

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA

CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

LUCAS BRENDOW DA SILVA

**ESCOAMENTO DE FLUIDO VISCOPLÁSTICO EM CANAL E
PLANO INCLINADO: ESTUDO DE VAZÕES E ALCANCES**

Trabalho de conclusão de curso apresentada à
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira -
UNESP, como parte dos requisitos para obtenção
do grau de Engenheiro Civil

Orientador: Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel

Ilha Solteira

2024

Lucas Brendow da Silva

**ESCOAMENTO DE FLUIDO VISCOPLÁSTICO EM CANAL E
PLANO INCLINADO: ESTUDO DE VAZÕES E ALCANCES**

Trabalho de conclusão de curso apresentada à
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira -
UNESP, como parte dos requisitos para obtenção
do grau de Engenheiro Civil

Orientador: Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel

Ilha Solteira

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S586e Silva, Lucas Brendow da.
Escoamento de fluido viscoplástico em canal e plano inclinado: estudo de vazões e alcances / Lucas Brendow da Silva. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
46 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2024

Orientador: Geraldo de Freitas Maciel

Inclui bibliografia

1. Ruptura de barragem. 2. Fluidos não newtonianos. 3. Vazão. 4. Alcance. 5. Hidrograma.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURSO : ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: HIDRÁULICA E SANEAMENTO
REALIZADA EM : 24-07-2024
DISCENTE : LUCAS BRENDOW DA SILVA
COMISSÃO EXAMINADORA:

1. Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel (Orientador)
2. Eng. Civil. Me. João Batista Pereira (Examinador)
3. Prof. Dr. Evandro Fernandes da Cunha (Examinador)

TÍTULO: "ESCOAMENTO DE FLUIDO VISCOPLÁSTICO EM CANAL E PLANO INCLINADO: ESTUDO DE VAZÕES E ALCANCES"

Local: Via Google Meet

Horário de início: 09 horas

Em sessão pública, após exposição em torno de 40 (quarenta minutos), o discente foi arguido oralmente, e no final da exposição foi "**APROVADO**" pelos membros componentes da Comissão Examinadora. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ATA, a qual é assinada pelos membros da Comissão Examinadora e pelo discente LUCAS BRENDOW DA SILVA

Ilha Solteira, 24 de Julho de 2024.

Documento assinado digitalmente
 **GERALDO DE FREITAS MACIEL**
Data: 27/07/2024 03:01:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel
(Orientador)

Documento assinado digitalmente
 **JOAO BATISTA PEREIRA**
Data: 26/07/2024 16:54:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng. Civil. Me. João Batista Pereira
(Examinador)

Documento assinado digitalmente
 **EVANDRO FERNANDES DA CUNHA**
Data: 26/07/2024 17:06:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Evandro Fernandes da Cunha
(Examinador)

Ciente:

Discente:



RESUMO

Os escoamentos de superfície livre, especialmente aqueles que envolvem materiais lamosos, têm chamado muita atenção recentemente. Esse interesse cresceu principalmente devido aos repetidos desastres decorrentes da ruptura de barragens. A situação é ainda mais complicada pelas dificuldades significativas em prever o comportamento do fluido que escoar após a ruptura. Essas dificuldades sublinham a necessidade de um conhecimento mais aprofundado sobre esse tipo específico de escoamento. É fundamental compreender melhor diversos aspectos, como as vazões dos fluidos, o comportamento do escoamento ao longo do tempo e o alcance das frentes de escoamento. Neste contexto, este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo aprofundar o estudo sobre os fluidos viscoplásticos que apresentam características lamosas. A pesquisa se concentrará em entender as propriedades desses fluidos, suas dinâmicas de escoamento e as vazões que apresentam diante de determinadas situações de abertura de comporta. A importância deste estudo é ressaltada pela necessidade de desenvolver métodos mais precisos para prever e controlar o comportamento dos escoamentos lamosos em situações de ruptura de barragens. Assim, a análise incluirá a investigação das variáveis que influenciam o escoamento, como a inclinação, velocidade de abertura de comporta, concentração de fluido escoante, os efeitos da parede (configuração de canal e plano inclinado) e o tipo de abertura (liberação instantânea ou gradual). Para isso a aplicação de técnicas avançadas para monitoramento para previsão dos padrões de escoamento foi empregada. Ao longo deste trabalho, espera-se contribuir significativamente para o campo de estudo dos escoamentos lamosos, proporcionando insights valiosos que possam ser utilizados para melhorar as práticas de engenharia e gestão de riscos associadas a barragens e outras estruturas similares. Dessa forma, a pesquisa não só visa ampliar o conhecimento teórico, mas também oferecer soluções práticas para problemas reais, ajudando a prevenir futuros desastres e minimizar os impactos negativos desses eventos. Os resultados obtidos foram muito satisfatórios no que diz respeito à precisão da técnica de medição empregada, garantindo análises consistentes.

Palavras-chave: Ruptura de Barragem; Fluidos não newtonianos; Vazão; Alcance; Hidrograma

ABSTRACT

Free surface flows, especially those involving muddy materials, have garnered a lot of attention recently. This interest has primarily grown due to the repeated disasters resulting from dam failures. The situation is further complicated by the significant difficulties in predicting the behavior of the fluid that flows after a rupture. These difficulties underscore the need for a deeper understanding of this specific type of flow. It is essential to better understand various aspects, such as fluid flow rates, flow behavior over time, and the reach of flow fronts. In this context, this graduation thesis aims to deepen the study of viscoplastic fluids that exhibit muddy characteristics. The research will focus on understanding the properties of these fluids, their flow dynamics, and the flow rates they present under certain gate opening situations. The importance of this study is highlighted by the need to develop more precise methods to predict and control the behavior of muddy flows in dam failure situations. Thus, the analysis will include investigating the variables that influence the flow, such as slope, gate opening speed, concentration of the flowing fluid, wall effects (channel configuration and inclined plane), and the type of opening (instantaneous or gradual release). For this, the application of advanced techniques for monitoring and predicting flow patterns will be employed. Throughout this work, it is expected to make a significant contribution to the field of study of muddy flows, providing valuable insights that can be used to improve engineering practices and risk management associated with dams and other similar structures. In this way, the research not only aims to expand theoretical knowledge but also offer practical solutions to real problems, helping to prevent future disasters and minimize the negative impacts of these events.

Keywords: Dam Break; Non-Newtonian Fluids; Flow Rate; Reach; Hydrograph

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO.....	2
2.1. RUPTURA DE BARRAGEM	3
2.1.1. BARRAGENS DE REJEITO	3
3. METODOLOGIA.....	5
3.1. CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA	5
3.2. APARATO EXPERIMENTAL DE DAM BREAK.....	6
3.2.1. MESA DE SUSTENTAÇÃO	7
3.2.2. RESERVATÓRIO.....	8
3.3. TÉCNICA DE MEDIÇÃO EMPREGADA	9
3.3.1. CÂMERAS	9
3.3.2. MEDIÇÃO DA EVOLUÇÃO DO ESCOAMENTO VIA IMAGEM STI	10
3.4. VISÃO GERAL DO EXPERIMENTO DE RUPTURA DE BARRAGEM.....	12
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	19
4.1. EXPERIMENTO DE DAM BREAK	20
4.2. HIDROGRAMA DE RUPTURA	30
5. CONCLUSÃO.....	43
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1. INTRODUÇÃO

As barragens são construções que tem por finalidade a contenção de materiais sólidos ou líquidos, dependendo de sua finalidade. Barragens que aprisionam água têm a finalidade de reter o fluxo e água, a fim de controlar cheias, gerar energia elétrica e/ou sanar problemas de escassez de recursos hídricos (SOUZA, 2018), bem como reservado a irrigação, recreação, navegação e controle de sedimentos. Os principais tipos de barragens são as de aterro, de concreto-gravidade e de concreto em arco. Somado as estruturas de barragens pode-se encontrar vertedouros, estruturas de descarga (JUNIOR, 2018).

Dentre as diversas funções das barragens, a que vem se destacando nos últimos anos, são as barragens de rejeitos. Em 2018 cerca de 786 estruturas estavam presentes no Brasil, das quais 417 inseridas na Política de Segurança de Barragens (PNSB). Em 2013 estavam cadastradas apenas 243 barragens no Brasil, segundo o Instituto Minere (2022). De 2013 para 2018 o número de barragens consideradas de alto risco de apresentarem acidentes baixou de 41 para 35 apenas, revelando a falta de comprometimento do País para com a segurança das barragens (Instituto Minere, 2022).

As barragens de rejeito ganharam espaço de discussão em virtude dos sucessivos desastres ‘naturais’ envolvendo ruptura de barragem (*Dam breack*) de lama ocorrido em Brumadinho e Mariana, cidades localizadas em Minas Gerais, palco da maior parcela de barragens de rejeito do País, e que alertaram o quão devastador pode ser os acidentes relacionados ao fenômeno.

Os materiais represados encontrados nas barragens de rejeito apresentam comportamento distinto do da água, óleo de cozinha e glicerina; estes por se tratarem de um fluido newtoniano, apresentam uma relação linear entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação. Em contra partida, os fluidos ditos não-newtonianos têm uma relação não linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, estes, de acordo com certas características, possuem efeitos pseudoplásticos, viscoelásticos ou viscoplásticos, assim, materiais como pasta de dente, maionese, concreto armado, argamassas, lava vulcânica e o gel de caropol apresentam necessitam de uma tensão mínima para que escoem.

Diante de tais diferença, faz-se necessário o melhor entendimento dos fluidos não newtonianos, principalmente pelo fato de tais fluidos não serem bem modelados pela hidráulica clássica a partir de equações analíticas. Logo, a ampliação do repertório de conhecimentos a respeito através de técnicas experimentais, utilizando entre outras a

reômetria e aparatos experimentais de simulação de escoamento, fornecerá informações previsíveis do escoamento desses fluidos, podendo assim, auxiliar na avaliação de escoamentos decorrentes de eventos tipo ruptura de barragem.

De elevada complexidade, comparando-se ou não com outros tipos de escoamento, essa problemática acerca dos escoamentos de corrida de lama vem sendo muito estudada utilizando fluidos viscoplásticos de reologia não-newtoniana para melhor retratar o comportamento do fluido escoante pós a ruptura da barragem, com destaque para o modelo reológico de *Herschel-Bulkley*, o qual mostra-se mais preciso em retratar o comportamento, revelando seu comportamento distinto do da água com relação a dinâmica de escoamento.

De forma a caracterizar problemas envolvendo escoamentos viscoplásticos a partir da liberação de material, o trabalho em tela visa avaliar experimentalmente o comportamento de alcance e vazão segundo o efeito de geometria de canal, inclinação, reologia e forma de liberação de material a partir da análise de imagens espaço-temporal (STI – *Space-Time Image*)

2. OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho de graduação é realizar a medição de alcances, espalhamentos e vazão de escoamentos viscoplásticos advindos de ruptura de barragem empregando técnica de velocimetria por imagem STI (*Space-Time image*) utilizando aparato experimental em laboratório.

Os objetivos específicos da proposta podem ser elencados da seguinte forma:

- Avaliação do efeito de liberação de material segundo a imposição de diferentes estágios de abertura descendente de comporta;
- Avaliação de efeito de velocidade de movimentação da comporta sobre o comportamento de alcance e vazão;
- Avaliação do efeito de confinamento do escoamento segundo experimentos em canal inclinado e plano inclinado;
- Avaliação dos efeitos de inclinação e reologia.

2.1. RUPTURA DE BARRAGEM

2.1.1. BARRAGENS DE REJEITO

Por ter dimensões continentais, o Brasil apresenta grandes reservas de minerais em seu território como nióbio, manganês, ferro e alumínio revelando um país com potencial crescimento econômico no setor mineral, fato esse também justificado pelo crescente crescimento populacional mundial. Minas Gerais, palco das maiores catástrofes envolvendo eventos de ruptura de barragem, é o estado que com maior potencial mineral do País (aproximadamente 48%). A mineração visa extrair os minerais valiosos economicamente das rochas os separando dos minerais não aproveitados, processo esse inevitável a geração de rejeitos (JUNIOR, 2018).

As barragens, diques, reservatórios, barramentos ou cavas exauridas com barramento construídos são associadas às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, utilizado para fins de contenção, decantação, acumulação ou descarga de sedimentos advindos da mineração, podendo haver a presença de água ou não (NBR 13028, 2017).

Figura 1 - Barragem de rejeito

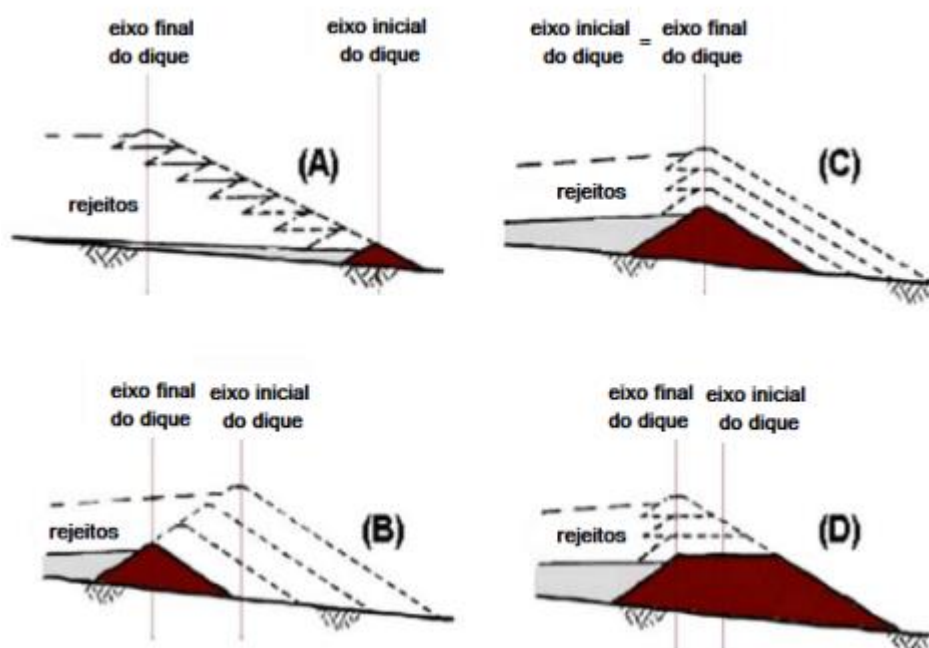


Fonte: Minera Jr.; 2019

Existem três tipos de represamentos de rejeito: montante, linha central e jusante. Denominações essa que se referem à direção em que a crista da barragem cresce, como mostra a Figura 2. O método de construção a montante consiste na construção de diques sucessivos cada um dos quais recuado em relação ao anterior. Tal método foi utilizado na

barragem da Vale que se rompeu em Brumadinho, sendo o método mais barato e com maior risco de sofrer deslizamentos de terra com rompimento da superfície do próprio dique. No método a jusante os diques são assentados na parte superior do talude situada na jusante em relação ao dique anterior. A espessura da parede de contenção aumenta à medida que os diques são construídos (aumentando os custos) e possuem maior facilidade de drenagem e isso aumenta a estabilidade da barragem. O método da linha central combina algumas propriedades dos outros métodos, com maior estabilidade sísmica do que o método a montante, e menos requisitos de volume de material no crescimento em relação ao método a jusante. Os aumentos sucessivos do dique partem do eixo central se estendendo a jusante, sem, no entanto, sair do eixo central. Outra variação do método da linha central modificada, consiste em aumentar o tamanho do muro de contenção da mesma forma que o método do modelo central, mas a linha central da crista da terra se move levemente a montante, economizando a quantidade de materiais de construção necessários na zona de revestimento a jusante do aterro. Como exemplo dessa aplicação no Brasil, cita-se a barragem de rejeito de minerais de Santo Antônio, em Paracatu-MG.

Figura 2: Tipos de barragens de rejeito. a) Linha montante, b) Linha Jusante, c) Linha de centro, d) Linha de centro modificada.



Fonte: Modificado de Alberruche, 2016

3. METODOLOGIA

Os experimentos de ruptura de barragem foram realizados em um aparato experimental (Figura 6) capaz de simular o rompimento e escoamento de um fluido viscoplástico segundo diferentes configurações de aberturas de comporta e inclinação de escoamento.

Para o desenvolvimento experimental deste trabalho, utilizou-se o Carbopol 996. 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).

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/m³, variando de 1005 a 1015 kg/m³. Os géis produzidos foram armazenados e mantidos à temperatura ambiente.

A Tabela 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 1 - Características do gel de Carbopol. Massa específica em termos de valor médio.

Fluido	Nomenclatura do fluido	Teor de sólidos (%)*	Massa específica (kg/m³)
Gel de carbopol	C_17	0,17	1009,98
Gel de carbopol	C_25	0,25	1013,97

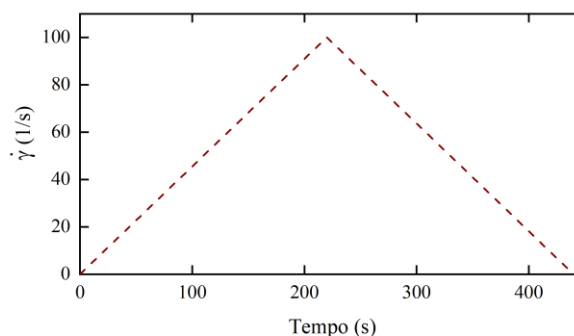
Fonte: Próprio autor.

3.1. CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA

A caracterização reológica dos fluidos-testes analisados, géis de carbopol, 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 protocolo do gel de carbopol 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. A Figura 3 ilustra os protocolos de ensaios reométricos empregados.

Figura 3 - Protocolo de ensaio reométrico empregado para o gel de carbopol



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 $3 \leq \dot{\gamma} \leq 100 \text{ s}^{-1}$.

3.2. APARATO EXPERIMENTAL DE DAM BREAK

O aparato empregado é capaz de simular rupturas 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

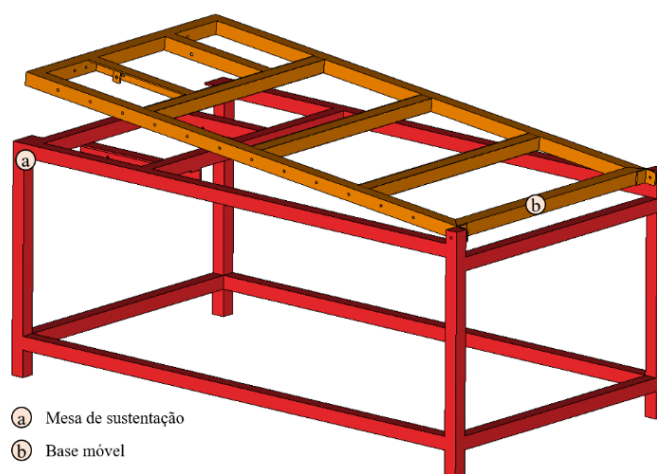
e altura variável de acordo com a inclinação desejada. O plano inclinado possibilita uma ampla faixa de inclinações (de 0° a 20°) e seu movimento ocorre, de forma mecanizada. A partir da colocação de duas placas de vidro, de 1,50 m de comprimento, sobre o plano inclinado pode-se alterar a configuração do aparato, tornando-o um canal inclinado. Além disso, o aparato possibilita, a partir de um conjunto único, 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.

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.

3.2.1. 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. 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 0 - Projeto executivo da mesa de sustentação.



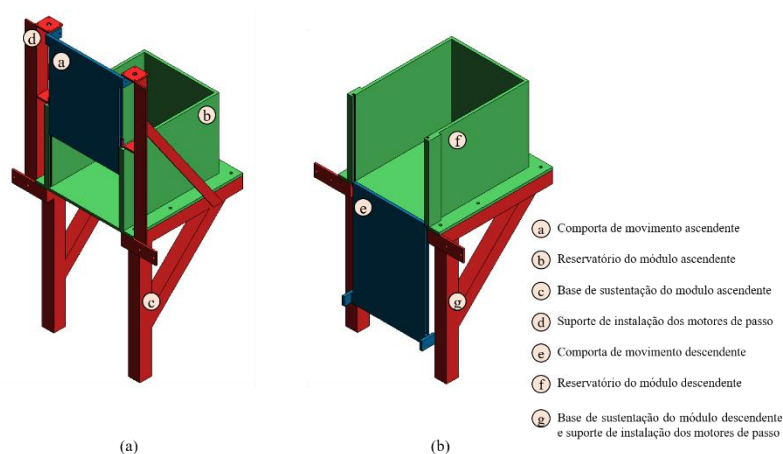
Fonte: Próprio autor.

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 dispostas na sequência das paredes laterais do reservatório, formando 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 os quais foram dispostos unindo as placas de vidro em seu topo, garantindo a vedação e perpendicularidade da parede.

3.2.2. RESERVATÓRIO

A fim de possibilitar um aparato de *dam-break* com as configurações de abertura de comporta (movimento descendente – novidade deste projeto a fim de simular ruptura gradual) foi decidido pela montagem de um módulo de retenção (Figura 5-(b)), o qual pode ser acoplado ao conjunto mesa de sustentação e plano inclinado (Figura 4).

Figura 5 - 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.

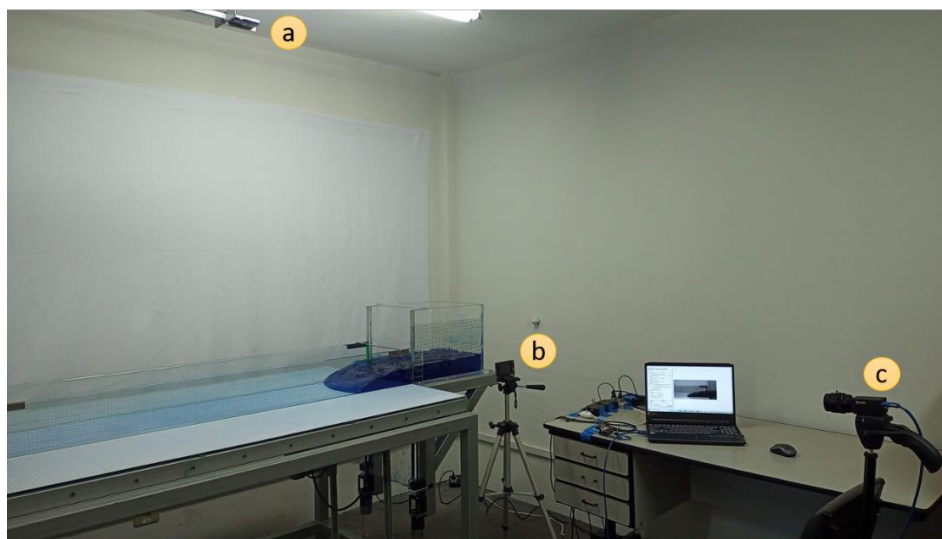
3.3. TÉCNICA DE MEDIÇÃO EMPREGADA

3.3.1. CÂMERAS

Para medição dos alcances das frentes viscoplásticas em situação de plano e canal inclinado, foram utilizadas 3 (três) câmeras: a primeira, uma Lumix FH8 (Panasonic) de foco automático localizada acima da mesa de sustentação, a fim de filmar o escoamento em uma perspectiva aérea para bem reportar a mancha de inundação do escoamento; a segunda localizada lateralmente ao reservatório, uma câmera Cyber-Shot DSC-W800 (Sony) de foco automático,

para registro da evolução da vazão do escoamento a partir da variação do nível do fluido dentro do reservatório pós ruptura de barragem e, por fim, 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 - $fps > 100$). A Figura 6 mostra a distribuição das câmeras frente ao aparato experimental.

Figura 6 - 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.

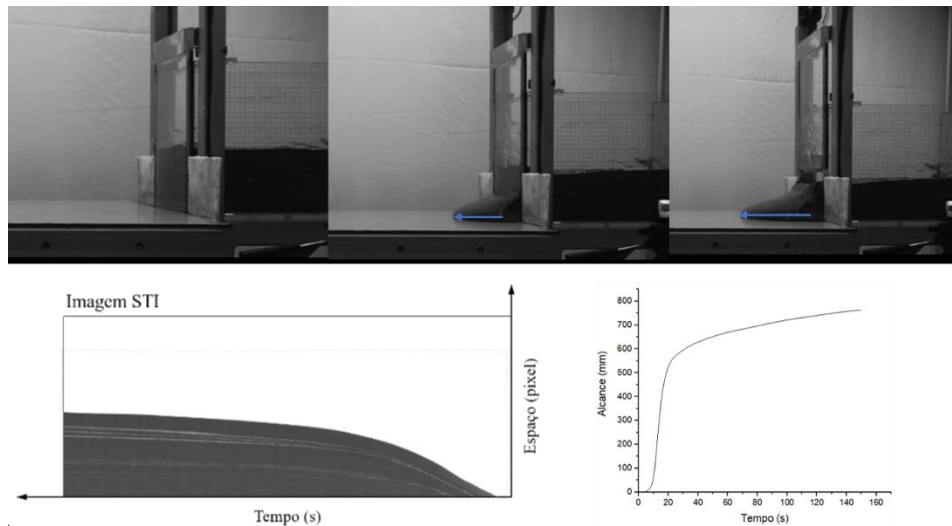
O uso de câmeras para medição requer a calibração das imagens. Para isso foi empregada uma malha de referência (quadriculado 10 x 10 mm). Assim, em todos os experimentos uma tomada contendo a malha de referência sobre o local de interesse foi realizada. Adesivos com malha de referência foram instalados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

3.3.2. MEDIÇÃO DA EVOLUÇÃO DO ESCOAMENTO VIA IMAGEM STI

A avaliação da extensão e rapidez dos escoamentos provenientes de rompimento de barragens é frequentemente feita através do monitoramento da fronteira do fluxo (observa-se a frente do fluxo) pixel a pixel.

Tendo como premissa a necessidade de empregar um mecanismo de maior resolução para analisar as curvas de alcance, optou-se por empregar a técnica de velocimetria asseada na imagem espaço-temporal (*STIV*).

Figura 7 - 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 azul e na altura da posição da linha azul.



Fonte: próprio autor.

A obtenção das imagens STI requer, inicialmente, a definição, ao longo do plano inclinado e do canal inclinado, dos trechos longitudinais em que serão avaliados o alcance da frente e uma altura de interesse (essas devem estar dentro da faixa de altura da frente viscoplástica – nesta pesquisa define-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 com a superfície do canal); isso possibilita a geração de uma imagem STI (Space Time-Image) que fornece registro do posicionamento da frente ao longo do tempo e espaço com elevada precisão em diferentes alturas da frente. Com base na análise da imagem STI (obtida em código Matlab) utilizando o software ImageJ para definição da resolução e pixels de interesse, foi possível identificar as posições da frente ao longo do tempo. A Figura 7 ilustra a obtenção da imagem STI e do alcance de um escoamento.

A partir da análise das imagens STI, foi constatada elevada precisão do acompanhamento da frente viscoplástica, sobretudo logo após uma abertura do comportamento. Este método de análise permitiu explorar, com elevado rigor, as frentes viscoplásticas, imediatamente após a liberação do material (informação numa faixa de tempo inferior a 1 segundo). O emprego da análise via imagem STI tem alto potencial para compreender os efeitos das propriedades

reológicas e outras características do experimento sobre o comportamento dos alcances e ainda pode permitir explorar as frentes viscoplásticas em diferentes alturas e nos tempos iniciais após a abertura da comporta.

3.4. VISÃO GERAL DO EXPERIMENTO DE RUPTURA DE BARRAGEM

Para a realização dos experimentos de *dam-break* foram utilizados diferentes materiais e equipamentos. Os experimentos foram conduzidos segundo diferentes configurações do aparato - plano inclinado e canal inclinado, com diferentes inclinações (θ variando entre 0, 2, 4°), diferentes velocidades de abertura da comporta (máxima e mínima) e comporta de movimento descendente (movimento descendente em canal e plano 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 2 reúne as informações características de todas as configurações de experimentos testados, definindo: configuração do aparato (canal inclinado ou plano inclinado); 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 4.5 devem ser avaliados tendo como referência as configurações experimentais relatadas na Tabelas 2.

Tabela 2 – Configurações experimentais para elaboração dos experimentos

Ensaio	Casos	Fluido-teste	Configuração aparato	Inclinação (°)	Velocidade comporta (mm/s)	Posição da comporta (estágio de abertura) (mm)*
1-2	C1	C-17	Canal inclinado	0	4,7-9,1	125 - 0
3-4	C3	C-17	Canal inclinado	0	4,7-9,1	125 – 75 – 25 - 0
5-6	C2	C-17	Canal inclinado	0	4,7-9,1	125 – 62,5 – 0
7-8	C4	C-17	Canal inclinado	0	4,7-9,1	125 – 100 – 75 – 50 – 25 - 0
9-10	C1	C-17	Plano inclinado	0	4,7-9,1	125 - 0
11-12	C3	C-17	Plano inclinado	0	4,7-9,1	125 – 75 – 25 - 0

Fonte: próprio autor.

Tabela 2.1 – Configurações experimentais para elaboração dos experimentos (continuação)

13-14	C2	C-17	Plano inclinado	0	4,7-9,1	125 – 62,5 – 0
15-16	C4	C-17	Plano inclinado	0	4,7-9,1	125 – 100 – 75 – 50 – 25 – 0
17-18	C1	C-17	Canal inclinado	2	4,7-9,1	125 – 0
19-20	C3	C-17	Canal inclinado	2	4,7-9,1	125 – 75 – 25 – 0
21-22	C2	C-17	Canal inclinado	2	4,7-9,1	125 – 62,5 – 0
23-24	C4	C-17	Canal inclinado	2	4,7-9,1	125 – 100 – 75 – 50 – 25 – 0
25-26	C1	C-17	Plano inclinado	2	4,7-9,1	125 – 0
27-28	C3	C-17	Plano inclinado	2	4,7-9,1	125 – 75 – 25 – 0
29-30	C2	C-17	Plano inclinado	2	4,7-9,1	125 – 62,5 – 0
31-32	C4	C-17	Plano inclinado	2	4,7-9,1	125 – 100 – 75 – 50 – 25 – 0
33-34	C1	C-17	Canal inclinado	4	4,7-9,1	125 – 0
35-36	C3	C-17	Canal inclinado	4	4,7-9,1	125 – 75 – 25 – 0
37-38	C2	C-17	Canal inclinado	4	4,7-9,1	125 – 62,5 – 0
39-40	C4	C-17	Canal inclinado	4	4,7-9,1	125 – 100 – 75 – 50 – 25 – 0
41-42	C1	C-17	Plano inclinado	4	4,7-9,1	125 – 0
43-44	C3	C-17	Plano inclinado	4	4,7-9,1	125 – 75 – 25 – 0
45-46	C2	C-17	Plano inclinado	4	4,7-9,1	125 – 62,5 – 0
47-48	C4	C-17	Plano inclinado	4	4,7-9,1	125 – 100 – 75 – 50 – 25 – 0
49-50	C1	C-25	Canal inclinado	0	4,7-9,1	125 – 0
51-52	C3	C-25	Canal inclinado	0	4,7-9,1	125 – 75 – 25 – 0
53-54	C2	C-25	Canal inclinado	0	4,7-9,1	125 – 62,5 – 0
55-56	C4	C-25	Canal inclinado	0	4,7-9,1	125 – 100 – 75 – 50 – 25 – 0
57-58	C1	C-25	Plano inclinado	0	4,7-9,1	125 – 0
59-60	C3	C-25	Plano inclinado	0	4,7-9,1	125 – 75 – 25 – 0

Fonte: próprio autor.

Tabela 2.1 – Configurações experimentais para elaboração dos experimentos (continuação)

61-62	C2	C-25	Plano inclinado	0	4,7-9,1	125 – 62,5 – 0
63-64	C4	C-25	Plano inclinado	0	4,7-9,1	125 – 100 – 75 – 50 – 25 – 0
65-66	C1	C-25	Canal inclinado	2	4,7-9,1	125 – 0
67-68	C3	C-25	Canal inclinado	2	4,7-9,1	125 – 75 – 25 – 0
69-70	C2	C-25	Canal inclinado	2	4,7-9,1	125 – 62,5 – 0
71-72	C4	C-25	Canal inclinado	2	4,7-9,1	125 – 100 – 75 – 50 – 25 – 0
73-74	C1	C-25	Plano inclinado	2	4,7-9,1	125 – 0
75-76	C3	C-25	Plano inclinado	2	4,7-9,1	125 – 75 – 25 – 0
77-78	C2	C-25	Plano inclinado	2	4,7-9,1	125 – 62,5 – 0
79-80	C4	C-25	Plano inclinado	2	4,7-9,1	125 – 100 – 75 – 50 – 25 – 0
81-82	C1	C-25	Canal inclinado	4	4,7-9,1	125 – 0
83-84	C3	C-25	Canal inclinado	4	4,7-9,1	125 – 75 – 25 – 0
85-86	C2	C-25	Canal inclinado	4	4,7-9,1	125 – 62,5 – 0
87-88	C4	C-25	Canal inclinado	4	4,7-9,1	125 – 100 – 75 – 50 – 25 – 0
89-90	C1	C-25	Plano inclinado	4	4,7-9,1	125 – 0
91-92	C3	C-25	Plano inclinado	4	4,7-9,1	125 – 75 – 25 – 0
93-94	C2	C-25	Plano inclinado	4	4,7-9,1	125 – 62,5 – 0
95-96	C4	C-25	Plano inclinado	4	4,7-9,1	125 – 100 – 75 – 50 – 25 – 0

Fonte: próprio autor.

Tabela 3 - Resultados experimentais de experimentos de *dam-break* realizados com géis de carbopol.

	Ensaio	τ_0 (Pa)	K_n (Pa.s ⁿ)	n	ρ
0g	CASO 1-CANAL E PLANO-V _{máx} E V _{mín}	29.74	7.58	0,45	1010.15
	CASO 2-CANAL E PLANO-V _{máx} E V _{mín}	30.81	5.17	0,46	1011.07
	CASO 3-CANAL E PLANO-V _{máx} E V _{mín}	28.80	5.65	0,42	1008.75
	CASO 4-CANAL E PLANO-V _{máx} E V _{mín}	25.42	7.41	0,42	1008.02
2g	CASO 1-CANAL E PLANO-V _{máx} E V _{mín}	24.88	9.08	0,41	1011.17
	CASO 2-CANAL E PLANO-V _{máx} E V _{mín}	28.63	5.94	0,45	1011.33
	CASO 3-CANAL E PLANO-V _{máx} E V _{mín}	27.63	8.07	0,42	1009.20
	CASO 4-CANAL E PLANO-V _{máx} E V _{mín}	27.66	5.68	0,44	1011.00
4g	CASO 1-CANAL E PLANO-V _{máx} E V _{mín}	28.40	3.05	0,48	1008.27
	CASO 2-CANAL E PLANO-V _{máx} E V _{mín}	27.28	3.98	0,49	1008.38
	CASO 3-CANAL E PLANO-V _{máx} E V _{mín}	26.55	5.89	0,45	1012.74
	CASO 4-CANAL E PLANO-V _{máx} E V _{mín}	24.04	7.55	0,44	1009.92

Fonte: próprio autor.

Tabela 4 - Resultados experimentais de experimentos de *dam-break* realizados com géis de carbopol.

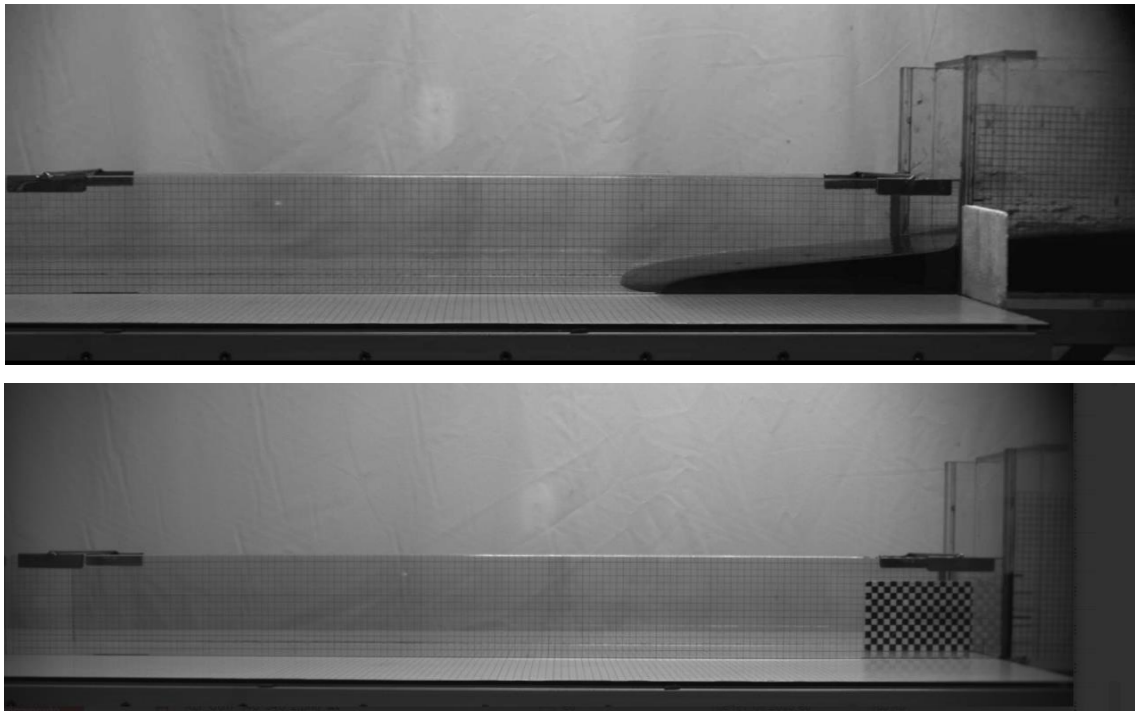
	Ensaio	τ_0 (Pa)	K_n (Pa.s ⁿ)	n	ρ
0g	CASO 1-CANAL E PLANO-V _{máx} E V _{mín}	66.62	22.89	0,36	1013.46
	CASO 2-CANAL E PLANO-V _{máx} E V _{mín}	68.41	24.62	0,36	1013.59
	CASO 3-CANAL E PLANO-V _{máx} E V _{mín}	68.96	26.23	0,36	1015.79
	CASO 4-CANAL E PLANO-V _{máx} E V _{mín}	69.33	24.98	0,36	1015.51
2g	CASO 1-CANAL E PLANO-V _{máx} E V _{mín}	74.32	22.59	0,39	1014.30
	CASO 2-CANAL E PLANO-V _{máx} E V _{mín}	74.25	20.43	0,38	1016.32
	CASO 3-CANAL E PLANO-V _{máx} E V _{mín}	68.11	25.03	0,37	1015.80
	CASO 4-CANAL E PLANO-V _{máx} E V _{mín}	68.88	26.54	0,36	1013.50
4g	CASO 1-CANAL E PLANO-V _{máx} E V _{mín}	69.03	20.93	0,37	1013.05
	CASO 2-CANAL E PLANO-V _{máx} E V _{mín}	70.64	21.00	0,37	1012.68
	CASO 3-CANAL E PLANO-V _{máx} E V _{mín}	70.82	21.48	0,37	1012.39
	CASO 4-CANAL E PLANO-V _{máx} E V _{mín}	71.83	21.45	0,37	1014.63

Fonte: próprio autor.

A título de simplificação, como a velocidade de descida de 4,7 e 9,1 mm/s são a velocidade mínima e máxima de movimentação de comporta, chamemos de V_{min} e V_{máx}, respectivamente

O experimento começa após determinar a inclinação de trabalho, posicionar as câmeras, enquadrar a área de captura e capturar a malha de referência (Figura 8). Uma vez montada a configuração experimental, o reservatório foi preenchido com fluido teste (o volume foi definido em 15 L para todos os experimentos) e a comporta foi aberta.

Figura 8 - Caso 1-C0.17-0g-9,1 mm/s



Fonte: Próprio autor

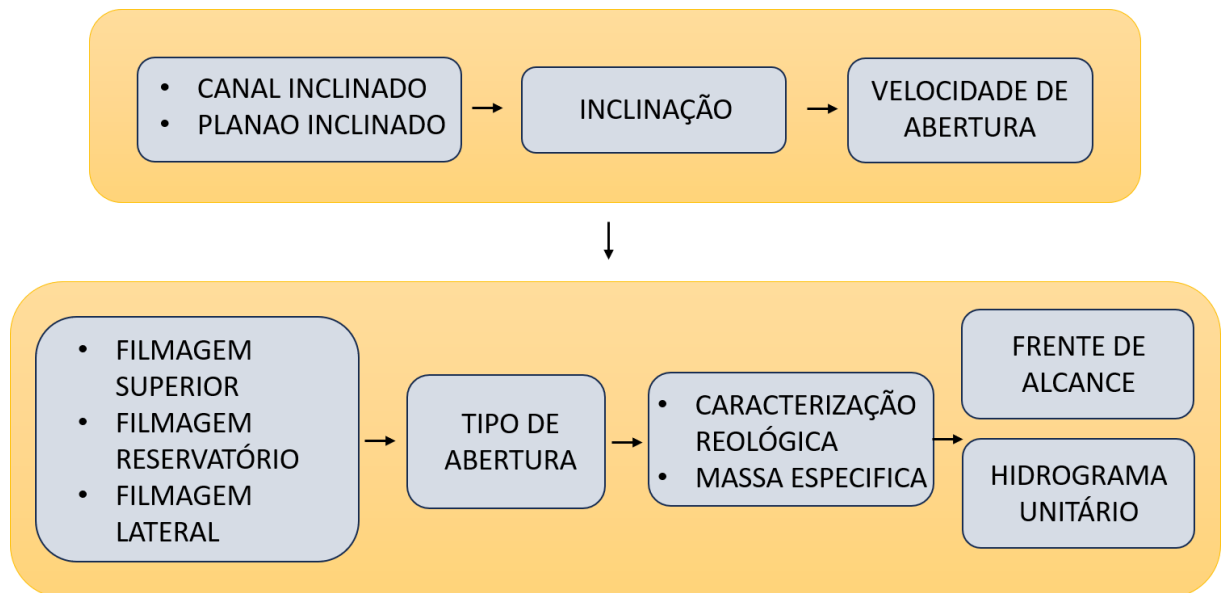
De maneira geral, os experimentos de rompimento de barragem foram realizados seguindo um padrão de altura de fluido H no reservatório, com volume de fluido represado mantido constante em todos os testes. O comportamento de alcance foi observado em quatro cenários de movimentação da comporta:

- **CASO 1: 125 - 0 mm:** a comporta se move de $H = 125\text{mm}$ até o fundo do canal;
- **CASO 2: 125 - 75 - 25 - 0 mm:** Quatro estágios de abertura, variando de $H = 125\text{ mm}$ para $H = 75\text{ mm}$, comporta em repouso por 20 segundos, movendo-se de 75 mm para 25 mm , mais 20 segundos em repouso, retomando o movimento, indo de 75 mm para 25 mm , parando por mais 20 segundos e, finalmente, movendo-se de 25 mm até o fundo do canal;
- **CASO 3: 125 - 62.5 mm:** a comporta se desloca em dois estágios, de $H = 125\text{ mm}$ até $H = 62.5\text{ mm}$, permanece parada por 20 segundos e então continua o movimento de 62.5 mm até a base do canal;
- **CASO 4: 125 - 100 - 75 - 50 - 25 - 0 mm** - Cinco estágios de abertura, variando de $H = 125\text{ mm}$ para $H = 100\text{ mm}$, comporta em repouso por 20 segundos, descendo de 100 mm para 75 mm , outra pausa de 20 segundos, movendo-se de 75 mm para 50 mm , nova pausa de 20 segundos, movimento de

50 mm para 25 mm, outra pausa de 20 segundos, e finalmente deslocando de 25 mm até o fundo do canal. Todas as aberturas da comporta foram testadas para analisar o comportamento das frentes viscoplásticas.

Após o escoamento e coleta dos dados, a amostra deformada foi empregada na caracterização reológica e de massa específica. Tais análises foram conduzidas em três repetições. O procedimento experimental está representado no fluxograma da Figura 9.

Figura 9 – Fluxograma de execução do experimento de ruptura de barragem



Fonte: Próprio autor

Durante o experimento, a câmera posicionada de frente para o reservatório foi responsável por acompanhar o nível de fluido. Com base na análise das imagens do reservatório, buscou-se obter os hidrogramas unitários correspondentes aos diferentes cenários de plano e canal inclinado. Na Figura 10 está apresentada a avaliação realizada a partir das imagens do reservatório, especificamente para elaboração dos hidrogramas.

Figura 10 – Variação do nível do gel de carbopol dentro do reservatório em relação ao tempo para fluido C0_17, mesa com 2° de inclinação, Caso 1



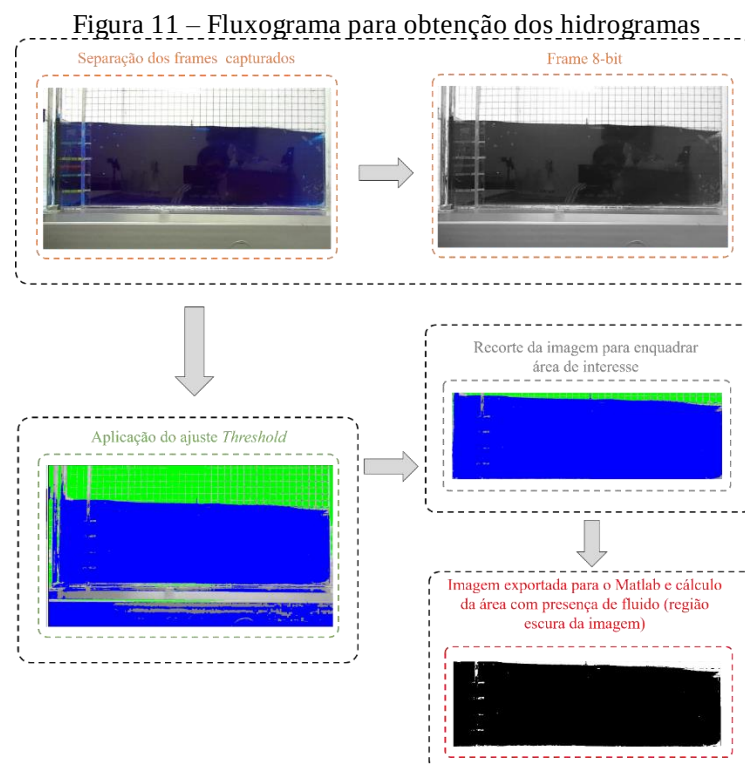
Fonte: Próprio autor

A captura das imagens do reservatório foi feita através de uma câmera de 30 quadros por segundo, de modo que, para analisar o fluxo de volume com base nessas capturas, foi necessário adquirir os frames individualmente e processá-los para definir o contorno do fluido em contato com a lateral, na superfície livre do reservatório, utilizando o software ImageJ. Após obter o contorno das imagens no reservatório, um código em Matlab foi utilizado para calcular a área preenchida pelo fluido em cada imagem e seus respectivos tempos. O produto da área pelo comprimento do reservatório foi então calculado para gerar o hidrograma da ruptura. Resumidamente, o procedimento envolveu as seguintes etapas:

- 1 - Importar o conjunto de imagens do reservatório representando seu esvaziamento para o ImageJ;
- 2 – Definir a imagem para o formato de 8 bits e ajuste o limite para distinguir entre reservatórios líquidos e vazios;
- 3 - Recortar a imagem no ImageJ para que apenas a área que contém o fluido possa ser visualizada;
- 4 - Exportar a imagem processada;
- 5 - Executar o código de cálculo de área desenvolvido em Matlab e importe a imagem processada em ImageJ;

6 - Calcular o volume no respectivo horário com base na área fornecida no Matlab e obtenha o hidrograma.

Rotinas de análise de imagens foram realizadas através de tarefas automatizadas no ImageJ para obtenção de linhas de processo únicas (importação de imagem, obtenção de contornos, corte da região de interesse e exportação). Em Matlab, o código desenvolvido permite a geração de arquivos .txt contendo informações de volume e tempo para definir o comportamento do hidrograma unitário. A Figura 11 apresenta um fluxograma das etapas de processamento da imagem para obtenção de um hidrograma do processo.



Fonte: Próprio autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este tópico analisa e discute os resultados experimentais. Diferentes subseções são apresentadas para permitir uma análise detalhada dos efeitos de alcance, hidrograma unitário, velocidade de abertura da comporta e método de abertura.

Na subseção 4.5.1, são apresentados os resultados de escopo de experimentos de ruptura de barragem, comparando o comportamento de alcance para diferentes velocidades de abertura de comporta e casos de canal e plano inclinado. Esta subseção também apresenta os resultados de alcance final obtidos em cada experimento, mostrando sua dependência em relação a algumas variáveis.

A Seção 4.5.2 compara os hidrogramas unitários do experimento de ruptura da barragem e verifica a relação entre a seção do escoamento e o hidrograma unitário.

4.1. EXPERIMENTO DE DAM BREAK

Os experimentos de dam-break conduzidos com géis de carbopol foram realizados segundo três inclinações de canal e plano inclinado, verificando o comportamento de alcances produzidos segundo diferentes velocidades de abertura de comporta e diferentes estágios de abertura. Com base nos testes realizados em canais e planos inclinados, ficou claro que o confinamento do escoamento afeta diretamente o alcance.

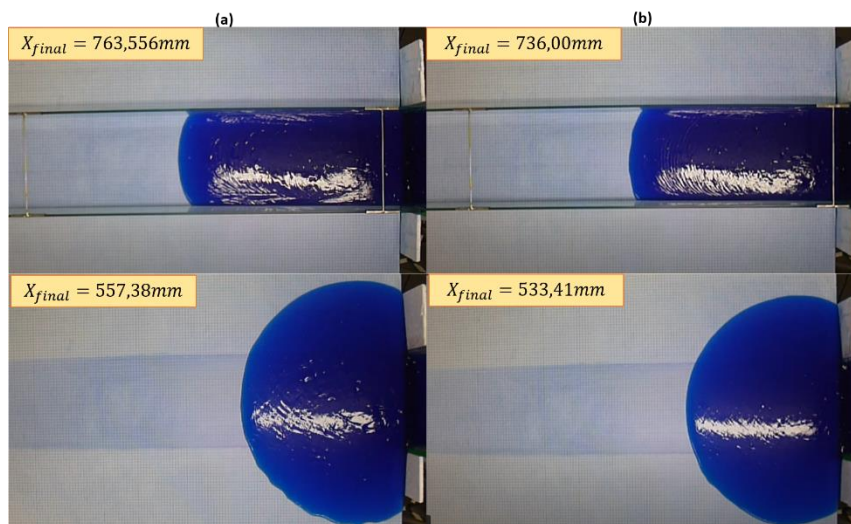
Tabela 3 – Frentes de alcance máximo, em mm, segundo diferentes configurações experimentais

			0g		2g		4g	
			C017	C025	C017	C025	C017	C025
Caso 1	Canal	Vmax	560,2945	294,298	763,5556	352,0692	1206,901	407,1312
Caso 1	Canal	Vmin	635,7188	309,1881	736,00	355,5987	1175,401	372,8465
Caso 1	Plano	Vmax	473,1975	219,5745	557,38	295,7058	726,0298	295,7058
Caso 1	Plano	Vmin	442,6686	222,1277	533,4162	262,2782	740,7407	322,2765
Caso 2	Canal	Vmax	603,3941	306,5604	760,8889	404,6512	1239,301	408,8455
Caso 2	Canal	Vmin	603,3941	301,3051	739,5556	322,9507	1257,301	383,1319
Caso 2	Plano	Vmax	458,8309	234,8936	554,7173	281,9919	734,6833	310,2769
Caso 2	Plano	Vmin	430,0979	221,2766	529,866	257,9926	717,3763	310,2769
Caso 3	Canal	Vmax	605,1899	284,6632	752	315,8916	1197,901	389,1317
Caso 3	Canal	Vmin	588,1297	292,5462	731,5556	328,245	1218,601	380,5606
Caso 3	Plano	Vmax	432,7916	226,383	546,7294	273,4208	726,0298	309,4197
Caso 3	Plano	Vmin	442,6686	220,4255	528,9784	250,2786	730,3565	305,9913
Caso 4	Canal	Vmax	632,1271	296,9256	766,2222	352,9516	1209,601	407,1312
Caso 4	Canal	Vmin	612,3732	292,5462	740,4444	329,5652	1237,501	383,1319
Caso 4	Plano	Vmax	435,4853	224,6809	546,7294	269,9923	732,9526	315,4196
Caso 4	Plano	Vmin	470,5037	221,2766	528,9784	249,4215	740,7407	310,2769

Fonte: Próprio autor

Conforme apresentado na Tabela 3 e nas Figuras 13 a 18., foi observado que fluxos em canais inclinados alcançam distâncias maiores em comparação com os fluxos em planos inclinados. De fato, o fluxo não confinado permite uma dispersão mais ampla do material, cobrindo áreas maiores, porém percorrendo distâncias menores se comparado ao fluxo confinado, como pode ser visto na Figura 12.

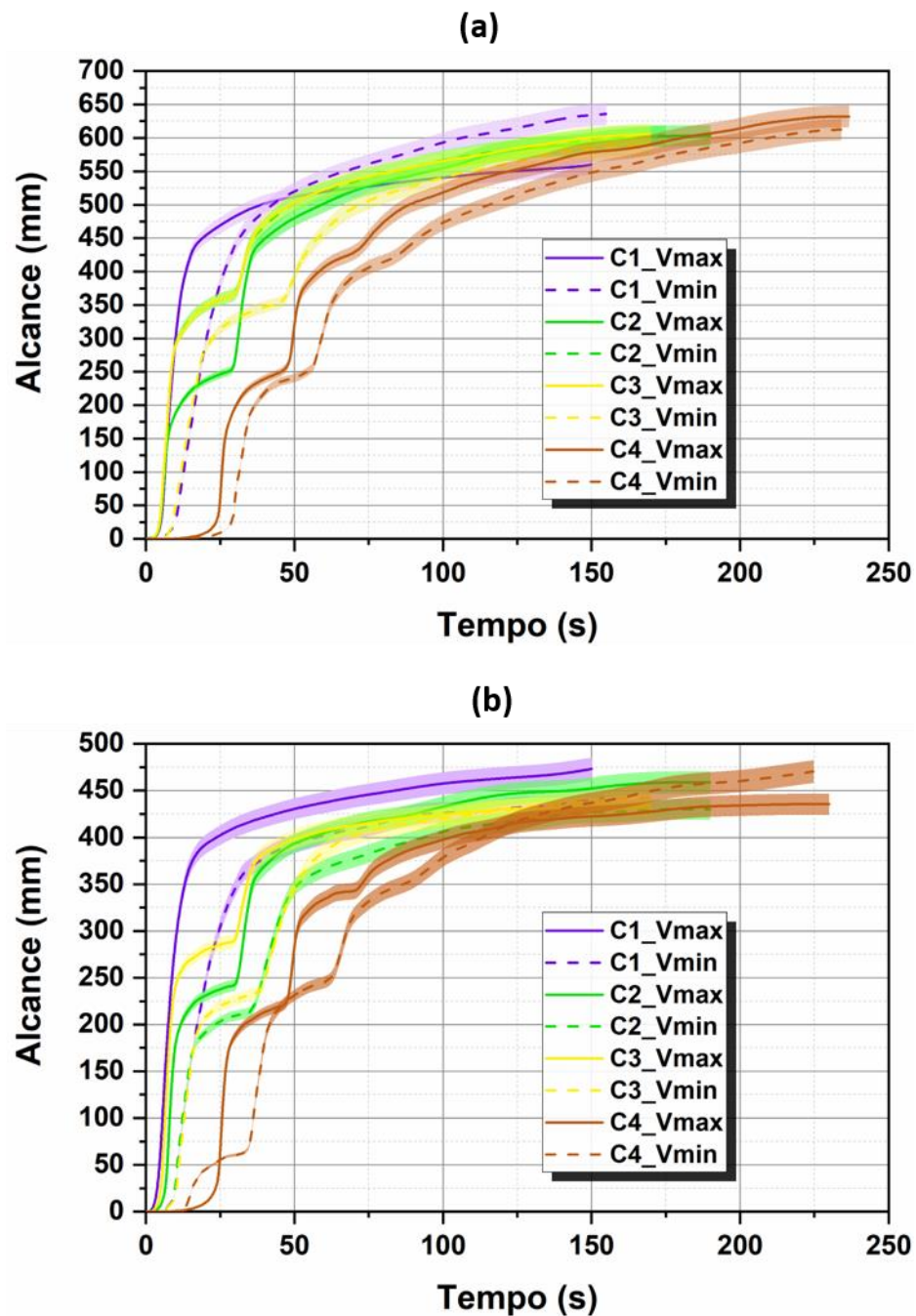
Figura 12: Alcance final do escoamento em concentração C_017, com inclinação de 2 (dois) graus para: (a) velocidade máxima de abertura de comporta e (b) velocidade mínima de abertura, ambos em abertura contínua (Caso 1).



Fonte: Próprio autor

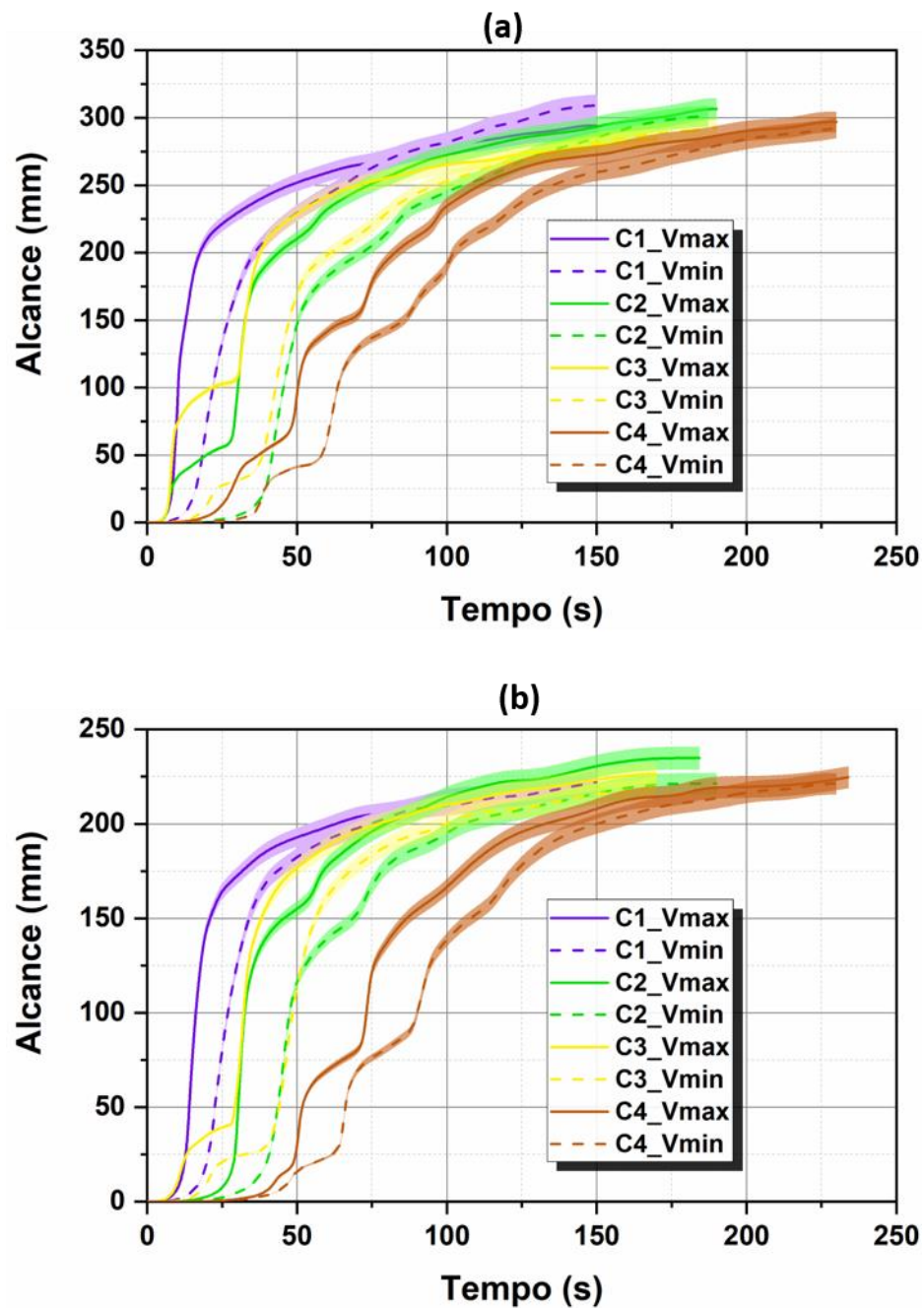
A partir da análise da evolução temporal da faixa do gel de carbopol nas Figuras 13 a 18, a influência da abertura da porta, da velocidade de abertura e das condições do canal e da rampa torna-se mais clara. A análise do comportamento de alcance validado nessas figuras deve ser validada frente à configuração experimental utilizada. Primeiramente, tomando como fator de análise a velocidade de abertura da comporta (faixa representada pela linha pontilhada na Figura 4.21 e Figura 4.22), percebe-se que sua influência domina a fase inicial de desenvolvimento do fluxo. Observe que as velocidades máxima e mínima, do grupo de portas são diferentes da curva de alcance inicial.

Figura 13 - Alcance da frente longo do tempo para a géis de carbopol C_0,17, 0°, segundo comporta de abertura gradual e diferentes velocidades de levantamento (linha inteira - velocidade máxima e linha pontilhada - velocidade mínima) evoluindo em: (a) plano inclinado e (b) canal inclinado. Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.



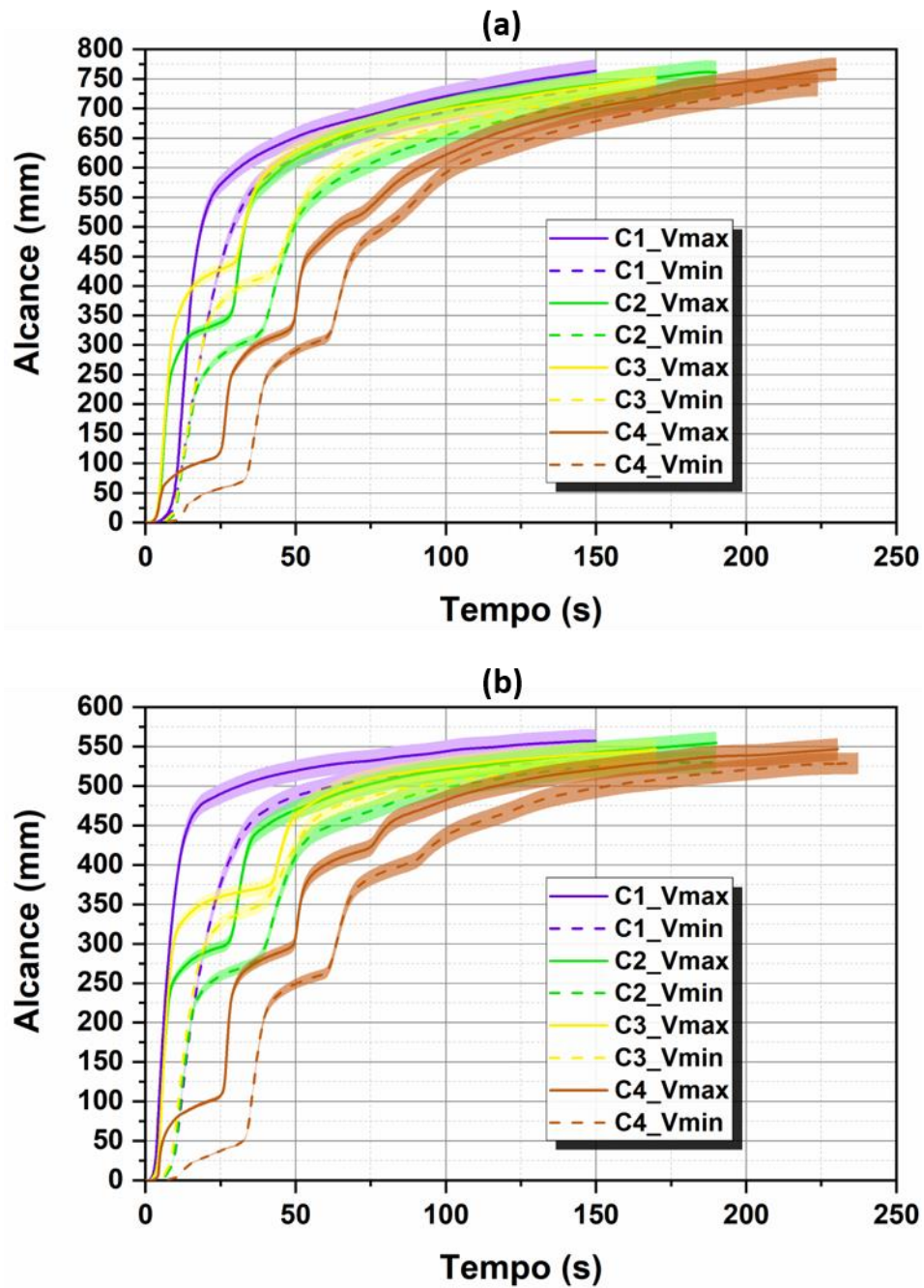
Fonte: Próprio autor

Figura 14 - Alcance da frente longo do tempo para a géis de carbopol C_0,25, 0°, segundo comporta de abertura gradual e diferentes velocidades de levantamento (linha inteira - velocidade máxima e linha pontilhada - velocidade mínima) evoluindo em: (a) plano inclinado e (b) canal inclinado. Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.



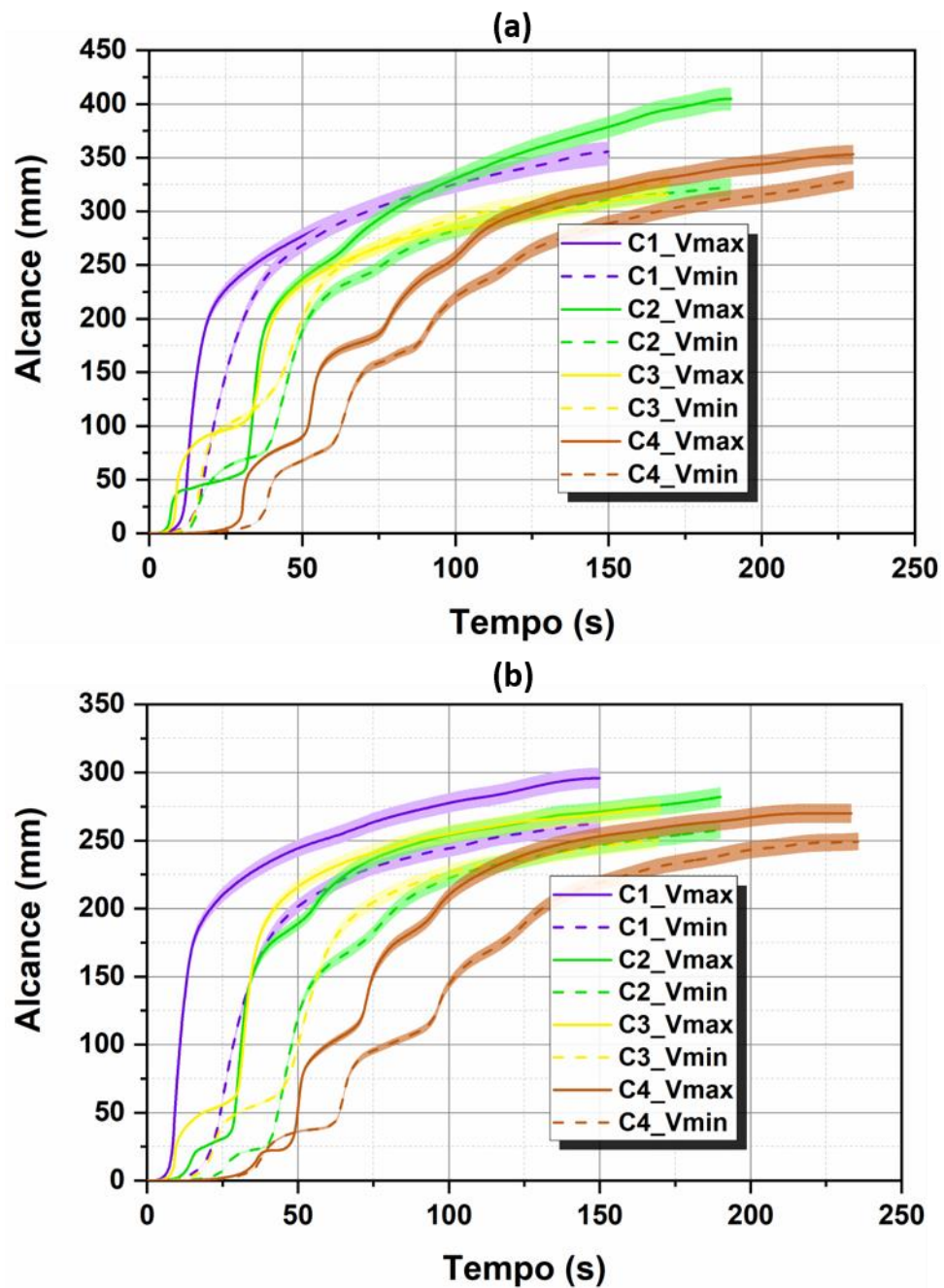
Fonte: Próprio autor

Figura 15 - Alcance da frente longo do tempo para a géis de carbopol C_0,17, 2°, segundo comporta de abertura gradual e diferentes velocidades de levantamento (linha inteira - velocidade máxima e linha pontilhada - velocidade mínima) evoluindo em: (a) plano inclinado e (b) canal inclinado. Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.



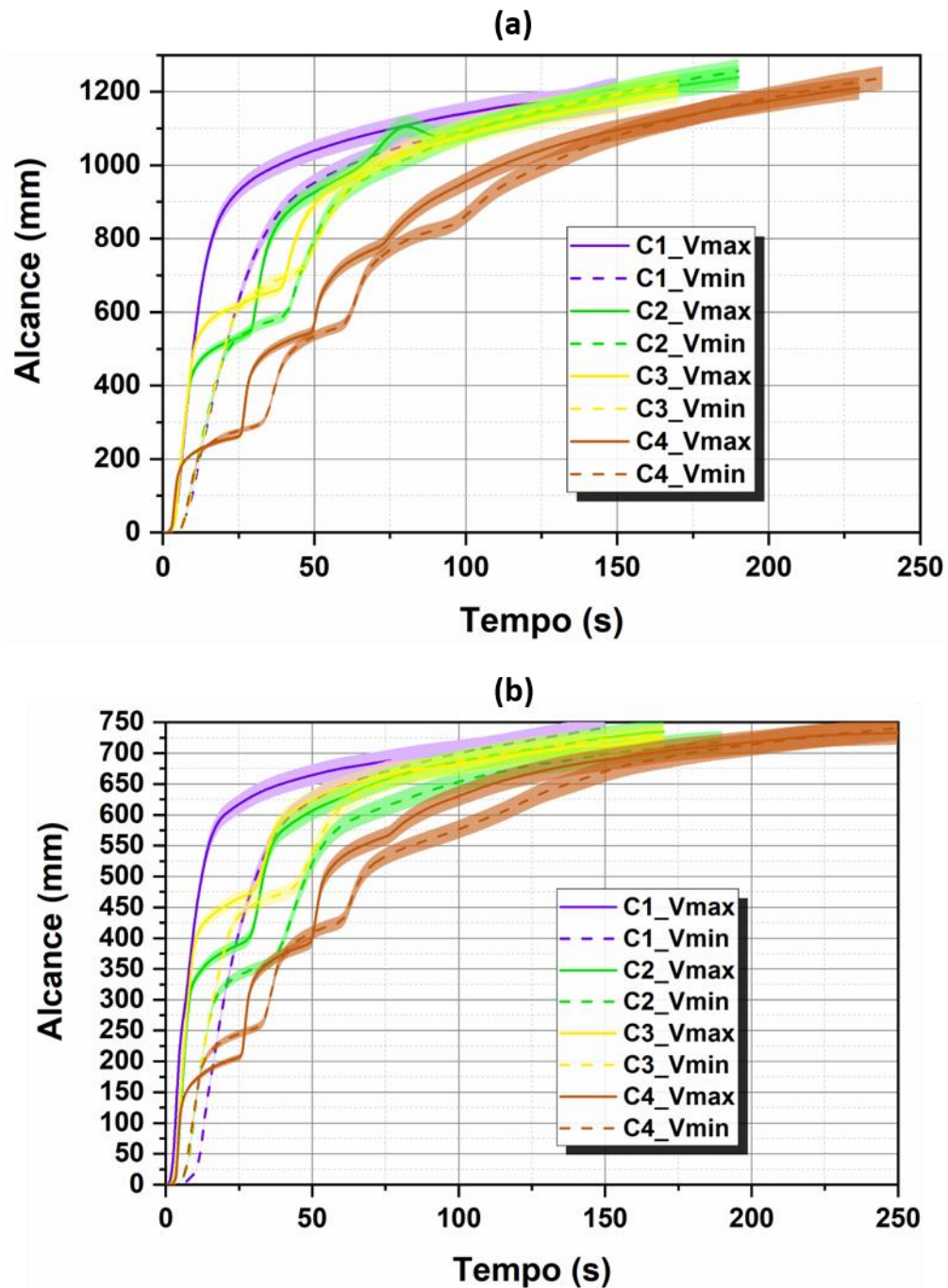
Fonte: Próprio autor

Figura 16 - Alcance da frente longo do tempo para a géis de carbopol C_0,25, 2º segundo comporta de abertura gradual e diferentes velocidades de levantamento (linha inteira - velocidade máxima e linha pontilhada - velocidade mínima) evoluindo em: (a) plano inclinado e (b) canal inclinado. Barra de erro das medidas de alcance definida segundo incerteza de 2,60%.



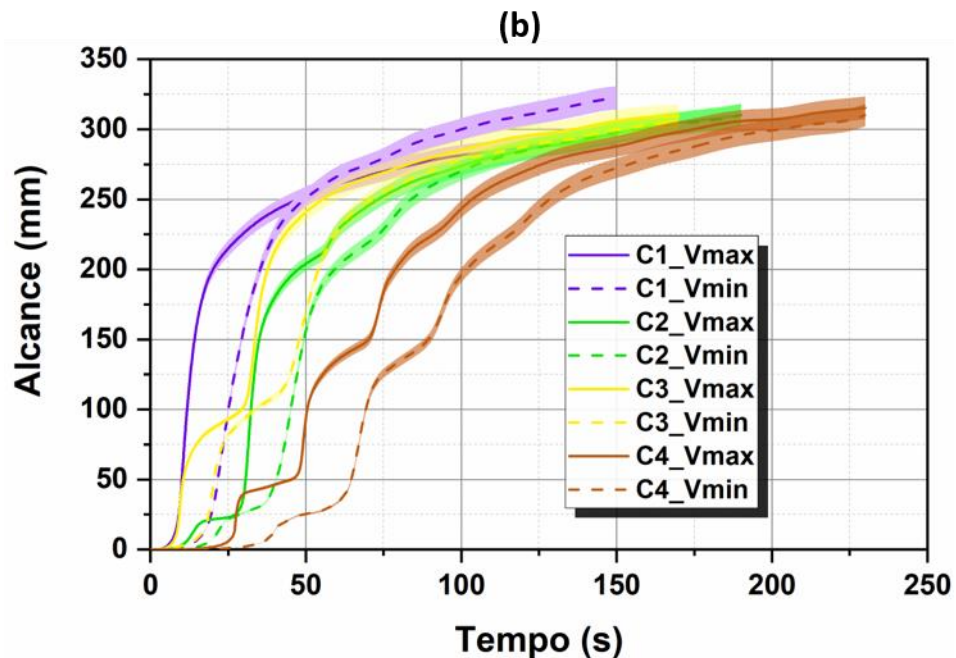
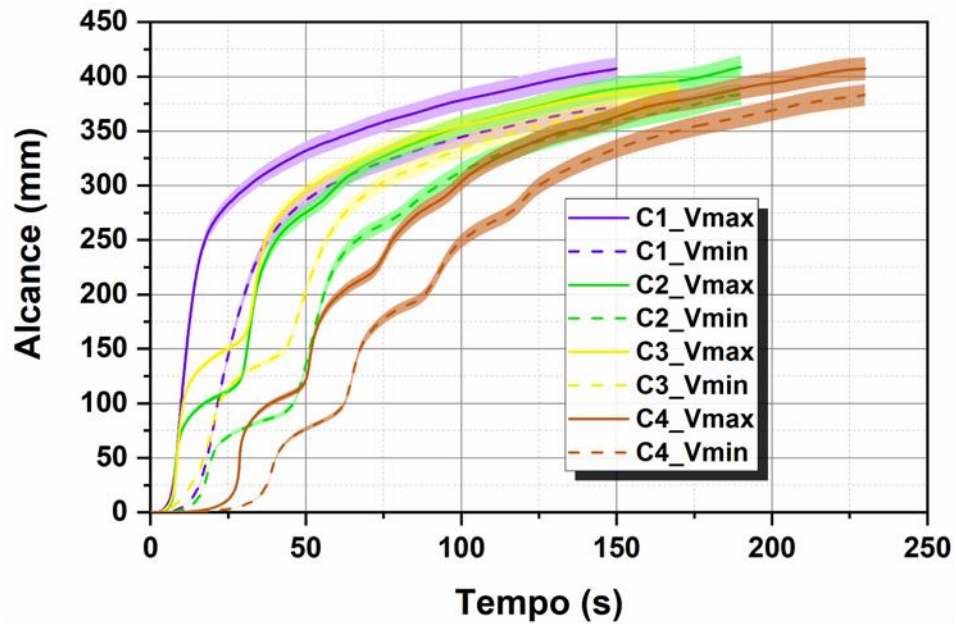
Fonte: Próprio autor

Figura 17 - Alcance da frente longo do tempo para a géis de carbopol C_0,17, 4º segundo comporta de abertura gradual e diferentes velocidades de levantamento (linha inteira - velocidade máxima e linha pontilhada - 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

Figura 18 - Alcance da frente longo do tempo para a géis de carbopol C_0,25, 4º segundo comporta de abertura gradual e diferentes velocidades de levantamento (linha inteira - velocidade máxima e linha pontilhada - 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

Ao avaliar o efeito da abertura da comporta comparando duas concentrações de fluido analisados, vale ressaltar que o fluido com as menores propriedades reológicas (menor tensão limite de escoamento, índice de consistência e índice de escoamento) é o fluido mais sensível ao levantamento da comporta.

Desta forma, o efeito inercial no escoamento inicial pode ser confirmado, porém, considerando o alcance final (X_f), vale ressaltar que a velocidade de abertura não desempenha um papel dominante. O efeito de inércia é visível nos primeiros instantes da liberação do material, entretanto para tempos elevados as curvas de alcance tendem a valores de mesma ordem.

Os achados deste trabalho sobre a influência da velocidade de abertura da comporta têm sido discutidos nos últimos anos em diferentes problemas envolvendo a liberação de material inicialmente confinado, neste sentido podemos citar o trabalho de Gao e Fourie (2015) e São (2021). Assim como neste trabalho, estes autores determinaram o efeito da velocidade de abertura da barreira na evolução do escoamento.

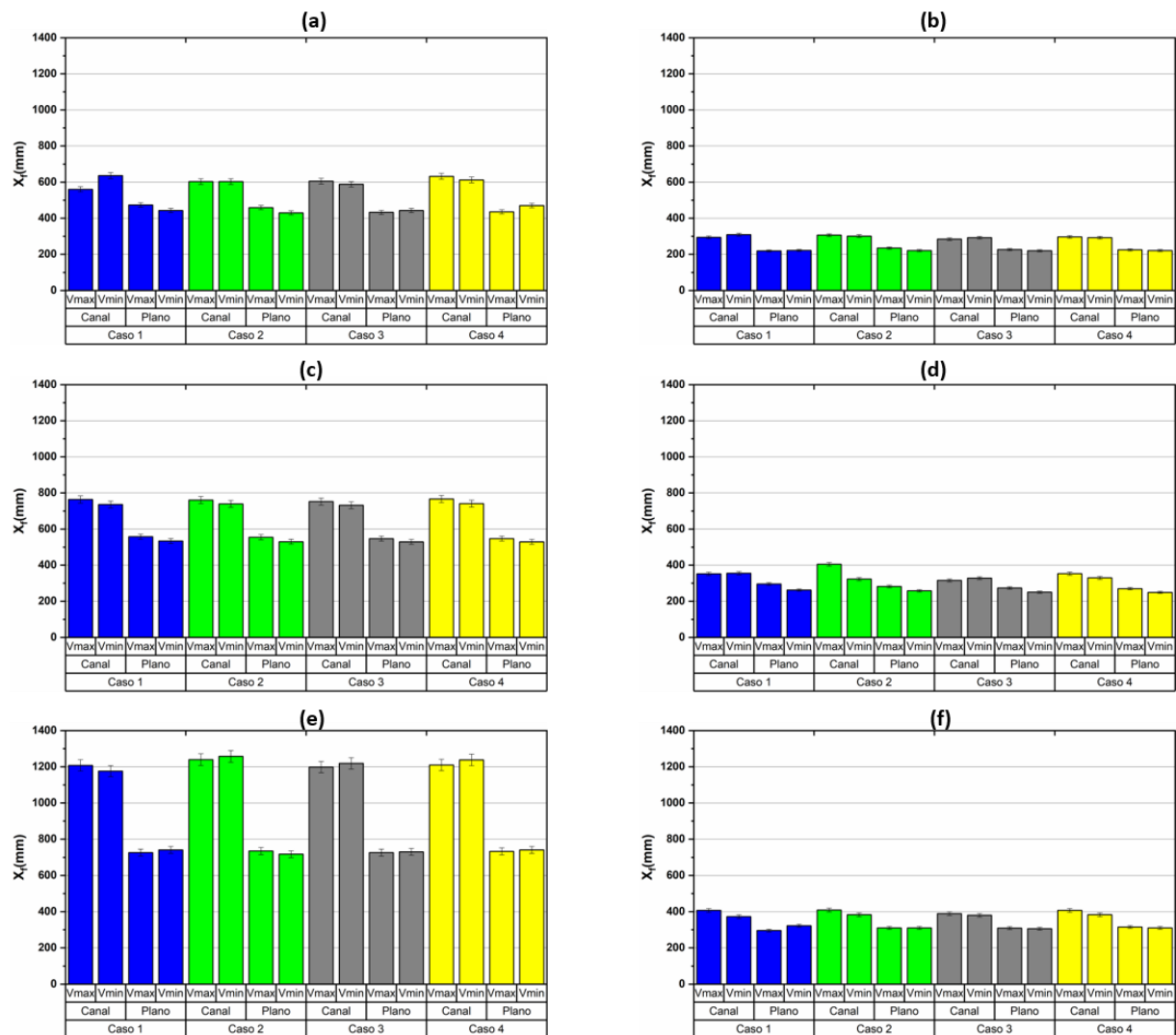
No que diz respeito à configuração de liberação do material (onde estão presentes diferentes estágios de abertura), o efeito de abertura sequencial tende a atenuar, ao longo do tempo, a evolução dos alcances. Neste sentido, e comparando os experimentos (diferentes velocidades de descida e fluidos), verifica-se que à medida que são utilizados mais estágios de liberação de material, a evolução espaço-temporal da frente viscoplástica torna-se mais lenta. Por exemplo, comparando os experimentos C_017, Vmin, a 0° de inclinação e plano inclinado (Figura 13), nos quais o mesmo fluido é avaliado, segundo a mesma inclinação e a mesma velocidade de abertura da comporta, diferindo apenas as etapas de abertura, nota-se que primeiro experimento de abertura única, enquanto o segundo tem 5 estágios de abertura), parece que para atingir um raio de cerca de 600 mm foram necessários cerca de 100 s no experimento Caso 1, e 200s no experimento Caso 4.

Um comportamento interessante a ser discutido é o de comparar as curvas de alcance, segundo diferentes estágios de abertura, considerando o canal e o plano inclinado. Ressalta-se que na condição de canal inclinado, tanto para a velocidade de abertura da comporta como para todas as etapas de liberação de material, seus intervalos, para tempos $t > 150$ s, tendem para a mesma ordem de grandeza (ver Figuras 13 a 18), o que mostra que o alcance final, no caso de canal inclinado, é influenciada pelas propriedades reológicas e que a configuração de liberação do material (progressiva e sequencial) influencia diretamente na velocidade de avanço da frente viscoplástica, sem ter forte efeito no alcance final. Este efeito é semelhante ao observado em experimentos com diferentes velocidades de abertura da comporta.

O mesmo comportamento é observado para os escoamentos realizados em plano inclinado em geral, os trechos finais tendem para valores de ordem semelhante, indicando, também para

planos inclinados, a predominância dos parâmetros reológicos como efeito predominante sobre o alcance final. Contudo, tanto para canais inclinados como para planos inclinados, é evidente o efeito da liberação do material na evolução espaço-temporal das frentes viscoplásticas. Embora os intervalos atinjam valores próximos, o tempo que isso leva para acontecer depende da forma de liberação empregada. Quanto mais estágios de abertura a ruptura envolve, mais tempo leva para o fluxo atingir sua extensão final. A Figuras 19 apresenta uma comparação dos resultados finais obtidos em cada experimento.

Figura 19-Alcance final X_f para todas as configurações experimentais: (a) 0° C_017, (b) 0° C_025 (c) 2° C_017, (d) 2° C_025, (e) 4° C_017, (f) 4° C_025. Coluna 1 formada por fluido na concentração de 17% e coluna 2 por fluido na concentração de 25%.



Fonte: Próprio autor

Analisando a Figura 19, fica clara a dependência de uma determinada concentração, tipo de escoamento e inclinação com relação ao alcance. Ou seja, para uma dada concentração, tipo

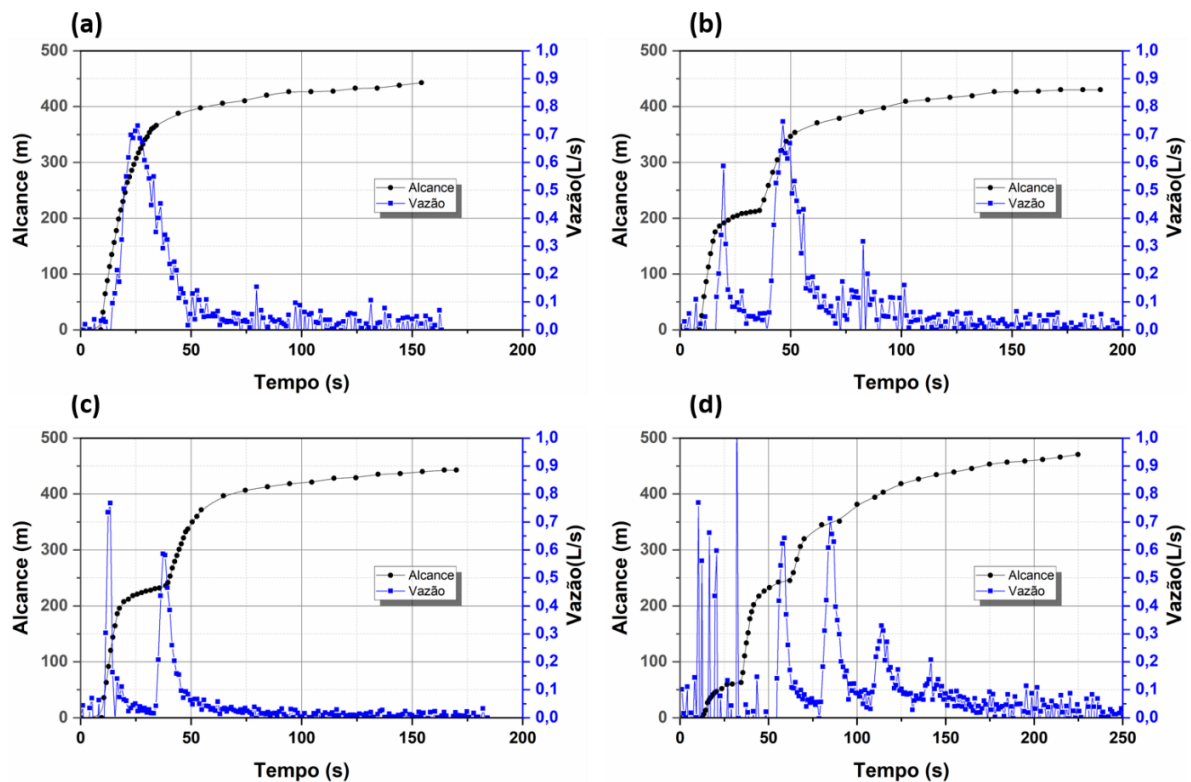
de escoamento (canal ou plano) e inclinação, o alcance tende a ter valores semelhantes nos quatro casos.

Nota-se também a influência do tipo de escoamento no alcance do fluido escoante. Em escoamento canalizado o alcance da frente de alcance é maior, visto a maior concentração de pressão a montante do canal. Já no escoamento em plano inclinado, por conta da ausência das canaletas, o fluido se espalha diminuindo sua pressão rapidamente a montante do escoamento.

4.2. HIDROGRAMA DE RUPTURA

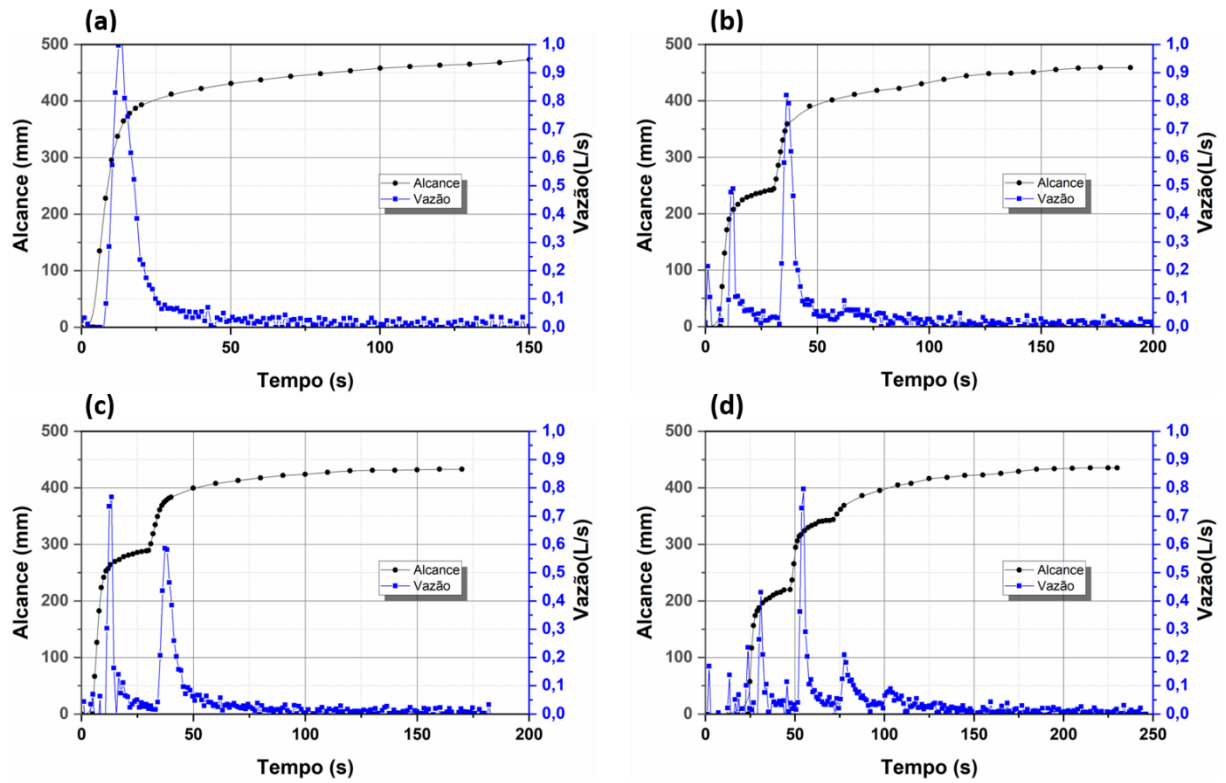
A partir da evolução do nível do fluido no reservatório ao longo do tempo, foram obtidos os hidrogramas de ruptura. Logicamente é possível identificar que a imposição dos estágios de abertura atua como um efeito retardador para a liberação de material do reservatório, portanto quanto mais estágios consideramos, mais importante é a energia dissipada pelo fluxo e maior é a atenuação dos hidrogramas. As Figuras 20 a 43 permitem identificar o comportamento dos hidrogramas obtidos para diferentes fases de abertura da porta em função de dois níveis de velocidade de abertura da comporta.

Figura 20- Hidrogramas de *dam-break* de géis de carbopol de concentração $C_{0,17}$, com 0° de inclinação, escoamento canalizado, V_{min} : (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4.



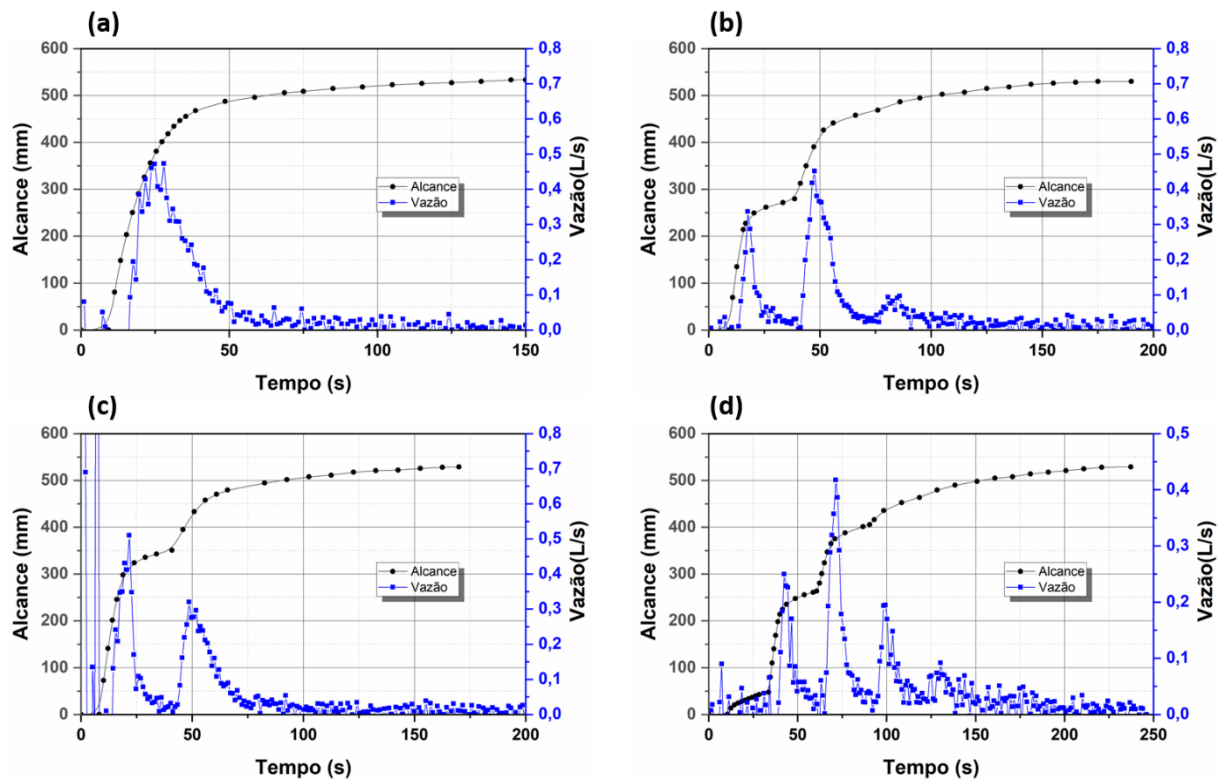
Fonte: Próprio autor

Figura 21- Hidrogramas de *dam-break* de géis de carbopol de concentração C_0,17, com 0° de inclinação, escoamento canalizado, $V_{m\acute{a}x}$: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4.



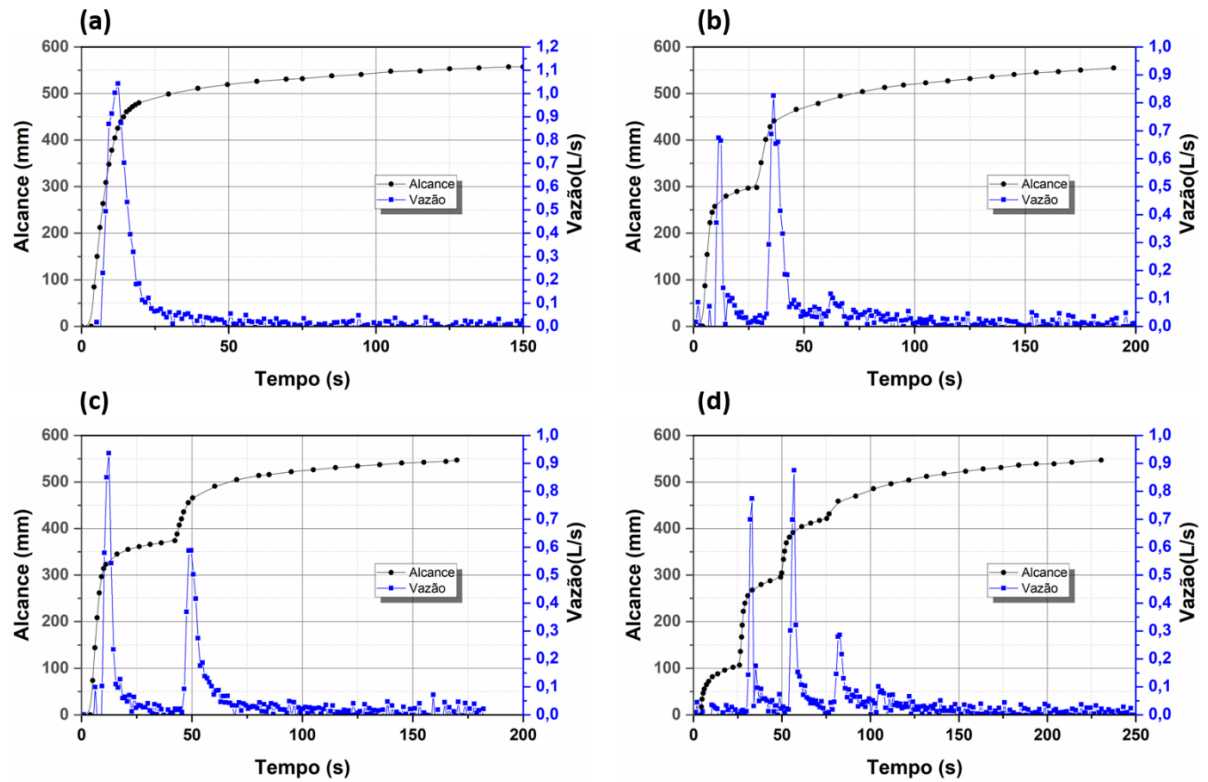
Fonte: Próprio autor

Figura 22- Hidrogramas de *dam-break* de géis de carbopol de concentração C_0,17, com 2° de inclinação, escoamento canalizado, V_{min} : (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4.



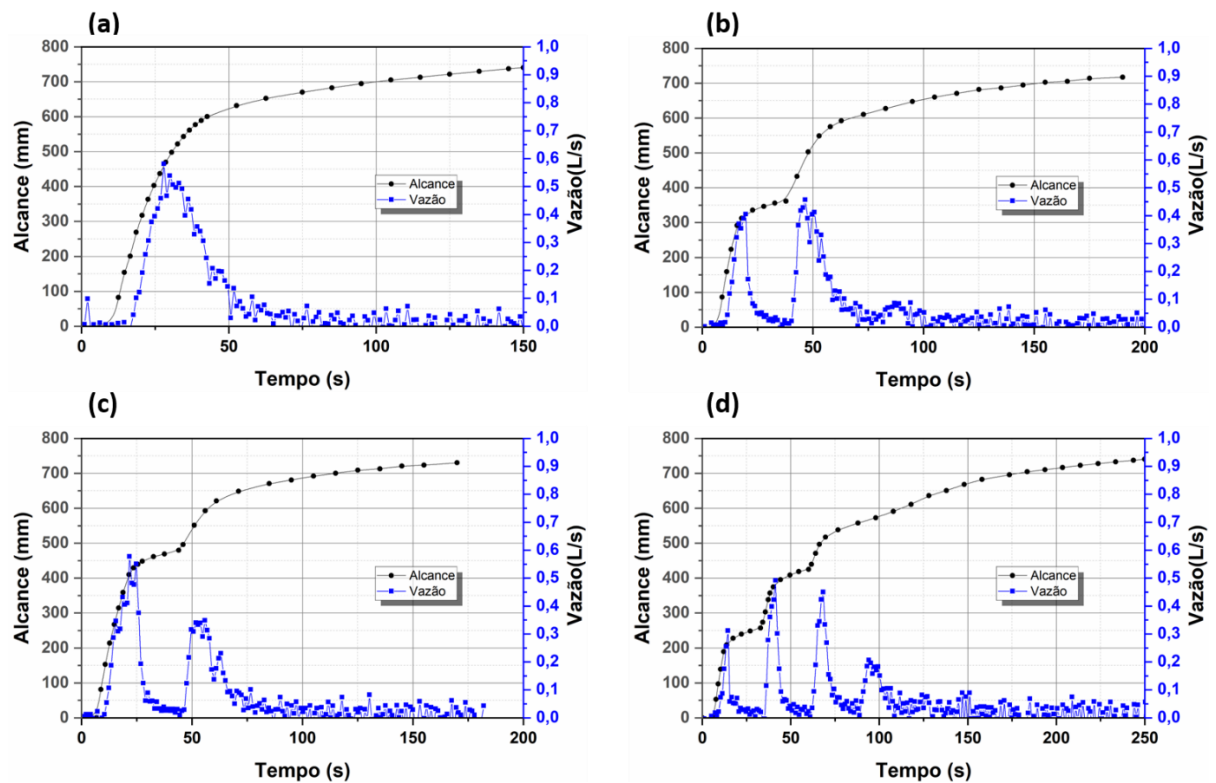
Fonte: Próprio autor

Figura 23- Hidrogramas de *dam-break* de géis de carbopol de concentração C_0,17, com 2° de inclinação, escoamento canalizado, $V_{m\acute{a}x}$: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4.



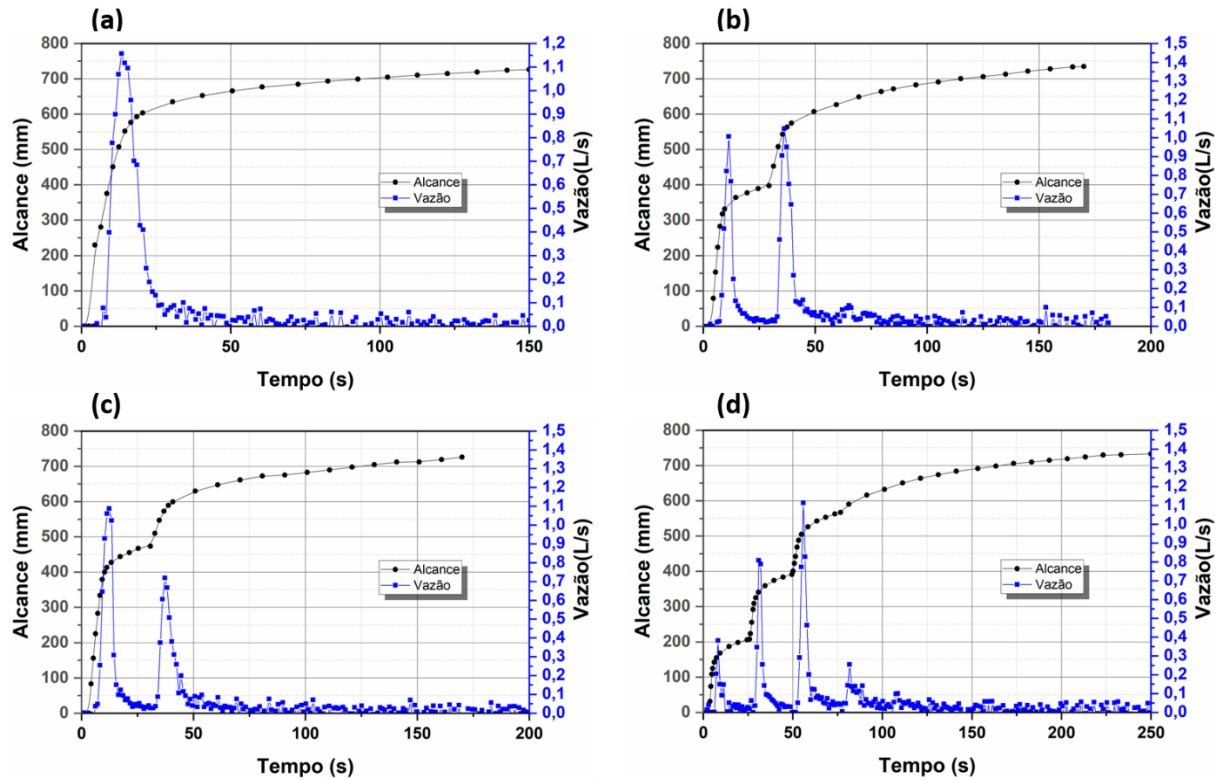
Fonte: Próprio autor

Figura 24- Hidrogramas de *dam-break* de géis de carbopol de concentração C_0,17, com 4° de inclinação, escoamento canalizado, V_{min} : (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4.



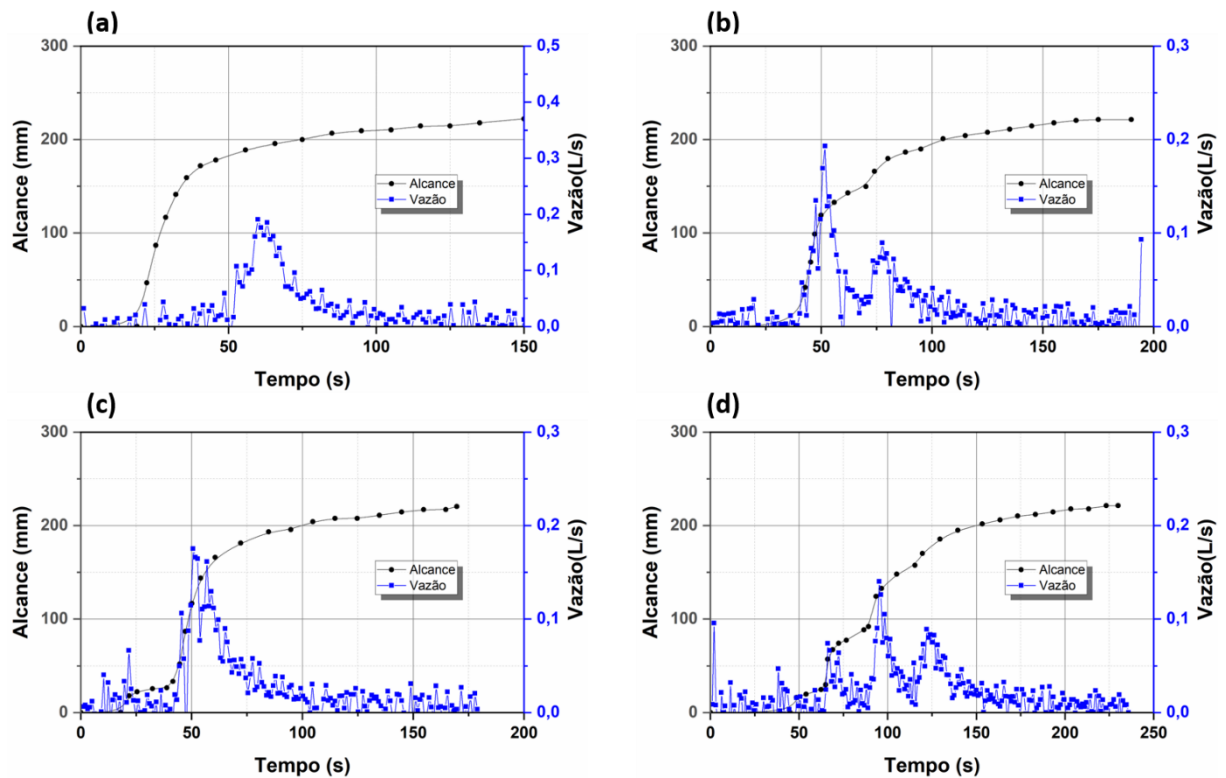
Fonte: Próprio autor

Figura 25 - Hidrogramas de *dam-break* de géis de carbopol de concentração C_0,17, com 4° de inclinação, escoamento canalizado, $V_{m\acute{a}x}$: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4.



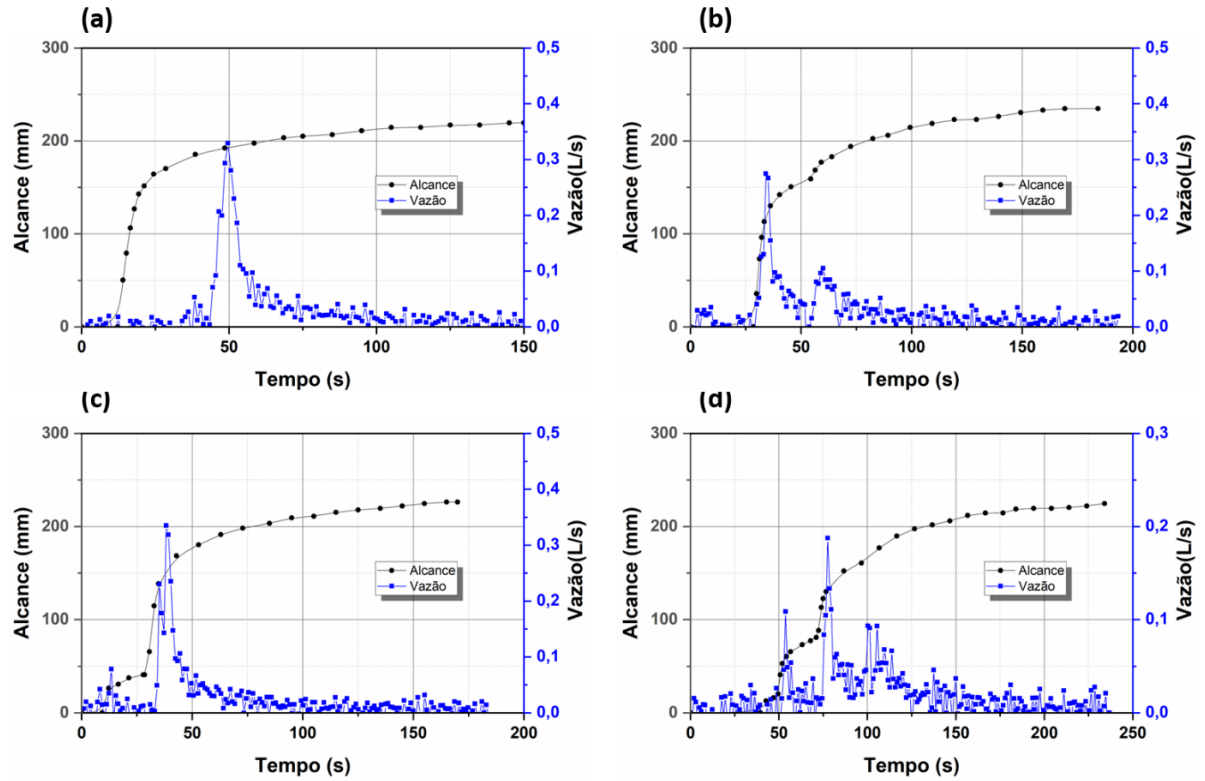
Fonte: Próprio autor

Figura 26 - Hidrogramas de *dam-break* de géis de carbopol de concentração C_0,25, com 0° de inclinação, escoamento canalizado, V_{min} : (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4.



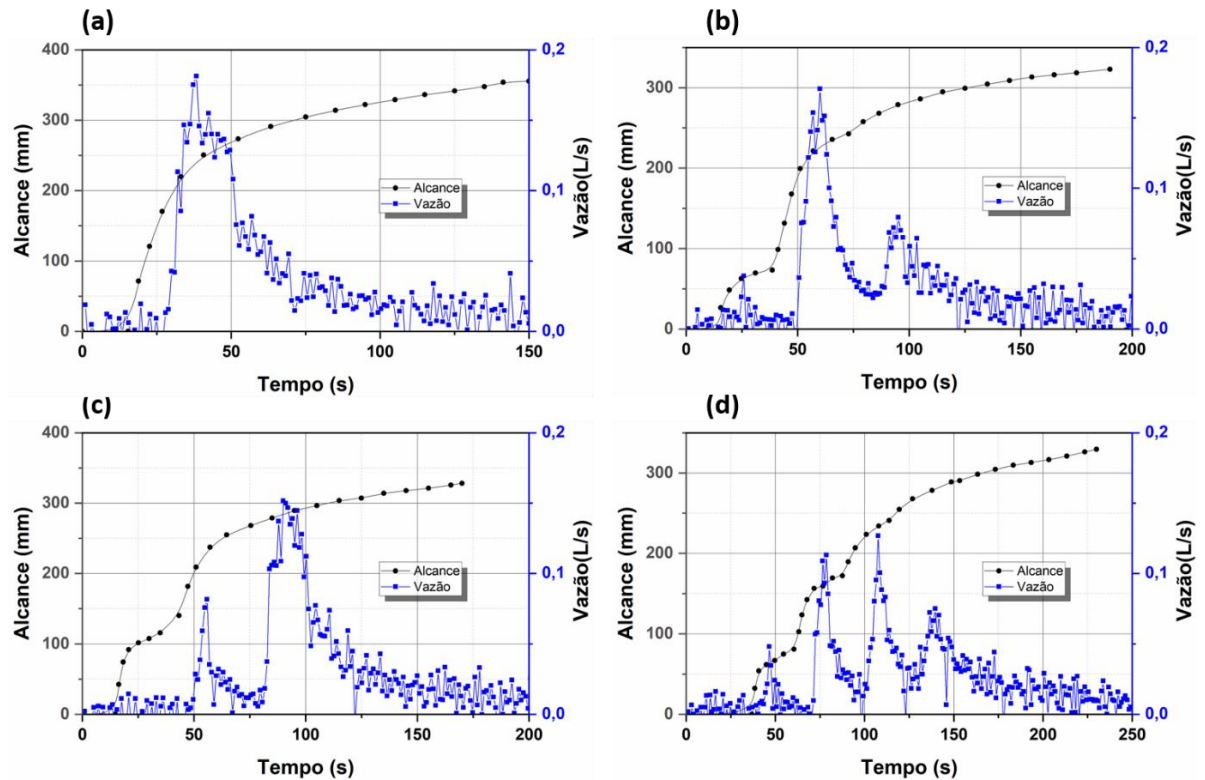
Fonte: Próprio autor

Figura 27 - Hidrogramas de *dam-break* de géis de carbopol de concentração $C_{0,25}$, com 0° de inclinação, escoamento canalizado, $V_{m\acute{a}x}$: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4.



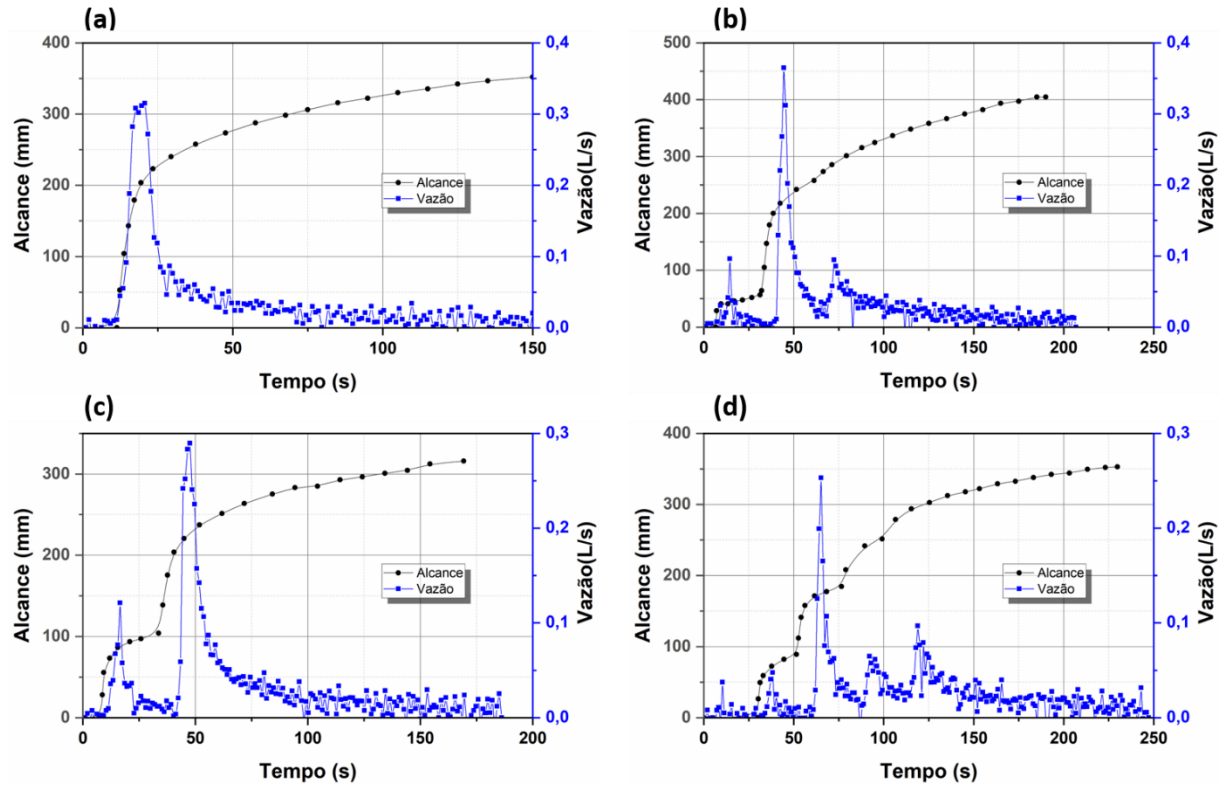
Fonte: Próprio autor

Figura 28 - Hidrogramas de *dam-break* de géis de carbopol de concentração $C_{0,25}$, com 2° de inclinação, escoamento canalizado, V_{min} : (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4.



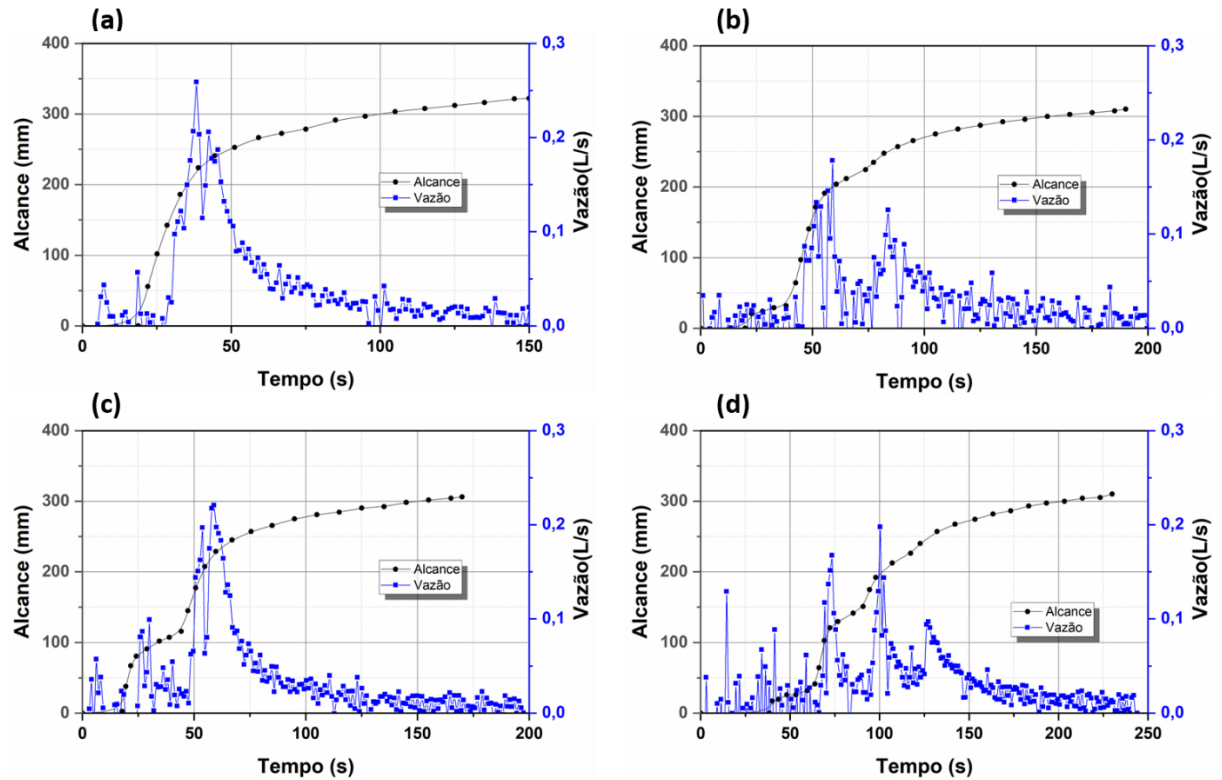
Fonte: Próprio autor

Figura 29 - Hidrogramas de *dam-break* de géis de carbopol de concentração C_0,25, com 2° de inclinação, escoamento canalizado, $V_{m\acute{a}x}$: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4.



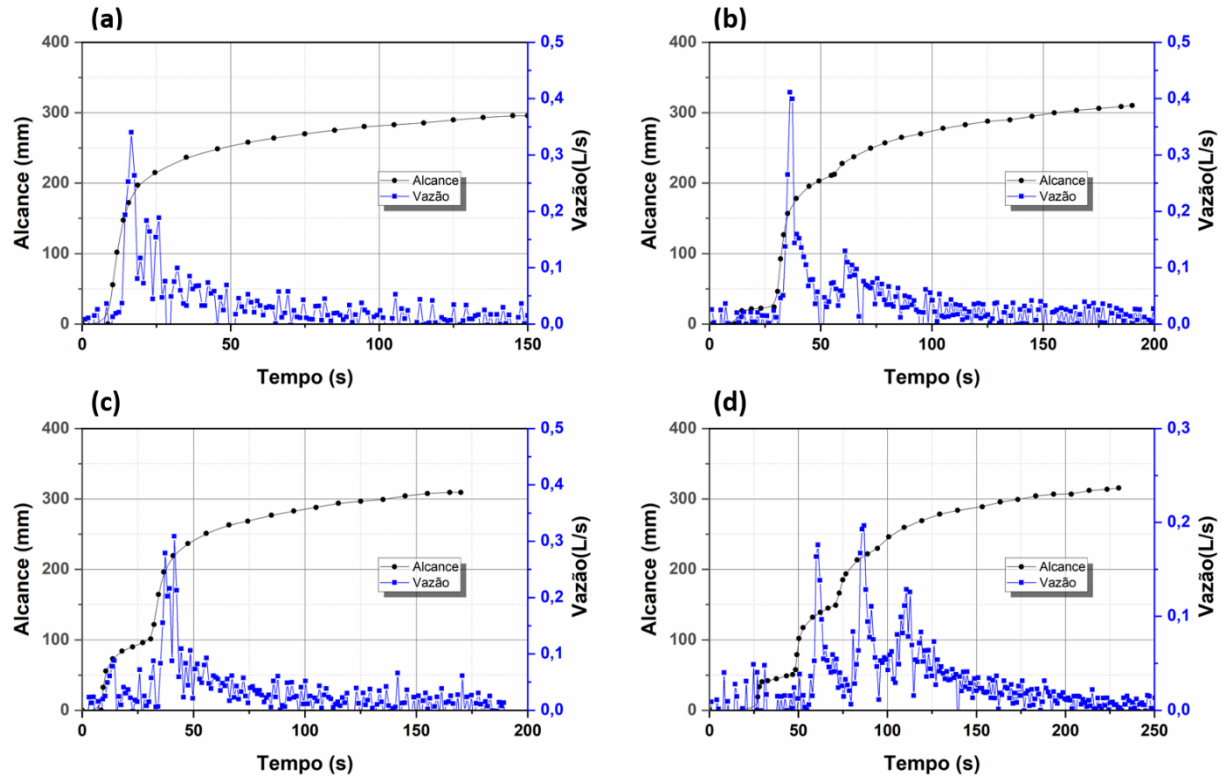
Fonte: Próprio autor

Figura 30 - Hidrogramas de *dam-break* de géis de carbopol de concentração C_0,25, com 4° de inclinação, escoamento canalizado, V_{min} : (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4.



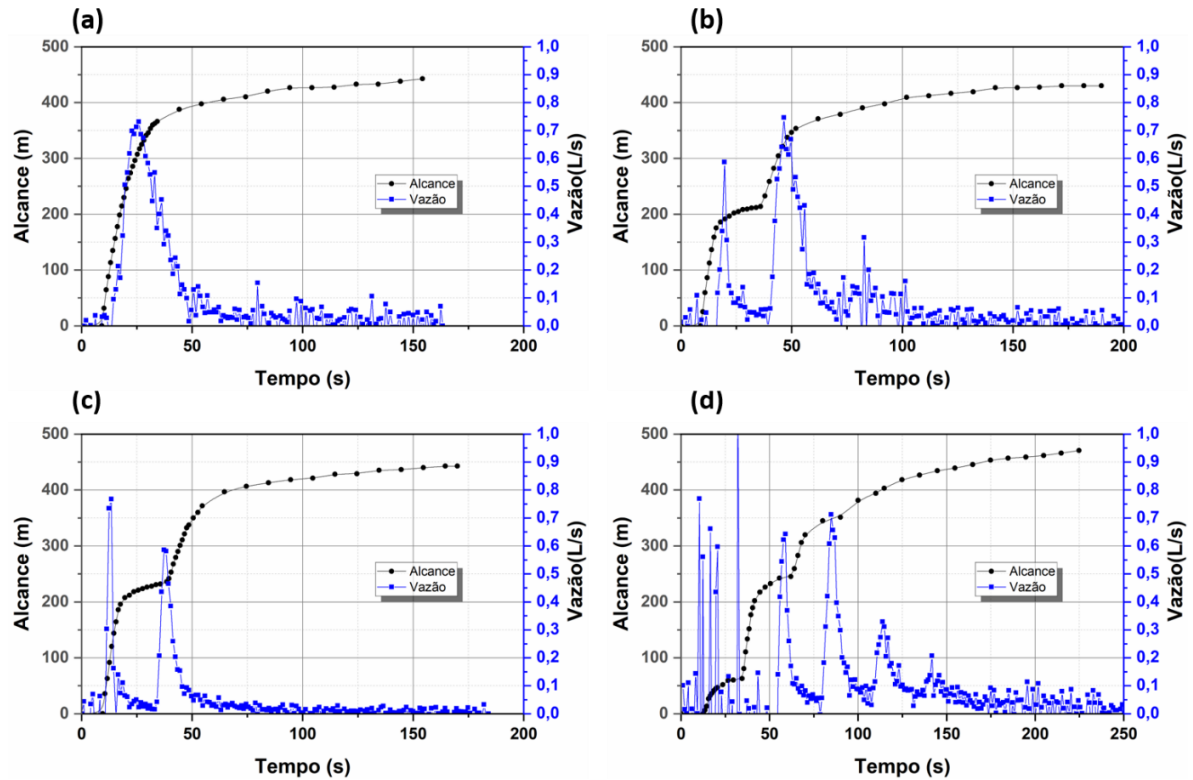
Fonte: Próprio autor

Figura 31 - Hidrogramas de *dam-break* de géis de carbopol de concentração C_0,25, com 4° de inclinação, escoamento canalizado, $V_{m\acute{a}x}$: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4.



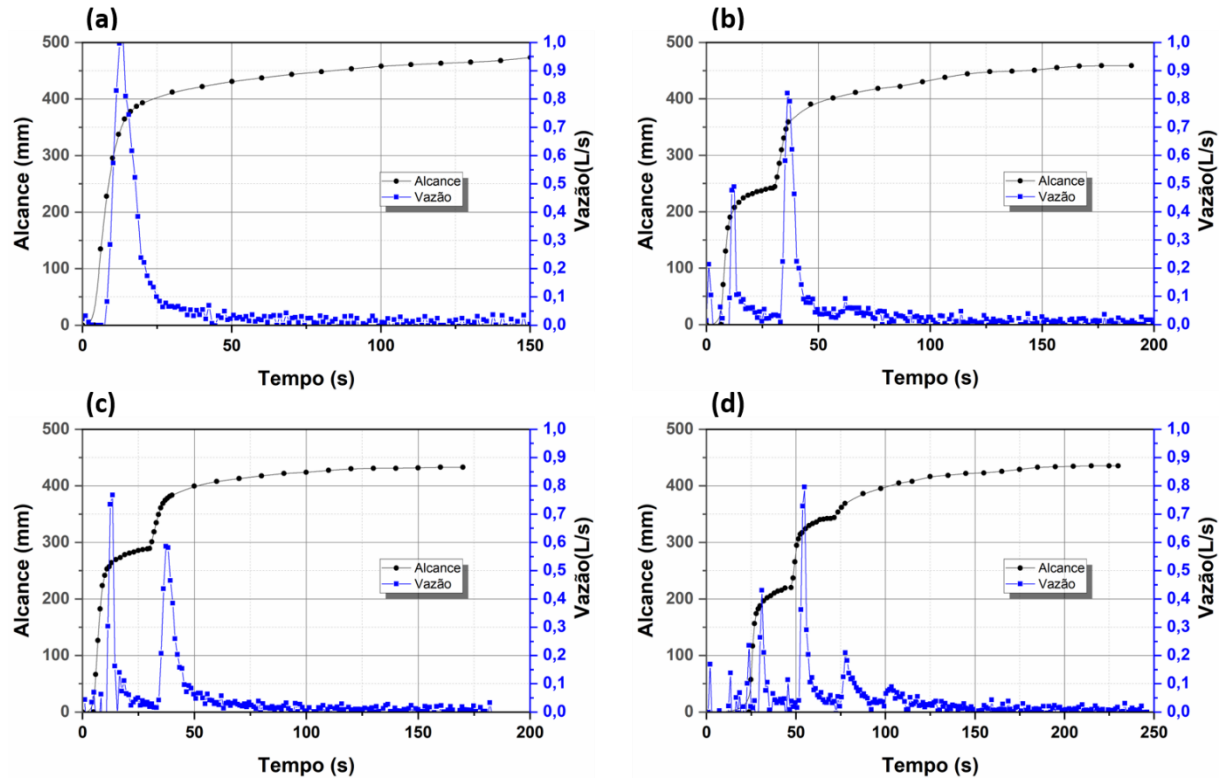
Fonte: Próprio autor

Figura 32 - Hidrogramas de *dam-break* de géis de carbopol de concentração C_0,17, com 0° de inclinação, plano inclinado, V_{min} : (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4.



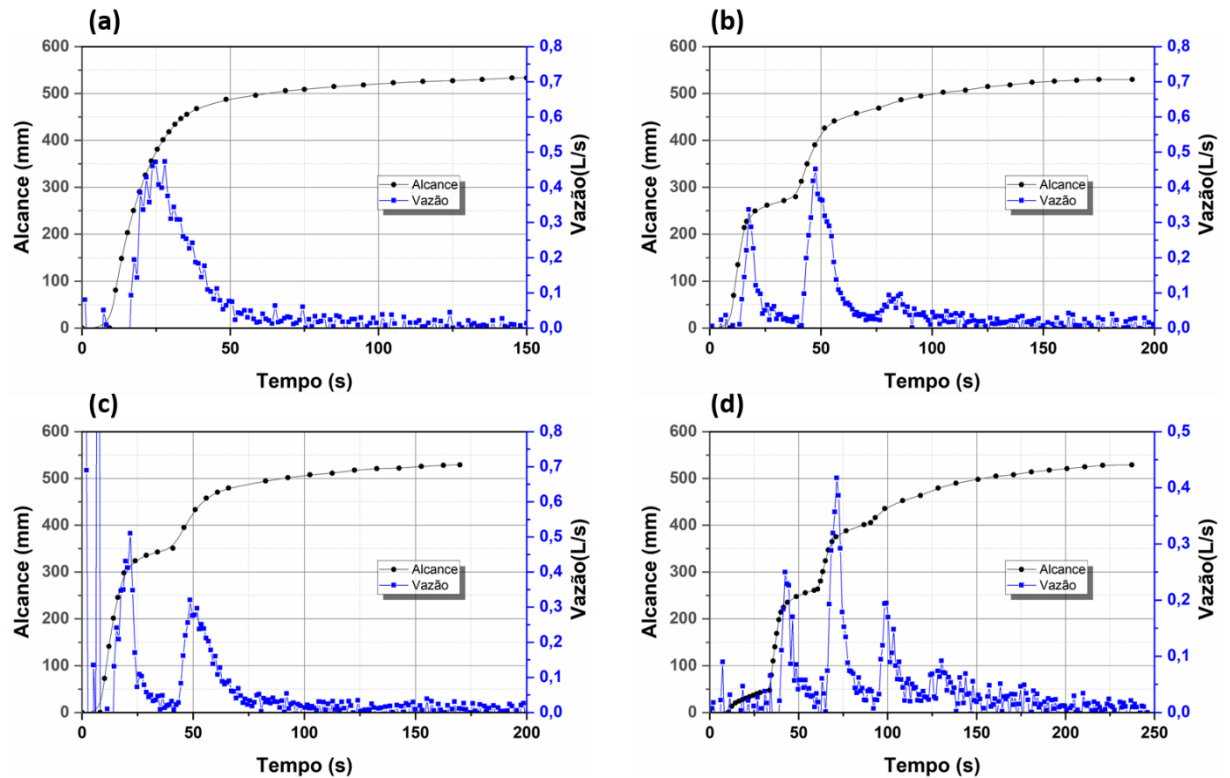
Fonte: Próprio autor

Figura 33 - Hidrogramas de *dam-break* de géis de carbopol de concentração C_0,17, com 0° de inclinação, plano inclinado, $V_{m\acute{a}x}$: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4.



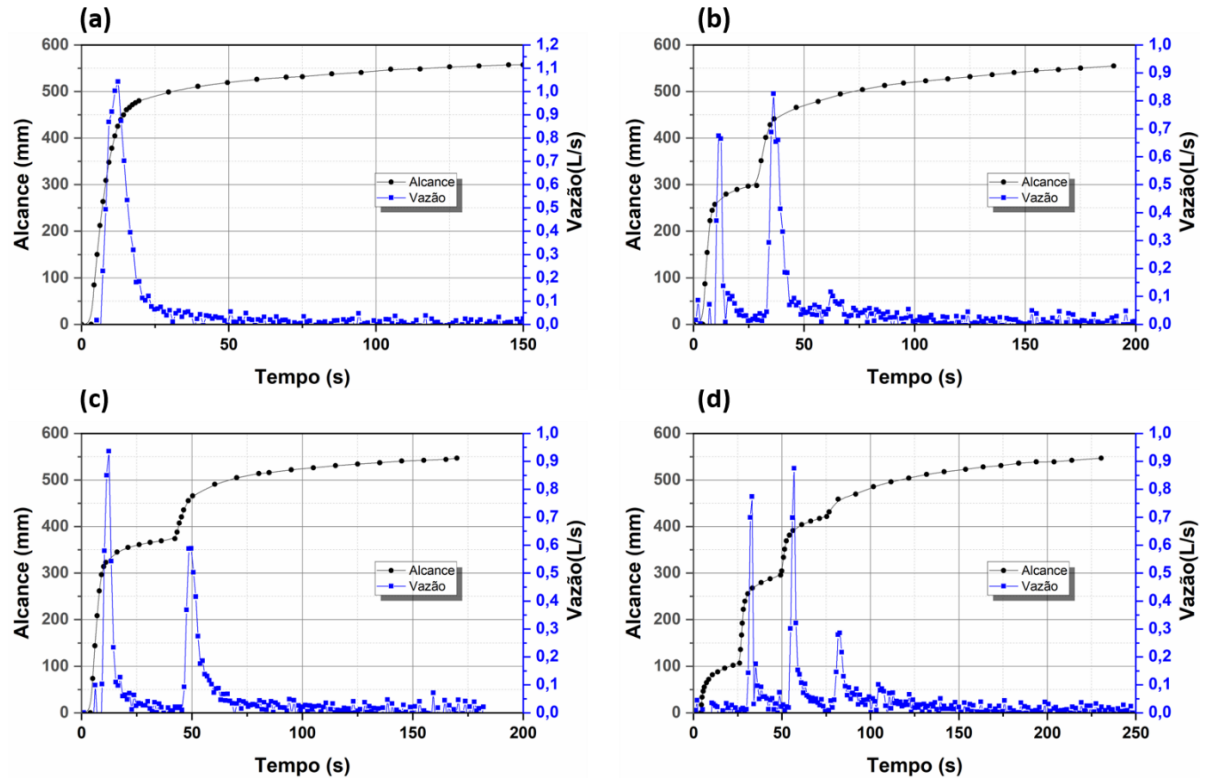
Fonte: Próprio autor

Figura 34 - Hidrogramas de *dam-break* de géis de carbopol de concentração C_0,17, com 2° de inclinação, plano inclinado, V_{min} : (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4.



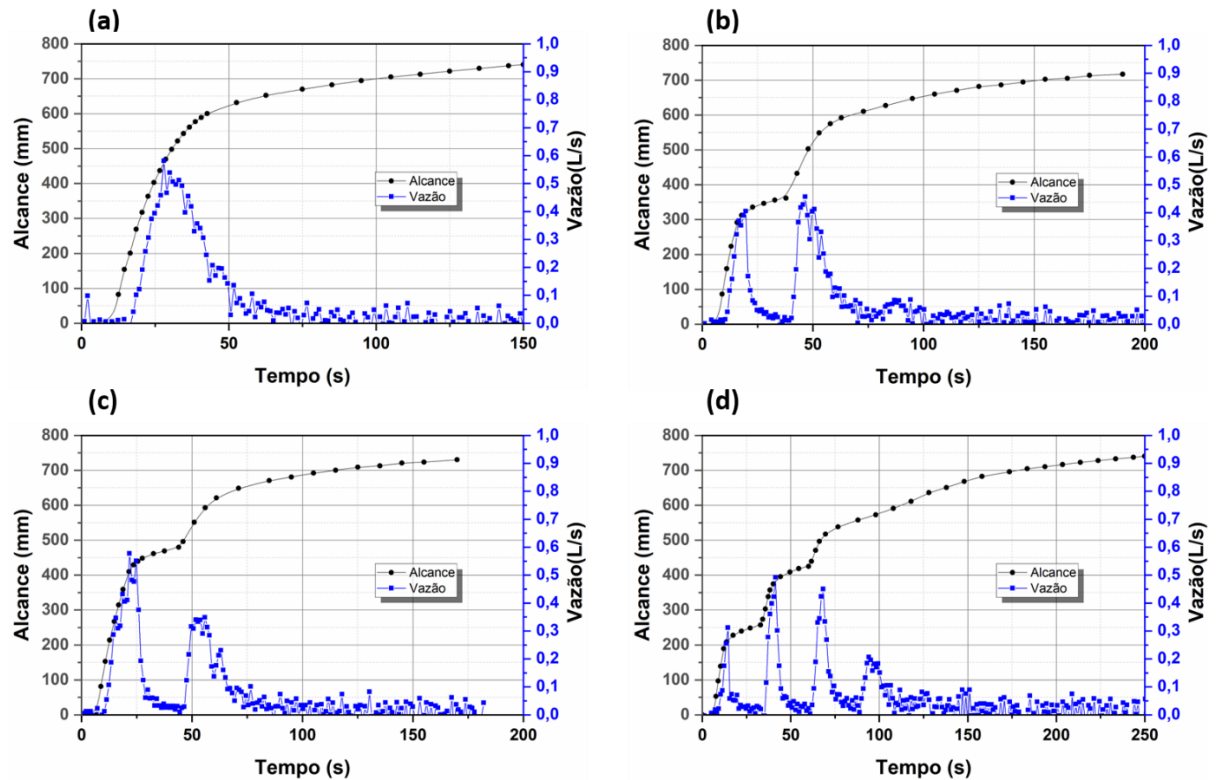
Fonte: Próprio autor

Figura 35 - Hidrogramas de *dam-break* de géis de carbopol de concentração C_0,17, com 2° de inclinação, plano inclinado, $V_{m\acute{a}x}$: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4.



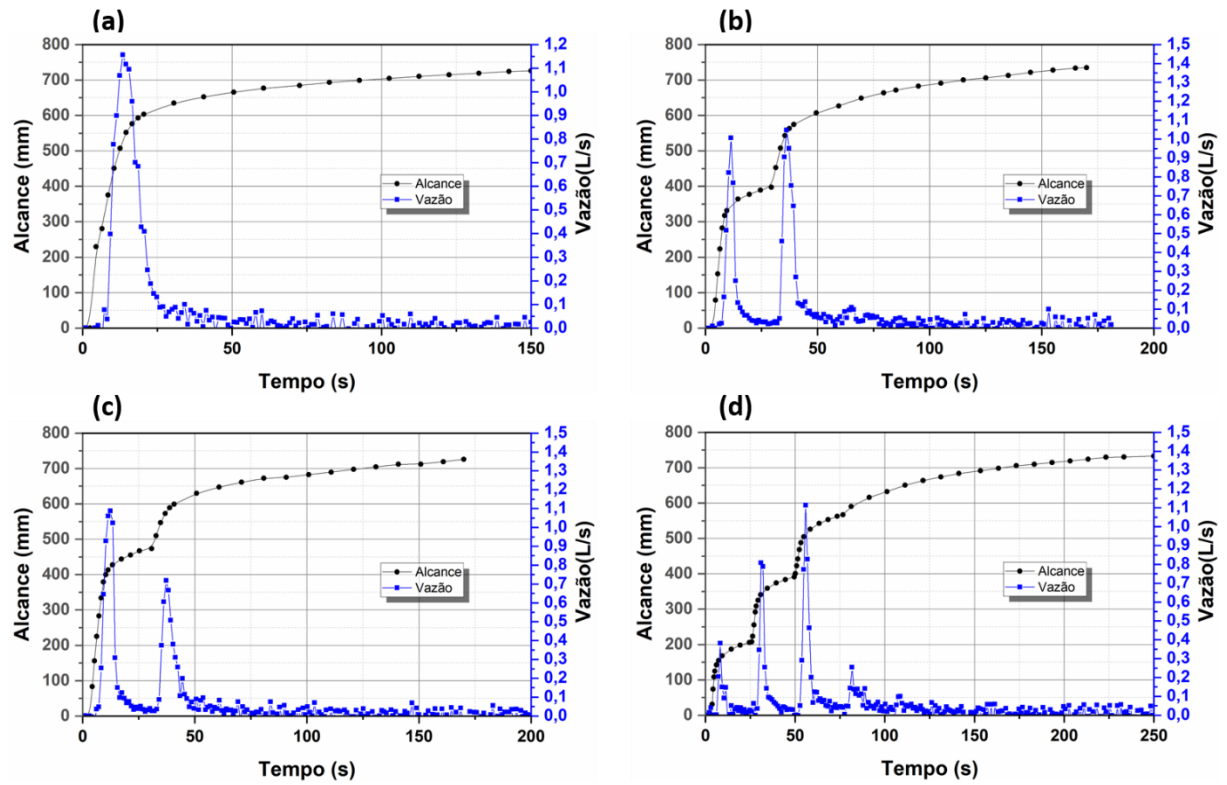
Fonte: Próprio autor

Figura 36 - Hidrogramas de *dam-break* de géis de carbopol de concentração C_0,17, com 4° de inclinação, plano inclinado, V_{min} : (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4.



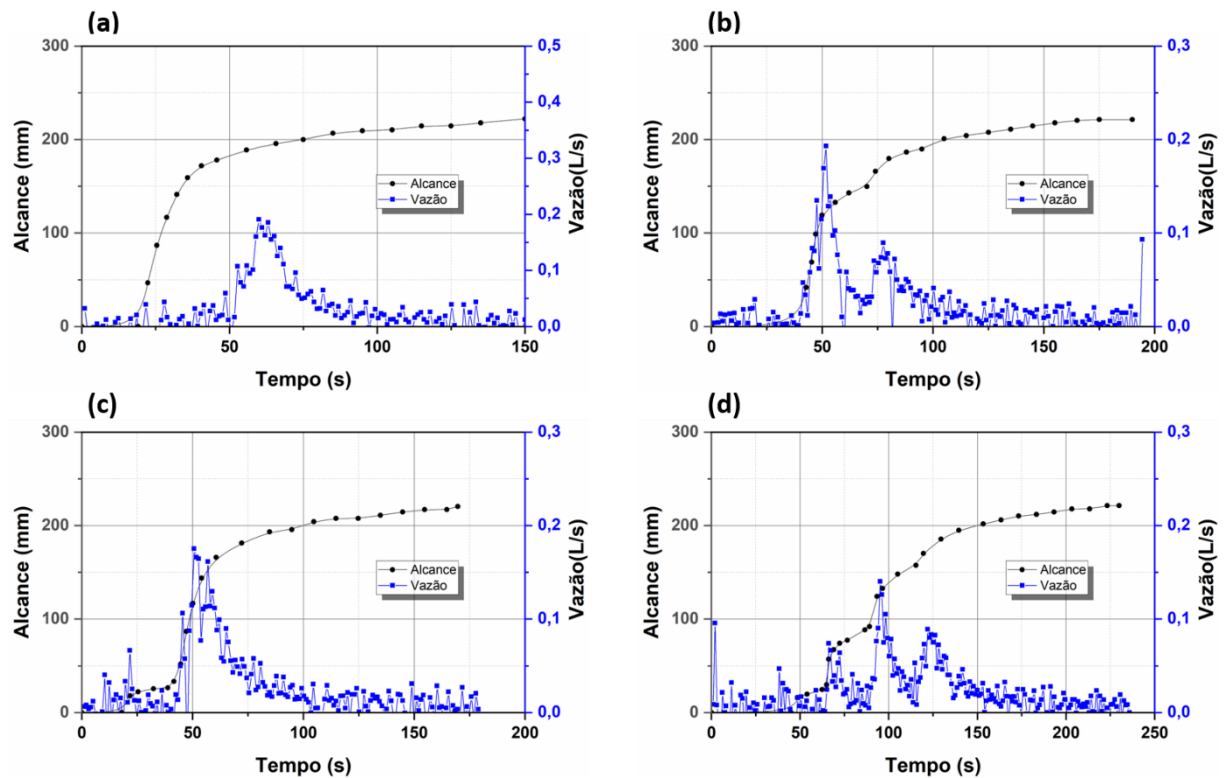
Fonte: Próprio autor

Figura 37 - Hidrogramas de *dam-break* de géis de carbopol de concentração C_0,17, com 4° de inclinação, plano inclinado, $V_{m\acute{a}x}$: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4.



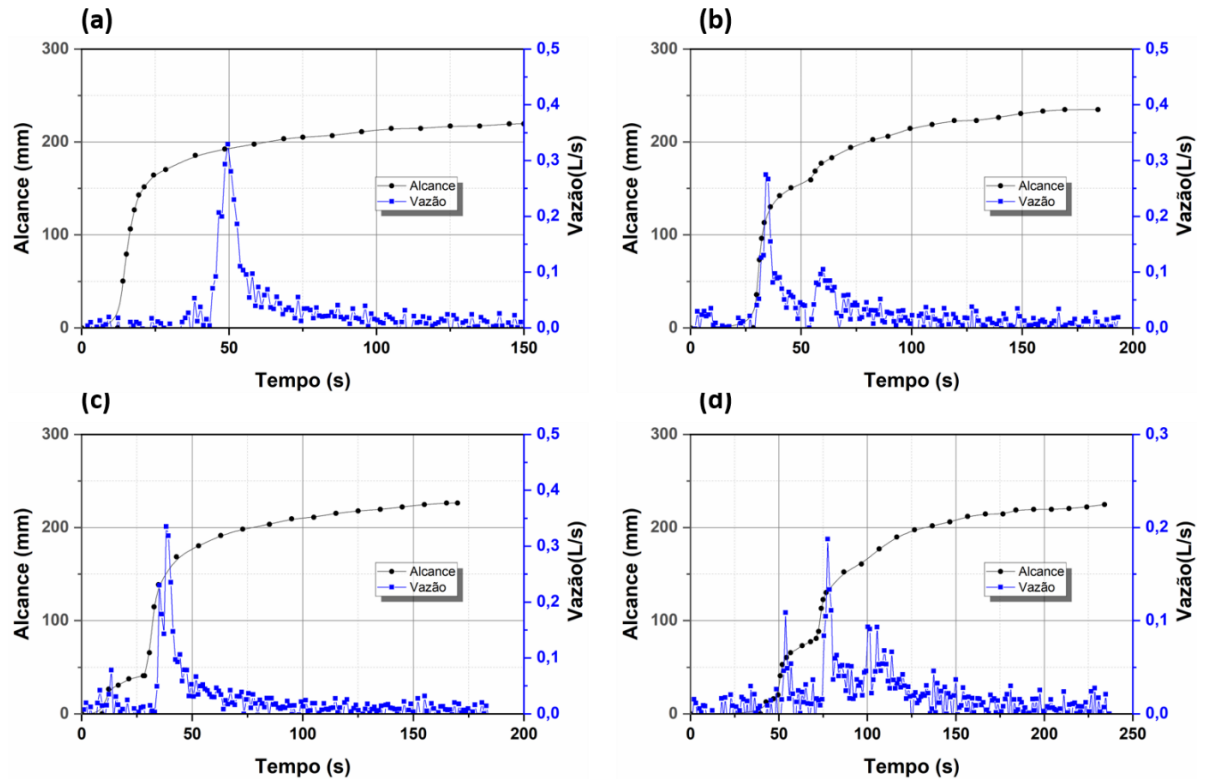
Fonte: Próprio autor

Figura 38 - Hidrogramas de *dam-break* de géis de carbopol de concentração C_0,25, com 0° de inclinação, plano inclinado, V_{min} : (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4.



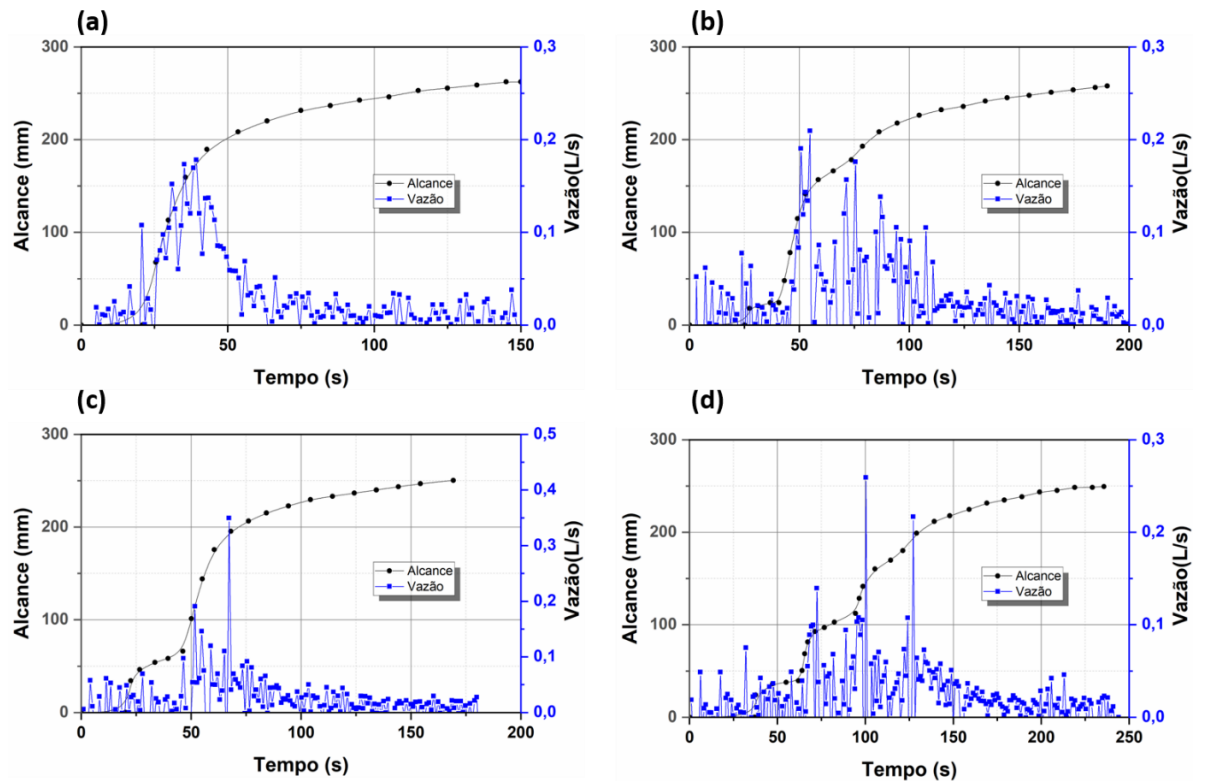
Fonte: Próprio autor

Figura 39 - Hidrogramas de *dam-break* de géis de carbopol de concentração $C_{0,25}$, com 0° de inclinação, plano inclinado, $V_{m\acute{a}x}$: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4.



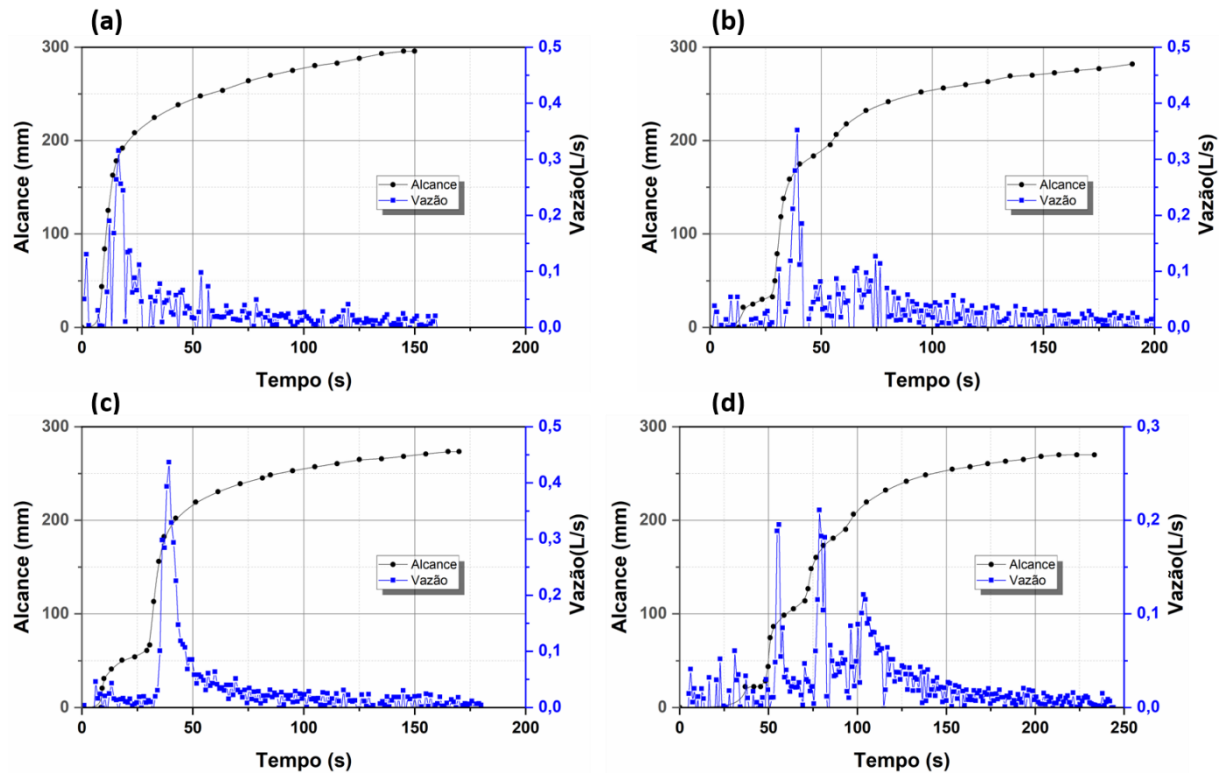
Fonte: Próprio autor

Figura 40 - Hidrogramas de *dam-break* de géis de carbopol de concentração $C_{0,25}$, com 2° de inclinação, plano inclinado, V_{min} : (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4.



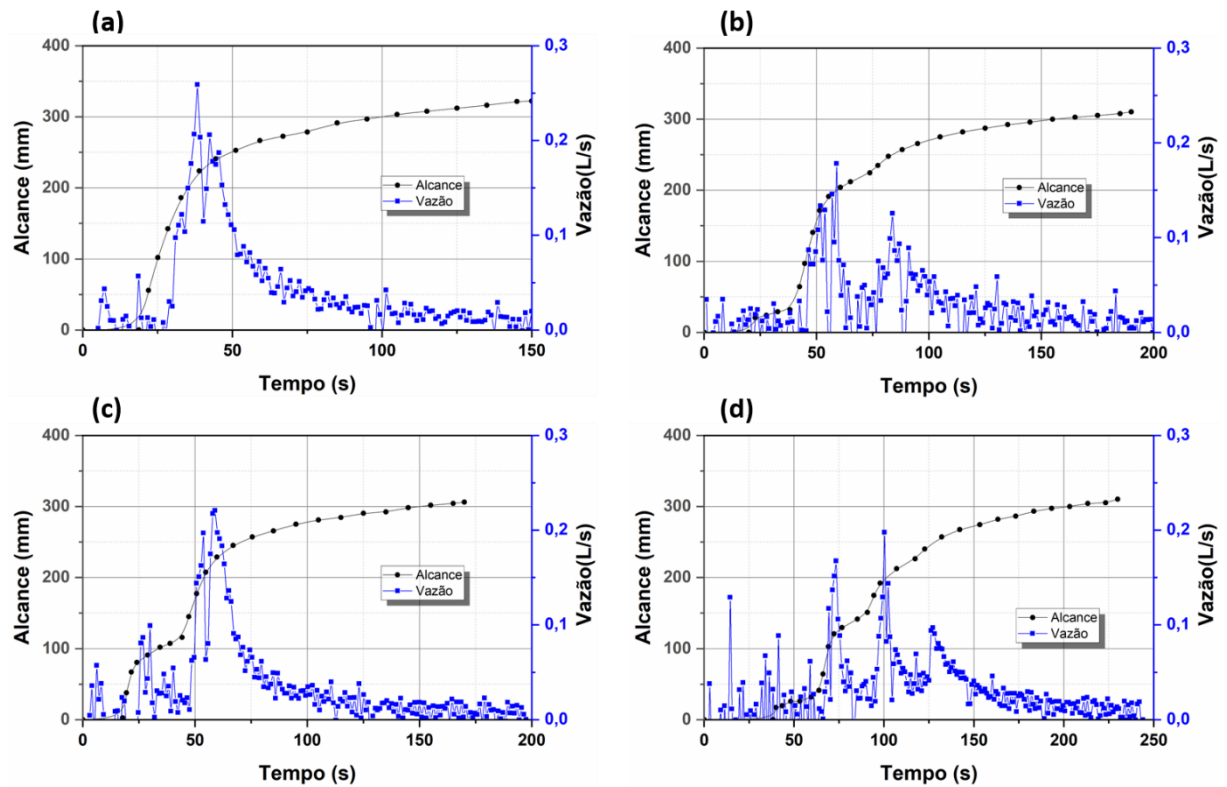
Fonte: Próprio autor

Figura 41 - Hidrogramas de *dam-break* de géis de carbopol de concentração $C_{0,25}$, com 2° de inclinação, plano inclinado, $V_{m\acute{a}x}$: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4.



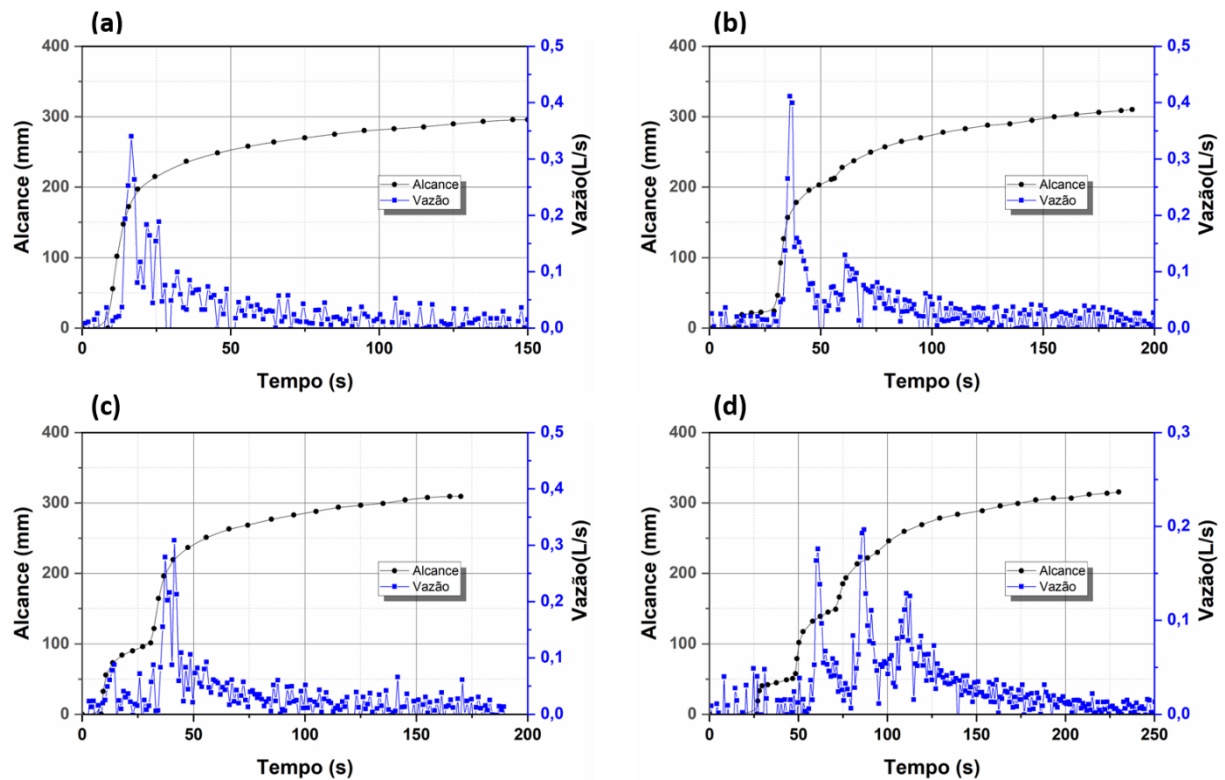
Fonte: Próprio autor

Figura 42 - Hidrogramas de *dam-break* de géis de carbopol de concentração $C_{0,25}$, com 4° de inclinação, plano inclinado, V_{min} : (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4.



Fonte: Próprio autor

Figura 43- Hidrogramas de *dam-break* de géis de carbopol de concentração C_0,25, com 4° de inclinação, plano inclinado, $V_{m\acute{a}x}$: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4.



Fonte: Próprio autor

A análise dos hidrogramas permite identificar a evolução do comportamento de ruptura em função do aumento do número de estágios de abertura. Experimentos, com único estágio de abertura de comporta (Caso 1) mostram um único pico de vazamento, caracterizado pelo pico máximo em comparação com experimentos com mais de um estágio de abertura. O Caso 2, que apresenta 3 estágios de abertura, no entanto apresenta em sua grande maioria de resultados 2 picos de vazão. O Caso 3 é possível ver nitidamente os dois picos de vazão, diante dos seus 2 estágios de abertura. Devido à baixa carga hidrostática disponível para a fase final de liberação dos experimentos Caso 2 e Caso 4, não foi possível identificar o quinto pico de vazão ligada a esses dois experimentos.

Comparando as figuras, como por exemplo a Figura 42 e Figura 43, cuja única diferença de escoamento é a velocidade de abertura da comporta, vemos que a diminuição na velocidade da abertura resultou em um amortecimento dos picos de vazão. Verifica-se que a condição de liberação progressiva tem influência significativa nos hidrogramas de ruptura, logo os picos de vazão diminuem à medida que se aumenta a quantidade de estágios de liberação de material. Comparando as Figuras 42 e Figura 43 vemos que ambos os casos com 1 estágio de abertura mostram uma diferença significativa dos valores dos picos de vazão. Enquanto com

velocidade máxima de abertura o pico de vazão é de 0,35 L/s, á velocidade mínima de abertura o pico é de 0,27 L/s. Cerca de 22% de redução.

5. CONCLUSÃO

O emprego de um dispositivo experimental de *dam break* permitiu a simulação física de ruptura de barragem, possibilitando escoamentos controlados e repetíveis. O controle da abertura da comporta se mostrou importante para compreender os efeitos do processo de liberação de material (formação de rechas) no desenvolvimento das frentes viscoplásticas.

A técnica de medição das curvas de alcance, baseada na imagem STI (*Space-Time Image*), permitiu rastrear as frentes viscoplásticas na seção central do canal com alta resolução espacial. Este método de análise melhorou a qualidade das curvas de alcance, identificando claramente os efeitos associados aos mecanismos de liberação de fluido. Assim, a imagem STI é uma ferramenta eficaz para rastrear frentes viscoplásticas e pode ser utilizada na avaliação espaço-temporal de escoamentos não permanentes, como em casos de rompimento de barragens.

Os resultados experimentais com géis de carbopol indicam que escoamentos em canais inclinados atingem maiores distâncias em comparação aos em planos inclinados, demonstrando a influência da geometria a jusante da barragem nos alcances das frentes viscoplásticas. Nos experimentos com duas velocidades de liberação de material para uma abertura gradual da comporta, constatou-se que a maior velocidade de abertura causou um efeito de inércia apenas nos momentos iniciais, resultando em maiores taxas de variação de alcance ao longo do tempo. No entanto, os alcances finais em $t \rightarrow \infty$ mostraram-se convergentes, independentemente da velocidade de abertura da comporta ou dos estágios de liberação do fluido. Com base nas medições experimentais, conclui-se que os alcances finais são fortemente dependentes da reologia do fluido, enquanto a velocidade de abertura da comporta e o método de liberação influenciam apenas a fase transiente do escoamento e o hidrograma unitário de ruptura, sem impactar significativamente o alcance final.

O aumento da inclinação resultou em um maior alcance da frente fluido. Este fenômeno pode ser explicado pelo fato de que a inclinação adicional proporciona uma maior força

gravitacional, que impulsiona o fluido a se deslocar mais rapidamente e a percorrer distâncias maiores.

Além disso, a reologia do fluido, que é o estudo de suas propriedades de fluxo e deformação, mostrou que, quanto maior a tensão limite de escoamento, menor é a influência dos efeitos da inércia no escoamento do fluido. A tensão limite de escoamento é a força mínima necessária para que o fluido comece a fluir, e quando essa força é alta, o fluido tende a resistir mais ao movimento inicial, reduzindo a contribuição da inércia.

Consequentemente, podemos observar que o fluido C_0,17, que possui uma tensão limite de escoamento menor, apresenta alcances maiores em comparação ao fluido C_0,25, que possui uma tensão limite de escoamento mais alta. Isso se deve ao fato de que o fluido C_0,17 é menos resistente ao início do movimento, permitindo que os efeitos da inclinação e da força gravitacional aumentada tenham um impacto mais significativo em seu deslocamento.

Na avaliação dos hidrogramas de ruptura, observou-se que a forma de liberação do material (diferentes estágios de abertura) e a velocidade de abertura da comporta têm grande influência. Os hidrogramas das frentes viscoplásticas, sejam elas de maior ou menor fluidez, são afetados pela liberação gradual e sequencial do material e pela velocidade da comporta, sugerindo a atuação do efeito de inércia.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMPO, E. A. D. et al. **SIMPLIFIED GUIDE FOR CLOSED/ABANDONED MINING WASTE FACILITIES RISK ASSESSMENT**. Ministério de agricultura y pesca, alimentación y medio ambiente. Madrid, p. 208. 2016.

CASTRO, A. L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2007.

INSTITUTO Minere. **Instituto Minere**, 2022. Disponível em: <<https://institutominere.com.br/blog/sabe-o-numero-de-barragens-de-rejeito-no-brasil>>. Acesso em: 08 Fevereiro 2023.

JUNIOR, T. F. D. S. **BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO NO BRASIL**. Universidade federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, p. 39. 2018.

MARTINS, L. F. **Barragens de rejeitos de mineração no Brasil: principais tipos de barragens, instrumentação e monitoramento**. Universidade Federal do Pará. Belém. 2016.

ROMIE, R. google.com. **Minera Jr.**, 2019. Disponível em: <https://minerajr.ufop.br/blog/reutilizacao_rejeitos_barragens_mineracao.html>. Acesso em: 15 Fevereiro 2023.

SOUZA, F. B. D. google.com. **Blog 2 Engenheiros**, 2018. Disponível em: <<https://2engenheiros.com/2018/01/30/barragens-histograma-no-r/>>. Acesso em: 08 Fevereiro 2022.

MARTINS, Luís Fernando. Barragens de rejeitos de mineração no Brasil: principais tipos de barragens, instrumentação e monitoramento. Orientadora: Gisele Ribeiro de Barros Yamanouth. 2016. 98 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geologia de Minas e Técnicas de Lavra a Céu aberto) - Faculdade de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016. Disponível em: <http://bdm.ufpa.br/jspui/handle/prefix/1974>. Acesso em: 15/02/2023 .

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. 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.