

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

ALAN VICTOR FERREIRA MODOLO

ESCOAMENTO DE MATERIAIS VISCOPLÁSTICOS: *DAM BREAK FLOW*

VITÓRIA

2017

ALAN VICTOR FERREIRA MODOLO

ESCOAMENTO DE MATERIAIS VISCOPLÁSTICOS: *DAM BREAK FLOW*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Edson José Soares

Coorientador: Prof. Dr. Bruno Venturini Loureiro

VITÓRIA

2017

ALAN VICTOR FERREIRA MODOLO

ESCOAMENTO DE MATERIAIS VISCOPLÁSTICOS: *DAM BREAK FLOW*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Aprovada em 24 de Março de 2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Edson José Soares - Orientador
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Bruno Venturini Loureiro - Coorientador
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Roney Leon Thompson - Examinador externo
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires - Examinador Interno
Universidade Federal do Espírito Santo

“Pois Dele, por Ele e para Ele são todas as coisas. A Ele seja a glória para sempre! Amém. ”.

Romanos 11:36

À Deus e minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre me iluminou e proporcionou tantas oportunidades e realizações em minha vida.

À minha família, que me deu incentivo e apoio, em especial meus pais, Jandira Ferreira Modolo e Almir Modolo, por compartilhar das minhas realizações e pelo amor incondicional. Meu irmão Daniel Rodrigo Ferreira Modolo, que sempre torceu pelo meu sucesso. Agradeço também a minha namorada e companheira Jenaina Fiorotti de Paulo, pela paciência, carinho e por estar comigo e me dar força sempre que precisei.

Agradeço ao professor Bruno Venturini Loureiro por sua orientação, com total disponibilidade e respeito, compartilhando suas experiências e conhecimentos, sempre disponível a colaborar com meu desenvolvimento e com a realização deste projeto.

Ao professor e orientador Edson Jose Soares, por compartilhar seu conhecimento, e pelo auxílio neste trabalho e durante todo o curso. Agradeço pela confiança e incentivo.

Agradeço aos amigos, colegas de mestrado e toda equipe do LAMEFT, que tornaram esse período mais enriquecedor. Em especial ao Michell Costalonga, Gabriel Vargas, Kelvin Barbosa, Hugo Motta e Hilton Moulin que compartilharam comigo todos os momentos, e que sempre se mostraram dispostos a ajudar.

Agradeço à Andréia Eyng, funcionária da secretaria do programa de pós-graduação, pela atenção e gentileza.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pelo auxílio financeiro.

RESUMO

Ao longo do último século, o *Dam Break Flow* vem sendo estudado por muitos autores. A compreensão deste tipo de fenômeno é de grande relevância, uma vez que envolve aplicações em barragens que oferecem múltiplos benefícios para a humanidade. Porém, o rompimento de uma dessas barragens pode trazer consequências indesejáveis e imensuráveis para a sociedade e para o setor de mineração, por exemplo. Neste trabalho estamos interessados em entender como o número de Froude e as propriedades não-newtonianas, particularmente a viscoplasticidade, afetam o perfil de interface do escoamento e a distância alcançada pelo material após o *Dam Break Flow*. Tais resultados são comparados com o deslocamento de um fluido newtoniano. Através de uma simples abordagem experimental, uma solução de material viscoplástico ou newtoniana inicialmente armazenada em um reservatório é instantaneamente liberada. As imagens do escoamento são capturadas durante o teste de duas maneiras diferentes. Uma é feita utilizando uma câmera CCD e a outra é através da Velocimetria por Imagem de Partícula. A partir das imagens obtidas pela câmera CCD, obtém-se um mapa do escoamento, com as suas respectivas velocidades, nível de líquido, formato das interfaces ar-líquido e distância percorrida pelo material são observadas. Já os resultados obtidos com o PIV, são para determinar o campo de velocidade dos momentos iniciais do *Dam Break Flow* para os diferentes tipos de materiais estudados. Neste trabalho, é mostrado que a plasticidade do material tem total influência sobre a distância alcançada pelo escoamento e também resultam em instabilidades ao longo do mesmo. Foi ainda identificado que o fluido viscoplástico alcança velocidades iniciais maiores que o caso newtoniano. Porém, no decorrer do escoamento, decrescem rapidamente. Quando analisado o caso viscoplástico para um leito com rugosidade, nota-se que para uma superfície lisa, há deslizamento do material de forma significativa para altos valores de plasticidade. Através da análise com PIV, foi constatado que a velocidade de frente de onda é um pouco menor do que a velocidade máxima obtida pelo escoamento.

Palavras chave: *Dam Break Flow*, material viscoplástico, PIV, plasticidade, deslizamento.

ABSTRACT

Over the last century, many authors have studied the Dam Break Flow. The understanding of this type of phenomenon is of great relevance, since it involves applications in dams that offer multiple benefits for humanity. However, the rupture of one of these dams may have undesirable and immeasurable consequences for society and the mining sector, for example. In this work we are interested in understanding how the Froude number and the non-Newtonian properties, particularly the viscoplasticity, affect the flow profile and the distance reached by the material after the Dam Break Flow. Such results are compared with the displacement of a Newtonian fluid. Through a simple experimental approach, a solution of viscoplastic or Newtonian material initially stored in a reservoir is released immediately. Such results are compared with the displacement of a Newtonian fluid. The flow images are captured during the test in two different ways. One is made using a CCD camera and the other is through Particle Image Velocimetry. From the images obtained by the CCD camera, a flow map is obtained, with their respective velocities, liquid level, air-liquid interface format and distance traveled by the material. The results obtained with the PIV are to determine the velocity field of the initial moments of the Dam Break Flow, for the different types of materials studied. In this work, it is shown that the plasticity of the material has total influence on the distance reached by the flow and also the results in instabilities along the flow. It has also been identified that the viscoplastic fluid reaches initial velocities greater than the Newtonian case. However, in the course of flow, they decrease rapidly. When the viscoplastic case is analyzed for a bed with roughness, it is observed that for a smooth surface, there is sliding of the material in a significant way for high values of plasticity. Through PIV analysis, it was found that the velocity of the wavefront is somewhat less than the maximum velocity obtained by the flow.

Keywords: Dam Break Flow, Viscoplastic material, PIV, plasticity, slip.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Resultados de viscosidade e tensão do xarope de glucose de milho. ...	36
Figura 3.2 - Resultados do ensaio de <i>flow curve</i> com a solução de carbopol 0,25% e ajuste pelo modelo SMD.	39
Figura 3.3 - Resultados do ensaio de <i>flow curve</i> com a solução de carbopol 0,5% e ajuste pelo modelo SMD.	40
Figura 3.4 - Resultados do ensaio de <i>flow curve</i> com a solução de carbopol 0,75% e ajuste pelo modelo SMD.	40
Figura 3.5 - Resultados do ensaio de <i>flow curve</i> com a solução de carbopol 1,0% e ajuste pelo modelo SMD.	41
Figura 3.6 - Resultados do ensaio de <i>flow curve</i> com a solução de carbopol 1,5% e ajuste pelo modelo SMD.	41
Figura 3.7 - Flow curve da concentração 0,25% (Solução 2) e a curva do modelo SMD utilizada para caracterizá-la.....	42
Figura 3.8 - Flow curve da concentração 1% (Solução 2) e a curva do modelo SMD utilizada para caracterizá-la.....	42
Figura 3.9 - Dimensões da montagem experimental (cotas em mm). (a) Vista superior e (b) Vista frontal	43
Figura 3.10 - Lixa para madeira Grão 50 Norton.....	44
Figura 3.11 - Vista Superior de parte da bancada com a lixa para madeira Grão 50 Norton.	45
Figura 3.12 - Câmera utilizada na bancada experimental.	46

Figura 3.13 - Processamento de imagem.	47
Figura 3.14 - Princípio de funcionamento do PIV. Miranda (2004) - adaptada pelo autor.	48
Figura 3.15 - Foto ilustrativa da bancada experimental utilizando PIV.	49
Figura 3.16 - Representação da área de aquisição de imagens feita no PIV.	49
Figura 4.1 - Perfil de interface do escoamento do Carbopol 0,25%.	50
Figura 4.2 - Perfil de interface do escoamento do Carbopol 0,5%.	51
Figura 4.3 - Perfil de interface do escoamento do Carbopol 0,75%.	51
Figura 4.4 - Perfil de interface do escoamento do Carbopol 1,0%.	51
Figura 4.5 - Perfil de interface do escoamento do Carbopol 1,5%.	52
Figura 4.6 - Aparecimento da ruptura para a solução de carbopol 1,0%.	53
Figura 4.7 - Aparecimento da ruptura para a solução de carbopol 0,5%.	53
Figura 4.8 - Comparação entre os instantes finais do escoamento.	54
Figura 4.9 - Perfil de interface do escoamento do Carbopol 1,5% - teste 1 e teste 2.	55
Figura 4.10 - Perfil de interface do escoamento do Carbopol 1,0% - teste 1 e teste 2.	55
Figura 4.11 - Imagens do escoamento com solução de carbopol 1,5%.	56
Figura 4.12 - Imagens do escoamento com solução de carbopol 1,0%.	57
Figura 4.13 - Tendência do comportamento do número de Froude a medida que há redução na altura inicial do Fluido C.	60
Figura 4.14 - Perfil de interface do escoamento do caso viscoplástico em comparação com o caso newtoniano.	61

Figura 4.15 - Perfil de interface do escoamento do caso viscoplástico em comparado com o caso newtoniano.....	61
Figura 4.16 - Perfil de interface do escoamento do caso viscoplástico em comparação com o caso newtoniano.....	61
Figura 4.17 - Velocidade pontual do escoamento paras os casos viscoplásticos e newtonianos.....	62
Figura 4.18 - Teste para análise de deslizamento no leito da bancada experimental.....	63
Figura 4.19 - Teste para análise de deslizamento no leito da bancada experimental.....	64
Figura 4.20 - Diferença percentual da posição da frente de escoamento para os testes com e sem rugosidade.....	65
Figura 4.21 - Perfil de velocidade para teste em superfície lisa. 6,4 segundos após abertura da comporta.....	66
Figura 4.22 - Perfil de velocidade para teste em superfície rugosa. 6,4 segundos após abertura da comporta.....	67
Figura 4.23 - Perfil de velocidade para teste em superfície lisa. 28 segundos após abertura da comporta.....	67
Figura 4.24 - Perfil de velocidade para teste em superfície rugosa. 28 segundos após abertura da comporta.....	68
Figura 4.25 - Perfil de velocidade para teste em superfície lisa. 68,4 segundos após abertura da comporta.....	69
Figura 4.26 - Perfil de velocidade para teste em superfície rugosa. 68,4 segundos após abertura da comporta.....	70
Figura 4.27 - Representação do perfil de velocidade para uma coordenada fixa. Posição $x = 25$ mm.....	70

Figura 4.28 - Perfil de velocidade para teste em superfície lisa. 206,4 segundos após abertura da comporta.	71
Figura 4.29 - Perfil de velocidade para teste em superfície rugosa. 206,4 segundos após abertura da comporta.	72
Figura 4.30 - Perfil de velocidade para teste em superfície lisa. 0,4 segundos após abertura da comporta.	73
Figura 4.31 - Perfil de velocidade para teste em superfície rugosa. 0,4 segundos após abertura da comporta.	73
Figura 4.32 - Perfil de velocidade para teste em superfície lisa. 1,2 segundos após abertura da comporta.	74
Figura 4.33 - Perfil de velocidade para teste em superfície rugosa. 1,2 segundos após abertura da comporta.	74
Figura 4.34 - Representação do perfil de velocidade para uma coordenada fixa. Posição $x = 25$ mm.	75
Figura 4.35 - Perfil de velocidade para teste em superfície lisa. 3,6 segundos após abertura da comporta.	76
Figura 4.36 - Perfil de velocidade para teste em superfície rugosa. 3,6 segundos após abertura da comporta.	76
Figura 4.37 - Perfil de velocidade para o teste com fluido newtoniano. 3,6 segundos após abertura da comporta.	77
Figura 4.38 - Perfil de velocidade para o teste com fluido newtoniano. 28,4 segundos após abertura da comporta.	78
Figura 4.39 - Perfil de velocidade para o teste com fluido newtoniano. 208 segundos após abertura da comporta.	79

LISTA DE SÍMBOLOS

PEG	Polietileno Glicol
ρ	massa específica (kg/m ³)
μ	viscosidade (Pa.s)
Re	número de Reynolds
τ	tensão de cisalhamento (Pa)
τ_0	tensão limite de escoamento (Pa)
Pl	número de plasticidade
$\dot{\gamma}$	taxa de cisalhamento (1/s)
K:	índice de consistência (Pa.s ⁿ)
n:	índice power-law
T_{amb}	temperatura ambiente (°C)
PIV	Velocimetria por Imagem de Partícula
u	velocidade do escoamento (m/s)
g	aceleração da gravidade
h	altura inicial da lâmina fluido (cm)
l	distância atingida pelo escoamento (cm)
e	rugosidade do fundo (m)

U_c	velocidade característica (m/s)
τ_c	tensão característica (Pa)
L_{SR}	leito sem a presença de rugosidade (cm)
L_S	leito rugoso (cm)

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Parâmetros Dimensionais	31
Tabela 3.1 - Propriedades dos fluidos newtonianos.....	37
Tabela 3.2 - Componentes utilizados para preparação da solução de carbopol 1,5%	38
Tabela 3.3 - Componentes utilizados para preparação da solução 2 (carbopol 1%)	38
Tabela 4.1 - Resultados obtidos com os casos viscoplásticos	58
Tabela 4.2 - Resultados obtidos utilizando o Fluido A e B.	59
Tabela 4.3 - Resultados obtidos com o xarope de glucose de milho.	60

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	VI
RESUMO	VII
ABSTRACT	IX
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE SÍMBOLOS	XIV
LISTA DE TABELAS	XVI
SUMÁRIO	XVII
CAPÍTULO 1	19
1.1 Motivação	19
1.2 Revisão da Literatura	21
1.3 Caracterização do Problema	29
CAPÍTULO 2	30
2.1 Análise Dimensional	30
2.2 Equações para o Caso Viscoplastico	32
CAPÍTULO 3	35
3.1 Seleção dos Fluidos	35
3.2 Preparo e Caracterização dos Fluidos	35
3.2.1 Fluido Newtoniano	35
3.2.2 Fluido Viscoplastico	37
3.3 Abordagem Experimental	43
3.3.1 Descrição do teste experimental utilizando Câmera CCD	45
3.3.2 Velocimetria por Imagem de Partículas – PIV	47

CAPÍTULO 4	50
4.1 Análise do Fluido Viscoplastico	50
4.1.1 Repetibilidade dos Resultados.....	55
4.2 O Caso Newtoniano	58
4.3 Análise de Deslizamento para o Caso Viscoplastico	63
4.4 Velocimetria por Imagem de Partícula – PIV	65
4.4.1 Solução de Carbopol com Concentração de 1,0%	66
4.4.2 Solução de Carbopol com Concentração de 0,25%	72
4.4.3 Fluido Newtoniano	77
CAPÍTULO 5	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

As barragens de maneira geral oferecem múltiplos benefícios para a humanidade. O primeiro papel das barragens foi o de prover armazenamento de água para irrigação, possibilitando assim o desenvolvimento agrícola de diversos países. Barragens de diferentes tipologias e finalidades continuam sendo construídas em todo mundo, para armazenamento de resíduos minerais, geração de energia elétrica, controle de cheias, irrigação, abastecimento de água, entre outros propósitos.

Conquanto as barragens resultem em inúmeras vantagens para a sociedade, elas também podem ser vistas como uma fonte de perigo potencial devido ao grande volume que comportam e às características do material armazenado. Em caso de ruptura, há um acréscimo da vazão no trecho a jusante e, por decorrência, uma área extensa fica exposta ao aumento da velocidade de escoamento e ainda à ocorrência de inundação. Do mesmo modo, caso o material armazenado na barragem apresente compostos nocivos para o meio ambiente, em uma possível ruptura o escoamento desse material resulta na contaminação de todo ecossistema a sua volta. Quando há o rompimento de uma barragem, ocorre sempre formação de resíduos ambientais e materiais, já a perda de vidas pode variar bastante dependendo da área inundada, o tamanho da poluição que poderá ser atingida e o tempo disponível para avisar e retirar todas as pessoas do local.

Segundo a CBDB (2011) as barragens de deposição de rejeitos começaram a ser construídas a partir da década de 30, tendo como principal objetivo evitar que os

rejeitos de minério fossem lançados diretamente em mananciais de água, minimizando assim os impactos ambientais da atividade minerária.

Os rejeitos são inevitáveis nos processos de tratamento em que são submetidos os minérios, sendo gerados, paralelamente ao produto de interesse. Em decorrência do grande volume de rejeitos que é gerado diariamente nas atividades de produção mineral, que são colocados em áreas cada vez menores, as barragens de rejeitos estão a cada dia mais sobrecarregadas e com alturas cada vez maiores, o que as expõe ainda mais ao risco de rompimento. ICOLD (2001) ressalta que apesar do material depositado em um reservatório de rejeitos muitas vezes conter alto teor de sólidos, as massas de polpa de rejeito no estado líquido podem atingir velocidades de escoamento, na faixa de 8 a 40 km/h, atingindo grandes distâncias.

O rompimento de barragens é uma modalidade de desastres recorrente na história da humanidade. No Brasil o rompimento de barragens de rejeitos minerários é o mais recorrente. Sendo número de barragens rompidas nos últimos anos alarmante, principalmente no Estado de Minas Gerais, onde 6 barragens se romperam nos últimos 15 anos, causando além de prejuízos ambientais e materiais o total de 34 óbitos diretos.

Tais acidentes continuam a ocorrer em todo mundo, com consequências indesejáveis e imensuráveis para a sociedade e para o setor de mineração. Azam e Li (2010) relatam que, em um inventário composto de 18.401 mineradoras, a taxa de acidentes de barragens nos últimos 100 anos é estimada em 1,2%. Esse valor é superior em duas ordens de grandeza à taxa de ruptura de barragens convencionais estimada em 0,01%.

Nesse contexto, torna-se evidente a relevância do desenvolvimento de pesquisas que objetivam compreender o fenômeno de rompimento de barragem e o consequente deslocamento do material armazenado. Tais estudos podem auxiliar o desenvolvimento de modelos simplificados para posterior simulação numérica, o que pode ajudar os estudos de previsão de acidentes e impactos.

1.2 Revisão da Literatura

Segundo Matson e Hogg (2007) o escoamento promovido pelo rompimento de barragem, conhecido na literatura como *Dam Break Flows*, ocorre quando um volume de fluido é abruptamente liberado e flui, impulsionado por forças gravitacionais. Muitos tipos de escoamento naturais podem ser modelados como um *Dam Break Flow*. É comum ver escoamentos de lama gerados por desmoronamento em regiões montanhosas após períodos de chuva ou mesmo pelo colapso de uma barragem. Outros exemplos incluem escoamentos de rejeitos, de lava e avalanches de neve que, muitas vezes, produzem efeitos catastróficos. Mas não é somente na natureza que ocorrem os *Dam Break Flows*. Muitas aplicações industriais envolvem o uso de fluidos que são liberados repentinamente. O processamento de alimentos, transporte de substâncias líquidas em fábricas químicas e o transporte de concreto em construções civis (Balmforth et al., 2006) são apenas alguns exemplos de *Dam Break Flows* que ocorrem em áreas industriais. Sendo assim, os conhecimentos dos limites de aplicabilidade das teorias existentes podem auxiliar na solução de problemas que envolvem *Dam Break Flows* e é vital para melhores projetos de engenharia na indústria e também na prevenção de acidentes geológicos, como os mencionados acima.

Devido à dificuldade em se obter dados de campo para *Dam Break Flow*, experimentos laboratoriais em situações idealizadas têm sido realizados para contribuir para a compreensão dos fenômenos envolvidos e validar modelos numéricos. No entanto, há um número limitado de dados laboratoriais e modelos físicos em comparação com estudos numéricos (Matson e Hogg, 2007). Os primeiros estudos relacionados ao caso de *Dam Break Flow* foram feitos por Ritter (1892), que propôs uma solução analítica para a propagação da onda de inundação sobre um leito fixo, que foi designado de caso hidrodinâmico puro.

Dressler (1954). O autor foi primeiro autor que obteve resultados experimentais em um canal retangular observou que na região da ponta da onda a velocidade é quase constante. Dressler (1954) usou ainda a teoria da camada limite para obter soluções mais realistas para a propagação da frente da onda de inundação considerando, por exemplo, a existência de um coeficiente de atrito no fundo.

Lauber e Willi (1998) investigaram experimentalmente as frentes de onda positivas e negativas em um canal horizontal e retangular. As velocidades das ondas foram determinadas com Velocimetria por Imagem de Partícula (PIV). Os autores observaram que a velocidade de frente de onda é um pouco menor do que a velocidade máxima obtida pelo escoamento.

Os estágios iniciais do *Dam Break Flow* foram melhor identificados a partir da utilização de câmeras de maiores velocidades e de melhor resolução. Stansby et al. (1998) investigou o escoamento quando uma placa fina separa a água em diferentes níveis e é retirada impulsivamente na vertical. Os autores estudaram a frente de onda e observaram que, para o caso de leito seco, um jato horizontal se forma em um curto intervalo de tempo e para os outros casos ocorre um jato vertical semelhante a um cogumelo, nenhum dos quais foi observado previamente. Essas características são consistentes com a análise do tempo de ruptura e, para um pequeno período de tempo depois, elas foram reproduzidas computacionalmente. Nos experimentos, os jatos interagiram com o leito ou a água a jusante de uma maneira altamente complexa, arrastando ar, mas depois que uma ruptura se estabeleceu os perfis mostraram um acordo bastante próximo com as soluções analíticas das equações de águas rasas.

Fraccarollo e Capart (2002) utilizam câmeras CCDs para analisar a erosão gerada pela liberação imediata de um fluxo de água sobre um leito de sedimentos soltos. As equações de águas rasas estendidas são formuladas para descrever o problema analisado, e as previsões do tratamento teórico comparam favoravelmente com testes experimentais visualizados usando técnicas de rastreamento de partículas. Após análise os autores separam os instantes iniciais do escoamento em duas regiões internas de fluxo uniforme, duas ondas simples centradas e uma onda de choque.

Resultados relacionados ao *Dam Break Flow* não ficaram restritos a escoamento em canais retos. Miller e Chaudhry (1989) obtiveram resultados experimentais que foram realizados em canais retos e curvos. Foram utilizadas sondas de capacitância para registrar os níveis de água no reservatório e digitalização eletrônica de imagens de vídeo para registrar os níveis de água no canal a jusante. Os autores propõem um modelo para calcular o gradiente lateral da superfície da água em um canal curvo. A

comparação com os resultados medidos mostra resultados satisfatórios. Bellos et al. (1992) conduziu uma série de experimentos em canais convergentes e divergentes com leito seco e molhado, analisando a influência do leito no comportamento da onda gerada pela ruptura da comporta.

Atualmente, o processamento de imagens digitais tem sido usado em laboratórios, com intuito de entender melhor o problema de *Dam Break Flow*. Soares-Frazao e Zech (2007) mostraram a influência de um obstáculo no percurso de um fluido instantaneamente liberado, sendo o obstáculo uma representação idealizada de um único edifício. O experimento consistiu em um canal retangular com um obstáculo localizado imediatamente a jusante da barragem. Para realização do trabalho foram utilizados vários dispositivos de medição para caracterizar o fluxo. A evolução do nível de água foi medida, em cinco locais distintos, por meio de medidores de nível enquanto a velocidade do escoamento foi medida por meio de um velocímetro acústico Doppler. Em seguida, o campo de velocidade de superfície foi obtido utilizando técnicas de imagem digital. A observação do escoamento mostra que após o impacto violento da onda sobre o edifício, o fluxo é forçado a mudar sua direção para passar o edifício. Isto causa a formação de saltos hidráulicos e tem como consequência que o nível da água pode subir localmente mais alto do que sem o obstáculo. Kocaman e Ozmen-Cagatay (2012) realizaram estudo parecido com Soares-Frazao e Zech (2007), mais avaliaram o efeito de uma contração no escoamento.

Aleixo et al. (2010) apresentaram resultados de medição do campo de velocidades em um escoamento de ruptura de barragem sobre um leito móvel de sedimentos recorrendo à técnica PIV. A técnica PIV se mostrou adequada para este tipo de escoamento. Os autores separaram a região de testes em dois intervalos de tempo e observaram que no intervalo de tempo próximo ao rompimento da barragem há maior gradiente de velocidade. No momento inicial o componente vertical da velocidade é mais significativo.

Ao longo do século XX, muitos autores analisaram os fluxos de ruptura de barragens de fluidos invíscidos e newtonianos. Nas últimas décadas, o estudo dos fluidos não-newtonianos e o seu comportamento do escoamento começaram a ser mais frequentes.

Segundo Huang e García (1998), o escoamento de lama é comumente observado em áreas montanhosas depois de longos ou intensos períodos de chuva, causando mudanças topográficas significativas. Esses fluxos de lama também ocorrem frequentemente em deslizamentos de taludes continentais submarinos onde desempenham um papel importante nos processos geológicos. Além de processos naturais, o escoamento de lama pode ser observado no rompimento de barragens de rejeitos de minério que podem causar danos imensuráveis.

As lamas com alta concentração de sólidos são fluidos altamente não newtonianos. Krone (1963) mostra que as partículas de sedimentos têm alta coesão, que confere ao material uma tensão limite de escoamento. O autor utilizou ainda um viscosímetro de cilindro rotativo com grande espaço anular, e evidenciou que as soluções com diferentes concentrações de material produzem um gráfico linear da taxa de cisalhamento característico de um fluido Bingham.

Wan (1982) estudou o movimento de um material argiloso de partículas finas de bentonita e esferas de plástico. O autor relatou que a lama formada pela solução de água e argila exibem uma tensão limite de escoamento, que fica evidenciado devido a uma profundidade mínima necessária para que uma camada uniforme de lama flua.

Para qualquer análise teórica dos parâmetros reológicos de um fluido, faz-se necessário a escolha de um modelo constitutivo adequado. Bingham (1922) descreve o primeiro modelo para o comportamento de um fluido viscoplástico. Esse modelo é conhecido como Modelo Plástico Ideal e seu comportamento é descrito pela Equação 1.1. Entretanto o modelo de Bingham apresenta determinadas limitações como o fato de ser representado por uma função com derivada descontínua e considerar viscosidade infinita em taxas de deformação próximas de zero. Devido a essas limitações, diversos outros modelos são propostos na literatura.

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} & \text{se } \tau \geq \tau_0 \\ \dot{\gamma} = 0 & \text{se } \tau < \tau_0 \end{cases} \quad (1.1)$$

A função Herschel-Bulkley é provavelmente um dos modelos viscoplásticos mais aplicados na indústria e literatura, para ajustar dados de viscosidade de materiais viscoplásticos. Ela utiliza três parâmetros reológicos para o ajuste: a tensão limite de escoamento, τ_0 , o índice de consistência, K , e o índice *power-law*, n . A função é apresentada pela Equação 1.2.

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n & \text{se } \tau \geq \tau_0 \\ \dot{\gamma} = 0 & \text{se } \tau < \tau_0 \end{cases} \quad (1.2)$$

É possível observar que quando $n = 1$ a equação reproduz o Modelo de Plástico Ideal; enquanto que, se $\tau_0 = 0$, tem-se a função *power-law* e para $n = 1$ e $\tau_0 = 0$ tem-se então um fluido newtoniano. Apesar disso, o modelo Herschel-Bulkley continua tendo derivadas descontínuas, veja (Bird, 1987).

Devido ao problema de derivada descontínua, Papanastasiou (1987) propôs uma função, regularizada com derivada contínua para descrever o modelo Bingham, Equação 1.3, sendo a um parâmetro de regularização, que não possui sentido físico, mas que a medida que se aumenta seu valor se aproxima do comportamento da função de Herschel-Bulkley.

$$\tau = (1 - \exp(-a\dot{\gamma}))\tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (1.3)$$

Souza Mendes e Dutra (2004) propuseram uma outra função de viscosidade para fluidos viscoplásticos. Nessa função, a intensidade da tensão de cisalhamento, τ , é uma função da intensidade da taxa de deformação, $\dot{\gamma}$, possuindo derivada contínua e descrita pela Equação 1.4.

$$\tau = (1 - \exp(-\eta_0 \dot{\gamma} / \tau_0))(\tau_0 + K \dot{\gamma}^n) \quad (1.4)$$

Onde η_0 é a viscosidade do fluido quando $\tau < \tau_0$. Essa função é usada no presente trabalho para obter as informações reológicas do material viscoplástico usado nos testes.

Thompson e Soares (2016) apresentaram uma análise teórica sobre os números adimensionais de fluidos viscoplásticos. Os autores recomendam que a tensão característica utilizada na adimensionalização deve ser definida com a intensidade da extra-tensão avaliada em uma taxa de deformação característica máxima. Tal definição inclui a tensão limite de escoamento em todos os números adimensionais que tem relação com os efeitos viscosos, tal como o número de Reynolds. Este procedimento mostra-se ser mais efetivo e proporciona uma comparação mais justa em relação ao caso newtoniano. O número de plasticidade, Pl , definido como a razão entre a tensão limite de escoamento e a tensão máxima encontrada, mostra-se como uma melhor opção no sentido de representar os efeitos plásticos do que o número de Bingham usual.

Huang e García (1998) analisaram o *Dam Break Flow* para um fluido Herschel-Bulkley em um canal inclinado. Eles usaram a teoria da lubrificação, semelhante, para este caso, à aproximação de águas rasas, e analisaram o efeito de algumas variações de parâmetros reológicos (n e K).

Debiane (2000) obteve soluções analíticas para fluidos newtonianos e não-newtonianos (Herschel-Bulkley), em canais retangulares com reservatórios infinitos e finitos. O escoamento foi dividido em três regimes, um regime inercial, seguido de dois viscosos. Verificou-se que tais regimes têm comportamentos distintos e assintóticos. Foi também proposta uma equação individual para as distâncias que o fluido alcança com base na tensão limite de escoamento.

Chanson et al. (2004) analisaram a onda gerada pelo rompimento de uma barragem para um fluido tixotrópico em uma superfície inclinada. Os autores realizaram

experimentos utilizando bentonita em suspensão. Os resultados mostraram quatro tipos de escoamento. Para pequenas concentrações de massa de bentonita e curto tempo de descanso, o fluido fluía rapidamente para baixo completando todo o percurso. Para concentrações intermediárias e períodos de repouso, a suspensão inicialmente flui rapidamente, desacelera repentinamente, porém continua a fluir lentamente por um tempo até parar completamente. Para grandes concentrações do material e longos períodos de repouso, a massa de fluido estende pelo declive, até a separação do material em duas partes. O último teste realizado correspondeu a uma ausência de escoamento para grandes concentrações de bentonita e longo tempo de repouso. Acredita-se ainda que o estudo feito seja a primeira análise teórica combinando com sucesso os princípios básicos do movimento de fluxo instável com um modelo de fluido tixotrópico.

Matson e Hogg (2007) apresentaram um estudo teórico sobre *Dam Break Flow* para fluidos viscoplásticos usando uma lei constitutiva de Herschel-Bulkley e um modelo de lubrificação do movimento. Os autores consideram que inicialmente o escoamento acontece devido às forças gravitacionais e seu movimento é interrompido quando ocorre um equilíbrio entre a força gravitacional e a tensão limite de escoamento. Toda a evolução do escoamento foi estudada, desde a iniciação até o momento de parada, integrando as equações do movimento numericamente.

Balmforth et al. (2006) apresentaram uma análise teórica e experimental da ruptura de uma barragem. Os testes experimentais foram conduzidos utilizando fluidos como xarope de milho, suspensões aquosas de goma de xantana, caulino, carbopol, amido de milho e purê de maçã. Xarope de milho, goma xantana e caulino mostraram concordância com a teoria. Com carbopol no entanto não se obteve bons resultados devido principalmente aos efeitos inerciais que estão faltando na análise teórica e são excessivamente importantes para o fluido estudado. Os resultados para o amido de milho mostram que o material se fratura e dobra como um sólido quando a comporta é levantada e os resultados obtidos não se parecem com os obtidos por outros fluidos. Purê de maçã, parece se assemelhar bem com a teoria, porém não foi possível obter repetitividade dos testes.

Ancey et al. (2007) investigaram o problema de *dam break flow* com fluido que segue o modelo de Herschel-Bulkley. Os testes são feitos em um canal reto

inclinado. Para medir os perfis de velocidade foi usado Velocimetria por Imagem de Partícula. Foi acompanhado ainda durante o teste a posição frontal em função do tempo e a evolução da profundidade do escoamento em um determinado local. Os dados experimentais foram comparados com três modelos de complexidade crescente. O perfil de velocidade calculado e a evolução da profundidade estavam razoavelmente de acordo com os dados experimentais obtidos pelo autor, porém o modelo superestimou a aceleração inicial, o que resultou em uma diferença sistemática entre as curvas teóricas e experimental da posição frontal ao longo do tempo. Como forma de entender melhor o comportamento específico do Carbopol e ver como os modelos funcionam para fluidos simples, os autores consideraram interessante ter um ponto de comparação. Foram, então, feitos testes com glicerina que apresentaram resultados teóricos com concordância com os obtidos experimentalmente.

Cochard e Ancey (2009) e Ancey e Cochard (2009), realizaram testes utilizando soluções de carbopol com concentrações variadas que resultaram em tensões limite de escoamento variando de 78 a 109 Pa. Nos trabalhos foi explorado uma variação da inclinação da bancada experimental e da altura inicial da lâmina de fluido. Foi observado que na abertura da comporta, a massa de material tem uma aceleração elevada. Este regime de escoamento foi destacado como o período em que o escoamento ocorre majoritariamente pelas forças de inércia. Embora tivesse algumas semelhanças com fases totalmente inerciais observadas para fluidos invíscido e newtonianos, foram observadas diferenças substanciais. Em particular, a velocidade da frente foi constante e muito menor do que a velocidade da frente dada pela solução de Ritter.

Minussi e Maciel (2012) fizeram uma comparação numérica e experimental para o escoamento de um fluido viscoplástico. O experimento foi conduzido em um canal horizontal e utilizaram como fluido uma solução aquosa de Carbopol 940, que foi modelada pela equação constitutiva de Herschel-Bulkley. O código numérico utiliza as equações de momentum sem simplificações e mostrou melhor concordância com os experimentos do que aqueles que usam equações de águas rasas, a qual descreve um escoamento incompressível de superfície livre onde a escala vertical (profundidade) tem dimensões muito menores do que a escala horizontal, ou seja, a extensão do corpo d'água.

1.3 Caracterização do Problema

Apesar dos vários estudos experimentais sobre *Dam Break Flow* a maioria dos trabalhos analisa isoladamente o comportamento de um fluido não-newtoniano ou um fluido newtoniano, não fazendo uma comparação entre os casos. Também não há especificação de uma diretriz metodológica para realização de estudos de ruptura de barragens. Em se tratando especificamente de estudo de ruptura de barragens de contenção de rejeitos (Fluido Não-Newtoniano), a situação se torna ainda mais indefinida, uma vez que muitos dentre os métodos disponíveis na literatura foram desenvolvidos especificamente para barragens de armazenamento de água. Dessa forma o que ocorre na maioria dos casos é uma avaliação que trata o fluido de uma forma muito simplista.

Com o intuito de entender um pouco mais a influência de alguns parâmetros reológicos nesse tipo de escoamento, o presente trabalho estuda o deslocamento de fluidos não-newtonianos e newtonianos experimentalmente. O material utilizado obedece à função SMD de viscosidade para líquidos viscoplástico proposta por Souza Mendes e Dutra (2004). Onde inicialmente, o fluido é contido em um reservatório e liberado de forma instantânea e visualizado em durante todo seu percurso até o repouso. Alguns parâmetros adimensionais são apropriadamente definidos para uma comparação justa com o respectivo caso newtoniano.

Como o deslizamento é muito comum em escoamento de fluido viscoplásticos, analisa-se aqui também esse fenômeno através da troca do leito do canal, liso originalmente, por uma superfície rugosa, observando assim o alcance obtido pelo fluido analisado. Finalmente utiliza-se ainda o PIV, para determinar o campo de velocidade nos instantes iniciais do *Dam Break Flow*.

CAPÍTULO 2

FORMULAÇÃO FÍSICA

Apresenta-se neste capítulo as equações que descrevem o fenômeno bem como uma análise dimensional, destacando os parâmetros adimensionais importantes.

2.1 Análise Dimensional

Para a caracterização física do problema de *Dam Break Flow* buscam-se os grupos adimensionais que governam o sistema de escoamento sobre o leito. A obtenção destes grupos adimensionais parte da definição dos parâmetros dimensionais característicos do problema e utiliza a metodologia do teorema Pi de Buckingham (Fox et al 2010). Após análise da montagem experimental e do processo de teste verificam-se que os parâmetros dimensionais relevantes são:

- I. Tensão de cisalhamento;
- II. Velocidade do escoamento;
- III. Aceleração da gravidade;
- IV. Viscosidade do fluido;
- V. Massa específica do fluido;
- VI. Altura inicial da lâmina de fluido;
- VII. Distância atingida pelo escoamento, e
- VIII. Rugosidade superficial da fronteira inferior (leito).

Os parâmetros dimensionais listados acima estão respectivamente simbolizados na Tabela 2.1 com suas correspondentes dimensões primárias. As dimensões dos parâmetros são especificadas pelo número mínimo de dimensões fundamentais como parte da metodologia para obtenção dos grupos adimensionais. As dimensões fundamentais requeridas são: comprimento (L), tempo (t) e massa (M).

Tabela 2.1 - Parâmetros Dimensionais

Símbolo	τ	u	g	μ	ρ	h	l	e
Dimensão primária	$\frac{M}{Lt^2}$	$\frac{L}{t}$	$\frac{L}{t^2}$	$\frac{M}{Lt}$	$\frac{M}{L^3}$	L	L	L

Segundo o teorema Pi de Buckingham, as razões adimensionais são obtidas agrupando os parâmetros dimensionais. Inicialmente a metodologia exige a escolha de termos repetentes. A quantidade destes termos é de acordo com a ordem da matriz expoente das dimensões primárias. Após análise de todas as possibilidades de agrupamento, os parâmetros escolhidos como repetentes são: massa específica do fluido, velocidade do escoamento e altura inicial do fluido.

Dessa maneira a caracterização física do problema pode ser expressa pela seguinte relação funcional:

$$\frac{\tau}{\rho u^2} = F \left(\frac{\mu}{\rho u h}, \frac{l}{h}, \frac{e}{h}, \frac{hg}{u^2} \right) \quad (2.1)$$

Na Equação 2.1, o parâmetro dependente corresponde à adimensionalização da tensão de cisalhamento pela massa específica do fluido e pelo quadrado da velocidade do escoamento. A velocidade do escoamento aumenta devido à altura inicial do fluido. O segundo grupo adimensional é equivalente ao inverso do número de Reynolds. Este é um parâmetro de grande influência no problema. O número de Reynolds nos traz a interpretação física do quociente entre as forças de inércia e as forças viscosas. A terceira razão adimensional é a distância que o escoamento atinge pela altura inicial da lâmina de fluido. Este parâmetro permite analisar a

influência da altura inicial do fluido com relação à distância que o mesmo irá percorrer. A quarto grupo Pi é a adimensionalização da rugosidade superficial da fronteira inferior pela altura inicial da lâmina de fluido. Este parâmetro permite analisar a influência da rugosidade do leito escoamento do material. O último parâmetro adimensional é função da aceleração da gravidade local, de um comprimento característico e do inverso do quadrado da velocidade do escoamento. Neste caso o comprimento característico é representado pela altura inicial da lâmina de fluido. Esse grupo adimensional corresponde ao inverso do número de Froude ao quadrado. O número de Froude pode ser interpretado como o quociente entre as forças de inércia e as forças de gravidade. Este número adimensional é considerado importante para casos de escoamentos com efeitos de superfície livre que é o caso do problema estudado.

2.2 Equações para o Caso Viscoplastico

Thompson e Soares (2016) definem o número de plasticidade (Pl), como a razão entre a tensão limite de escoamento e a tensão máxima encontrada, e este parâmetro mostra-se como uma melhor opção no sentido de capturar os efeitos plásticos do que, por exemplo, o número de Bingham usual. Eles também propõem para o modelo de Hershel-Buckley o número de plasticidade, como sendo:

$$Pl = \frac{\tau_0}{\tau_0 + K(U/L)^n} \quad (2.2)$$

Quando temos uma velocidade característica (U_c), que depende das condições de escoamento e não apenas das propriedades do material. Além disso, $\partial U_c / \partial \tau_c > 0$, ou seja, quanto maior a tensão máxima imposta, maior é a velocidade característica do problema (considerando as propriedades do material fixadas). Desse modo observa-se que a tensão máxima de escoamento passa a ser uma tensão característica (τ_c) do problema, Eq. (2.3).

$$\tau_0 + K(U_c/L)^n = \tau_c \quad (2.3)$$

Para o problema de *Dam Break Flow* a tensão máxima é obtida no instante inicial, ou seja, quando todo o fluido que está no reservatório é liberado de maneira instantânea. No momento de abertura da comporta todo o fluido com massa específica (ρ) se mantém a uma altura inicial (h) e está sobre ação do campo gravitacional (g), que para dada situação não poderíamos considerar que a força gravitacional na forma de tensão é isotrópica. Assim, a tensão pode ser escrita conforme a Eq. (2.4).

$$\mathbf{T} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho g(h - y) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (2.4)$$

A parte deviatórica desse tensor é $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{T} - \frac{1}{3} \text{tr} \mathbf{T}$, com isso chegamos ao resultado da Eq. (2.5).

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{vmatrix} -\frac{1}{3}\rho g(h - y) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{3}\rho g(h - y) & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{3}\rho g(h - y) \end{vmatrix} \quad (2.5)$$

Sabendo que a tensão característica máxima é $\sqrt{\frac{1}{2} \text{tr}(\boldsymbol{\tau}^2)}$, onde $\boldsymbol{\tau}^2$ é mostrado na Eq. (2.6), chegamos à Eq. (2.7).

$$\boldsymbol{\tau}^2 = \begin{vmatrix} \frac{1}{9}\rho^2 g^2(h - y)^2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{4}{9}\rho^2 g^2(h - y)^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{9}\rho^2 g^2(h - y)^2 \end{vmatrix} \quad (2.6)$$

$$\tau_c = \frac{\sqrt{3}}{3} * \rho g h \quad (2.7)$$

Dessa maneira para o presente trabalho podemos escrever o número de plasticidade como sendo:

$$Pl = \frac{\tau_0}{\sqrt{3}/3 * \rho g h} \quad (2.8)$$

Thompson e Soares (2016) definem ainda a velocidade característica (U_c), como sendo:

$$U_c = \left(\frac{\tau_c - \tau_0}{k} \right)^{\frac{1}{n}} h \quad (2.9)$$

$$\dot{\gamma} = U_c / h \quad (2.10)$$

Porém os resultados de velocidade obtidos utilizando tal análise não foram representativos para o problema, visto que apresentaram valores de velocidade muito maiores do que o esperado. Ao analisar a Eq. (2.9), observamos que a τ_c está sendo igualada a uma tensão viscosa que ocorre nas camadas mais próximas à base, dessa forma o comprimento característico onde ocorrem variações de velocidade seria muito menor do que h . Devido a isso, foi proposta a Eq. (2.11) como uma maneira implícita de definir a velocidade característica.

$$\tau_c = \frac{1}{2} \rho U_c + \left(\tau_0 + k \left(\frac{U_c}{h} \right)^n \right) \quad (2.11)$$

Apesar de considerar que a parcela da τ_c que não foi para os efeitos viscosos tenha ido para os efeitos inerciais, os valores de velocidade obtidos através da Eq. (2.11) continuaram sendo maiores quando comparados com as velocidades obtidas experimentalmente.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 Seleção dos Fluidos

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento de um material viscoplástico para o caso de *Dam Break Flow* e comparar com o caso newtoniano. Usamos como material viscoplástico uma solução de carbopol com cinco concentrações diferentes: 1,5, 1, 0,75, 0,5 e 0,25%, podendo assim observar o efeito da plasticidade no escoamento e posteriormente comparar tais resultados com o caso newtoniano.

O fluido newtoniano utilizado foi um xarope de glucose de milho, fluido que apresenta viscosidade elevada e fácil solubilidade em água.

3.2 Preparo e Caracterização dos Fluidos

As propriedades dos fluidos foram obtidas a temperatura ambiente do laboratório. Com o auxílio de um termômetro de mercúrio, foi constatado que a temperatura ambiente média do laboratório era $T_{amb} = 24$ °C, sendo assim todos os resultados apresentados subsequentemente foram realizados a tal temperatura.

3.2.1 Fluido Newtoniano

O fluido Newtoniano foi selecionado depois dos testes com material viscoplástico, devido à necessidade de se obter resultados que possibilitavam a comparação do

caso não-newtoniano com o caso newtoniano com o mesmo número de Froude. Sendo assim devido à elevada plasticidade do caso não-newtoniano fez-se necessário utilizar um fluido que apresentasse alta viscosidade. Inicialmente foram feitos testes com uma solução de água e Polietileno Glicol (PEG) e posteriormente foi utilizado glicerina, mas ambos os fluidos apresentaram resultados insatisfatórios que serão demonstrados no capítulo a seguir.

Devidos aos resultados insatisfatórios obtidos com os primeiros fluidos fez-se necessário a utilização de um fluido newtoniano com alta viscosidade, e para tal foi utilizado o xarope de glucose de milho.

As viscosidades do Fluido A (53% PEG + 47% água) e do Fluido B (Glicerina) foram medidas por meio de um viscosímetro do tipo Canon-Fenske da marca SCHOTT *Instruments*, a 24 °C. O procedimento para determinação da viscosidade do Fluido C (xarope de glucose de milho), apesar de ser um fluido newtoniano, foi diferente dos casos anteriores devido à alta viscosidade do fluido. Foi utilizado o reômetro modelo *HAAKE MARS II* acoplado a um banho para controle de temperatura modelo *Thermo Haake Phoenix II – P1-C50P*, ambos fornecidos pela *Thermo Scientific*. Usamos a configuração de placas paralelas com uma geometria de placa ranhurada *P35 TiL* com folga de 0,5 mm. Um volume de 0,5 ml do fluido foi adicionado ao equipamento e imposto uma taxa de 0,01 a 11,5 durante 20 minutos. A viscosidade obtida é apresentada na Figura 3.1.

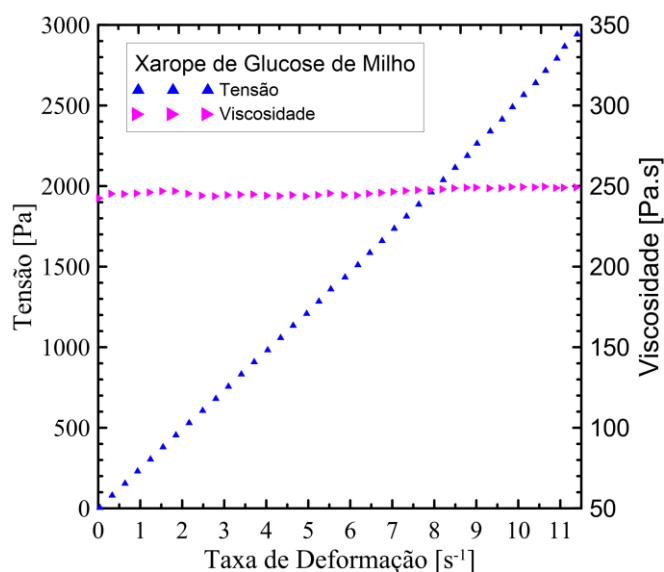


Figura 3.1 - Resultados de viscosidade e tensão do xarope de glucose de milho.

Para determinar a massa específica do xarope de glucose de milho foi utilizado procedimento idêntico aos das soluções anteriormente citadas.

As propriedades dos fluidos utilizados estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Propriedades dos fluidos newtonianos

Fluido	ρ [Kg/m^3]	μ [$Pa.s$]
Fluido A	1090,16	0,2926
Fluido B	1243,15	0,8677
Fluido C	1817,92	246,68

3.2.2 Fluido Viscoplastico

O material viscoplastico utilizado no presente trabalho foi uma solução aquosa de Carbopol 980 preparada com as quantidades de componentes descritos na Tabela 3.2 (1,5% de carbopol) e Tabela 3.3 (1% de carbopol). Inicialmente preparou-se uma solução com concentração em massa de 1,5% de carbopol. Parte dessa solução foi diluída com concentrações de 1%, 0,75%, 0,5% e 0,25%. Subsequentemente foi preparado uma solução (Solução 2) com concentração em massa de 1% de carbopol e diluída para concentração de 0,25%. Foi necessário realizar duas bateladas de soluções devido à quantidade de fluido utilizada nos testes.

Para o preparo da solução foi adicionado o pó de carbopol na água com agitação constante de 1200 rpm, utilizando um agitador com capacidade de aproximadamente 15 litros. O processo de adição do pó de carbopol com agitação intensa durou cerca de 30 minutos. Posteriormente a solução ficou em repouso por 22 horas. Após o descanso da solução, adicionou-se lentamente a solução de NaOH (18%) durante 30 minutos com uma agitação constante de 300 rpm. A solução completa continuou com agitação por mais 2 horas. Tais procedimentos foram feitos para garantir uma solução homogênea e estável.

Tabela 3.2 - Componentes utilizados para preparação da solução de carbopol 1,5%

Componente	Massa [g]	Concentração [massa%]
Carbopol 980	165,00	1,5
Solução de NaOH (18%)	379,50	3,45
NaOH	68,31	0,621
Água	311,19	
Água	10455,50	
Total de Solução	11000,00	

Tabela 3.3 - Componentes utilizados para preparação da solução 2 (carbopol 1%)

Componente	Massa [g]	Concentração [massa%]
Carbopol 980	80,00	1
Solução de NaOH (18%)	184,00	2,30
NaOH	33,12	0,414
Água	150,88	
Água	7736,00	
Total de Solução	8000,00	

A massa específica da solução foi determinada de forma análoga as demais soluções newtonianas, isto é, com um picnômetro.

A curva de viscosidade do Carbopol foi obtida com o reômetro modelo *HAAKE MARS II* com as mesmas configurações utilizadas para caracterização do Fluido C.

Um volume de 0,5 ml de solução foi adicionado ao equipamento e imposta uma rampa de tensão de 0,1 Pa à 2000 Pa durante 1 hora. As *flow curves* obtidas são apresentadas nas Figuras 3.2 a 3.8.

O modelo SMD proposto por Souza Mendes e Dutra (2004) foi ajustado às curvas de tensão obtidas. Empregando o modelo SMD é possível extrair alguns parâmetros reológicos como a tensão limite de escoamento, τ_0 , necessária para calcular o número de plasticidade, Pl . As propriedades da solução são apresentadas nas Figuras 3.2 a 3.8.

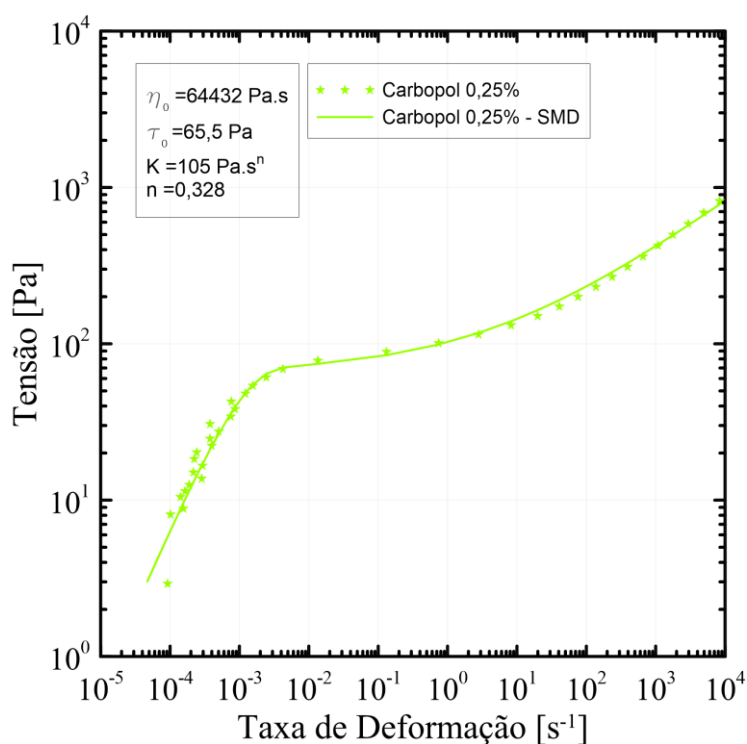


Figura 3.2 - Resultados do ensaio de *flow curve* com a solução de carbopol 0,25% e ajuste pelo modelo SMD.

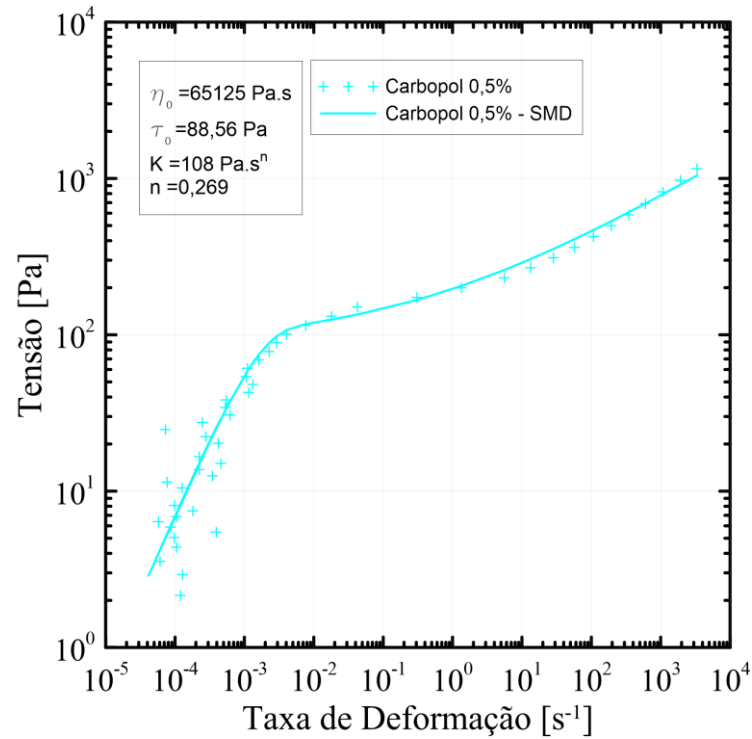


Figura 3.3 - Resultados do ensaio de *flow curve* com a solução de carbopol 0,5% e ajuste pelo modelo SMD.

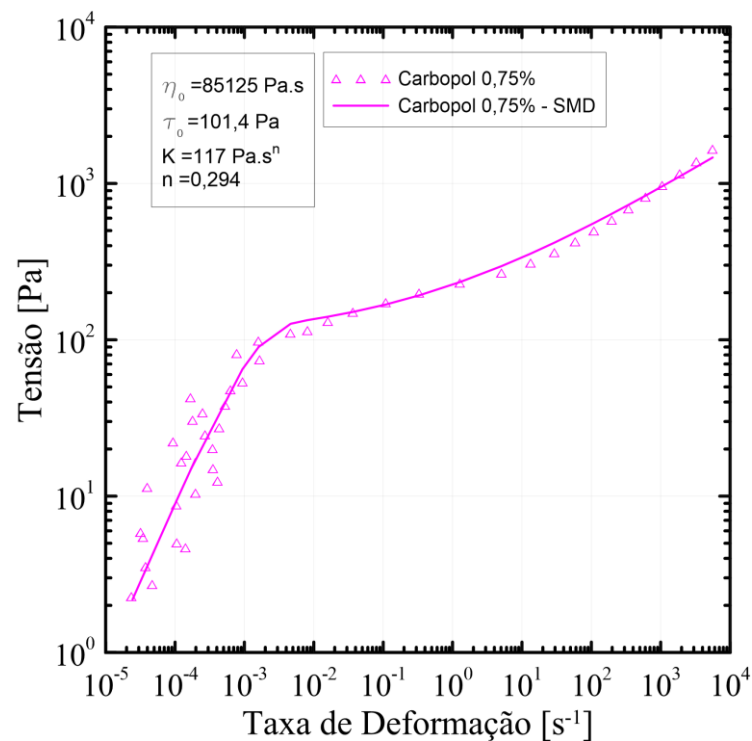


Figura 3.4 - Resultados do ensaio de *flow curve* com a solução de carbopol 0,75% e ajuste pelo modelo SMD.

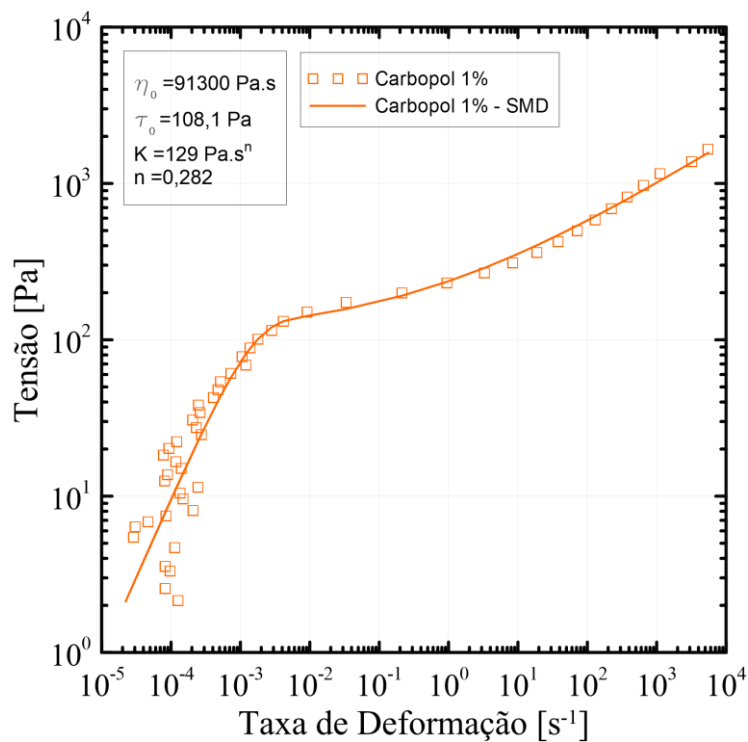


Figura 3.5 - Resultados do ensaio de *flow curve* com a solução de carbopol 1,0% e ajuste pelo modelo SMD.

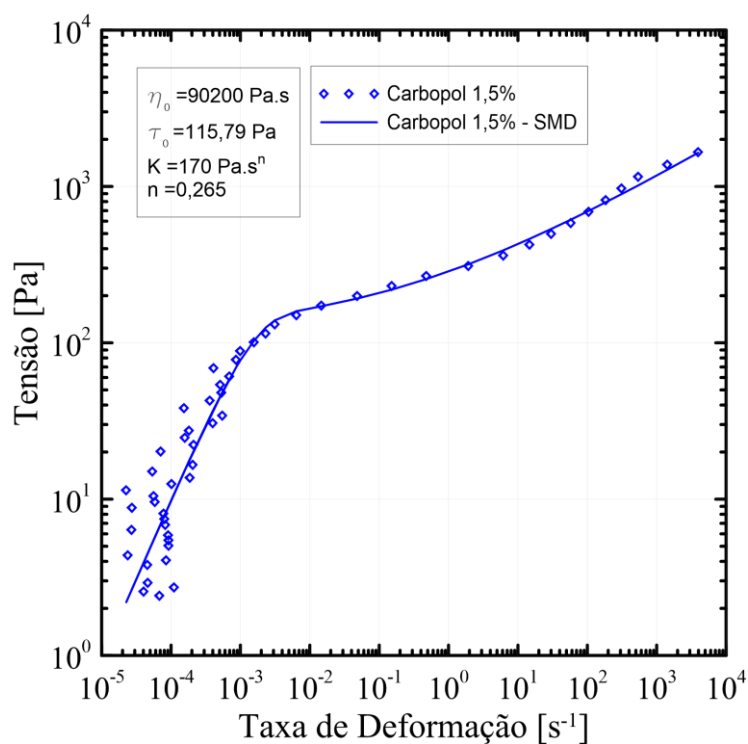


Figura 3.6 - Resultados do ensaio de *flow curve* com a solução de carbopol 1,5% e ajuste pelo modelo SMD.

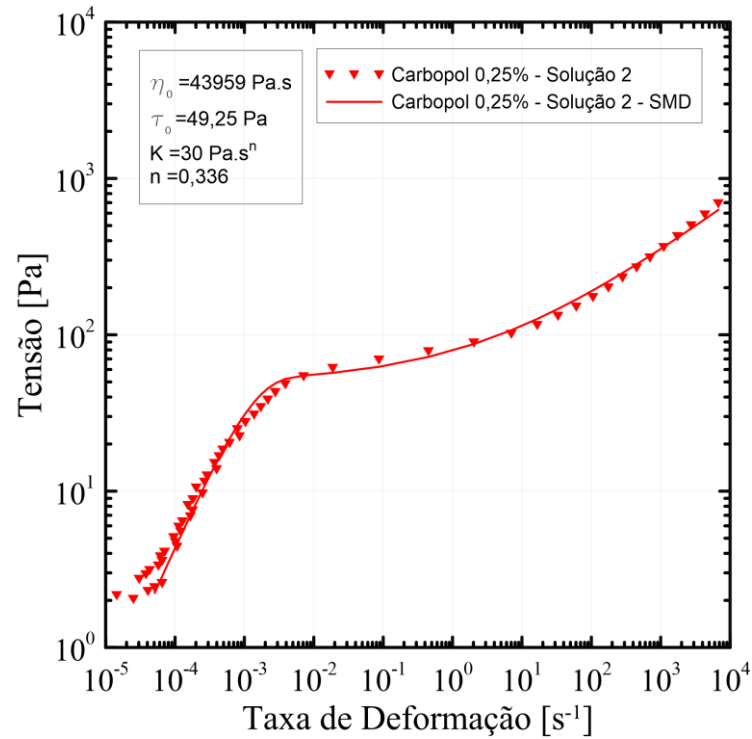


Figura 3.7 - Flow curve da concentração 0,25% (Solução 2) e a curva do modelo SMD utilizada para caracterizá-la.

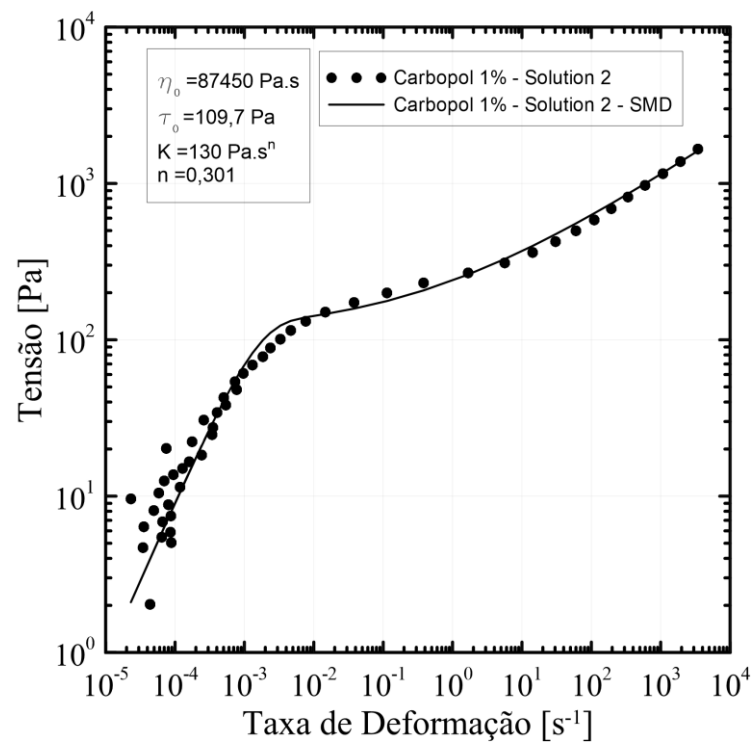


Figura 3.8 - Flow curve da concentração 1% (Solução 2) e a curva do modelo SMD utilizada para caracterizá-la.

3.3 Abordagem Experimental

Existe vários estudos de *Dam Break Flow* disponíveis na literatura com diferentes razões de aspecto. Para o presente trabalho a bancada experimental foi construída tendo como referência as razões de aspecto apresentadas por Carrivick et al. (2011).

A bancada é construída em acrílico, possibilitando a visualização do escoamento e a aquisição das imagens dos testes. Os detalhes estão na Figura 3.9.

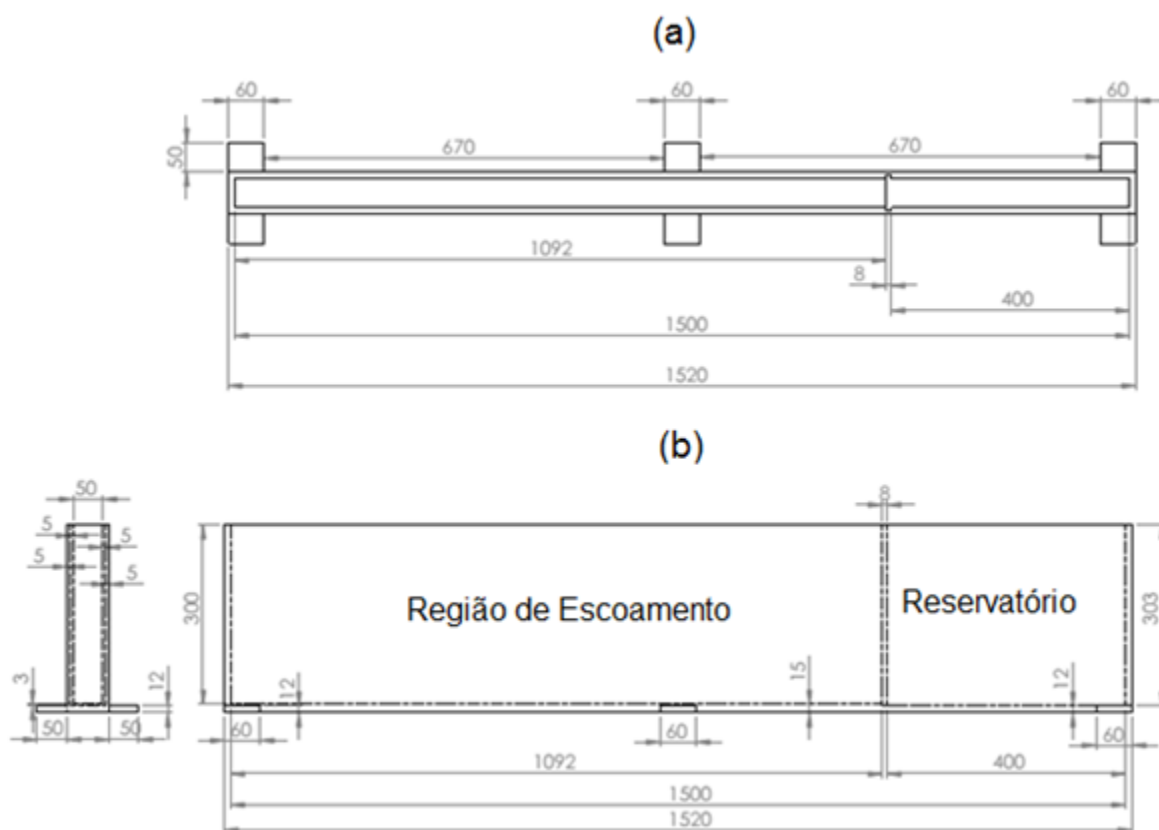


Figura 3.9 - Dimensões da montagem experimental (cotas em mm). (a) Vista superior e (b) Vista frontal

A bancada de acrílico é dividida em duas partes, reservatório e região de escoamento. A área definida com reservatório tem 400 mm de comprimento, 303 mm de altura e 50 mm de largura. Entre as regiões de escoamento e o reservatório há dois rasgos verticais nas paredes laterais e por uma elevação no fundo de 3 mm,

modificações que foram necessárias para o encaixe da comporta impedindo assim o vazamento do fluido antes do momento de abertura. Já a região de escoamento tem 1092 mm de comprimento, 300 mm de altura e 50 mm de largura.

Inicialmente o fluido fica retido no reservatório que é separado da região de escoamento por uma comporta de acrílico com vedação. Após adição do fluido, ele é nivelado e tem sua altura inicial medida. Subsequentemente ao nivelamento do fluido é iniciada a aquisição das imagens, que foram obtidas por uma câmera CCD ou utilizando Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV). Após início da aquisição das imagens há então a abertura da comporta de forma súbita, para que a mesma não interfira no escoamento conforme citado na literatura.

Alguns dos testes efetuados tinham como objetivo avaliar a ocorrência ou não de deslizamento na parede inferior da bancada. Foi então adicionada uma lixa mostrada nas Figuras 3.10 e 3.11.

O procedimento de limpeza da bancada experimental consiste na retirada de todo o fluido utilizado no teste e lavagem com detergente neutro seguida de enxague e secagem. Para facilitar a limpeza, a bancada possui um registro de dreno na parte inferior. Após feito o teste com lixa, ela é descartada e a limpeza feita conforme citado anteriormente.



Figura 3.10 - Lixa para madeira Grão 50 Norton.



Figura 3.11 - Vista Superior de parte da bancada com a lixa para madeira Grão 50 Norton.

3.3.1 Descrição do teste experimental utilizando Câmera CCD

A estação de trabalho utilizada para realização dos testes é constituída de uma câmera monocromática analógica de varredura progressiva tipo CCD (*MANTA G-201C*. Figura 3.12) com 2 megapixel de resolução, sensor Sony ICX274 CCD, e 14,7 frames por segundo em resolução máxima. O processamento de imagens foi realizado a partir de um algoritmo desenvolvido com o programa *Vision Assistant* versão 7.1 da *National Instruments* para o processamento das imagens.

Os fluidos estudados no presente trabalho são translúcidos o que dificulta a visualização e processamento. Então, utilizou-se um pigmento de cor preta adicionado ao fluido, em baixa concentração, facilitando assim o processamento de imagem.

A câmera CCD foi utilizada nos casos não newtonianos e newtoniano. Para realização do teste é feito inicialmente o posicionamento da câmera, que fica a uma distância de 2,10 metros da bancada experimental, e são ajustados foco e intensidade luminosa. A imagem capturada cobre toda a região de escoamento.



Figura 3.12 - Câmera utilizada na bancada experimental.

Antes da abertura da comporta já se inicia o programa e começa a aquisição das imagens (2 horas e 15 minutos de duração). Posteriormente as imagens são individualmente processadas no programa *NI Vision Assistant*. A captura de uma foto da área de observação sem a presença de fluido é importante para calibração do programa. O programa utilizado é calibrado para converter pixels em milímetros a partir de uma referência incluída na parede frontal da bancada experimental. Filtros de ajuste de brilho, contraste e retirada de ruído das imagens são aplicados. O processamento é responsável por discretizar o contorno do escoamento, aplicar uma malha de leitura da imagem e converter cores e tons em uma máscara monocromática, com opções de configuração de sensibilidade ou método de conversão e medir a as posições do escoamento para cada imagem.

A seqüência do processamento pode ser observada na exemplificação apresentada na Figura 3.13:

- (a) Imagem original;
- (b) Área da imagem a ser processada;
- (c) Identificação da interface entre fluido e ar;
- (d) Conversão da imagem para 8 bits;
- (e) Ajuste de morfologia e retirada de partículas;
- (f) Medição da região do escoamento.

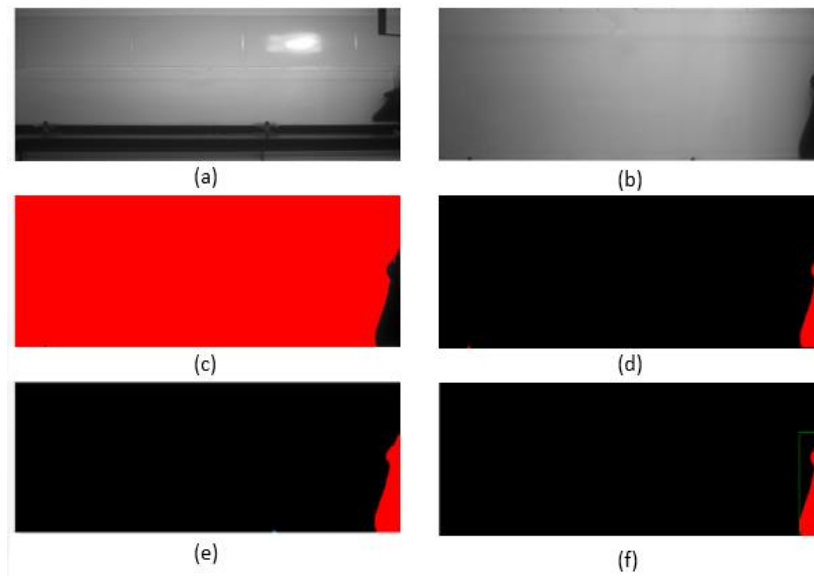


Figura 3.13 - Processamento de imagem.

Utilizando a imagem da posição da frente de escoamento e sabendo o intervalo de tempo entre cada foto tirada, torna-se possível calcular a velocidade do escoamento de maneira simples.

3.3.2 Velocimetria por Imagem de Partículas – PIV

Na maioria das situações práticas de escoamento, o campo de velocidade não pode ser facilmente calculado devido à complexidade das equações que regem a dinâmica dos fluidos. Como as técnicas intrusivas para determinação da velocidade não são adequadas a este experimento optou-se por utilizar a técnica de PIV.

A Velocimetria por Imagem de Partícula surgiu na década de 80. O princípio básico da técnica consiste em iluminar uma seção do escoamento, que contenha partículas traçadoras de pequeno diâmetro que devem acompanhar fielmente o escoamento e são previamente adicionadas. Tal seção é iluminada em dois instantes de tempo próximos (da ordem de microssegundos de intervalo entre pulsos) por meio de um plano de *laser* pulsado, que ilumina a região a ser analisada e a luz refletida pelas partículas sensibiliza uma câmera que por sua vez transfere a imagem para um microcomputador (Figura 3.14). Após um curto intervalo de tempo, o *laser* é disparado novamente e o segundo registro é armazenado separado do primeiro.

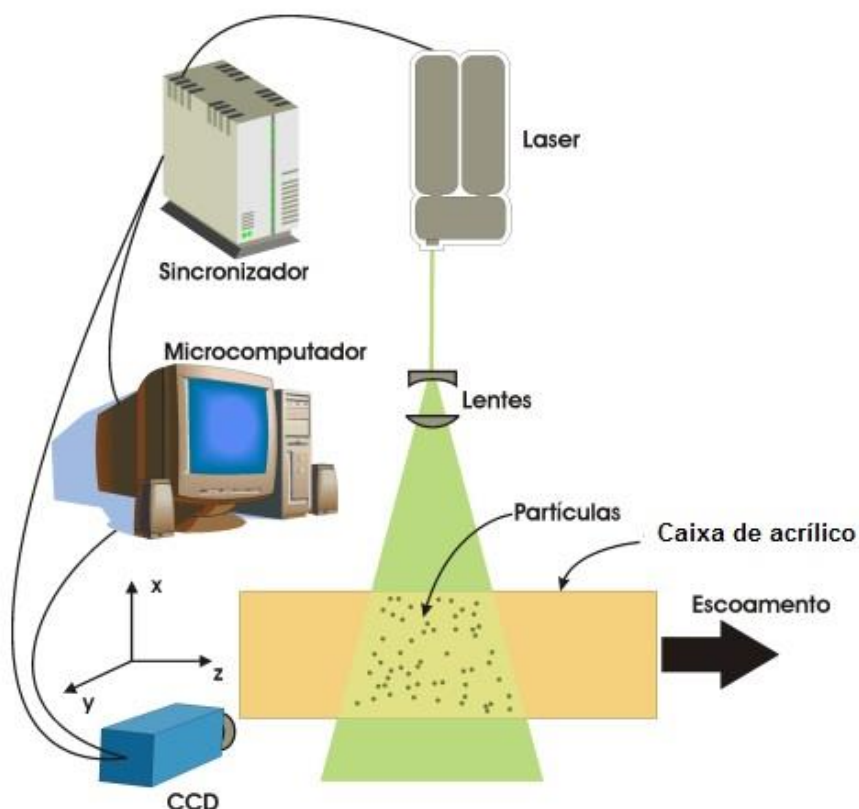


Figura 3.14 - Princípio de funcionamento do PIV. Miranda (2004) - adaptada pelo autor.

3.3.2.1 Descrição do teste experimental utilizando a técnica de PIV

As partículas traçadoras utilizadas foram esferas de vidro modelo *SEED PARTICLES-GLSS-HLLW*, com diâmetro médio variando de 8 a 12 μm . Um laser com pulso duplo Nd:YAG, uma câmera CCD, um sincronizador e um computador com o software *INSIGHT™ 4G-2DTR* foram usadas para aquisição e processamento de dados. Todos os equipamentos citados são da *TIS*.

Após a aquisição dos pares de imagem elas são calibradas com objetivo de transformar *pixels* em valores reais. Já o processamento consisti em dividir a primeira imagem em janelas de interrogação com 64×64 pixels e analisar onde as partículas dessa janela encontram-se na segunda imagem. A segunda imagem é verificada utilizando as mesmas dimensões da primeira e a obtenção da nova posição é obtida através de correlação cruzada. O software faz ainda um pós-

processamento que é de extrema importância para obtenção de um campo de deslocamento de qualidade. Uma vez que a determinação dos vetores se baseia em técnicas probabilísticas, o método pode eventualmente encontrar vetores espúrios, que devem ser substituídos por vetores adequados.

Os testes utilizando o PIV da *TSI* (Figura 3.15) foram feitos de maneira semelhante àqueles com a câmera CCD. O tempo total de teste foi menor, uma vez que a área de análise do PIV era bem menor, 165 x 125 mm, representada na Figura 3.16.

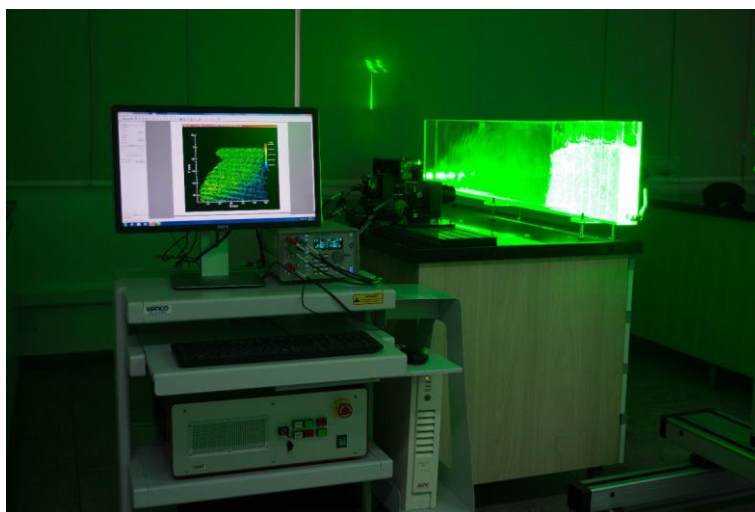


Figura 3.15 - Foto ilustrativa da bancada experimental utilizando PIV.

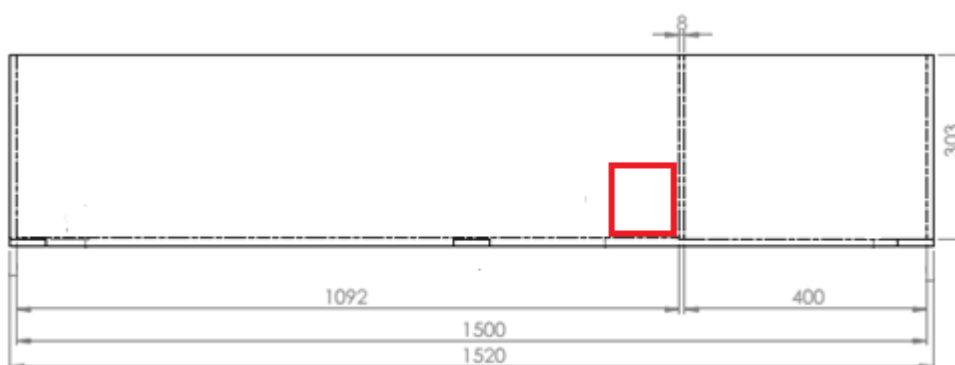


Figura 3.16 - Representação da área de aquisição de imagens feita no PIV.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos são subdivididos em quatro partes. Na seção 4.1 são apresentados os resultados dos experimentos exclusivamente não-newtonianos, detectando a influência da plasticidade no escoamento. Os resultados e discussões do caso newtoniano são abordados na sequência, na seção 4.2. Na seção 4.3 são apresentados os resultados para o caso viscoplástico mostrando o efeito do deslizamento no escoamento. Finalmente, na seção 4.4, é feita uma análise utilizando o PIV, exibindo o campo de velocidade dos instantes iniciais do *Dam Break Flow*.

4.1 Análise do Fluido Viscoplástico

Durante a realização dos testes foram feitas capturas de imagens de todo o processo de escoamento. As Figuras 4.1 a 4.5 mostram o perfil da interface do escoamento para as soluções com diferentes concentrações de carbopol é altura inicial igual a 24 cm.

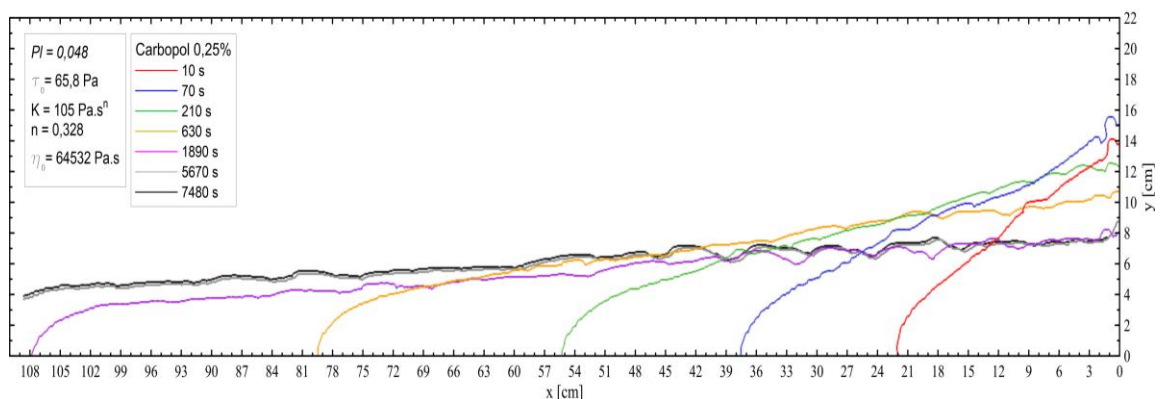


Figura 4.1 - Perfil de interface do escoamento do Carbopol 0,25%.

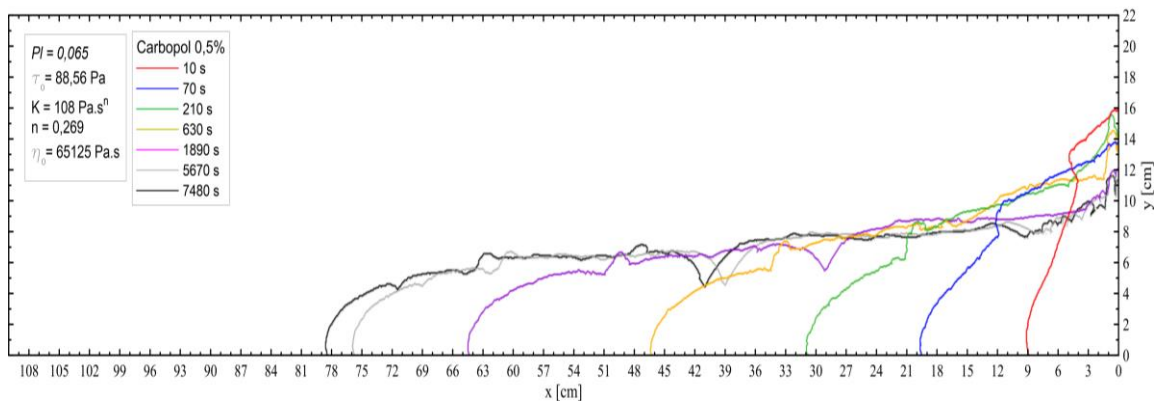


Figura 4.2 - Perfil de interface do escoamento do Carbopol 0,5%.

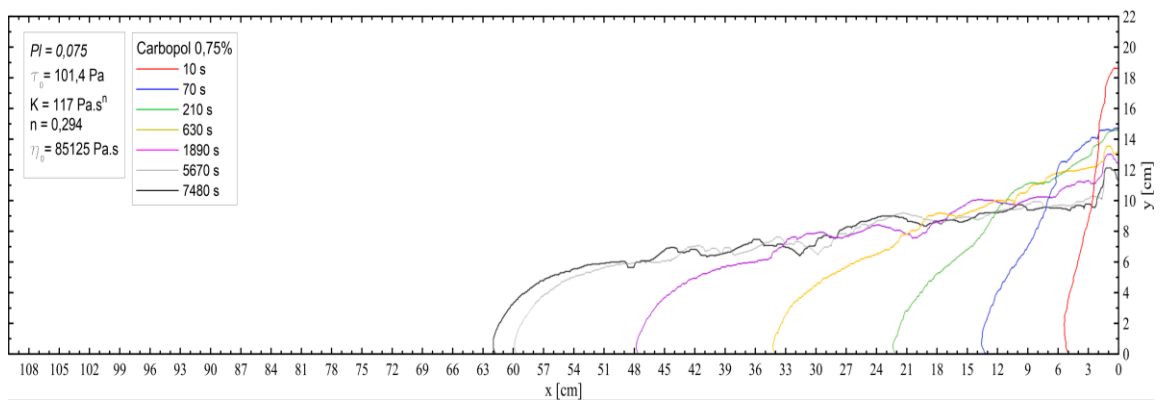


Figura 4.3 - Perfil de interface do escoamento do Carbopol 0,75%.

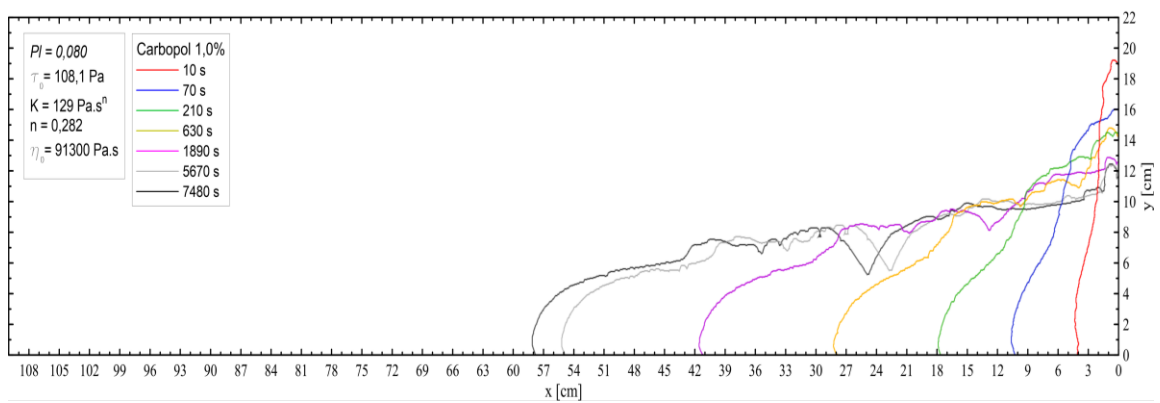


Figura 4.4 - Perfil de interface do escoamento do Carbopol 1,0%.

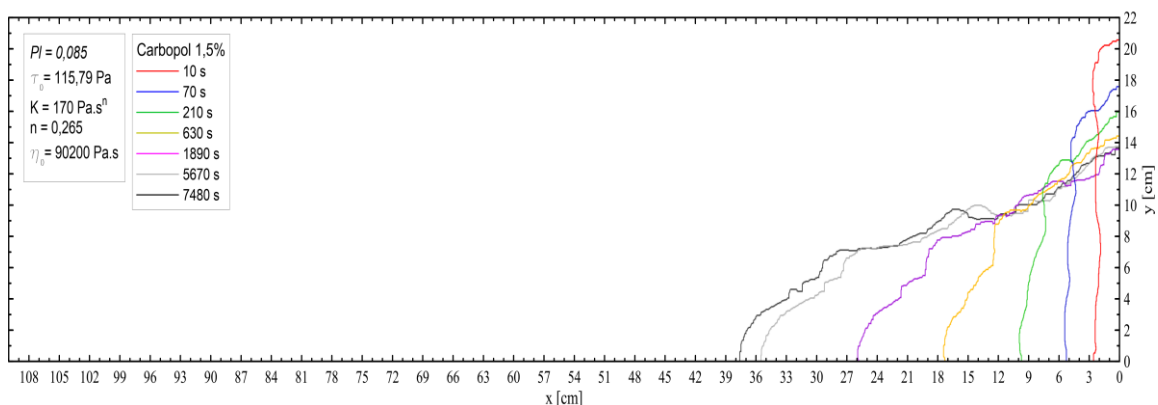


Figura 4.5 - Perfil de interface do escoamento do Carbopol 1,5%.

À medida que há um aumento da plasticidade a distância alcançada pelo fluido cai, como esperado. Analisando os instantes iniciais, observa-se que o material com maior plasticidade se comporta como um bloco, conforme visualizado na Figura 4.5, onde a base e o topo do escoamento estão a uma mesma distância (no eixo x) até 210 segundos de teste. A partir dos 210 segundos de teste nota-se então o desmoronamento do fluido, de maneira semelhante às outras soluções estudadas.

Verifica-se através do perfil de interface do escoamento que o material viscoplástico apresenta irregularidades ao longo do percurso, sugerindo fratura, o que seria típico de materiais viscoplásticos. As deformidades são mais evidentes para os casos de maior plasticidade. Essas irregularidades também foram observadas por Ancey e Cochard (2008). Ainda podemos dizer que, para os instantes iniciais, o fluido se desloca com maior velocidade. Nestes instantes de tempo, o regime de escoamento está dominado pelas forças gravitacionais e à medida que ocorre um equilíbrio entre a força gravitacional e a tensão limite de escoamento, o mesmo é interrompido.

Ao analisar o perfil de interface do escoamento das soluções estudadas é possível ressaltar que alguns casos apresentam falhas na vertical, indicando um início da separação do material deslocado em duas partes. As Figuras 4.6 e 4.7 mostram as imagens adquiridas a partir do instante de tempo de 1890 segundos, com as soluções de carbopol com concentração de 1,0 e 0,5%, onde fica evidente o início da ruptura (demarcação em verde) e o aumento da fenda criada com o passar do escoamento.

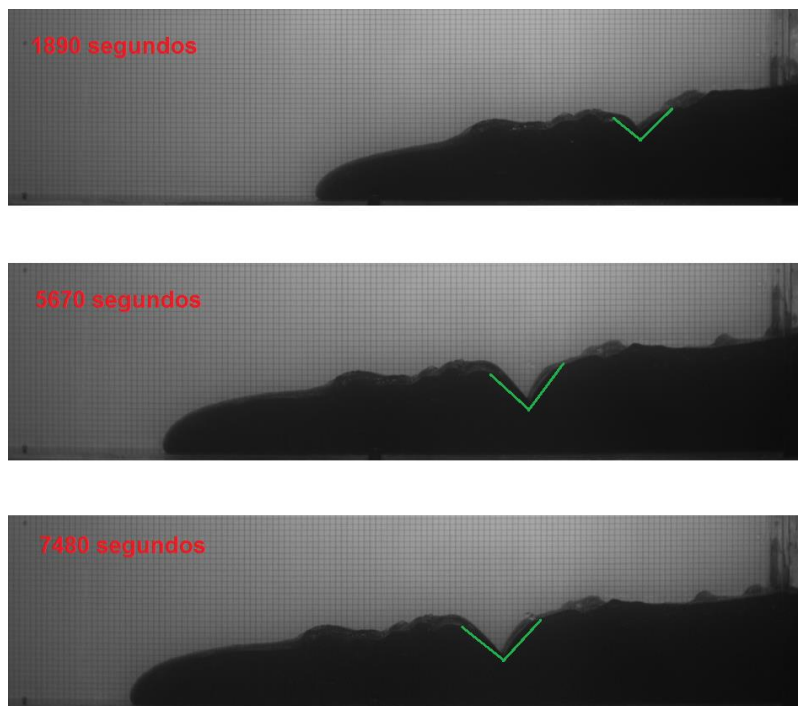


Figura 4.6 - Aparecimento da ruptura para a solução de carbopol 1,0%.

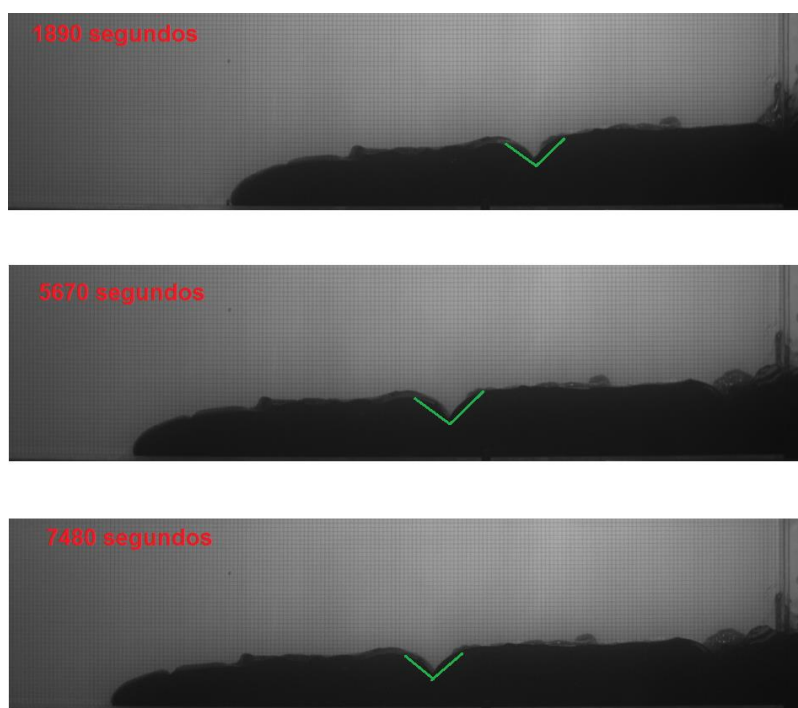


Figura 4.7 - Aparecimento da ruptura para a solução de carbopol 0,5%.

Chanson et al. (2004) observou o fenômeno de separação do material em duas partes realizando testes em uma superfície inclinada com um fluido tixotrópico. O processo de separação observado acontece devido ao desmoronamento do fluido que apresenta uma plasticidade elevada e tem velocidades altas na frente de escoamento. Como a parte de baixo do reservatório não sofre com os efeitos desse desmoronamento a mesma tende a ficar com velocidade menor. Sendo assim, o fluido tende a se separar devido ao efeito plástico.

Analisando as imagens com todas as soluções de carbopol, percebe-se que apenas a solução com concentração de 0,25% não apresenta as mesmas brechas na vertical, apesar dessa falha não ser visível na interface devido ao ângulo que ocorrem em relação à posição da câmera CCD. Esse comportamento pode ser observado na Figura 4.8, quando se analisa as imagens antes do processamento.

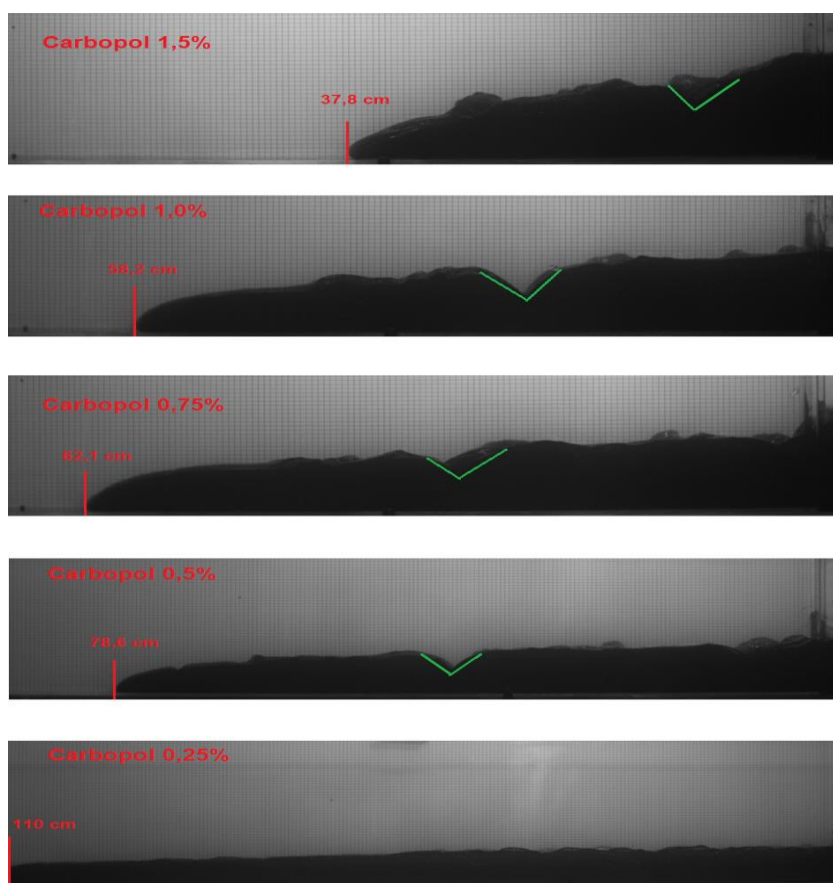


Figura 4.8 - Comparação entre os instantes finais do escoamento.

4.1.1 Repetibilidade dos Resultados

Para cada procedimento realizado, foram feitos dois testes iguais para se obter uma maior confiabilidade dos resultados. As Figuras 4.9 e 4.10 exibem os resultados de repetibilidade do perfil de interface do escoamento com as soluções nas concentrações de 1,5 e 1,0% de carbopol.

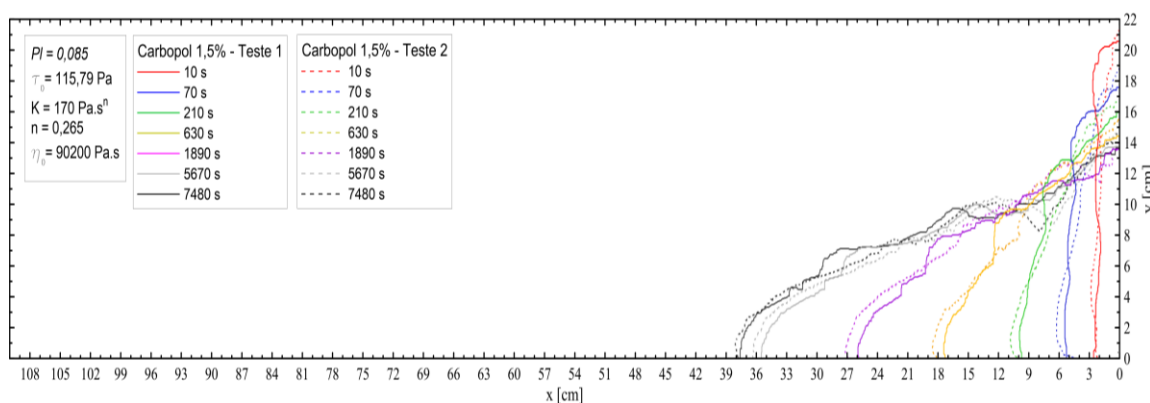


Figura 4.9 - Perfil de interface do escoamento do Carbopol 1,5% - teste 1 e teste 2.

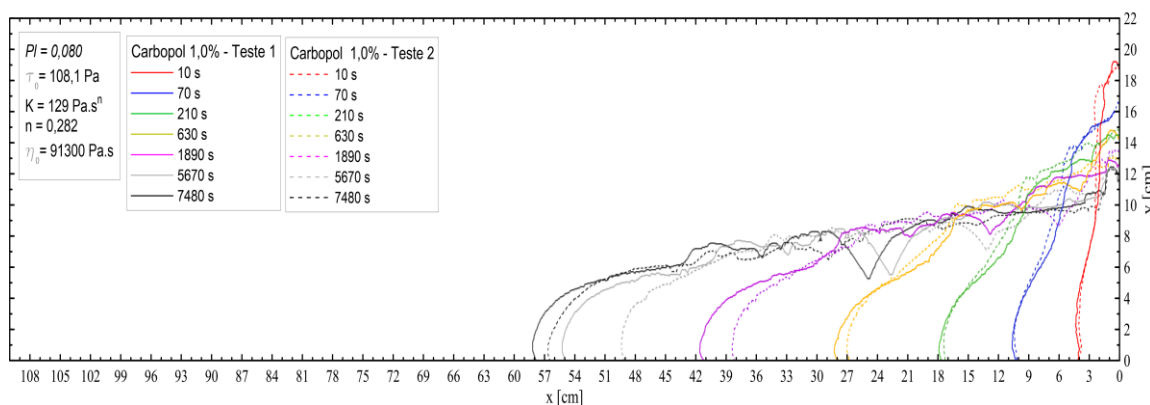


Figura 4.10 - Perfil de interface do escoamento do Carbopol 1,0% - teste 1 e teste 2.

Os resultados obtidos no teste 1 (linhas contínuas) e no teste 2 (linhas tracejadas), para ambas soluções, apresentam semelhança para o tempo de parada do escoamento e também nas irregularidades verificadas. Tais fatos podem ser observados ainda nas Figuras 4.11 e 4.12, que mostram o comportamento do material viscoplástico ao longo de seu deslocamento.

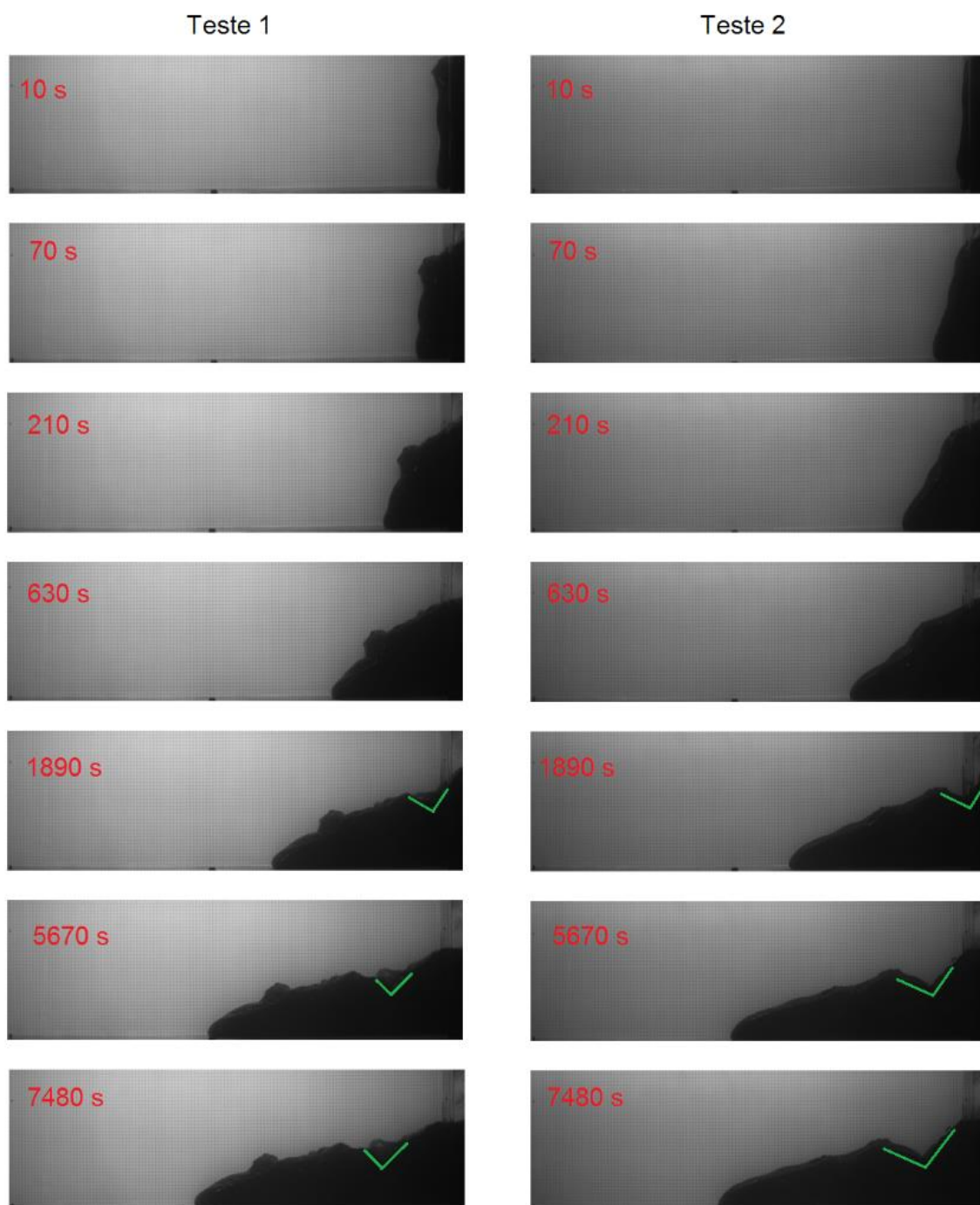


Figura 4.11 - Imagens do escoamento com solução de carbopol 1,5%.

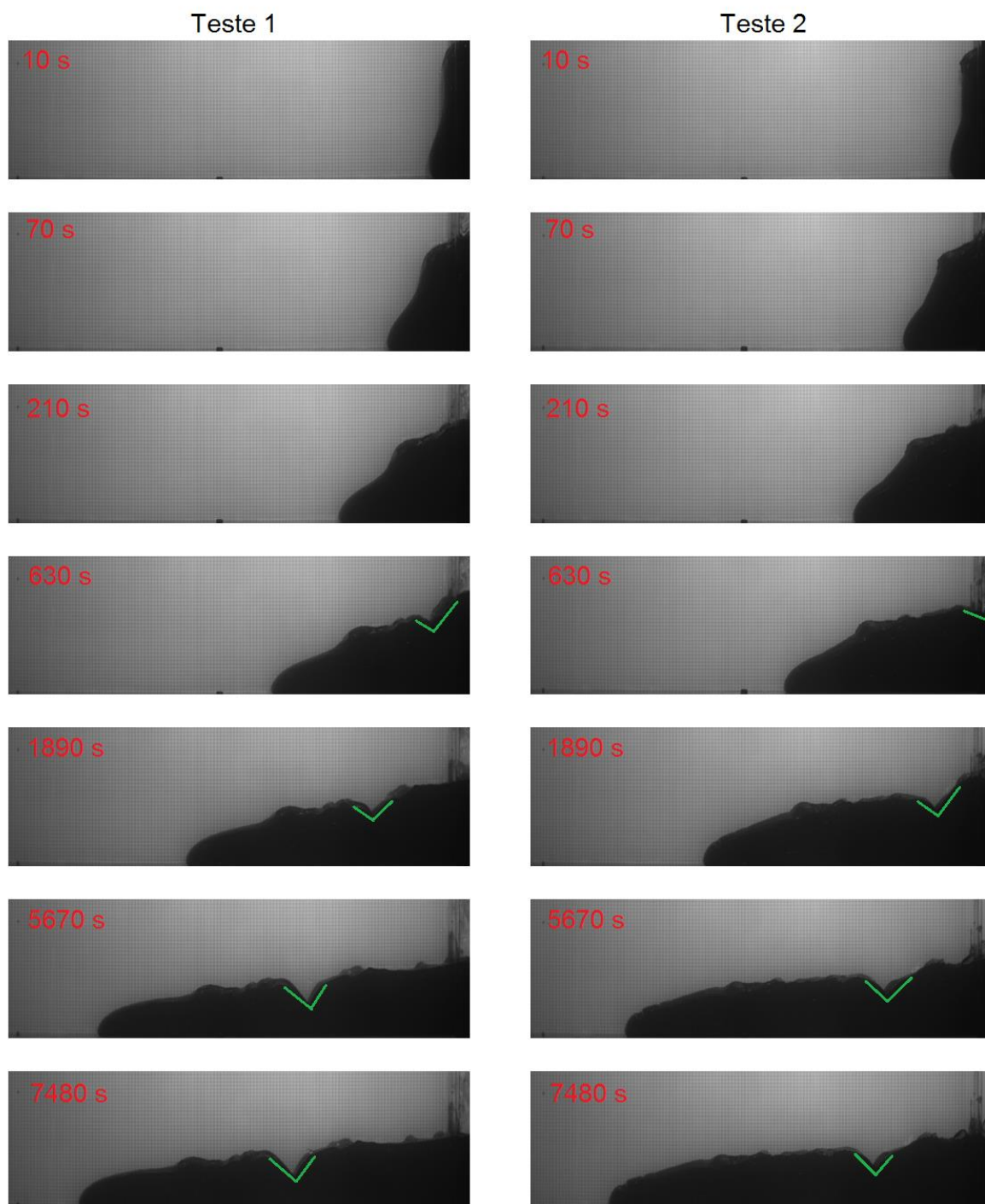


Figura 4.12 - Imagens do escoamento com solução de carbopol 1,0%.

Após análise das imagens, notou-se que além da semelhança no tempo de parada e nas irregularidades da superfície do fluido, o processo de ruptura do material tanto no teste 1 quanto no teste 2 de ambas as soluções ocorre em instantes próximos de tempo. Apesar das falhas não aparecerem no mesmo formato e ângulo, podemos

notar que elas estão presentes praticamente na mesma posição. Isso mostra que a falha obtida faz parte do padrão de escoamento do material viscoplásticos estudados aqui.

4.2 O Caso Newtoniano

O fluido escolhido foi o xarope de glucose de milho conforme apresentado na seção 3.2. O objetivo principal desta análise é identificar as diferenças entre os casos viscoplásticos e newtonianos.

Para tal, uma análise feita utilizando apenas uma mesma altura inicial da lâmina de fluido para o caso viscoplástico e newtoniano se tornaria inconclusiva. Desta forma, para uma comparação justa, o resultado do teste utilizando o material viscoplástico foi comparado com o resultado newtoniano equivalente com o mesmo número de Froude. A Tabela 4.1 mostra os resultados obtidos com os casos viscoplásticos.

Tabela 4.1 - Resultados obtidos com os casos viscoplásticos

SOLUÇÃO DE CARBOPOL [%]	PI	ALTURA INICIAL [M]	VELOCIDADE DO ESCOAMENTO PARA 10 SEGUNDOS DE TESTE [MM/S]	NÚMERO DE FROUDE
1,5	0,085	0,24	2,37	0,0015
1,0	0,080	0,24	4,31	0,0028
0,75	0,075	0,24	5,20	0,0034
0,5	0,065	0,24	9,07	0,0059
0,25	0,048	0,24	22,06	0,0144
1,0 SOLUÇÃO 2	0,081	0,24	6,37	0,0042
0,25 SOLUÇÃO 2	0,036	0,24	24,04	0,0157

Ao observar a tabela, podemos verificar que as maiores plasticidades apresentam menor velocidade de escoamento e, portanto, um menor valor do número de Froude. Para comparação com os resultados do material viscoplástico obtidos, inicialmente os estudos para o caso newtoniano foram feitos utilizando o Fluido A (53% PEG + 47% água) e o Fluido B (Glicerina) que apresentaram resultados conforme descrito na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Resultados obtidos utilizando o Fluido A e B.

	ALTURA INICIAL [M]	VELOCIDADE DO ESCOAMENTO PARA 10 SEGUNDOS DE TESTE [M/S]	NÚMERO DE FROUDE
FLUIDO A	0,24	1,26	0,8239
FLUIDO A	0,1	0,56	0,5702
FLUIDO B	0,24	0,82	0,5355
FLUIDO B	0,1	0,46	0,4641

Nota-se que os valores alcançados com os fluidos A e B para o número de Froude são elevados em relação ao caso viscoplástico, impossibilitando assim a comparação do caso não-newtoniano com o newtoniano. Como alternativa para este problema, utilizou-se o xarope de glucose de milho (Fluido C) que apresentou resultados satisfatórios quando comparado com os resultados obtidos na Tabela 4.1 (valores em vermelho). Porém, para tal comparação houve alteração da altura inicial do escoamento, variando assim o número de Froude. O resultado obtido com o Fluido C é apresentado na Tabela 4.3, onde os valores marcados em vermelho na tabela, são aqueles que tiveram uma maior proximidade com as soluções de carbopol nas concentrações estudadas.

Com base nas Tabelas 4.1 e 4.3, é feito um comparativo da solução de carbopol com concentrações de 1,0 % (Solução 2), 0,75 % e 0,5 % com as alturas iniciais de

102, 59 e 150 mm respectivamente, por apresentarem número de Froude semelhantes.

Tabela 4.3 - Resultados obtidos com o xarope de glucose de milho.

	ALTURA INICIAL [M]	VELOCIDADE DO ESCOAMENTO PARA 10 SEGUNDOS DE TESTE [MM/S]	NÚMERO DE FROUDE
FLUIDO C	0,255	15,21	0,0096
FLUIDO C	0,24	13,89	0,0091
FLUIDO C	0,201	9,86	0,0070
FLUIDO C	0,15	6,9	0,0057
FLUIDO C	0,102	4,07	0,0041
FLUIDO C	0,059	2,49	0,0033

Na Figura 4.13 nota-se que na medida em que ocorre redução da lâmina de fluido há também a diminuição do número de Froude. A tendência desse comportamento é mostrada na Figura 4.13.

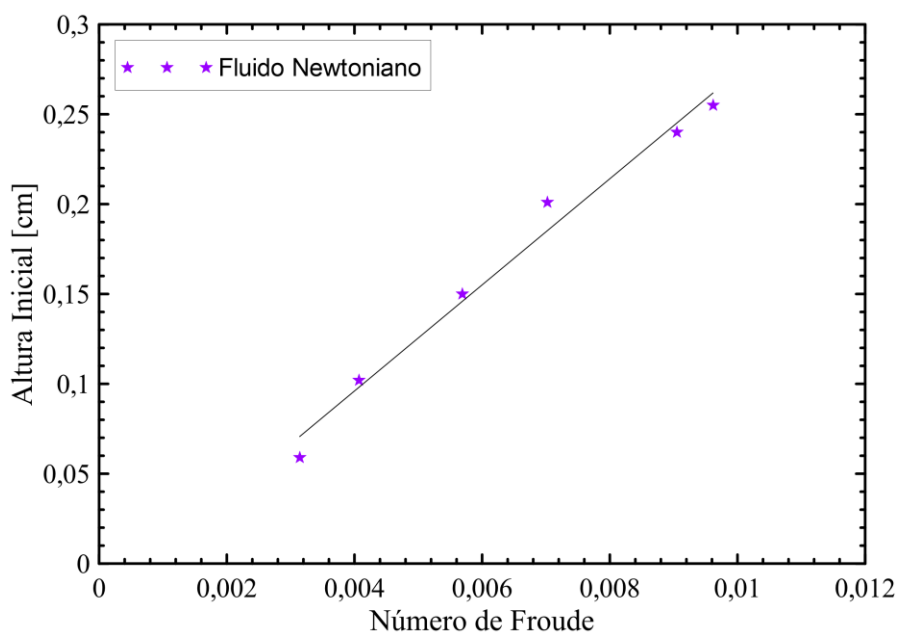


Figura 4.13 - Tendência do comportamento do número de Froude a medida que há redução na altura inicial do Fluido C.

As Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 mostram a comparação do perfil de interface do escoamento do caso viscoplástico (linhas contínuas) com o caso newtoniano (linhas tracejadas) para número de Froude semelhante.

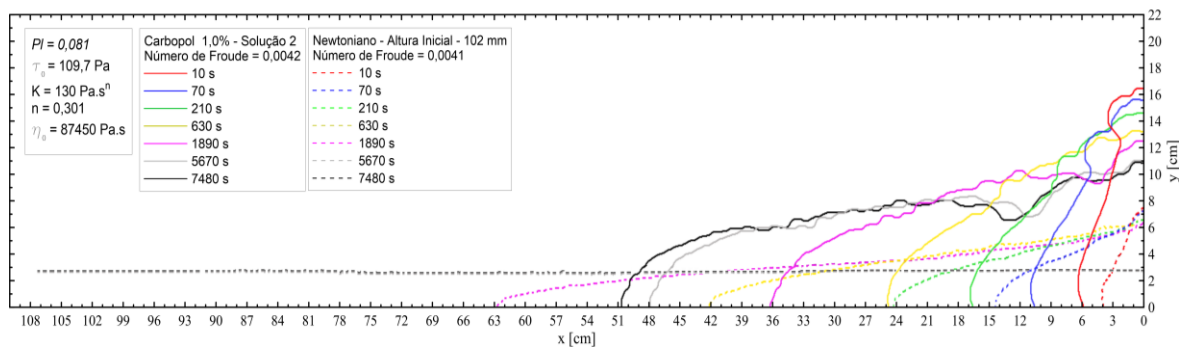


Figura 4.14 - Perfil de interface do escoamento do caso viscoplástico em comparação com o caso newtoniano.

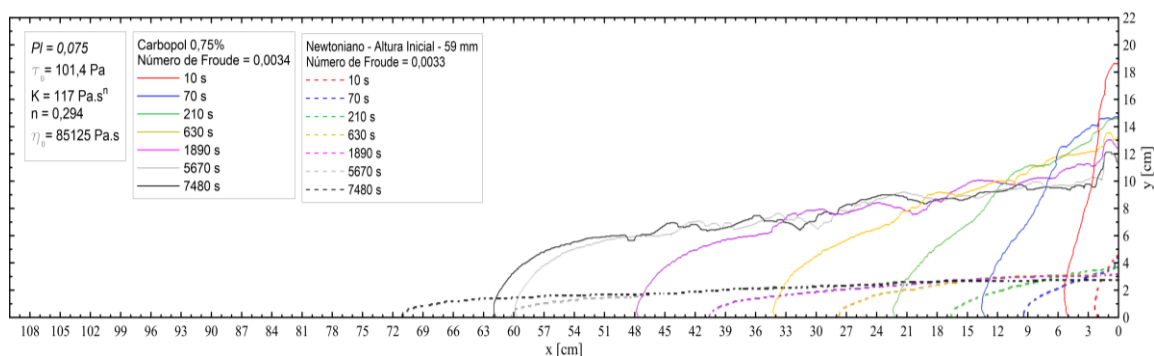


Figura 4.15 - Perfil de interface do escoamento do caso viscoplástico em comparado com o caso newtoniano.

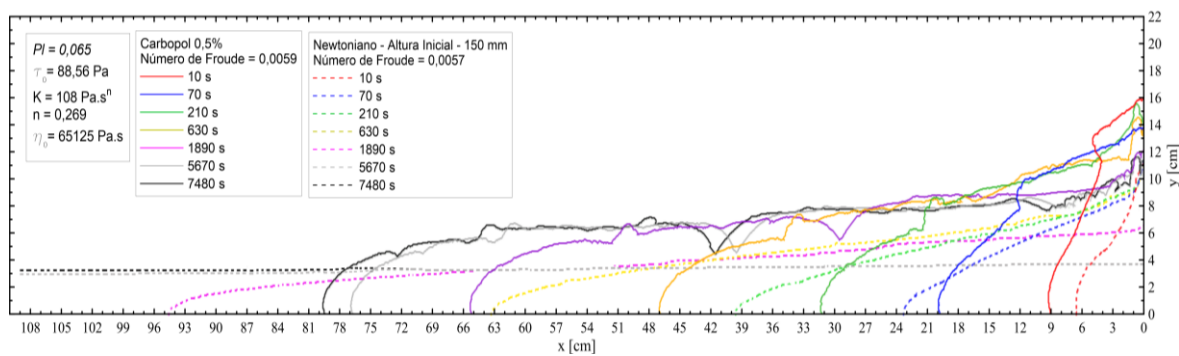


Figura 4.16 - Perfil de interface do escoamento do caso viscoplástico em comparação com o caso newtoniano.

Podemos observar que em todos os testes comparados, a velocidade inicial do escoamento é maior para o caso viscoplástico. Isso ocorre devido à altura inicial do escoamento que leva o caso viscoplástico a receber uma maior ação das forças gravitacionais. Na medida em que o escoamento se processa, ocorre a inversão das frentes de onda na qual o caso viscoplástico começa a sofrer uma redução de velocidade, ou seja, as forças gravitacionais se igualam com a tensão limite de escoamento. Essa inversão pode ser observada na Figura 4.17.

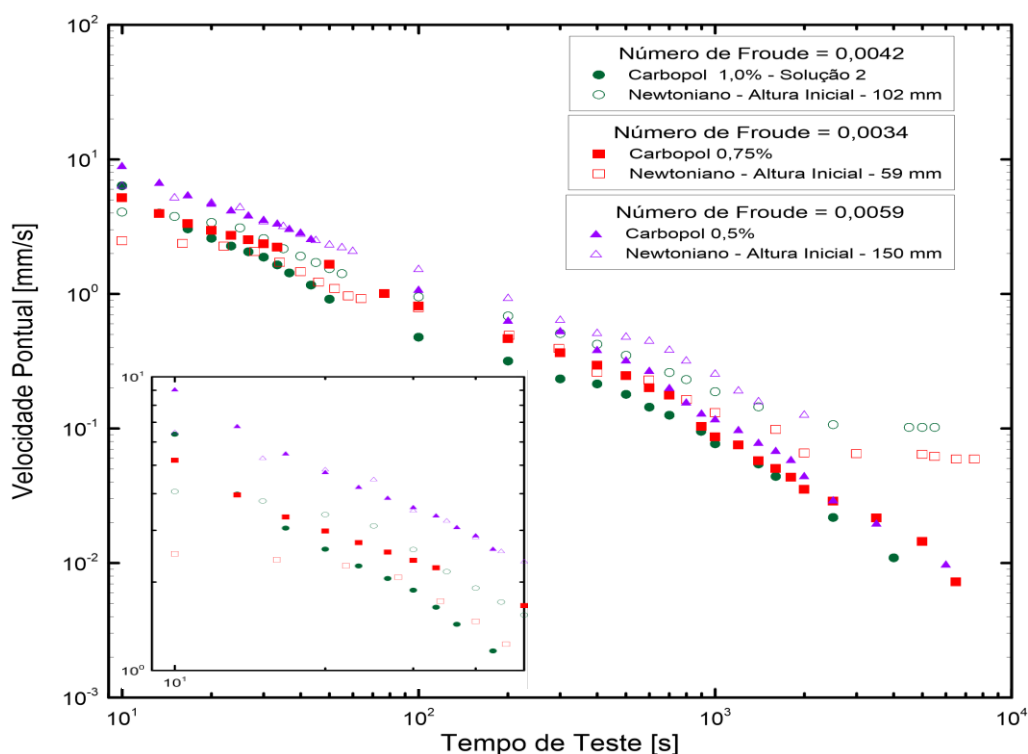


Figura 4.17 - Velocidade pontual do escoamento para os casos viscoplásticos e newtonianos.

Após análise, observa-se que para os casos newtonianos com alturas iniciais iguais a 102 mm e 150 mm, a inversão do fluido que está com maior velocidade ocorre nos momentos iniciais do teste. Para esses casos, antes dos 70 segundos de teste, o fluido newtoniano se move de maneira mais rápida que o fluido viscoplástico até que o mesmo chegue ao final da bancada experimental. Já para o caso do fluido newtoniano com altura inicial igual a 59 mm, o tempo para ocorrer a inversão da velocidade é maior do que para os outros casos, visto que o escoamento começa a ocorrer com uma lâmina de fluido muito pequena. Sendo assim, o escoamento acontece de maneira lenta desde o início.

Outro fato que se pode destacar é que os testes com fluido newtoniano assumem nos instantes finais do tempo de duração uma velocidade constante de escoamento. Fator este que não pode ser observado com alturas iniciais maiores do que 150 mm, já que o escoamento atinge o final da bancada experimental antes de passar por esse instante de tempo.

4.3 Análise de Deslizamento para o Caso Viscopoplástico

Após realização dos testes com as soluções nas concentrações citadas na seção 4.1, decidiu-se averiguar se, para o caso viscopoplástico, a distância alcançada pelo fluido ocorria apenas por escoamento ou se havia a influência de deslizamento na fronteira inferior da montagem experimental. Para analisar a presença de deslizamento, foi feita uma nova solução de carbopol denominada Solução 2 para as concentrações de 1,0 e 0,25%. As Figuras 4.18 e 4.19 mostram uma comparação entre o perfil de interface do escoamento para os testes com superfície lisa (linhas contínuas) e com superfície rugosa (linhas tracejadas).

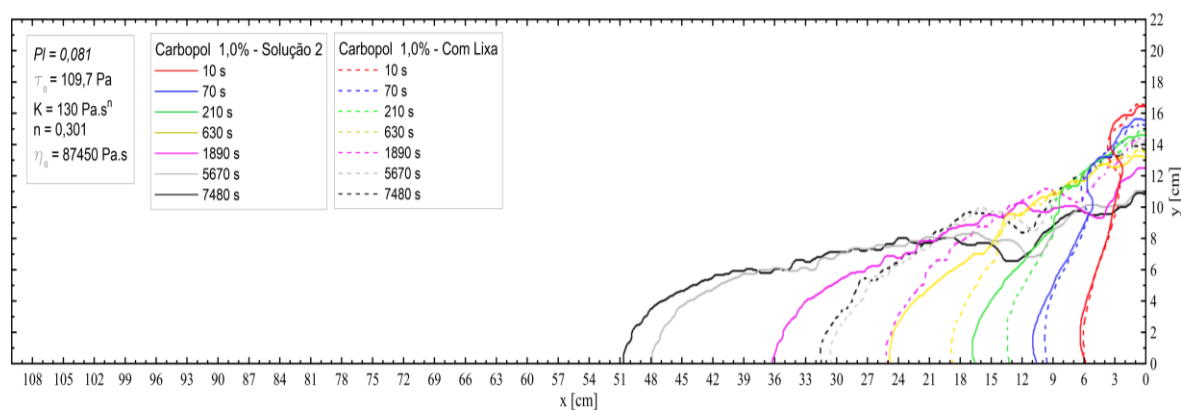


Figura 4.18 - Teste para análise de deslizamento no leito da bancada experimental.

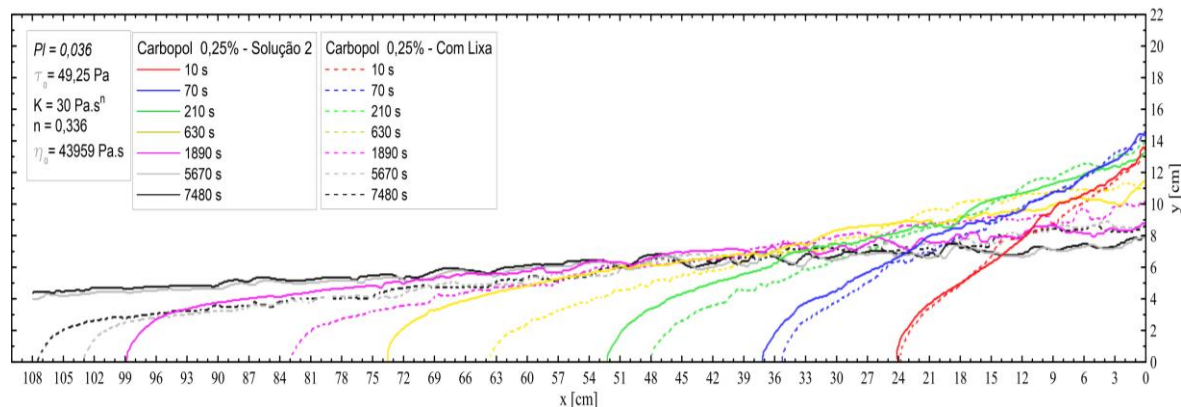


Figura 4.19 - Teste para análise de deslizamento no leito da bancada experimental.

Nota-se através do perfil de interface do escoamento que, no caso do teste para superfície lisa, o fluido percorre uma distância consideravelmente maior do que com o leito rugoso, distância essa que corresponde a 21,3 cm para o caso da Solução 2 de carbopol com concentração de 1,0%. Também é evidente nas imagens que, para os instantes iniciais, a distância percorrida pelo fluido tanto no leito rugoso quanto no liso é a mesma, e a diferença da frente de escoamento começa a ficar em maior evidência quando ocorre um aumento da área de contato do fluido com o leito, o que resulta em aumento do deslizamento. A Figura 4.20 mostra a diferença percentual entre os resultados obtidos para os testes com e sem rugosidade, que é obtida pela Equação 4.1.

$$\text{Diferença Percentual} = \left(\frac{L_{SR}}{L_R} - 1 \right) * 100 \quad (1)$$

Onde L_{SR} é o comprimento alcançado pelo material para o leito sem rugosidade em um determinado tempo e L_R é o comprimento alcançado pelo material para o leito rugoso no mesmo período de tempo.

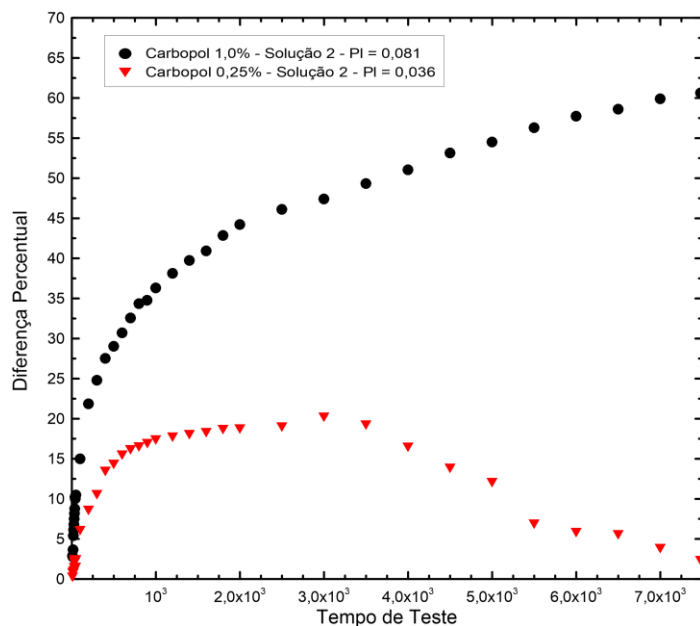


Figura 4.20 - Diferença percentual da posição da frente de escoamento para os testes com e sem rugosidade.

Podemos observar que, para o caso com menor plasticidade, a diferença percentual entre o teste com rugosidade e leito com superfície lisa é bem menor quando comparado ao caso de maior plasticidade que atinge valores maiores que 60% de diferença entre os testes. Outro ponto a se observar é que, para o caso de menor plasticidade, a diferença percentual começa a reduzir, pois o escoamento em superfície lisa chega até o fim da montagem experimental.

4.4 Velocimetria por Imagem de Partícula – PIV

Com o objetivo de analisar o campo de velocidade nos instantes iniciais do *Dam Break Flow*, o presente trabalho utilizou o PIV. Foi utilizada a Solução 2 de carbopol com concentrações de 1,0 e 0,25%. Também foi utilizado xarope de glucose de milho como fluido newtoniano. Os testes para solução de carbopol foram realizados com e sem a presença de rugosidade no leito conforme feito para a câmera CCD.

4.4.1 Solução de Carbopol com Concentração de 1,0%

As Figuras 4.21 e 4.22 mostram a solução de carbopol com concentração de 1,0% com e sem a presença do leito rugoso no intervalo de tempo de 6,4 segundos após a abertura da comporta. Apesar de apresentarem um perfil de interface do escoamento um pouco diferente entre os casos, ambas apresentam um campo de velocidade parecido com as linhas de correntes com uma inclinação vertical em toda região de escoamento, mostrando um desmoronamento do material nos instantes iniciais. Evidencia-se que neste momento inicial, o componente vertical da velocidade é mais significativo, conforme visualizado por Aleixo et al. (2010).

O ponto de maior velocidade para o tempo de teste analisado fica entre 15 e 60 mm de altura. Até este momento do escoamento, não é possível observar nenhuma diferença entre o caso com leito liso e com leito rugoso, visto que ambos apresentam um gradiente de velocidade parecidos perto do leito. Na medida em que o escoamento se processa, começa então ser notada uma diferença no campo de velocidade do escoamento conforme apresentado nas Figuras 4.23 e 4.24.

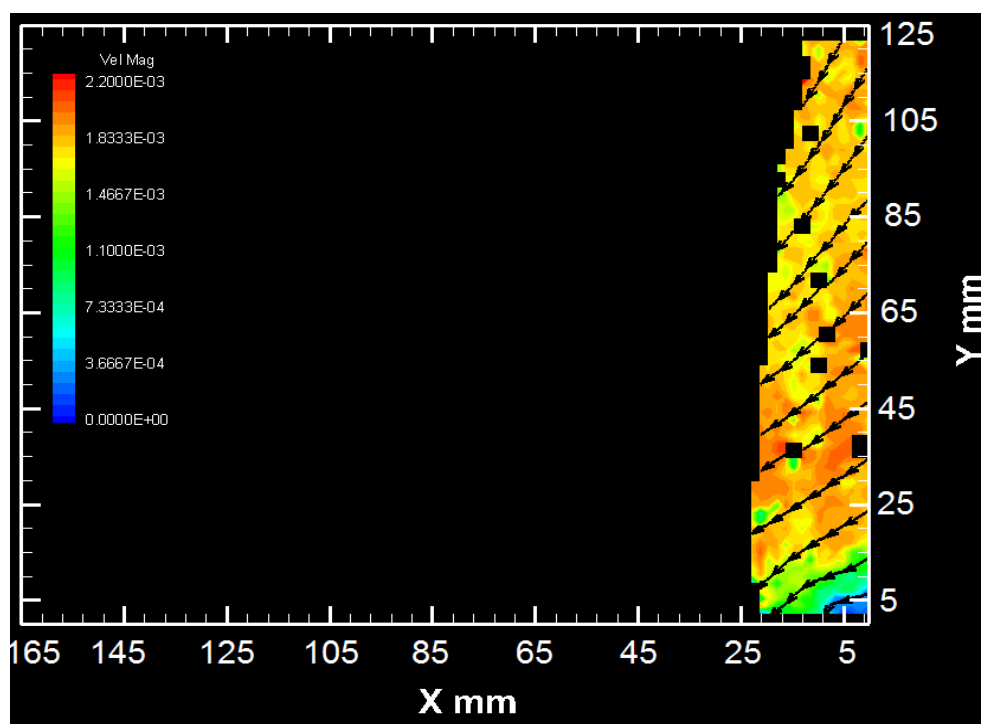


Figura 4.21 - Perfil de velocidade para teste em superfície lisa. 6,4 segundos após abertura da comporta.

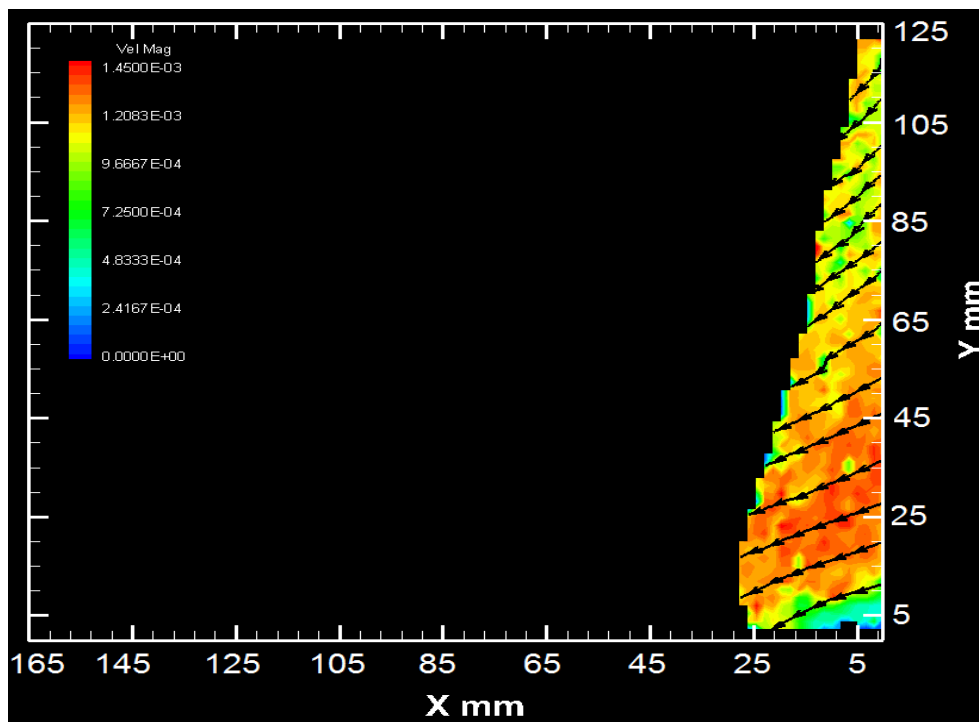


Figura 4.22 - Perfil de velocidade para teste em superfície rugosa. 6,4 segundos após abertura da comporta.

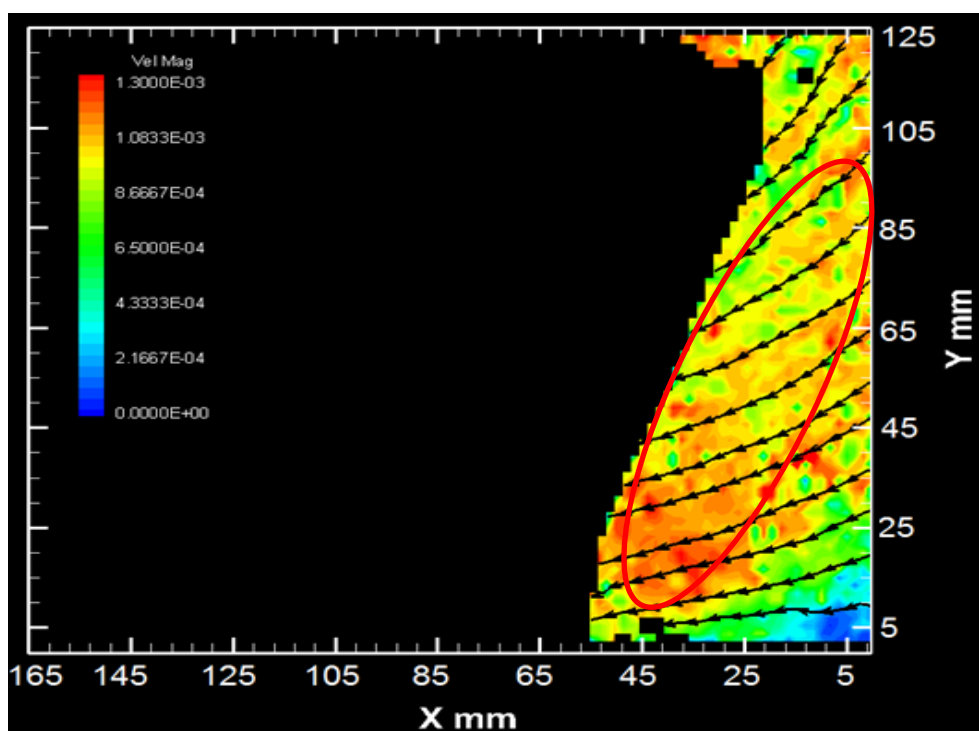


Figura 4.23 - Perfil de velocidade para teste em superfície lisa. 28 segundos após abertura da comporta.

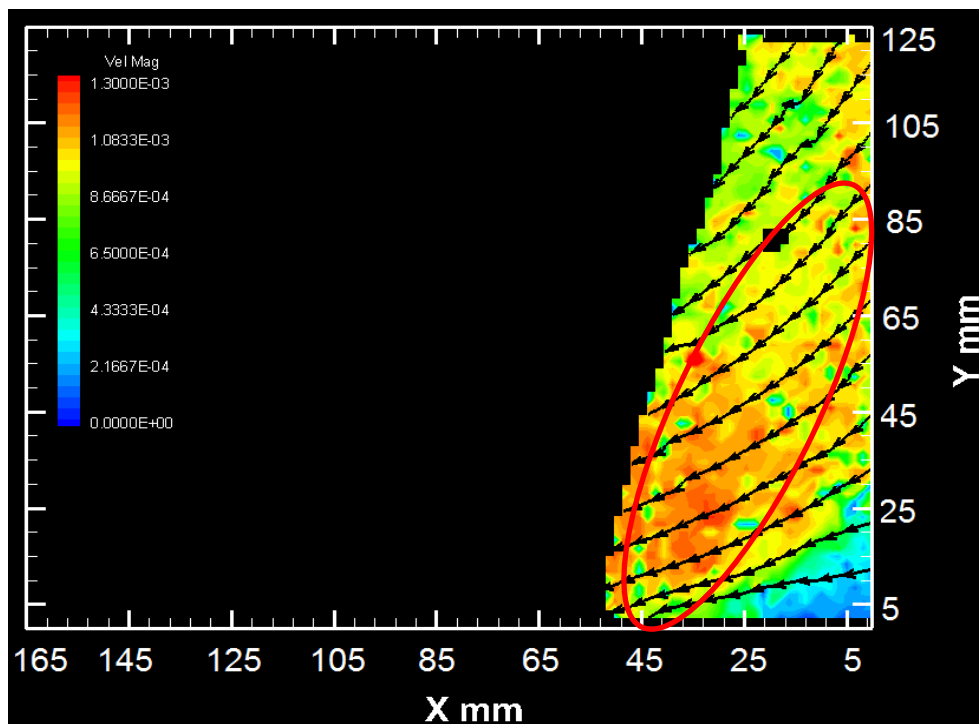


Figura 4.24 - Perfil de velocidade para teste em superfície rugosa. 28 segundos após abertura da comporta.

Nota-se que, após 28 segundos da abertura da comporta, no topo do escoamento ainda ocorre um desmoronamento que é indicado pelas linhas de corrente e, na medida em que há uma aproximação do leito para ambos os casos, as linhas de corrente tendem a assumir um padrão mais horizontal. Podemos observar a região de maior velocidade pelo contorno em vermelho, que começa pouco depois da frente de onda e se propaga na região central do escoamento. Para os tempos próximos de escoamento, temos a continuidade deste comportamento, conforme mostrado nas Figuras 4.25 e 4.26.

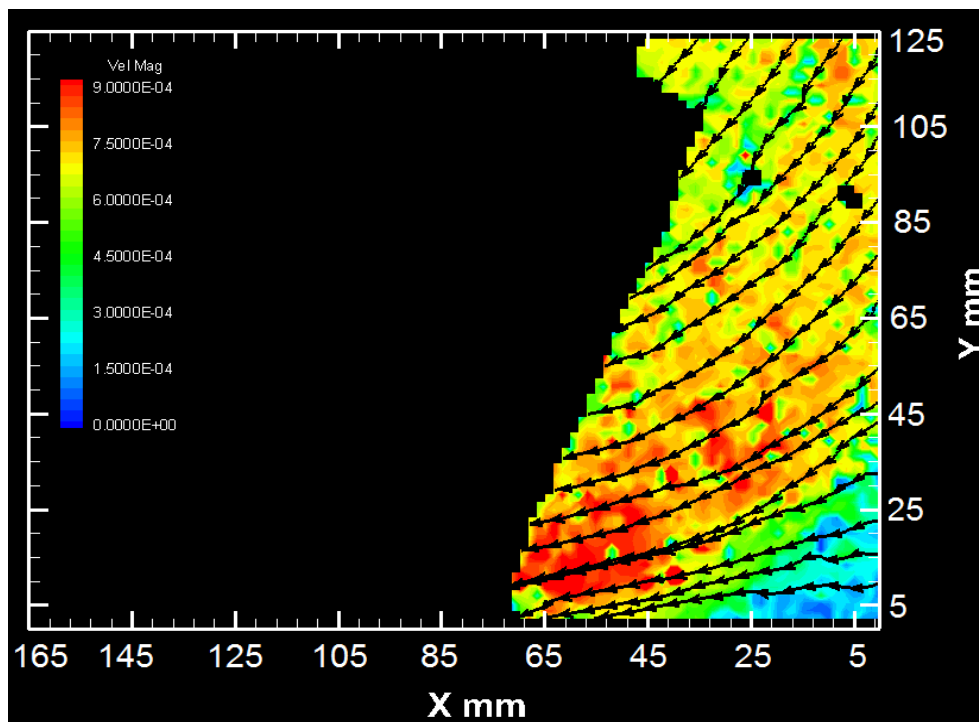


Figura 4.25 - Perfil de velocidade para teste em superfície lisa. 68,4 segundos após abertura da comporta.

Na medida em que ocorre a propagação do escoamento, ocorre uma redução da velocidade de escoamento e uma maior centralização da região de maior velocidade. Região esta que fica pouco depois da frente de onda. Esse fenômeno também foi evidenciado por Lauber e Willi (1998) para um fluido newtoniano. Para 68,4 segundos após abertura da comporta, ambos os casos apresentam uma distância percorrida semelhante, que foi observado anteriormente para os testes com a câmera CCD. É possível notar também que a região de maior velocidade é a mesma para ambos os testes. Porém para o leito com rugosidade, as velocidades são um pouco menores (Figura 4.27).

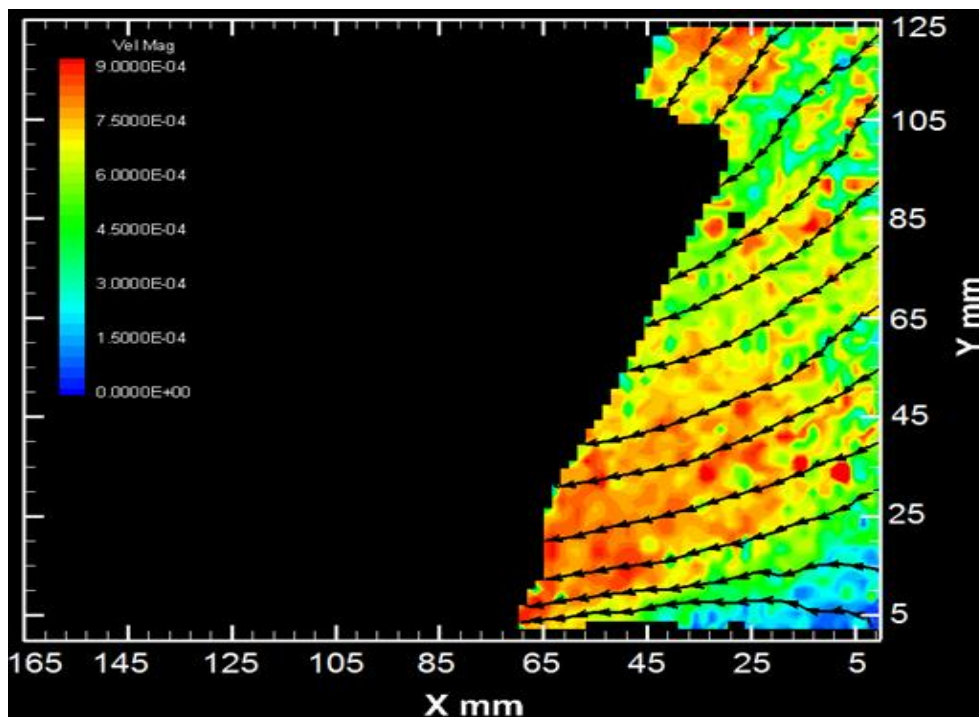


Figura 4.26 - Perfil de velocidade para teste em superfície rugosa. 68,4 segundos após abertura da comporta.

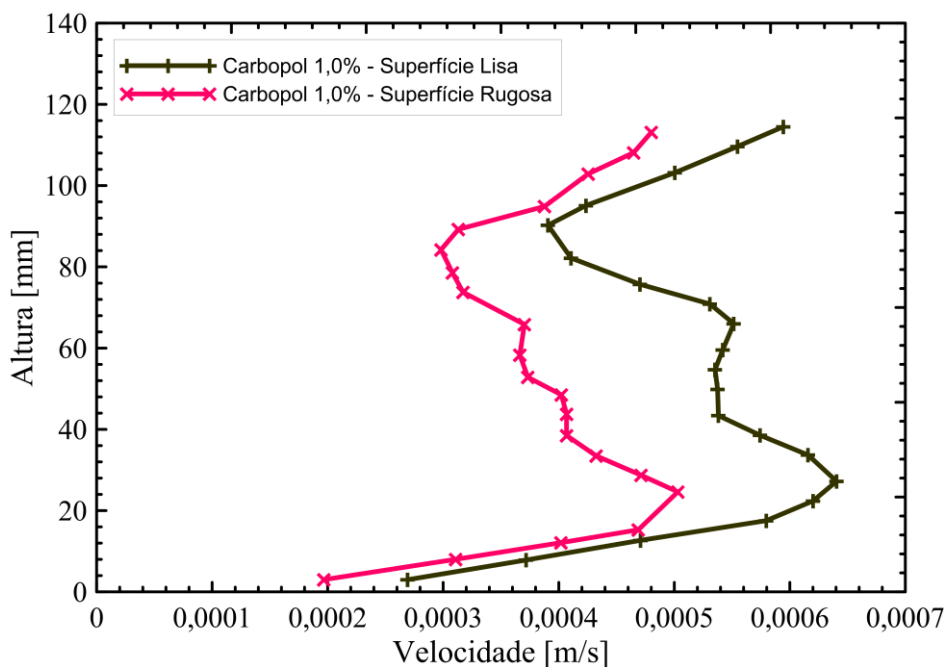


Figura 4.27 - Representação do perfil de velocidade para uma coordenada fixa. Posição $x=25$ mm.

Observa-se que o para o teste realizado sem a presença de rugosidade, o perfil de velocidade é maior. No entanto, o comportamento de ambos os testes é semelhante, visto que os piques de velocidade ocorrem praticamente na mesma posição. Nas proximidades do leito, as velocidades são menores e aumentam conforme se distanciam do mesmo, até chegar à região de maior velocidade que fica em aproximadamente 25 mm de distância do leito. Após este aumento de velocidade, a mesma volta a cair e sobe novamente a partir dos 85 mm da lâmina do fluido, onde o desmoronamento ocorre com maior intensidade. Na medida em que a área atingida pelo fluido aumenta, começa a ficar evidente os efeitos do deslizamento conforme mostrado nas Figuras 4.28 e 4.29.

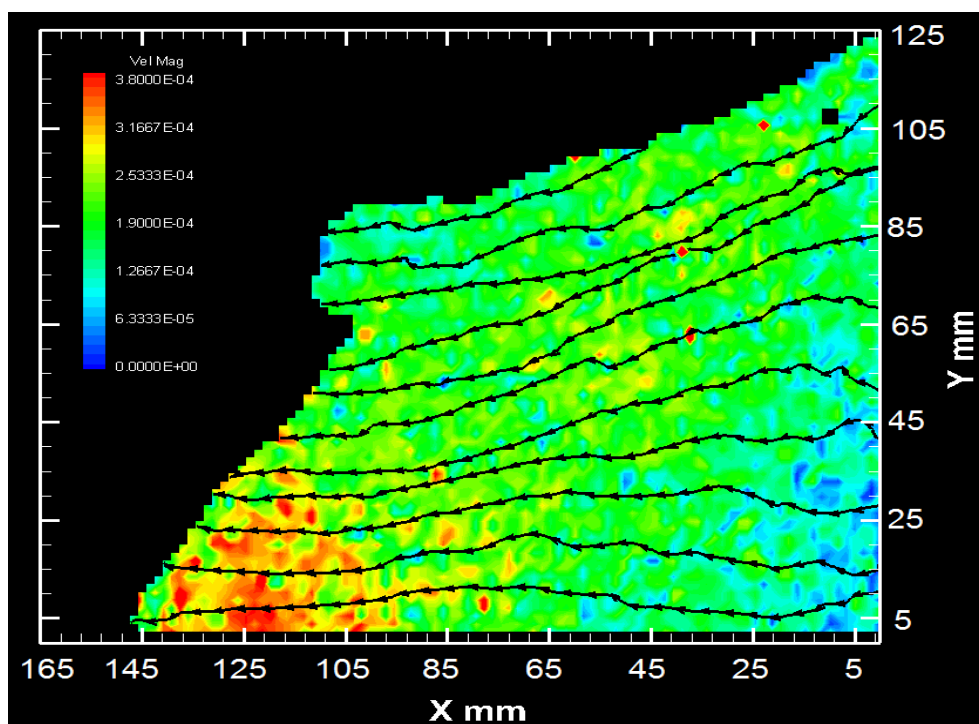


Figura 4.28 - Perfil de velocidade para teste em superfície lisa. 206,4 segundos após abertura da comporta.

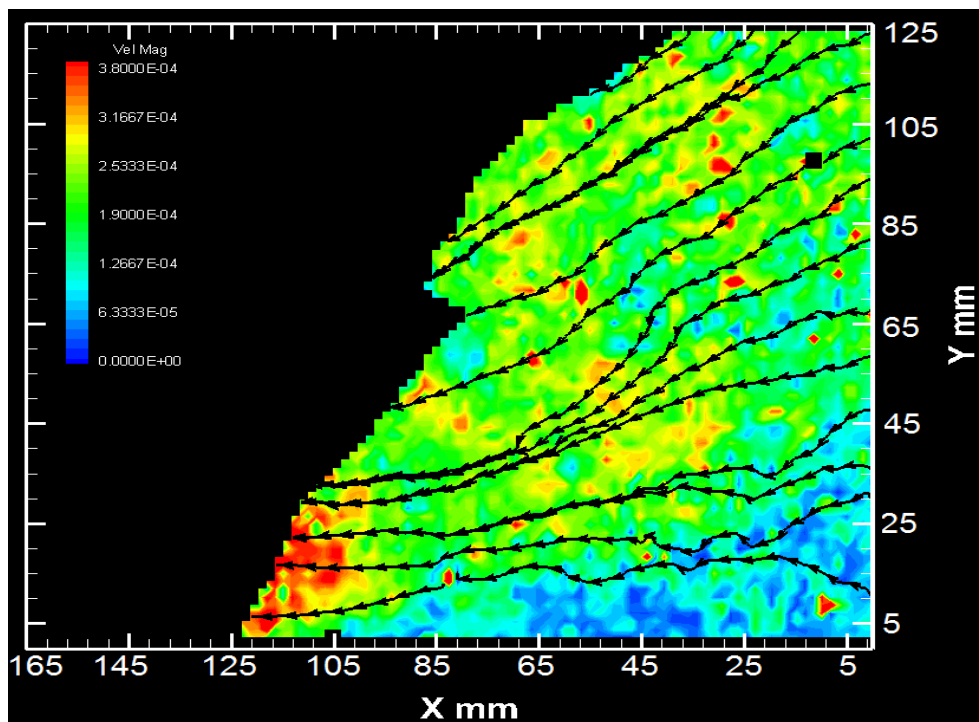


Figura 4.29 - Perfil de velocidade para teste em superfície rugosa. 206,4 segundos após abertura da comporta.

Para o instante de 206,4 segundos de teste, uma diferença entre os casos com superfície rugosa e superfície lisa, tanto na distância percorrida pelo fluido como também no perfil de velocidade é observada. Para o caso com superfície lisa, as linhas de corrente em toda a região do escoamento estão mais horizontalizadas e, próxima à frente de escoamento, está a região de maior velocidade. Para o caso com leito rugoso, as velocidades são menores, próximas ao leito, o que não ocorre para o leito liso, mostrando assim maior adesão ao leito.

4.4.2 Solução de Carbopol com Concentração de 0,25%

A solução de carbopol com concentração de 0,25% apresentou resultado semelhante com os obtidos pela solução de carbopol com concentração de 1,0%, conforme podemos visualizar nas Figuras 4.30 a 4.33.

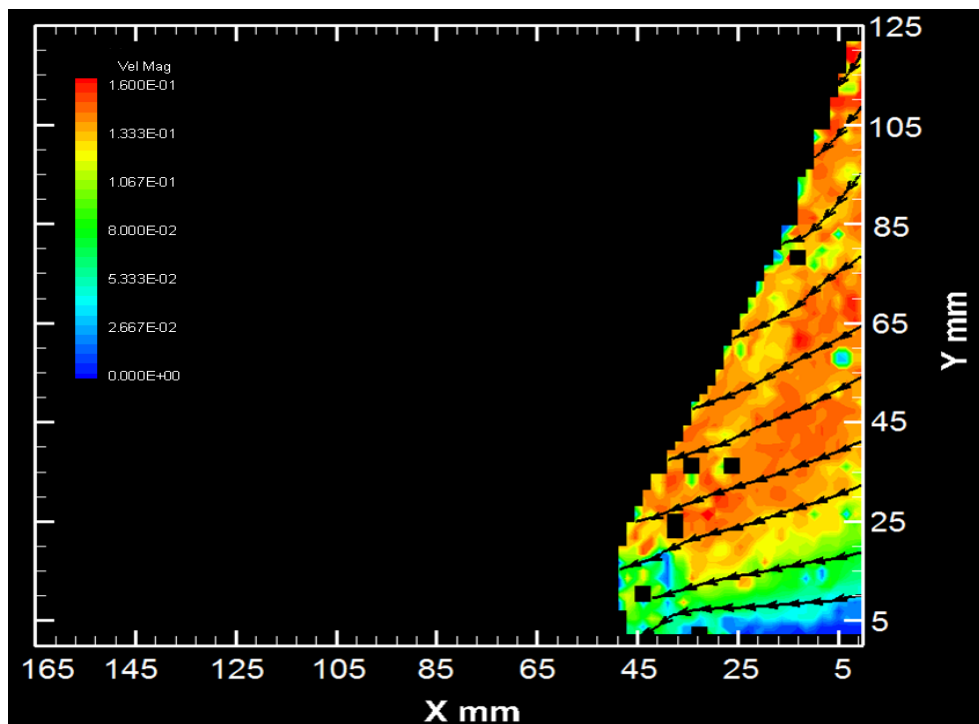


Figura 4.30 - Perfil de velocidade para teste em superfície lisa. 0,4 segundos após abertura da comporta.

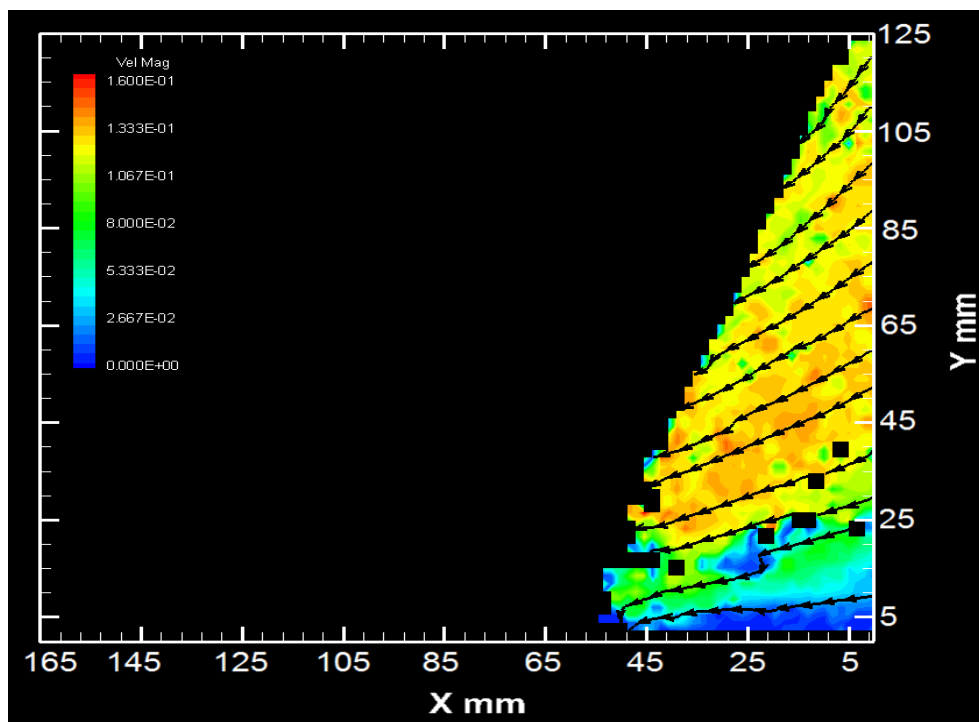


Figura 4.31 - Perfil de velocidade para teste em superfície rugosa. 0,4 segundos após abertura da comporta.

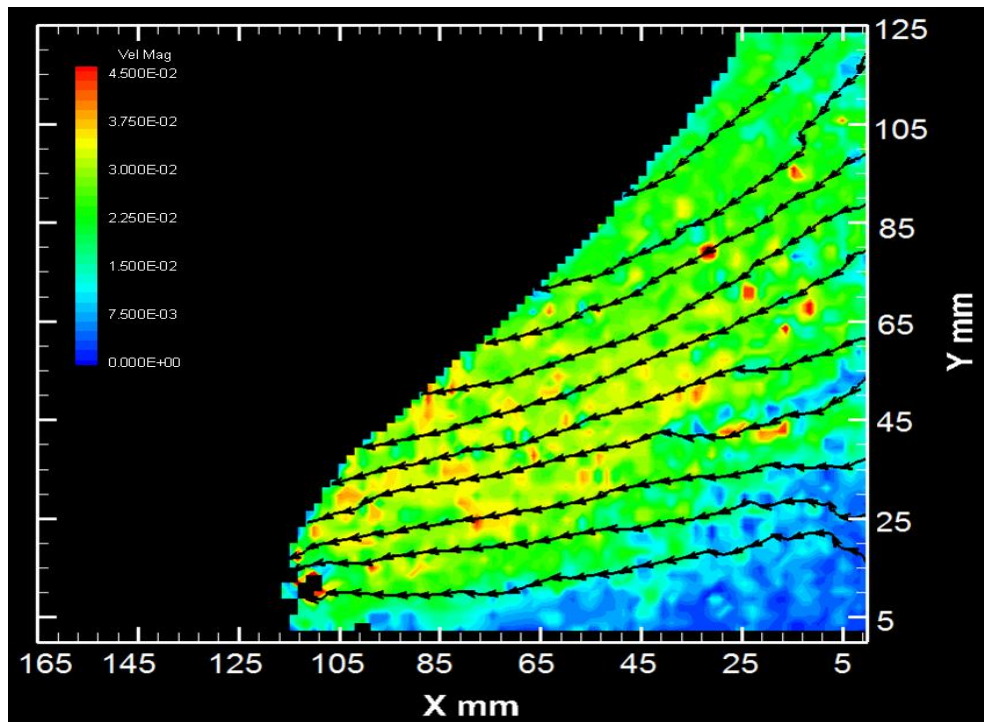


Figura 4.32 - Perfil de velocidade para teste em superfície lisa. 1,2 segundos após abertura da comporta.

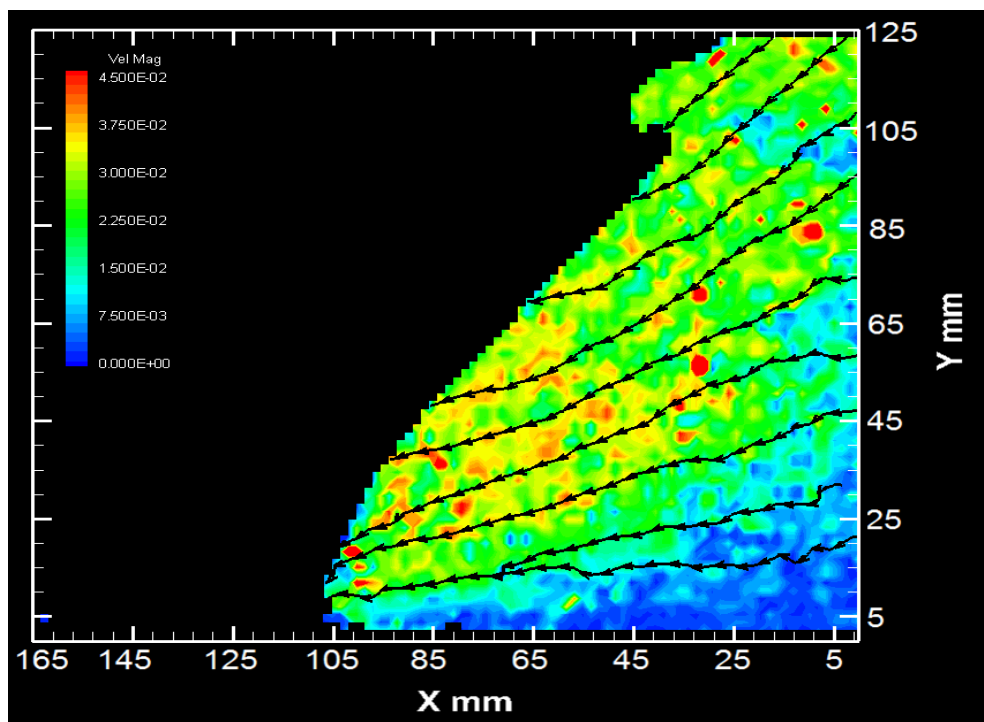


Figura 4.33 - Perfil de velocidade para teste em superfície rugosa. 1,2 segundos após abertura da comporta.

Nota-se que o perfil de interface do escoamento obtido é semelhante a solução de carbopol com concentração de 1,0%. Porém, com valores maiores de velocidade. Inicialmente, observa-se através das linhas de corrente um desmoronamento do fluido que, devido a menor plasticidade, ocorre com menor intensidade. Um gradiente de velocidade é observado no instante de tempo de 0,4 segundos, e à medida que ocorre o escoamento, a região de maior velocidade fica logo após a frente de onda como já observado anteriormente. O perfil de velocidade obtido no teste sem a presença de rugosidade para este caso apresenta pequena diferença do obtido com a presença de rugosidade, conforme podemos verificar na Figura 4.34.

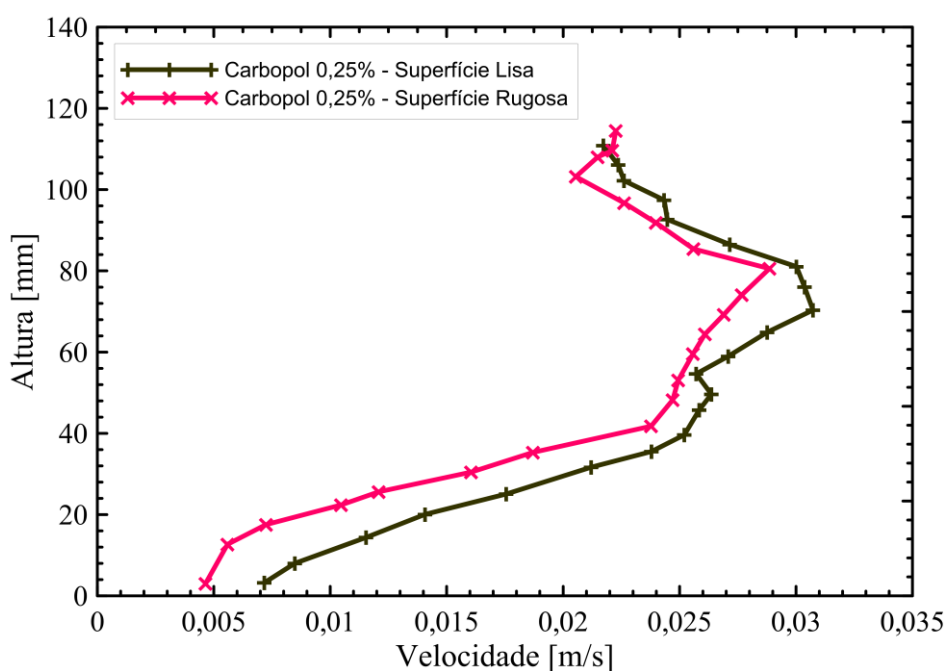


Figura 4.34 - Representação do perfil de velocidade para uma coordenada fixa. Posição $x = 25$ mm.

Ao acompanhar o gradiente de velocidade obtido, notou-se que o para o teste com leito rugoso, as velocidades obtidas são menores principalmente próximo do leito, o que já era esperado devido à redução dos efeitos de deslizamento. No entanto, o gradiente de velocidade se comporta de maneira semelhante em ambos os casos.

À medida que ocorre o escoamento do material, o mesmo tende a apresentar menores valores de velocidade devido à redução do efeito da força gravitacional

sobre o escoamento. Sendo assim, as linhas de corrente ficam mais orientadas em um plano horizontal conforme podemos observar nas Figuras 4.35 e 4.36.

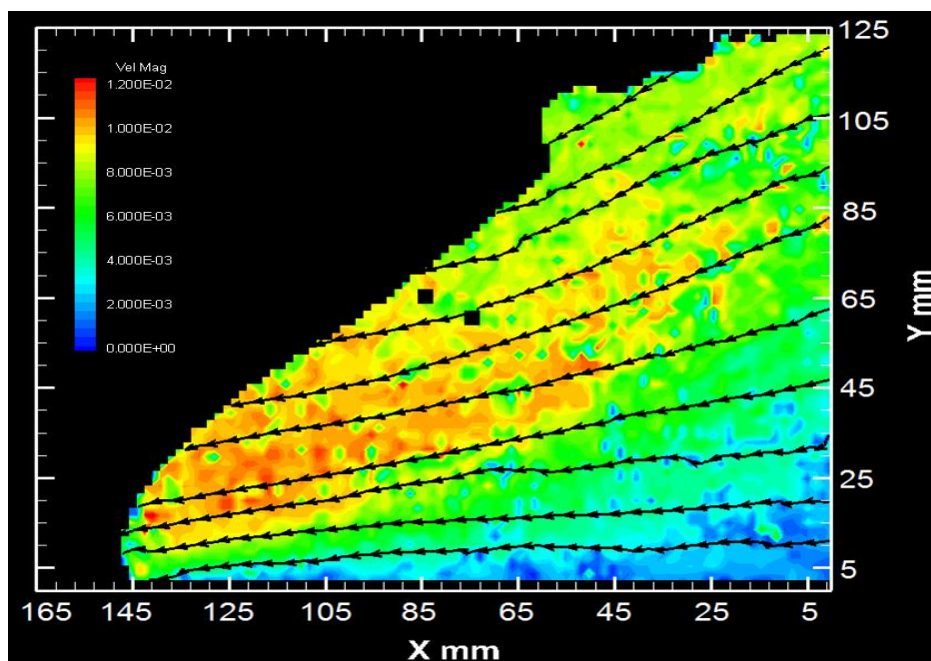


Figura 4.35 - Perfil de velocidade para teste em superfície lisa. 3,6 segundos após abertura da comporta.

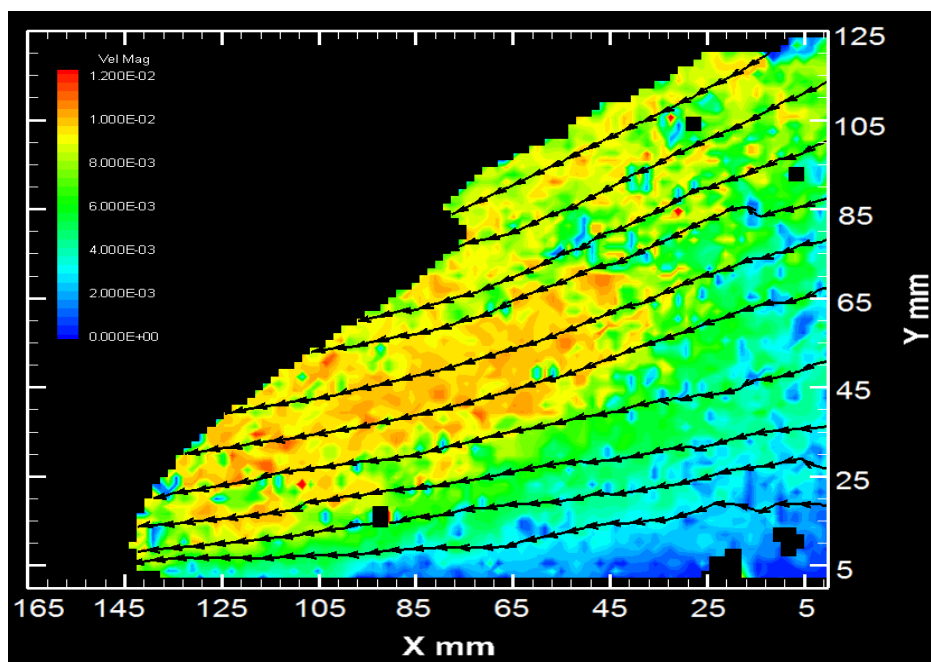


Figura 4.36 - Perfil de velocidade para teste em superfície rugosa. 3,6 segundos após abertura da comporta.

A superfície rugosa, como já relatado, apresenta um escoamento com menor velocidade. O perfil de velocidade para ambos os casos continua apresentando semelhança e pela análise ser em instantes tão próximos à abertura da comporta, não é possível observar claramente a presença de deslizamento para a solução com concentração de 0,25% de carbopol.

4.4.3 Fluido Newtoniano

Diferentemente dos casos onde foi utilizado um material viscoplástico, para o caso newtoniano a lâmina inicial de fluido foi de 150 mm e os resultados obtidos são demonstrados nas Figuras 4.37 a 4.40.

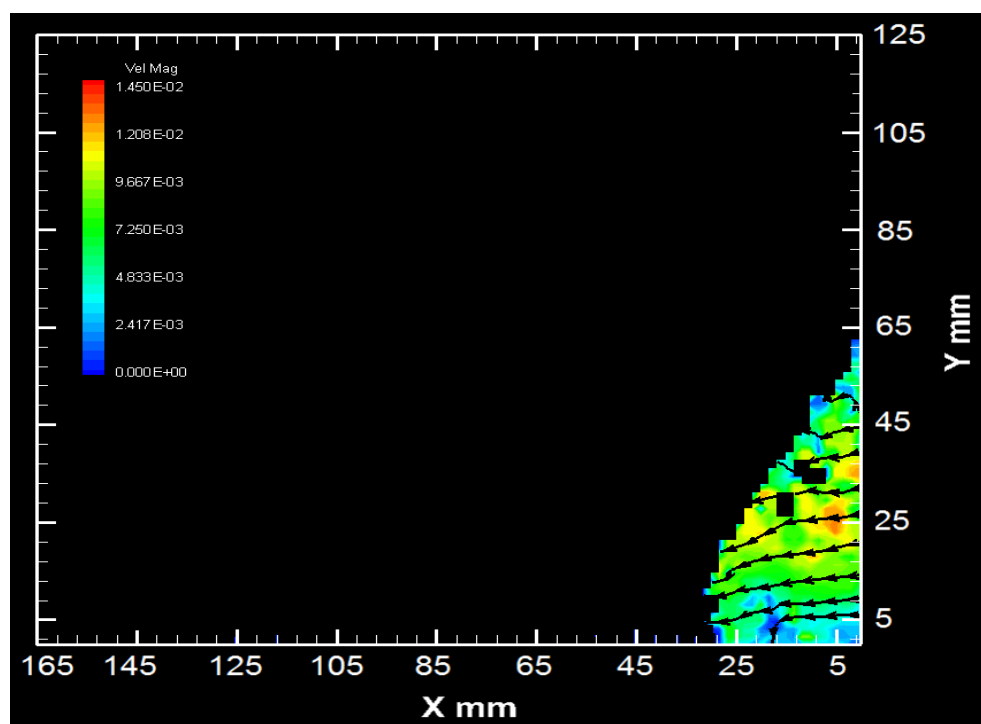


Figura 4.37 - Perfil de velocidade para o teste com fluido newtoniano. 3,6 segundos após abertura da comporta.

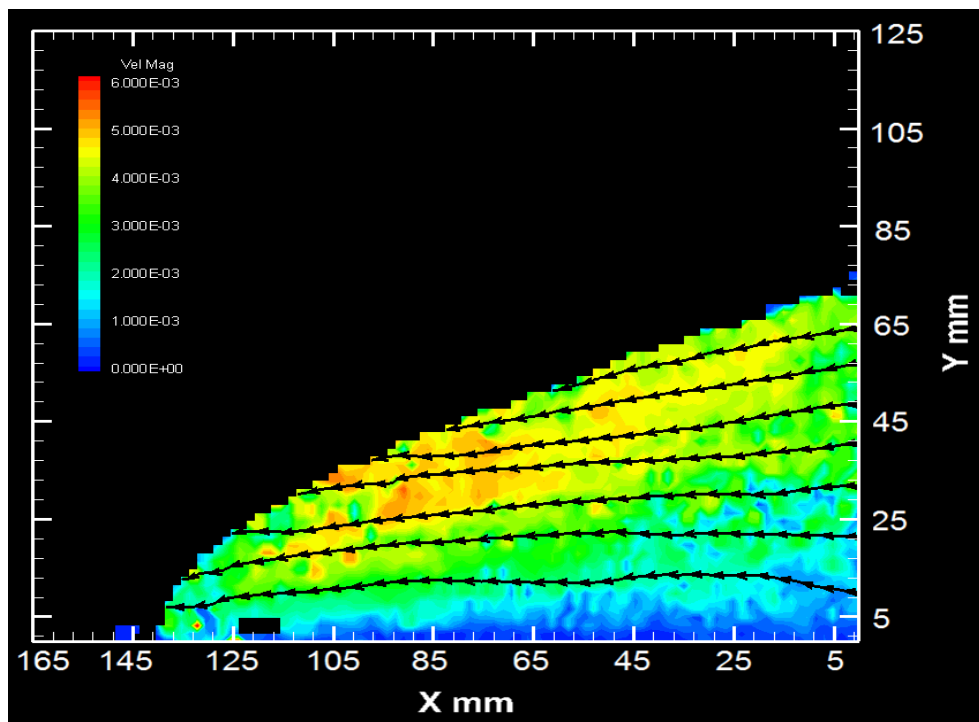


Figura 4.38 - Perfil de velocidade para o teste com fluido newtoniano. 28,4 segundos após abertura da comporta.

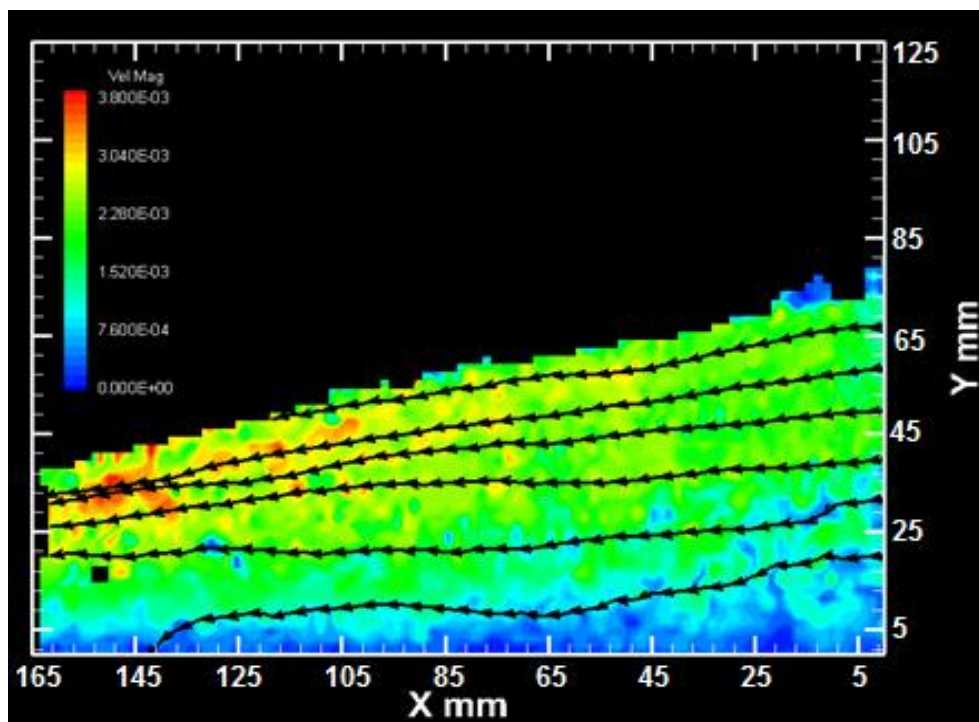


Figura 4.39 - Perfil de velocidade para o teste com fluido newtoniano. 68,4 segundos após abertura da comporta.

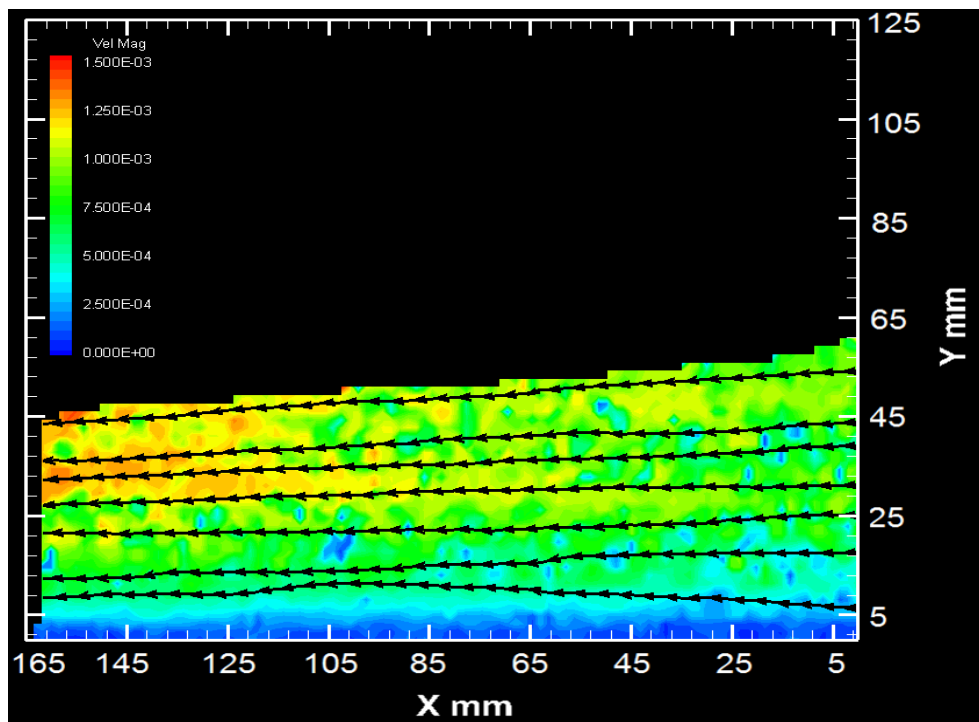


Figura 4.40 - Perfil de velocidade para o teste com fluido newtoniano. 208 segundos após abertura da comporta.

Para o fluido newtoniano com alta viscosidade, é possível observar um gradiente de velocidade mais uniforme desde o início do experimento onde as linhas de corrente se apresentam horizontalizadas em todo o tempo de teste analisado. É possível observar também que a região de maior velocidade no escoamento fica ainda mais distante da frente de onda do que analisado nos casos viscoplásticos. A interface próxima ao leito fica mais nítida apresentando decréscimo da velocidade para valores próximos de zero em todos os intervalos de tempo observados.

A Figura 4.41 representa o perfil de velocidade para uma coordenada fixa a 68,4 segundos após a abertura da comporta, é possível observar que a velocidade obtida no caso newtoniano é maior que para o material viscoplástico. Nota-se que para o caso newtoniano o gradiente de velocidade é mais uniforme apresentando aumento de velocidade à medida que aumenta a coluna de fluido.

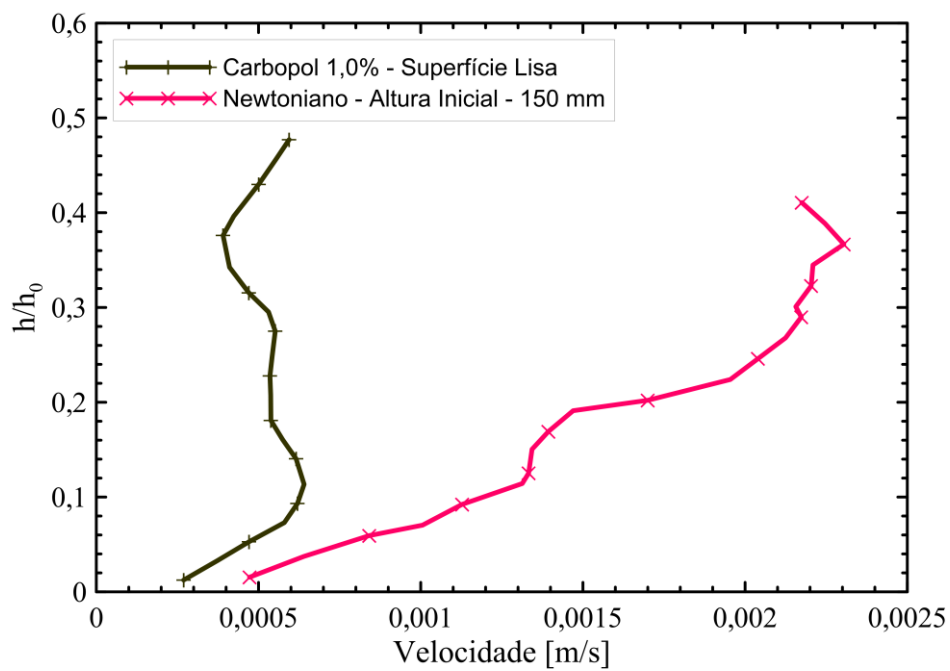


Figura 4.41 - Representação do perfil de velocidade para uma coordenada fixa. Posição $x=25$ mm.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estuda-se aqui o desempenho do escoamento para o caso de *Dam Break Flow* com uma solução de carbopol em concentrações variadas (material viscoplástico) e também fluidos newtonianos. A montagem experimental projetada em acrílico permite a visualização do escoamento em análises quantitativas e qualitativas do fenômeno físico. Para todos os escoamentos utilizando material viscoplástico, é analisada a influência da plasticidade no escoamento e também do número de Froude. Também foram observados os efeitos do deslizamento para os casos viscoplásticos, além do perfil de velocidade obtido através de Velocimetria por Imagem de Partícula (PIV).

No que diz respeito à plasticidade, foi observado que a diminuição da tensão limite de escoamento acarreta um aumento na distância percorrida pelo material. Portanto, quanto maior a plasticidade do fluido, menor a velocidade obtida pelo escoamento. A plasticidade está ligada ainda com as instabilidades observadas na superfície do fluido, como por exemplo falhas verticais que provocam sua separação. A evidenciação destes resultados foi obtida através da repetibilidade dos testes, onde para uma mesma plasticidade, o tempo de parada e as irregularidades apresentavam comportamento semelhante.

Os resultados obtidos mostraram-se compatíveis com os resultados disponíveis na literatura, uma vez que o comportamento do material viscoplástico aqui apresentado foi semelhante aos apresentados por Ancey e Cochard (2008)

Após análise inicial, foi utilizado o xarope de glucose de milho como fluido newtoniano. A comparação entre os materiais mostrou que o fluido viscoplástico

apresenta maiores velocidades iniciais. Porém, as mesmas reduzem até que o movimento do material é interrompido quando ocorre um equilíbrio entre a força gravitacional e a tensão limite de escoamento. Já para o caso newtoniano, a velocidade descrece até atingir uma velocidade constante e o fluido percorrer toda região de escoamento.

Foi observado deslizamento do material viscoplástico que ficou evidente quando testes com leito liso foram comparados com o leito rugoso. Para o caso mais plástico analisado, a diferença entre os dois leitos, no que diz respeito à distância deslocada, foi de 60%.

Com o PIV, observou-se que para os casos viscoplásticos, no momento inicial o componente vertical da velocidade é mais significativo. Para o caso newtoniano, o gradiente de velocidade ficou distribuído de forma mais uniforme. Conforme observado por Lauber e Willi (1998), a velocidade de frente de onda é um pouco menor do que a velocidade máxima obtida pelo escoamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Aleixo, R., Soares-Frazaó, S., Zech, Y., Experimental Analysis of a Dam-Break Flow. 5.as Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, 2010.
- [2] Ancey, C., Balmforth, N. and Frigaard, I., Visco-plastic fluids: from Theory to Application, *J. Non-Newton. Fluid Mech.*, Vol. 142, pp. 1-3, 2007.
- [3] Ancey, C. and Cochard, S., The dam-break problem for Herschel–Bulkley viscoplastic fluids down steep flumes, *J. Non-Newton. Fluid Mech.*, Vol. 158, pp. 18-35, 2009.
- [4] AZAM, S., LI, Q. Tailings dam failures: a review of the last one hundred years. *Geotechnical News*, v. 28, n. 4, p. 50-54, 2010.
- [5] Balmforth, N.J., Craster, R.V., Perona, P., Rust, A.C. and Sassi, R., “Viscoplastic dam breaks and the Bostwick consistometer”, *J. Non-Newton. Fluid Mech.*, Vol. 142, pp. 63-78, 2006.
- [6] Bell, S.W., Elliot, R.C., Chaudhry, M.H., Experimental results of two dimensional dam-break flows. *J. Hydraul. Res.* 30 (2), 225–252, 1992.
- [7] Bellos, C.V., Soulis, J.V., Sakkas, J.G., Experimental investigation of twodimensional dam-break induced flows. *J. Hydraul. Res.* 30 (1), 47–63, 1992.
- [8] Bingham, E. C, Fluidity and Plasticity. *McGraw-Hill Book Company*, New York, 1922.
- [9] Bird, R. B, Armstrong, R. C., Hassager, O., Dynamics of polymeric liquids, Vol. 1, *Fluid Dynamics*. John Wiley and Sons, New York, pp. 649, 1987.
- [10] CBDB – COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens. Rio de Janeiro: CBDB, 2011.

- [11] Chanson, H., Coussot, P., Jarny, S., and Toquer, L., A Study of Dam Break Wave of Thixotropic Fluid: Bentonite Surges down an Inclined plane. Report No. CH54/04, Dept. of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia, June (ISBN 1864997710), 2004.
- [12] Cochard, S., and Ancey, C., Experimental investigation of the spreading of viscoplastic fluids on inclined planes, *J. Non-Newton. Fluid Mech.*, Vol. 158, pp. 73-84, 2009.
- [13] Debiante, K., “Hydraulics of lâminar free surface flow in channel for viscous or Viscoplastic models: uniform regime, gradually varied flow, and dam break problem”, Ph.D. Thesis, University of Joseph Fourier-Grenoble I, Grenoble, France, 275 p, 2000.
- [14] Dressler, R.F., Comparison of theories and experiments for the hydraulic dam break wave. *Assoc. Sci. Hydrol.* Rome 38, 319–328, 1954.
- [15] Fraccarollo, L., Capart, H., Riemann wave description of erosional dam-break flows. *J. Fluid Mech.* 461, 183–228, 2002.
- [16] Fox, R. W., Pritchard, P. J., McDonald, A. T., **Introdução à mecânica dos fluidos**, Guanabara Koogan, 7 ed. Rio de Janeiro, 2010. Tradução: Ricardo N. N. Kouty e Luiz Machado, *Introduction to Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons.
- [17] Matson, G.P., Hogg, A.J., Two-dimensional dam break flows of HerschelBulkley fluids: The approach to the arrested state, *J. Non-Newton. Fluid Mech.*, 142, 79–94, 2007.
- [18] Huang, X., García, M.H., “A Herschel-Bulkley model for mud flow down a slope”, *J. Fluid Mech.*, Vol. 374, pp. 305-333, 1998.
- [19] ICOLD. Tailings Dams – Risk of Dangerous Occurrences, Lessons Learnt from Practical Experiences, Bulletin 121. *Published by International Commission on Large Dams*, Paris, France, 2001, 146 p.
- [20] Kocaman, S., Ozmen-Cagatay, H., The effect of lateral channel contraction on dam break flows: Laboratory experiment, *Journal of Hydrology*, 432–433, 145–153, 2012.

- [21] Krone, R. B., A study of rheologic properties of estuarial sediments. Ser. Rep. 63–8. Hydraul. Engng. Lab. and Sanitary Res. Lab., Univ. of Calif., Berkeley, 1963.
- [22] Lauber, G., Willi H. H., Experiments to dambreak wave: Horizontal channel, *Journal of Hydraulic Research*, 36:3, 291-307, 1998.
- [23] Miller, S., Chaudhry, M.H., Dam-break flows in curved channel. *J. Hydraul. Eng.* – ASCE 115 (11), 1465–1478, 1989.
- [24] Minussi, R. B., Maciel, G. F., Numerical Experimental Comparison of Dam Break Flows with non-Newtonian Fluids, ABCM, Vol. XXXIV, No. 2, April-June, 2012.
- [25] Miranda, M. A. C., Utilização de Velocimetria por Imagem de Partícula na Visualização e Caracterização de Escoamento Bifásico. UFSC, Florianópolis - SC. (dissertação de mestrado), 2004
- [26] Soares-Frazaio, S., Zech, Y., Experimental study of dam-break flow against an isolated obstacle. *J. Hydraul. Res.*, 45, 27–36, 2007. (Extra issue).
- [27] Souza Mendes, P. R., Dutra, E. S. S., A viscosity function for viscoplastic liquids. *Annual Transactions of the Nordic Rheology Society*, 12, 2004.
- [28] Thompson, R. L., Soares, E. J., Viscoplastic dimensionless numbers. *J. Non-Newton. Fluid Mech.*, pages 57-64, 2016.
- [29] Ritter, A., Die Fortpflanzung der Wasserwellen. Zeitschrift Verein Deutscher Ingenieure, Vol. 36, No. 2, 33, 13 Aug., pp. 947-954, 1892. (em Alemão).
- [30] Stansby, P.K., Chegini, A., Barnes, T.C.D., The initial stages of dam-break flow. *J. Fluid Mech.* 374, 407–424, 1998.
- [31] Soares-Frazaio, S., Zech, Y., Experimental study of dam-break flow against an isolated obstacle. *J. Hydraul. Res.* 45, 27–36, 2007.
- [32] Papanastasiou, T. C., Flows of materials with yield. *Journal of Rheology*, 31(5), 1987.
- [33] Wan, Z, Bed material movement in hyperconcentrated flow. Ser. Pap. 31. *Inst. of Hydrodyn. and Hydraul. Engng.* Tech. Univ. of Denmark, Lyngby, 1982.