finais.

Em termos do comportamento dos alcances, segundo a alteração de inclinação do canal, fica evidente que maiores inclinações conduzem a escoamentos de maiores alcances finais. De fato, o aumento da inclinação do canal implica no aumento dos níveis de tensão atuando sobre o escoamento, promovendo o maior desenvolvimento das frentes viscoplásticas. Dessa forma, deve-se ter em mente que, além da reologia do fluido em escoamento, as condições de inclinação, em problemas reais representadas pela topografia do local a jusante do represamento, atua diretamente sobre o alcance final das frentes viscoplásticas.

Além dos efeitos de reologia e inclinação do escoamento, ambos já relatados na literatura e tidos como elementos importantes na análise de alcances de frentes viscoplásticas, esta Subseção analisa os efeitos associados à forma de liberação do material. A Figura 4.28 ilustra os alcances visualizados a partir de diferentes condições de liberação da lama represada, possibilitando identificar comportamento distinto dos alcances em caso de liberação instantânea (comporta de movimento ascendente) e liberação gradual (descida da comporta e imposição de estágios de abertura). As curvas de alcances (Figura 4.29, Figura 4.30, Figura 4.31 e Figura 4.32) possibilitarão melhor entendimento sobre os efeitos da configuração de liberação de fluido no desenvolvimento dos alcances.

Ao avaliar a Figura 4.29, Figura 4.30, Figura 4.31 e Figura 4.32 efeitos cruzados em termos de propriedades reológicas e configuração de abertura da comporta sobre os alcances são constatados. Considerando a avaliação nos tempos iniciais de desenvolvimento dos alcances é visível nos detalhes contidos na Figura 4.29, Figura 4.30, Figura 4.31 e Figura 4.32, para tempos inferiores a 20 s, o efeito da configuração de liberação do material sobre as taxas de alcance. A evolução inicial do alcance se mostrou com maiores taxas em experimentos realizados a partir da abertura instantânea da comporta (comporta ascendente) em praticamente todos os fluidos avaliados; nos experimentos com o fluido L_AA_31 e L_AAA_28_0.5A notou-se efeito de taxa de alcance da configuração instantânea semelhante ao caso de abertura gradual, entretanto nota-se que a curva de alcance desses experimentos na situação de abertura instantânea foi retardada (verifique linha pontilhada de cor laranja na Figura 4.29), isso, provavelmente, devido à velocidade de subida da comporta estar com valor insuficiente para garantir a saída contínua do material, gerando um efeito de retenção de fluido no reservatório, reduzindo os níveis de velocidade da frente viscoplástica.

Figura 4.28 - Alcance final da frente x_F no tempo final de análise para os experimentos conduzidos com lama de concentração C_28 e canal a 0°: (a) L1-0, (b) L2-0, (c) L3-0 e (d) L4-0.



Fonte: Próprio autor.

Ainda que o efeito de velocidade da comporta possa ter influenciado o desenvolvimento do alcance dos experimentos de abertura instantânea no caso das suspensões L_AA_31 e L_AAA_28_0.5A, pode-se afirmar que a presença de abertura gradual possibilitou redução das taxas de alcance, e, conseqüentemente atuou no amortecimento dos hidrogramas unitários da ruptura (o comportamento do hidrograma está atrelado diretamente à evolução temporal dos alcances, conforme constatação relacionada na Subseção 4.4.2).

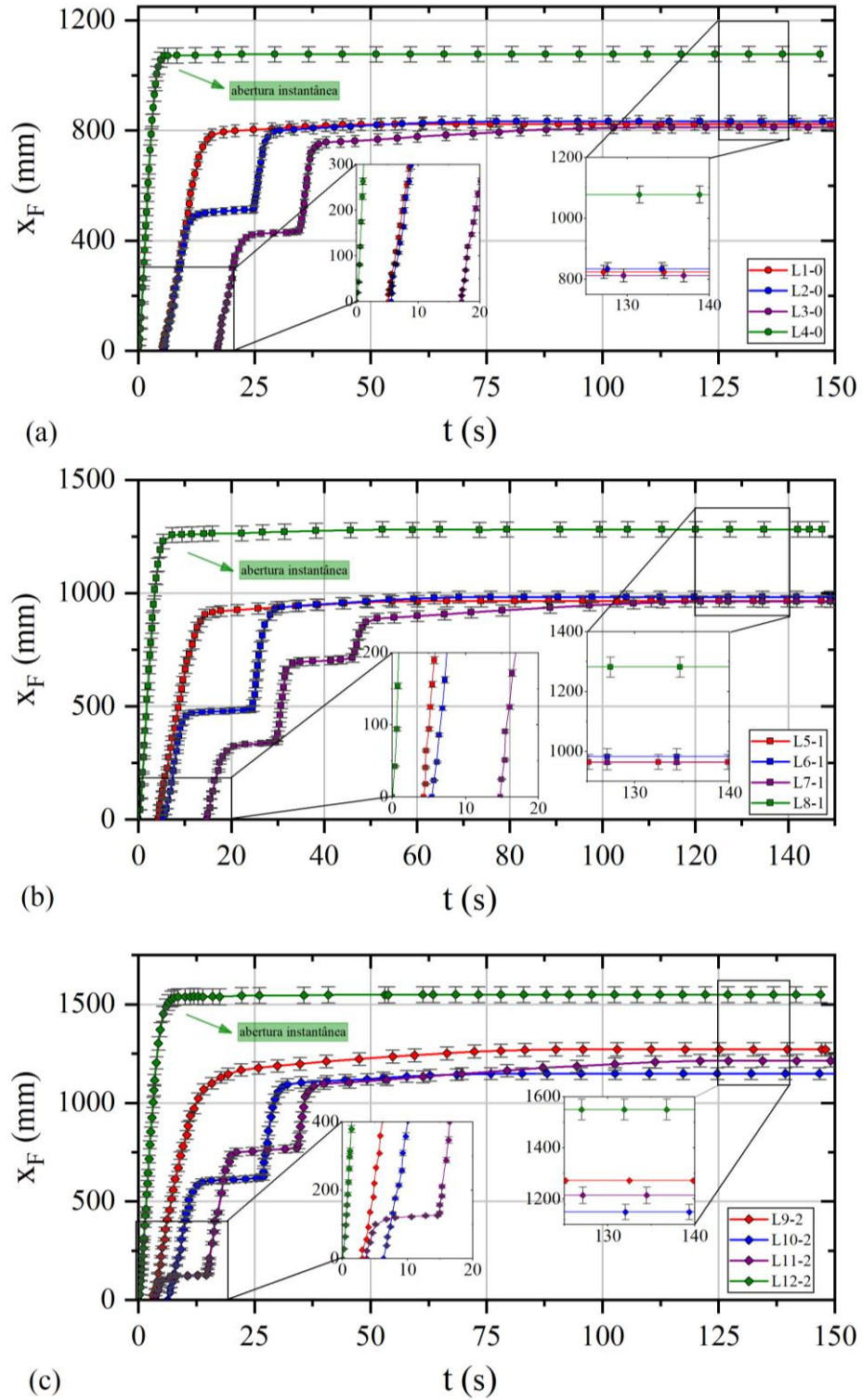
Para o caso de abertura instantânea (linhas verdes da Figura 4.29, Figura 4.30, Figura 4.31 e Figura 4.32) nota-se, em grande parte dos experimentos realizados, que os alcances foram superiores aos casos de abertura gradual. Essa constatação indica que a liberação instantânea é capaz de aumentar a inércia do escoamento, possibilitando, além de maiores velocidades da frente viscoplástica (verifica-se maiores taxas de alcance para essa situação), maiores alcances. Entretanto, deve-se atentar que o efeito da abertura instantânea atua, principalmente, em casos de fluidos de menor propriedade reológica (L_AA_28 e L_AAA_28_0.25A). Nesse sentido, deve-se verificar, em novos estudos, a imposição de maiores níveis de velocidade na abertura da comporta ascendente a fim de retirar/reduzir o efeito de represamento de fluido no reservatório quando de sua abertura.

Em relação às configurações de liberação de material (presença de diferentes estágios de abertura), verifica-se a tendência do efeito de abertura gradual prorrogar, temporalmente, a evolução dos alcances. Nesse sentido, identifica-se, à medida que mais estágios de abertura são empregados, que os alcances finais são estabelecidos em tempos maiores. Considere, por exemplo, os experimentos L1-0 e L3-0, enquanto primeiro atinge o alcance final no tempo de aproximadamente 50 s, o segundo tem seu alcance final estabelecido em tempo superior a 125 s (a definição do tempo de alcance final foi definida considerando velocidade de escoamento inferior a 1 mm/s). Tal efeito da abertura gradual prorrogar o estabelecimento do alcance final é maior quanto mais estágios de abertura são impostos aos escoamentos e esse comportamento pode ser visto em todos os experimentos analisados, independentemente da suspensão e inclinação testada. Assim, confirma-se a presença da abertura gradual como efeito a estender a evolução das frentes viscoplásticas ao longo do tempo. Essa constatação pode ser transpassada diretamente para problemas reais de ruptura de barragem, em que rupturas segundo formação de brechas, possibilitam escoamentos que se estendam por longos períodos de tempo (LIU, 2018).

A partir da Figura 4.30.b nota-se que a suspensão L_AA_31, avaliada em inclinação de 6°, apresenta alcances finais, para todas as configurações analisadas, de mesma ordem de grandeza, indicando, provavelmente, a velocidade de comporta da configuração ascendente (subida) como insuficiente para evitar efeitos de retenção de fluido no reservatório.

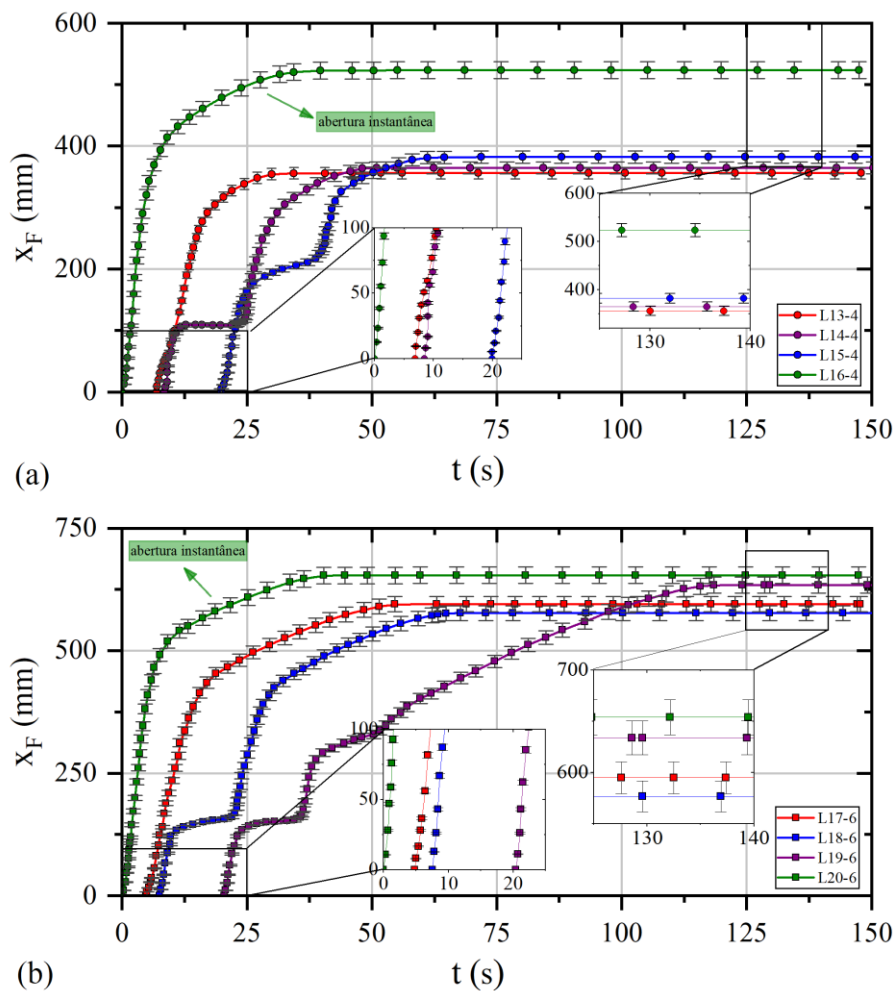
Algo interessante deve ser discutido a partir do confronto das curvas de alcance das suspensões L_AA_31, L_AAA_28_0.5 e L_AAA_28_0.25 (Figura 4.30, Figura 4.31 e Figura 4.32). É visível em todas elas um efeito de atenuação das taxas de variação do alcance ao longo do tempo antes de atingir o estado de repouso, mesmo na situação de abertura gradual (por exemplo, curvas L24-4 *versus* L26-4). No caso de comporta de abertura instantânea a velocidade de subida, associada aos altos índices de consistência, é o elemento que está conduzindo a retenção de fluido no reservatório e promovendo a redução das taxas de alcance. Já para os casos de abertura gradual o efeito de atenuação das taxas de variação do alcance ao longo do tempo pode ser explicado pelo efeito da reologia das suspensões, especialmente pelos elevados índices de consistência verificados nas suspensões L_AA_31, L_AAA_28_0.5A e L_AAA_28_0.25A. O efeito de elevado índice de consistência prevaleceu nos experimentos com presença de areia e maior concentração volumétrica de argila.

Figura 4.29 - Alcance da frente x_F ao longo do tempo t para a lama L_AA_28 segundo comporta de abertura instantânea (comporta ascendente - linha verde) e abertura gradual (presença de estágios de abertura – linhas vermelha, azul e roxa) para três inclinações do canal inclinado: (a) 0° , (b) 1° e (c) 2° . Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.



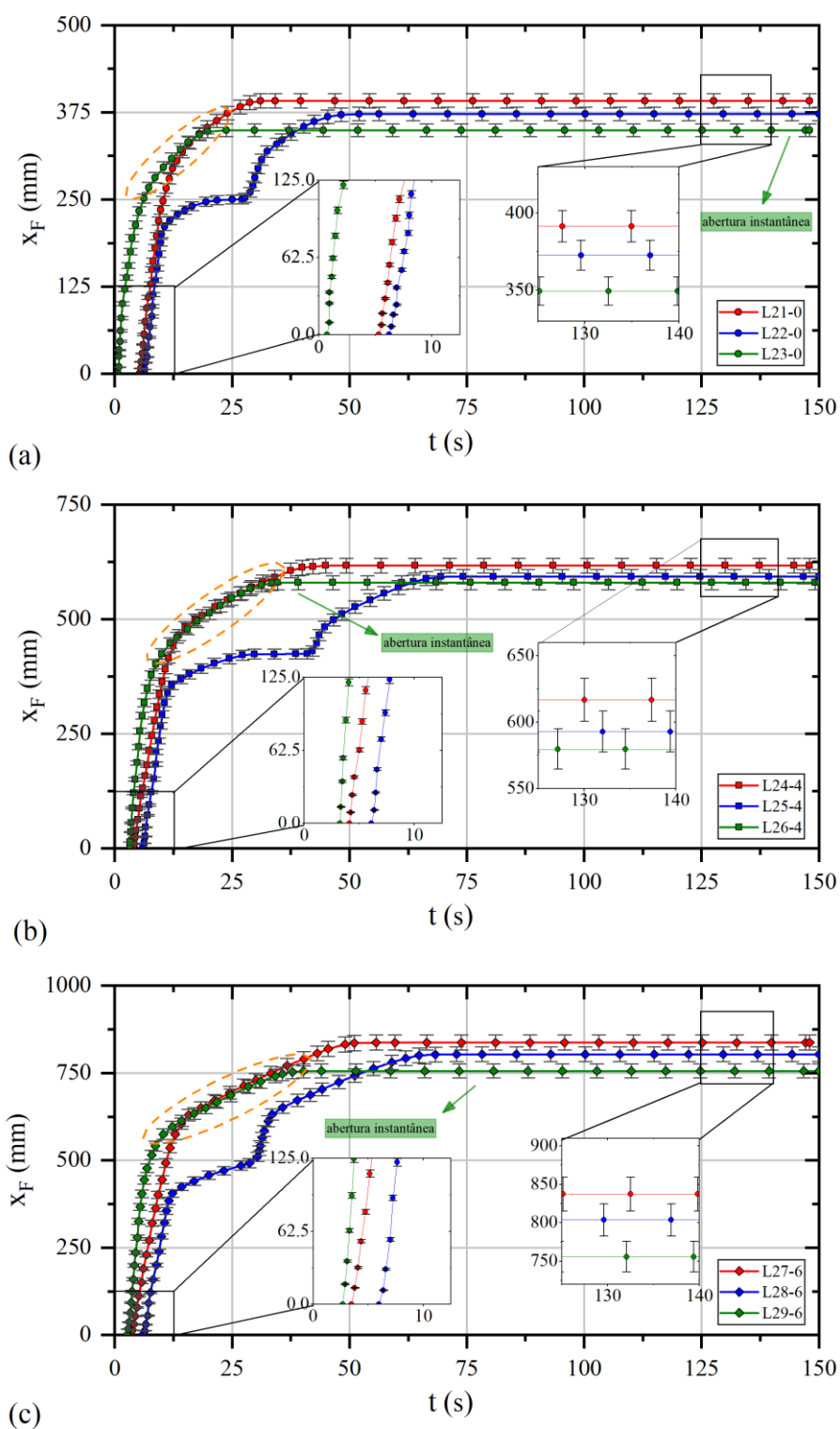
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.30 - Alcance da frente x_F ao longo do tempo t para a lama L_AA_31 segundo comporta de abertura instantânea (comporta ascendente - linha verde) e abertura gradual (presença de estágios de abertura – linhas vermelha, azul e roxa) para duas inclinações do canal inclinado: (a) 4° e (b) 6°. Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.



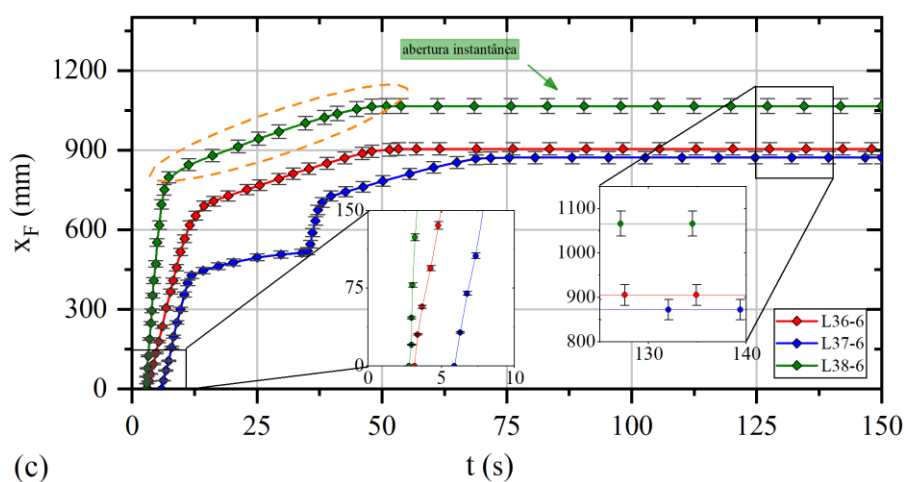
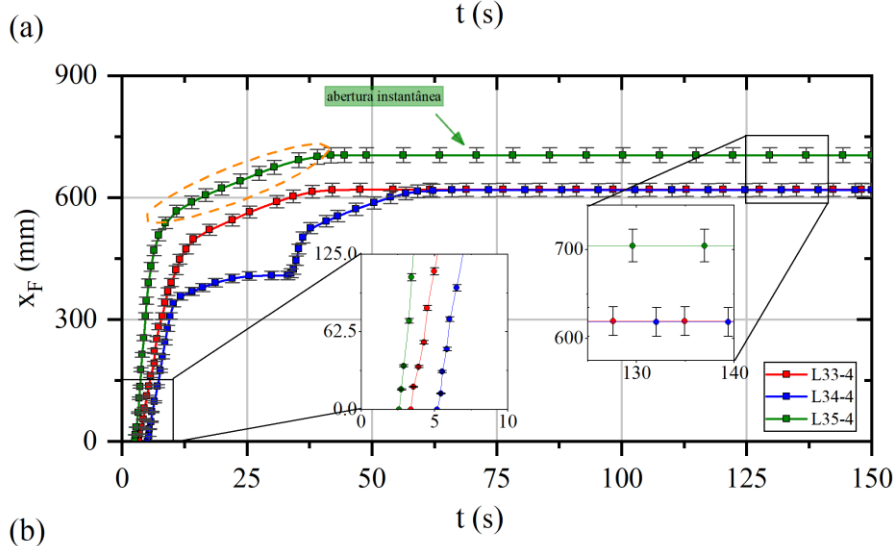
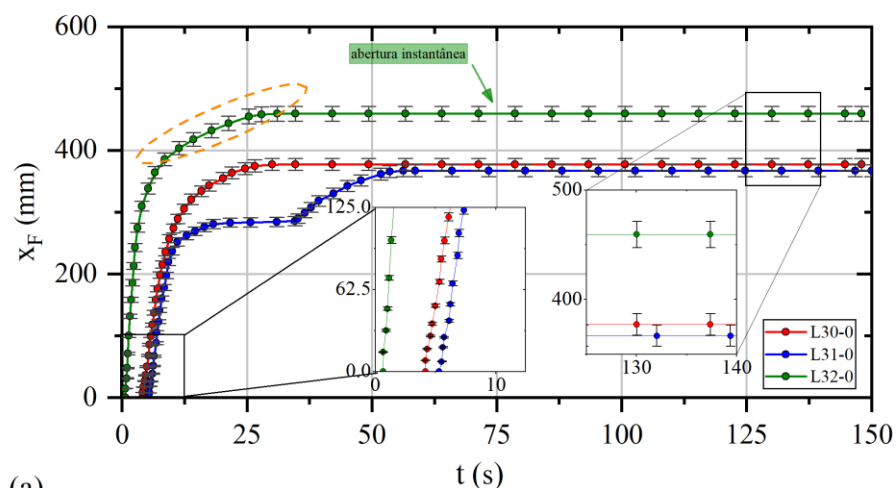
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.31 - Alcance da frente x_F ao longo do tempo t para a lama L_AAA_28_0.5A segundo comporta de abertura instantânea (comporta ascendente - linha verde) e abertura gradual (presença de estágios de abertura – linhas vermelha, azul e roxa) para duas inclinações do canal inclinado: (a) 0° , (b) 4° e (c) 6° . Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.



Fonte: Próprio autor.

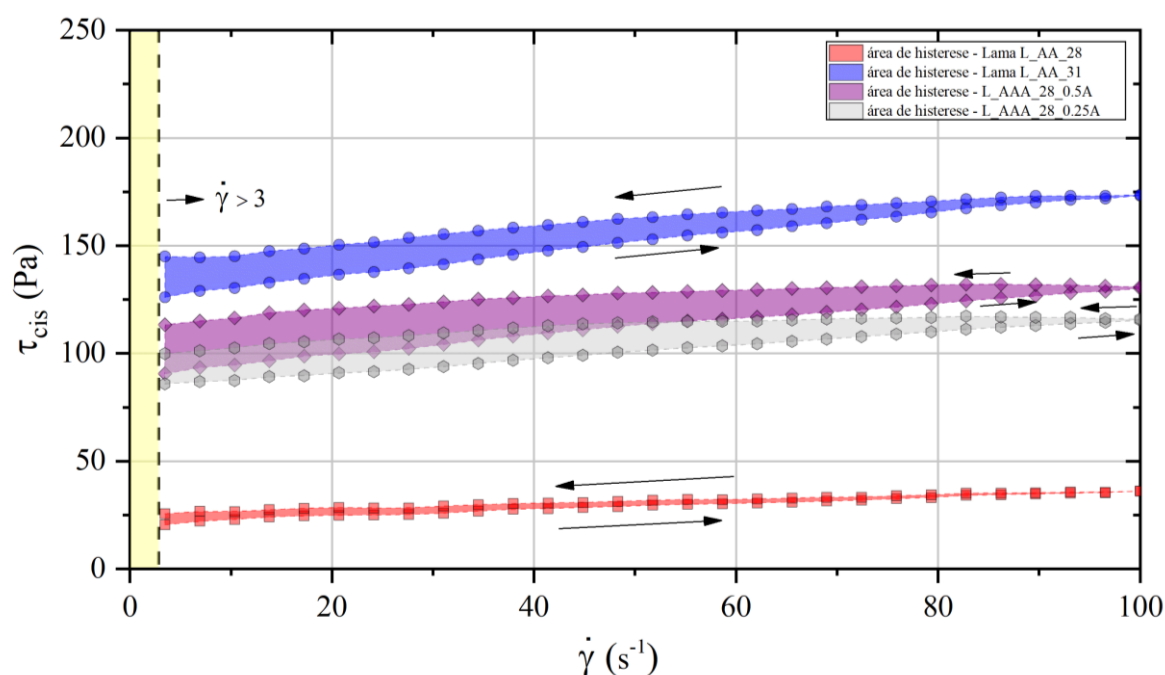
Figura 4.32 - Alcance da frente x_F ao longo do tempo t para a lama L_AAA_28_0.25A segundo comporta de abertura instantânea (comporta ascendente - linha verde) e abertura gradual (presença de estágios de abertura – linhas vermelha, azul e roxa) para duas inclinações do canal inclinado: (a) 0° , (b) 4° e (c) 6° . Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.



Fonte: Próprio autor.

Também pode-se traçar um paralelo do efeito de atenuação das taxas de variação de alcance ao longo do tempo nas suspensões com maior concentração volumétrica de argila e presença de areia aos efeitos de reopexia verificados em todas as caracterizações reológicas realizadas. Conforme Figura 4.33, foi constatado área de histerese e sentido anti-horário da relação taxa de deformação *versus* tensão de cisalhamento. O efeito de reopexia se mostrou baixo para a suspensão de baixa concentração de argila, aumentando à medida em que houve o aumento da quantidade de argila presente na mistura e também sendo maior à medida que aumentou a presença de areia na suspensão. Com relação ao efeito de reopexia pode-se atrelar, de forma inicial e baseada em análises reológicas apenas considerando reometria rotacional, sem análises reológicas detalhadas e aprofundadas, o efeito de atenuação das taxas de alcances em situação de abertura gradual das suspensões L_AA_31, L_AAA_28_0.5A e L_AAA_28_0.25A ao efeito reopético, o qual promoveu aumento da viscosidade aparente à medida que os níveis de taxa de deformação sentidos pelo escoamento reduziram.

Figura 4.33 - Curvas de fluxo das lamas caulínicas avaliadas: efeito de reopexia identificado.



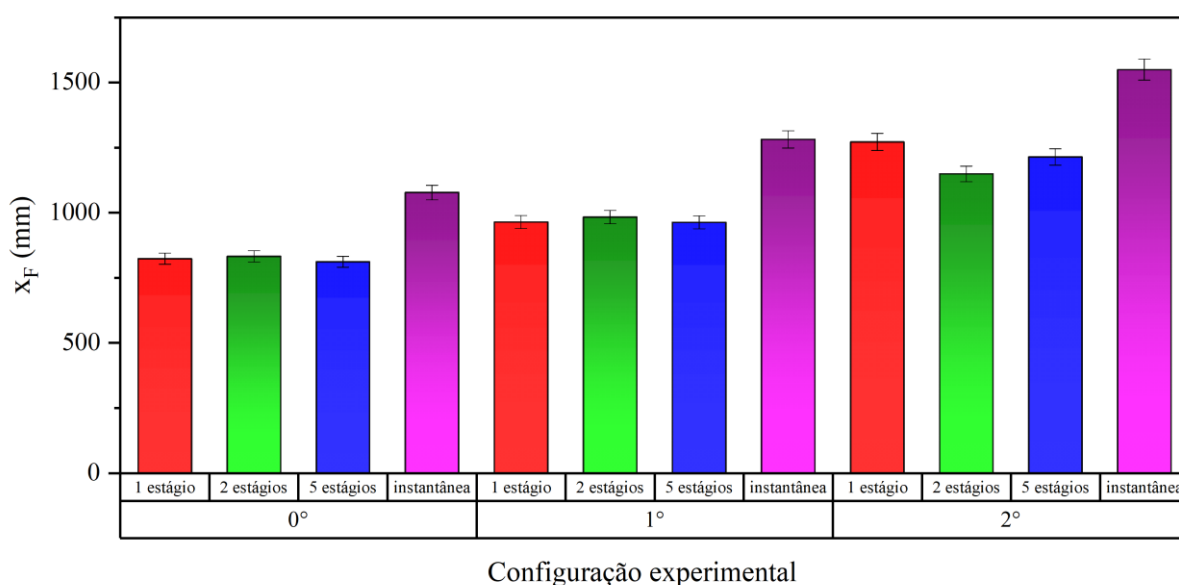
Fonte: Próprio autor.

O trabalho realizado por Wang et al. (1994) identificou comportamento reopético de suspensão de lama caulínica de concentração volumétrica de 32%, fato esse corroborado por esses autores pelos resultados ilustrados pela Figura 4.33. Em contrapartida, para os casos de concentração volumétrica reduzida o efeito reopético inexistia. Assim, a explicação para a

presença de reopexia nas lammas analisadas pode estar associada ao efeito combinado de aumento de finos e efeito de taxa de deformação, de forma que um processo de cristalização, formando estrutura floculante mais forte, induzida por cisalhamento (WANG et al.,1994; BALMFORTH; PROVENZALE, 2001) pode ser responsável pela reopexia observado neste trabalho.

Como forma de sistematizar os resultados de alcance final e possibilitar melhor entendimento das discussões realizadas com base na Figura 4.29, Figura 4.30, Figura 4.31 e Figura 4.32, as quais apresentam a evolução temporal das frentes viscoplásticas, a Figura 4.34, Figura 4.35, Figura 4.36 e Figura 4.37 permitem identificar o comportamento de alcance final segundo as diferentes condições experimentais avaliadas.

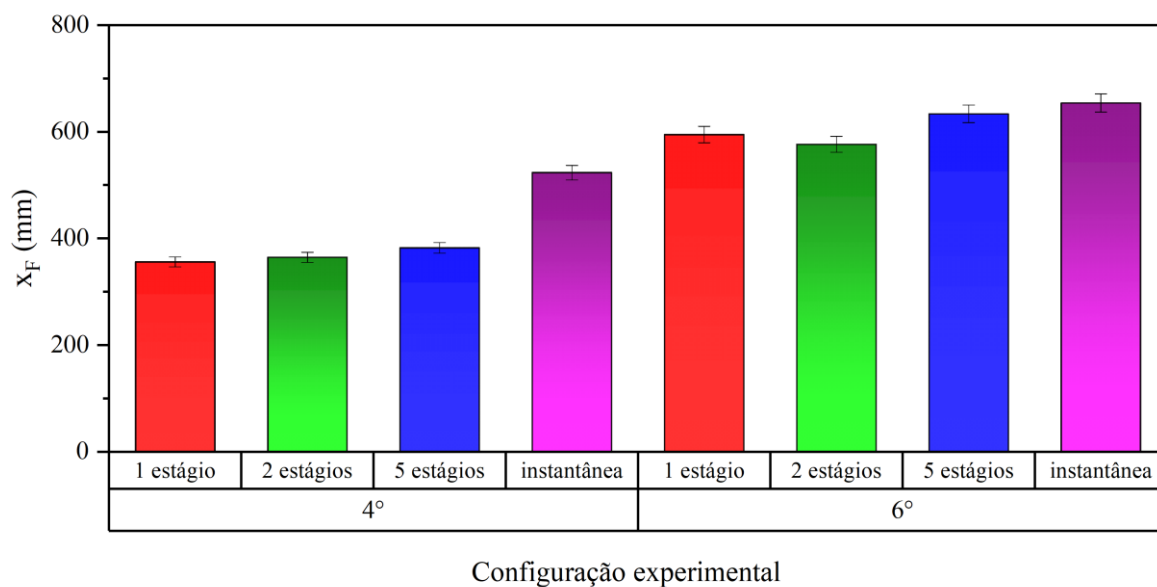
Figura 4.34 - Alcance final da frente x_F para todas as configurações experimentais conduzidas com lama L_AA_28. Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.



Fonte: Próprio autor.

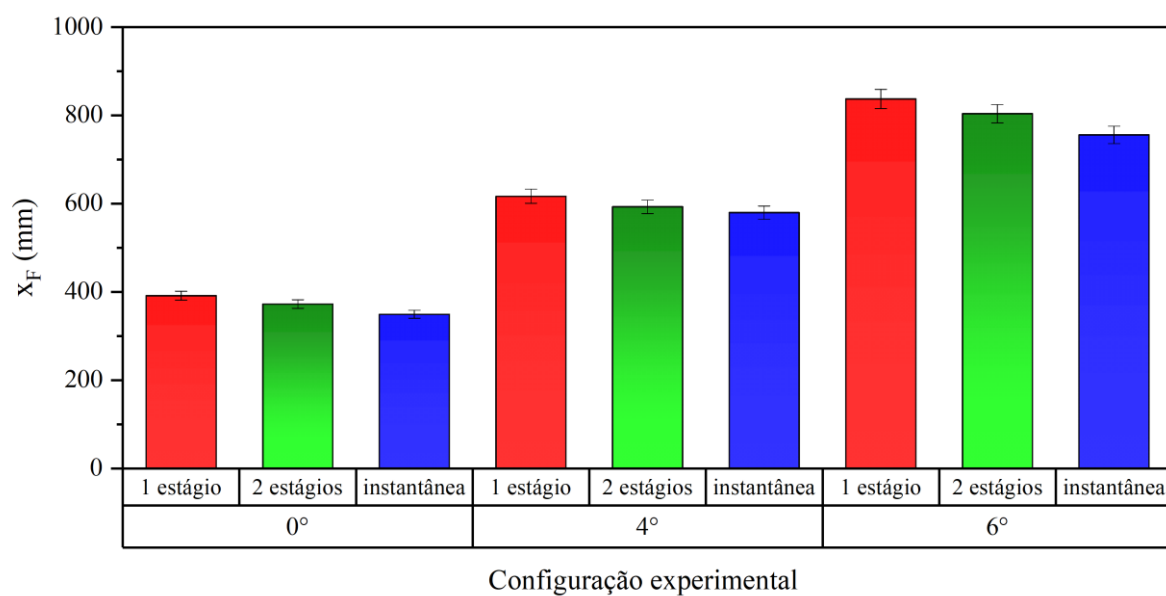
O aumento da quantidade da concentração mássica da suspensão e maiores quantidades de finos (areia) da mistura são capazes de retardar a evolução de frentes viscoplásticas em situação de abertura instantânea, considerando velocidade de subida insuficiente para manter a continuidade do fluxo da ruptura (Figura 4.34 e Figura 4.35). Já considerando apenas liberação gradual da lama, o alcance final não foi influenciado pela imposição de diferentes estágios de abertura, apresentando-se semelhante, com valores médios na faixa de erro, indicando efeito predominante da reologia, com destaque para a tensão limite de escoamento sobre o alcance final.

Figura 4.35 - Alcance final da frente x_F para todas as configurações experimentais conduzidas com lama L_AA_31. Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.



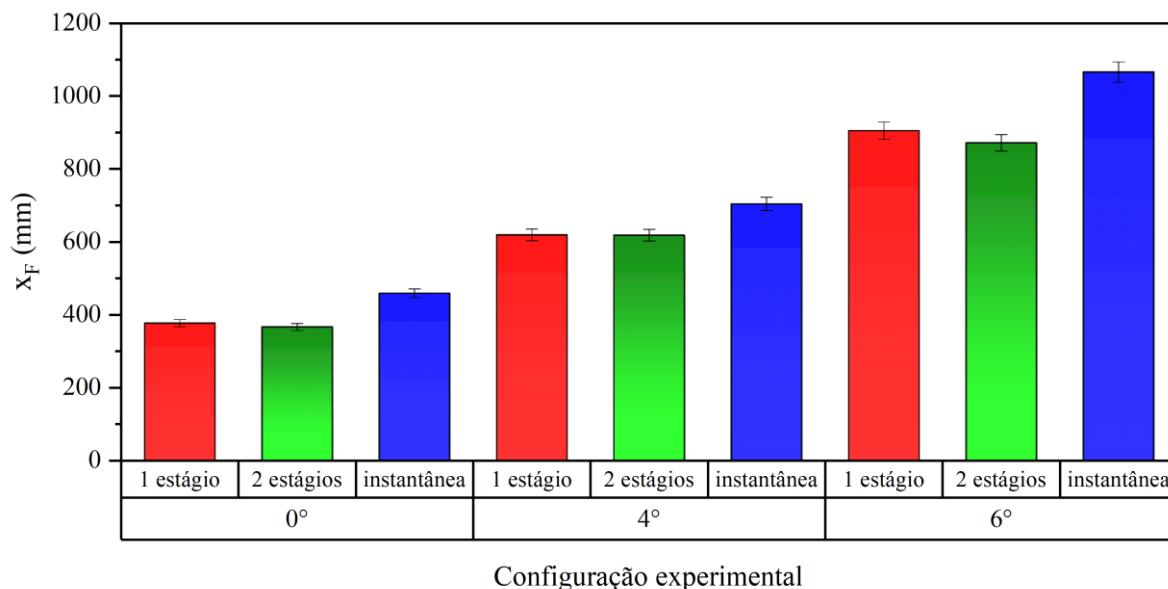
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.36 - Alcance final da frente x_F para todas as configurações experimentais conduzidas com lama L_AAA_28_0.5A. Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.37 - Alcance final da frente x_F para todas as configurações experimentais conduzidas com lama L_AAA_28_0.25A. Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.



Fonte: Próprio autor.

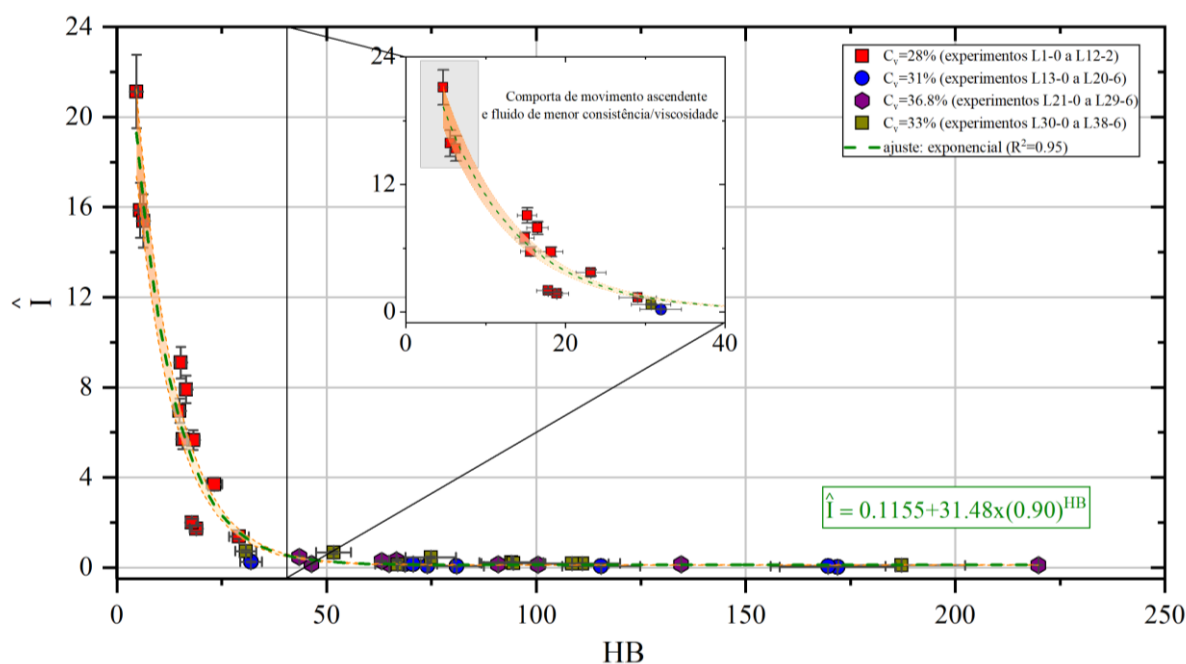
4.4.4 Leituras interpretativas de escoamentos *dam-break* a partir de adimensionais

A fim de verificar efeitos possíveis efeitos de inércia atuando nos experimentos de *dam-break* a Figura 4.38 é empregada para relacionar o número de Herschel-Bulkley (HB) com a inércia normalizada pela tensão limite de escoamento ($\hat{I} = \rho V^2 / \tau_0$). Ainda que seja conhecido que dois parâmetros, a reologia do fluido e a razão de aspecto do reservatório (razão entre altura do fluido no reservatório e comprimento H/L), tenham forte efeito sobre a geração de inércia, este estudo não realizou variações da razão de aspecto, de forma que esse parâmetro foi substituído pela razão entre a inércia e tensão limite de escoamento, buscando verificar o mecanismo de liberação do fluido como um elemento possível de interferir na inércia do escoamento. A velocidade empregada no cálculo do parâmetro $\hat{I}$ foi a velocidade máxima desenvolvida pela frente, associada, portanto, ao início de liberação do material.

A partir da Figura 4.38 é possível verificar que quanto maior for HB, maior é o efeito de plasticidade (tensão limite de escoamento) e de viscosidade aparente em relação à dinâmica do escoamento, implicando em maior resistência do fluido à inércia. Porém, quanto menor for o HB, maior a possibilidade do escoamento ser susceptível aos efeitos de inércias advindos da liberação instantânea de material. Assim, pode-se inferir, conforme Figura 4.38, que dois regimes estão prevalecendo sobre o escoamento: o regime de maior fluidez, marcado por baixos números de HB, aumento de velocidade e maior susceptibilidade a efeitos de inércia; e o regime

de menor fluidez, caracterizado por elevados valores de HB, baixas velocidades de escoamento e menor influência de efeitos de inércia.

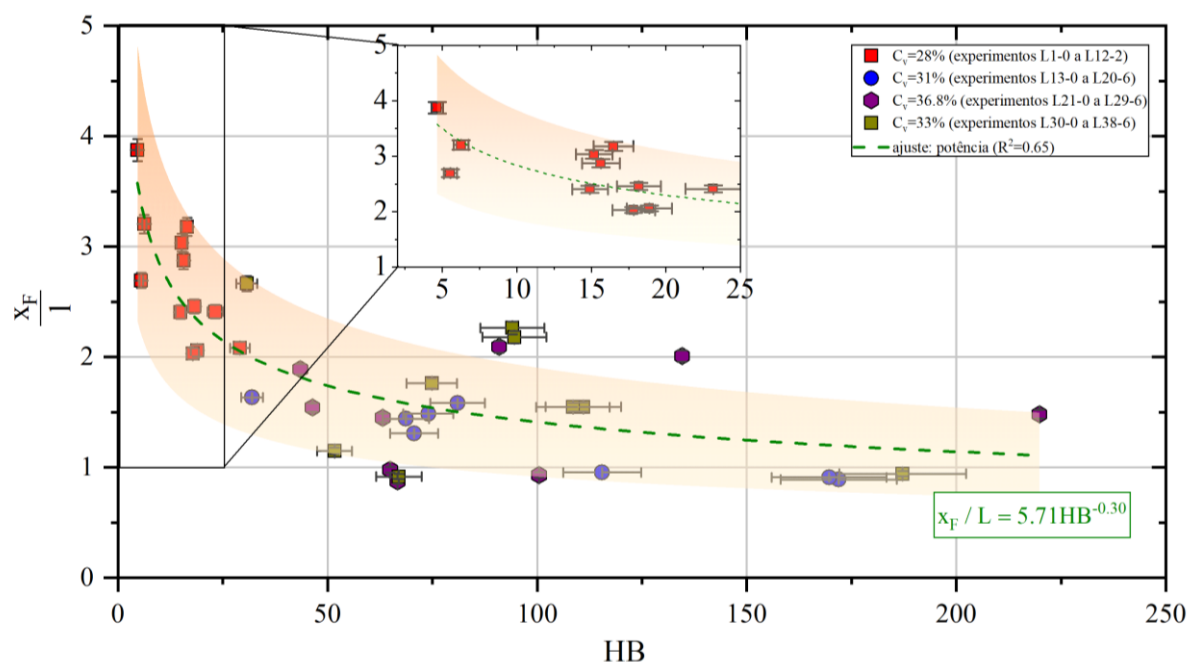
Figura 4.38 - Adimensional de inércia ($\hat{I}$) em função do número de Herschel-Bulkley (HB). A linha verde pontilhada indica o ajuste exponencial empregado e a região sombreada, limitada por linhas pontilhadas laranjas, indica a incerteza do modelo de ajuste.



Fonte: Próprio autor.

Verifica-se ainda na Figura 4.38 que os experimentos de maior fluidez (lama C-28) conduzidos com abertura instantânea da comporta promoveram um aumento significativo de $\hat{I}$ quando comparado aos demais experimentos, conduzidos segundo a mesma velocidade de abertura de comporta e com liberação gradual de material. Essa constatação indica que além da reologia do fluido, a configuração de liberação de material, especificamente a abertura instantânea associada a fluidos de maior fluidez, torna o escoamento mais susceptível aos efeitos de inércia, podendo potencializar sua ocorrência. Detalhe da Figura 4.38 indica aumento acentuado de $\hat{I}$ e queda de HB em experimentos de maior fluidez avaliados a partir da liberação instantânea das lamas.

Figura 4.39 - Adimensional de alcance final (x_F/l) em função do número de Herschel-Bulkley (HB). A linha verde pontilhada indica o ajuste segundo lei de potência empregado e a região sombreada indica a incerteza do modelo de ajuste.



Fonte: Próprio autor.

Além da verificação do número de Herschel-Bulkley (HB) com o parâmetro $\hat{I}$, pode-se identificar a atuação dos efeitos de plasticidade, viscosidade, e mesmo de inércia, quando do confronto do parâmetro HB com o adimensional x_F/l (relação entre os alcances finais e o comprimento do reservatório). A partir da Figura 4.39 verifica-se que quanto maior HB, menor a variação de x_F/l , indicando região de baixa possibilidade de atuação de efeito de inércia, entretanto para menores HB a tendência é de aumento de x_F/l de forma acentuada, indicando possibilidade de atuação de efeitos de inércia. Também é possível identificar que a reologia é um efeito importante sobre a inércia, sendo que maior fluidez acarreta menores HB e maiores x_F/l . Verifica-se, ainda, que o efeito de liberação de fluido, segundo abertura instantânea, atuou no aumento da relação x_F/l e redução de HB, indicando que o efeito de inércia pode ser atuante em situações que associam material de alta fluidez e liberação instantânea.

4.5 CONCLUSÃO

De forma geral, pode-se afirmar que o aparato desenvolvido é capaz de simular o efeito de *dam-break* com elevado rigor, possibilitando a ocorrência de escoamentos controlados e com repetibilidade. O controle da abertura da comporta se mostra um elemento importante para o melhor entendimento sobre efeitos advindos do processo de liberação de material no desenvolvimento das frentes viscoplásticas. Dessa forma, o aparato de *dam-break* retratou com maior proximidade rupturas de barragem com formação de brechas.

O emprego de técnica de medição baseada na imagem STI (*Space-Time Image*) permitiu o rastreamento das frentes viscoplásticas, na seção central com canal, com alta resolução espacial. Esse mecanismo de análise influenciou diretamente a qualidade das curvas de alcance, as quais permitiram identificar claramente efeitos associados aos mecanismos de liberação de fluido. Assim, a imagem STI pode ser empregada como ferramenta de rastreamento de frentes viscoplásticas, podendo ser aplicada na avaliação de escoamentos de natureza não permanente, como casos de ruptura de barragem.

Os resultados experimentais de curvas de alcance conduzidos com géis de carbopol demonstraram que escoamentos em canal inclinado possibilitam maiores alcances quando comparados aqueles que se desenvolvem em planos inclinados. Isso demonstra a influência da geometria a jusante da barragem sobre os níveis de alcance de frentes viscoplásticas. Em termos de velocidade de levantamento da comporta, experimentos com géis de carbopol conduzidos com duas velocidades de liberação de material para configuração de abertura gradual (comporta de movimento descendente), demonstraram que a alteração da velocidade da comporta promoveu a atuação de efeito de inércia apenas nos instantes iniciais dos alcances, de forma que maior velocidade de abertura da comporta promoveu maiores taxas de variação de alcance ao longo do tempo. Entretanto, ao avaliar os alcances finais, em $t \rightarrow \infty$, os experimentos demonstraram convergência de resultados, tanto no caso de diferentes velocidades de abertura da comporta, quanto para diferentes estágios de liberação do fluido. Com base nas medições experimentais, pode-se afirmar que os alcances finais apresentam uma forte dependência da reologia do fluido, sendo que a velocidade de abertura da comporta e a forma de liberação do material influenciam a fase transiente do escoamento e o hidrograma unitário de ruptura, não tendo efeito significativo sobre o alcance final.

Em relação à avaliação dos hidrogramas de ruptura foi possível verificar a forte influência da forma de liberação de material (imposição de diferentes estágios de abertura) e da velocidade de abertura da comporta. Fica evidente que os hidrogramas de frentes viscoplásticas,

de maior e de menor fluidez, são influenciados pela liberação gradual e sequencial de material, bem como pela velocidade da comporta, demonstrando nessa situação uma possível atuação do efeito de inércia atuando.

Considerando os experimentos de *dam-break* com suspensões de argila caulinítica, em canal inclinado e velocidade da comporta fixada, pode-se verificar a atuação da forma de liberação de material sobre a taxa de variação de alcance ao longo do tempo. Experimentos conduzidos com abertura instantânea apresentaram níveis iniciais de alcance maiores que aqueles conduzidos com liberação gradual de material. Em termos de alcance final, verificou-se o comportamento de maiores níveis de alcance em situações envolvendo lamas de maior fluidez associadas à liberação instantânea de material, indicando atuação de efeito de inércia nessa situação. Para fluidos de maiores níveis de tensão limite de escoamento e viscosidade aparente, os alcances finais se mostraram semelhantes para os diferentes estágios de abertura empregados. Assim, pode-se concluir que para fluidos de maior plasticidade e viscosidade o efeito advindo da forma de liberação do material é baixo sobre o alcance final, sendo, portanto, desprezíveis os efeitos de inércia. Entretanto, para casos em que há a associação de materiais de baixa fluidez e abertura instantânea da comporta, efeitos de inércia podem atuar, alterando de forma acentuada o alcance final das frentes viscoplásticas e acentuando a sua evolução espacial nos primeiros instantes.

Por fim, o uso de adimensionais representativos de escoamentos viscoplásticos a partir de *dam-break* demonstram que os efeitos de elevada plasticidade e viscosidade, neste trabalho, avaliados a partir do número de Herschel-Bulkley, possibilita menor influência do efeito de inércia qualquer que seja a forma de liberação do material. Entretanto, a queda da plasticidade e viscosidade dos materiais (redução de HB) implica no aumento dos níveis de velocidade do escoamento, os quais são potencializados com a liberação instantânea do material, implicando na presença significativa de efeitos de inércia.

5 ABORDAGEM NUMÉRICA DE ESCOAMENTOS VISCOPLÁSTICOS EVOLUINDO EM CANAL INCLINADO E A PARTIR ESCOAMENTO TIPO RUPTURA DE BARRAGEM

O objetivo deste capítulo é realizar confrontações numérica-experimental de escoamentos viscoplásticos de dois estudos de caso: evolução em canal inclinado, considerando regime permanente e uniforme; e evolução de frentes viscoplásticas em canal a partir da liberação gradual de fluido contido em reservatório. Para isso as Subseções 5.1 e 5.2 descrevem as hipóteses e métodos empregados pelo código computacional ANSYS *Fluent* 14.5, além das características geométricas, condições de contorno, malha computacional e parâmetros numéricos empregados para cada estudo de caso. Por fim, a Seção 5.3 apresenta e discute os resultados obtidos.

5.1 METODOLOGIA

As simulações numéricas foram realizadas através do software ANSYS *Fluent* 14.5, o qual utiliza as equações governantes da dinâmica dos fluidos (Equações 5.1 e 5.2) discretizadas pelo método dos volumes finitos (MOUKALLED, 2016). As hipóteses consideradas foram as seguintes: escoamento laminar, isotérmico, fluido incompressível e homogêneo que segue a equação constitutiva do modelo reológico de Herschel-Bulkley, visto que o fluido-teste é o gel de carbopol (PEREIRA, 2021). Os casos foram avaliados em um sistema bidimensional de coordenadas, considerando-se o plano longitudinal do centro do canal e largura unitária, desprezando-se efeitos de paredes laterais no escoamento e, em uma segunda avaliação, incluindo efeito de deslizamento de parede no fundo do canal para o caso de escoamento em canal inclinado. A modelagem do problema em questão requer, necessariamente, a abordagem de três itens: rastreamento da superfície livre em uma malha; regularização numérica da viscosidade aparente devido à viscoplasticidade do fluido (FRIGAARD, 2005); e malha dinâmica para simular o levantamento de comporta. A abordagem para cada um dos itens é descrita de maneira breve nas subseções a seguir, com mais informações em São (2021).

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{U} = 0 \quad (5.1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [\vec{U} \vec{U}] \right) = -\vec{\nabla} p + \rho \vec{g} + \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} \quad (5.2)$$

em que $\vec{U}$ é o campo de velocidade, p é a pressão estática, $\vec{g}$ é a aceleração da gravidade e $\bar{\tau}$ é o tensor de tensões cisalhantes, descrito pela Equação 5.3.

$$\bar{\tau} = \eta(\vec{\nabla} \vec{U} + \vec{\nabla} \vec{U}^T) \quad (5.3)$$

em que η é a viscosidade aparente.

Nas simulações associadas ao capítulo 3 desta tese, ou seja, avaliação de perfis de velocidade ao longo da profundidade de escoamento viscoplástico, foi admitido regime permanente e escoamento uniforme. Entretanto, para a análise de *dam break* (de acordo com o desenvolvimento apresentado capítulo 4), considerou-se regime não permanente e escoamento não uniforme.

5.1.1 Rastreamento de superfície livre

A interface entre o ar e o fluido-teste é rastreada através do método *Coupled Level-Set/VoF (CLSVoF)*. Para o escoamento de duas fases, duas variáveis “fração de volume” (α_1 e α_2) são adicionadas para identificar qual fase preenche o volume de controle da malha. Em uma célula da malha, três condições são possíveis:

- Se $\alpha_1 = 1$, a célula está preenchida com a fase primária, definida como o ar ambiente;
- se $\alpha_1 = 0$, a célula está preenchida com a fase secundária, definida como o fluido-teste;
- caso $0 < \alpha_1 < 1$, a interface da superfície livre está presente na célula em questão.

Para a aplicação das condições citadas, um limitador é dado pela Equação 5.4, em que a soma da fração de volume de ambas as fases dentro de uma célula deve equivaler à unidade.

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1 \quad (5.4)$$

As frações de volume são tratadas como campos escalares e são propagadas no tempo e espaço por uma equação de difusão-advecção. Para escoamentos incompressíveis de duas fases que não interagem entre si, a Equação 5.5 é resolvida para α_2 e α_1 obtido pela condição dada pela Equação 5.4. Os campos de fração de volume são resolvidos explicitamente no tempo e A

reconstrução da interface é feita pelo método *Geo-Reconstruct*, similar ao método *Piecewise Linear Interface Construction (PLIC)*.

$$\frac{\partial \alpha_2}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\alpha_2 \vec{U}_2) = 0 \quad (5.5)$$

Na região da interface, as propriedades do fluido, como viscosidade aparente η e massa específica ρ variam linearmente com α , conforme mostrado na Equação 5.6 utilizando a viscosidade aparente como exemplo.

$$\eta = \alpha_2 \eta_2 + (1 - \alpha_2) \eta_1 \quad (5.6)$$

5.1.2 Regularização da viscosidade aparente

Fluidos viscoplásticos modelados reologicamente com presença de tensão limite de escoamento – como os fluidos Binghamianos ou de Herschel-Bulkley – apresentam viscosidade aparente teórica tendendo ao infinito quando a taxa de deformação tende a zero (COUSSOT, 2014). Esse comportamento necessita de um tratamento numérico através da regularização da função de viscosidade aparente, aproximando-a para valores elevados, porém finitos, em baixas taxas de deformação (FRIGAARD, 2005). O método de regularização utilizado nas simulações é o método bi-viscoso proveniente do ANSYS *Fluent* 20.0, implementado por meio de uma *User-Defined Function (UDF)*, dado pela Equação 5.7 (ANSYS, 2020). A presença do parâmetro numérico “taxa de deformação crítica” $\dot{\gamma}_c$ exige testes de sensibilidade para determinar um valor baixo o suficiente para bem modelar a função da viscosidade aparente, mas o mais elevado possível para evitar divergência numérica ou prejudicar significativamente o desempenho da simulação (GAO; FOURIE, 2015; SÃO, 2021).

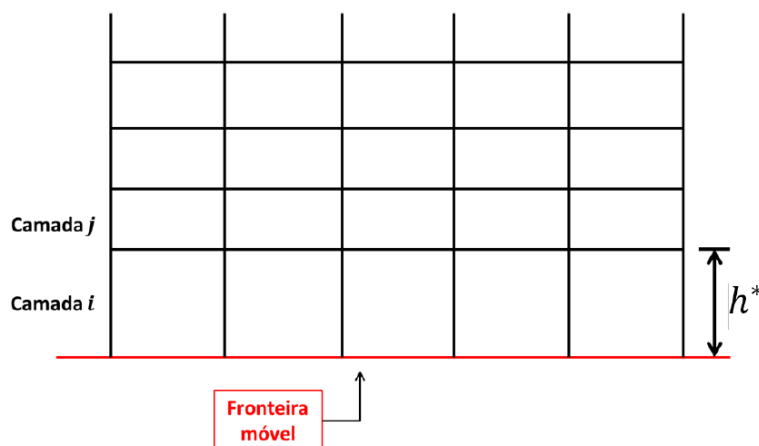
$$\eta = \begin{cases} \frac{\tau_c}{\dot{\gamma}_c} \left(2 - \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right) + K_n \dot{\gamma}_c^{n-1} \left[(2 - n) + (n - 1) \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right], & \text{se } \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_c \\ \frac{\tau_c}{\dot{\gamma}} + K_n \dot{\gamma}^{n-1}, & \text{se } \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_c \end{cases} \quad (5.7)$$

5.1.3 Malha dinâmica

O movimento da comporta, ao se levantar ou se rebaixar, introduz o desafio numérico relacionado à alteração do domínio a cada passo de tempo. Dessa maneira, a malha deve ser

dinâmica para se readequar a essa alteração e técnicas específicas são aplicadas nesse contexto. Das técnicas disponíveis no código ANSYS Fluent 14.5 (*Remeshing*, *Smoothing* e *Layering*), este trabalho se utiliza da técnica *Layering*, adequada para malhas regulares. A técnica consiste na adição ou remoção de camadas de volumes de controle adjacentes a uma fronteira móvel, cujo esquema de funcionamento é mostrado na Figura 5.1.

Figura 5.1 - Esquema de funcionamento da técnica *Layering*.



Fonte: São (2021)

Se a altura da camada i (h_i) estiver aumentando, a camada i não se divide até que seja atendida a condição dada por $h_i > (1 + f_s)h^*$, em que f_s é o fator de divisão e h^* uma altura especificada pelo usuário. Atingida a condição, a camada i se divide em duas camadas: uma camada de altura h^* que se manterá constante e outra camada, adjacente à fronteira móvel, com altura de $h_i - h^*$. Se h_i estiver diminuindo, a camada i irá desaparecer, caso seja atendida a condição dada por $h_i < f_c h^*$, em que f_c é o fator de colapso. Neste trabalho, utiliza-se $f_s = 0.4$ e $f_c = 0.2$. Assim, a camada adjacente à fronteira móvel que estiver aumentando irá se dividir ao ser 40% maior do que a altura especificada pelo usuário h^* . Caso esteja diminuindo, a camada irá desaparecer caso sua altura seja 20% de h^* . A velocidade da fronteira móvel é implementada por meio de uma função externa (*UDF*), através da função *DEFINE-CG-MOTION*.

5.1.4 Detalhamento das simulações numéricas

Para os casos estudados, os métodos numéricos empregados foram: método acoplado *Coupled* para o acoplamento pressão-velocidade, método dos Mínimos Quadrados baseado no volume de controle para avaliação de gradientes, método *PREssure STaggering Option*

(*PRESTO!*) para interpolação da pressão no volume de controle, método de segunda-ordem progressivo (*Second-Order Upwind*) para discretização espacial nas equações de *momentum*, método *Geo-Reconstruct* para reconstrução de fronteiras e método implícito de primeira ordem (*First-Order Implicit*) para discretização temporal. O passo de tempo foi definido como variável de acordo com a condição de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), na qual o adimensional foi fixado em $CFL = 0,25$ para garantir estabilidade da simulação, conforme verificado em estudo semelhante realizado por São (2021). O critério de convergência para cada passo de tempo foi baseado nos resíduos, com 10^{-6} de resíduos normalizados para as três equações governantes (continuidade e duas componentes da equação de *momentum*). Para simulação dos casos, o modelo reológico empregado foi o modelo de Herschel-Bulkley, cujos parâmetros dependem do caso a ser estudado, regularizado conforme a Equação 5.7 e com o parâmetro $\dot{\gamma}_c = 0,01 \text{ s}^{-1}$, cujo valor se mostra suficiente para avaliação de escoamentos de fluidos viscoplásticos (SÃO, 2021).

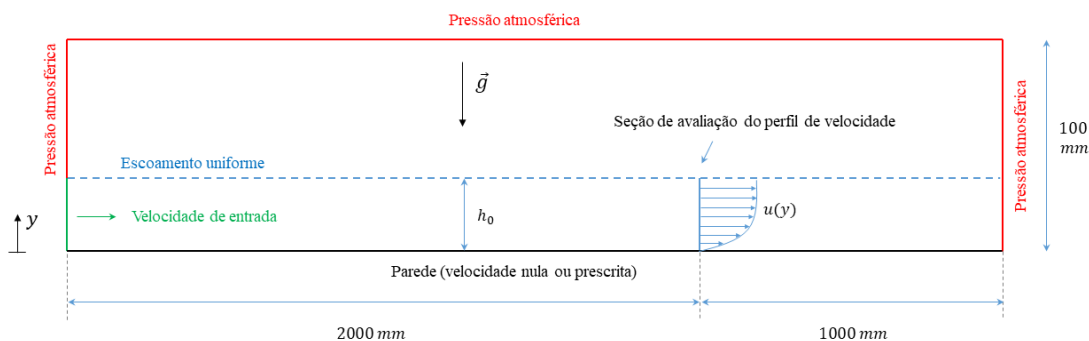
O protocolo de testes de sensibilidade adotou a metodologia de São (2021), o qual realizou avaliação de escoamentos viscoplásticos em geometria semelhante a esta tese. Dessa forma, a influência da resolução de malha, da discretização temporal, do parâmetro taxa de deformação crítica e do critério de convergência foi verificada por meio do *Grid Convergence Index (GCI)*.

5.2 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS CONDUZIDOS

5.2.1 Escoamentos viscoplásticos evoluindo em canal inclinado

O escoamento permanente e uniforme de fluido viscoplástico em um canal retangular inclinado retratado Capítulo 3 foi estudado e confrontado com experimentos descritos na Seção 3.4 (Resultados e discussões) visando obter o perfil de velocidade ao longo da profundidade. Para a simulação numérica, a geometria e condições de contorno seguem o esquema na Figura 5.2.

Figura 5.2 - Esquema em corte longitudinal do canal empregado nos experimentos físicos. Dimensões e condições de contorno de cada segmento são indicadas.

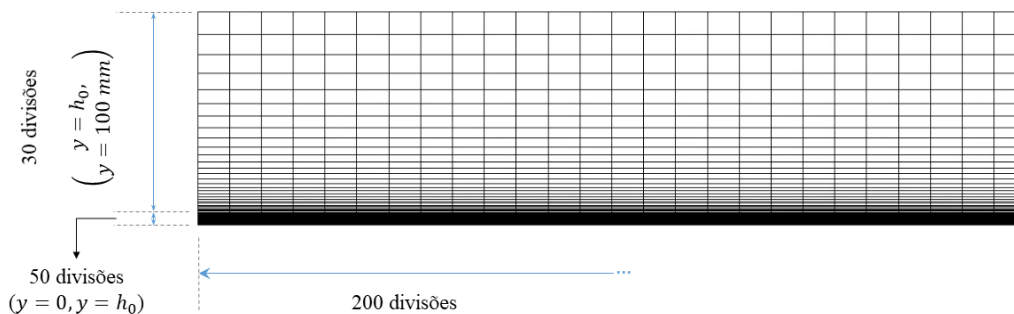


Fonte: Próprio autor.

A geometria foi definida no *software* ANSYS *DesignModeler*, correspondente ao plano longitudinal central do canal de largura unitária, desprezando-se os efeitos de paredes laterais. As condições de contorno foram implementadas com base na geometria através do *software* ANSYS *Meshing*, com condições de não fluxo e não deslizamento representando fronteiras sólidas estáticas (condições de parede), condição de pressão atmosférica prescrita (pressão de entrada) e condição de velocidade do escoamento prescrita (velocidade de entrada). Em uma segunda análise, o efeito de escorregamento de parede, modelado de acordo com a condição de velocidade de parede prescrita, definida na fronteira correspondente, foi considerado na modelagem numérica. O resultado de interesse é o perfil de velocidade na região de escoamento permanente e uniforme, capturado a 2 metros da entrada do canal.

A malha computacional foi confeccionada com base na geometria e no mesmo *software* ANSYS *Meshing* com elementos regulares e com refinamento de malha na região do escoamento uniforme, ou seja, maior refinamento entre o fundo do canal e a profundidade normal h_0 , visando capturar adequadamente os maiores gradientes de velocidade no perfil, com números de divisões de malha de cada segmento apresentados na Figura 5.3. A região sem escoamento de fluido-teste apresenta, ainda, refinamento gradual com maior viés para a região próxima da superfície livre. As simulações foram realizadas de acordo com os métodos descritos na Seção 5.1 e em tempo suficiente para que o escoamento permanente e uniforme se estabelecesse no canal.

Figura 5.3 - Esquema da malhagem com maior refinamento na região do escoamento.



Fonte: Próprio autor.

Dois testes com fluidos newtoniano (caso *N*) e de Lei de Potência (caso *LP*) - advindos de Ferreira (2013) – foram realizados para validação da metodologia e confrontados com soluções analíticas. A metodologia foi então aplicada para a simulação dos experimentos da vertente 3, usando o fluido-teste gel de carbopol em concentração mássica $C_m = 0,15\%$ e massa específica $\rho = 1001,93 \text{ kg/m}^3$ com curva de fluxo ajustada ao modelo de Herschel-Bulkley ($\tau_0 = 32,49 \text{ Pa}$, $K_n = 12,94 \text{ Pa s}^n$ e $n = 0,369$). Dois experimentos (casos *HB1* e *HB2*), de acordo com a Subseção 3.5.1, foram considerados usando o mesmo fluido e modificando-se a velocidade de entrada $\bar{U}_0$ e a profundidade normal h_0 como parâmetros de entrada do modelo numérico. A Tabela 5.1 apresenta as informações do escoamento e do fluido de cada caso estudado.

Os casos *HB1* e *HB2* foram simulados tanto com a condição de não deslizamento no fundo ($u_{y=0} = 0$) quanto com a velocidade de deslizamento aferida experimentalmente; para o caso *HB1*, tem-se $u(y = 0) = 0,0325 \text{ m/s}$ e para o caso *HB2* aferiu-se $u(y = 0) = 0,0293 \text{ m/s}$.

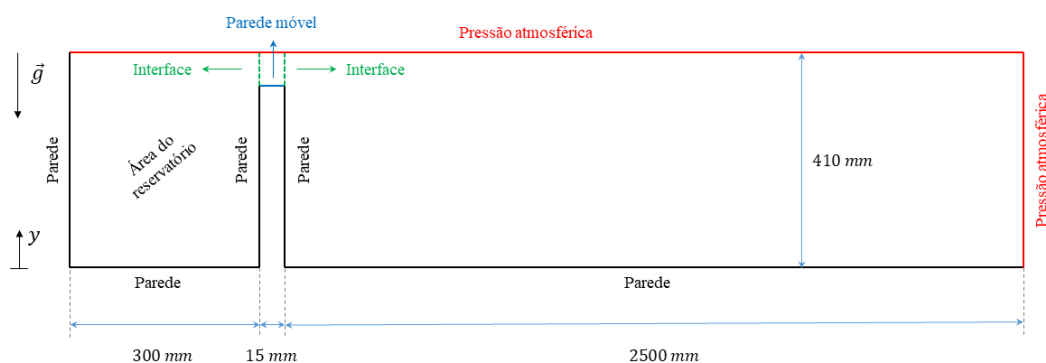
Tabela 5.1 - Dados do escoamento (velocidade média de entrada $\bar{U}_0$, profundidade normal h_0 e declividade do canal θ) e do fluido escoante (tensão limite de escoamento τ_c , índice de consistência K_n , índice de escoamento n e massa específica ρ).

Caso	$\bar{U}_0$ (m/s)	h_0 (mm)	θ (°)	τ_c (Pa)	K_n (Pa s ⁿ)	n (–)	ρ (kg/m ³)
<i>N</i>	0,2558	9,83	8,00	0,00	0,212	1,000	1237,00
<i>LP</i>	0,2357	5,70	1,03	0,00	0,140	0,400	1120,00
<i>HB1</i>	0,0373	35,77	8,00	32,49	12,94	0,369	1001,93
<i>HB2</i>	0,0565	44,86	8,00	32,49	12,94	0,369	1001,93

5.2.2 Escoamentos viscoplásticos evoluindo em canal inclinado a partir da liberação de material (*dam-break*)

Escoamentos produzidos pela abertura de uma comporta em canal retangular e inclinado foi estudado e confrontado com experimentos descritos na Subseção 4.3.5 (Visão geral dos experimentos de *dam-break*) visando obter o alcance da frente ao longo do tempo.

Figura 5.4 - Esquema em corte longitudinal do canal empregado nos experimentos físicos. Dimensões e condições de contorno de cada segmento são indicadas.



Fonte: Próprio autor.

Para a simulação numérica, a geometria e condições de contorno seguem o esquema na Figura 5.4. Os casos foram modelados com geometria bidimensional, definida no *software* ANSYS *DesignModeler*, e as condições de contorno foram implementadas com base na geometria através do *software* ANSYS *Meshing*, com condições de não fluxo e não deslizamento representando fronteiras sólidas estáticas (condições de parede), condição de pressão atmosférica prescrita (pressão de entrada) e condição de velocidade do escoamento prescrita (velocidade de entrada). Condições de contorno de interface são implementadas na fronteira de movimento da parede móvel. A malha computacional foi confeccionada com base na geometria e no mesmo *software* ANSYS *Meshing* com elementos regulares com tamanho de malha de 5 mm. A sensibilidade da malha foi executada (Sáo, 2021) e apresentou incerteza de, no máximo, 2%.

Foram realizados dez testes, sendo quatro com géis de carbopol (concentrações C_0,25 e C_0,25) e seis com suspensões de argila caulinítica (L_AA_28 e L_AAA_28_0.25A), com propriedades dos escoamentos e dos fluidos indicadas na Tabela 5.2. Em todos os testes o volume contido no reservatório foi fixado em 15 litros, conforme experimentos físicos. Na Tabela 5.2 são apresentados os experimentos avaliados segundo testes numéricos, a nomenclatura segue aquela definida nas Subseções 4.4.1 (*Experimentos de dam-break: géis de*

carbopol) e 4.4.3 (*Experimentos de dam-break: lamas*). As análises foram conduzidas com experimentos com comporta de movimento ascendente e descendente, bem como com a imposição de mais de um estágio de abertura.

Em relação ao tempo computacional, foram necessárias 30 horas de simulação para a obtenção de 60 segundos de escoamento. Os experimentos com apenas um estágio de abertura foram executados por menos tempo, tempo de escoamento inferior a 60 segundos, entretanto os demais casos exigiram mais tempo de processamento, pois foi necessário avaliar o escoamento por um período de 90 a 180 segundos.

Tabela 5.2 - Dados do ensaio (velocidade de descida da comporta V_D , estágio de abertura e inclinação do canal θ) e dos fluidos-teste (tensão limite de escoamento τ_c , índice de consistência K_n , índice de escoamento n e massa específica ρ).

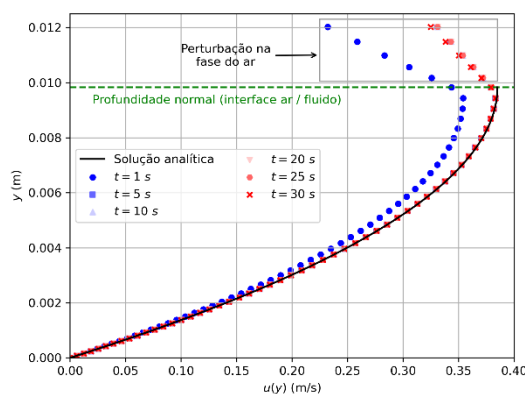
Caso	V_D (m/s)	Estágio	θ (°)	τ_c (Pa)	K_n (Pa s ⁿ)	n (-)	ρ (kg/m ³)
C1-CI-4	0,0091	1	4,00	28,66	6,33	0,45	1010,72
C3-CI-4	0,0091	2	4,00	27,91	7,42	0,42	1008,53
C17-CI-4	0,0091	1	4,00	66,26	25,01	0,36	1012,07
C19-CI-4	0,0091	2	4,00	68,28	24,94	0,36	1013,21
L1-0	0,0091	1	0,00	20,62	0,38	0,81	1463,00
L2-0	0,0091	2	0,00	21,24	0,24	0,90	1450,00
L4-0	0,0091	Movimento ascendente	0,00	26,63	0,24	0,87	1457,00
L30-0	0,0091	1	0,00	84,03	0,40	0,95	1535,00
L31-0	0,0091	2	0,00	75,41	0,93	0,76	1545,00
L32-0	0,0091	Movimento ascendente	0,00	71,34	0,61	0,86	1531,00

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1 Perfis de velocidade ao longo da profundidade de escoamentos viscoplásticos evoluindo em canal inclinado

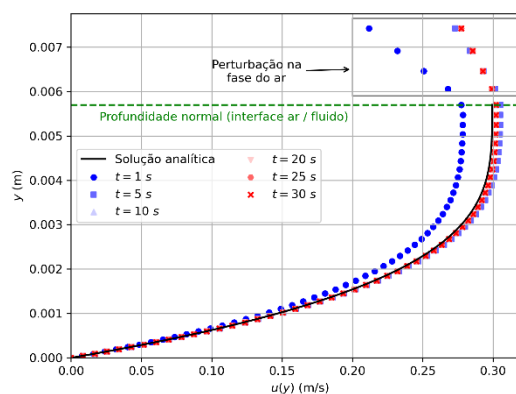
Na Figura 5.5 e Figura 5.6 são mostradas as confrontações numérico-analítica dos perfis de velocidade dos casos *N* e *LP*. Os perfis de velocidade em diferentes instantes de tempo indicam que o escoamento se estabeleceu ao longo do tempo, convergindo para uma solução numérica em regime permanente em $t \approx 10$ s. Os pontos numéricos acima da reta horizontal que representa a profundidade normal se referem à perturbação na fase correspondente ao ar ambiente, já que o modelo numérico utiliza o modelo multifásico. Por se tratar de uma região fora do escoamento de interesse e de uma fase menos densa e muito menos viscosa do que o fluido-teste, o ar ambiente gera interações desprezíveis com o fluido-teste (FERREIRA, 2013); assim, a malhagem não foi implementada com o mesmo nível de refinamento em comparação com regiões de profundidades menores.

Figura 5.5 - Perfis de velocidade analítico (linha contínua) e numéricos (pontos dispersos) para fluido Newtoniano (caso *N*).



(a) Caso *HB1*

Figura 5.6 - Perfis de velocidade analítico (linha contínua) e numéricos (pontos dispersos) para fluido lei de potência (caso *LP*).



(b) Caso *HB2*

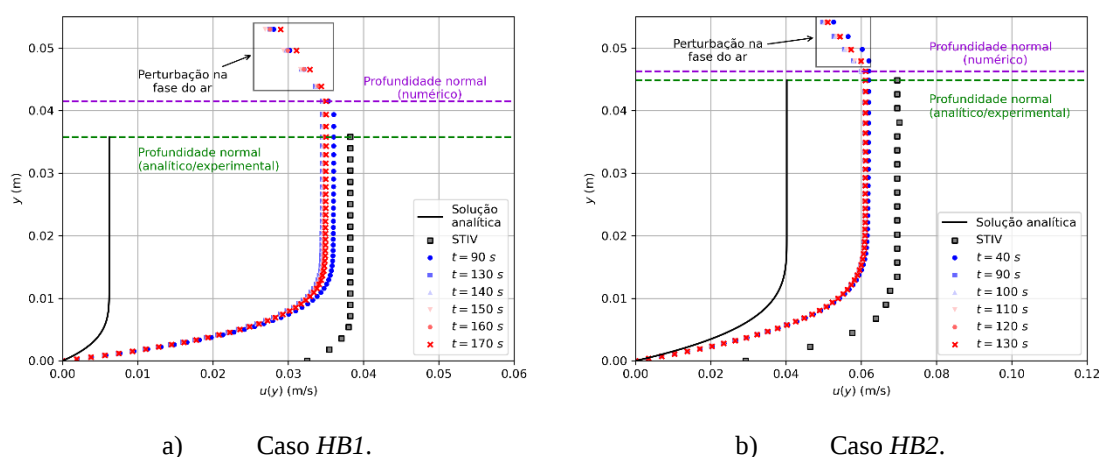
Fonte: Próprio autor.

A confrontação numérico-analítica pode ser considerada boa pela proximidade tanto dos perfis de velocidade quanto das profundidades normais numéricos e analíticos, o que indica a adequabilidade da metodologia empregada, ou seja, métodos numéricos adequados, resolução de malha adequada e critérios de convergência suficientes. Destaca-se que a geometria empregada no modelo numérico é bidimensional e, portanto, não contabiliza possíveis efeitos de atrito de parede lateral do canal – assim como a solução analítica não os contabilizam. Uma

eventual confrontação do modelo tridimensional com a solução analítica deve ser acompanhada, necessariamente, da verificação dos perfis de velocidade em uma mesma seção transversal a fim de se estabelecer a distância na qual os efeitos de parede são desprezíveis. O Grupo vem envidando esforços nessa direção.

As confrontações numérico-analítica-experimentais para os casos *HB1* e *HB2* são mostradas na Figura 5.7. Observa-se que, assim como nos casos *N* e *LP*, os perfis de velocidade numéricos (pontos dispersos coloridos) convergem para soluções em regime permanente, ainda que em tempos consideravelmente maiores devido à maior viscosidade do fluido escoante. Ao se considerar a condição de não deslizamento no fundo, observa-se que não existe boa confrontação entre resultados experimentais, analíticos e numéricos. O perfil de velocidade experimental indica a presença de deslizamento no fundo do canal, enquanto os perfis de velocidade analítico e numérico são obtidos com a condição de não deslizamento no fundo; nessas condições, o resultado numérico diverge tanto da solução analítica quanto das medições experimentais através da técnica *STIV*. Embora as velocidades da região não cisalhada (região de *plug*) estejam relativamente próximas daquelas medidas pela técnica *STIV*, com desvios da ordem de 7,8% para o caso *HB1* e de 12,2% para o caso *HB2*, os gradientes de velocidade na região cisalhada desviam significativamente.

Figura 5.7 - Perfis de velocidade analítico (linha contínua), numéricos (pontos dispersos coloridos) e experimentais (pontos dispersos quadrados cinzas) para fluido Herschel-Bulkley. Soluções analíticas e numéricas consideram a condição de não deslizamento no fundo.

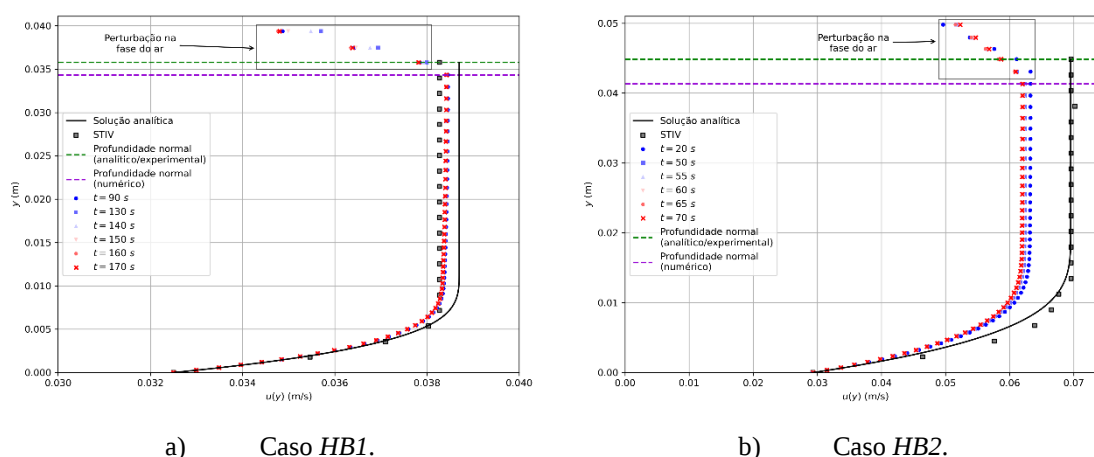


Fonte: Próprio autor.

Na direção da observação experimental de um efeito de deslizamento no fundo, as soluções analítica e numérica foram obtidas considerando-se a velocidade de deslizamento observada experimentalmente, conforme mostradas na Figura 5.8 para os casos *HB1* e *HB2*,

respectivamente. A implementação da velocidade de deslizamento nas soluções analíticas e numéricas resultou em perfis de velocidade semelhantes ao perfil obtido pela técnica *STIV* (pontos dispersos quadrados cinzas), com velocidades na região cisalhada da mesma ordem que aquelas obtidas experimentalmente e velocidades na região não cisalhada (região de *plug*) com desvios menores que 1% para o caso *HB1* e que 10% para o caso *HB2*. A incerteza na medição da vazão (item comentado na parte experimental) possivelmente afetou a solução numérica no caso *HB2*. Como a condição de contorno de velocidade de entrada é proveniente da vazão experimental, a profundidade normal obtida numericamente desviou em cerca de 7,5% daquela medida experimentalmente, conforme Figura 5.8.b.

Figura 5.8 - Perfis de velocidade analítico (linha contínua), numéricos (pontos dispersos coloridos) e experimentais (pontos dispersos quadrados cinzas) para fluido Herschel-Bulkley. Soluções analíticas e numéricas consideram o efeito de deslizamento no fundo.



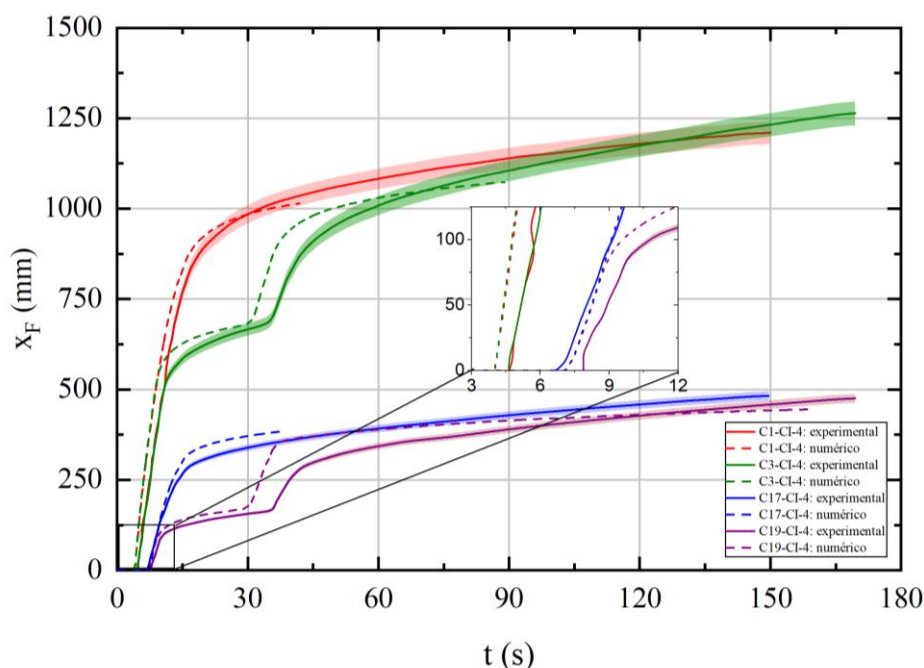
Fonte: Próprio autor.

Para avaliação da posição de início da região de *plug* no caso dos resultados numéricos apresentados na Figura 5.8, as taxas de deformação $\dot{\gamma}$ devem ser avaliadas ao longo da profundidade y , conforme Figura 5.9. Devido à técnica de regularização empregada, dada pela Equação 5.7, considera-se que a região em $\dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_c$ possui comportamento de um fluido lei de potência muito viscoso, enquanto que a região em $\dot{\gamma} > \dot{\gamma}_c$ segue o comportamento de um fluido ajustado ao modelo reológico de Herschel-Bulkley. Tal aproximação implica que a região $\dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_c$ é considerada a região de *plug* e estabelece o critério para definir a profundidade do início do *plug* z_0 : a profundidade que apresenta $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_c$ é dita z_0 . Em relação à solução analítica, os desvios na profundidade de *plug* são de 8,5% e de 6,4% para os casos *HB1* e *HB2*, respectivamente, o que reforça a boa confrontação entre os métodos de análise.

5.3.2 Evolução de alcances ao longo de canal

A Figura 5.9 e Figura 5.10 mostram os resultados da evolução do alcance da frente ao longo do tempo para escoamento envolvendo géis de carbopol e lamas, respectivamente. Observam-se dois regimes distintos no desenvolvimento do alcance da frente ao longo do tempo os diferentes experimentos realizados. O primeiro regime, dito “predominantemente inercial”, ocorre, de modo geral, nos instantes iniciais do escoamento e se caracteriza pela predominância da inércia sobre o efeito viscoso (Piau e Debiane, 2005).

Figura 5.9 - Confrontação numérico-experimental para experimentos conduzidos em canal inclinado com géis de carbopol e diferentes estágios de abertura de comporta.

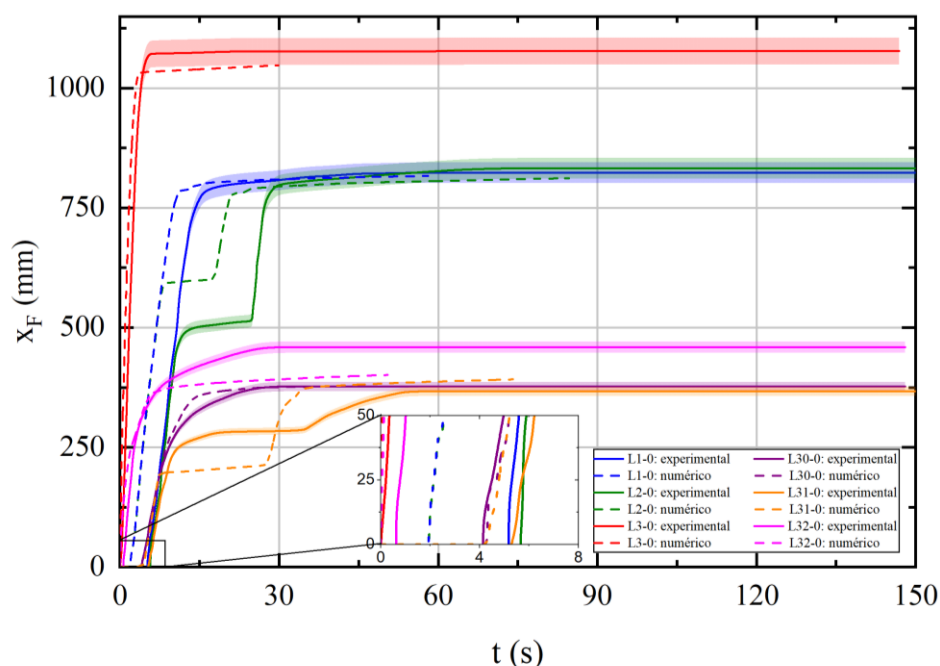


Fonte: Próprio autor.

Na Figura 5.9 observa-se o regime predominantemente inercial nos tempos iniciais de escoamento (entre 3,0 e 6,0 s para o gel C_{0,17} e entre 6,0 e 10,0 s para o gel C_{0,25}); na Figura 5.10, tal regime é verificado entre 0,0 e 8,0 segundos, sendo de elevada variação ao longo do tempo devido à lei de evolução do rebaixamento da comporta (presença de 1 e 2 estágios de abertura e, ainda, comporta de movimento ascendente). O segundo regime é dito “viscoso”, em que a espessura característica da frente já é bem menor do que a altura inicial do reservatório, e os efeitos viscosos dominam sobre o escoamento. A frente possui velocidade consideravelmente menor do que no primeiro regime, visto que efeitos advindos da liberação de material já não estão presentes. As simulações foram realizadas até que se obtivesse o regime

viscoso, não completando todo tempo avaliado nos experimentos devido ao custo computacional da simulação.

Figura 5.10 - Confrontação numérico-experimental para experimentos conduzidos em canal inclinado com géis de carbopol e diferentes estágios de abertura de comporta.



Fonte: Próprio autor.

De forma geral, boa confrontação numérico-experimental foi verificada nos períodos caracterizados pelo regime predominantemente inercial, inclusive nos instantes iniciais, em que a comporta já estava se deslocando e o fluido deslizando sobre ela, sem ainda ter feito contato com a superfície (verifica-se em todos os casos inclinação da curva de alcance, nos tempos iniciais, semelhantes para dados experimentais e numéricos). Entretanto, percebem-se diferenças no segundo regime, dito viscoso, sobretudo nas velocidades da frente. Nesse regime, as simulações numéricas tendem a fornecer velocidades menores do que aquelas observadas em experimentos, o que é explicado pela predominância de efeitos viscosos no escoamento. Sendo as parcelas inerciais desprezíveis, a sensibilidade na reometria dos fluidos e, sobretudo, o efeito das paredes laterais são potencializados (Balmforth et al., 2007), o que vem a distanciar os resultados numéricos dos experimentais. As paredes laterais introduzem atrito, que produzem um campo bidimensional de velocidade em cada seção transversal do escoamento. Como recomendação, simulações tridimensionais podem trazer resultados mais precisos no segundo regime, tendo em vista que consideraria o efeito de paredes laterais.

Em termos da presença de estágios de abertura, os resultados numéricos distanciam-se dos experimentais no desenvolvimento da curva de alcance no segundo estágio de descida da comporta. Fica claro a partir da Figura 5.10, especialmente pelo confronto dos experimentos com 2 estágios de abertura, que a diferença de comportamento de avanço entre numérico e experimental ocorre no segundo estágio de abertura. Esse efeito, além de condicionado pelas diferenças de regime viscoso e inércia, também pode ser explicado por eventuais falhas de sincronização da abertura da comporta nos experimentos.

Por fim, vale ressaltar que a definição da distância de alcance, associada à parada do escoamento e, portanto, a $t \rightarrow \infty$, não foi tomada rigorosamente dessa forma em função da dificuldade em caracterizar o comportamento estático do escoamento. Assim, foi considerado como tempo de parado aquele em que as velocidades experimentais das frentes viscoplásticas atingissem valores inferiores a 0,0005 m/s. Numericamente, a avaliação associada à parada do escoamento exigiria o uso da técnica *Augmented Lagrangian Method* para o tratamento da viscosidade aparente. Embora a técnica de regularização de bi-viscosidade seja efetiva para avaliar uma grande janela de tempo do escoamento, os instantes de parada não são capturados com a precisão desejada. Isso se deve ao fato de que os instantes de parada estão associados a baixíssimas taxas de deformação ($\dot{\gamma} \rightarrow 0$) e o modelo de bi-viscosidade (Equação 5.7) necessariamente considera um modelo Newtoniano bastante viscoso nesse domínio de taxa de deformação; logo, incapaz de modelar exatamente a parada do escoamento. Em função de tal situação, nota-se na Figura 5.9 e Figura 5.10, a tendência de continuidade do avanço do escoamento experimentais, entretanto deve-se atentar aos baixos níveis de velocidade nos tempos superiores a 140 s (velocidade $< 0,0005$ m/s, podendo ser vista como ≈ 0).

5.4 CONCLUSÃO

Os resultados numéricos apresentados neste capítulo tiveram como objetivo elucidar o comportamento do código numérico em fornecer o alcance de fluidos de natureza viscoplástica em situações com diferentes configurações de estágios de abertura da comporta e materiais. Ainda que baseado em poucas confrontações, foi possível verificar boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos, principalmente, nos tempos iniciais de abertura da comporta. Dessa forma, pode-se corroborar, mais uma vez, o potencial em empregar simulações de *Computational Fluid Dynamics* (CFD) para resolver problemas de *dam-break* (notadamente em fluidos viscoplásticos), entretanto considerações de homogeneidade do rejeito, tanto em

termos físicos quanto reológicos, bem como ausência de processo de segregação de partículas devem ser garantidas.

Simulações de escoamentos *dam-break* com equações completas de CFD em domínio espacial tridimensional (códigos ANSYS FLUENT e OpenFOAM, por exemplo), sobretudo em casos reais com terrenos complexos, são práticas que geram um maior custo computacional. No entanto, avanços computacionais recentes podem ser capazes de mitigar esse problema, através de paralelização das simulações em *clusters* de simulação computacional e uso mais amplo de processadores gráficos (GPUs). No momento, quando da análise de problemas reais de *dam-break*, alternativas como o uso de equações promediadas na direção vertical (Equações de Águas Rasas – Saint-Venant, aplicadas pelos códigos HEC-RAS e FLO-2D, por exemplo) são empregadas para avaliação do escoamento em termos de área de inundação e profundidades. Porém, a avaliação mais detalhada de perfis de velocidade ao longo da profundidade só é possível em códigos de equações completas e casos idealizados, como os analisados neste trabalho, o que pode ser uma primeira aproximação para melhor entender e prever problemas de *dam-break* reais.

6 CONCLUSÕES GERAIS E PERSPECTIVAS

Nesta tese associa-se o estudo e análise de escoamentos de fluidos controlados em nível de laboratório àqueles de escoamentos naturais, mais especificamente com presença significativa de argila, os quais poderiam se inserir, segundo a concentração, nas categorias de escoamentos fracamente hiperconcentrados aos *mudflows*. Esse tipo de fluido pode ser modelado a partir do emprego do modelo reológico de Herschel-Bulkley, ainda que se saiba que para baixas concentrações volumétricas de argila (Maciel et al., 2009) o modelo reológico mais indicado pode ser até mesmo o newtoniano. Os modelos de avaliação de naturezas diversas, tanto para escoamentos em regime permanente e uniforme quanto para aqueles de natureza transiente (como o *dam-break*), costumam ser baseados em condições simplificadoras que diferem das situações reais envolvidas nesses escoamentos. Nesse sentido, há a necessidade de se verificar, a título de exemplo, o comportamento da evolução de perfis de velocidade ao longo da profundidade de escoamentos de fluidos viscoplásticos e os efeitos atuantes sobre eles. Também torna-se importante avaliar o desenvolvimento, em termos de alcance e hidrograma, de frentes viscoplásticas advindas de *dam-break* e como a liberação do material e velocidade de movimentação da comporta de represamento interferem nesses parâmetros. Assim, a partir de experimentação física e documentação dos resultados de perfis de velocidade, alcances e hidrogramas, pôde-se identificar e compreender efeitos capazes de atuarem sobre o comportamento desses escoamentos. Nesta perspectiva, este capítulo apresenta as conclusões da tese, produções desenvolvidas ao longo do doutoramento e as recomendações para trabalhos futuros relacionados às temáticas tratadas.

6.1 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento da velocidade ao longo da profundidade de escoamentos de fluidos viscoplásticos evoluindo em canal inclinado e verificar a influência de abertura de comporta sobre escoamentos dessa natureza advindos da liberação de material represado (*dam-break*). Como forma de alcançar os objetivos traçados, duas fases de natureza experimental foram definidas: 1) medição de velocidade ao longo da profundidade do escoamento (emprego de gel de carbopol) por meio da implementação de técnica de velocimetria por imagens baseada no método STIV (*Space-Time Image Velocimetry*); 2) realização de experimentos de liberação de material (simulação experimental de *dam-break*), em canal e plano inclinado, empregando aparato experimental desenvolvido especificamente para verificar os possíveis efeitos tanto da velocidade de abertura de comporta quanto da forma de liberação do material (instantânea ou sequencial) sobre as leis de alcance, alcances finais e hidrogramas. Perfis de velocidade medidos ao longo da profundidade de escoamento, tratados no Capítulo 3, e resultados de evolução de alcance, dispostos ao longo do Capítulo 4, são confrontados numericamente, cujos resultados são apresentados no Capítulo 5. Assim, as Subseções 6.1.1, 6.1.2 e 6.1.3 apresentam, de forma mais detalhada, as conclusões deste trabalho.

6.1.1 Medição de perfil de velocidade a partir de técnica de velocimetria

A partir de conjuntos experimentais capazes de simular escoamento de natureza viscoplástica, análises sobre campo de velocidade de avanço de frentes foram realizadas, conforme apresentado no Capítulo 3. Os experimentos de velocimetria foram conduzidos em canal inclinado e com fluido teste (gel de carbopol) de comportamento reológico ajustado ao modelo Herschel-Bulkley. Tendo como objetivo a obtenção do campo de velocidade ao longo da profundidade do canal e comparação com modelo teórico, diferentes configurações experimentais, com alteração de vazão, inclinação e propriedades reológicas do fluido, foram testadas.

As medidas de velocimetria foram possibilitadas a partir do desenvolvimento de metodologia própria de geração e análise de imagens espaço-temporal. Com o uso de câmera ultrarrápida e plano laser, a captura do deslocamento de traçadores contidos do interior do fluido tornou-se possível, fornecendo imagens de elevada resolução espacial (cerca de $83 \mu\text{m}/\text{px}$). A implementação de código baseado na Transformada *Wavelet* Contínua 2D para análise espaço-

temporal das imagens se mostrou um caminho assertivo na determinação do perfil de velocidades do escoamento, bem como mais rigoroso e de fácil implementação, além de abrir possibilidade de expansão de tal ferramenta em avaliações que envolvam velocimetria.

Os perfis de velocidade obtidos via técnica de velocimetria implantada retrataram o comportamento característico de escoamento de fluido viscoplástico do tipo Herschel-Bulkley, tanto a região do *plug* quanto da zona cisalhada. Entretanto, efeito de deslizamento de parede foi observado e a partir do modelo teórico, baseado na teoria da lubrificação, ficou evidente o quanto a presença de tal efeito pode ser prejudicial ao uso do próprio modelo teórico sem a adequada avaliação do escoamento. O uso da velocidade experimental no fundo no modelo teórico foi capaz de corrigir as discrepâncias inicialmente observadas. Também foi possível identificar o efeito de parede sobre o escoamento de fluido viscoplástico, evidenciando a inadequabilidade do modelo teórico utilizado em retratar perfis de velocidade na proximidade das bordas do escoamento, face às condicionantes experimentais.

Por fim, a medição do perfil de velocidade pode ser utilizada como uma ferramenta que permite, assim como o reômetro, inferir sobre propriedades reológicas dos materiais (recompor curva de fluxo). Ainda que diferenças de comportamento reológicos tenham sido constatadas considerando escoamento de gel de carbopol em canal e reologia medida por reômetro, pode-se utilizar da técnica de medição de perfil de velocidade para obter estimativas de reologia do material, devendo-se, no entanto, atentar-se que efeitos de escala e de deslizamento nas paredes (estes devido à elevada consistência do fluido e à microestrutura do carbopol) podem alterar ligeiramente os parâmetros reológicos, especialmente e em maior efeito, o índice de consistência em caso de materiais de menor fluidez.

6.1.2 Escoamentos de natureza viscoplástica em situação de *dam-break*

O desenvolvimento de um aparato experimental capaz de realizar a movimentação de uma comporta, segundo diferentes configurações (movimentação ascendente e descendente), e com possibilidade de abertura gradual, permitiu gerar escoamentos controlados, tendo como diferencial de análise a imposição de níveis de velocidade de ruptura e de estágios de liberação de material (simulação de brechas). A partir da análise de imagens, processadas usando os conceitos associados ao método de velocimetria apresentado no Capítulo 3, curvas de alcance, com elevada resolução espacial, foram obtidas, permitindo a análise de efeitos presentes em uma eventual ruptura de barragem. Neste trabalho associam-se situações controladas de laboratório, distinta velocidade de ruptura e liberação gradual de material, aos possíveis efeitos

reais presentes em rupturas de barragem, ainda que as escalas reais sejam maiores e as rupturas ocorram de forma não controlada/uniformizada. De forma global, o Capítulo 4 aponta para as seguintes conclusões:

- A condição da geometria em que ocorre o avanço de frentes viscoplásticas é um efeito com forte influência sobre o alcance final. Geometria canalizada aumenta, com relação ao plano inclinado, os alcances finais, independentemente da velocidade de abertura da comporta, concentração do fluido e estágios de liberação de material. Transpassando essa conclusão para situações reais, pode-se inferir que a geometria a jusante da barragem (vale mais encaixado ou planície de inundação mais extensa) atua diretamente sobre os alcances finais resultantes da ruptura;
- A velocidade de levantamento de comporta não se mostrou como efeito significativo sobre o alcance final de géis de carbopol, provavelmente em função de efeitos viscosos e plásticos dos fluidos avaliados dominarem sobre os efeitos de inércia nas condições de velocidades testadas;
- A velocidade de levantamento de comporta é um efeito de forte influência nos tempos iniciais da ruptura, implicando em maiores velocidades iniciais de avanço quanto maior a velocidade de liberação do material;
- O tempo associado ao desenvolvimento dos alcances é influenciado pela velocidade de levantamento e configuração de liberação do material (instantânea ou gradual). Quanto mais rápida a liberação do material mais rápida a frente viscoplástica alcança uma determinada posição. Em termos de situação real, rupturas de natureza instantânea possibilitam chegada antecipada de frentes viscoplásticas comparando-se com rupturas com formação de brechas;
- A configuração de abertura gradual (formação de brecha) não se mostrou significativa na definição do alcance final. Tanto experimentos com géis quanto com lamas evidenciaram alcances finais de mesma ordem de grandeza para os diferentes estágios de abertura empregados;
- Hidrogramas de ruptura, para géis de carbopol, são influenciados pela velocidade de abertura da comporta e também pela liberação gradual de material. Quanto maior a velocidade de abertura e menor o número de estágios de liberação de fluido, maiores os picos de vazão e menor o tempo de pico. Essa conclusão, quando tomada segundo um problema real, indicaria que rupturas de barragens com formação de brechas provocam hidrogramas de menor pico de vazão e maior tempo de pico, implicando em maior tempo para

desocupação de áreas afetadas pela mancha de inundação uma vez que as frentes viscoplásticas viajam com menores velocidades;

- Efeitos de inércia podem atuar, de maneira considerável, em situações que associam menor fluidez do material e liberação instantânea, promovendo maiores alcances finais e rápido avanço nos tempos iniciais após abertura da comporta. Tal constatação foi verificada em experimentos com lama.

De forma definitiva, ensaios laboratoriais de apoio aos estudos de escoamentos de fluidos viscoplásticos do tipo *dam-break* devem considerar o mecanismo de liberação do material. Nesse sentido, a avaliação de rompimento de barragens, quando verificada segundo modelos empíricos e numéricos, deve-se atentar à existência ou não de efeitos de formação de brecha no caso de ruptura, pois tal condição implicará diretamente sobre o hidrograma da ruptura e nos níveis iniciais de alcance da frente. Também é importante destacar que as características do fluido poderão atuar de forma conjunta aos mecanismos de liberação, implicando em análises cruzadas de propriedades reológicas e condições de escoamento, efeitos esses que podem ser quantificados pelo número de Herschel-Bulkley.

Como inicialmente colocado, esta tese, de pesquisa de natureza básica experimental, deixa como legado um vasto banco de dados experimentais rigorosamente controlados que facilitam, espera-se, testes de calibração e validação de modelos matemáticos, como uma base metodológica consistente em trabalhar um problema real em escala no laboratório. Para tanto, análise dimensional direcionada e, respeitando os efeitos de escala, permitirá transpassar resultados de laboratório à natureza.

6.1.3 Confrontação numérico-experimental de escoamentos viscoplásticos

A partir de experimentos *dam-break* realizados com géis de carbopol e suspensões de água, argila caulinítica e areia, em canal inclinado, fixando velocidade de abertura e empregando diferentes estágios de abertura da comporta (experimentos e resultados do Capítulo 4), confrontações numérico-experimental de alcances foram realizadas empregando o *software* ANSYS *Fluent* 14.5. Com base nos resultados do Capítulo 5 as seguintes conclusões são elencadas:

- O código numérico simulou com elevada proximidade, quando comparado aos dados experimentais, o regime transiente dos escoamentos, tanto para abertura instantânea quanto gradual, considerando os níveis de velocidade das frentes nessa fase;
- No trecho de redução da velocidade do escoamento, qual seja, região onde o regime viscoso domina sobre o inercial, o código numérico, especialmente para experimentos com mais de um estágio de abertura da comporta, não apresentou boa confrontação com os resultados experimentais, que pode ter sido advindo de uma adição de novo efeito viscoso quando de aberturas subsequentes ou até mesmo de falhas de sincronismos de liberação de material durante a liberação, as quais deverão ser melhor verificadas.

6.2 PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Emprego do método de velocimetria desenvolvida

- estender a faixa de concentração avaliada a fim de verificar o comportamento da técnica de velocimetria em escoamentos de maiores níveis de velocidade;
- estender o banco de dados experimentais com avaliação de perfis de velocidade ao longo da seção transversal do canal, para diferentes concentrações mássicas de géis de carbopol, de forma a identificar com maior rigor os efeitos de parede associados às características de reologia do fluido e possibilitar implementar correções nos modelos analíticos de velocidade e vazão de escoamentos de fluidos viscoplásticos de reologia representado pelo modelo Herschel-Bulkley;
- aplicar a técnica de velocimetria em escoamentos com presença de instabilidades superficiais (*roll waves*) a fim de verificar a possibilidade de obter os níveis de velocidade ao longo da profundidade das frentes de ondas.

Testes tipo *dam-break*

- estender as condições de avaliação de experimentos *dam-break* com suspensões de argila caulinítica: empregar diferentes razões de aspecto do reservatório (H/L), diferentes velocidades de movimentação da comporta e materiais com maior faixa de concentração;
- implementar, considerando escoamentos com lamas, sistema de medição de nível no reservatório para possibilitar a obtenção dos hidrogramas;
- com dados de maior abrangência em termos de razão de aspecto, velocidade de abertura de comporta e reologia do fluido, empregar os adimensionais característicos de *dam-break*, verificados no Capítulo 4, e realizar análise crítica mais refinada dos efeitos físicos associados às rupturas de barragem;
- alterar a configuração do reservatório para formato de prisma de geometria trapezoidal a fim de representar com maior aproximação formação de brechas características;
- posicionar obstáculos ao longo do canal e verificar os efeitos sobre os alcances finais e seu desenvolvimento, bem como o comportamento de hidrogramas.

6.3 PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

Ao longo do período de desenvolvimento do doutorado diferentes produções científicas foram realizadas, todas tendo como temática central a reologia de materiais de natureza não newtoniana, especialmente do tipo Herschel-Bulkley, com foco em escoamentos naturais. Dessa forma, é listada na sequência a produção científica ao longo deste doutoramento:

SÁO, Y. T.; **PEREIRA, J. B.**; MACIEL, G. F. Evaluation of shear rate formulations through steady uniform non-Newtonian fluid flows in the context of shallow-water equations. *Brazilian Journal of Water Resources*, v. 28, e19, 2023.

MACIEL, G. F.; **PEREIRA, J. B.**; SÁO, Y. T.; FERREIRA, F. O.; GARCIA, L. F. Impulse wave in the Brazilian Lake of Capitólio. Trabalho aceito para publicação no *Brazilian Journal of Water Resources*, 2023.

PEREIRA, J. B.; SÁO, Y. T.; MACIEL, G. F. Numerical and experimental application of the automated slump test for yield stress evaluation of mineralogical and polymeric materials. *Rheologica Acta*, v. 61, n. 2, p. 163-182, 2022.

PEREIRA, J.B.; MACIEL, G.F. Automated slump test: An effective alternative in predicting rheological properties and an efficient tool for providing the quality control of materials. *Measurement*, v. 178, p. 109384, 2021.

SÁO, Y. T.; **PEREIRA, J. B.**; FIOROT, G. H.; MACIEL, G. F. Obtaining flow curve for viscoplastic fluids through inclined open-channel apparatus. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering (online)*, v. 43, p. 278, 2021.

FERREIRA, F. O.; MACIEL, G. F. ; **PEREIRA, J.B.** Roll waves and their generation criteria. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 26, p. 1-18, 2021

PEREIRA, J.B.; MACIEL, G. F. Medida de consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone automatizado: sua validação e potencialidades. *Matéria - Rio de Janeiro*, v. 26, p. 1-13, 2021

PEREIRA, J. B.; MACIEL, G. F. Escoamentos viscoplásticos evoluindo em canal inclinado a partir de ruptura tipo barragem. Trabalho aceito para publicação no XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2023.

MACIEL, G. F.; **PEREIRA, J. B.;** SÃO, Y. T.; FERREIRA, F. O.; GARCIA, L. F. Queda de bloco de rocha no lago de Capitólio/MG - reflexão sobre ondas de impacto. Trabalho aceito para publicação no XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2023.

PEREIRA, J. B.; MATTIOLLI, H.; SÃO, Y. T.; MACIEL, G. F. Medição de perfil de velocidade de fluido viscoplástico: aplicação da função CWT 2D na análise de velocimetria *STIV*. XXX Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Brasil, 2022.

ROCHO, V. R.; FIOROT, G. H.; MÖLLER, S. V.; **PEREIRA, J. B.;** CUNHA, E. F.; MACIEL, G. F. An empirical assessment of roll waves evolution in mud-like fluids flowing down steep slopes. ENCIT 2022, Brasil, 2022.

MACIEL, G. F.; **PEREIRA, J. B.;** SÃO, Y. T. Dispositivos de laboratório como suporte à medição de propriedades reológicas e dinâmicas de materiais representativos de corridas de lama. I Simpósio Nacional de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica, Brasil, 2022.

PEREIRA, J. B.; MATTIOLLI, H.; SÃO, Y. T.; MACIEL, G. F. Caracterização experimental de campo de velocidade de fluido viscoplástico em canal inclinado. In: XXIX Congresso Latinoamericano de Hidráulica, México, 2021.

REFERÊNCIAS

- ABERLE, J. *et al.* **Experimental hydraulics: methods, instrumentation, data processing and management - volume ii: instrumentation and measurement techniques.** CRC Press, London 2017.
- ANCEY, C. Plasticity and geophysical flows: a review. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 142, n. 1-3, p. 4-35, 2007.
- ANCEY, C.; ANDREINI, N.; EPELY-CHAUVIN, G. Viscoplastic dambreak waves: Review of simple computational approaches and comparison with experiments. **Advances in Water Resources**, v. 48, p. 79-91, 2012.
- BRASIL, **Agência Nacional de Mineração (ANM)**. 2022. Resolução N°.95, de 7 de fevereiro de 2022. Revoga a Portaria DNPM nº 70.389/2017, a Resolução ANM nº 13/2019, a Resolução ANM nº 32/2020 e a Resolução ANM nº 40/2020, a Resolução ANM nº 51/2020 e a Resolução ANM nº 56/2021
- BELAID, H. A.; MOHAMED, M.; ZINEEDDINE, L.; KARIM, B.; MENDES, P. R. de S. Viscoplastic fluid flow in pipes: a rheological study using in-situ laser Doppler velocimetry. **Applied Rheology**, v. 34, n. 1, 2024.
- ANSYS Inc. **ANSYS FLUENT 14.5 User's Guide**, Southpointe, 275 Technology Drive, Canonsburg, ANSYS Inc., USA, 2012.
- ANTOINE, J. P. *et al.* **Two-dimensional wavelets and their relatives.** Cambridge University Press, 2008.
- AZIMI, A. H. Free surface flow characteristics of multi-phase viscoplastic fluids on inclined flumes and planes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 78, p. 59-69, 2016.
- BAKER, V. R. Hypotheses and geomorphological reasoning. **The Scientific Nature of Geomorphology**, p. 57-85, 1996.
- BALMFORTH, N. J. *et al.* Viscoplastic flow over an inclined surface. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 139, n. 1-2, p. 103-127, 2006.
- BALMFORTH, N. J. *et al.* Viscoplastic flow over an inclined surface. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 142, n. 1-3, p. 219-243, 2007.
- BALMFORTH, N. J.; CRASTER, R. V. A consistent thin-layer theory for Bingham plastics. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 84, n. 1, p. 65-81, 1999.
- BALMFORTH, N. J.; FRIGAARD, I. A.; OVARLEZ, G. Yielding to stress: recent developments in viscoplastic fluid mechanics. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 46, p. 121-146, 2014.
- BALMFORTH, N. J.; PROVENZALE, A. **Geomorphological Fluid Mechanics.** Springer Science & Business Media, 2001.

BARDOU, E. **Méthodologie de diagnostic des laves torrentielles sur un bassin versant alpin** (Tese de Doutorado). Ecole Polytechnique Fédérale, 2002.

BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WALTERS, K. **An introduction to rheology**. Amsterdam: Elsevier, 1989. 199 p.

BARNES, H. A. The yield stress-a review or ‘*παντα ρει*’-everything flows? **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 81, n. 1-2, p. 133-178, 1999.

BATES, B. M.; ANCEY, C. The dam-break problem for eroding viscoplastic fluids. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 243, p. 64-78, 2017.

BINGHAM, E. C. **Fluidity and Plasticity**. McGraw Hill, London, 1922, p. 231.

BOGER, D. V. Rheology and the resource industries. **Chemical Engineering Science**, v. 64, n. 22, p. 4525-4536, 2009.

BOGER, D. V. Rheology of slurries and environmental impacts in the mining industry. Annual **Review of Chemical and Biomolecular Engineering**, v. 4, p. 239-257, 2013.

BOGER, David V.; WALTERS, Kenneth. **Rheological phenomena in focus**. Elsevier, 2012.

BOWKER, L. N.; CHAMBERS, D. M. In the dark shadow of the supercycle tailings failure risk & public liability reach all time highs. **Environments**, v. 4, n. 4, p. 75, 2017.

CHÁCARA, D. M.; OLIVEIRA FILHO, W. L. Rheology of mine tailings deposits for dam break analyses. **REM-International Engineering Journal**, v. 74, p. 235-243, 2021.

CHAMBON, G.; GHEMMOUR, A.; LAIGLE, D. Gravity-driven surges of a viscoplastic fluid: An experimental study. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 158, n. 1-3, p. 54-62, 2009.

CHAMBON, G.; GHEMMOUR, A.; NAAIM, M. Experimental investigation of viscoplastic free-surface flows in a steady uniform regime. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 754, p. 332-364, 2014.

CHANSON, H; JARNY, S.; COUSSOT, P. Dam break wave of thixotropic fluid. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 132, n. 3, p. 280-293, 2006.

CHENG, D. C. H. Yield stress: a time-dependent property and how to measure it. **Rheologica Acta**, v. 25, n. 5, p. 542-554, 1986.

CLOITRE, M.; BONNECAZE, R. T. A review on wall slip in high solid dispersions. **Rheologica Acta**, v. 56, n. 3, p. 283-305, 2017.

COCHARD, S.; ANCEY, C. Experimental investigation of the spreading of viscoplastic fluids on inclined planes. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 158, n. 1-3, p. 73-84, 2009.

COUSSOT, P. et al. Avalanche behavior in yield stress fluids. **Physical Review Letters**, v. 88, n. 17, p. 175501, 2002.

COUSSOT, P. *et al.* Direct determination of rheological characteristics of debris flows. **Journal Hydraulic Engineering**, v.124, p.865-868, 1998.

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

COUSSOT, P. Yield stress fluid flows: A review of experimental data. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 211, p. 31-49, 2014.

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

COUSSOT, P.; PROUST, S.; ANCEY, C. Rheological interpretation of deposits of yield stress fluids. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 66, n. 1, p. 55-70, 1996.

DE PAULA, I. B.; AZEVEDO, L. F. A. **Medição de escoamentos turbulentos utilizando Velocimetria por Imagem de Partículas**. 1ed. São Paulo: ABCM USP, v. 8, pp. 133-209, 2012.

DINKGREVE, M. *et al.* On different ways of measuring the yield stress. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 238, p. 233-241, 2016.

FERRARIS, C. F.; DE LARRARD, F. Modified slump test to measure rheological parameters of fresh concrete. **Cement, Concrete, and Aggregates**, v. 20, n. 2, p. 241-247, 1998.

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

FREYDIER, P.; CHAMBON, G.; NAAIM, M. Experimental characterization of velocity fields within the front of viscoplastic surges down an incline. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 240, p. 56-69, 2017.

FRIGAARD, I. A.; NOUAR, C. "On the usage of viscosity regularisation methods for viscoplastic fluid flow computation," **Journal of non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 127, n. 1, p. 1-26, 2005.

FUJITA, I. *et al.* Accuracy of Ku-Stiv for Discharge Measurement in Ghana, Africa. **Journal of Japan Society of Civil Engineers**, v. 73, n. 4, p. I_499-I_504, 2017.

FUJITA, I. *et al.* **Development of KU-STIV: software to measure surface velocity distribution and discharge from river surface images**. In: Proceedings of the 37th IAHR world congress. 2017. p. 5284-5292.

FUJITA, I.; WATANABE, H.; TSUBAKI, R. Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: The space-time image velocimetry (STIV). **International Journal of River Basin Management**, v. 5, n. 2, p. 105-114, 2007.

GAO J.; FOURIE A. Spread is better: An investigation of the mini-slump test. **Minerals Engineering**, v. 71, p. 120-132, 2015.

GAO, J.; FOURIE, A. Using the flume test for yield stress measurement of thickened tailings. **Minerals Engineering**, v. 81, p. 116-127, 2015a.

GARCÍA-BLANCO, Y. J. *et al.* Rheological characterization of viscoplastic fluid flow in a pipe with wall slip using in situ particle image velocimetry. **Rheologica Acta**, v. 62, n. 2, p. 93-110, 2023.

GRIFFITHS, R. W. The dynamics of lava flows. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 32, n. 1, p. 477-518, 2000.

HACKLEY, V. A.; FERRARIS, C. F. **Guide to rheological nomenclature: Measurements in ceramic particulate systems**. Gaithersburg, MD, USA: National Institute of Standards and Technology, 2001.

HALABI, A. *et al.* Tailings dam failures: a historical analysis of the risk. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, v. 22, n. 2, p. 464-477, 2022.

HALDENWANG, R. *et al.* Laminar and transitionnal flow in open channel for nonnewtonian fluids. **Hydrotransport**, v. 15, pp. 755-768, 2002.

HATZIKIRIAKOS, S. G. Slip mechanisms in complex fluid flows. **Soft Matter**, v. 11, n. 40, p. 7851-7856, 2015.

HUANG, X.; GARCIA, M. H. A Herschel–Bulkley model for mud flow down a slope. **Journal of fluid mechanics**, v. 374, p. 305-333, 1998.

HUYNH, H. T.; ROUSSEL, N.; COUSSOT, P. Aging and free surface flow of a thixotropic fluid. **Physics of Fluids**, v. 17, n. 3, 2005.

IRGENS, F. **Continuum mechanics**. Berlin: Springer, 2008. 624 p.

IVERSON, R. M. *et al.* The perfect debris flow? Aggregated results from 28 large-scale experiments. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 115, n. F3, 2010.

JEYAPALAN, B.; JEY, K. J.; DUNCAN, M.; SEED, H. B. Analyses of Flow Failures of Mine Tailings Dams. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 109, n. 2, p. 150-171, 1983.

KALYON, D. M. Apparent slip and viscoplasticity of concentrated suspensions. **Journal of Rheology**, v. 49, n. 3, p. 621-640, 2005.

KHURANA, R.; MUGABE, D.; ETIENNE, X. L. Climate change, natural disasters, and institutional integrity. **World Development**, v. 157, p. 105931, (2022).

KIM, Y. *et al.* Measurement of debris flow velocity in flume using normal image by space-time image velocimetry incorporated with machine learning. **Measurement**, v. 199, p. 111218, 2022.

LE BOUTELLER, C. *et al.* Hydraulics and rheology of natural hyperconcentrated flows from Draix-Bleone observatory, French Alps. **Journal of Hydraulic Research**, v. 59, n. 2, p. 181-195, 2021.

LI, X.; ZHAO, J. Dam-break of mixtures consisting of non-Newtonian liquids and granular particles. **Powder Technology**, v. 338, p. 493-505, 2018.

LIU, H. **An experimental and numerical study of runout from a tailings dam failure**. 2018. 236 f. Tese (Doutorado) - The University of Western Australia, Perth, 2018.

LONG, W. J. *et al.* Rheological approach in proportioning and evaluating prestressed self-consolidating concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 82, p. 105-116, 2017.

MACHADO, N. C. **Retroanálise da propagação decorrente da ruptura da barragem do fundo com diferentes modelos numéricos e hipóteses de simulação**. 2017. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

MACIEL, G. F. *et al.* Experimental apparatus for roll-wave measurements and comparison with a 1d mathematical model. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 143, n. 11, p. 04017046, 2017.

MACIEL, G. F.; BARBOSA, M.; PEREIRA, J. B. Análise comparativa da tensão limite de escoamento de argamassas por meio da técnica de Pashias e reometria rotacional. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 21, p. 866-879, 2016.

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

MACIEL, G., TONIATI, A. L., FERREIRA, F. O. Cultura de gestão de riscos na mitigação de desastres 'naturais'. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 2, p. 671-686, 2021.

MALKIN, A. Y.; ISAYEV, A. I. **Rheology: concepts, methods and applications**. 2. ed. Toronto: ChemTec Publishing, 2012. 474 p.

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 de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"(UNESP), 2007.

MINUSSI, R. B.; MACIEL, G. F. Numerical experimental comparison of dam break flows with non-Newtonian fluids. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 34, n. 2, p. 167-178, 2012.

MOUKALLED, F.; MANGANI, L.; DARWISH, M. et al. **The finite volume method in computational fluid dynamics**. New York: Springer, v. 113, 2016.

MOYERS-GONZALEZ, M. et al. Non-isothermal thin-film flow of a viscoplastic material over topography: critical Bingham number for a partial slump. **Theoretical and Computational Fluid Dynamics**, p. 1-22, 2023.

MUCHIRI, D. et al. Numerical simulations of dam-break flows of viscoplastic fluids via Shallow Water equations. **Research Square**, 2023.

NSOM, B. *et al.* Bed slope effect on the dam break problem. **Journal of Hydraulic Research**, v. 38, n. 6, p. 459-464, 2000.

OCHIAI, H. et al. A fluidized landslide on a natural slope by artificial rainfall. **Landslides**, v. 1, p. 211-219, 2004.

OCHIAI, H.; SAMMORI, T.; OKADA, Y. Landslide experiments on artificial and natural slopes. **Progress in Landslide Science**, p. 209-226, 2007.

OVARLEZ, G. et al. Flows of suspensions of particles in yield stress fluids. **Journal of Rheology**, v. 59, n. 6, p. 1449-1486, 2015.

OWEN, J. R. et al. Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure. **International journal of disaster risk reduction**, v. 42, p. 101361, 2020.

PAIK, J. et al. A real-scale field experiment of debris flow for investigating its deposition and entrainment. **In: AGU Fall Meeting Abstracts**. 2012. p. EP53A-1010.

PASHIAS, N.; BOGER, D.; SUMMERS, J.; GLENISTER, D. A fifty cent rheometer for yield stress measurement. **Journal of Rheology**, v. 40, n. 6, p. 1179-1189, 1996.

PATALANO, A; GARCÍA, C. M.; RODRÍGUEZ, A. Rectification of image velocity results (RIVeR): a simple and user-friendly toolbox for large scale water surface particle image velocimetry (PIV) and particle tracking velocimetry (PTV). **Computers & Geosciences**, v. 109, p. 323-330, 2017.

PEREIRA, J. B. **Desenvolvimento de aparato automatizado de slump test: ferramenta de controle de qualidade e de caracterização reológica de materiais**. 2018. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"(UNESP), Ilha Solteira, 2018.

PEREIRA, J. B.; MACIEL, G. F. Automated slump test: An effective alternative in predicting rheological properties and an efficient tool for providing the quality control of materials. **Measurement**, v. 178, p. 109384, 2021.

PEREIRA, J. B.; SÃO, Y. T.; MACIEL, G. F. Numerical and experimental application of the automated slump test for yield stress evaluation of mineralogical and polymeric materials. **Rheologica Acta**, v. 61, n. 2, p. 163-182, 2022.

PERONA, P. Bostwick degree and rheological properties: an up-to-date viewpoint. **Applied Rheology**, v. 15, n. 4, p. 218–229, 2005.

PHILIPPOU, M. et al. Viscoplastic flow development in tubes and channels with wall slip. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 234, p. 69-81, 2016.

PIAU, J. M. Carbopol gels: Elastoviscoplastic and slippery glasses made of individual swollen sponges: Meso-and macroscopic properties, constitutive equations and scaling laws. **Journal of non-newtonian fluid mechanics**, v. 144, n. 1, p. 1-29, 2007.

PIAU, J. M. Flow of a yield stress fluid in a long domain. Application to flow on an inclined plane. **Journal of Rheology**, v. 40, n. 4, p. 711-723, 1996.

PIAU, J. M.; DEBIANE, K. Consistometers rheometry of power-law viscous fluids. **Journal of non-newtonian fluid mechanics**, v. 127, n. 2-3, p. 213-224, 2005.

PISSARRA, T. C. T. *et al.* Role of Mine Tailings in the Spatio-Temporal Distribution of Phosphorus in River Water: The Case of B1 Dam Break in Brumadinho. **Water**, v. 14, n. 10, p. 1572, 2022.

REINER, M. **Deformation, Strain and Flow**. H. K. Lewis, London, 1960.

RICO, M. *et al.* Reported tailings dam failures: a review of the European incidents in the worldwide context. **Journal of Hazardous Materials**, v. 152, n. 2, p. 846-852, 2008.

RICO, M.; BENITO, G.; SALGUEIRO, A.; DÍEZ-HERRERO, A.; PEREIRA, H. Reported tailings dam failures: a review of the european incidents in the worldwide context. **Journal of Hazardous Materials**, v. 152, n. 2, p. 846–852, 2008.

ROUSSEL, N. The LCPC BOX: a cheap and simple technique for yield stress measurements of SCC. **Materials and Structures**, v. 40, n. 9, p. 889-896, 2007.

ROUSSEL, N.; COUSSOT, P. Fifty-cent rheometer for yield stress measurements: from slump to spreading flow. **Journal of rheology**, v. 49, n. 3, p. 705–718, 2005.

SAKANO, V. K. **Métodos avançados para avaliação da natureza reológica de suspensões concentradas aplicados ao escoamento pós-colapso de barragens de rejeito**. 2022. 246 p. (Tese de doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo São Paulo, São Paulo, 2022.

SANVITALE, N.; BOWMAN, E. T.; GENEVOIS, R. Experimental measurements of velocity through granular-liquid flows. **Italian Journal of Engineering Geology and Environment**, p. 375-384, 2011.

SÁO, Y. T. *et al.* **Validação numérica de um escoamento de fluido não newtoniano no âmbito de corridas de lama**. In: XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, Buenos Aires. 2018. p. 250-258.

SÁO, Y. T. **Investigação numérico-experimental da influência de efeitos de inércia em escoamentos de fluidos viscoplásticos modelados como ruptura de barragem**. 2021. 152 f.

Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), 2021.

SÁO, Y. T. **Simulação numérica tridimensional da onda de lama decorrente do rompimento da barragem de fundão (Mariana - Mg): Uma primeira aproximação**. 2018. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2018.

SARAMITO, P.; SMUTEK, C.; CORDONNIER, B. Numerical modeling of shallow non-Newtonian flows: Part I. The 1D horizontal dam break problem revisited. **International Journal of Numerical Analysis & Modeling**, v. 4, n. 3, p. 283-298, 2013.

SARNO, L. *et al.* Velocity and volume fraction measurements of granular flows in a steep flume. **Environmental & Engineering Geoscience**, v. 27, n. 2, p. 245-257, 2021.

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

SPRINGMAN, S. *et al.* Landslide triggering experiment in a steep forested slope in Switzerland. In: **Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: The Academia and Practice of Geotechnical Engineering**. IOS Press, 2009. p. 1698-1701.

STOKER, J. J. **Water Waves: The Mathematical Theory with Applications**. Pure and Applied Mathematics, Interscience publishers, Inc., New York, 1957

TRAVIS, B.; TEAL, M.; GUSMAN, J. Best methods and inherent limitations of bulked flow modeling with HEC-RAS. In: **World Environmental and Water Resources Congress 2012: Crossing Boundaries**. 2012. p. 1195-1202.

TRUE, A. C.; CRIMALDI, J. P. High dynamic range particle image velocimetry analysis of viscous inhalant flows. **Physics of Fluids**, v. 31, n. 10, p. 103605, 2019.

TSUBAKI, R. On the Texture Angle Detection Used in Space-Time Image Velocimetry (STIV). **Water Resources Research**, v. 53, n. 12, p. 10908-10914, 2017.

VICK, S. G. Analyses of flow failures of mine tailings dams and investigation of flow failures of tailings dams. **Journal of Geotechnical Engineering**, v.110, p. 454-456, 1984.

WANG, K. *et al.* Integration of DSM and SPH to Model Tailings Dam Failure Run-Out Slurry Routing Across 3D Real Terrain. **Water**, v. 10, n. 8, p. 1087, 2018.

WANG, Z.; LARSEN, P.; XIANG, W. Rheological properties of sediment suspensions and their implications. **Journal of Hydraulic Research**, v. 32, n. 4, p. 495-516, 1994.

XU, C.; FIEß, M.; WILLENBACHER, N.. Impact of wall slip on screen printing of front-side silver pastes for silicon solar cells. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 7, n. 1, p. 129-135, 2016.

YU, D.; TANG, L.; CHEN, C. Three-dimensional numerical simulation of mud flow from a tailings dam failure across complex terrain. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 20, n. 3, p. 727-741, 2020.

APÊNDICE A – MÉTODO PARA OBTENÇÃO AUTOMÁTICA DA INCLINAÇÃO DE IMAGENS STI

Este apêndice apresenta a formulação matemática e os procedimentos adotados para a estimativa da orientação dominante das estrias em imagens espaço-temporais (*Space-Time Image* - STI), utilizando a Transformada *Wavelet* Contínua Bidimensional (2D CWT).

As análises foram aplicadas a imagens STI obtidas em experimentos laboratoriais conduzidos no âmbito desta pesquisa (ver Capítulo 3), permitindo a avaliação da robustez e da acurácia do método proposto na identificação da inclinação das estrias associadas ao movimento dos traçadores no escoamento.

A Transformada *Wavelet* Contínua Bidimensional (2D CWT) foi empregada para estimar a orientação dominante das estrias presentes nas imagens espaço-temporais, as quais representam a trajetória de partículas traçadoras no campo de escoamento. O método baseia-se no cálculo dos coeficientes *wavelet* em um conjunto de escalas e orientações, permitindo identificar o ângulo que maximiza a resposta da *wavelet* a feições lineares orientadas na imagem.

Considere-se a imagem espaço-temporal $g(x, t)$. A 2D CWT é definida pela Equação A.1.

$$W_\psi(a, \alpha, b) = \iint g(x, t) \cdot \psi_{a, \alpha}^*(x - b_x, t - b_t) dx dt \quad (\text{A.1})$$

em que a é a escala, α o ângulo de orientação, $b = (b_x, b_t)$ o vetor de translação e ψ^* o complexo conjugado da *wavelet*.

Neste estudo, foi adotada a *wavelet* complexa de Cauchy, devido à sua elevada seletividade direcional e eficiência na detecção de feições lineares e estrias em dados espaço-temporais. A expressão espacial da *wavelet* de Cauchy de ordem m é dada pela Equação A.2.

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

em que i representa a unidade imaginária e m controla a seletividade angular. Na implementação utilizada, a ordem da *wavelet* não foi explicitamente definida, sendo adotado o valor padrão da função *cwtft2* do MATLAB ($m = 2$).

A 2D CWT foi aplicada com escala fixa $a = 5$ pixels, valor selecionado empiricamente para representar adequadamente a espessura média das estrias e garantir um compromisso entre resolução espacial e sensibilidade direcional. As orientações foram amostradas em incrementos finos de $\pi/1024$ radianos (aproximadamente $0,18^\circ$), cobrindo o intervalo angular de 0° a 360° .

Para cada orientação, a *wavelet* foi rotacionada e convoluída com a imagem STI, resultando em mapas de coeficientes complexos que expressam o grau de correlação local entre a imagem e a *wavelet* orientada. O módulo desses coeficientes indica a intensidade de alinhamento entre as estruturas da imagem e a orientação considerada. A energia total associada a cada ângulo α foi obtida pelo somatório do quadrado do módulo dos coeficientes *wavelet* em todo o domínio espacial é definida pela Equação A.3.

$$E(\alpha) = \sum_x \sum_t |W_\psi(a, \alpha, b)|^2 \quad (\text{A.3})$$

Devido à simetria rotacional de 180° da *wavelet* de Cauchy, a resposta *wavelet* associada a uma orientação α é equivalente àquela em $\alpha + 180^\circ$. Assim, quando a análise é realizada sobre o intervalo angular completo $[0^\circ, 360^\circ]$, são observados dois picos de energia idênticos, separados por 180° , correspondentes à mesma orientação física das estrias presentes na imagem espaço-temporal.

Neste trabalho, a análise foi conduzida no intervalo completo de 0° a 360° , permitindo a identificação explícita desses dois máximos na distribuição de energia $E(\alpha)$. A orientação dominante das estrias foi então determinada a partir da identificação do par de picos energéticos, sendo o ângulo final associado a um dos máximos, uma vez que ambos representam a mesma direção física do padrão linear observado.

O código numérico desenvolvido ao longo desta pesquisa, implementado em linguagem MATLAB, foi empregado no processamento das imagens experimentais e na geração das imagens espaço-temporais analisadas nesta tese. A partir dessas imagens, foi possível identificar os padrões lineares característicos e extrair a inclinação das estrias observadas durante os experimentos, etapa fundamental para a avaliação quantitativa dos fenômenos estudados.

No processo de aprimoramento metodológico, o código recebeu a incorporação da função CWT 2D (*Continuous Wavelet Transform* bidimensional), utilizada para identificar e quantificar automaticamente as inclinações dos padrões lineares formados nas imagens STI

(*Space-Time Image*). Essa abordagem permitiu maior precisão, reprodutibilidade e robustez nas análises realizadas.

A seguir é apresentada a implementação do código numérico desenvolvido em linguagem MATLAB, utilizado no processamento das imagens experimentais, na construção das imagens espaço-temporais (STI) e na estimativa automática da inclinação das estrias por meio da Transformada *Wavelet* Contínua Bidimensional (2D CWT). O código contempla as etapas de leitura e pré-processamento das imagens, extração das informações espaço-temporais, montagem da imagem STI e cálculo da resposta energética associada às diferentes orientações analisadas.

```
clc; clear;
% Obter lista de arquivos no diretório (formato PNG)
D = dir('*.png');
num_imagens = numel(D);

% Parâmetros de extração
y = 110;           % Linha de interesse
x1 = 100;          % Início do intervalo de colunas
x2 = 300;          % Final do intervalo de colunas
RES = 9.3;         % Resolução da imagem (pixel/mm)
FPS = (807/3);     % Taxa de aquisição (frames por segundo)

% Estruturas para armazenamento
imcell = cell(1, num_imagens);
I = cell(1, num_imagens);
M = cell(1, num_imagens);

% Processamento das imagens
for i = 1:num_imagens

    imcell{i} = imread(D(i).name);

    % Conversão para tons de cinza, se necessário
    if size(imcell{i},3) == 3
        I{i} = rgb2gray(imcell{i});
    else
        I{i} = imcell{i};
    end

    [img_height, img_width] = size(I{i});

    % Verificações de limite
    if y < 1 || y > img_height
```

```

        error('O índice y (%d) está fora dos limites da
imagem (%d).', y, img_height);
    end

    x1 = max(1, x1);
    x2 = min(img_width, x2);

    if x1 > x2
        error('O valor de x1 (%d) deve ser menor ou igual
a x2 (%d).', x1, x2);
    end

% Extração da linha selecionada
M{i} = I{i}(y, x1:x2);
end

% Montagem da imagem STI
STI = cat(1, M{:});

% Garantir formato adequado
if ndims(STI) == 3
    STI = rgb2gray(STI);
end
STI = double(STI);

% Exibição da imagem STI
figure;
imshow(STI, []);
title('Imagem STI');

%% PARTE 2: IDENTIFICAÇÃO DA INCLINAÇÃO DA ESTRIA - CWT 2D

esc = 5;           % Escala Wavelet
wav = 'cauchy';    % Tipo de Wavelet
inc = pi/1024;     % Incremento angular (rad)
ai = 0;           % Ângulo inicial (rad)
af = pi - inc;    % Ângulo final (evita duplicação)
ang = ai:inc:af;   % Vetor de ângulos

% Ângulos convertidos para graus
ang_deg = rad2deg(ang) - 90;

% Transformada Wavelet Contínua 2D
cwt2d = cwtft2(STI, 'wavelet', wav, 'scales', esc,
'angles', ang);

% Energia associada a cada orientação
energy = zeros(1, length(ang));

```

```
for angn = 1:length(ang)
    A = abs(cwt2d.cfs(:, :, 1, 1, angn));
    energy(angn) = sum(A(:).^2);
end

% Normalização
energy = energy ./ max(energy);

% Visualização do resultado
figure;
plot(ang_deg, energy, 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Ângulo (graus)');
ylabel('Energia Normalizada');
title('Distribuição Angular de Energia (CWT 2D)');
grid on;
```