

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO
AMBIENTAL

LÉLIS ESPARTEL

**ANÁLISE HIDRODINÂMICA DA ONDA GERADA ATRAVÉS DA
RUPTURA INSTANTÂNEA DE UMA BARRAGEM**

Porto Alegre
junho de 2019

LÉLIS ESPARTEL

**ANÁLISE HIDRODINÂMICA DA ONDA GERADA ATRAVÉS DA
RUPTURA INSTANTÂNEA DE UMA BARRAGEM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Manica

Porto Alegre
junho de 2019

Espartel, Lélis

Análise hidrodinâmica da onda gerada através da ruptura instantânea de uma barragem / Lélis Espartel. -- 2019.

188 f.

Orientador: Rafael Manica.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Ruptura de barragem. 2. Hidrodinâmica.
3. Modelagem física. 4. Onda de ruptura. I. Manica, Rafael, orient. II. Título.

LÉLIS ESPARTEL

ANÁLISE HIDRODINÂMICA DA ONDA GERADA ATRAVÉS DA
RUPTURA INSTANTÂNEA DE UMA BARRAGEM

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a
obtenção do título de Mestre.

Aprovado em: Porto Alegre, 14 de junho de 2019.

Prof. Dr. Rafael Manica – IPH/UFRGS

Orientador

Prof. Dr. Aloysio Portugal Maia Saliba – DEHRH/UFGM

Examinador

Prof^a. Dr^a. Ana Luiza de Oliveira Borges – IPH/UFRGS

Examinadora

Prof. Dr. Eder Daniel Teixeira – IPH/UFRGS

Examinador

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, com incentivo financeiro do CNPq. É uma conquista que compartilho com pessoas as quais sou imensamente grato.

Rafael Manica, orientador dessa dissertação e meu professor preferido desde a época de Mecânica dos Fluidos, a quem devo todo o meu aprendizado no ramo de hidráulica e agradeço por mais uma etapa concluída.

A toda equipe do Neced (Núcleo de Estudos de Corrente de Densidade), que abraçou esse trabalho com leveza e competência. Cristian, o melhor gerador de ondas de ruptura e solucionador de problemas que eu já conheci. Felipe, que me ensinou como transformar placas de acrílico em um canal de verdade e Marcelo, que colocou o canal nos trilhos quando nem eu mesmo acreditava.

Aos amigos que converso diariamente, Nanda, Álvaro e Reginara, que tanto me escutam e aconselham. Mal sabem que seus melhores conselhos são suas próprias atitudes, as quais muito admiro.

Kleide, àquela que mantém minha mente sã, escutando devaneios e convertendo-os em novas perspectivas. Ela foi peça essencial para eu entender a transformação que escrever uma dissertação me causou.

À minha família, Fábiana, Filipe, Glória e Flávio, exemplos que sigo e base que forjou quem eu sou. Me sinto uma pessoa privilegiada por ter esses exemplos tão perto e saber que posso contar com eles eternamente.

E à Brenda, fonte de inspiração para eu conseguir traçar e alcançar todos os objetivos da minha vida, inclusive essa dissertação que ela tanto leu e releu, enchendo meu coração de felicidade por ter feito a escolha certa.

RESUMO

O rompimento de uma barragem é uma das maiores catástrofes geradas pela humanidade e esses eventos, infelizmente, são registrados desde o século XIX até os dias de hoje. Na busca por aumentar a compreensão do que acontece com a onda de translação gerada instantaneamente após a ruptura de uma barragem, a presente dissertação se propôs a avaliar esse fenômeno hidráulico e, posteriormente, comparar os resultados encontrados com soluções analíticas da literatura. A ruptura da barragem foi feita através de um modelo simplificado: em um canal retangular de acrílico, com dimensões de 6,00 x 0,49 x 0,24 metros, foi instalada uma placa de aço que reproduziu o barramento de um curso de água. Quando retirada abruptamente simula o rompimento instantâneo de uma barragem. As informações da onda de ruptura foram colhidas através de vídeos registrados por uma câmera de alta velocidade, que capta 240 quadros por segundo, e por um medidor de velocidades por ultrassom. A metodologia desenvolvida neste trabalho experimental reduziu o tempo de ruptura da barragem na simulação física. Através das imagens coletadas, os resultados mostraram que em função da razão entre os níveis iniciais de água a montante e a jusante da barragem (R_N), o formato da onda pode ser: jato horizontal, sem arrebentação da onda para $R_N = \infty$. Esse jato se desenvolveu com um formato mais alto na sua frente, chamado de cabeça da onda, que é mais espesso quanto maior for o nível a montante; jato de transição, com quebra ascendente da onda para $R_N < 5$. Essa quebra é caracterizada por uma dissipação de energia mais lenta, ocorrendo uma elevação de nível seguida de uma desestabilização da onda; e jato cogumelo com quebra tubular para $R_N > 5$, no qual foram identificadas quatro etapas de desenvolvimento: (i) alteamento de nível de jusante a montante, (ii) acúmulo de água, (iii) projeção para frente e (iv) quebra impactando a lâmina de água a jusante. Em uma análise mais detalhada do momento da quebra da onda, verificou-se que a altura máxima atingida pela onda tubular, no ato da quebra, equivale a 20% da distância percorrida, enquanto o ponto em que ocorre a altura máxima está situado a 80% da distância percorrida pela onda até a sua quebra. Os resultados apresentaram uma tendência em que a velocidade da onda cresce de forma proporcional ao aumento do nível de montante e inversamente proporcional ao aumento do nível de jusante, esse último, atuando como um obstáculo que retarda o desenvolvimento da onda de ruptura. Os hidrogramas da onda de ruptura identificaram que os picos de altura da onda ocorrem nas seções de 30 e 40 centímetros de distância do barramento e amortecem entre 30% e 70% do nível de água a montante. Comparando os resultados com equações analíticas, constatou-se que as ondas oriundas das equações excediam a distância percorrida pela onda experimental em uma faixa de 15% a 40%. Foi proposta uma correção na equação teórica, de modo a obter valores mais próximos dos identificados nos experimentos. Espera-se com os resultados desta pesquisa contribuir para o aumento da massa crítica acerca desse fenômeno que, particularmente no Brasil, está em evidência nos últimos anos.

Palavras-chave: Ruptura instantânea de barragem. Ondas de translação. Comportamento hidrodinâmico. Modelagem física.

ABSTRACT

A dam break is one of the greatest catastrophes generated by mankind, and these events, unfortunately, occur since the nineteenth century until nowadays. To better understanding the behavior of the translatory wave generated by a dam break, this work proposes an evaluation of this hydraulic phenomenon and comparison of the results with analytical solutions from literature. The dam break is simulated by a simplified model: in a rectangular acrylic's channel with dimensions of 6.00 x 0.49 x 0.24 meters, a steel plate is placed in order to replicates the dam of a water course. To simulate the instantaneous dam break, the plate is abruptly withdrawn. The generated wave information are then collected by means of a high-speed camera, which capture 240 frames per second, and by an ultrasonic velocity gauge. The methodology developed in this experimental work reduced the time of the dam break in the physical simulation. Through the images collected, the results showed that, according to the ratio between the initial water levels upstream and downstream of the dam (RN), the waveform can be: horizontal jet, without wave break, for $RN = \infty$. This jet developed with a thicker shape in front of it, called the wave head, which is larger the higher is the upstream level; transition jet, with spilling wave breaking for $RN < 5$. This type of break is characterized by a slower energy dissipation, and a level elevation followed by wave destabilization; and mushroom jet with plunging break for $RN > 5$, in which four development stages were identified: (i) rise of level from downstream to upstream, (ii) water accumulation, (iii) forward projection and (iv) break impacting on the downstream water slide. In a more detailed analysis of the wave breaking moment it was verified that the maximum height reached by the plunging wave at the moment of the break, is equivalent to 20% of the distance covered by the same. While the point at which the maximum height occurs, is located at 80% of the distance traveled by the wave until it breaks. The results showed a trend in which the wave velocity increases proportionally to the increase of the upstream level and inversely proportional to the increase of the downstream level, which acts as an obstacle delaying the development of the rupture wave. The rupture wave hydrographs identified that the wave height peaks occur in the 30 and 40 centimeter distance section of the dam and diminish between 30% and 70% of the upstream level. By comparing the results with analytical solutions proposed in the literature, it was found that the waves calculated by the equations exceeded the distance traveled by the experimental wave in a range of 15% to 40%. Therefore, a correction in the theoretical model is proposed, in order to obtain values closer to the experimental results. With this work results, it is expected to contribute on the understanding of this phenomenon, which has been gaining importance in the recent years, especially in Brazil.

Keywords: Instantaneous Dam Break. Translatory Waves. Hydrodynamic Behavior. Physical Modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Quantidade de barragens inauguradas até o ano de 1999.	19
Figura 2 – Tipos de barragens: (a) barragem de terra ou enrocamento; (b) barragem por gravidade; (c) barragem por contrafortes e (d) barragem em arco.	24
Figura 3 – Situação antes (a) e depois (b) do rompimento da barragem em Brumadinho-MG.	30
Figura 4 – Componentes básicos da onda.	33
Figura 5 – Frente de onda e raio de onda: (a) propagação em duas dimensões de uma onda qualquer; (b) propagação de uma onda de ruptura, confinada em um canal.	34
Figura 6 – Ondas positiva e negativa em uma onda de translação.	36
Figura 7 – Tipos de jatos e quebras observadas em uma onda de ruptura.	37
Figura 8 – Solução da onda de translação através do método das características.	40
Figura 9 – Desenho esquemático de onda de ruptura teórica.	41
Figura 10 – Adimensional proposto por Chanson (2006).	44
Figura 11 – Croqui de um canal retangular com diferentes níveis de água entre um barramento.	45
Figura 12 – Contornos de pressão dentro do fluido no momento da liberação e vetores de aceleração na superfície, com o comprimento da seta proporcional à magnitude. A ordem de grandeza da profundidade é de 0,1 metro.	47
Figura 13 – Formato de onda registrado por Espartel (2015), para canal seco com nível de 15 centímetros a montante.	49
Figura 14 – Análise do tempo de abertura da placa, realizado por Espartel (2015).	50
Figura 15 – Gráfico com dados experimentais e analíticos a respeito do desenvolvimento da frente de onda, realizado por Stansby et al. (1998).	51
Figura 16 – Gráfico com dados analíticos (quadrados dispersos) e experimentais (linha contínua) a respeito do desenvolvimento da frente de onda e comparação com imagem.	52
Figura 17 – Canal de acrílico, medidas referentes a um módulo de 2 metros.	56
Figura 18 – Detalhe do acoplamento entre os módulos que formam o canal de acrílico.	56
Figura 19 – Fim do canal de acrílico com placa de altura variada aparafusada e vedação em borracha.	57
Figura 20 – Escalas colocadas nos eixos X e Y do canal.	58
Figura 21 – Placa metálica que funciona como barramento do canal.	58
Figura 22 – Distanciamento entre o início do canal e a placa metálica, formando o reservatório de montante.	59
Figura 23 – Croqui do sistema de retirada da placa, simulando a ruptura da barragem.	60
Figura 24 – Instalação do UVP, altura de cada sonda e distância da placa metálica.	63

Figura 25 – Croqui com posicionamento dos aparatos experimentais (onda de ruptura ocorre da direita para a esquerda).....	64
Figura 26 – Registros da metodologia do ensaio.....	66
Figura 27 – Determinação do início do movimento da onda de ruptura.	73
Figura 28 – Exemplo de representação das velocidades e acelerações da onda de ruptura.	75
Figura 29 – Exemplo de identificação da linha d'água da onda de ruptura utilizando o aplicativo <i>Plot Digitizer</i>	76
Figura 30 – Ilustração das seções e método de cálculo em que serão realizados os hidrogramas.	78
Figura 31 – Área considerada para a medição do UVP.....	79
Figura 32 – Análise do tempo de abertura da placa metálica para diferentes configurações...	82
Figura 33 – Imagem ilustrativa das ondas de ruptura geradas através dos ensaios experimentais.....	85
Figura 34 – Desenvolvimento geométrico da onda B2-M10-J0 (legenda em segundos).....	87
Figura 35 – Desenvolvimento geométrico da onda B2-M10-J2 (legenda em segundos).....	88
Figura 36 – Desenvolvimento geométrico da onda B2-M10-J4 (legenda em segundos).....	90
Figura 37 – Desenvolvimento geométrico da onda B2-M20-J0 (legenda em segundos).....	92
Figura 38 – Desenvolvimento geométrico da onda B2-M20-J2 (legenda em segundos).....	94
Figura 39 – Desenvolvimento geométrico da onda B2-M20-J4 (legenda em segundos).....	96
Figura 40 – Desenvolvimento geométrico da onda B2-M20-J8 (legenda em segundos).....	98
Figura 41 – Desenvolvimento geométrico da onda B2-M40-J0 (legenda em segundos).....	100
Figura 42 – Desenvolvimento geométrico da onda B2-M40-J2 (legenda em segundos).....	102
Figura 43 – Desenvolvimento geométrico da onda B2-M40-J4 (legenda em segundos).....	104
Figura 44 – Desenvolvimento geométrico da onda B2-M40-J8 (legenda em segundos).....	106
Figura 45 – Desenvolvimento da velocidade nos experimentos com o canal seco a jusante.	108
Figura 46 – Aceleração desenvolvida pela frente de onda em relação à distância percorrida.	110
Figura 47 – Velocidade da frente de onda com 10 centímetros de nível a montante e 0, 2 e 4 centímetros a jusante.	111
Figura 48 – Velocidade da frente de onda com 20 centímetros de nível a montante e 0, 2, 4 e 8 centímetros a jusante.	112
Figura 49 – Velocidade da frente de onda com 40 centímetros de nível a montante e 0, 2, 4 e 8 centímetros a jusante.	114
Figura 50 – Gráfico da velocidade média por trecho da frente de onda pela diferença entre nível d'água a montante e nível d'água a jusante.....	116
Figura 51 – Variáveis importantes no momento de quebra da onda.	119
Figura 52 – Relação entre distância percorrida pela onda e o tempo em que ocorre a quebra.	120

Figura 53 – Diferença de altura entre os níveis a montante e jusante da placa metálica, relacionada com a velocidade da frente de onda.	121
Figura 54 – Relação entre a altura máxima ($H_{MÁX}$) e a distância percorrida pela onda no momento da quebra (X_{QUEBRA}).....	122
Figura 55 – Relação entre a distância horizontal ($X_{Hmáx}$) em que ocorre a altura máxima e a distância total (X_{QUEBRA}) percorrida pela onda no momento da quebra.	122
Figura 56 – Medidas padrões da onda de ruptura com quebra tubular, no momento da quebra.	123
Figura 57 – Comprimento da onda de ruptura no momento da quebra, em função da altura de montante pré-ruptura.	124
Figura 58 – Relação entre a taxa de variação do aumento da distância percorrida pela onda até o momento da quebra e o nível de jusante.	125
Figura 59 – Distância percorrida pela onda até a arrebentação, em função do produto das alturas de montante e jusante da placa (os dados estão rotulados com seus respectivos valores de R_N).....	126
Figura 60 – Análise adimensional da altura máxima relativa aos níveis de água a montante e jusante do barramento pré ruptura.	128
Figura 61 – Distância percorrida pela onda em função do tempo, resultados analíticos e experimentais para as seguintes M05-J0.	130
Figura 62 – Distância percorrida pela onda em função do tempo, resultados analíticos e experimentais para as seguintes M10-J0.	131
Figura 63 – Distância percorrida pela onda em função do tempo, resultados analíticos e experimentais para as seguintes M20-J0.	131
Figura 64 – Distância percorrida pela onda em função do tempo, resultados analíticos e experimentais para as seguintes M40-J0.	132
Figura 65 – Erro relativo da onda analítica em relação à onda experimental, calculado no momento em que a onda experimental alcançou o comprimento de 60 centímetros.	133
Figura 66 – Erros relativos na seção de 60 centímetros do desenvolvimento da onda em função de k_S	134
Figura 67 – Fator de correção F por níveis de montante.	135
Figura 68 – Distância percorrida pela onda em função do tempo: resultados experimentais e analíticos corrigidos para onda M05-J0.	136
Figura 69 – Distância percorrida pela onda em função do tempo: resultados experimentais e analíticos corrigidos para onda M10-J0.	136
Figura 70 – Distância percorrida pela onda em função do tempo: resultados experimentais e analíticos corrigidos para onda M20-J0.	137
Figura 71 – Distância percorrida pela onda em função do tempo: resultados experimentais e analíticos corrigidos para onda M40-J0.	137
Figura 72 – Comparação entre o formato geométrico oriundo das equações analíticas com o experimental, para M05-J0.	138

Figura 73 – Comparação entre o formato geométrico oriundo das equações analíticas com o experimental, para M10-J0.....	138
Figura 74 – Comparação entre o formato geométrico oriundo das equações analíticas com o experimental, para M20-J0.....	139
Figura 75 – Comparação entre o formato geométrico oriundo das equações analíticas com o experimental, para M40-J0.....	139
Figura 76 – Formato geométrico da onda experimental, analítica e analítica corrigida. (a) M05-J0; (b) M20-J0; (c) M10-J0 e (d) M40-J0.	140
Figura 77 – Dados adimensionais propostos por Chanson (2006) aplicados nos ensaios M05-J0.	141
Figura 78 – Dados adimensionais propostos por Chanson (2006) aplicados nos ensaios M10-J0.	141
Figura 79 – Dados adimensionais propostos por Chanson (2006) aplicados nos ensaios M20-J0.	142
Figura 80 – Dados adimensionais de Chanson para os ensaios M40-J0.	142
Figura 81 – Comparação entre os adimensionais analíticos e analíticos corrigidos.	143
Figura 82 – Números adimensionais oriundos dos dados analíticos corrigidos em comparação com demais resultados expostos por Chanson (2006).....	144
Figura 83 – Hidrograma de nível de 8 seções da onda gerada com nível inicial a montante de 10 centímetros. (a) M10-J0; (b) M10-J2 e (c) M10-J4.....	145
Figura 84 – Hidrograma de nível de 8 seções da onda gerada com nível inicial a montante de 20 centímetros. (a) M20-J0; (b) M20-J2; (c) M20-J4 e (d) M20-J8.	146
Figura 85 – Hidrograma de nível de 8 seções da onda gerada com nível inicial a montante de 40 centímetros. (a) M40-J0; (b) M40-J2; (c) M40-J4 e (d) M40-J8.	147
Figura 86 – Hidrograma de nível apenas das seções 30 e 40 centímetros.....	149
Figura 87 – Altura máxima atingida pelas ondas de todos os ensaios, nas seções 30 e 40 centímetros.	151
Figura 88 – Relação da altura máxima atingida pela onda em função da altura do nível de água no barramento.	152
Figura 89 – Amortecimento em função do R_N	152
Figura 90 – Velocidade registrada pelo UVP.....	154
Figura 91 – Influência da instalação do UVP no formato das ondas M10.....	158
Figura 92 – Influência da instalação do UVP no formato das ondas M20.....	158
Figura 93 – Influência da instalação do UVP no formato das ondas M40.....	158
Figura 94 – Erro relativo da formação de onda da terceira série de ensaios em comparação com a segunda série de ensaios.	159
Figura 95 – Código que compõe o pixel.....	174
Figura 96 – Imagem em preto e branco da onda de ruptura analisada.	176
Figura 97 – Imagem em preto e branco com aplicação de filtro para remoção de ruídos.....	176

Figura 98 – Formato geométrico identificado pelo Matlab, M10-J0.	178
Figura 99 – Formato geométrico identificado pelo Matlab, M10-J4.	179
Figura 100 – Formato geométrico identificado pelo Matlab, M20-J0.	180
Figura 101 – Formato geométrico identificado pelo Matlab, M20-J4.	181
Figura 102 – Formato geométrico identificado pelo Matlab, M20-J8.	182
Figura 103 – Formato geométrico identificado pelo Matlab, M40-J0.	183
Figura 104 – Formato geométrico identificado pelo Matlab, M40-J4.	184
Figura 105 – Formato geométrico identificado pelo Matlab, M40-J8.	185

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais eventos de rompimento de barragem ocorridos no Brasil.	31
Tabela 2 – Principais eventos de rompimento de barragem ocorridos no Brasil (continuação).	32
Tabela 3 – Equações que descrevem a altura d da onda em função da localização X e do tempo t	43
Tabela 4 – Configurações da câmera <i>Ipad</i>	61
Tabela 5 – Plano da primeira série de ensaios: velocidade de abertura.	68
Tabela 6 – Plano da segunda série de ensaios: onda de ruptura livre. Total de 38 ensaios.	70
Tabela 7 – Plano da terceira série de ensaios: onda de ruptura com o UVP. Total de 27 ensaios.	71
Tabela 8 – Plano da quarta série de ensaios: complemento para comparação com equação teórica. Total de 3 ensaios.	72
Tabela 9 – Exemplo do método de cálculo da velocidade da onda, tanto para velocidade média quanto para velocidade por trecho.	75
Tabela 10 – Forma do jato e formato de quebra para cada onda, em função de R_N	84
Tabela 11 – Desvio padrão, em metros por segundo, dos ensaios de desenvolvimento de velocidade, entre parênteses está o coeficiente de variação.	115
Tabela 12 – Valores médios do comprimento da onda de ruptura no momento da quebra para as 6 configurações de ensaio com $R_N > 5$, caracterizando quebras tubulares de onda.	125
Tabela 13 – Cálculo do fator de correção F	134

LISTA DE SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas

CIGB – Comissão Internacional de Grandes Barragens

ICOLD – International Commission on Large Dams¹

IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas

NECOD – Núcleo de Estudos de Corrente de Densidade

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UVP – Ultrasonic Velocity Profiler (Perfilador de Velocidade Ultrassônica)

¹ CIGB e ICOLD são a mesma instituição, denominadas de acordo com o idioma da publicação citada.

LISTA DE SÍMBOLOS

- ΔH – altura da lâmina da água no canal (m)
 ΔX – comprimento longitudinal do volume de controle (m)
 A – área molhada da seção do canal (m²)
 B – largura do canal (m)
 c – celeridade (m/s)
 C – constante que depende do material no qual o líquido escoar (-)
 $C1$ – curva positiva do método das características
 $C2$ – curva negativa do método das características
 dH/dx – energia total do sistema (m)
 dt – variação no tempo (s)
 dx – variação no espaço no eixo horizontal (m)
 g – aceleração da gravidade (m/s²)
 G – constante adimensional das equações de Chanson (-)
 J – altura do nível de água a jusante do barramento (m)
 M – altura do nível de água a montante do barramento (m)
 P – perímetro molhado (m)
 Q – vazão (m³/s)
 R – raio hidráulico (m)
 S_f – declividade da linha de energia do escoamento (m/m)
 t – tempo (s)
 U – velocidade da onda aproximada pelas equações de Chanson (m/s)
 v – velocidade do escoamento (m/s)
 X – posição da onda no canal (m)
 X_1 – início da região de ponta da onda de ruptura (m)
 X_2 – intersecção entre o fim da onda negativa e a massa líquida ainda não afetada pela ruptura (m)
 X_s – fim da região de ponta da onda de ruptura (m)
 γ – peso específico (N/m³)
 ρ – massa específica (kg/m³)
 τ_0 – tensão de cisalhamento (N/m²)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	JUSTIFICATIVA.....	19
3	DIRETRIZES DA PESQUISA	22
3.1	QUESTÃO DE PESQUISA.....	22
3.2	OBJETIVOS.....	22
3.2.1	Objetivo principal.....	22
3.2.2	Objetivos secundários.....	22
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
4.1	BARRAGENS E SUAS CLASSIFICAÇÕES	23
4.2	ROMPIMENTO DE BARRAGEM: CAUSAS E EFEITOS	25
4.3	PERSPECTIVA HISTÓRICA DE ROMPIMENTOS.....	27
4.4	ONDA DE RUPTURA	33
4.4.1	Componentes básicos de uma onda.....	33
4.4.2	Ondas de translação.....	35
4.4.3	Onda formada com o rompimento instantâneo de uma barragem.....	36
4.5	EMBASAMENTO TEÓRICO.....	38
4.5.1	Equações principais.....	38
4.5.2	Parâmetros geométricos e cinemáticos da onda de ruptura.....	41
4.6	MODELAGEM FÍSICA	44
4.6.1	Concepção da geometria do modelo	44
4.6.2	Arranjo do experimento.....	45
4.7	RESULTADOS ORIUNDOS DA MODELAGEM DE ONDAS DE RUPTURA ...	48
4.8	COLETA DE INFORMAÇÕES ATRAVÉS DA VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO.....	53
5	APARATO EXPERIMENTAL	55
5.1	CANAL DE ACRÍLICO	55
5.2	BARRAMENTO E ACIONAMENTO DE PLACA	58
5.3	REGISTRO DE IMAGEM E VÍDEO DA ONDA DE RUPTURA	61
5.4	MEDIDOR DE VELOCIDADE UVP (ULTRASONIC VELOCITY PROFILER) .	62
5.5	DEMAIS EQUIPAMENTOS.....	63
6	METODOLOGIA	64
6.1	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	64
6.2	PLANO DE ENSAIOS	67

6.2.1	Série 01: velocidade de retirada da placa	67
6.2.2	Série 02: ensaio de onda de ruptura livre	69
6.2.3	Série 03: onda de ruptura com medições do UVP.....	69
6.2.4	Série 04: complemento da série 2 para comparação com equação teórica	72
6.3	TRATAMENTO DE DADOS	72
6.3.1	Extração dos quadros do vídeo para arquivos digitais individuais	72
6.3.2	Determinação de início de movimento da onda de ruptura.....	73
6.3.3	Quantificação de tempo e da velocidade da onda de ruptura através das filmagens..	74
6.3.4	Tratamento de imagens via aplicativo <i>Plot Digitizer</i>	76
6.3.5	Identificação de hidrograma de nível	77
6.3.6	Dados de velocidade do UVP.....	79
7	RESULTADO DOS EXPERIMENTOS.....	81
7.1	AVALIAÇÃO DO TEMPO DE ABERTURA DA PLACA VERTICAL	81
7.2	ANÁLISE QUALITATIVA DO FENÔMENO HIDRÁULICO – RUPTURA DE BARRAGEM	83
7.2.1	Ondas com o canal seco a jusante	83
7.2.2	Ondas com lâmina de água a jusante.....	83
7.3	ANÁLISE QUANTITATIVA DO FENÔMENO HIDRÁULICO – DESENVOLVIMENTO INICIAL DA ONDA	86
7.3.1	Desenvolvimento geométrico da frente de onda	86
7.3.1.1	Ensaio B2-M10-J0	86
7.3.1.2	Ensaio B2-M10-J2	88
7.3.1.3	Ensaio B2-M10-J4	89
7.3.1.4	Ensaio B2-M10-J8	90
7.3.1.5	Ensaio B2-M20-J0	91
7.3.1.6	Ensaio B2-M20-J2	93
7.3.1.7	Ensaio B2-M20-J4	95
7.3.1.8	Ensaio B2-M20-J8	97
7.3.1.9	Ensaio B2-M40-J0	99
7.3.1.10	Ensaio B2-M40-J2	101
7.3.1.11	Ensaio B2-M40-J4	103
7.3.1.12	Ensaio B2-M40-J8	105
7.3.1.13	Síntese da análise geométrica da formação da onda	107
7.3.2	Análise cinemática	108
7.3.2.1	Desenvolvimento da onda de ruptura: instantes iniciais ao rompimento até 20 centímetros de distância.....	108

7.3.2.2	Desenvolvimento da onda de ruptura: trechos de 20 a 120 centímetros	111
7.3.2.3	Síntese da análise cinemática	117
7.4	MOMENTO DE QUEBRA DA ONDA	118
7.4.1	Velocidade média até a quebra da onda de ruptura.....	119
7.4.2	Correlações geométricas da onda de ruptura no momento da quebra.....	121
7.4.3	Síntese das análises relacionadas ao momento de quebra da onda de ruptura	129
7.5	COMPARAÇÃO COM EQUAÇÃO ANALÍTICA	129
7.5.1	Distância percorrida em função do tempo.....	129
7.5.2	Altura da onda em função de tempo e distância percorrida	138
7.5.3	Dados adimensionais	141
7.6	HIDROGRAMAS DE NÍVEL.....	144
7.6.1	Hidrogramas do desenvolvimento da onda até 60 centímetros	145
7.6.2	Análise de amortecimento nas seções 30 e 40 centímetros.....	148
7.6.3	Síntese da análise dos hidrogramas	153
7.7	RESULTADOS REGISTRADOS PELO UVP	154
7.7.1	Velocidade registrada na terceira série de experimentos	154
7.7.2	Interferência da instalação do UVP.....	157
8	CONCLUSÕES.....	160
	REFERÊNCIAS	164
	APÊNDICE A	169
	APÊNDICE B.....	172
	APÊNDICE C.....	174

1 INTRODUÇÃO

Barragens são definidas como estruturas hidráulicas cuja finalidade é represar líquidos, em geral água ou rejeitos². A importância da construção de barragens ao longo da história da humanidade é fato notório, tanto em termos de engenharia propriamente dita, quanto ao seu uso e aplicações para o bem-estar das pessoas. Atualmente, existem inúmeras barragens ao redor do mundo, exercendo atividades como: produção hidroelétrica, abastecimento de água, regulação de vazão de rios e proteção contra inundações, entre outros (ANCEY, 2014). Além dessas, também é válido destacar o significativo número de barragens que servem como reservatório para a irrigação de lavouras agrícolas.

A criação e utilização de barragens sempre visou beneficiar a sociedade, porém, na contramão dessas benfeitorias, além de impactos socioambientais gerados na sua construção, há a destruição causada quando essas barragens se rompem. Com o avanço de técnicas de projeto e execução, o risco de colapso dessas estruturas tem diminuído, entretanto, a existência de uma enorme quantidade de barragens colabora para o aumento da possibilidade de que ao menos uma delas falhe. O rompimento de uma única barragem já é uma catástrofe, por represar grandes volumes de água, o que significa elevados níveis de pressão hidrostática, esse rompimento acaba gerando uma onda de grande magnitude, com capacidade para devastar plantações, cidades, acabar com ecossistemas e potencial para causar a morte de centenas ou milhares de pessoas (ANCEY, 2014).

A existência de barragens é uma realidade imutável, no mundo existem mais de 58.000 grandes barragens, conforme dados do CIGB³ (Comissão Internacional de Grandes Barragens). No Brasil, segundo dados da Agência Nacional de Águas (ANA, 2018), existem 24.092 barragens cadastradas, considerando todos os tipos e tamanhos. Esforços para evitar falhas e

² Barragens de rejeitos são reservatórios destinados a resíduos sólidos misturados com água resultantes de processos de extração de minérios. O armazenamento desses rejeitos é necessário a fim de evitar danos ambientais causados por um descarte negligente. Esse tipo de barragem não faz parte do objeto de pesquisa desta dissertação.

³ A CIGB (Comissão Internacional de Grandes Barragens) é mais conhecida pela sua identificação em inglês, *ICOLD (International Commission on Large Dams)*. No site da CIGB é mantido atualizado o número de barragens dos países filiados à comissão. Em março de 2019, o levantamento totalizava 58.351 barragens. A informação está disponível em: <https://www.icold-cigb.org/article/GB/world_register/general_synthesis/number-of-dams-by-country-members> e foi acessado em 12 de março de 2019.

minorar impactos são um dever cívico que afetam diversas camadas da população, como políticas de manutenção e fiscalização de barragens existentes, conscientização para que não se fixem moradias em áreas de risco e produção acadêmica com aprofundamento de pesquisa em assuntos pertinentes à causa de mitigar desastres oriundos do rompimento de barragem.

Nesse contexto, o estudo do impacto da ruptura da barragem e a análise da onda de ruptura formada é importante para avaliar o potencial de risco de uma barragem. Existem duas situações independentes que devem ser levadas em consideração na avaliação do rompimento de uma barragem: suas causas e suas consequências. Acidentes com barragens implicam na liberação de grandes volumes de água e raramente o comportamento da onda de ruptura leva à uma correlação entre suas causas e seus efeitos de modo que seja possível generalizar todas situações de maneira consistente. Dessa forma, o planejamento e a implantação de novos empreendimentos necessitam englobar também a análise de seus impactos em caso de acidentes, independentemente de suas causas, como fator inerente ao risco. Isso significa que, durante o estudo de concepção desses empreendimentos, o cálculo do risco do empreendimento, como um todo, será afetado pela existência do conhecimento prévio dos impactos decorrentes de falhas diversas e da forma de tratá-las (UEMURA et al., 2007).

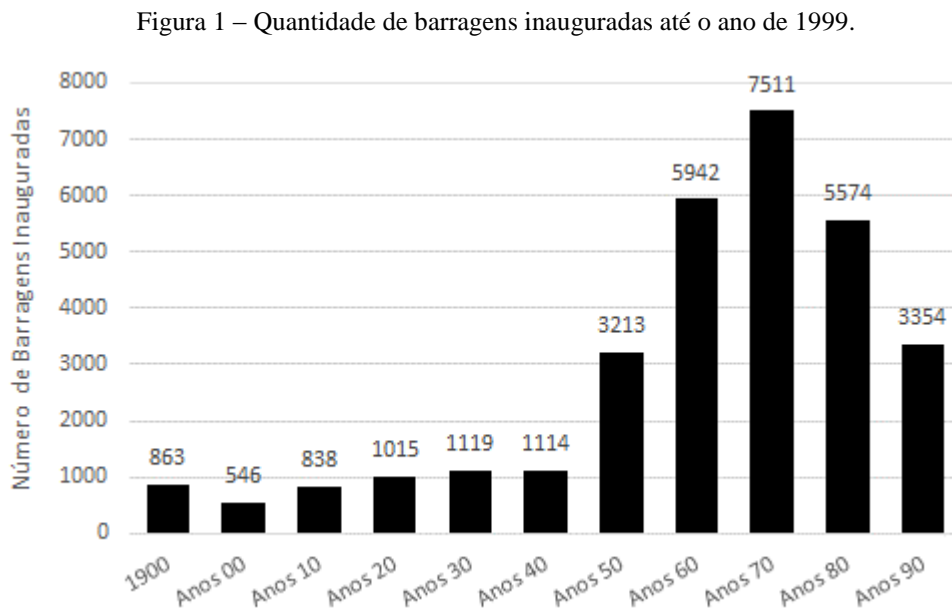
No âmbito brasileiro, em 2010, foi criada a Lei 12.334/2010 que rege a segurança das barragens e também expõe a necessidade de planos emergenciais para caso de ruptura. Nessa Lei se estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragem (PNSB) e o Sistema Nacional de Informações de Segurança de Barragem (SNISB). No que tange ao objeto desta pesquisa – onda de ruptura de barragem – os artigos 11 e 12 citam os Planos de Ação de Emergência (PAE) (BRASIL, 2010) e abordam classificação, risco e as ações a serem executadas em caso de situação de emergência, entretanto, não é definido um grau de detalhamento e escala que deve ser analisado. A Lei ainda é pouco profunda, já que simboliza que existe a possibilidade de ruptura de barragem, mas não indica as reais condições sob as quais esse problema deve ser resolvido. De fato, após a ruptura de barragem existem poucas medidas que possam ser tomadas a fim de diminuir a área inundada. Porém, ao se ter noção do que significará o impacto de um rompimento é possível estar previamente preparado, seja com infraestrutura, realocação de casas e planos de alerta eficientes, por exemplo.

Após as considerações sobre a onda de ruptura de barragem, suas causas e consequências, atenta-se para uma lacuna a ser pesquisada no que tange a aprofundar o

conhecimento sobre os fatores que regem esses escoamentos. Esta pesquisa buscará, a partir da modelagem física desse processo, colaborar no avanço desses estudos, com vista a aumentar o acervo técnico a respeito do assunto, caracterizando a onda de ruptura no estágio inicial, destacando quais os parâmetros mais importantes e como se correlacionam.

2 JUSTIFICATIVA

Entre a década de 60 e 80 houve o ápice da construção de barragens, acarretando nos dias atuais que a maioria dessas barragens tenha em torno de 40 a 60 anos, o que as coloca perto da classificação de mais alto risco, segundo a resolução nº 143 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos que estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo volume do reservatório (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2012). A Figura 1 apresenta o número de grandes barragens inauguradas por décadas, em levantamento realizado por Sória et al. (2008), através dos dados da CIGB.



Fonte: adaptado de Sória, 2008.

Além de boa parte das barragens possuírem mais de 40 anos, Sória (2018) aponta que o maior número de falhas ocorreu com barragens nos seus primeiros 10 anos de funcionamento, em especial no primeiro ano. Em relatório do CIGB (ICOLD, 1995) é citado que 38% das falhas ocorreram durante o primeiro enchimento do reservatório.

Relacionando esses dois fatos, chega-se ao seguinte extrato da situação atual das barragens: (i) a maioria das barragens foram inauguradas perto dos anos 70, possuindo mais de 40 anos e logo estarão enquadradas com o mais alto risco de rompimento; e (ii) toda nova

barragem construída tem chance considerável de romper nos seus primeiros dez anos de funcionamento, especialmente, no primeiro enchimento.

Esses dados apontam que rompimentos de barragem são uma realidade a ser confrontada, pois barragens antigas aumentam suas chances de rompimento a cada ano que passa, visto que estão envelhecendo e as barragens novas precisam superar a maior possibilidade de falha, que é no seu primeiro enchimento.

Exemplos de rompimento são registrados na história recente como, por exemplo, o acidente ocorrido em Banqiao, na China, que provocou a morte de 171.000 pessoas, em 1975. Quase 50 anos depois, com expressivos avanços em diversas áreas da ciência e tecnologia, ainda existem acidentes de grande porte. Os anos de 2015 e de 2019 foram marcados pelo rompimento da barragem de rejeitos de mineração na cidade de Mariana e Brumadinho, em Minas Gerais. Entre mortos e desaparecidos contabilizou-se mais que 270 pessoas. O pequeno intervalo de tempo entre esses eventos demonstra a incerteza quanto às reais condições de outras obras de igual magnitude e desse universo de imprevisibilidade.

O impacto de ondas oriundas de rompimento de barragem é um problema prático da engenharia. Saber detalhes a respeito da onda oriunda da ruptura de uma barragem gera embasamento para todos os estudos sobre o fenômeno (Stansby et al., 1998) e define o mote norteador desta pesquisa. Entender essa onda permite utilizar técnicas de prevenção funcionais e que dialoguem com a realidade.

Dentro desse enfoque, esta pesquisa se propõe a detalhar a onda que se forma quando uma barragem rompe se alinhando com estudos teóricos de Chanson (2006) e práticos Stansby et al. (1998). A escolha do enfoque do tema se dá após a percepção de que a maioria dos esforços acadêmicos se encontra em evitar rompimentos através de melhorias nos métodos construtivos e de dimensionamento ou estudos de caso específicos em que a aplicabilidade é reduzida. Ou seja, pouco enfoque é dado na questão hidrodinâmica do fenômeno de onda de ruptura em si.

Assim, o enfoque desta pesquisa visa aprofundar os conceitos hidráulicos envolvidos na formação e comportamento da onda, identificando padrões geométricos, desenvolvimento da velocidade e aceleração, além de apresentar correlações entre as variáveis envolvidas no processo. O mesmo estudo será feito em variados cenários, que diferem entre si em relação à altura do nível de água a montante e a jusante do barramento, vinculando as condições de

contorno empregadas (causas) com os dados medidos (consequências), aumentando a gama de informações que existem a respeito desse fenômeno.

Por fim, essa dissertação se justifica por ampliar conceitos e trazer à luz um assunto que cada vez mais precisa protagonizar pautas nas esferas acadêmica, profissional, social, política e da engenharia. Debater com profundidade sobre rompimento de barragens, impactos socioambientais, vidas perdidas e biomas afetados é urgente. Qualificar essa dialética com estudo técnico, fruto de uma dissertação de mestrado, é uma resposta da comunidade acadêmica frente a essa crítica realidade.

3 DIRETRIZES DA PESQUISA

3.1 QUESTÃO DE PESQUISA

Quais os principais parâmetros que regem o movimento da frente de onda oriunda da ruptura de uma barragem?

3.2 OBJETIVOS

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

3.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal da pesquisa é definir como se desenvolve a frente de onda oriunda da ruptura de uma barragem e identificar quais os principais parâmetros que regem esse fenômeno hidráulico, através de um modelo simplificado de rompimento instantâneo em escala reduzida.

3.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários da pesquisa são:

- a) desenvolver uma metodologia, em modelo reduzido, para a geração da frente de onda de ruptura;
- b) verificar a influência dos níveis de água a montante e a jusante do barramento na formação da onda de ruptura;
- c) caracterizar o momento da quebra da onda de ruptura;
- d) comparar os resultados encontrados com métodos analíticos relacionados a esse fenômeno.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão será focada nos fenômenos hidráulicos que compõem o processo de formação da frente de onda, oriunda da ruptura de uma barragem, compilando informações presentes na literatura que definem o que é uma barragem, sua importância, seus tipos, principais formas de ruptura, além de uma perspectiva histórica de rompimentos no mundo e no Brasil. Também serão apresentadas formas de equacionar e modelar fisicamente esse fenômeno.

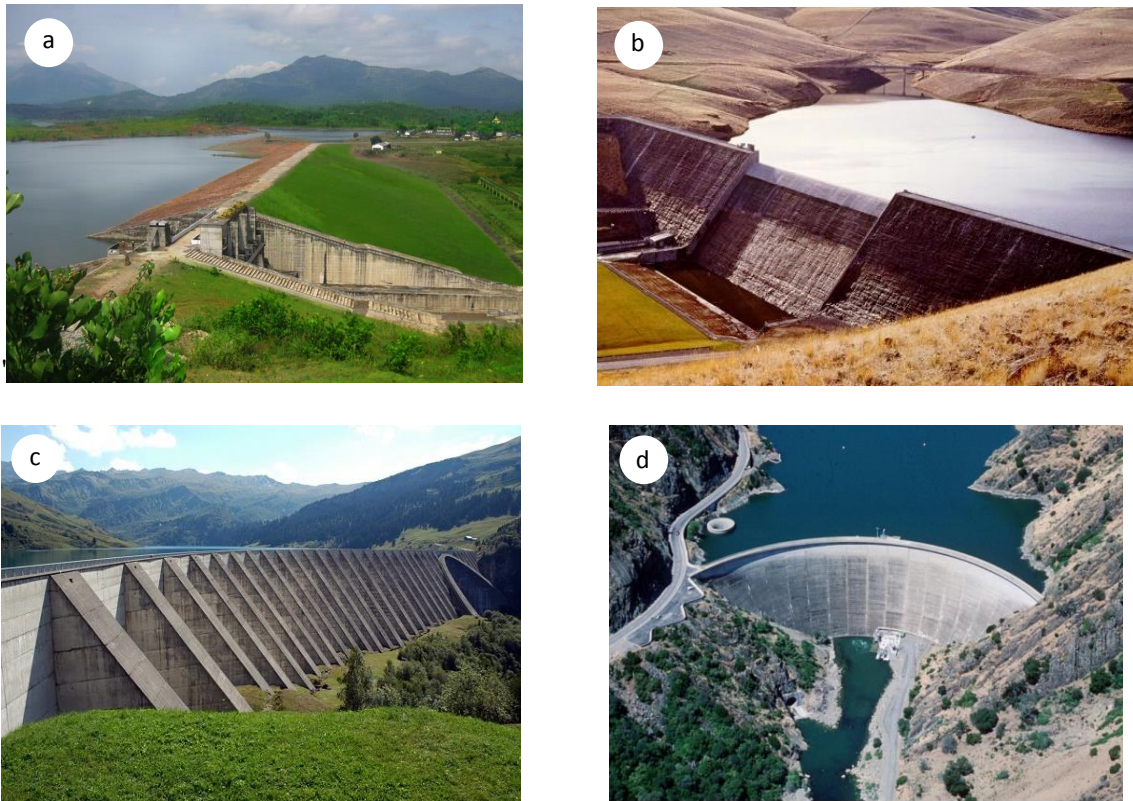
4.1 BARRAGENS E SUAS CLASSIFICAÇÕES

Uma barragem é uma barreira artificial que consegue restringir o movimento da água ou qualquer material líquido que se queira armazenar (ZHANG et al., 2016). A barragem tem duas funções principais, a primeira é armazenar água para compensar flutuações da vazão de um rio ou na demanda de água para produção de energia. A segunda é aumentar o nível de água a montante e, com isso, aumentar a energia potencial, ou seja, aumentar a diferença de altura entre a superfície do reservatório e o rio que corre a jusante. A criação desse armazenamento e, conseqüentemente, do aumento da energia potencial permite que a barragem gere eletricidade, abastecendo hidrelétricas responsáveis por produzir cerca de metade da energia elétrica do mundo (ANCEY, 2014). Outros motivos para construção de barragens são: disponibilizar água para agricultura; controlar cheias; melhorar a navegação em rios, fornecendo vazões regulares; pescaria em reservatório e atividades de lazer, como passeios de barco (MCCULLY, 2001).

As barragens possuem diversos tamanhos, desde diques com poucos metros, facilmente encontrados em pequenas propriedades rurais, até megaconstruções de barramentos com mais de 300 metros de altura, como a barragem de Rogun, no Tajiquistão (ESHCHANOV et al., 2011). A diferenciação de barragens devido ao seu tamanho está lavrada no estatuto do CIGB. O estatuto indica que grandes barragens são aquelas que possuem mais de 15 metros de barramento (medindo da fundação mais profunda até a sua crista) ou barragens entre 5 e 15 metros que armazenem mais de 3 milhões de metros cúbicos de líquido (ICOLD, 2011).

Outros fatores utilizados para classificar barragens são material que constituem o maciço (terra, rochas e concreto) e seu método construtivo (gravidade, em arco, contrafortes, etc.). Esses dois fatores se interseccionam devido ao fato de certos tipos de materiais permitirem apenas um determinado método construtivo. O ICOLD⁴ destaca a seguinte classificação:

Figura 2 – Tipos de barragens: (a) barragem de terra ou enrocamento; (b) barragem por gravidade; (c) barragem por contrafortes e (d) barragem em arco.



Fonte: (a) Vijayan, 2014; (b) Dam Engineer, 2019; (c) Janberg, 2019 e (d) Youssef, 2019.

- a) barragem de terra ou enrocamento (Figura 2a): são as mais comuns, têm seu maciço composto por solo ou rocha. Os próprios deslizamentos de terra podem acabar formando barragens naturais em rios com o vale estreito, por exemplo.
- b) por gravidade (Figura 2b): são barragens construídas em concreto ou rochas e antigamente alvenaria. Utilizam seu peso próprio para resistir às forças causadas pela água represada.
- c) por contrafortes (Figura 2c): consiste na implantação de placas de concreto inclinadas formando um paramento de montante da barragem. Dessa forma, a pressão hidrostática é transmitida a uma série de contrafortes perpendiculares ao eixo da barragem.

⁴ Essa definição por tipo de barragem também está disponível na página virtual da instituição e o acesso está disponível em <https://www.icold-cigb.org/GB/world_register/general_synthesis.asp>. Acessado em 12 de março de 2019.

- d) em arco (Figura 2d): uma construção em arco transfere a força para as ombreiras, necessitando de menos concreto na sua construção. Em compensação, necessita de uma fundação robusta para suportar as solicitações (cargas aplicadas).

Zhang et al. (2016), apontam um segundo viés para classificar as barragens por tipo de material e construção:

- a) barragens de enrocamento construídas: possuem a mesma definição de barragens dada pelo CIGB, com solo e rocha no maciço, mas que se diferenciam por serem consideradas apenas as barragens existentes devido à construção humana.
- b) deslizamentos: essas barragens ocorrem naturalmente devido aos terremotos ou às enxurradas. O bloqueio de um rio por uma barragem de deslizamento não ocorre por interferência da humanidade.
- c) barragens de concreto: podem ser tanto por gravidade como em arco.
- d) diques: barragem de terra de menor porte, geralmente construídas com o intuito de proteger certas áreas de um alagamento, ao invés de represar grande quantidade de água.

Ainda existem barragens de outros materiais, menos populares, como: alvenaria, gabião e até mesmo madeira.

4.2 ROMPIMENTO DE BARRAGEM: CAUSAS E EFEITOS

O Manual de Segurança e Inspeção de Barragens, lançado pelo Ministério da Integração Nacional (2002), expõe que uma barragem segura é aquela cujo desempenho satisfaça as exigências de comportamento necessárias para evitar incidentes e acidentes que se referem a aspectos estruturais, econômicos, ambientais e sociais.

E no que tange a segurança, Zhang et al. (2016) afirmam que as barragens não são totalmente seguras e que as falhas podem ocorrer devido a um fator isolado ou a uma combinação dos seguintes fatores:

- a) galgamento (*overtopping*): causado por inundações que excedem a capacidade projetada para o vertedouro da barragem. O escoamento por cima da barragem introduz uma tensão trativa na superfície a jusante. O processo erosivo que inicia o rompimento ocorre no ponto em que essa tensão trativa excede a resistência crítica que mantém o material da barragem unido;
- b) falhas estruturais: podem ocorrer nas fundações, corpo da barragem ou em alguma junta estrutural. Há perda de resistência devido a ações permanentes ou repetidas, subdimensionamento das cargas em fase de projeto, má compactação na execução,

degradação em função de reações químicas do material com o meio, deformação excessiva devido à baixa qualidade do material ou contrações;

- c) *piping* (erosão interna do solo): a erosão provoca a remoção de partículas do interior do solo, resultando em um subleito mais poroso e por consequência mais instável, pois a desagregação aumentará a quantidade de vazios entre a estrutura, facilitando a movimentação da água subsuperficial e ruindo o barramento;
- d) manutenção inadequada: a falta de manutenção pode levar ao rompimento por diversas causas. O procedimento correto tem vista de assegurar condições de operações confiáveis, com os equipamentos sendo inspecionados e averiguados em intervalos regulares. Uma avaliação sistemática da segurança se dá através de inspeções pormenorizadas das estruturas, avaliação do desempenho e conferências dos registros originais de projeto e construção, assegurando que estes obedeçam aos critérios em vigor. A reavaliação deverá atestar se todas as instalações necessárias à segurança da barragem, são mantidas em condições satisfatórias, de acordo com os requisitos de manutenção, definidos no manual de segurança da barragem (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2002).

Toda as causas já listadas levam ao rompimento de uma barragem e quando uma barragem rompe, o primeiro efeito são milhões de metros cúbicos de água se movendo o mais rápido possível a jusante do rio, formando uma onda com alto potencial de devastação, compartilhando algumas características de uma inundação repentina, como desencadear um evento de cheia ou iniciar deslizamentos de terra. Os impactos persistem no meio ambiente em que a perda de nutrientes do solo, por causa da erosão, pode ser significativamente maior, devido à grande quantidade de água em movimento rápido que afeta uma área pequena (WYLAM, 2016). Os sedimentos oriundos dessa erosão podem modificar a paisagem e alterar o ecossistema local. Além disso, materiais perigosos poder ser transportados de propriedades inundadas e distribuídos por toda a planície de inundação. Os produtos químicos, resíduos industriais, agrícolas e de mineração, os resíduos sólidos, os esgotos brutos e os produtos domésticos comuns compreendem a maioria dos materiais perigosos espalhados pelas inundações, contaminando o meio ambiente e contaminando tudo com o que entram em contato, prejudicando o abastecimento de água da comunidade (MCCULLY, 2001).

Uma forma de avaliar o possível impacto de uma barragem que venha a romper, é classificá-la quanto ao seu potencial de dano, essa classificação visa ranquear as barragens em termos do potencial de perdas nos mais diversos âmbitos. A classificação é baseada numa projeção das consequências adversas e não tem a ver com o estado estrutural corrente da barragem, situações operacionais ou condições de segurança. A classificação do potencial de

dano é baseada no impacto e perdas em três categorias: ambiental, socioeconômica⁵ e em termos de vidas humanas (WYLAM, 2016). Para exemplificar usaremos a rompimento ocorrido em Mariana-MG, em 2015, rompimento de uma barragem de rejeitos de mineração, que teve as seguintes consequências (LOPES, 2016):

- a) ambiental: a lama de rejeitos de minérios comprometeu a qualidade da água desde o local do rompimento da barragem até a foz do Rio Doce. Ao longo de 77 quilômetros, o sedimento erodiu e remodelou o relevo, alterou o curso dos rios e deixou o solo com baixa fertilidade. A água dos rios ficou marrom e tóxica, impedindo que as plantas executassem a fotossíntese e que os animais conseguissem respirar ou beber.
- b) socioeconômica: a lama de rejeitos comprometeu a qualidade da água do Rio Doce, prejudicando o abastecimento em várias cidades da região. Foram mais de 600 famílias desabrigadas e os pescadores também ficaram sem exercer seu ofício, pois os peixes estavam mortos.
- c) vidas humanas: trata-se de quando o rompimento provoca a morte de uma pessoa. Em Mariana 19 pessoas morreram.

Mesmo sendo uma breve análise de causa e efeito, não é difícil evidenciar a magnitude de como o impacto negativo de uma ruptura de barragem afeta diversas camadas sociais da humanidade, fauna e flora.

4.3 PERSPECTIVA HISTÓRICA DE ROMPIMENTOS

O item anterior contextualizou o fenômeno, suas causas e consequências. Neste item o intuito é entender como o rompimento de barragem acontece e é relatado ao longo dos anos. Barragens simples de terra e redes de canais foram construídas por volta de 2000 a.C. para fornecer às pessoas fontes confiáveis da água. Há dados de que na China um sistema de barragens e canais foi construído em 2280 a.C (CECH, 2010). Na área que hoje corresponde à Síria foi construída uma das barragens mais antigas – em, aproximadamente, 1300 a.C. – que ainda permanece em uso, a barragem Lake Homs, feita de terra e enrocamento. A construção da barragem de Marib no Iêmen começou, aproximadamente, em 750 a.C. e levou 100 anos para ser concluída, ela era um maciço de terra de 4 metros de altura, com aberturas em pedra que regulavam as descargas para irrigação e uso doméstico. Em 1986, a barragem de Marib foi

⁵ No texto original, as perdas são divididas em 4 categorias: ambiental, socioeconômica, vidas humanas e *lifeline facilities*, que se refere a serviços como linha de transmissão de energia, tubulação de sistema de abastecimento de água, conduto de gás e até hospitais. Em tradução livre, esse item foi anexado à categoria socioeconômica.

elevada à altura de 38 metros, o que criou um reservatório de 398 milhões de metros cúbicos de água. Também existem várias barragens antigas, dos séculos XIII ao XVI, que ainda estão em uso no Irã (MELLO, 2011).

Os romanos são reconhecidos por seus avanços hidráulicos, nesse sentido construíram um sistema elaborado de barragens baixas para fornecimento de água. A mais famosa delas era a barragem de terra de Cornalbo, no sul da Espanha, com altura de 24 metros e comprimento de 185 metros. Depois da Era Romana, houve pouco desenvolvimento na área de construção de barragens, até o fim do século XVI, quando os espanhóis começaram a construir grandes barragens para irrigação. Engenheiros europeus refinaram seus conhecimentos de projeto e construção no século XIX, o que resultou na capacidade de construir barragens com altura de 45-60 metros (MELLO, 2011).

Quase 200 barragens maiores que 15 metros foram construídas no século XIX, na Grã-Bretanha pós-revolução industrial, sendo a maioria para armazenamento de água visando a expansão das cidades. Em 1900, a Grã-Bretanha possuía o mesmo número de grandes barragens que o resto do mundo. As barragens do século XIX eram principalmente de aterro, projetadas com base em tentativa e erro, até a década de 1930 havia pouca compreensão científica de como o solo e a rocha se comportavam sob a pressão do maciço e do líquido. Os construtores de barragens no século XIX tinham poucos dados de vazão ou precipitação, e poucas ferramentas estatísticas para analisar quais dados hidrológicos haviam sido coletados. Como consequência, suas estruturas entraram em colapso com frequência alarmante. Duzentas e cinquenta pessoas morreram quando uma represa de abastecimento de água em Yorkshire, na Inglaterra, rompeu em 1864. Os Estados Unidos da América tinham um registro de dado de segurança de barragem preocupante, isto é, quase uma em dez barragens de aterro construídas antes de 1930 romperam (MCCULLY, 2001). A seguir é exposto um compilado dos mais significativos rompimentos de barragem ao longo dos tempos (MONTZ et al., 2017).

- a) South Fork, Estados Unidos (1889, 2.209 mortes): a barragem de South Fork se situa na Pensilvânia. Constantes vazamentos eram registrados e as soluções dadas pelos engenheiros eram paliativas, preenchendo as rachaduras com lama e palha. Uma forte chuva superou a capacidade de suporte da já fragilizada barragem e 20 milhões de toneladas de água foram lançadas a jusante. O custo das reparações e perdas econômicas foi estimado em torno de 17 milhões de dólares.
- b) Malpasset, França (1959, 423 mortes): a barragem de Malpasset foi construída sobre o rio Reyran, localizado no sul da França. Uma parede inteira do barramento colapsou, indício de falta de manutenção. As ondas geradas ultrapassaram 40

metros e causaram uma série de acidentes fatais e a destruição da estrutura da cidade a jusante.

- c) Barragem de Vajont, Itália (1963, 2.500 mortes): situada no vale do Rio Vajont, é uma das maiores barragens no mundo. Não é mais usada nos dias de hoje, mas se mantém em pé e não colapsou estruturalmente, mesmo a área sendo frequentemente afetada por terremotos de baixa escala. Em outubro de 1963, enquanto o reservatório estava enchendo, um terremoto aconteceu na área e um deslizamento de terra de aproximadamente 260 milhões de metros cúbicos se assentaram no reservatório. Em apenas 45 segundos uma onda de 50 milhões de metros cúbicos e 250 metros de altura transpassou o barramento e dizimou todos os povoados próximos.
- d) Barragem de Banqiao, China (1975, 171.000 mortes): logo após a conclusão da represa, em 1952, rachaduras começaram a aparecer nas comportas e reparações foram feitas. Costumavam chamar a barragem de “Barragem de Ferro”, por crer que ela não apresentaria danos no futuro. Mas em agosto de 1975, após encontro do tufão Nina e uma frente fria, a quantidade equivalente a um ano de chuva precipitou em apenas 24 horas. O nível da água na barragem começou a subir e as comportas de fundo não foram capazes de suportar toda a pressão de água, cuja consequência foi o rompimento instantâneo. Como resultado, um total de 1,7 bilhões de metros cúbicos de água foram liberados a uma velocidade média de 14 m/s, que devastou a terra situada a milhares de quilômetros quadrados de distância e causou o mais letal acidente de barragem da história.
- e) Barragem Saddle Dam D, Laos (2018, 42 mortes e 23 desaparecidos): essa barragem fazia parte de uma hidrelétrica ainda em construção no sudeste de Laos. A causa apontada pelas autoridades locais foi uma precipitação acima do previsto, somada com uma construção abaixo dos padrões. A consequência, além dos óbitos, foi o número de 6.000 pessoas desalojadas e a ruína do projeto com um custo estimado em 1 bilhão de dólares (KPL, 2018; OLARN et al., 2018).

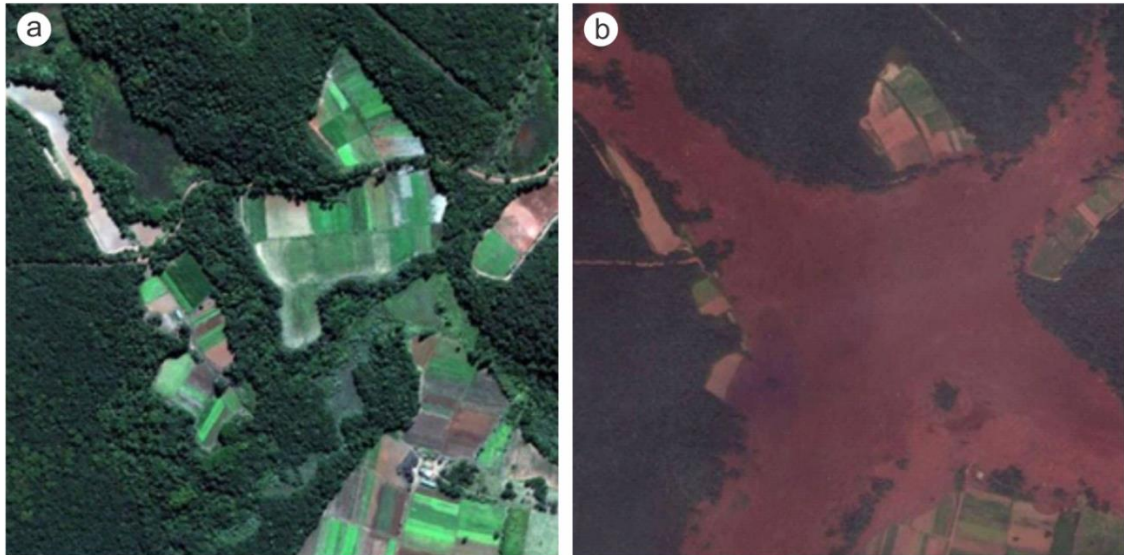
Com relação aos rompimentos de barragem no Brasil, a história recente mostra que o país deveria possuir um maior controle na prevenção, manutenção e minoração de danos oriundos de falhas de barramentos. No ano de 2019, a onda originada na ruptura da barragem de rejeitos da Mina Córrego do Feijão, da empresa Vale, localizada na cidade de Brumadinho, em Minas Gerais, matou 246⁶ pessoas, enquanto 24 ainda estão desaparecidas. A Figura 3 dá indícios do tamanho do impacto causado pelo rompimento da barragem em Brumadinho.

Soma-se isso a outra tragédia recente semelhante: em Mariana-MG, no ano de 2015, outra barragem de rejeitos da Vale que rompeu e tirou a vida de 19 pessoas. Ambos os casos apontam que as barragens não recebiam a manutenção adequada, o órgão fiscalizador era

⁶ Dados levantados até a data de 18 de junho de 2019, conforme o site de notícias G1, disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/01/26/veja-quem-sao-as-vitimas-da-tragedia-em-brumadinho.ghtml>>. Acesso em 18 de junho de 2019.

ineficaz e a empresa proprietária da barragem foi criminosamente negligente, visto que há reincidência de falhas.

Figura 3 – Situação antes (a) e depois (b) do rompimento da barragem em Brumadinho-MG.



Fonte: Metro, 2019.

Infelizmente Brumadinho e Mariana não são os únicos casos de rompimento de barragem na história do Brasil, na Tabela 1 destacam-se os principais acidentes desde 1954. O número de mortes e a frequência com que ocorrem esses eventos é preocupante, principalmente pela maioria ter acontecido no século XXI, época em que existe conhecimento e meios para evitar esses desastres.

O relatório de segurança de barragens (ANA, 2018), considerando dados de 2017, traz um panorama atual do Brasil, o estudo aponta que ao menos 45 barragens estão vulneráveis e podem apresentar risco de rompimento. Comparando com o levantamento baseado em dados de 2016, no qual existiam 25 reservatórios em risco, houve um aumento de 80%. A maioria das barragens classificadas como vulneráveis estão no Nordeste, especialmente na Bahia e em Alagoas, e mais da metade são de responsabilidade do poder público. Nove já eram consideradas de risco no relatório anterior (ano de 2016), indicando que segue sendo uma área da engenharia negligenciada, sem avanços. Os principais problemas citados são: rachaduras, infiltrações, buracos, vertedores quebrados e falta de documentação que comprove a segurança do reservatório.

Tabela 1 – Principais eventos de rompimento de barragem ocorridos no Brasil.

Local	Ano	Nome	Tipo	Danos Causados
Belo Horizonte/MG	1954	Barragem da Pampulha	Água	Perda de plantações e animais, o desmoronamento de casas e a interrupção dos serviços de luz, além do completo alagamento das pistas do aeroporto da Pampulha.
São José do Rio Pardo/SP	1977	Barragem Euclides da Cunha	Água	Maior acidente envolvendo Usinas Hidrelétricas no Brasil, paralisou a usina por quase 2 anos, causando grande prejuízo financeiro.
Itabirito/MG	1986	Barragem de Fernandinho	Rejeitos minerários	7 mortes.
Nova Lima/MG	2001	Barragem de Macacos	Rejeitos minerários	5 mortes.
Caraguases/MG	2003	Barragem Cataguases	Rejeitos industriais	Contaminação do rio Paraíba do Sul, mortandade de animais e interrupção no abastecimento de água de 600.000 pessoas.
Alagoa Nova/PB	2004	Barragem Camará	Água	5 mortes e aproximadamente 3.000 pessoas desabrigadas ou desalojadas.
Mirai/MG	2007	Barragem do Rio Pomba	Rejeitos minerários	4.000 pessoas desalojadas.
Vilhena/RO	2008	Barragem Apertadinho	Água	Construída para geração de energia, causou danos ambientais variados, como assoreamento de rios e erosão do solo.

Fonte: adaptado de Carvalho, 2015; Oliveira, 2015; Madeiro, 2015.

Tabela 2 – Principais eventos de rompimento de barragem ocorridos no Brasil (continuação).

Local	Ano	Nome	Tipo	Danos Causados
Cocal e Buriti dos Lopes/PI	2009	Barragem de Algodões	Água	Entre 9 e 24 mortos e aproximadamente 2.000 pessoas ficaram desabrigadas ou desalojadas.
Itabirito/MG	2014	Barragem Herculano	Rejeitos minerários	3 mortes.
Laranjal do Jari/AP	2014	Barragem da Hidrelétrica Santo Antônio	Água	4 mortes.
Mariana/MG	2015	Barragem Fundão e Barragem Santarém	Rejeitos minerários	19 mortes, 8 desaparecidos, 600 desabrigados, interrupção no abastecimento de água, poluição do rio São Francisco, interrupção da atividade pesqueira e impacto negativo no turismo em Regência/ES.
Brumadinho/MG	2019	Barragem 1 do Córrego do Feijão	Rejeitos minerários	238 mortes, 33 desaparecidos até a data de 14 de maio de 2019.

Fonte: adaptado de Carvalho, 2015; Oliveira, 2015; Madeiro, 2015.

4.4 ONDA DE RUPTURA

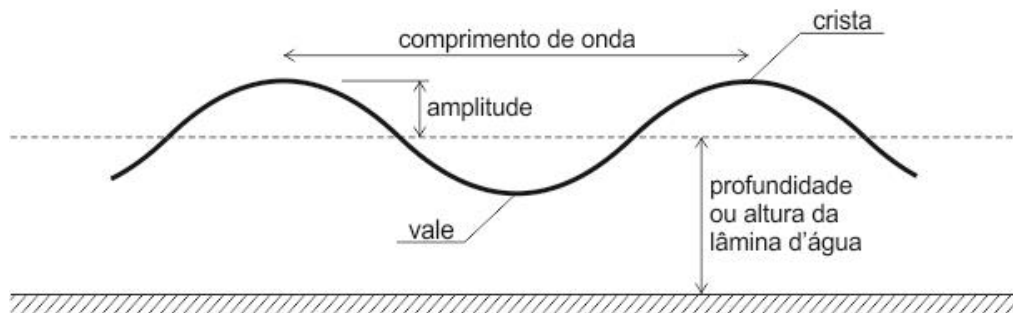
O fenômeno estudado nesta pesquisa é a frente de onda oriunda da ruptura de uma barragem, que ao longo do texto será chamado apenas de “onda de ruptura”, esse fenômeno se caracteriza por ser uma massa de água se deslocando sobre uma superfície livre, com o diferencial de possuir grandes dimensões e um início abrupto, podendo ocorrer em questão de poucas horas. Neste item serão vistos os tipos de onda classificados pela literatura e outras definições que podem ser aplicadas à onda de ruptura.

4.4.1 Componentes básicos de uma onda

Ondas são conceituadas como fenômenos que se propagam no tempo e no espaço, através de vários meios, como a água e o ar. São geradas por algum tipo de estímulo, que pode ou não ser periódico. A classificação das ondas permite dividi-las de acordo com sua natureza, direção de propagação e direção de vibração (LE MÉHAUTÉ, 1976 e TIPLER; MOSCA, 2009).

Existem alguns componentes básico que auxiliam a mensurar a magnitude de uma onda, dessa forma elas podem ser descritas, comparadas e melhor compreendidas. Esses componentes são expostos na Figura 4.

Figura 4 – Componentes básicos da onda.



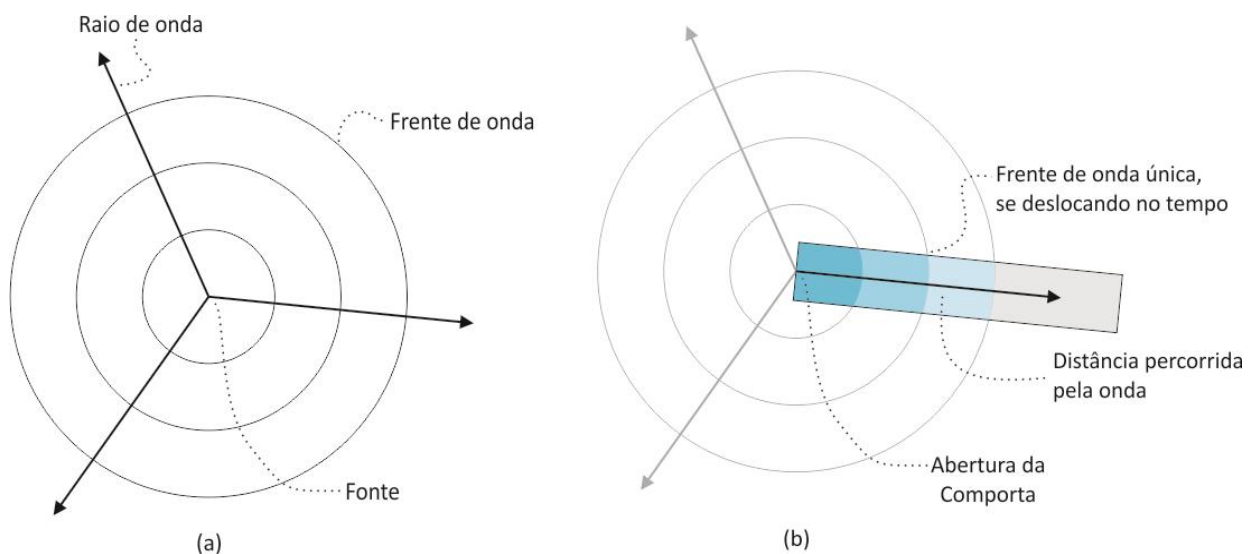
Fonte: adaptado de Dean; Dalrymple, 1984.

- a) crista: ponto mais alto da onda;
- b) vale: ponto mais baixo da onda;
- c) amplitude: medida da magnitude da máxima perturbação do meio durante um ciclo, no caso da onda de ruptura, medido em metros;

- d) comprimento: distância entre duas cristas ou dois vales consecutivos;
- e) profundidade: distância do fundo do canal à linha de água média.

No que tange ao desenvolvimento da onda, é importante entender “frente de onda” e “raio de onda”, eles conceituam a forma e a localização da onda no espaço. A Figura 5 mostra um desenho esquemático dessas componentes, seguida de uma conceituação prática (TIPLER; MOSCA, 2009).

Figura 5 – Frente de onda e raio de onda: (a) propagação em duas dimensões de uma onda qualquer; (b) propagação de uma onda de ruptura, confinada em um canal.



Fonte: adaptado de Tipler; Mosca, 2009.

Frente de onda é a fronteira da região ainda não atingida pela onda com a região já atingida. A onda de ruptura possui apenas uma frente de onda que se desloca no intuito de achar um novo ponto de equilíbrio para estabilização da massa líquida, uma vez que o fluido não está mais represado pelo barramento.

É possível definir como o raio de onda a linha que parte da fonte e é perpendicular à frente de onda, indicando a direção e o sentido de propagação. No caso da onda de ruptura, que está confinada em um canal, o raio de onda se desenvolve em apenas uma direção, assim, também pode ser entendido como a distância percorrida pela única frente de onda.

4.4.2 Ondas de translação

Lightill (1978) aponta que a dinâmica elementar das ondas envolve o equilíbrio entre forças restauradoras e a inércia de um sistema, sendo uma das principais forças restauradoras externas a gravidade. Com isso, chega-se ao conceito de ondas de gravidade: ondas guiadas pelo equilíbrio entre a inércia do fluido e a tendência, sob o efeito da gravidade, de retornar à condição de estabilidade, em que o fluido líquido fica abaixo do fluido gasoso.

Exemplifica-se esse fato com uma camada de líquido homogêneo (por exemplo, água) separada por uma superfície horizontal de um gás homogêneo (por exemplo, ar), a camada de gás fica sobre a camada líquida. Nessa situação, a variação de densidade é descontínua e é confinada em uma superfície: a superfície da água. Distúrbios nesse estado de equilíbrio tomam forma como um tipo de onda de gravidade, também chamado de onda de gravidade de superfície ou onda de água (LIGHTILL, 1978).

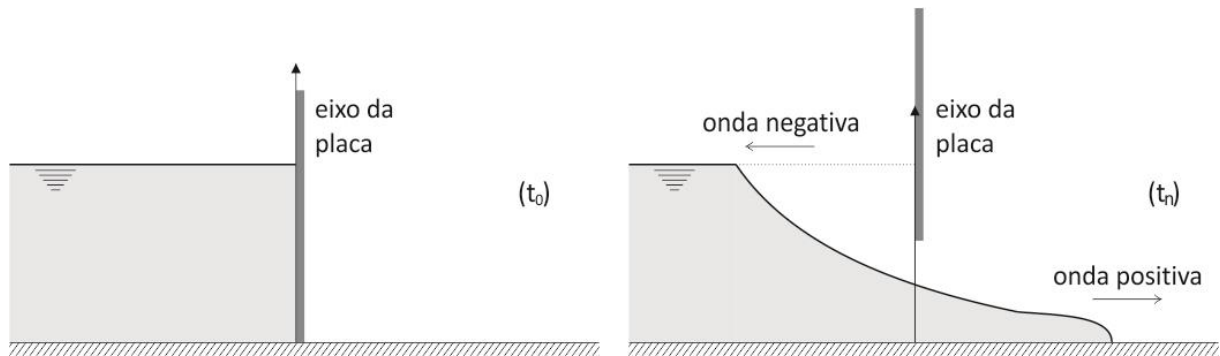
Do ponto de vista físico, existem essencialmente dois tipos de ondas de gravidade: ondas oscilatórias e ondas de translação. As oscilatórias transportam energia e não transportam massa, sendo o movimento da onda análogo ao movimento da onda em uma corda. Por outro lado, a onda de translação envolve o transporte de massa na direção em que a onda se movimenta. (LE MÉHAUTÉ, 1976). O arquétipo de uma onda de translação é uma perturbação transitória de descarga e elevação da superfície, viajando entre duas regiões de fluxo uniforme (BATTJES; LABEUR, 2017).

Ondas oscilatórias podem ser compreendidas como uma partícula de água que se move para cima e para baixo, enquanto a onda se propaga. Já a partícula de água em uma onda de translação se movimenta para frente ou em direção ao solo, podendo carregar sedimento (GIBSON, 2009). Em outras palavras, em uma onda de translação, há um transporte de água (matéria) na direção do curso da onda. Alguns exemplos de tais fenômenos são: ressaltos hidráulicos, ondas de inundação em rios, ondas marítimas perto das encostas e as ondas geradas pelo rompimento de uma barragem (LE MÉHAUTÉ, 1976).

Uma onda de translação gera uma onda positiva e uma onda negativa (Figura 6). A onda positiva se desenvolve na direção do escoamento do líquido e tem uma coluna de água a montante maior que a altura da linha d'água do fluxo ainda não perturbado. Enquanto a onda negativa se desloca na direção oposta do escoamento do líquido, a coluna de água a montante

– em relação à direção do escoamento da onda negativa – é menor que a altura a jusante (CHAUDRY, 2008).

Figura 6 – Ondas positiva e negativa em uma onda de translação.



Fonte: adaptado de Chanson, 2006.

4.4.3 Onda formada com o rompimento instantâneo de uma barragem

A onda de ruptura é uma onda de translação e, por conseguinte, uma onda de gravidade, visto que se propaga na interface líquido-gás (água-ar) devido ao campo gravitacional e transporta matéria. A onda de ruptura simulada experimentalmente é gerada a partir da seguinte situação de repouso: um barramento confina um determinado volume de água dentro de um canal. A onda começa a se formar assim que o barramento é retirado abruptamente e o empuxo que antes incidia na placa, agora gera o escoamento a jusante do fluido que estava confinado.

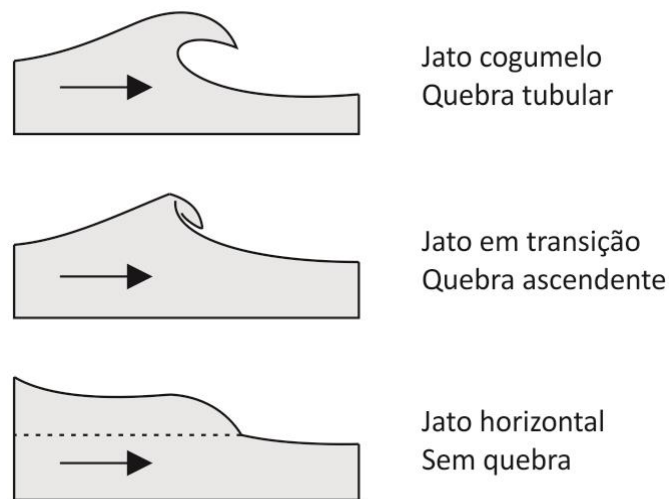
O desequilíbrio de forças dá origem a uma resultante que leva à propagação da onda positiva a jusante, enquanto uma onda negativa se propaga a montante do escoamento do líquido. O ponto de equilíbrio dessas ondas se situa na seção em que estava o barramento, a uma altura de $4/9$ do nível de água a montante. A resistência do contato fluido-paredes, faz com que a onda se desenvolva com uma cabeça arredondada na frente (ESPARTEL, 2015).

A frente de onda se desenvolve em dois tipos de fluxo, que Stansby et al. (1998) classificam como jato horizontal ou jato cogumelo. O jato horizontal é o deslizamento de uma massa líquida sobre uma superfície, ele ocorre quando o canal é seco a jusante. Enquanto o outro jato desenvolve um formato semelhante à um cogumelo, que arrebenta a jusante. Com a retirada do barramento, a água a montante se desloca por baixo da linha d'água a jusante, impulsionando a massa líquida para o formato cogumelo.

As formas que a onda de ruptura pode arrebentar são análogas ao que é visto nas ondas do mar e podem ser caracterizadas em dois tipos: tubular e ascendente (LE MÉHAUTÉ, 1976; JAMES, 2016), sendo:

- a) tubular: a onda quebra abrupta e violentamente, formando um tubo que desaba na quebra. À medida que a onda se desenvolve, a crista gradualmente cai para a frente oferecendo um forte impacto a jusante.
- b) ascendente: a crista da onda se enrola e desestabiliza, não chegando a quebrar propriamente.

Figura 7 – Tipos de jatos e quebras observadas em uma onda de ruptura.



Fonte: adaptado de Le Méhauté, 1976.

O fenômeno de quebra é caracterizado por uma alta taxa de turbulência e arrastamento de ar associado com uma alta taxa de dissipação de energia. A quebra ocorre quando (LE MÉHAUTÉ, 1976):

- a) a velocidade da partícula na crista se torna maior que a velocidade da onda;
- b) a pressão na superfície livre dada pela equação de Bernoulli é incompatível com a pressão atmosférica;
- c) a aceleração de partículas na crista tende a separar as partículas do volume da superfície da água;
- d) a superfície livre se torna vertical.

4.5 EMBASAMENTO TEÓRICO

4.5.1 Equações principais

As equações que regem o movimento da onda de ruptura de um canal de superfície livre, partem de três equações principais⁷, que são:

- resistência do fluxo de escoamento não permanente e variado (HENDERSON, 1966);
- equação da continuidade;
- equação da perda de carga de Chèzy.

A equação de resistência do fluxo é dada por:

$$-\gamma A \Delta H - \tau_0 P \Delta X = \rho A \Delta X \left(v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} \right) \quad (\text{equação 1})$$

A equação da continuidade para um escoamento variado em um canal retangular é:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial \Delta H}{\partial t} = 0 \quad (\text{equação 2})$$

E para a equação da perda de carga de Chèzy, tem-se:

$$Sf = \frac{v^2}{C^2 R} = \frac{\tau_0}{\gamma R} \quad (\text{equação 3})$$

Sendo,

γ é peso específico, em N/m³;

v é a velocidade do escoamento, em m/s;

A é a área molhada da seção, em m²;

ΔH é a altura da lâmina da água no canal, em metros;

τ_0 é tensão de cisalhamento, em N/m²;

P é o perímetro molhado da seção, em metros;

⁷ O movimento de uma onda de ruptura é tridimensional, porém, para fins de simplificação de cálculo, esse mesmo movimento pode ser descrito através de equações unidimensionais, considerando apenas o principal deslocamento da onda, que é horizontal.

ΔX é a comprimento longitudinal do volume de controle, em metros;
 ρ é a massa específica, em kg/m³;
 x é a variação no espaço, eixo horizontal, em metros;
 t é a variação no tempo, em segundos;
 Q é a vazão do escoamento, em m³/s;
 B é a largura do canal, em metros;
 S_f é a declividade da linha de energia, em m/m;
 C é o coeficiente de rugosidade de Chèzy e depende do material do canal, em m^{2/3}/s;
 R é o raio hidráulico, em metros.

A partir de algumas hipóteses e deduções (detalhadas no Apêndice A) se chega as equações 4, 5 e 6.

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v^2}{C^2 R} = 0 \quad (\text{equação 4})$$

$$S_f = -\frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (\text{equação 5})$$

$$A \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial A}{\partial x} + B \frac{\partial \Delta H}{\partial t} = 0 \quad (\text{equação 6})$$

Sendo,

dH/dx é a variação da energia potencial ao longo do eixo horizontal;
 g é a aceleração gravitacional, em m/s²;
 dv/dt é a variação da velocidade ao longo do tempo, em m/s²;
 v é a velocidade do escoamento, em m/s;
 C é uma constante, que depende do material do canal;
 R é o raio hidráulico, em metros;
 S_f é a declividade da linha de energia, em m/m;
 A é a área da seção, em m²;
 B é a largura do canal, em metros;
 ΔH é a altura da lâmina da água no canal, em metros.

É necessário resolver duas equações independentes, 4 e 5, por um lado e 2 e 6 por outro, para as duas variáveis desconhecidas v e ΔH . A melhor aproximação para resolver esse tipo de problema é o método das características (HENDERSON, 1966; CHANSON, 2006), um método

semigráfico em que soluções explícitas são facilmente obtidas e soluções numéricas podem ser trabalhadas para casos mais gerais, quando as soluções explícitas não são possíveis. As equações 7 e 8 apresentam a solução final da aplicação do método e o Apêndice B apresenta o passo a passo dessa dedução proposta.

Aplicando em uma onda simples, que é o problema mais trivial em um escoamento não permanente em um canal horizontal, sendo a declividade S_f igual a zero.

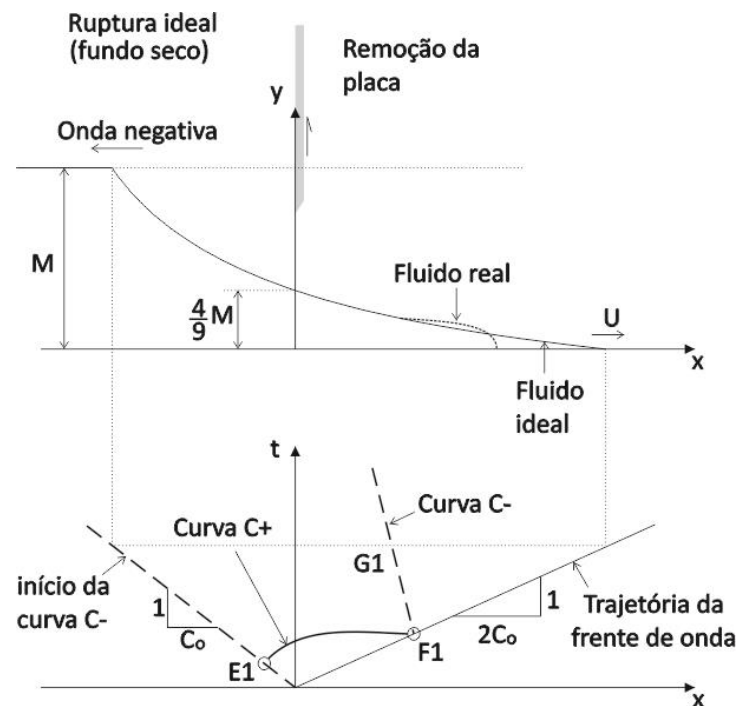
$$\text{família } C1: (v + c) \frac{\partial(v + 2c)}{\partial x} + \frac{\partial(v + 2c)}{\partial t} = 0 \quad (\text{equação 7})$$

A inclinação inversa da linha é $(v + c)$, enquanto $(v + 2c)$ é constante. O mesmo ocorre para o segundo grupo (família C_2), no qual a inclinação inversa é $(v - c)$ e $(v - 2c)$ é constante.

$$\text{família } C2: (v - c) \frac{\partial(v - 2c)}{\partial x} + \frac{\partial(v - 2c)}{\partial t} = 0 \quad (\text{equação 8})$$

Isso significa que para o observador que se move com velocidade $(v \mp c)$, a quantidade $(v \mp 2c)$ permanece constante.

Figura 8 – Solução da onda de translação através do método das características.

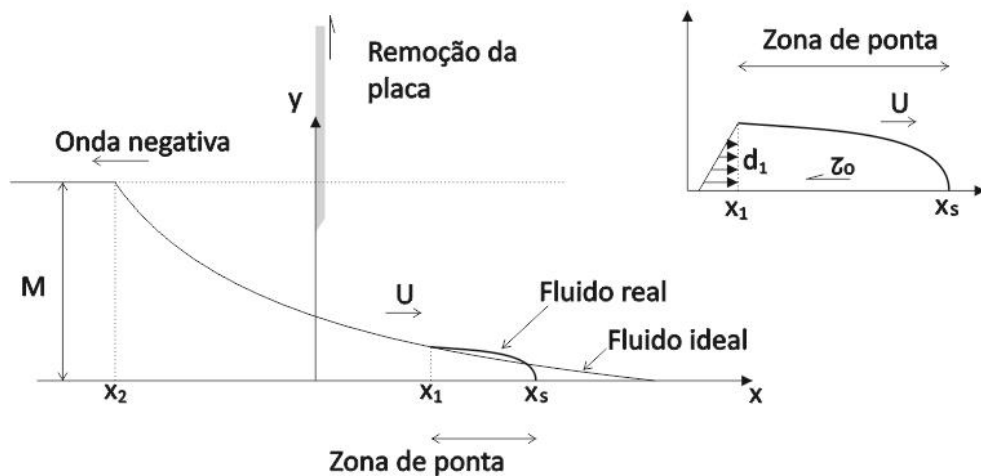


Fonte: adaptado de Chanson, 2006.

4.5.2 Parâmetros geométricos e cinemáticos da onda de ruptura

Chanson (2006) propôs uma solução analítica para a onda oriunda da ruptura de uma barragem, em aplicações unidimensionais. Utilizando as equações da continuidade e da quantidade de movimento aliada à equação da perda de carga de Darcy-Weisbach. Aplicando condicionantes de canal retangular, o autor definiu os seguintes parâmetros geométricos e cinemáticos para a onda de ruptura, ilustrados na Figura 9.

Figura 9 – Desenho esquemático de onda de ruptura teórica.



Fonte: adaptado de Chanson, 2006.

Após a rápida retirada do barramento, representada pela placa cinza na Figura 9, que se encontra no eixo y, uma onda negativa se propaga a montante e uma onda positiva a jusante do fluxo do escoamento. No eixo horizontal existirão diferentes zonas nas quais são feitas as seguintes considerações:

- $X \leq X_2$, há apenas o deslocamento longitudinal da coluna de água no barramento;
- $X_2 < X \leq X_1$, propagação de onda em que o fluido é considerado ideal, ou seja, sem viscosidade;
- $X_1 < X \leq X_s$, zona em que o fluido é considerado real e é influenciado pelo atrito do canal, formando uma espécie de região de ponta (em inglês chamado de *tip region*).

O fim da onda positiva se encontra em X_s e o fim da onda negativa em X_2 . A letra M representa a altura do nível da água junto ao barramento no momento da ruptura. Esse esquema configura um fluido real, analisado como um fluido ideal atrás de uma região com resistência

ao fluxo. Na zona de ponta a velocidade não varia rapidamente. Se a resistência é dominante, e a aceleração e inércia são pequenas, esses dois últimos termos podem ser desconsiderados, assumindo que a velocidade na ponta é equivalente à velocidade U.

Chanson (2006) calcula a velocidade U da onda em função do tempo t. Nessa equação são levadas em consideração a força da gravidade (g), a altura do barramento (M) e uma constante adimensional G, que utiliza a rugosidade equivalente de areia (k_s) e o número de Reynolds do escoamento (Re_D).

$$\frac{32}{13} \frac{\left(1 - \frac{1}{2} \frac{U}{\sqrt{gM}}\right)^{7/2}}{G^{1/4} \left(\frac{U}{\sqrt{gM}}\right)^2} = t \sqrt{\frac{g}{M}} \quad (\text{equação 9})$$

$$G = 3,65 \cdot 10^{-5} \frac{k_s}{M} + \frac{2,5 \cdot 10^{-3}}{Re_D \frac{U}{\sqrt{gM}}} \quad (\text{equação 10})$$

O ponto X_1 que marca a intersecção entre os modelos de fluido ideal e real é calculada em função da velocidade U, do tempo t e demais condições de contorno supracitadas.

$$X_1 = M \left(\frac{3}{2} \frac{U}{\sqrt{gM}} - 1 \right) t \sqrt{\frac{g}{M}} \quad (\text{equação 11})$$

A distância da região de ponta também é calculada em função de U e t, quando somada à X_1 resulta no ponto X_s que indica o fim da onda.

$$X_s = X_1 + \frac{32M}{9} \frac{\left(1 - \frac{1}{2} \frac{U}{\sqrt{gM}}\right)^{9/2}}{G^{1/4} \left(\frac{U}{\sqrt{gM}}\right)^2} \quad (\text{equação 12})$$

Munido das informações que caracterizam a região de ponta (X_1 e X_s) em função de um tempo t e uma velocidade U, é possível calcular a altura da onda (d) em função de uma distância qualquer X. Considerando X_2 o ponto em que acaba a propagação da onda negativa.

Tabela 3 – Equações que descrevem a altura d da onda em função da localização X e do tempo t .

ZONA	CONDIÇÃO	EQUAÇÃO	
Área ainda não afetada pela ruptura da barragem	$X \leq X_2$	$d = M$	(equação 13)
Zona de fluido ideal	$X_2 < X \leq X_1$	$d = \frac{M}{9} \left(2 - \frac{X}{t\sqrt{gM}} \right)^2$	(equação 14)
Região de ponta, zona de fluido real	$X_1 < X \leq X_s$	$d = M \left(\frac{9G^{1/4}}{32} \left(\frac{U}{\sqrt{gM}} \right)^2 \frac{X_s - X}{M} \right)^{4/9}$	(equação 15)

Fonte: adaptado de Chanson, 2006.

Sendo,

d , altura da onda em diferentes distâncias X , em metros;

U , velocidade da onda, em m/s;

X_1 , X_2 e X , posição da onda no canal, em metros, sendo que a posição zero se encontra no local onde está a placa de metal (barramento);

g , aceleração da gravidade em m/s^2 ;

M , altura do nível de água a montante do barramento, em metros;

S_0 , inclinação do canal, em radianos;

t , tempo, em segundos;

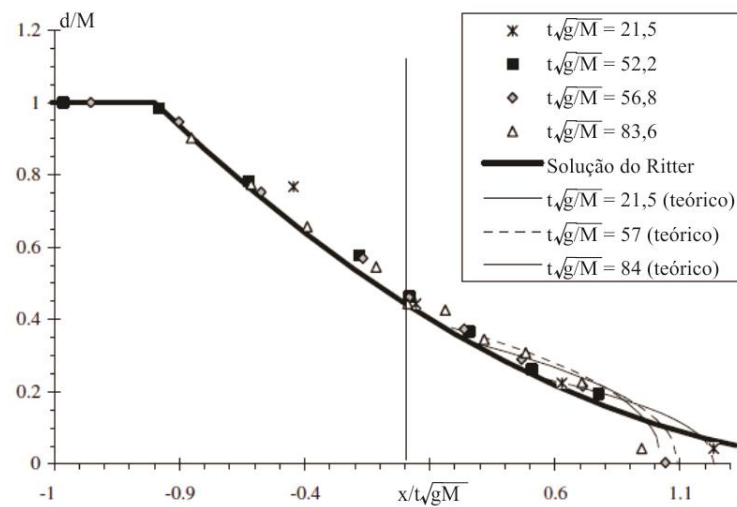
G , constante adimensional.

De forma a comparar todos os dados entre si, Chanson (2006) expõe seus resultados – baseados em evento entre 2 e 12 segundos após o rompimento do barramento, para alturas de lâmina de água a montante de 0,115 e 0,23 metros, em um canal com comprimento de 18 metros e largura de 0,25 metros – através de um gráfico (Figura 10) que correlaciona dois números adimensionais:

a) Eixo das abscissas: $x / t\sqrt{gM}$;

b) Eixo das ordenadas: d/M .

Figura 10 – Adimensional proposto por Chanson (2006).



Fonte: Chanson, 2006.

O gráfico de eixos adimensionais, proposto por Chanson (2006), aponta que existe um comportamento padrão de desenvolvimento da onda de ruptura, identificado em diferentes configurações de ensaio, tanto experimentais, quanto analíticos (teóricos).

4.6 MODELAGEM FÍSICA

Este capítulo apresentará estudos experimentais que dão respaldo aos métodos utilizados nesta pesquisa, destacando suas principais características em termos de:

- geometria: aspectos de forma e tamanhos utilizados nos modelos físicos para representar com veracidade a onda de ruptura e seus mecanismos de simulação;
- arranjo da filmagem: posicionamento adequado dos aparatos para extrair o melhor aproveitamento dos equipamentos e técnicas disponíveis;
- resultados obtidos: o conhecimento do que foi produzido e registrado em mídia, de forma que possa guiar a relevância dos resultados da presente pesquisa.

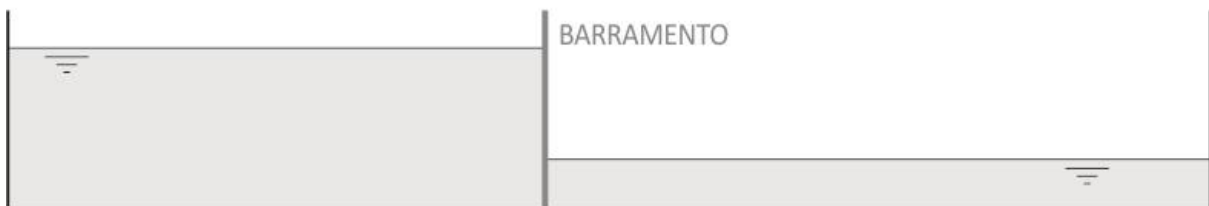
4.6.1 Concepção da geometria do modelo

A geometria utilizada no experimento que visa simular a ruptura de uma barragem é embasada em modelos já utilizados em trabalhos anteriores. Stansby et al. (1998) apontam que a idealização de um problema bidimensional, com uma barreira sendo removida instantaneamente entre dois corpos de água em repouso com diferentes níveis, sobre uma

superfície horizontal, tem sido a situação comumente utilizada em simulações numéricas. Na prática a ruptura será mais gradual que essa idealização e depende também da interação entre a água e o solo. Entretanto, a retirada instantânea da barreira gera o cenário que apresenta maiores picos de velocidade no desenvolvimento da onda de ruptura, o que torna essa situação fundamental para estudos práticos.

A opção por esse modelo é corroborada por Leal (2006). O autor expõe que a maioria dos experimentos de onda de ruptura de barragem são realizados em canais retangulares equipados com uma barreira móvel. A barreira é removida rapidamente, estimulando uma falha completa e instantânea da barragem. A Figura 11 mostra um desenho da condição inicial do experimento de Leal (2006).

Figura 11 – Croqui de um canal retangular com diferentes níveis de água entre um barramento.



Fonte: adaptado de Leal, 2006.

A pesquisa de Korobkin (2008) também ensaiou considerando o problema de um fluxo gerado quando um barramento vertical na frente de uma região líquida é subitamente removido. Outro experimento, publicado por Javadian (2016), também serve como referência, pois mostra que essa concepção é utilizada nos dias atuais. Javadian (2016) utilizou um canal retangular de vidro com uma comporta no meio, que abria abruptamente, para modelar experimentalmente a ruptura da barragem. O canal a jusante da comporta se encontrava completamente seco e a montante da comporta o canal estava preenchido com água.

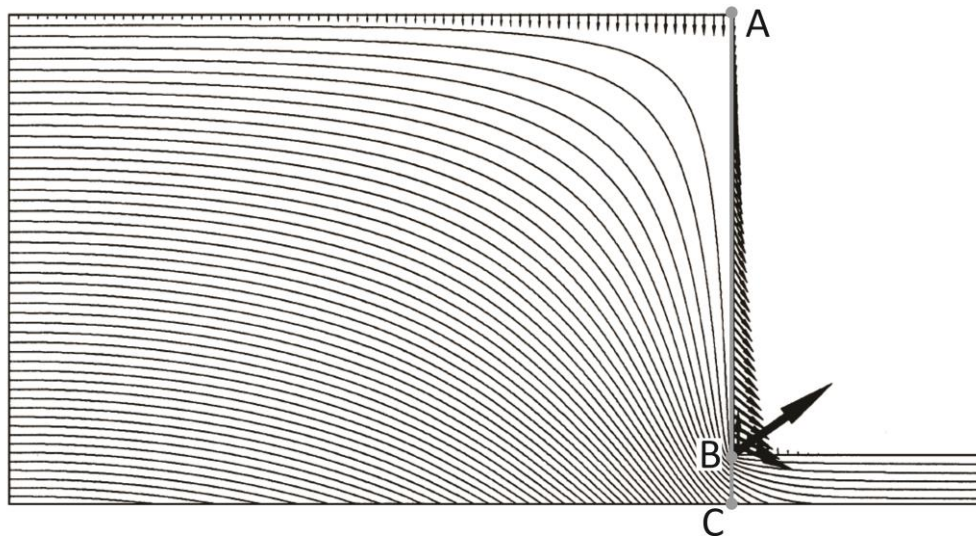
4.6.2 Arranjo do experimento

Após o entendimento de que um canal retangular com uma placa transpondo o fluxo da água é uma maneira consolidada para simular a ruptura de uma barragem simplificada, são estudados os materiais e as dimensões utilizadas em estudos anteriores para esse tipo de experimento.

No seu trabalho, Stansby et al. (1998) conduziram o experimento em um canal de 15,24 metros de comprimento, 0,4 metros de largura e 0,4 metros de altura, com um leito horizontal. Foram utilizadas paredes de acrílico transparentes a montante e a jusante do local da barragem de forma a ser possível visualizar o fluxo. Ambas as extremidades do canal eram fechadas e o local da barragem foi instalado 9,76 metros a jusante de uma extremidade. A própria represa era representada por uma fina chapa metálica de 3 milímetros de espessura, que podia deslizar em pequenas canaletas acopladas no canal. Foi adicionada graxa às canaletas para minimizar o vazamento. Um cabo de aço foi anexado ao topo da placa, a corda foi instalada em uma polia, cerca de 3 metros acima do solo com um peso de 7 quilos ligado à outra extremidade. Ao abandonar o peso, a chapa metálica subia através da polia. O fluxo é visualizado por uma linha de luz produzida por um *laser* de íon argônio com um cabo de fibra ótica que direcionava o feixe acima do canal e, através de uma lente, produzia um feixe de luz vertical ao longo do canal, a cerca de 7 centímetros da parede. A largura do feixe é 1~3 milímetros. O fluxo era gravado em uma câmera de vídeo, proporcionando um campo de visão de cerca de 0,83 metros de altura e 1,0 metro de comprimento. As imagens de vídeo eram gravadas com efetivamente 25 quadros/segundo e eram digitalizadas como 512 x 512 pixels com 256 níveis de cinza através de um separador de quadros (*frame grabber*) em um computador. Como o campo de visão infelizmente não cobria toda a área de fluxo de interesse, a câmera precisou ser movida de posição e a experiência repetida para obter uma visualização completa.

Stansby et al. (1998) consideram o lançamento de um fluido não viscoso que é inicialmente estacionário com dois níveis de água diferentes nas regiões 1 e 2, separados por uma placa final vertical ABC, como mostrado na Figura 12. No instante $t = 0$, a placa ABC é removida, provocando um ajuste instantâneo do campo de pressão, uma vez que o fluido é incompressível. A pressão que era descontínua em BC torna-se contínua e a pressão em AB torna-se constante (atmosférica). Esse ajustamento do campo de pressão provoca o movimento instável resultante.

Figura 12 – Contornos de pressão dentro do fluido no momento da liberação e vetores de aceleração na superfície, com o comprimento da seta proporcional à magnitude. A ordem de grandeza da profundidade é de 0,1 metro.



Fonte: adaptado de Stansby et al., 1998.

Hsu (2014) conduziu seus experimentos em um canal de aproximadamente 27 metros de comprimento, 0,37 metros de largura e 0,6 metros de altura. As paredes laterais foram construídas com vidro liso, enquanto a comporta é automaticamente aberta por um compressor de ar acoplado a uma placa de aço. A distância da comporta (barragem) foi fixada a 11,27 metros do início do canal e duas alturas de enchimento a montante iniciais foram escolhidas: 0,3 e 0,4 metros. A comporta que separa o reservatório do resto do tanque foi removida pelo topo a uma velocidade de aproximadamente 1,5 m/s. As experiências foram registradas por meio de uma câmera filmadora.

Espartel (2015) realizou experimento semelhante de ruptura da barragem modelada a partir da adaptação de um canal de vidro que possuía inclinação de 1,2 graus (2,1%) com a horizontal e dimensões de 4,0 metros de comprimento, 0,12 metros de largura e 0,4 metros de altura. Essa adaptação consistiu em instalar uma placa de acrílico no canal, que deslizava em guias também de acrílico, de forma a estancar o fluxo da água e criar um desnível, simulando o barramento de um curso de água. A retirada manual da placa equivaliu à ruptura instantânea de uma barragem simplificada. A placa se movimentava verticalmente com o auxílio de guias de acrílico que foram acopladas no canal com o uso de silicone. As dimensões da placa retangular eram de 0,66 x 12,2 metros e as guias possuíam 0,23 metros de altura e 0,02 metros de largura, ambas com espessura de 0,01 metros.

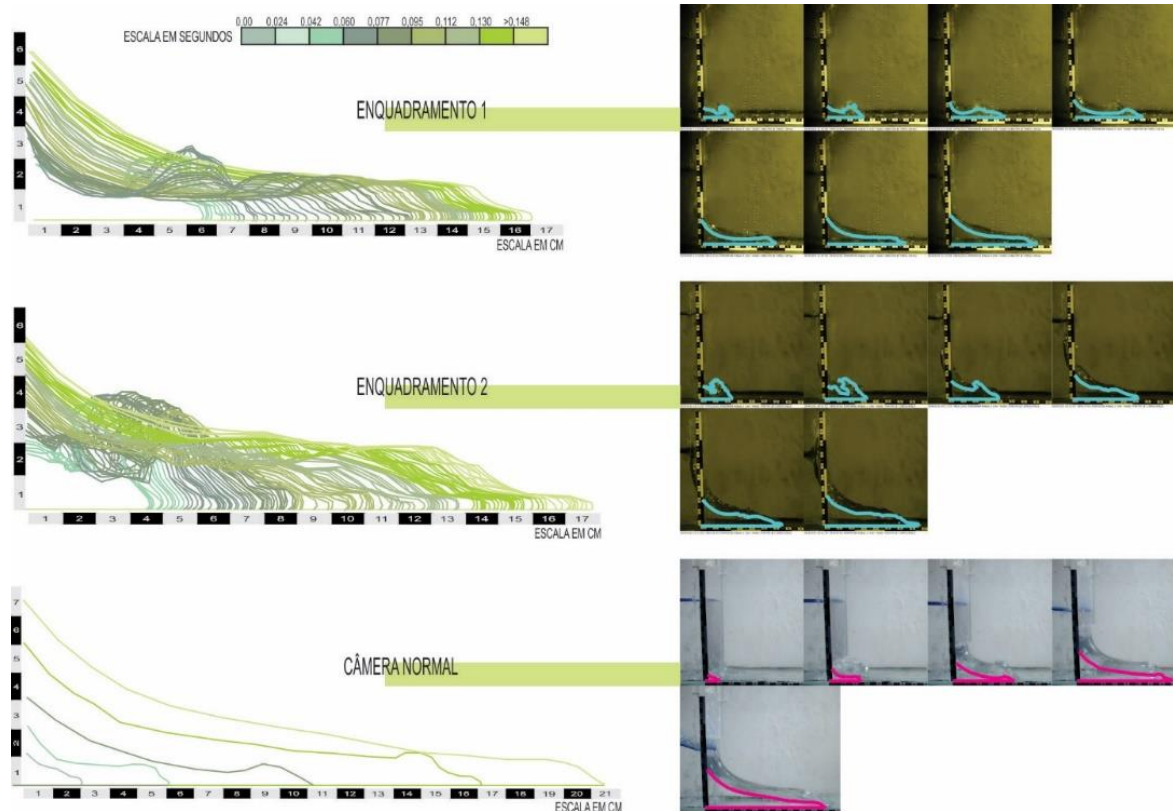
4.7 RESULTADOS ORIUNDOS DA MODELAGEM DE ONDAS DE RUPTURA

Neste item são mostrados resultados analíticos, experimentais e numéricos que compreendem os perfis da superfície livre e a velocidade da frente da onda. Relativo às condições iniciais, Leal (2006) constata que a existência de água inicialmente a jusante reduz a velocidade da frente da onda. O autor também constata que, para fundo seco, a mobilidade do fundo influencia na velocidade da frente da onda.

Referente ao formato da onda, Espartel (2015) descreveu: tão logo a placa é aberta, uma frente de onda muito rápida se forma a jusante, enquanto uma onda negativa, de menor velocidade, se propaga a montante. A onda que se propaga a jusante tem um formato de cunha, que aumenta ao longo do tempo. Porém, em relação ao próprio tamanho da cunha, é possível perceber que a cabeça da onda vai afinando e alongando ao passar dos segundos, a exemplo da Figura 13.

Salienta-se que são apresentados, na Figura 13, três tipos de filmagem para um mesmo evento de ruptura – 15 centímetros de nível de água a montante e canal seco a jusante. Foram aplicados dois diferentes enquadramentos registrados por câmera rápida (taxa de aquisição de quadros maior que 120 quadros por segundo) e uma filmagem realizada por câmera de velocidade normal (24 a 36 quadros por segundo). Enquadramentos são posicionamentos distintos do aparato de filmagem, que alteram a área de vídeo capturada. As características dos enquadramentos apresentados por Espartel (2015) compreendem: um primeiro enquadramento capturando imagem de 1280 x 700 pixels, em uma área de 40 x 24 centímetros, registrados à uma taxa de 739 quadros por segundo. Já o enquadramento 2 capturou uma imagem de 704 x 700 pixels, em uma área de 21 x 21 centímetros, registrados à uma taxa de 1190 quadros por segundo.

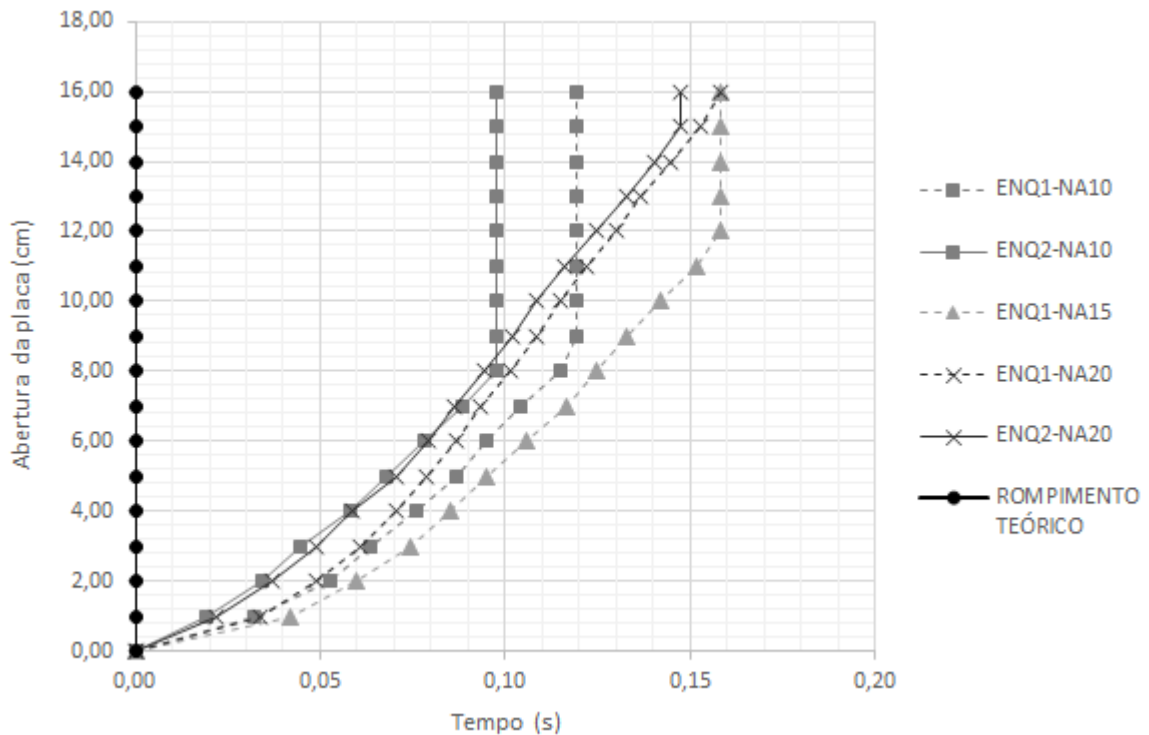
Figura 13 – Formato de onda registrado por Espartel (2015), para canal seco com nível de 15 centímetros a montante.



Fonte: Espartel, 2015.

Também foi visto em Espartel (2015), que um fator com possibilidade de influência nos resultados foi o tempo de abertura da placa (rompimento do barramento), que não era constante em todos os ensaios. A Figura 14 apresenta o deslocamento da placa no eixo vertical, em função do tempo, para 5 ensaios distintos. Também consta no gráfico uma linha teórica que representa a condição ideal, ou seja, a abertura instantânea da placa.

Figura 14 – Análise do tempo de abertura da placa, realizado por Espartel (2015).

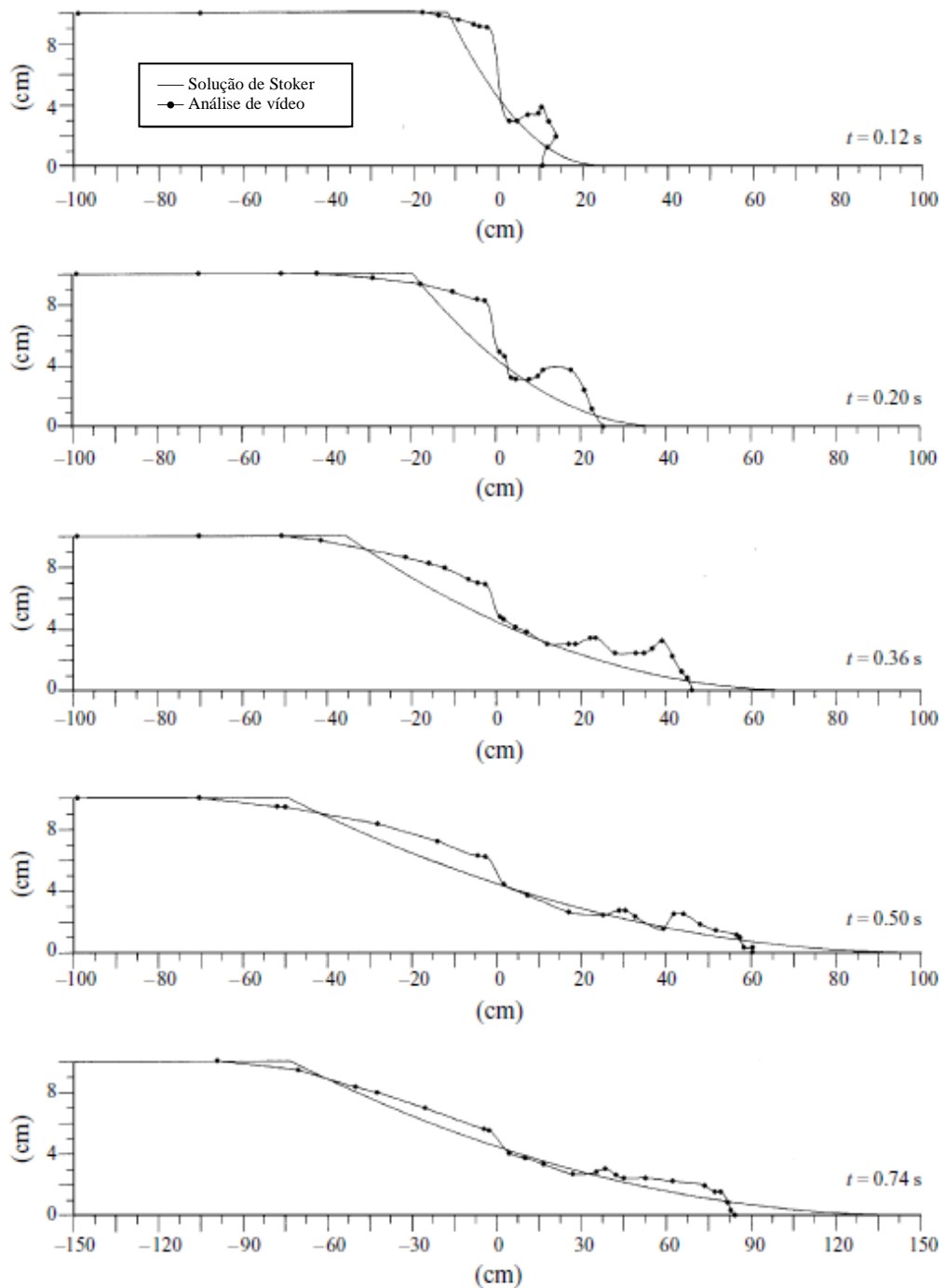


Fonte: adaptado de Espartel, 2015.

Espartel (2015) constatou que quanto menor o nível de água a montante do barramento, mais rápido se chega na condição teórica de ruptura instantânea, que é quando a placa não encosta em nenhum ponto da massa líquida que estava represada. A velocidade da placa entre sua condição de repouso até 1 cm de abertura é influenciada pela quantidade de água a montante, pois quanto maior o nível de água, maior é o empuxo no fundo da placa.

Já Stansby et al. (1998) compararam dados dos experimentos físicos com cálculos analíticos. Nos experimentos, os jatos interagiram com o leito ou a água a jusante de maneira considerada complexa, arrastando ar, mas depois se estabeleceu um perfil geométrico bastante próximo com as soluções analíticas das equações de águas rasas (Figura 15).

Figura 15 – Gráfico com dados experimentais e analíticos a respeito do desenvolvimento da frente de onda, realizado por Stansby et al. (1998).

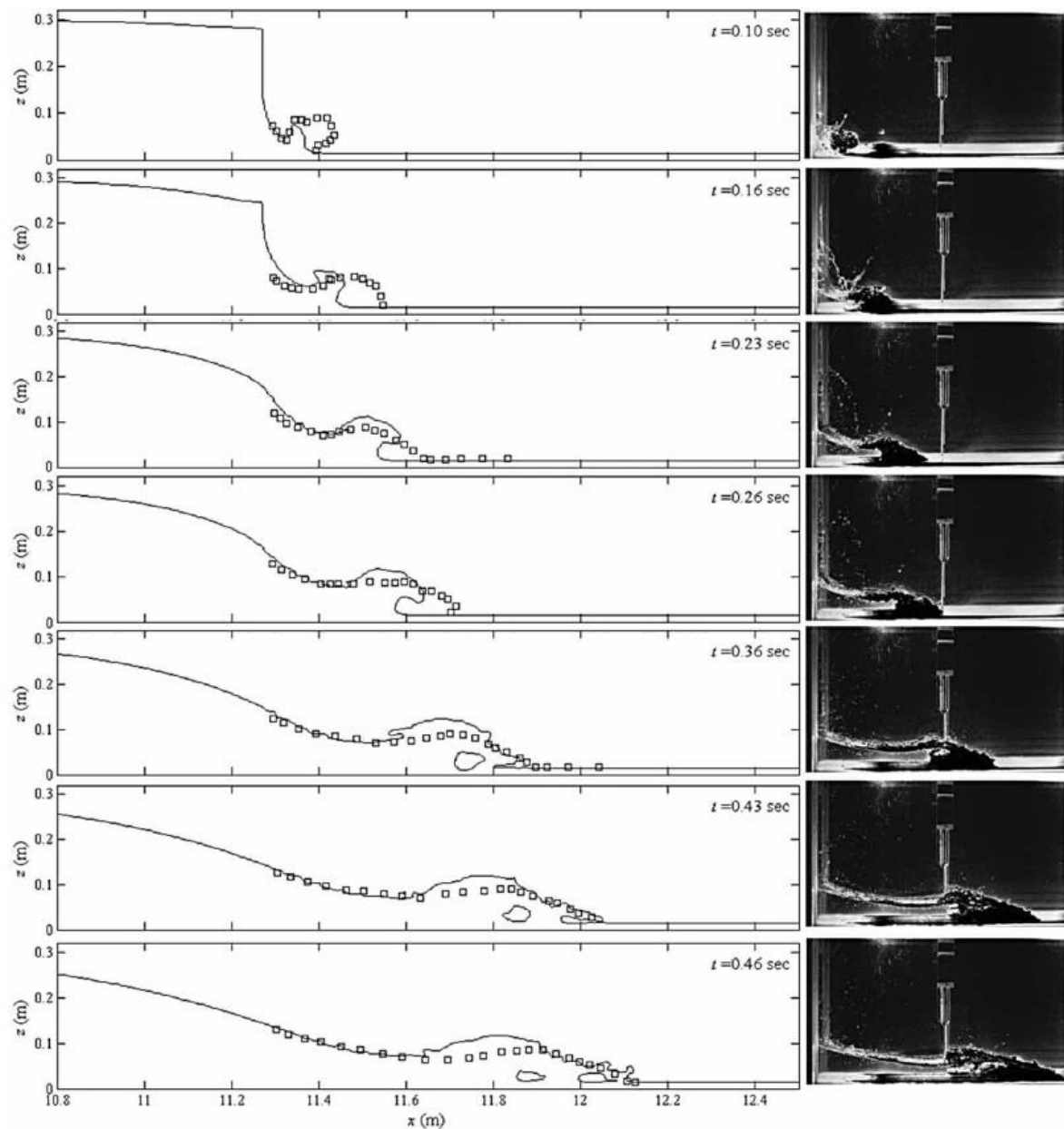


Fonte: Stansby et al., 1998.

Hsu (2014) também descreve a onda de ruptura e mostra uma comparação entre resultados analíticos e físicos (Figura 16). O autor aponta que a propagação de uma onda de ruptura é um transiente e um fluxo de superfície livre não uniforme, com grandes gradientes temporais e espaciais, especialmente no estágio inicial do movimento. Os resultados

experimentais mostram um decréscimo na velocidade da frente de onda. Os resultados numéricos também estão de acordo com essa tendência, mostrando consistência com os resultados experimentais. A onda mais rápida ocorre com o canal praticamente seco a jusante. Em todos os casos, o valor experimental da velocidade da onda de ruptura foi menor que o valor analítico, para um reservatório finito.

Figura 16 – Gráfico com dados analíticos (quadrados dispersos) e experimentais (linha contínua) a respeito do desenvolvimento da frente de onda e comparação com imagem.



Fonte: Hsu, 2014.

O processo de propagação de onda de um rompimento de barragem pode ser descrito em dois diferentes regimes de fluxo. Um regime inicial desenvolvido no primeiro instante após a liberação do barramento. Nessa região, a velocidade da onda é maior se comparada com regiões mais distantes do barramento, em que o aumento da resistência do fundo diminui a velocidade, caracterizando o outro regime de fluxo. A diferença entre esses dois regimes aumenta quanto maior é a profundidade da água a jusante. Dependendo da relação entre a profundidade de água a jusante e a montante, a onda pode comportar-se apenas como um jato horizontal para a frente ou como um jato cogumelo (HSU, 2014).

4.8 COLETA DE INFORMAÇÕES ATRAVÉS DA VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO

O assunto de visualização de escoamento foi revisado por Mansur e Vieira (2004), os autores apontam o sentido da visão como um importante instrumento de análise e destacam que o sucesso de um trabalho científico depende de variados fatores, dentre os quais, três merecem destaque:

- a) escolha adequada de ferramentas capazes de gerar os resultados pretendidos;
- b) correta utilização das técnicas existentes frente à ferramenta de análise escolhida;
- c) interpretação consistente desses resultados, dentro de um determinado contexto.

Ocorre, porém, que a cada nova pesquisa, os fenômenos tratados apresentam um grau de complexidade cada vez maior, exigindo a disponibilidade de muitos dados para permitir estudos conclusivos. Nesses casos, com uma escolha equivocada do instrumento de análise, o tratamento e a avaliação dos resultados obtidos pode se tornar uma tarefa demasiadamente árdua ou, até mesmo, impossível de ser realizada.

Em estudos de laboratório, o uso científico de tratamento de imagens tem se proliferado, tornando-se corriqueiro em muitos ramos das ciências (MANSUR; VIEIRA, 2004). Aliado a isso, o avanço tecnológico tem permitido imagens cada vez mais bem definidas e detalhadas. Balch (1999) atesta que a análise por vídeo, por exemplo, deu aos pesquisadores e engenheiros, uma nova ferramenta à gravação de objetos que se movem rápido, aleatórios na natureza, de grande tamanho ou velocidade.

Dentro dessa linha, Versluis (2012) comenta que especificamente imagens de câmera de alta velocidade têm sido a chave para uma série de descobertas nos mais variados âmbitos de pesquisa. Desde o trabalho pioneiro feito por Muybridge, em 1887, que aplicou em uma corrida de cavalos, passando pelos primeiros estudos de fenômenos hidráulicos realizados por Worthington (1908), que trabalhou com estudos de impactos sólidos e fluidos, até os dias atuais, em que a câmera rápida vem sendo amplamente utilizada na ciência. Guillermo et al. (2014) destacam que o uso de câmeras de alta velocidade pode ser vantajoso se comparado com outras técnicas que exigem aparatos laboratoriais maiores e com maior custo, além do ganho de detalhamento mais completo do fenômeno em tempo real, o qual o olho humano não conseguiria perceber.

Para o estudo de ondas de ruptura geradas em laboratório, essa tendência não foi diferente. Hsu (2014), adquiriu imagens com velocidade tradicional de 30 quadros por segundo para estudar a erosão causada por rupturas de barragem. Já Liu e Liu (2017), ampliaram em 5 vezes essa velocidade e usaram 150 quadros por segundo na comparação de ondas de ruptura em canal seco com ondas em canal com uma lâmina d'água a jusante.

Já Espartel (2015) se dedicou ao estudo da aplicação de câmera de alta velocidade como instrumento para análise de dados de onda de ruptura e, em seus ensaios, chegou a filmar na ordem de 700 e 1200 quadros por segundo o fenômeno da onda de ruptura. Entretanto, o autor acredita que valores acima de 200 quadros por segundo não apresentam ganho significativo na análise dos resultados.

5 APARATO EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentado o aparato utilizado para a realização dos experimentos do evento de rompimento de barragem e da formação da onda de ruptura. Os experimentos foram realizados nas instalações do Núcleo de Estudos de Corrente de Densidade (Necod), localizado no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

5.1 CANAL DE ACRÍLICO

Baseado na bibliografia estudada, optou-se por realizar o experimento em um canal retangular de acrílico sem declividade, com as seguintes dimensões:

- a) largura de 24 centímetros;
- b) altura de 49 centímetros;
- c) comprimento de 6 metros;
- d) espessura das paredes de 1 centímetro.

O canal se constitui em 3 módulos de 2 metros de comprimento, sendo que a construção de cada módulo foi feita a partir de 5 chapas de acrílico transparente de 2 m² cada. Duas paredes são aparafusadas perpendicularmente sobre a base, com um vão de 24 centímetros entre elas. No início, no meio e no fim do módulo foram colocados reforços laterais, através de aparafusamento, espaçados em média de 7 centímetros. O aparafusamento da base nas paredes utilizou um espaçamento de 10 centímetros entre eles. Depois da conclusão dos três módulos separadamente foi necessário uni-los para que juntos formassem o canal propriamente dito.

A Figura 17 apresenta as medidas de um módulo do canal de acrílico e a Figura 18 apresenta o detalhe do acoplamento entre os módulos, com aparafusamento e borracha para vedação.

Figura 17 – Canal de acrílico, medidas referentes a um módulo de 2 metros.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 18 – Detalhe do acoplamento entre os módulos que formam o canal de acrílico.



Fonte: elaborado pelo autor.

A montante do primeiro módulo foi aparafusada uma placa de 0,50 x 0,32 metros, para servir de fechamento do mesmo, permitindo o seu enchimento até o topo. Nesse acoplamento, foi instalada uma camada de borracha com espessura de um centímetro, com o intuito de vedar o canal, uniformizando possíveis descontinuidades do acrílico (Figura 18). A união do módulo do meio com o inicial e final se dá através de aparafusamento, com camada de borracha e um reforço superior também de acrílico. A jusante do canal, na extremidade de saída, foi colocada uma pequena placa de altura variada, de forma que seja possível criar níveis variados a jusante do barramento e que não bloqueie completamente a onda de ruptura, conforme apresentado na Figura 19.

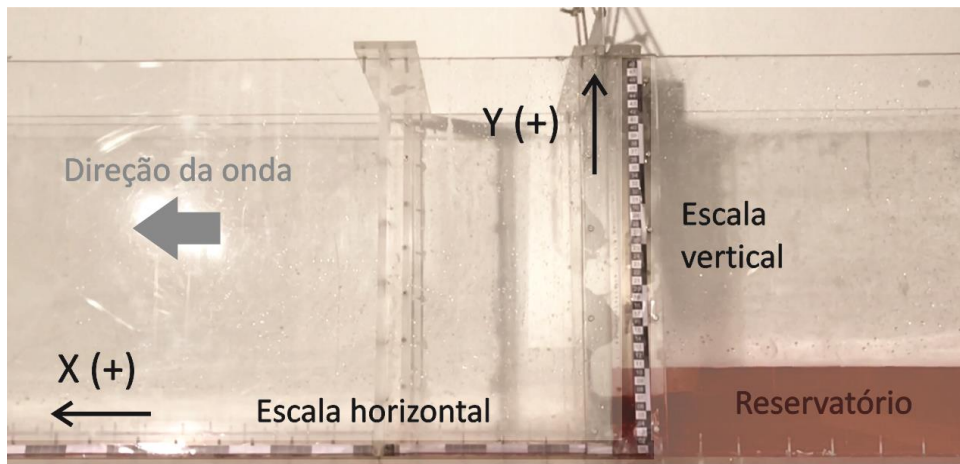
Figura 19 – Fim do canal de acrílico com placa de altura variada aparafusada e vedação em borracha.



Fonte: elaborado pelo autor.

Por fim, foi inserida uma escala horizontal (de 5 em 5 centímetros), no eixo considerado X e uma escala vertical de (1 em 1 centímetro), no eixo considerado Y, conforme Figura 20. O intuito das escalas são facilitar a forma de medir as grandezas físicas da onda de ruptura.

Figura 20 – Escalas colocadas nos eixos X e Y do canal.



Fonte: elaborado pelo autor.

5.2 BARRAMENTO E ACIONAMENTO DE PLACA

A barragem é simulada através de uma placa metálica, plana e retangular, cujas medidas são de 0,24 x 0,60 metros, com espessura de 3 milímetros (Figura 21).

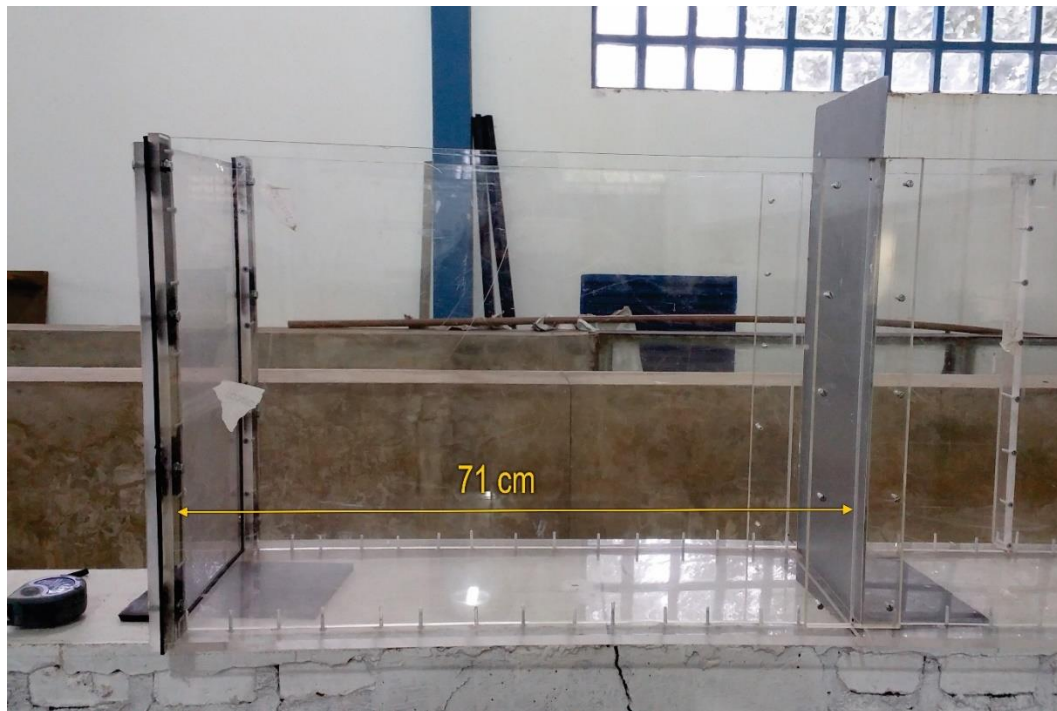
Figura 21 – Placa metálica que funciona como barramento do canal.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para melhor estabilidade da placa na sua retirada, foram feitas ranhuras verticais no acrílico do canal, que servem como guia durante o seu deslizamento. A placa foi posicionada à 71 centímetros do início do canal (Figura 22), gerando um reservatório a montante cujo volume máximo equivale a aproximadamente 84 litros.

Figura 22 – Distanciamento entre o início do canal e a placa metálica, formando o reservatório de montante.

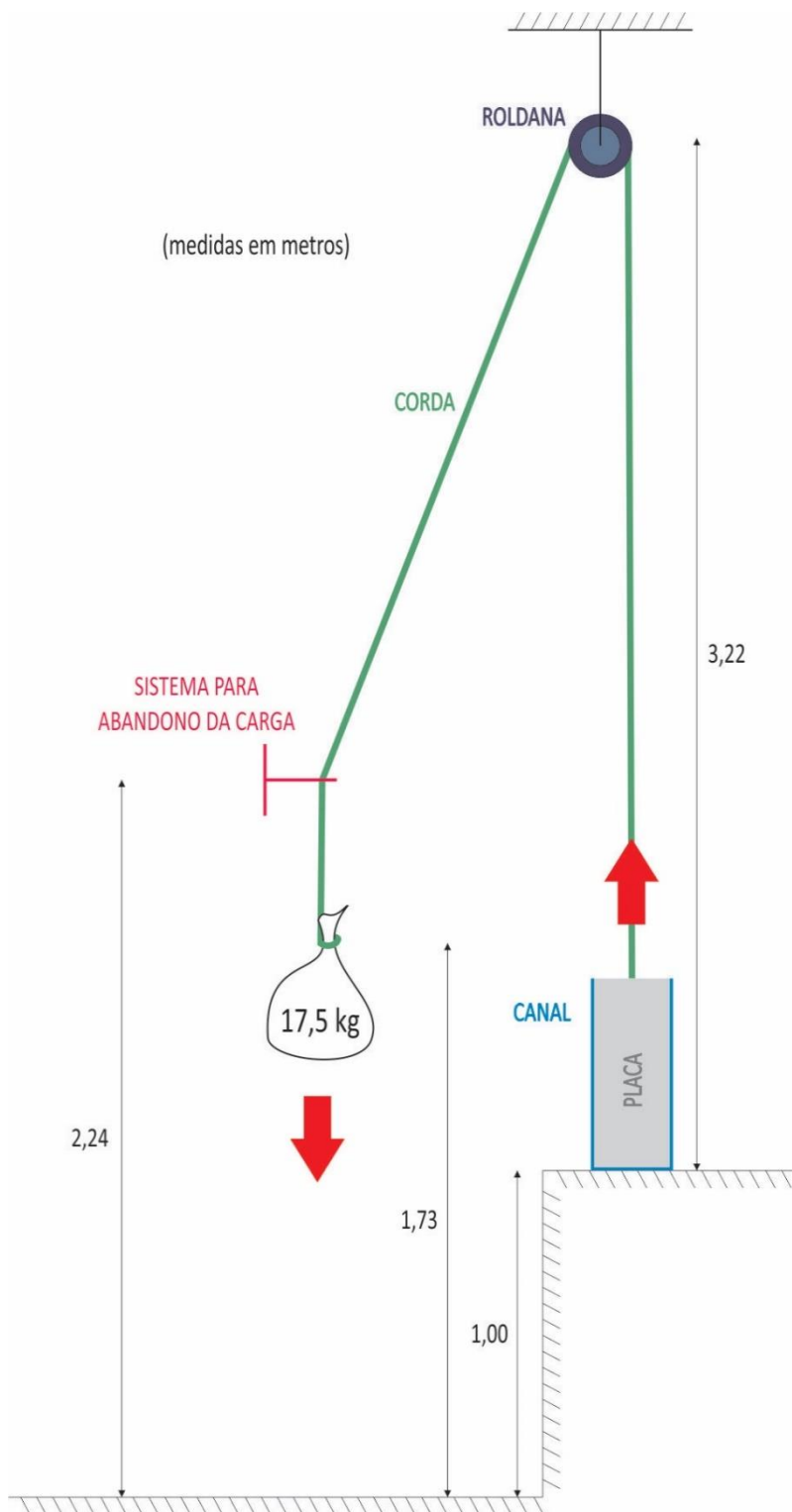


Fonte: elaborado pelo autor.

A simulação da falha ou ruptura da barragem se dá através da retirada da placa, liberando o fluxo de água para jusante. A situação ideal era que a retirada fosse instantânea, pois representaria a pior situação possível de ruptura de uma barragem. Espartel (2015) utilizou um sistema manual de remoção da placa, que demorava entre 0,10 e 0,16 segundo – ainda assim, considerado lento em comparação com a velocidade do fenômeno hidráulico. Dentro desta linha de raciocínio foi proposto um sistema de peso, corda e roldanas para aumentar a velocidade de remoção. Esse mecanismo de ruptura funcionava da seguinte forma: Através de uma corda, a placa era conectada a uma roldana que ficava 3,20 metros acima do fundo do canal. Essa roldana era acionada pelo abandono de uma massa de areia com 17,5 quilos, a uma altura de 3 metros, em queda livre. O movimento da placa começava após o estiramento completo da corda. O peso encontrava-se distante 1,73 metros do solo. O movimento da placa liberava o fluxo no

reservatório de montante (formação da onda de ruptura). A Figura 23 representa o mecanismo de retirada da placa.

Figura 23 – Croqui do sistema de retirada da placa, simulando a ruptura da barragem.



Fonte: elaborado pelo autor.

5.3 REGISTRO DE IMAGEM E VÍDEO DA ONDA DE RUPTURA

Os aparatos utilizados para realizar as filmagens e fotos das ondas de ruptura foram dois *Ipads*. O *Ipad* é um computador portátil, conhecido como *tablet*, fabricado pela empresa *Apple*. Para aquisição e registro dos vídeos, a câmera conta com as configurações apresentadas na Tabela 4. A escolha por esse equipamento se deu pela facilidade de manuseio, operação e tratamento de dados sem perder qualidade para realização de filmes em alta velocidade, uma vez que o equipamento registra até 240 quadros por segundo. Essa taxa foi considerada adequada para a correta percepção das grandezas aqui analisadas. Um aumento dessa taxa de quadros não agrega no detalhamento do fenômeno, que apesar de ser muito rápido, possui um desfecho de fácil identificação, mais quadros acabariam por ser redundantes, além de necessitar de aparatos mais complexos e pouco usais. Em Espartel (2015), as análises realizadas com registros de 700 a 1200 quadros por segundos, não necessitaram utilizar todos os quadros disponíveis para chegar a conclusões sobre formato e velocidade da onda.

Tabela 4 – Configurações da câmera *Ipad*.

câmera	8 megapixels (imagem formada por 8 milhões de pixels)
foco	ajuste automático
controle de exposição	ajuste automático da exposição de luz para a foto ou filmagem ⁸
abertura	f/2,4 ⁹
taxa de quadros	240 quadros por segundo

Fonte: elaborado pelo autor.

⁸ O dispositivo tira várias fotos com diferentes tempos de exposição. Em um único disparo, são registradas fotos superexpostas (ou seja, com muita luz), subexpostas (pouca luz) e com exposição média. Em seguida as imagens são combinadas, de maneira que a fotografia final é a junção da melhor exposição para as áreas com luz e para as áreas de sombra.

⁹ A medida da abertura, é calculada pelo comprimento focal (f) dividido pelo diâmetro da abertura; quanto maior for a abertura, maior será a capacidade de captar luz. Por exemplo, uma câmera com abertura f/1,7 recebe mais luz do que uma com f/2,8. Outra vantagem de aberturas maiores é mais velocidade para o obturador, isso se traduz em mais precisão na captura de cenas em movimento, que podem ficar borradas caso o tempo de exposição seja longo demais.

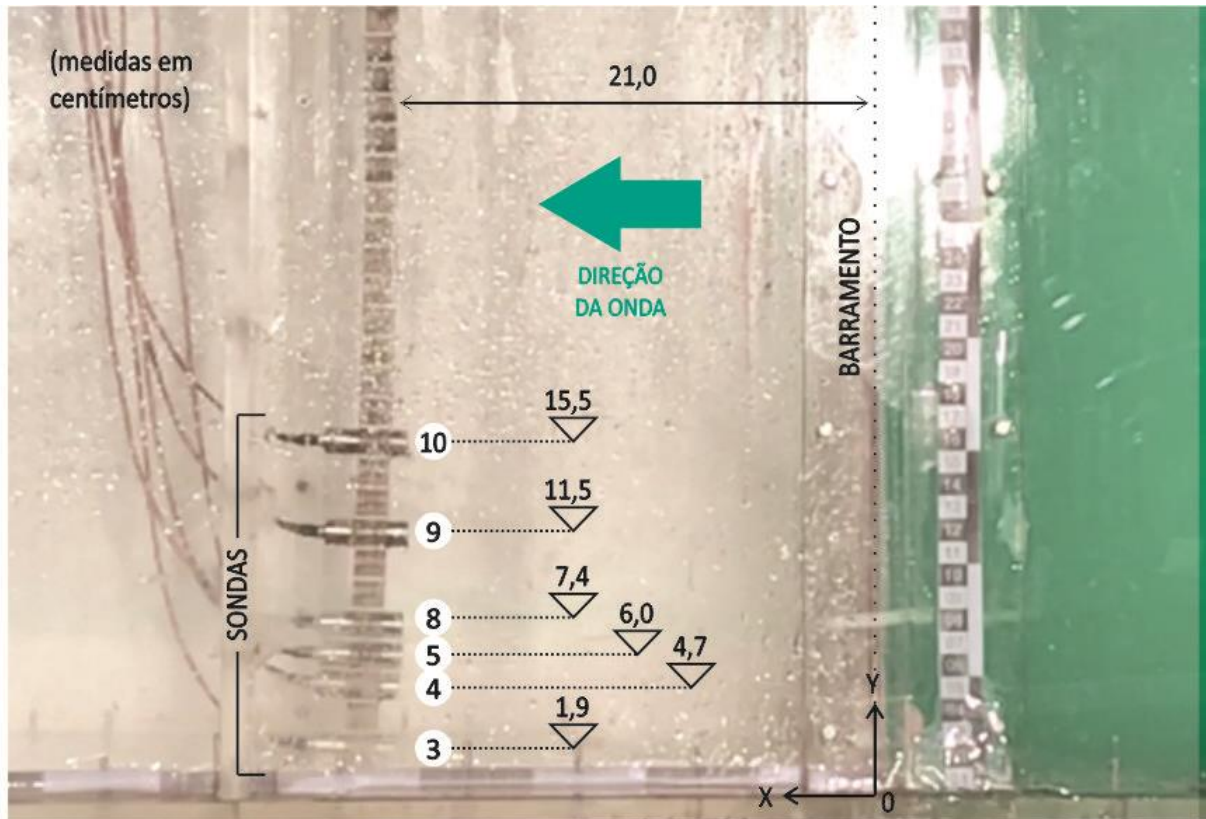
5.4 MEDIDOR DE VELOCIDADE UVP (ULTRASONIC VELOCITY PROFILER)

Para a realização das medidas alternativas de propriedades cinemáticas da onda de ruptura, foi utilizado o *UVP (Ultrasonic Velocity Profiler)*, o qual é um velocímetro acústico de alta precisão que mede a velocidade da água em duas dimensões. O funcionamento das sondas ultrassônicas parte do princípio do efeito *Doppler*, que consiste na diferença entre as frequências sonoras emitidas e lidas (MANICA, 2009). O *UVP* envia um pulso acústico curto a partir de um transmissor, quando esse pulso atravessa o ponto de foco dos feixes receptores, o eco é gravado em cada receptor acústico. O eco é então processado para encontrar o efeito *Doppler*, a escala é ajustada com a medição da velocidade do som no líquido, (para o qual se deve medir a temperatura) e o vetor de velocidade é registrado na memória interna ou transmitido para um computador em taxa acelerada.

As sondas *UVP* funcionam em conjunto com um console e um computador externo, enquanto as sondas emitem os pulsos sonoros e os leem, o console realiza as medidas, transformando as leituras em resultados. Por último, o computador contém o software, o qual possui todo o controle sobre o equipamento e realiza a análise sobre as informações coletadas. O Necod possui cinco tipos de sondas, trabalhando nas frequências emitidas: 0,5; 1; 2; 4 e 8 megaHertz. As sondas podem realizar medidas de velocidade em diversos pontos na direção do seu eixo e com o cruzamento de duas ou mais sondas, é possível obter medidas bi e tridimensionais. (FERREIRA, 2013). Nesse trabalho foram utilizadas 6 sondas de 2 megaHertz cada, posicionadas a 21 centímetros do barramento, com o intuito de medir a velocidade com que a onda se desenvolve em seus estágios iniciais. A Figura 24 apresenta o posicionamento de cada sonda e sua numeração¹⁰.

¹⁰ A numeração das sondas é dada em função da disposição dos canais no aparelho medidor, os canais #1, #2, #6 e #7 são desconsiderados.

Figura 24 – Instalação do UVP, altura de cada sonda e distância da placa metálica.



Fonte: elaborado pelo autor.

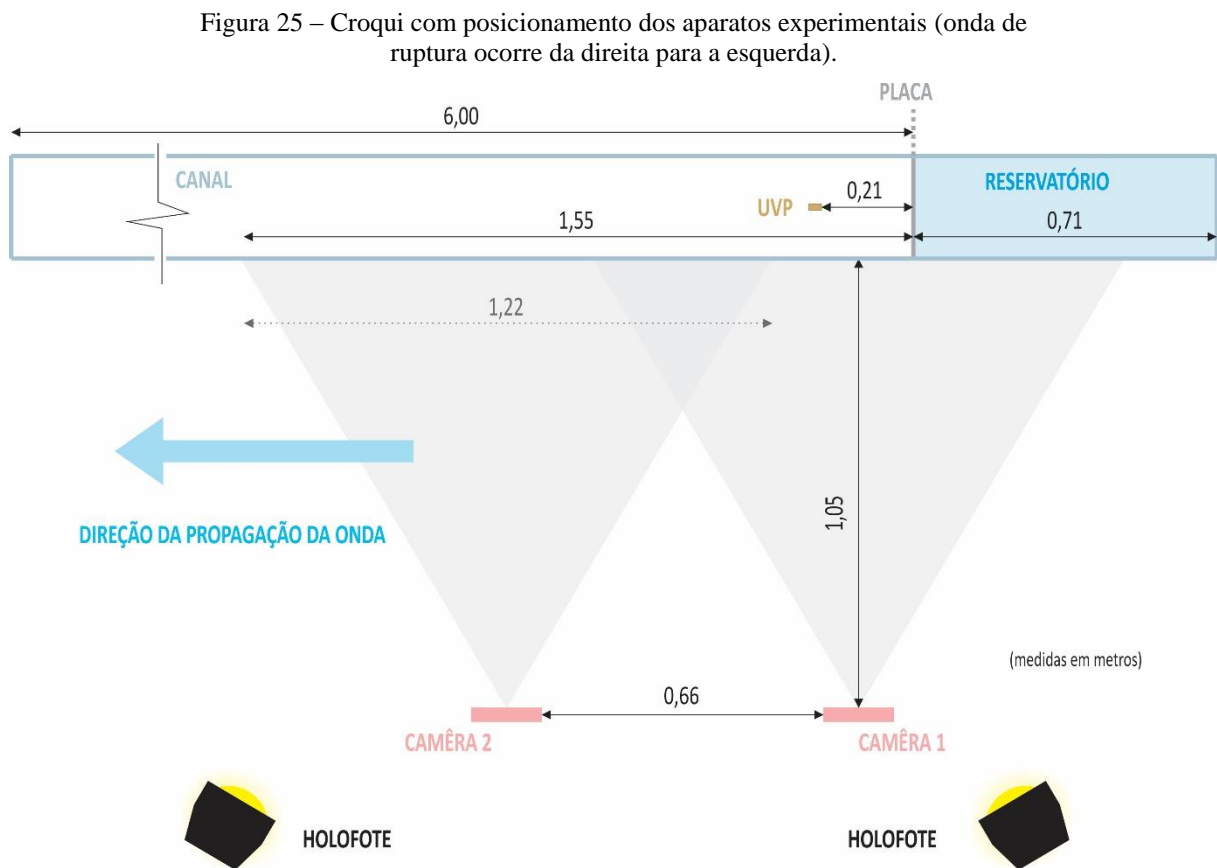
5.5 DEMAIS EQUIPAMENTOS

Para realização dos ensaios também foram necessários dois holofotes de luz incandescente de 1000 Watts cada, para se obter a iluminação necessária às filmagens. Além disso, também foi utilizado um aparato de sustentação construído em laboratório para posicionar a câmera. Termômetros para conferência da temperatura da água e assim poder calcular corretamente seu peso específico e viscosidade.

6 METODOLOGIA

6.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O experimento para simular a ruptura da barragem inicia com o posicionamento dos equipamentos de filmagem, dos quais fazem parte: câmeras sobre um aparato de sustentação e dois holofotes. As duas câmeras de vídeo, modelo *Ipad*, utilizadas para a filmagem dos ensaios são posicionadas a uma distância de 1 metro do canal (Figura 25).



Fonte: elaborado pelo autor.

A câmera 1 tem seu eixo alinhado perpendicularmente ao canal, enquanto que a câmera 2 é locada a 66 centímetros da primeira câmera, gerando uma abrangência de filmagem que cobre aproximadamente 2 metros do canal. Nos ensaios em que se optou pela utilização do *UVP*, 6 sensores de 2 megaHertz foram colocados a 21 centímetros da placa. Para melhor

visualização dos ensaios, dois holofotes de 1000 Watts cada, foram instalados a 3,5 metros do canal.

Após o posicionamento dos equipamentos, foi colocada vaselina nas laterais e no fundo da placa metálica (barramento) com o intuito de estancar a passagem de água pelas laterais da placa e facilitar o seu movimento no processo de retirada. Então, o canal foi preenchido com água até os níveis escolhidos para cada ensaio. Caso o cenário fosse com uma lâmina de água a jusante, era adaptado o seguinte procedimento: primeiro o canal era preenchido até alcançar o nível de jusante desejado, após, era instalada a placa retangular e continuava-se enchendo apenas o lado a montante, até o nível água no barramento escolhido. Para facilitar a identificação da interação entre as massas líquidas de água a montante e a jusante, eram aplicados corantes verde e vermelho alternadamente a cada ensaio¹¹.

Para simular uma onda de ruptura instantânea, se retirava a placa metálica, através do sistema de roldanas, apresentado no item 5.2, as guias garantiam a retirada perpendicularmente ao fluxo de água. Após a retirada da mesma, que represava a coluna de água, não havia mais nada que evitasse o desenvolvimento e a progressão da onda de ruptura.

Devido ao fato de estar acumulando energia potencial junto ao barramento, o seu rompimento resultava na formação brusca de uma onda rápida. Para registrar este fenômeno que acontecia na ordem dos segundos, foram realizadas baterias de filmagens com as duas câmeras de vídeo¹². A metodologia de ensaio é descrita passo a passo no que segue, após apresentação da Figura 26.

¹¹ De modo a racionalizar o uso da água e facilitar a operação dos ensaios, alternou-se as cores dos corantes a montante e a jusante, isto é, se em um primeiro ensaio o reservatório de montante está vermelho e a lâmina a jusante verde, depois que a ruptura acontece, a lâmina a jusante é invadida pelo vermelho e assim, no ensaio seguinte, basta adicionar verde na água que está enchendo o reservatório para novamente ter duas cores diferentes a jusante e a montante do barramento. Se a opção tivesse sido por manter sempre a mesma cor a montante e a jusante da placa, seria necessário trocar toda a água do canal a cada ensaio, a alternância de cores possibilitou economizar, em torno de 22.000 litros de água.

¹² I pads, ver item 5.3, na página 47.

Figura 26 – Registros das diferentes fases da metodologia do ensaio.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 26a registra todos os aparatos utilizados no ensaio, a placa metálica (barragem) está ligada através de uma corda e uma roldana a um peso (lastro) de 17,5 quilos. O experimento era filmado por uma câmera de vídeo *Ipad* e iluminado pelos holofotes de 1000 Watts. No momento em que o peso era abandonado, a corda conectada à placa estava completamente sem

tensão (Figura 26b). A queda do peso afetava primeiro a corda, tensionando-a, e depois a placa. Ainda antes de efetivamente retirar a placa, a corda se tensionava (Figura 26c). Isso garantia que a mesma era aberta com uma velocidade maior, pois quanto maior o tempo de queda do peso, maior sua velocidade, devido a ação da aceleração gravitacional.

Na Figura 26d é possível perceber que depois da corda estar completamente tensionada, a placa rapidamente entrava em movimento vertical, proporcionando o desprendimento da placa da massa líquida e assim a onda de ruptura começava a se formar. A Figura 26e mostra a continuidade do experimento e a placa atingindo uma altura de aproximadamente 3 metros. Nesse curto tempo a onda já começava a avançar também. O último quadro (Figura 26f) configura o fim do ensaio, pois a frente de onda não está mais na área de abrangência da filmagem.

6.2 PLANO DE ENSAIOS

A fim de cumprir os objetivos propostos nesta dissertação, foram realizadas quatro séries de ensaios, totalizando 89 experimentos, as quais serão discriminadas nos próximos itens.

6.2.1 Série 01: velocidade de retirada da placa

A primeira série de ensaios teve como objetivo analisar qual a forma mais rápida de retirar a placa de metal, dentre duas configurações de liberação do lastro (peso morto). Isso é, mensurar o tempo que a placa levava para abrir completamente, verificando se a premissa de movimento instantâneo estava sendo satisfeita. As duas configurações de retirada da placa metálica foram as seguintes:

- a) configuração 1: peso de 17,5 kg de areia era vinculado, através de uma roldana, à placa. O peso era abandonado a uma altura de 1,4 metros e esse movimento gerava a abertura da placa.
- b) configuração 2: peso de 17,5 kg de areia era vinculado, através de uma roldana, à placa. O peso era abandonado a uma altura de 1,73 metros e só movimentava a placa após o estiramento completo da corda, o que significa uma velocidade maior no movimento.

Essa série de ensaios de filmagens foi registrada apenas pela câmera 1, e não necessitou de corante nas massas líquidas. Ao todo foram realizados 21 ensaios para avaliar esse parâmetro conforme apresenta a Tabela 5. A quinta coluna da tabela “Código”, indica como serão

nomeados os ensaios, por exemplo: B1-M20-J0-3, em que a sigla *B1* indica a 1ª série de ensaios (Bateria de ensaios), a sigla *M20* indica 20 centímetros de água a Montante (reservatório), a sigla *J0*, indica 0 centímetros de água a Jusante (canal) e o #3 indica o número do ensaio realizados naquela configuração (no caso, a terceira repetição).

Tabela 5 – Plano da primeira série de ensaios: velocidade de abertura.

Nº	NA Montante (cm)	NA Jusante (cm)	Repetições	Código	Configuração
1	41	0	1	B1-M41-J0-1	1
2			2	B1-M30-J0-1	1
3				B1-M30-J0-2	1
4		0		B1-M30-J0-3	2
5			4	B1-M30-J0-4	2
6	30			B1-M30-J0-5	2
7				B1-M30-J0-6	2
8				B1-M30-J4-1	2
9		4	3	B1-M30-J4-2	2
10				B1-M30-J4-3	2
11			2	B1-M20-J0-1	1
12				B1-M20-J0-2	1
13	20	0		B1-M20-J0-3	2
14			4	B1-M20-J0-4	2
15				B1-M20-J0-5	2
16				B1-M20-J0-6	2
17			1	B1-M10-J0-1	1
18				B1-M10-J0-2	2
19	10	0		B1-M10-J0-3	2
20			4	B1-M10-J0-4	2
21				B1-M10-J0-5	2

Fonte: elaborado pelo autor.

6.2.2 Série 02: ensaio de onda de ruptura livre

A segunda série de filmagem foi batizada com esse nome pelo fato de não existir nenhum aparato de medição a jusante que causasse uma interferência na onda de ruptura formada após a liberação da placa, possibilitando que ela se desenvolvesse livremente, apenas confinada pela própria estrutura (paredes) do canal. Para esta série foram utilizadas as duas câmeras de vídeo, visando registrar tanto a formação inicial da onda, junto à placa, quanto o seu desenvolvimento até aproximadamente 2 metros de canal.

Ao total, compuseram esta segunda série 38 ensaios (expostos na Tabela 6), variando o nível de montante em 10, 20 e 40 centímetros, enquanto o nível de jusante variou entre 0, 2, 4 e 8 centímetros. A escolha desses níveis possibilita verificar se a proporcionalidade dos níveis de montante e jusante reflete no desenvolvimento e formação da onda.

6.2.3 Série 03: onda de ruptura com medições do UVP

A terceira série foi similar a segunda, se diferenciando pela instalação de um medidor de velocidade UVP, a 21 centímetros da placa. Essa série de ensaios tinha o intuito de obter uma segunda fonte de dados da velocidade do escoamento, medida dentro da corrente de água.

Compuseram a terceira série 27 ensaios (expostos na Tabela 7), variando o nível de montante em 10, 20 e 40 centímetros, enquanto o nível de jusante variou entre 0, 4 e 8 centímetros. Destaca-se a supressão dos ensaios com linha d'água de 2 centímetros a jusante, eles não foram realizados em função de serem o menor nível a jusante, como o UVP necessita estar com a sonda em meio aquoso para a correta medição, essa série de ensaios resultaria em dados com baixa confiabilidade.

Um objetivo secundário dessa série, era averiguar como a onda se comporta com a interferência parcial causada pela instalação das sondas, por isso o ensaio com canal seco a jusante foi mantido.

Tabela 6 – Plano da segunda série de ensaios: onda de ruptura livre. Total de 38 ensaios.

Nº	NA Montante (cm)	NA Jusante (cm)	Repetições	Código	
22	40	0	4	B2-M40-J0-1	
23				B2-M40-J0-2	
24				B2-M40-J0-3	
25				B2-M40-J0-4	
26		2	3	B2-M40-J2-1	
27				B2-M40-J2-2	
28				B2-M40-J2-3	
29		4	4	B2-M40-J4-1	
30				B2-M40-J4-2	
31				B2-M40-J4-3	
32				B2-M40-J4-4	
33		8	3	B2-M40-J8-1	
34				B2-M40-J8-2	
35				B2-M40-J8-3	
36		20	0	3	B2-M20-J0-1
37					B2-M20-J0-2
38	B2-M20-J0-3				
39	2		3	B2-M20-J2-1	
40				B2-M20-J2-2	
41				B2-M20-J2-3	
42	4		3	B2-M20-J4-1	
43				B2-M20-J4-2	
44				B2-M20-J4-3	
45	8		3	B2-M20-J8-1	
46				B2-M20-J8-2	
47				B2-M20-J8-3	
48	10		0	3	B2-M10-J0-1
49					B2-M10-J0-2
50					B2-M10-J0-3
51			2	3	B2-M10-J2-1
52		B2-M10-J2-2			
53		B2-M10-J2-3			
54		4	3	B2-M10-J4-1	
55				B2-M10-J4-2	
56				B2-M10-J4-3	
57		8	3	B2-M10-J8-1	
58				B2-M10-J8-2	
59				B2-M10-J8-3	

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 7 – Plano da terceira série de ensaios: onda de ruptura com o UVP. Total de 27 ensaios.

Nº	NA Montante (cm)	NA Jusante (cm)	Repetições	Código
60				B3-M40-J0-1
61		0	3	B3-M40-J0-2
62				B3-M40-J0-3
63				B3-M40-J4-1
64	40	4	3	B3-M40-J4-2
65				B3-M40-J4-3
66				B3-M40-J8-1
67		8	3	B3-M40-J8-2
68				B3-M40-J8-3
69				B3-M20-J0-1
70		0	3	B3-M20-J0-2
71				B3-M20-J0-3
72				B3-M20-J4-1
73	20	4	3	B3-M20-J4-2
74				B3-M20-J4-3
75				B3-M20-J8-1
76		8	3	B3-M20-J8-2
77				B3-M20-J8-3
78				B3-M10-J0-1
79		0	3	B3-M10-J0-2
80				B3-M10-J0-3
81				B3-M10-J4-1
82	10	4	3	B3-M10-J4-2
83				B3-M10-J4-3
84				B3-M10-J8-1
85		8	3	B3-M10-J8-2
86				B3-M10-J8-3

Fonte: elaborado pelo autor.

6.2.4 Série 04: complemento da série 2 para comparação com equação teórica

Conforme aponta a Figura 9, do item 4.5.2, a equação teórica aplicada nessa pesquisa foi desenvolvida para ondas com o canal seco a jusante e as séries de ensaios anteriores possuíam ensaios com níveis de montante em 40, 20 e 10 centímetros para o canal seco a jusante (M40-J0, M20-J0 e M10-J0). De forma a aumentar a gama de dados medidos para serem comparados com os teóricos, foi realizada uma pequena série de ensaios complementar com nível de montante em 5 centímetros e canal seco a jusante, conforme mostra a Tabela 8.

Tabela 8 – Plano da quarta série de ensaios: complemento para comparação com equação teórica. Total de 3 ensaios.

Nº	NA Montante (cm)	NA Jusante (cm)	Repetições	Código
87				B2-M5-J0-1
88	5	0	3	B2-M5-J0-2
89				B2-M5-J0-3

Fonte: elaborado pelo autor.

6.3 TRATAMENTO DE DADOS

Este item explana a forma como os dados coletados dos experimentos foram tratados para permitir a interpretação dos resultados.

6.3.1 Extração dos quadros do vídeo para arquivos digitais individuais

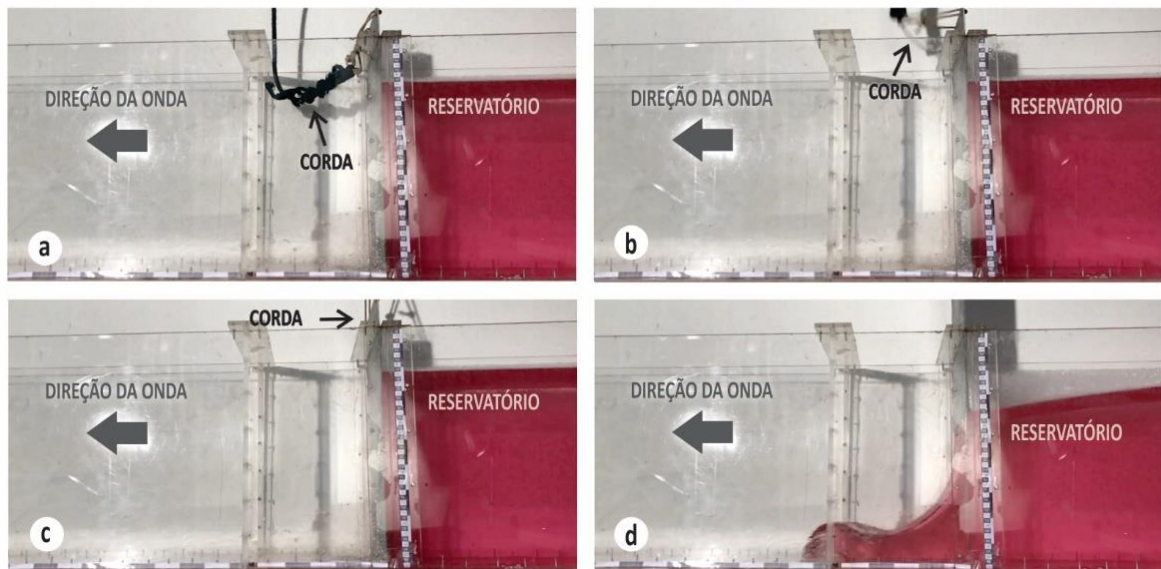
O primeiro passo no tratamento dos dados é realizar a separação dos quadros registrados em vídeo pela câmera rápida. Para tal, utilizou-se o *software Virtualdub*, programa de código aberto que processa e edita vídeos de variados propósitos (VIRTUALDUB, 2019). Empregou-se a opção direta de importar um vídeo e exportar todos seus quadros. Através do *Virtualdub* é possível carregar um arquivo em formato de vídeo (foram utilizados arquivos com a extensão *.mov*) e exportar todos os quadros que compõem o vídeo, através dos comandos *file > export > image sequence*. Essas ações geram um conjunto de arquivos digitais (imagens individuais) em formato *.jpeg*.

6.3.2 Determinação de início de movimento da onda de ruptura

O momento do início do movimento da onda de ruptura foi determinado pela análise visual das filmagens do experimento, através da identificação do quadro imediatamente anterior ao quadro em que a placa começa a deslizar para cima. No processo de análise das imagens, quadro a quadro, o primeiro item que se destaca é a corda sem tensão, demonstrando que ainda não ocorreu o deslocamento de massa para levantamento da placa (Figura 27a).

Ao avançar na investigação, atenta-se à movimentação da corda, esse é o prenúncio de que a placa está próxima de ser içada (Figura 27b). No momento em que a corda se encontra completamente tensionada é possível identificar a placa se movendo verticalmente, e o quadro imediatamente anterior a esse movimento é considerado o início da onda de ruptura. Detalhes como: o movimento de gotas ou reflexos da placa colaboram para facilitar essa identificação. Na imagem a seguir, a Figura 27c é o quadro considerado o tempo zero para a onda B2-M40-J0. A Figura 27d expõe a onda fluindo após o movimento de ruptura já ter iniciado.

Figura 27 – Determinação do início do movimento da onda de ruptura.



Fonte: elaborado pelo autor.

6.3.3 Quantificação de tempo e da velocidade da onda de ruptura através das filmagens

A capacidade de registro das câmeras utilizadas nesta pesquisa foi de 240 quadros por segundo, isso significa que entre um quadro e outro havia o intervalo de 0,0042 segundos. Assim, para calcular qualquer intervalo de tempo entre dois momentos distintos, basta multiplicar a diferença de número de quadros por 0,0042 segundos.

Conforme exposto na Figura 20, ao longo de todo o canal experimental foram inseridas escalas de comprimento, tanto na horizontal quanto na vertical, com o objetivo de auxiliar as medições. Dessa forma, foi possível detectar o posicionamento da frente de onda ou altura da crista nos eixos X e Y. Ao dividir a distância que a onda percorreu pelo tempo decorrente da diferença de quadros, obteve-se a velocidade de avanço da onda de ruptura. Nessa pesquisa, a velocidade que a onda avança é abordada através de dois vieses, velocidade média e velocidade por trecho.

A velocidade média é calculada sempre a partir do repouso, ou seja, divide-se o quanto a onda se deslocou desde o início do movimento pela quantidade de tempo despendida. Por exemplo, se a onda, partindo do repouso, percorreu 20 centímetros em 0,21 segundos, sua velocidade média é:

$$\text{Velocidade média} \rightarrow 0,20 \text{ m} / 0,21 \text{ s} = 0,95 \text{ m/s}$$

Na sequência do seu movimento, a onda atingiu 40 centímetros em 0,36 segundos, então a velocidade média da onda se tornou:

$$\text{Velocidade média} \rightarrow 0,40 \text{ m} / 0,36 = 1,11 \text{ m/s.}$$

Enquanto na velocidade por trecho, para analisar como a velocidade da onda se desenvolve até chegar em 0,40 metros, divide-se o deslocamento em trechos menores e é realizada uma análise individualizada de cada trecho. Utilizando o exemplo anterior, para chegar em 20 centímetros de deslocamento, a onda necessitou 0,21 segundos, portanto, para chegar em 40 centímetros foi necessário 0,36 segundos. Então, a velocidade da onda no trecho 20-40 é de:

$$\text{Velocidade por trecho 20-40} \rightarrow (0,40 - 0,20) / (0,36 - 0,21) = 1,33 \text{ m/s.}$$

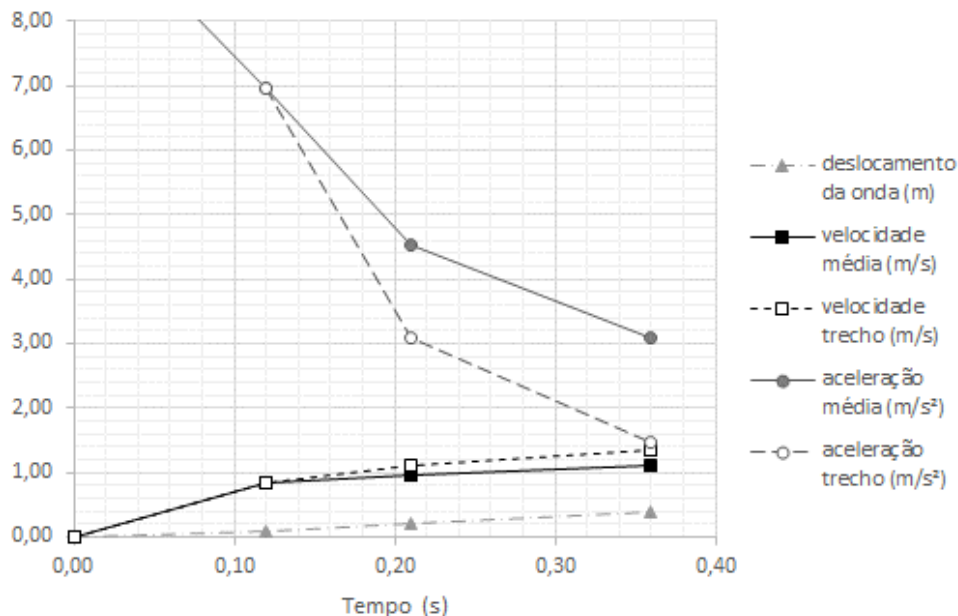
A Tabela 9 e a Figura 28 exemplificam o método de cálculo utilizado para a velocidade média, velocidade por trecho¹³, aceleração média e aceleração por trecho e suas formas de apresentação gráfica.

Tabela 9 – Exemplo do método de cálculo da velocidade da onda, tanto para velocidade média quanto para velocidade por trecho.

Deslocamento da onda (m)	Tempo (s)	Velocidade média (m/s)	Velocidade por trecho (m/s)	Aceleração média (m/s ²)	Aceleração por trecho (m/s ²)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,10	0,12	0,10 / 0,12 = 0,83	(0,10 – 0,00) / (0,12 – 0,00) = 0,83	0,83 / 0,12 = 6,95	(0,83 – 0,00) / (0,12 – 0,00) = 6,95
0,20	0,21	0,20 / 0,21 = 0,95	(0,20 – 0,10) / (0,21 – 0,12) = 1,11	0,95 / 0,21 = 4,54	(1,11 – 0,83) / (0,21 – 0,12) = 3,09
0,40	0,36	0,40 / 0,36 = 1,11	(0,40 – 0,20) / (0,36 – 0,21) = 1,33	1,11 / 0,36 = 3,09	(1,33 – 1,11) / (0,36 – 0,21) = 1,48

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 28 – Exemplo de representação das velocidades e acelerações da onda de ruptura.



Fonte: elaborado pelo autor.

¹³ Destaca-se que a velocidade por trecho não deixa de ser uma média, mas de uma faixa menor de valores de velocidades.

6.3.4 Tratamento de imagens via aplicativo *Plot Digitizer*

O *Plot Digitizer* é um aplicativo que permite converter uma imagem em uma matriz de coordenadas, através de um método simplificado: primeiramente, seleciona-se uma imagem e marca-se a origem de um eixo cartesiano; depois, marca-se um ponto positivo conhecido no eixo horizontal e outro ponto positivo no eixo vertical. Tendo esses três pontos iniciais, forma-se a base da matriz de coordenadas, e então, basta marcar quaisquer pontos na imagem que o *software* identifica as coordenadas [X,Y] e exporta diretamente para uma planilha eletrônica.

Nesta dissertação, essa metodologia foi utilizada para identificar a linha d'água da onda de ruptura, em diferentes momentos, transformando a imagem em dados de uma planilha de cálculo. Para identificar o formato geométrico da onda de ruptura, inicialmente, foram definidos os pontos de base a partir das escalas horizontais (eixo X) e verticais (eixo Y) colocadas no canal. Depois, adicionaram-se pontos em todos os momentos que a linha d'água sofreu uma mudança de declividade. A Figura 29 mostra uma onda de ruptura com a sua malha de pontos sobreposta (traçado amarelo) e as coordenadas dos pontos nos eixos cartesianos, identificando a linha d'água.

Figura 29 – Exemplo de identificação da linha d'água da onda de ruptura utilizando o aplicativo *Plot Digitizer*.



Fonte: elaborado pelo autor.

Também foi testada a utilização do software Matlab para a identificação do formato da onda de forma automatizada, porém os resultados ficaram aquém do necessário para consolidação da pesquisa. A forma de desenvolvimento e os resultados iniciais são apresentadas no apêndice C.

6.3.5 Identificação de hidrograma de nível

Hidrograma é um gráfico representativo da variação no tempo de diversas observações hidrológicas, tal como: vazão, nível de água, velocidade, entre outros. (WATSON; BURNETT, 1995). A presente pesquisa se propõe a analisar o hidrograma de nível da onda de ruptura gerada nos experimentos

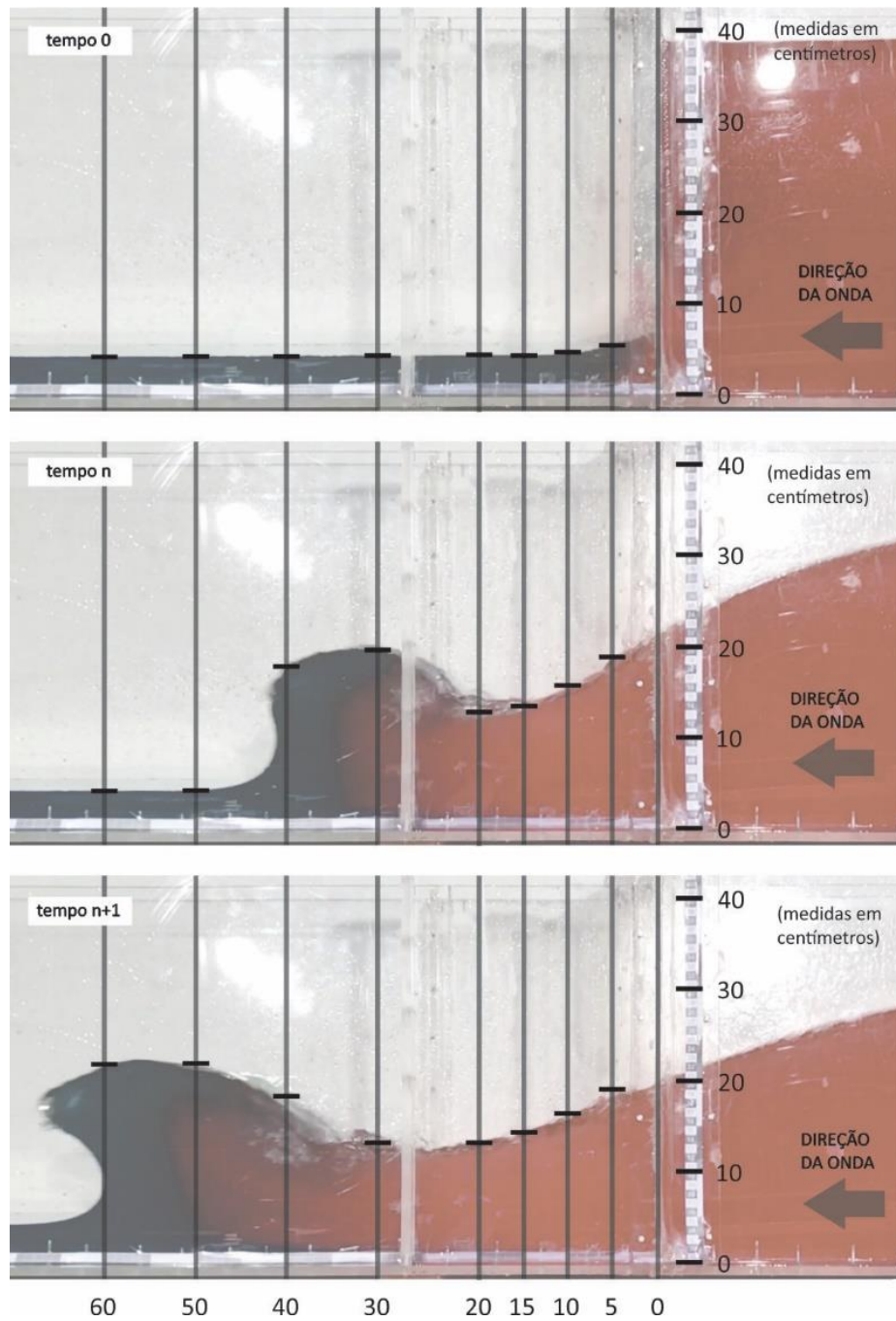
Ao passo que existe a informação da forma geométrica da onda em diferentes intervalos de tempo, adquiridas através do método exposto no item anterior (6.3.5), foram escolhidas 8 seções do canal, em que se avaliou a variação da altura da água ao longo do tempo. As 8 seções escolhidas se encontram às seguintes distâncias da placa metálica:

- a) 5 centímetros;
- b) 10 centímetros;
- c) 15 centímetros;
- d) 20 centímetros;
- e) 30 centímetros;
- f) 40 centímetros;
- g) 50 centímetros;
- h) 60 centímetros.

Analisou-se a variação de nível a partir do repouso, até a onda atingir 60 centímetros de comprimento, em 6 intervalos de tempo diferentes. Essa identificação deu-se analisando os gráficos oriundos do aplicativo *Plot Digitizer*. A Figura 30 ilustra a lógica aplicada na aquisição de dados.

A construção dos hidrogramas permite analisar a onda de ruptura com o viés hidrológico e identificar variáveis que dialogam com a realidade, como: altura máxima da onda, volume de alagamento e taxa de amortecimento.

Figura 30 – Ilustração das seções e método de cálculo em que serão realizados os hidrogramas.



Fonte: elaborado pelo autor.

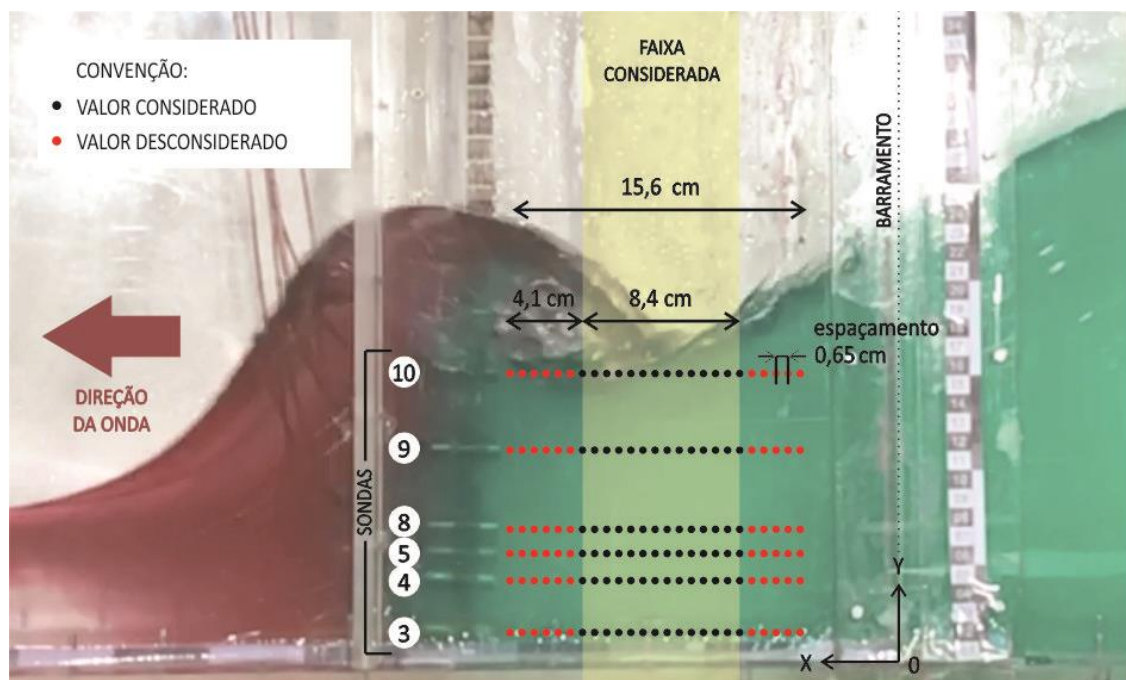
6.3.6 Dados de velocidade do UVP

As medições com o UVP foram utilizadas em todos os ensaios da terceira série de experimentos e têm como objetivo identificar um perfil de velocidade ao longo do interior da corrente e comparar esses dados com a velocidade observada através das imagens.

Cada sonda emite um pulso acústico com frequência de 2 megaHertz, que se desloca para frente e obtém o valor da velocidade da onda em 25 pontos, ao longo de uma linha reta horizontal com 15,6 centímetros de comprimento (espaçamento de 0,65 centímetros). O dado bruto é extraído de cada sonda separadamente, através do *software* do equipamento UVP e se resume a uma tabela contendo o valor da velocidade nos 25 pontos já citados, em diferentes intervalos de tempo.

São desconsideradas as 6 primeiras e 5 últimas medições, restando 14 pontos confiáveis, devido a instabilidades indicadas pelo fabricante do aparato. Isto é, os dados de velocidade considerados distavam entre 4,1 centímetros e 12,5 centímetros da sonda, totalizando uma faixa de 8,4 centímetros de medição. Entende-se que a velocidade do interior da corrente na altura da sonda é a média dessas 14 velocidades medidas. A Figura 31 expõe a onda no momento da medição e ilustra as áreas consideradas para obtenção da velocidade.

Figura 31 – Área considerada para a medição do UVP.



Fonte: elaborado pelo autor.

O processamento dos dados do UVP foi realizado em planilha eletrônica e consistia em realizar as seguintes etapas:

- a) extrair as medidas de velocidade dos 25 pontos registrados pelo UVP;
- b) desconsiderar os 6 primeiros e os 5 últimos pontos registrados;
- c) desconsiderar valores de velocidades acima de 7 m/s ¹⁴, que fogem da ordem de grandeza do experimento e denotam ruído na medição (que acontece quando o pulso acústico não se propaga em meio aquoso);
- d) obter o valor médio de velocidade entre os 14 pontos considerados;
- e) comparar os resultados entre as três repetições de cada ensaio e identificar o perfil de velocidades gerado pela onda de ruptura.

¹⁴ O limite de velocidade foi estabelecido após identificar que a velocidade máxima determinada através da câmera de alta velocidade foi de $3,5 \text{ m/s}$ (apresentado no capítulo 7.3.2), assim, considerou-se como teto da análise via UVP o dobro do valor máximo encontrado via câmera rápida.

7 RESULTADO DOS EXPERIMENTOS

Neste capítulo serão expostos os resultados obtidos a partir do tratamento e análise dos dados gerados nos experimentos realizados em laboratório.

7.1 AVALIAÇÃO DO TEMPO DE ABERTURA DA PLACA VERTICAL

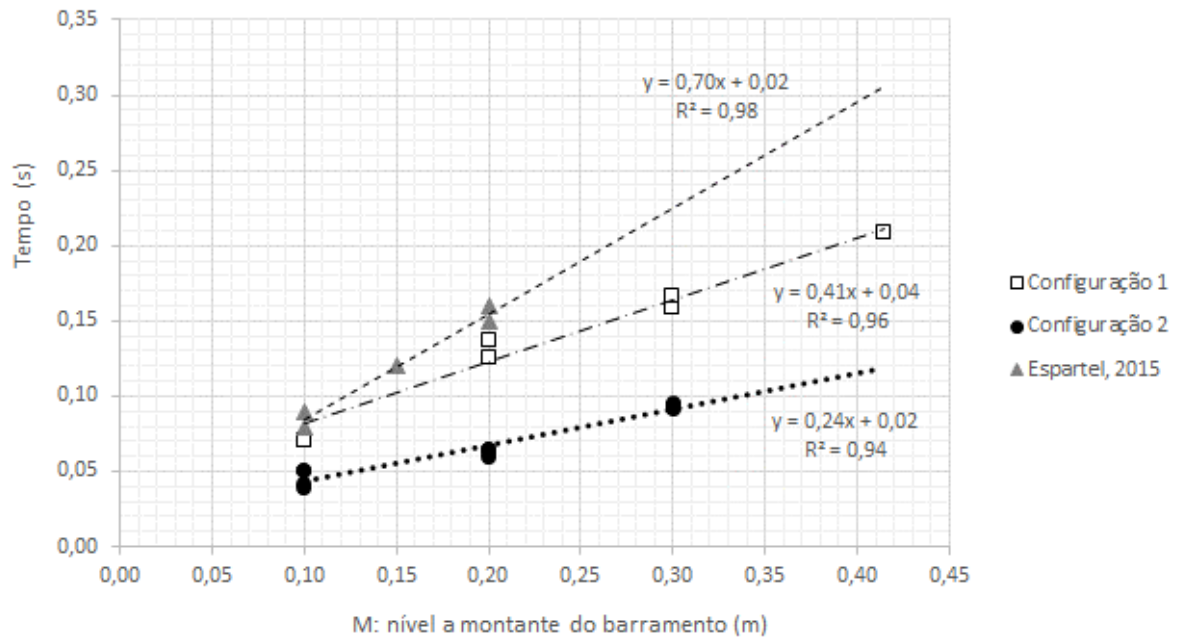
Um dos pressupostos deste trabalho é considerar a ruptura instantânea da barragem, simulada pelo içamento da placa metálica. De antemão é conhecido que a placa vertical no modelo não consegue reproduzir esse fenômeno de forma instantânea, entretanto, através da análise de imagens é possível avaliar o tempo que levou a sua abertura total. Nesse caso, será considerada a ruptura da barragem por completo quando a massa de água a montante, no reservatório, não estiver em contato com nenhuma área da placa de metal, ou seja, livre para escoar.

A primeira série de ensaios foi idealizada para avaliar esse tempo de abertura considerando duas configurações de liberação do lastro (peso morto), apresentadas no item 6.2.1. A Figura 32 apresenta os resultados obtidos do tempo de abertura total da placa metálica para os 21 ensaios realizados naquela etapa, sendo 6 na configuração 1 e 15 na configuração 2. Relembrando:

- a) configuração 1: peso de 17,5 quilogramas de areia era vinculado, através de uma roldana, à placa. O peso era abandonado a uma altura de 1,4 metros e esse movimento gerava a abertura da placa.
- b) configuração 2: peso de 17,5 quilogramas de areia era vinculado, através de uma roldana, à placa. O peso era abandonado a uma altura de 1,73 metros e só movimentava a placa após o estiramento completo da corda, o que significa uma velocidade maior no movimento.

Os resultados foram comparados com Espartel (2015), que retirou a placa manualmente, e assim, como proposto no presente trabalho, a placa era considerada totalmente retirada quando não encostava em nenhuma massa líquida de água.

Figura 32 – Análise do tempo de abertura da placa metálica para diferentes configurações.



Fonte: elaborado pelo autor.

Pelos resultados apresentados na Figura 32, nota-se a configuração 2 como método mais rápido de abertura, sendo pelo menos 1,5 vezes mais veloz que a configuração 1 e até 10 centésimos de segundo mais rápido que o experimento de Espartel (2015). Esse resultado era esperado, pois na configuração 2 o lastro é abandonado de uma altura maior e, conseqüentemente, fica mais tempo acelerando. A altura maior de queda somada com o tempo que a corda leva para tensionar, resultaram no aumento da velocidade na retirada da placa.

Também se constatou que houve uma correlação linear entre o nível da água a montante do barramento e o tempo necessário para levantar a placa. Esse resultado também era esperado, uma vez que a abertura é considerada finalizada quando a placa não encosta mais na massa líquida. Os vãos a serem vencidos em reservatórios com níveis de água mais baixo são menores, logo, o tempo despendido para vencê-los também é menor.

Assim, a configuração 2 foi adotada para as demais séries de experimentos que foram realizadas neste trabalho.

7.2 ANÁLISE QUALITATIVA DO FENÔMENO HIDRÁULICO – RUPTURA DE BARRAGEM

O fenômeno hidráulico do desenvolvimento da onda de ruptura apresentou dois comportamentos distintos que dependiam da presença de água ou não a jusante do canal. A seguir, serão descritos esses comportamentos com base na análise qualitativa feita através das imagens.

7.2.1 Ondas com o canal seco a jusante

Após a realização dos ensaios, averiguou-se que as ondas de ruptura que se desenvolveram sem a presença de água a jusante (Figura 33a-f), possuíam um formato que, em geral, independia da altura de água presente a montante do barramento (reservatório), no início da ruptura. Durante um primeiro estágio da ruptura é formada uma frente de onda, chamada de cabeça, de maior espessura, seguida de um corpo mais delgado (Figura 33b e Figura 33c). Essa frente de onda, comandada pela cabeça, tende a se movimentar mais rapidamente e, por isso, se alonga com o tempo (Figura 33d). Após atingir um comprimento de duas a três vezes o valor do nível de água inicial a montante, tanto a cabeça quanto o corpo da onda têm a mesma espessura (Figura 33e e Figura 33f). Outra observação revela que quanto maior esse nível de montante, mais rápida é a frente de onda formada.

7.2.2 Ondas com lâmina de água a jusante

A formação da onda de ruptura apresentou uma diferenciação quanto à relação de níveis de montante e jusante, definido aqui como R_N , sendo:

$$R_N = \frac{\text{Nível de água a montante}}{\text{Nível de água a jusante}} \quad (\text{equação 16})$$

A Tabela 10 expõe o valor de R_N para cada configuração de ensaio, vinculado a como se deu a forma do jato e o formato da quebra da onda (ver Figura 7 do item 4.4.3 da Revisão Bibliográfica).

Tabela 10 – Forma do jato e formato de quebra para cada onda, em função de R_N .

NA Montante (cm)	NA Jusante (cm)	R_N (-)	Código	Forma do Jato	Formato de Quebra
40	2	20	M40-J2	Jato cogumelo	Quebra tubular
	4	10	M40-J4	Jato cogumelo	Quebra tubular
	8	5	M40-J8	Jato cogumelo	Quebra tubular
20	2	10	M20-J2	Jato cogumelo	Quebra tubular
	4	5	M20-J4	Jato cogumelo	Quebra tubular
	8	2,5	M20-J8	Jato em transição	Quebra ascendente
10	2	5	M10-J2	Jato cogumelo	Quebra tubular
	4	2,5	M10-J4	Jato em transição	Quebra ascendente
	8	1,25	M10-J8	Não identificado	Sem quebra

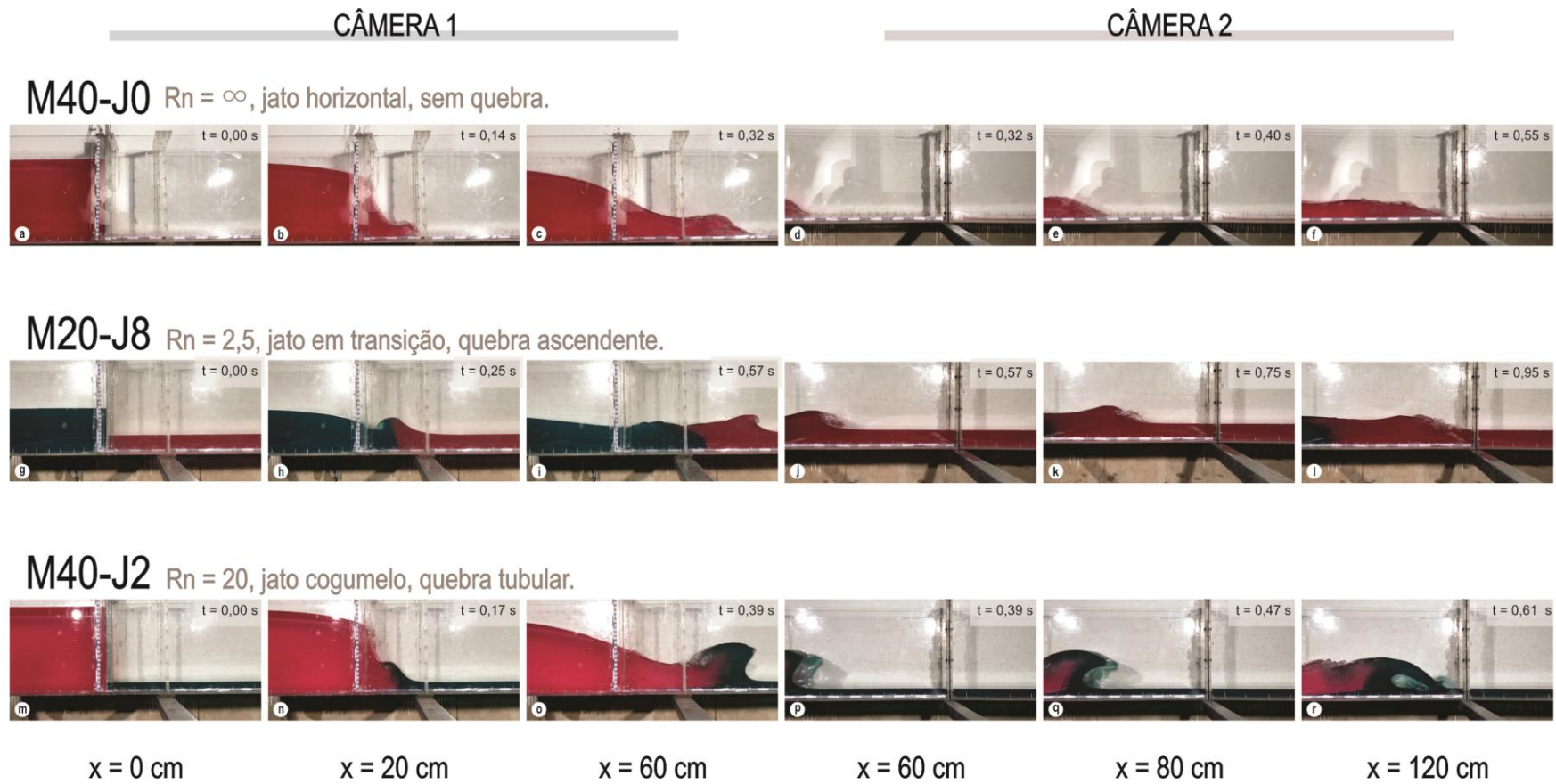
Fonte: elaborado pelo autor.

A onda de ruptura formada para os ensaios em que $R_N < 5$ apresentou um formato brando e pode ser classificada como ascendente (Figura 33g-l). Nesse caso, a frente de onda formada entra por baixo do nível de água a jusante e a eleva até que a crista (ver Figura 7) se torne instável (Figura 33h), resultando em uma instabilidade localizada que se propaga pela face frontal da onda (Figura 33i-k). A energia da onda é lentamente dissipada a jusante, criando assim, uma onda mais suave (Figura 33l).

Já quando $1,25 > R_N \geq 5$ (Figura 33m-r), a frente de onda formada avança sob a de jusante mais rapidamente (Figura 33n) e forma uma onda com quebra tubular (Figura 33o-p), isso significa que sua crista se torna íngreme (Figura 33q) e se empola (Figura 33r), liberando a maior parte de sua energia e gerando impacto da onda de ruptura com a lâmina da água a jusante.

M10-J8 é o único ensaio com $R_N = 1,25$, o menor R_N visto nos resultados. Para esse ensaio foi observada a existência de um leve alteamento de nível, de jusante para montante, que não foi enquadrado como uma onda de ruptura nesta pesquisa.

Figura 33 – Imagem ilustrativa das ondas de ruptura geradas através dos ensaios experimentais.



Fonte: elaborado pelo autor.

7.3 ANÁLISE QUANTITATIVA DO FENÔMENO HIDRÁULICO – DESENVOLVIMENTO INICIAL DA ONDA

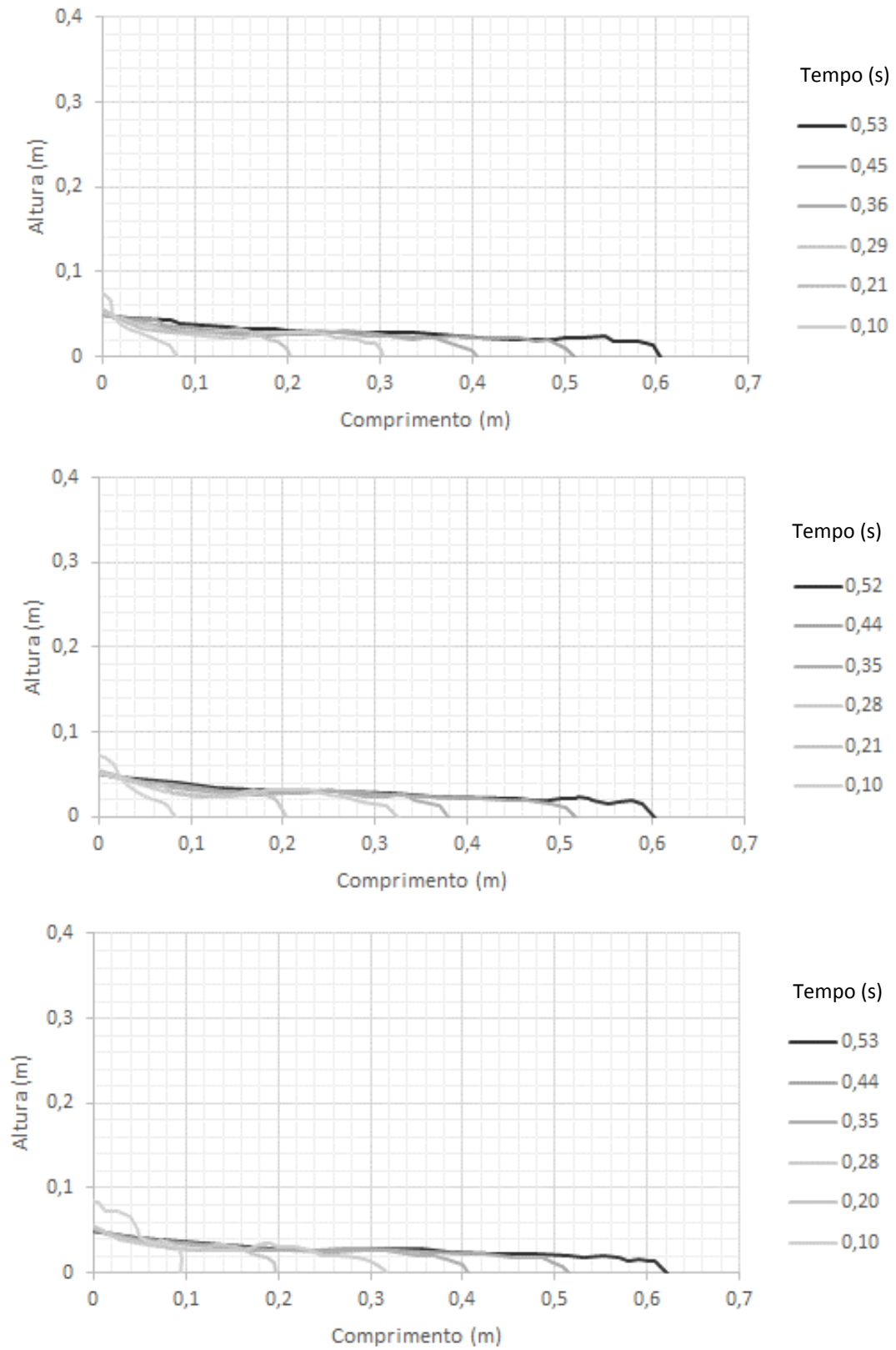
7.3.1 Desenvolvimento geométrico da frente de onda

O registro do desenvolvimento geométrico da frente de onda de ruptura foi realizado através do aplicativo *Plot Digitizer*, tendo como base os ensaios da segunda série de experimentos (item 6.3.3). Era avaliado um quadro da filmagem toda a vez que a onda alcançava 10, 20, 30, 40, 50 e 60 centímetros no seu desenvolvimento. Dessa forma foi possível analisá-la ao longo do tempo e espaço. Os experimentos serão apresentados com o código modificado dos ensaios da Tabela 6, novamente exposto aqui para lembrar a nomenclatura. Exemplo: B1-M20-J0-3, em que, a sigla *B1* indica a **1ª** série de ensaios (**B**ateria de ensaios); a sigla *M20*, indica **20** centímetros de água a **M**ontante (reservatório); a sigla *J0*, indica **0** centímetros; de água a **J**usante (canal); e o **#3** indica o número de ensaios naquela configuração (no caso a 3ª repetição). Esse último termo será omitido, pois os resultados são apresentados em grupos.

7.3.1.1 Ensaios B2-M10-J0

Os experimentos da onda de ruptura com 10 centímetros a montante e canal seco a jusante reproduziu um comportamento mais próximo ao idealizado na teoria, no qual esforços oriundos da interação canal-fluido são minorados (Chanson, 2006). Após a ruptura do barramento, a massa líquida se desenvolveu sempre com um mesmo formato, sendo uma frente de onda praticamente vertical, com espessura constante de aproximadamente 3 centímetros ao longo dos primeiros 60 centímetros do canal (Figura 34). Nota-se também que entre três repetições a forma geométrica foi muito similar, bem como a indicação cinemática de velocidades, já que as legendas da figura representam o tempo acumulado registrado a cada 10 centímetros em que a onda de ruptura avançava.

Figura 34 – Desenvolvimento geométrico da onda B2-M10-J0 (três repetições).

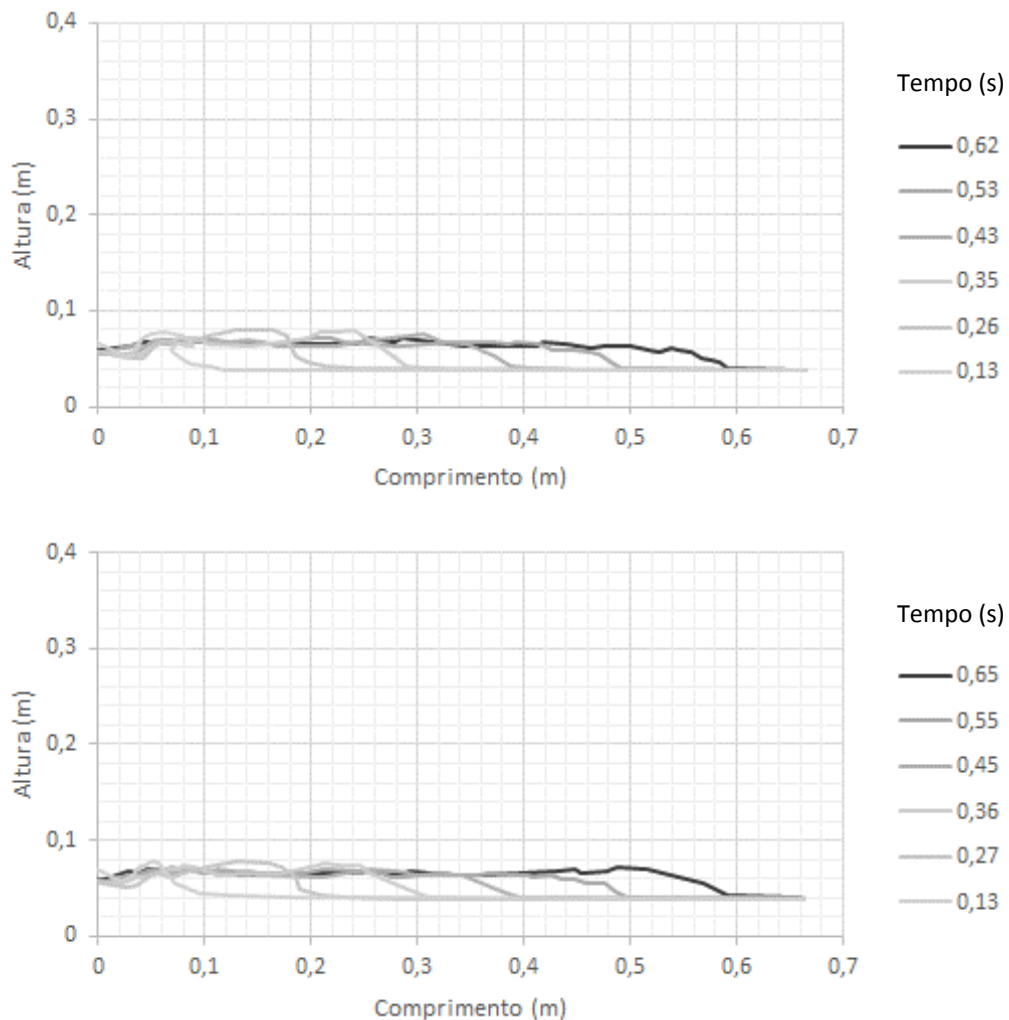


Fonte: elaborado pelo autor.

7.3.1.2 Ensaios B2-M10-J2

A Figura 35 mostra o desenvolvimento da onda gerada através da seguinte configuração: reservatório no nível de 10 centímetros e lâmina de água de 2 centímetros a jusante. No desenvolvimento dos primeiros dez centímetros, as águas a montante avançaram sob as águas a jusante e as impulsionaram para cima e para frente, gerando um acúmulo de água na onda, que ao se deslocar até 20 centímetros já estava na iminência de quebrar. Depois que a onda quebrou, ocorreu um aumento na turbulência na sua parte frontal, causando uma instabilidade no nível de 4 centímetros. A partir dos 30 centímetros o fluxo se desenvolveu formando uma cabeça de onda levemente mais delgada e mantendo esse formato até alcançar a marca de 60 centímetros. O ensaio B2-M10-J2-3 não pode ser utilizado nessa análise, em função de um erro operacional no momento da aquisição das imagens.

Figura 35 – Desenvolvimento geométrico da onda B2-M10-J2 (duas repetições).



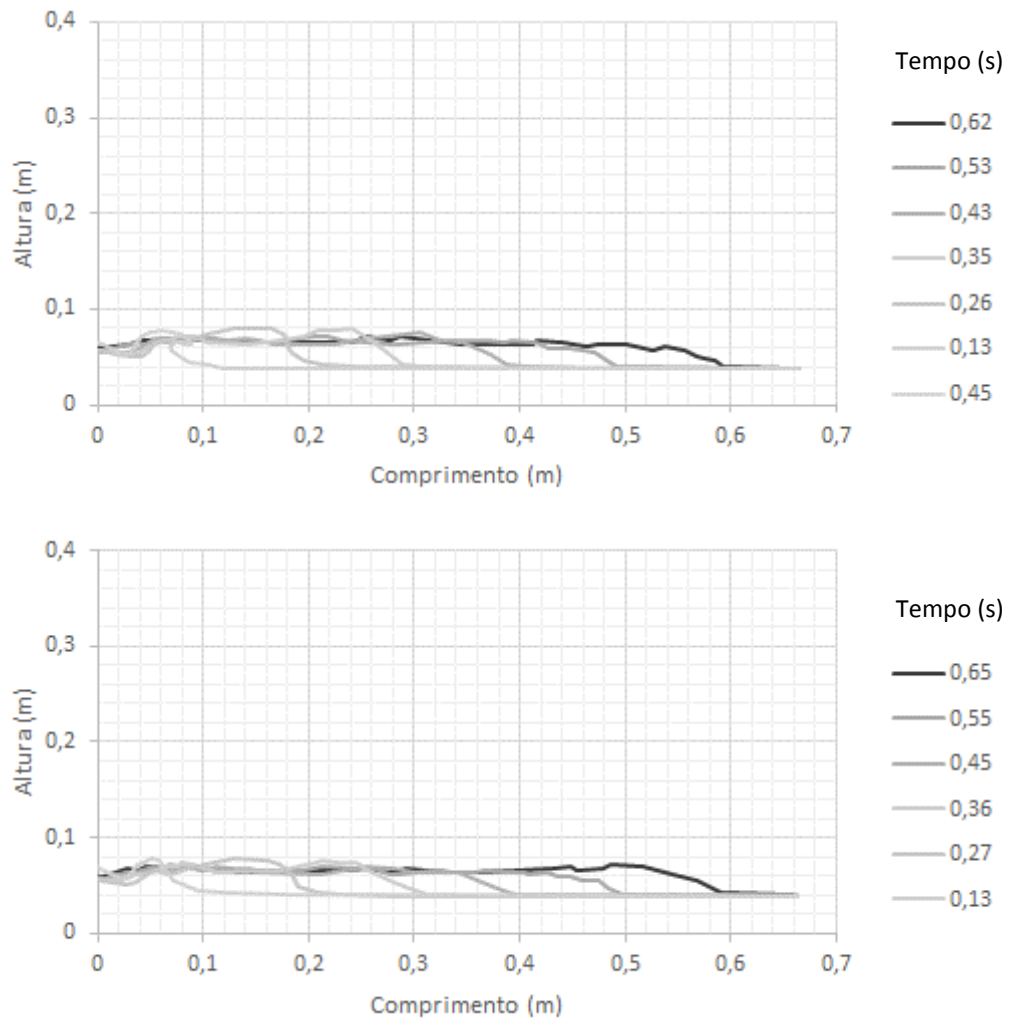
Fonte: elaborado pelo autor.

7.3.1.3 Ensaio B2-M10-J4

A Figura 36 apresenta o desenvolvimento da onda com 10 centímetros de nível de água no reservatório e 4 centímetros na linha d'água a jusante. No momento em que a placa foi içada as massas líquidas interagiram e resultaram em um escoamento no qual a maior parte do volume que estava a montante se sobrepõe à massa líquida que estava a jusante, resultando em uma onda de quebra ascendente, que dá a impressão de deslizar sobre a massa líquida que estava a sua frente.

Inicialmente a onda se desenvolveu com um formato vertical da cabeça, acumulando água e assim alcançando sua maior altura (8 centímetros), antes de se desenvolver horizontalmente até os 20 centímetros. No caminho percorrido até os 40 centímetros, a onda se desestabilizou, configurando uma quebra ascendente, diminuindo levemente sua espessura e mantendo uma altura aproximada de 6 centímetros. Isso também se deve à resistência fluido-fluido, que retardou a velocidade da cabeça da onda e também gerou um maior volume de água ali, afinando a espessura a montante. Esse movimento, a partir dos 40 centímetros, resultou em uma cabeça de onda mais inclinada. O ensaio B2-M10-J4-3 também não pode ser utilizado nessa análise, por um erro operacional no momento da aquisição das imagens.

Figura 36 – Desenvolvimento geométrico da onda B2-M10-J4 (duas repetições).



Fonte: elaborado pelo autor.

7.3.1.4 Ensaios B2-M10-J8

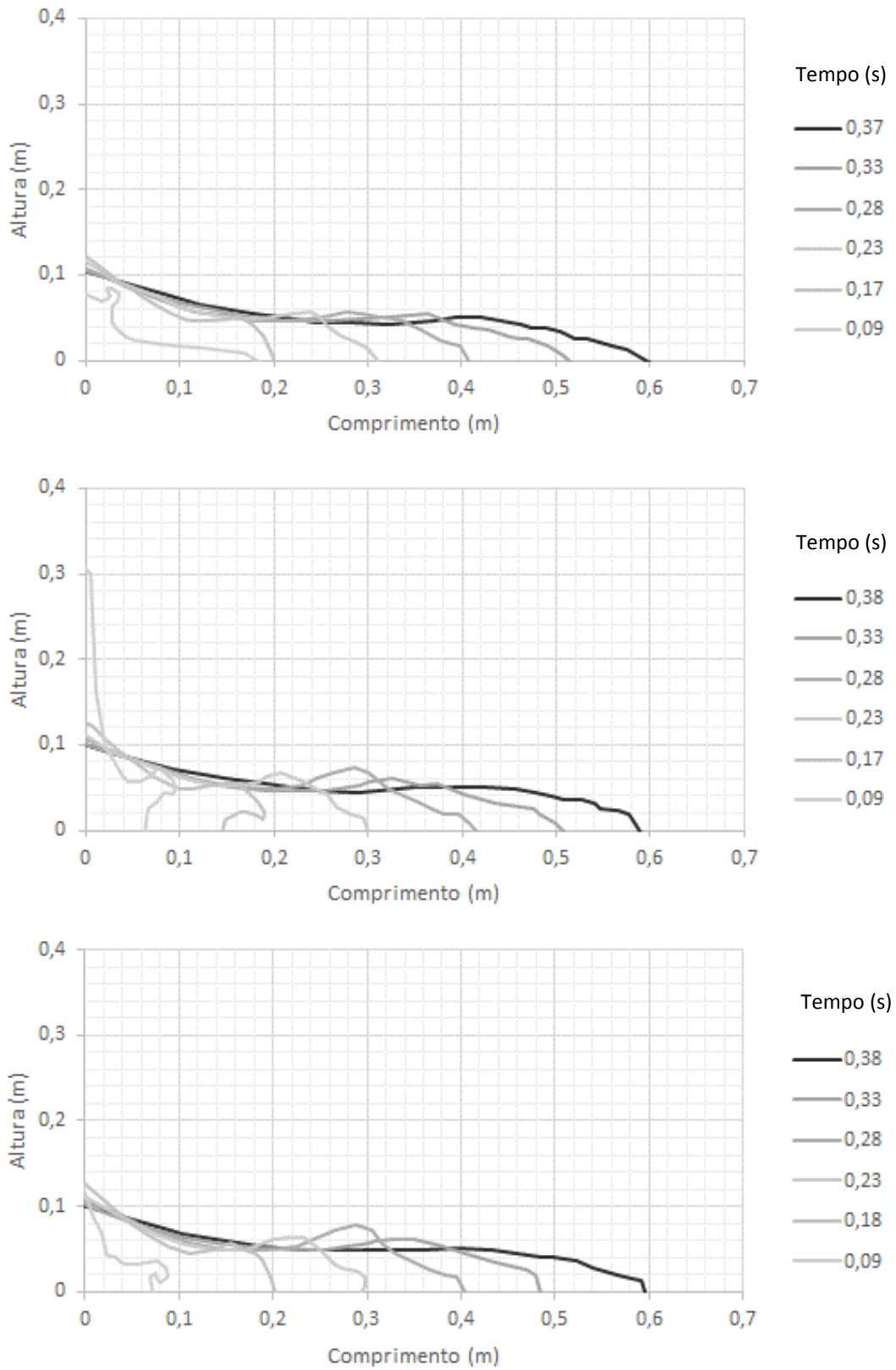
Não foi possível identificar uma frente de onda para o ensaio com 10 centímetros a montante e 8 centímetros a jusante da placa. A exígua diferença de nível entre a região de montante e jusante, não configurou a formação de uma onda de ruptura, apenas um leve alteamento de nível, não perceptível na escala gráfica utilizada.

7.3.1.5 Ensaio B2-M20-J0

A Figura 37 retrata a onda oriunda da ruptura do reservatório de montante com 20 centímetros de nível de água e que tem a jusante um canal seco. Ao avançar os primeiros 10 centímetros, à frente da onda ainda não havia encostado no fundo do canal. Como a retirada da placa é vertical, as camadas mais baixas da água no reservatório avançaram primeiro. Quando as camadas superiores começaram o seu movimento, elas alavancaram essas camadas inferiores que já haviam avançado horizontalmente.

A frente de onda impactou completamente no fundo apenas ao chegar nos 20 centímetros de deslocamento. A partir disso, a onda desenvolveu uma cabeça no formato de cunha, em função do acúmulo de água devido à resistência do fundo do canal. Na trajetória entre os 30 e 40 centímetros, a onda alcançou sua maior altura, no valor de 8 centímetros. Com a sequência do desenvolvimento do escoamento, a cunha se alongou, diminuindo a altura da onda, agora em 5 centímetros. Ao alcançar os 60 centímetros, a onda assumiu um formato semelhante a onda B2-M10-J0, que também era em canal seco, mas com reservatório com nível de água igual a 10 centímetros.

Figura 37 – Desenvolvimento geométrico da onda B2-M20-J0 (três repetições).



Fonte: elaborado pelo autor.

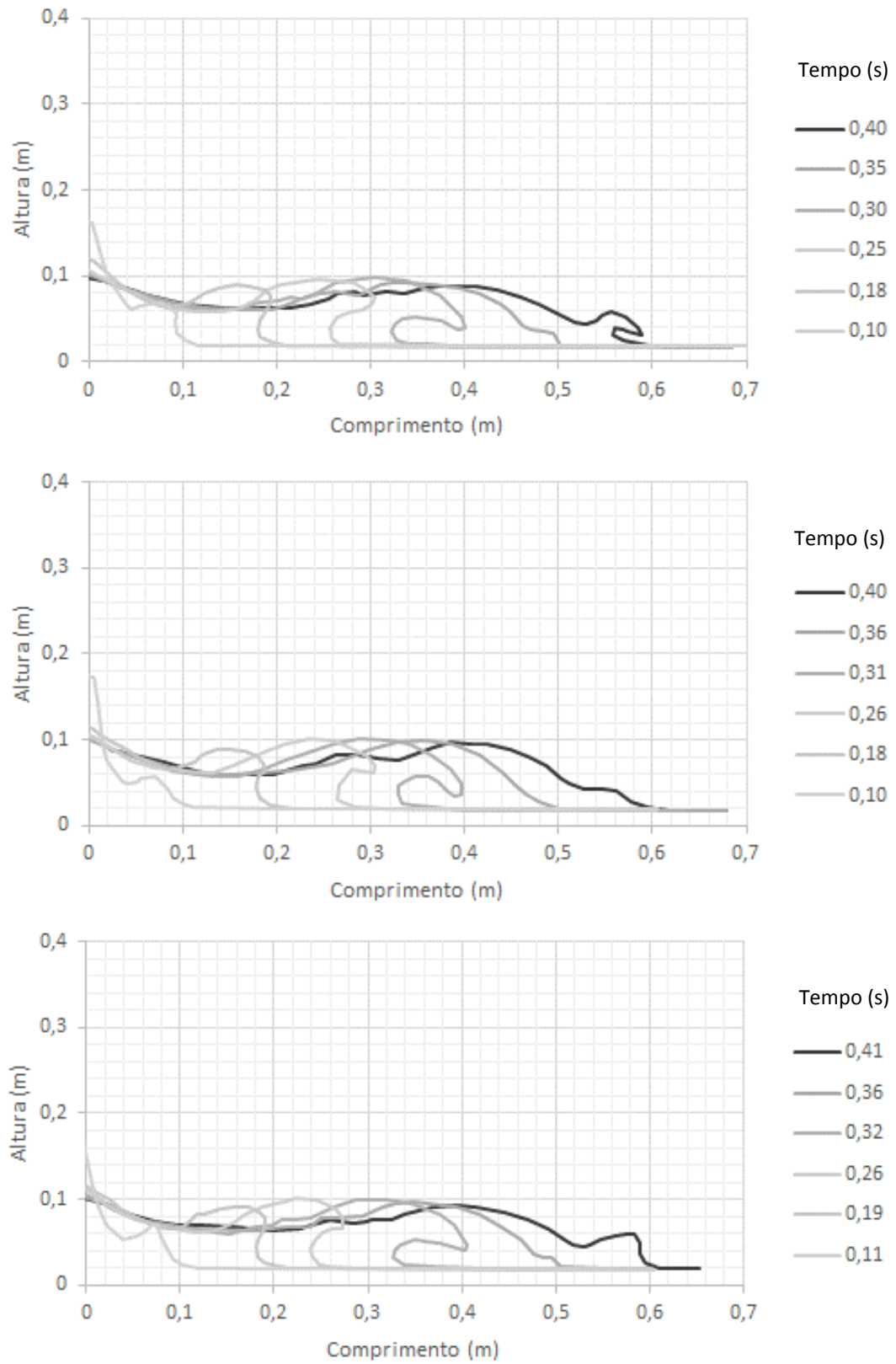
7.3.1.6 Ensaio B2-M20-J2

A Figura 38 representa o desenvolvimento de uma onda oriunda da ruptura de um barramento com nível de água a montante de 20 centímetros e nível a jusante de 2 centímetros. Nessa configuração foi possível averiguar o acontecimento, ainda dentro dos primeiros 60 centímetros de desenvolvimento, da formação de um jato cogumelo até a quebra em formato tubular.

Nos 10 centímetros iniciais de desenvolvimento horizontal da onda, as águas que estavam a montante avançaram sob a massa líquida a jusante e geraram um alteamento de nível. Nessa fase inicial da quebra tubular, a onda tendia a crescer tanto verticalmente quanto horizontalmente. Na trajetória até os 20 centímetros, essa situação foi acentuada até que fosse atingido a altura de 9 centímetros.

O deslocamento da onda até a distância de 30 centímetros determinou o ápice do desenvolvimento vertical da onda, no caso, 10 centímetros de espessura. Depois que a onda atingiu essa altura, a frente de onda empolou em função da força da gravidade, gerando uma quebra tubular. Nesse processo de arrebentação, a onda seguiu se desenvolvendo horizontalmente e aos 40 centímetros, a frente de onda entrou em contato com a linha d'água a jusante, de altura 2 centímetros. Aos 50 centímetros esse contato já ocorreu e por causa disso e devido ao impacto, novamente as águas a jusante foram aceleradas e impulsionadas a jusante e são essas águas as primeiras a alcançarem a distância de 60 centímetros.

Figura 38 – Desenvolvimento geométrico da onda B2-M20-J2 (três repetições).



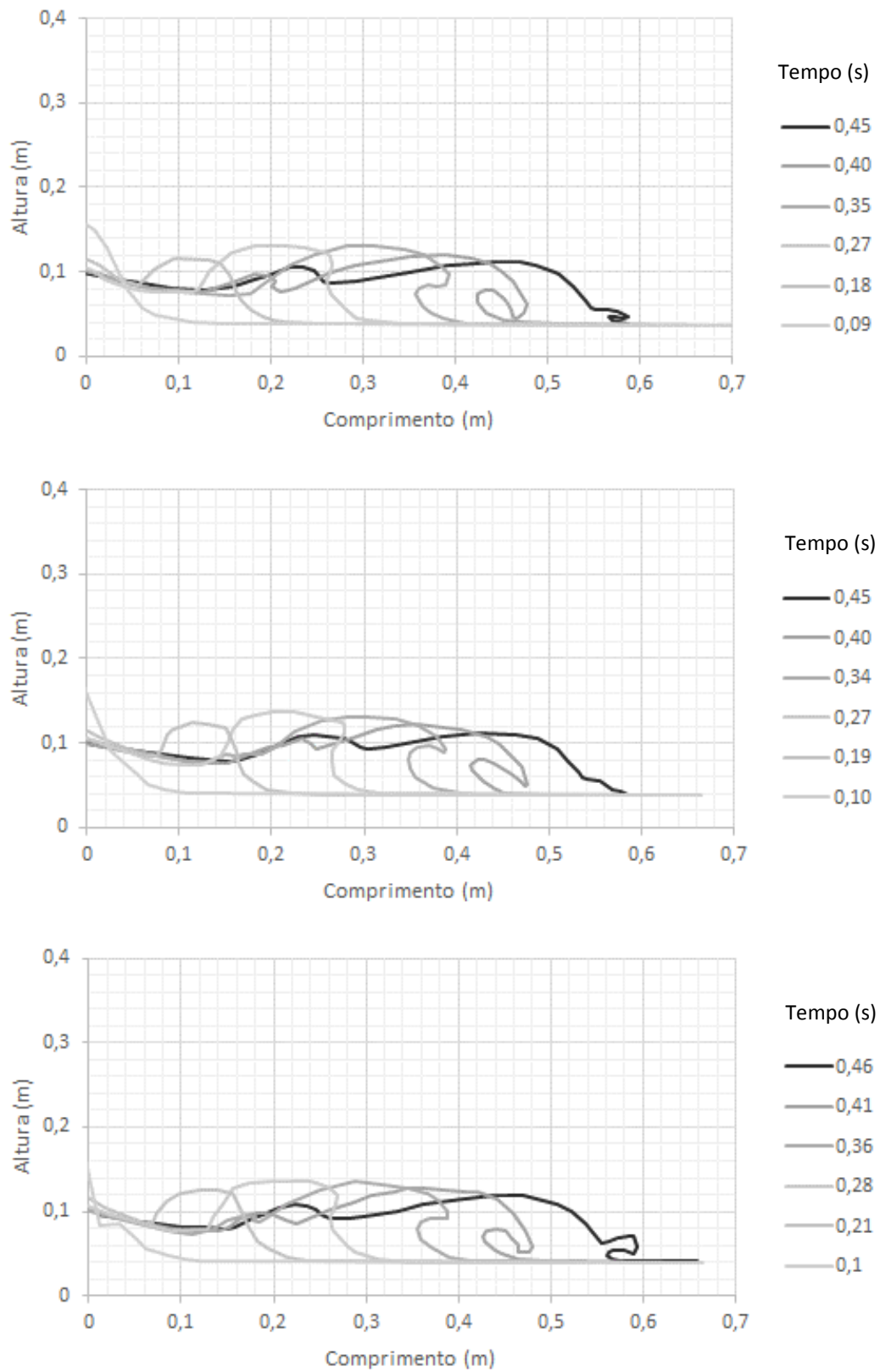
Fonte: elaborado pelo autor.

7.3.1.7 Ensaio B2-M20-J4

A onda gerada da ruptura do reservatório de montante com 20 centímetros de nível de água, que incide em um canal com linha d'água com 4 centímetros de espessura (Figura 39) apresenta um comportamento semelhante a onda B2-M20-J2 (Figura 38), porém o aumento do nível de água a jusante refletiu no aumento da altura máxima que essa onda alcançou e prolongou o processo de desenvolvimento e quebra tubular da onda.

Os primeiros 10 centímetros de desenvolvimento mostraram o avanço das águas de montante sob a de jusante, essa expansão tanto vertical, quanto horizontal continuou enquanto a onda avançava até 20 centímetros de distância e alcançava uma altura máxima de 13 centímetros, chegando a distância de 30 centímetros no canal. Na sequência do deslocamento, a onda acumulou água e atingiu sua altura máxima, a partir daí ela começou a cair (quebrar). No processo de acúmulo de água e início da quebra a onda percorreu mais 20 centímetros, alcançando na distância de 50 centímetros. Repetindo o comportamento visto em B2-M20-J2 (Figura 38), o impacto da quebra tubular com a lâmina de água a jusante de altura 4 centímetros, gerou uma nova impulsão das águas a jusante.

Figura 39 – Desenvolvimento geométrico da onda B2-M20-J4 (três repetições).



Fonte: elaborado pelo autor.

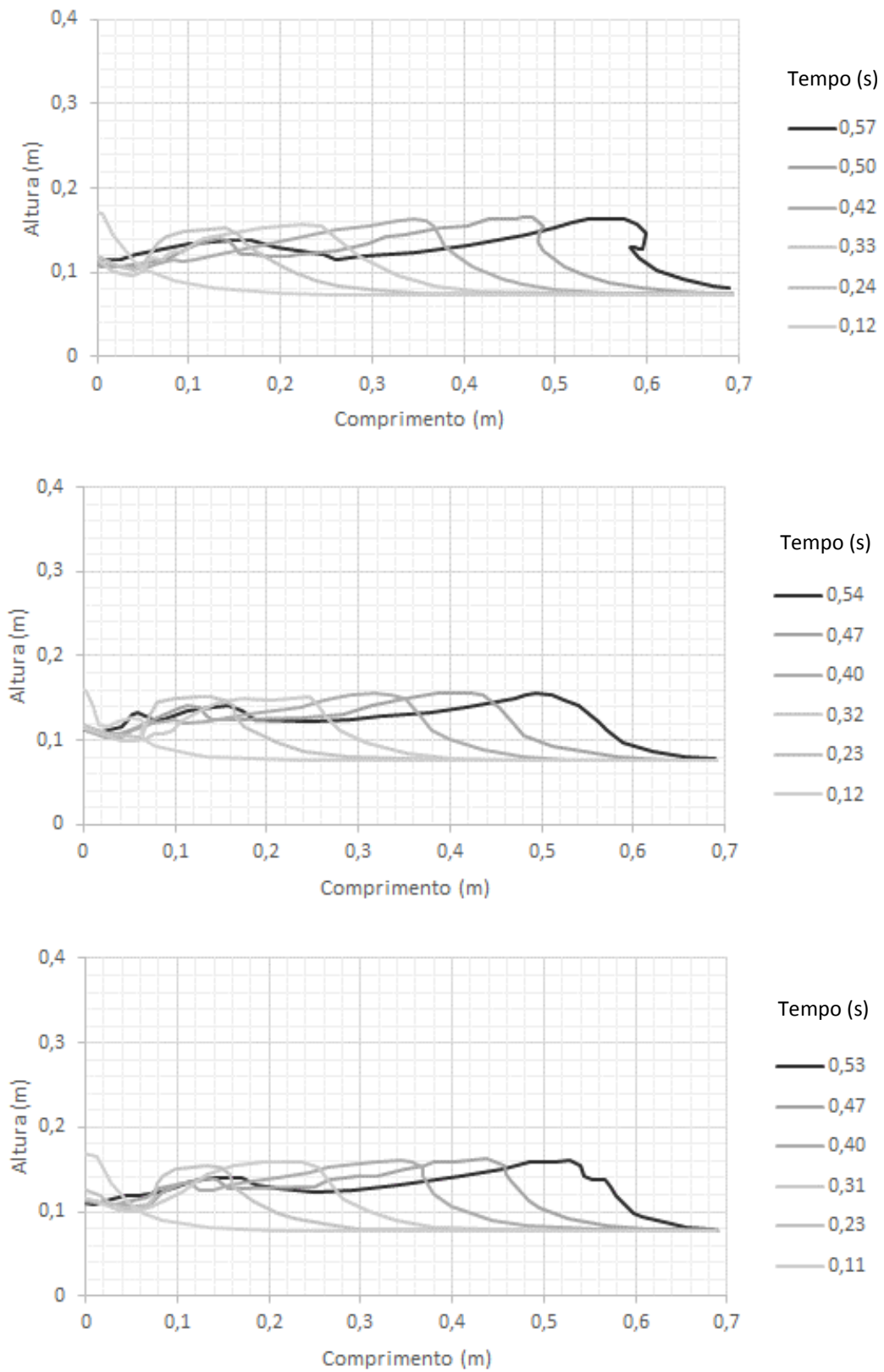
7.3.1.8 Ensaio B2-M20-J8

A Figura 40 registra o desenvolvimento inicial da onda originada a partir da liberação de água represada com nível em 20 centímetros, incidindo em um canal com lâmina d'água com 8 centímetros de espessura, essa, a maior altura de água a jusante da placa ensaiada na presente pesquisa. O resultado desse experimento é uma onda com quebra ascendente, que se desenvolveu de forma homogênea durante os primeiros 60 centímetros analisados.

A partir da retirada da placa até a onda alcançar os primeiros 10 centímetros, foi possível visualizar que as massas líquidas a jusante e a montante buscavam uma nova situação de equilíbrio através de um alteamento de nível de jusante para montante. A onda seguia se deslocando e, em uma distância aproximada de 20 centímetros, alcançou a altura máxima de 16 centímetros. Ao chegar na distância de 30 centímetros e, posteriormente, 50 centímetros, não é percebido nenhuma mudança no formato da onda, salvo o seu próprio deslocamento horizontal.

Na distância de 60 centímetros, a parte acima da frente de onda começou a se desestabilizar, mas devido ao nível de jusante estar elevado, a onda de ruptura fluiu sobre as águas de jusante, configurando uma quebra ascendente.

Figura 40 – Desenvolvimento geométrico da onda B2-M20-J8 (três repetições).



Fonte: elaborado pelo autor.

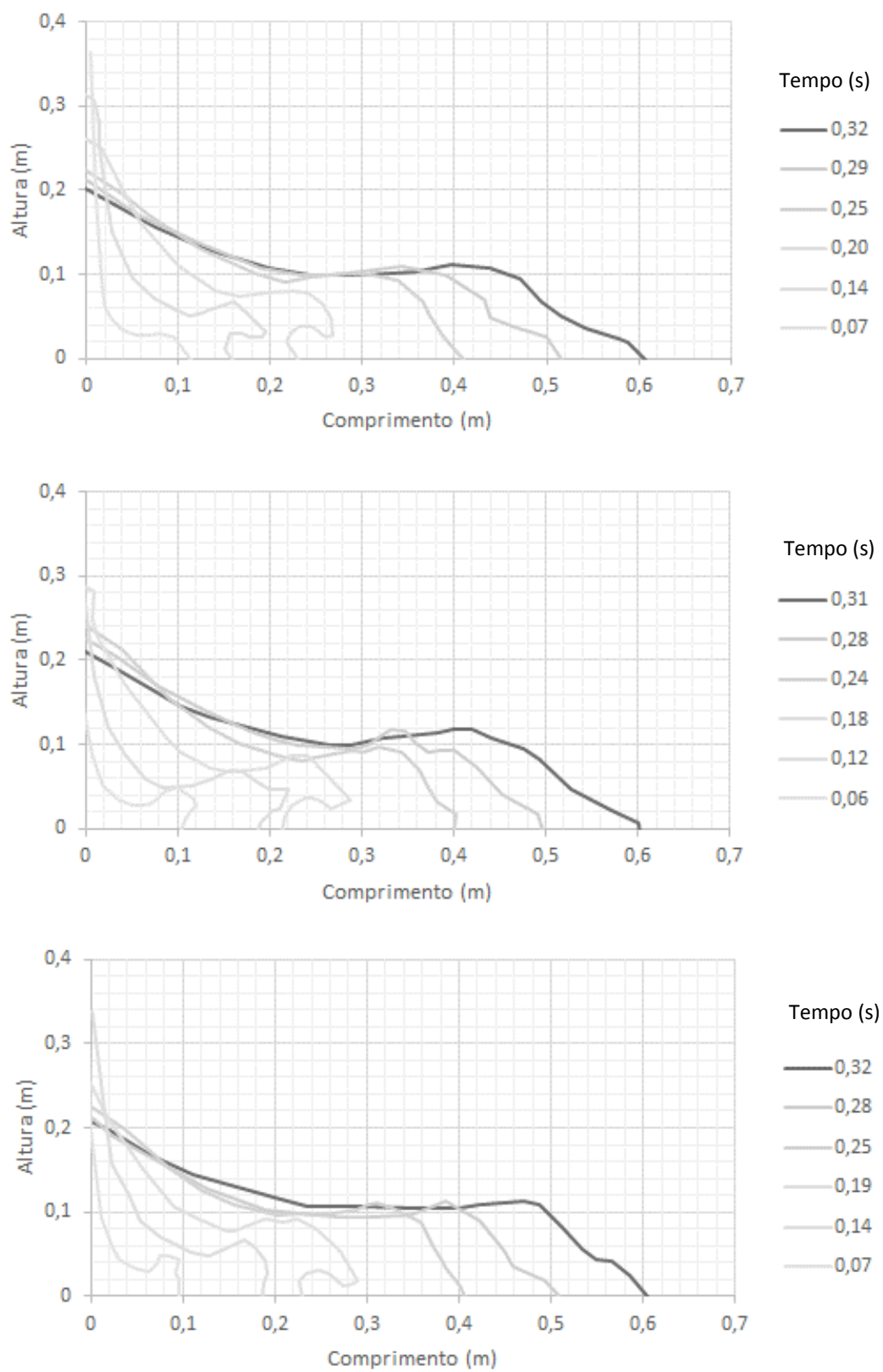
7.3.1.9 Ensaio B2-M40-J0

A Figura 41 expõe a forma geométrica da onda oriunda da liberação de 40 centímetros de água confinados no reservatório e que avançam sobre um canal seco a jusante. Esse ensaio tem como característica particular ter a maior diferença entre o nível de montante e jusante ($R_N = 20$). A onda assumiu um formato de cunha, liderada por uma cabeça de onda de fácil identificação.

No momento em que a placa foi levantada, a onda já começou a se deslocar horizontalmente, com comportamento semelhante a B2-M20-J0 (Figura 37). Nos primeiros 10 centímetros ocorreu o avanço tanto vertical, quanto horizontal. Ao chegar nos 20 centímetros, ambos avanços continuaram, porém, o vertical começou a desestabilizar e ao chegar em 30 centímetros a onda estava na iminência de quebrar. A partir dessa distância até alcançar a marca de 40 centímetros, a onda se desenvolveu sempre em contato com o fundo e a partir desse momento a cabeça de onda começou a ficar mais espessa.

Quando a onda alcançou 50 centímetros, a cabeça da onda de ruptura ainda ficava levemente mais espessa, atingindo a altura máxima de 12 centímetros e assumindo o formato de cunha. Em 60 centímetros é possível constatar a manutenção desses 12 centímetros de altura, porém o formato de cunha estava mais íngreme, devido à resistência do fundo do canal.

Figura 41 – Desenvolvimento geométrico da onda B2-M40-J0 três repetições).



Fonte: elaborado pelo autor.

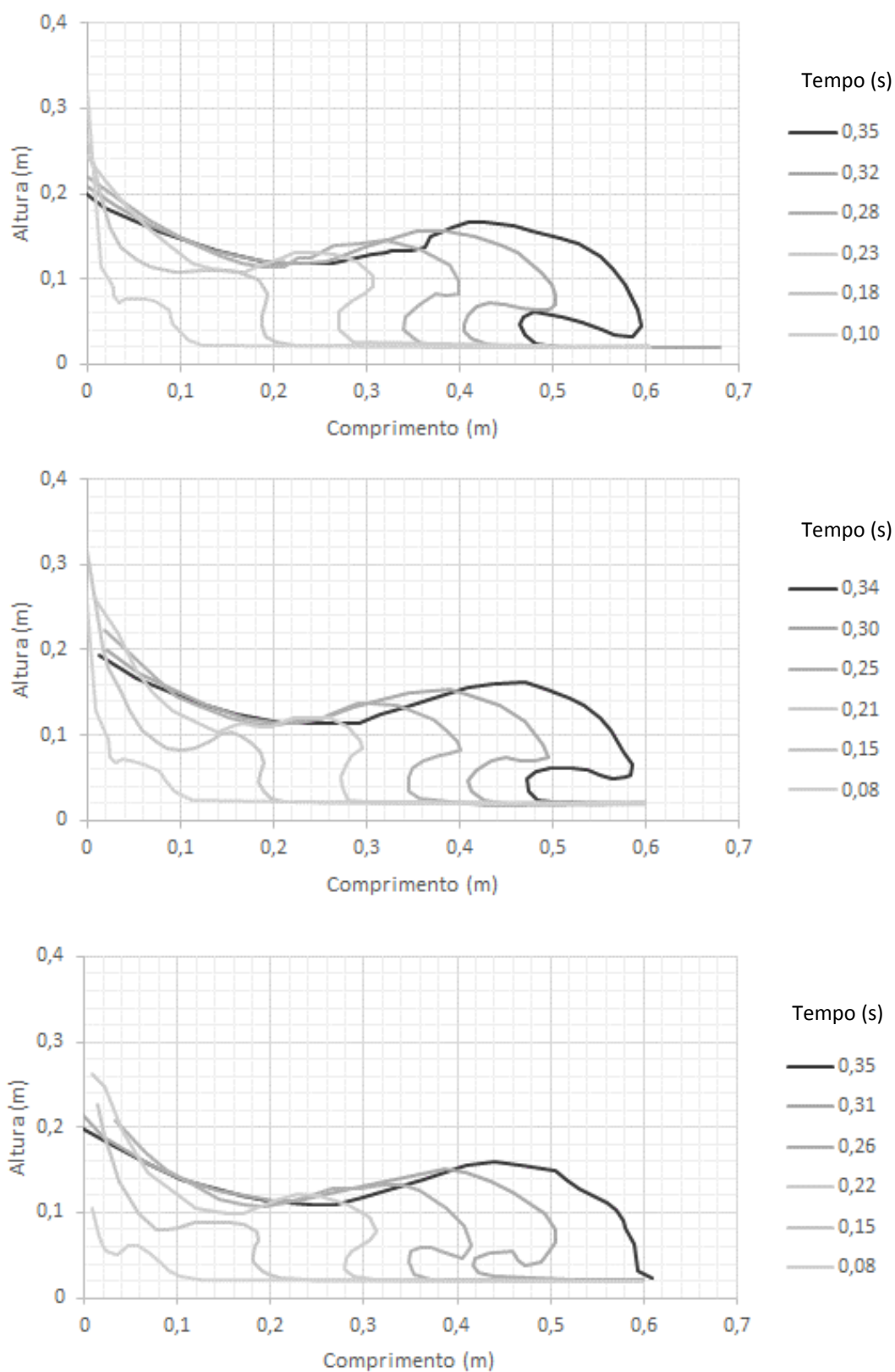
7.3.1.10 Ensaios B2-M40-J2

A Figura 42 permite acompanhar o desenvolvimento da onda originada de uma configuração inicial com altura de 40 centímetros de água a montante da placa e 2 centímetros a jusante. Evidenciou-se uma onda de quebra tubular e jato cogumelo. Durante o deslocamento dos 60 centímetros analisados, essa quebra não chegou a impactar nas águas de jusante.

Os primeiros 10 centímetros de desenvolvimento da onda mostraram uma onda com 7 centímetros de altura e uma frente mais verticalizada. Esse padrão se manteve quando o escoamento chegou em 20 centímetros, com a espessura da onda na ordem de 10 centímetros. Ao chegar aos 30 centímetros de deslocamento, o processo de quebra tubular quase se concretizou, mas diferente dos ensaios anteriores, a espessura da onda ainda aumentaria até os 13 centímetros. Com 40 centímetros de deslocamento foi possível identificar uma quebra tubular consolidada, já em processo de quebra; nesse ponto a onda tinha altura de 14 centímetros. Referente ao trajeto de 40 para 50 centímetros, o jato de onda em formato cogumelo era alongado e estava quase atingindo as águas a jusante. Finalmente, quando a onda estava a 60 centímetros do início, ocorre o encontro entre a onda e as águas presentes no nível a jusante (mais evidente na 3ª repetição).

Uma característica desse ensaio foi o crescimento constante da altura da onda, pois mesmo no processo de quebra a onda ainda tinha sua altura sendo incrementada. Isso significa que para a configuração B2-M40-J2 não é possível afirmar que a onda se desenvolveu verticalmente por completo nos primeiros 60 centímetros de deslocamento. Esse comportamento é diferente dos ensaios B2-M20-J2 e B2-M20-J4, em que a onda atingia uma altura máxima e somente então começava a desabar.

Figura 42 – Desenvolvimento geométrico da onda B2-M40-J2 (três repetições).



Fonte: elaborado pelo autor.

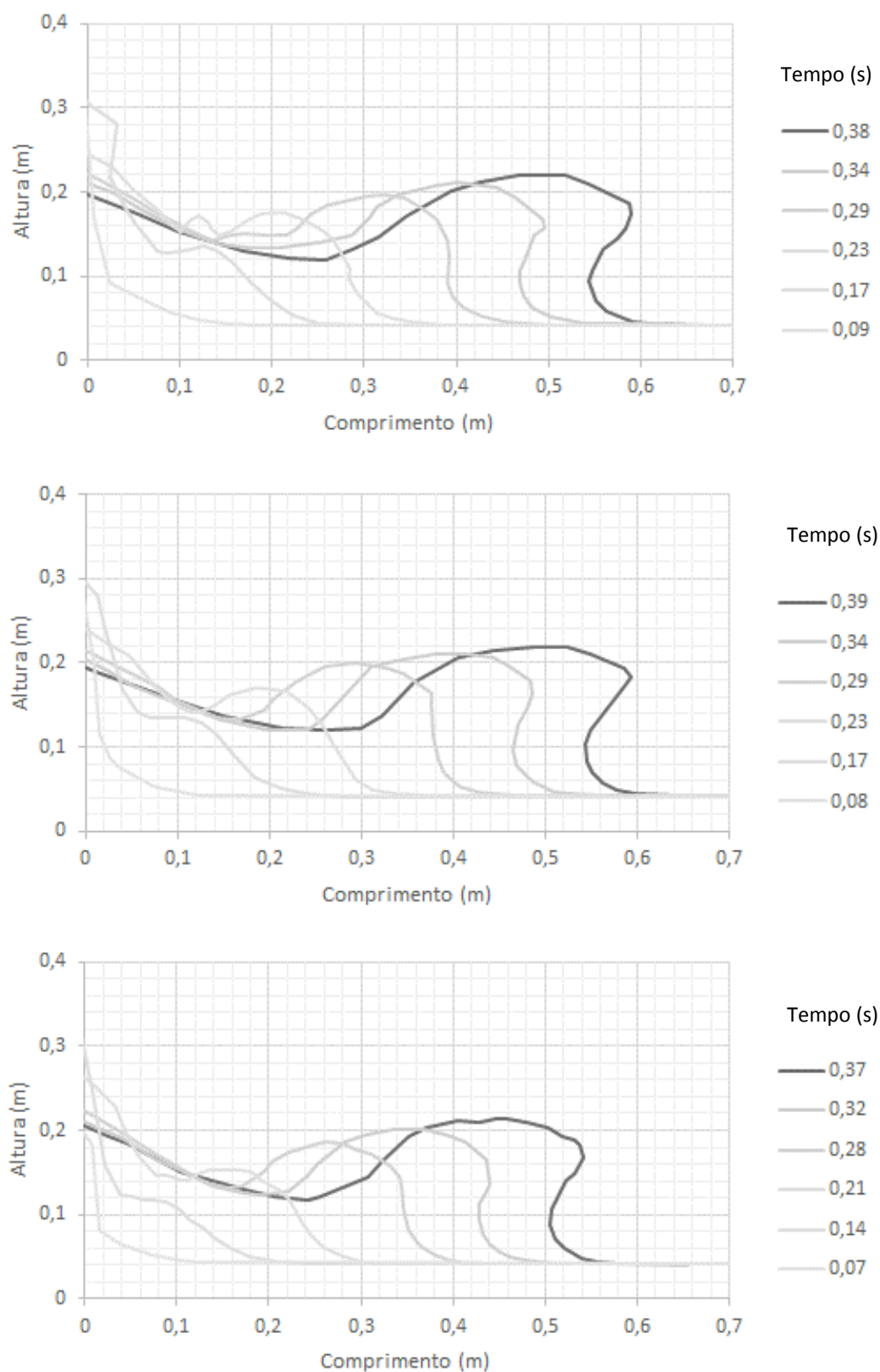
7.3.1.11 Ensaio B2-M40-J4

O ensaio com 40 centímetros de nível de água a montante da placa e 4 centímetros a jusante, representado na Figura 43, possui as mesmas proporções que o ensaio B2-M20-J2 e seu desenvolvimento é fiel ao já visto na Figura 38. Porém, no caso do B2-M40-J4, os 60 centímetros de desenvolvimento analisados, não permitiram uma visualização da quebra da onda, apenas o detalhamento da sua formação antes que ocorresse a quebra de fato.

Os primeiros 10 centímetros mostram um alteamento de nível, em que ainda não era possível enxergar o formato típico da onda de quebra tubular. Esse formato começou a tomar forma aos 20 centímetros de desenvolvimento horizontal, já sendo possível detectar um patamar na altura de 13 centímetros entre o reservatório de montante e a lâmina a jusante. Esse patamar se desenvolveu horizontalmente e verticalmente (com uma altura de 17 centímetros), assumindo um formato ovalado quando alcançou os 30 centímetros de percurso. Aos 40 centímetros de distância percorrida, o escoamento manteve uma altura crescente (20 centímetros) e uma frente de onda verticalizada.

Ao chegar nos 50 centímetros, foi possível perceber que a frente de onda, antes vertical, começou a pender mais para frente, indicando o início de uma quebra tubular; a altura da onda cresceu até os 21 centímetros. Em 60 centímetros de deslocamento ficou claro que a onda teria uma quebra tubular a jusante, por mais que ela não fosse visualizada completamente nessa distância. Repetindo a B2-M40-J2 (Figura 42), a altura máxima da onda nessa análise foi registrada no último quadro e possuiu 22 centímetros.

Figura 43 – Desenvolvimento geométrico da onda B2-M40-J4 (três repetições).



Fonte: elaborado pelo autor.

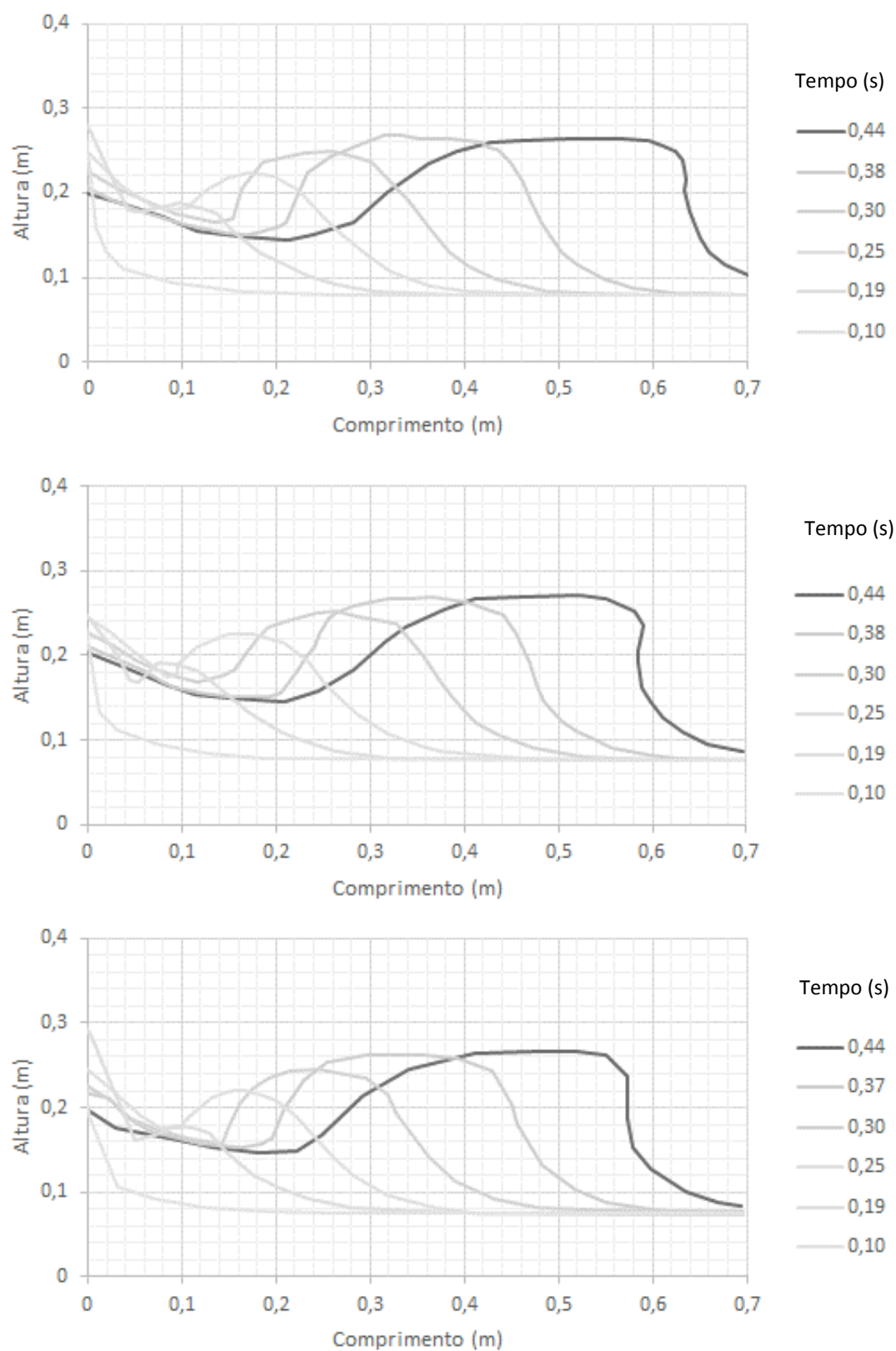
7.3.1.12 Ensaios B2-M40-J8

O último ensaio, B2-M40-J8, envolveu o maior volume de água do canal, com 40 centímetros a montante do barramento e 8 centímetros a jusante. A Figura 44 mostra o formato geométrico do desenvolvimento da onda até alcançar 60 centímetros de comprimento.

O comportamento inicial da onda é semelhante ao visto em ensaios anteriores, como B2-M40-J2 (Figura 42) e B2-M40-J8 (Figura 43). Nos primeiros 10 centímetros houve um alteamento de nível, formação padrão das ondas supracitadas. Já ao atingir 20 centímetros, começou a se formar um insipiente jato cogumelo, com um patamar na altura de 17 centímetros. Em 30 centímetros de deslocamento, a onda possuía um formato ovalado com altura de 22 centímetros e aos 40 centímetros, diferentemente do ensaio B2-M40-J4, o escoamento possuía uma frente de onda íngreme, com altura de 24 centímetros.

Quando a onda alcançou o comprimento de 50 centímetros, sua frente estava ainda mais íngreme, mostrando uma tendência de verticalização e posterior quebra tubular, a altura da onda nesse momento era de 26 centímetros. O último quadro, referente ao trajeto de 60 centímetros, mostra uma frente de onda vertical, com altura de 27 centímetros, a tendência de quebra tubular se confirmou ao perceber um leve deslocamento horizontal na parte superior da frente de onda.

Figura 44 – Desenvolvimento geométrico da onda B2-M40-J8 (três repetições).



Fonte: elaborado pelo autor.

7.3.1.13 Síntese da análise geométrica da formação da onda

A análise detalhada do desenvolvimento geométrico de todas as ondas ensaiadas apontou um comportamento semelhantes entre os grupos:

- a) canal seco a jusante;
- b) canal preenchido a jusante e quebra tubular;
- c) canal preenchido a jusante e quebra ascendente.

Nos ensaios com canal seco a jusante, há uma diferença no formato da cabeça da onda, que é maior, quanto maior o nível a montante. Nos casos de M20-J0 e M40-J0, a cabeça é mais espessa que o corpo da onda, enquanto que o M10-J0 mantém uma mesma altura para todo o escoamento.

Referentes às ondas com quebra tubular, foram identificadas 4 etapas de desenvolvimento, que consistem em: (i) alteamento de nível de jusante a montante, (ii) acúmulo de água, (iii) projeção para frente e (iv) quebra impactando na lâmina de água a jusante. O que diferencia os ensaios em que ocorreu quebra tubular são os momentos em que cada etapa aconteceu. Enquanto na M20-J2 é possível visualizar as 4 etapas de desenvolvimento dentro da distância de 60 centímetros analisadas, na M40-J4 foi possível identificar apenas as três primeiras. Já na M40-J8 a única etapa identificada foi o acúmulo de água. Como nas ondas com mais volume de água, as etapas são mais duradouras, o seu desenvolvimento pode ser conferido de forma mais detalhada, pois ela passa mais tempo (logo, há mais quadros registrados) alteando nível, acumulando água, se projetando para frente e quebrando.

O mesmo é identificado nas ondas de quebra ascendente, M10-J4 e M20-J8. As ondas possuem a mesma proporção entre nível a montante e jusante e o desenvolvimento da primeira onda (M10-J4) até quebrar é reproduzido pela segunda (M20-J8), porém de forma mais prolongada. Isto é, enquanto M10-J4 chega na altura máxima de 10 centímetros e quebra na distância de 30 centímetros, a M20-J8 alcança a altura máxima de 16 centímetros e quebra na distância de 60 centímetros.

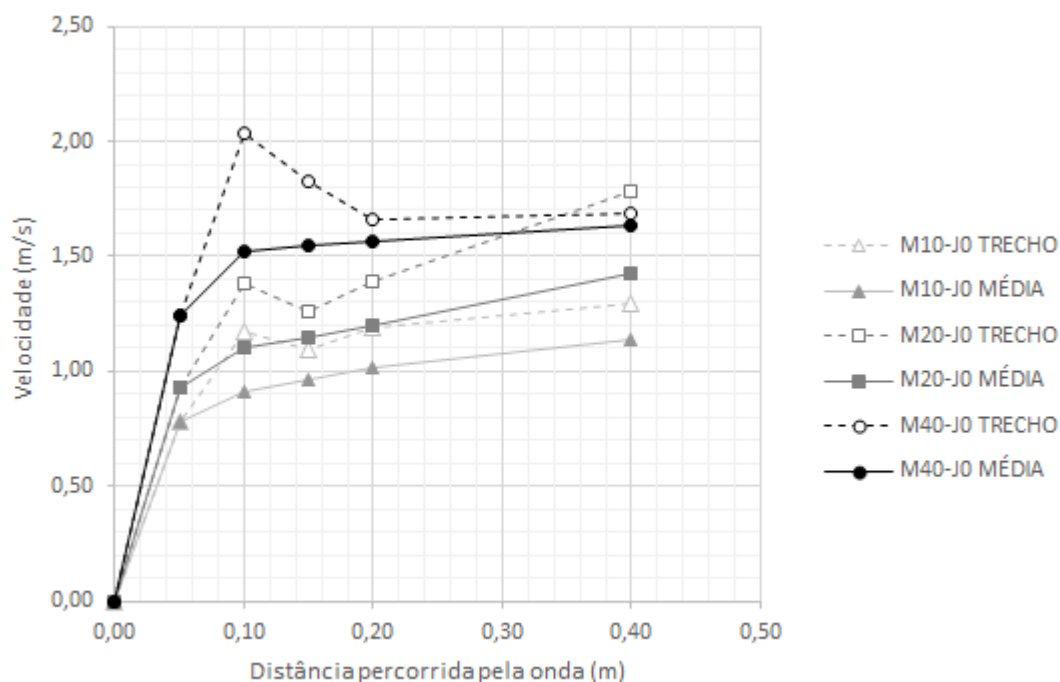
7.3.2 Análise cinemática

7.3.2.1 Desenvolvimento da onda de ruptura: instantes iniciais ao rompimento até 20 centímetros de distância

Neste item foram avaliadas as características cinemáticas iniciais (velocidade e aceleração) no instante logo após a retirada do barramento (formação da onda de ruptura) e sua relação com o nível de água a montante do reservatório. Essa análise foi realizada em todos os ensaios com nível de jusante seco (J0), da segunda e terceira série de experimentos, pois são os únicos em que é possível identificar a formação da onda nos primeiros 20 centímetros através das imagens.

A metodologia utilizada para a definição da velocidade foi apresentada no item 6.3.3 e utiliza as imagens da câmera rápida para quantificar o tempo necessário para a onda se deslocar. A partir disso é possível calcular a velocidade e a aceleração médias e por trecho, esse conceito também foi explicado no item 6.3.3. A Figura 45 apresenta os valores de velocidade registrados imediatamente após a retirada da placa.

Figura 45 – Desenvolvimento da velocidade nos experimentos com o canal seco a jusante.



Fonte: elaborado pelo autor.

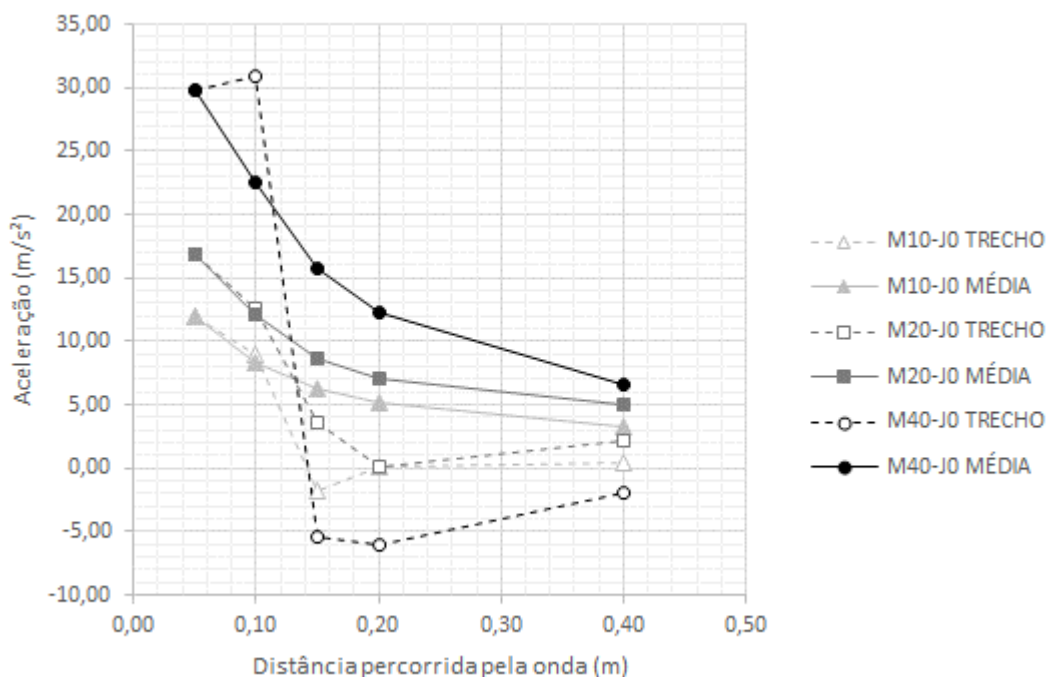
Pela análise da Figura 45, confere-se que o comportamento da velocidade é comum para as três configurações analisadas. Ocorreu um crescimento abrupto da velocidade nos primeiros 5 centímetros de comprimento após a barragem, seguidos de um crescimento moderado, para todos os ensaios. Ao retirar a placa, a situação que antes estava equilibrada, necessitou de um novo ajuste e assim, a energia potencial vinculada à altura do reservatório – carga hidrostática – se transformou em carga cinética, relacionada ao movimento do escoamento.

A diferença dos resultados se encontrou na magnitude das velocidades identificadas. Nota-se que as maiores inclinações, vistas no gráfico da Figura 45, representando a aceleração do escoamento, ocorreram nos ensaios com maiores alturas potenciais. Isso acontece devido a maior carga hidrostática, a qual é proporcional ao nível de água no reservatório. Os resultados foram maiores velocidades para barramentos com maior nível de água a montante.

Um ponto importante a ressaltar é o fato das velocidades por trecho serem maiores que as velocidades médias. O valor da velocidade por trecho simula de forma mais aproximada a ordem de grandeza da velocidade que irá ocorrer quando uma barragem romper. Como a velocidade média sempre considera o movimento desde o início, isso acumula os valores menores de velocidade no início do desenvolvimento da onda, que parte do repouso, diminuindo sua magnitude. Analisando exclusivamente a velocidade por trecho (Figura 45), foi possível perceber um crescimento ainda mais acentuado do trecho entre 5 a 10 centímetros, oriundo da formação inicial acentuada da onda. Na sequência a velocidade diminuiu, já estabilizada em uma nova condição de equilíbrio e a partir daí seguiu aumentando moderadamente.

O entendimento de como essas velocidades se desenvolvem pode ser melhor compreendido se a análise se concentrar na aceleração que é desenvolvida por cada onda. Utilizando os mesmos princípios da análise anterior, a Figura 46 mostra o gráfico com as acelerações (médias e por trecho) de cada um dos ensaios estudados.

Figura 46 – Aceleração desenvolvida pela frente de onda em relação à distância percorrida, com o canal seco a jusante.



Fonte: elaborado pelo autor.

A aceleração das ondas tem um comportamento parecido, primeiramente há um pico alto, logo após o rompimento da barragem, essa alta aceleração inicial é devido à água estar também sob efeito da aceleração gravitacional e em deslocamento vertical, buscando sua nova condição de equilíbrio hidrodinâmico. Quanto mais alto o nível no reservatório, maior é a aceleração inicial. Depois desse pico, a aceleração tende a diminuir devido ao estabelecimento de uma nova condição de equilíbrio do escoamento e também por influências externas, como a fricção com o fundo e paredes do canal.

O desenvolvimento da aceleração por trechos mostra que a única condição que segue acelerando após os 5 centímetros iniciais de avanço da onda, é o reservatório com 40 centímetros (M40-J0) a montante, mesmo que com uma taxa de aceleração menor. Isso se deve a existência de mais água acumulada nesse reservatório. Há mais partículas que antes estavam barradas e agora se deslocam livremente a jusante, com menos resistência do meio, elas aumentam a aceleração do escoamento como um todo. Após esse pico positivo também é o M40-J0 que mais desacelera. A partir disso a aceleração tende a se aproximar de zero.

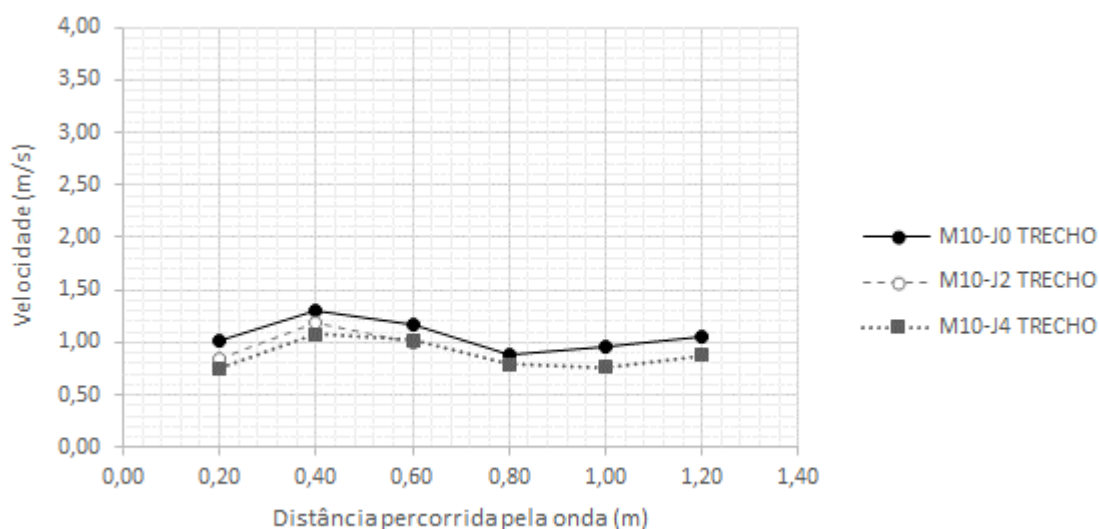
7.3.2.2 Desenvolvimento da onda de ruptura: trechos de 20 a 120 centímetros

Ainda utilizando o método apresentado em 6.3.3, essa análise identificou os valores da velocidade por trecho, a partir do momento em que frente da onda atingiu a marca de 20 centímetros e se deslocou até 120 centímetros de distância da placa. O registro da velocidade é espaçado a cada 20 centímetros, sendo analisados 5 trechos: 20-40, 40-60, 60-80, 80-100 e 100-120.

Optou-se por apresentar apenas a velocidade desenvolvida por trecho, por entender que ela é mais relevante para a pesquisa, uma vez que essa velocidade atingiu valores maiores e mais próximos ao que irá se observar em um eventual rompimento real de barragem. Para essa análise foram considerados todos os ensaios realizados na série 2 e na série 3 de experimentos.

A Figura 47 apresenta o desenvolvimento da onda com 10 centímetros de nível de água no reservatório e nível a jusante variado: 0, 2 e 4 centímetros.

Figura 47 – Velocidade da frente de onda com 10 centímetros de nível a montante e 0, 2 e 4 centímetros a jusante.



Fonte: elaborado pelo autor.

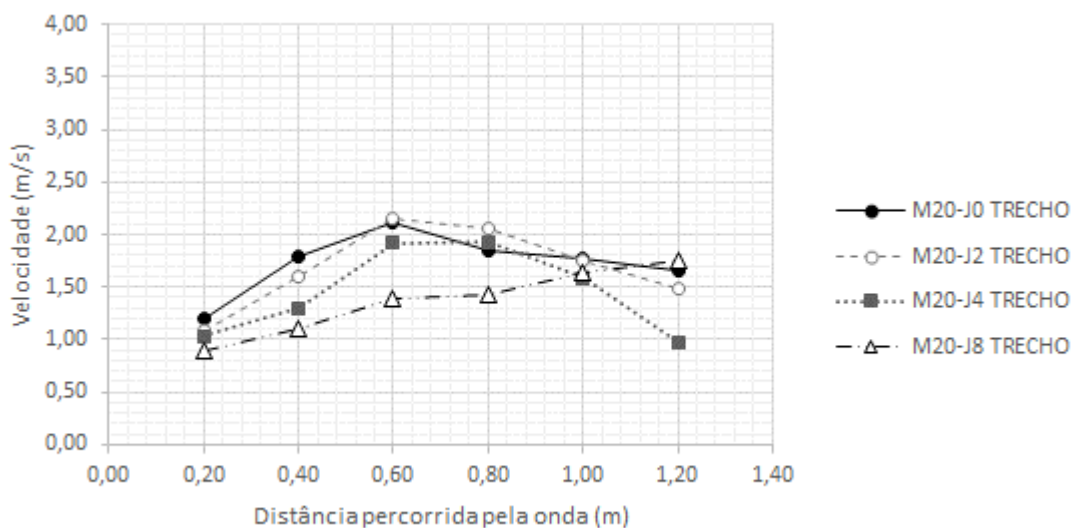
Ao analisar a Figura 47, averiguou-se que a velocidade das ondas de ruptura teve desenvolvimento semelhante a uma senoide, com comprimento de onda longo e uma baixa amplitude de variação de velocidade. Todas as ondas atingiram o pico de velocidade no trecho 20-40 centímetros; como o canal é horizontal, a aceleração vertical é praticamente nula após a onda encontrar uma configuração de pressões hidrodinâmica pós-rompimento. A onda mais

veloz foi a M10-J0, que alcança um pico próximo de 1,30 m/s, seguido da M10-J2 e por fim a M10-J4, essa constatação de velocidade da onda também era esperada, já que as águas a jusante do reservatório também funcionam como uma barreira para o desenvolvimento da onda. Uma onda no canal seco se desenvolve livremente e por isso, atinge maiores velocidades.

A menor velocidade desenvolvida por M10-J0 ocorreu no momento em que a onda se deslocou dos 60 centímetros para os 80 centímetros (trecho 60-80), enquanto que para a M10-J4, esse pico de menor velocidade ocorreu no trecho 80-100, eles marcaram respectivamente, 0,87 e 0,78 m/s. No que tange à aceleração, o comportamento das ondas M10 são semelhantes, tendo o deslocamento de 80 para 100 centímetros como único trecho diferente. No trecho 80-100 a M10-J0 acelerou positivamente, ganhando velocidade, enquanto que a M10-J4 desacelerou, perdendo velocidade. Após o pico negativo, as velocidades voltam a acelerar, indicando que a onda se desenvolveu através de pulsos não permanentes, função da sua formação geométrica, já que a onda acelera durante a quebra e desacelera durante o acúmulo de água.

A Figura 48 apresenta o desenvolvimento da onda com 20 centímetros de nível de água no reservatório e nível a jusante variado: 0, 2, 4 e 8 centímetros.

Figura 48 – Velocidade da frente de onda com 20 centímetros de nível a montante e 0, 2, 4 e 8 centímetros a jusante.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 48 mostra que as velocidades oriundas da configuração com linha d'água em 0, 2 e 4 centímetros a jusante possuíram desenvolvimentos semelhantes, sendo uma aceleração até o trecho 40-60, seguido de uma desaceleração até o fim da análise.

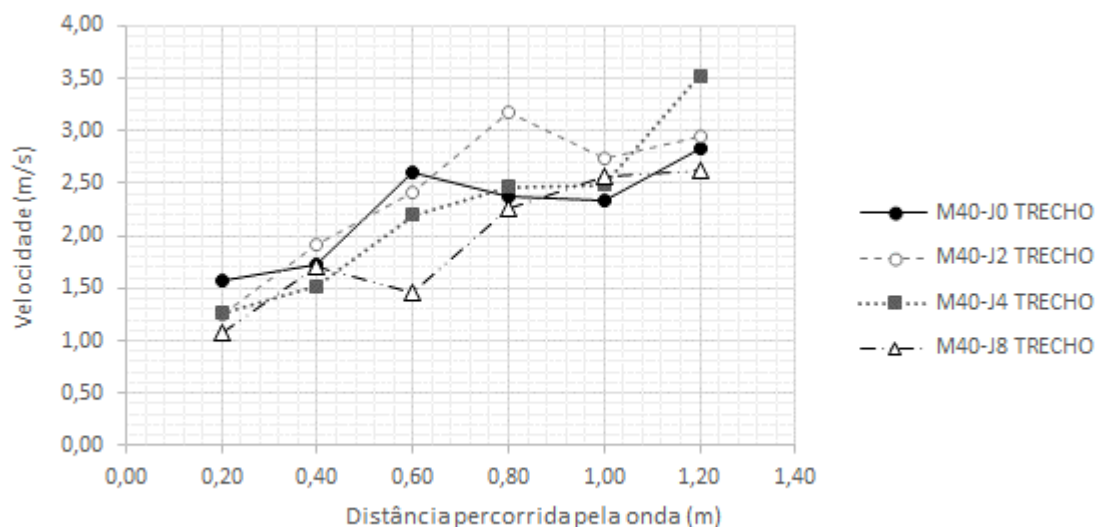
Divergindo desse padrão, há o M20-J8, que mantém um crescimento constante de velocidade durante toda sua trajetória. Conclui-se que a diferença no comportamento de M20-J8 ocorre por se tratar de um maior volume de água que quebra de forma ascendente, mesmo depois da frente de onda ter quebrado, ainda havia uma massa líquida se desenvolvendo horizontalmente de forma a incorporar as águas a jusante e manter o seu desenvolvimento positivo de velocidade.

O M20-J0 e o M20-J2 têm o pico mais alto de velocidade, ambos apontam 2,1 m/s no seu trecho mais veloz, seguido do M20-J4, que possui 1,9 como máximo de velocidade. Como o M20-J8 estava em constante crescimento da sua velocidade, não foi possível identificar um pico, entretanto a sua última velocidade analisada se aproximava do valor de 1,7 m/s. Esse resultado era esperado, uma vez que as menores alturas a jusante registram as maiores velocidades, já que a lâmina de água em repouso a jusante se comporta como uma barreira para o desenvolvimento da onda de ruptura.

As quebras tubulares da onda ocorreram antes do escoamento alcançar 60 centímetros de comprimento, o que indica que a onda acelerou até quebrar e que o próprio impacto da onda a montante na massa líquida a jusante retardou o seu desenvolvimento. O ensaio M20-J8 foi o único em que esse comportamento não foi identificado.

Na sequência das análises, a Figura 47 apresenta a velocidade por trecho das ondas oriundas de reservatório com nível em 40 centímetros de água e nível do canal a jusante variando entre 0 e 8 centímetros.

Figura 49 – Velocidade da frente de onda com 40 centímetros de nível a montante e 0, 2, 4 e 8 centímetros a jusante.



Fonte: elaborado pelo autor.

As ondas com 40 centímetros a montante, se analisadas de maneira global, tiveram um desenvolvimento de velocidade crescente, visto que ao fim da análise (trecho 1,0-1,2 metros), as velocidades dos quatro experimentos foram superiores as identificadas no trecho inicial (0,2-0,4 metros). A onda que registrou maior velocidade foi a M40-J4, contrariando a expectativa que fosse a onda M40-J0, sem água a jusante.

A onda M40-J0 desenvolve uma velocidade crescente, que no trecho 40-60 alcança um pico de 2,6 centímetros. Desacelera parcialmente até o trecho 80-100 e no último trecho volta a acelerar, finalizando o ensaio com uma velocidade de 2,7 m/s.

M40-J2 aponta um comportamento parecido, porém mais prolongado e com maior magnitude que M40-J0. A onda quebra no trecho 60-80 e por isso é lá que está seu primeiro pico de velocidade, na ordem de 3,1 m/s. A partir disso, ela desacelera levemente no trecho 80-100 e volta a acelerar em 100-120.

No caso de M40-J4, a velocidade desenvolve majoritariamente uma aceleração positiva, com apenas um patamar de aceleração próxima a zero no trecho em que a onda quebra, 80-100, e logo depois ela retorna a acelerar. Essa aceleração final ocorre devido ao impacto da quebra projetar uma quantidade significativa de água para frente, essa massa líquida já é considerada como um avanço da onda.

O ensaio M40-J8, por envolver os maiores volumes de água, consegue apresentar de forma mais detalhada o desenvolvimento da velocidade da onda, uma vez que cada etapa entre formação inicial, acúmulo de água e quebra, envolvem maiores distâncias percorridas. A velocidade é ascendente até o trecho 20-40, em função da movimentação da massa líquida originada pela ruptura da barragem, como aconteceu em todos os ensaios já analisados. No trecho 40-60, a resistência das águas de jusante faz com que a onda acumule ainda mais água e se desloque de forma mais devagar. Essa situação só muda quando chega no trecho 60-80, em que a onda começa a cair. Essa queda, auxiliado pela força da gravidade, acelera o desenvolvimento da onda que ganha velocidade até quebrar de forma tubular, em 100-120. A velocidade máxima desenvolvida por esse escoamento é 2,50 m/s, a mais baixa verificada para os ensaios com 40 centímetros a montante do barramento.

A Tabela 11 aponta o desvio padrão, em metros por segundo, aferido para as 3 repetições dos ensaios de desenvolvimento de velocidade e entre parênteses está o coeficiente de variação.

Tabela 11 – Desvio padrão, em metros por segundo, dos ensaios de desenvolvimento de velocidade, entre parênteses está o coeficiente de variação¹⁵.

ENSAIO\ΔX (cm)	20	40	60	80	100	120
M10-J0	0,046 (5%)	0,05 (4%)	0,058 (5%)	0,043 (5%)	0,048 (5%)	0,05 (5%)
M10-J2	0,008 (1%)	0,119 (10%)	0,021 (2%)	-	-	-
M10-J4	0,023 (3%)	0,06 (6%)	0,086 (8%)	0,038 (5%)	0,048 (6%)	0,045 (5%)
M20-J0	0,11 (9%)	0,128 (7%)	0,094 (4%)	0,064 (3%)	0,098 (6%)	0,095 (6%)
M20-J2	0,027 (3%)	0,053 (3%)	0,055 (3%)	0,131 (6%)	0,096 (5%)	0,023 (2%)
M20-J4	0,053 (5%)	0,066 (5%)	0,069 (4%)	0,147 (8%)	0,109 (7%)	0,123 (13%)
M20-J8	0,042 (5%)	0,089 (8%)	0,115 (8%)	0,19 (13%)	0,119 (7%)	0,192 (11%)
M40-J0	0,148 (9%)	0,087 (5%)	0,225 (9%)	0,118 (5%)	0,182 (8%)	0,195 (7%)
M40-J2	0,101 (8%)	0,077 (4%)	0,12 (5%)	0,44 (14%)	0,243 (9%)	0,102 (3%)
M40-J4	0,118 (9%)	0,087 (6%)	0,075 (3%)	0,111 (4%)	0,065 (3%)	0,204 (6%)
M40-J8	0,059 (5%)	0,055 (3%)	0,07 (5%)	0,151 (7%)	0,197 (8%)	0,072 (3%)

Fonte: elaborado pelo autor.

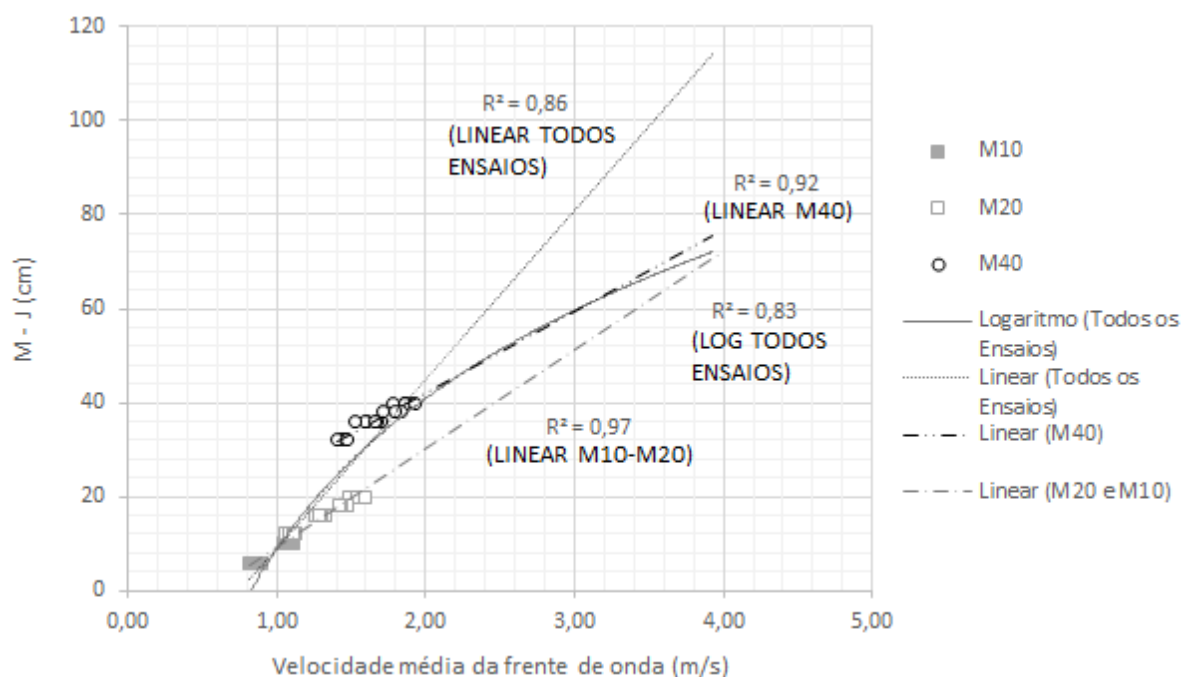
A mediana dos valores dos coeficientes de variação equivale a 5%, o que é considerado um valor baixo, corroborando à validade dos resultados obtidos. As maiores variações encontradas foram da ordem de 13% e 14%, levando em consideração o número de trechos e o

¹⁵ Coeficiente de variação é uma medida padronizada de dispersão de uma distribuição de frequências. É comumente expresso como uma porcentagem, sendo definido como a razão do desvio padrão pela média.

número de ensaios, esse também é um resultado considerado dentro do aceitável para um trabalho experimental, no que tange a confiabilidade dos resultados.

Para analisar todos os ensaios de forma conjunta, a Figura 50 apresenta a correlação entre a velocidade média da frente de onda de ruptura e a diferença entre os níveis a montante e jusante do barramento. Os dados foram separados em função da altura no reservatório, significando que M40, por exemplo, engloba todos os ensaios com 40 centímetros de água no reservatório e lâminas de 0, 2, 4 e 8 no restante do canal e gera os valores do eixo vertical em 40, 38, 36 e 32 centímetros, respectivamente. O mesmo ocorre com M20 e M10.

Figura 50 – Gráfico da velocidade média por trecho da frente de onda pela diferença entre nível d'água a montante e nível d'água a jusante.



Fonte: elaborado pelo autor.

Com base na Figura 50 é possível examinar a variação da velocidade em relação ao desnível inicial. Os resultados apresentam um crescimento linear, ou seja, quanto maior a diferença entre o nível de água a montante e a jusante da placa, maior a velocidade da onda de ruptura. Um ajuste de tendência linear foi proposto, obtendo os coeficientes de determinação para cada grupo de dados afins. Optou-se por unir a análise dos dados M10 e M20, em função do bom ajustamento das suas distribuições quando analisadas de forma conjunta. Inclusive, a

projeção linear com maior coeficiente de determinação (R^2)¹⁶ foi baseada no conjunto de dados M10 e M20, sendo $R^2 = 0,97$, identificada pela linha traço-ponto.

A projeção linear traço-ponto-ponto, teve como fonte de dados apenas a altura a montante de 40 centímetros, resultando em um $R^2 = 0,92$. Ao tentar encaixar todos os dados em uma única equação, são expostas duas projeções: a linha pontilhada é linear e tem um coeficiente de determinação maior, $R^2 = 0,86$, porém diverge do limite criado entre os dados M40 e M20-M10. Enquanto que a linha contínua é uma projeção logarítmica que se enquadra de forma mais coerente nas demais equações, mesmo tendo um $R^2 = 0,83$.

7.3.2.3 Síntese da análise cinemática

Os ensaios de análise cinemática apontaram primeiramente que velocidade identificada por trechos difere significativamente da velocidade média geral desenvolvida pela onda ruptura. Como o escoamento parte de uma situação de repouso, a velocidade média geral tende a minorar os resultados, principalmente nos instantes iniciais. Dessa forma, as análises posteriores foram realizadas levando em consideração a velocidade por trecho, que é mais próxima da situação que ocorre em um rompimento de barragem real.

Os resultados mostram uma tendência em que a velocidade cresce de forma proporcional ao aumento do nível de montante e inversamente proporcional ao aumento do nível de jusante. Pois o nível de jusante atua como um obstáculo, retardando o desenvolvimento da onda de ruptura.

O pico de velocidade identificado para as ondas com 10 centímetros de água a montante equivaleu a 1,3 m/s. Para as ondas que partiram de uma configuração com 20 centímetros de água a montante, encontrou-se valores máximos na ordem de 2,2 m/s e para as ondas de ruptura oriundas da maior altura a montante ensaiada, 40 centímetros, identificou-se uma velocidade maior que 3,5 m/s.

¹⁶ O coeficiente de determinação é simbolizado por R^2 e indica quanto da variação total é comum aos elementos que constituem os pares analisados. Quanto mais próximo de 1 for o coeficiente de determinação, tanto maior será a validade da projeção.

Visando garantir a confiabilidade dos resultados, foram realizadas 3 repetições para cada configuração de ensaio e constatou-se um coeficiente de variação menor que 10% para 94% dos experimentos e menor que 6% para 65% dos experimentos.

Por fim foram agrupados os resultados semelhantes a fim de encontrar um padrão de crescimento linear da velocidade em função da diferença de nível a montante e a jusante da placa. Em um grupo ficaram os ensaios com uma diferença de nível menor que 20 centímetros e esses crescem, em média, a uma taxa de 0,047 m/s/cm de diferença. Já os ensaios com diferença de nível entre 30 e 40 centímetros formaram o outro grupo analisado e foi averiguado que esses aumentam sua velocidade em 0,053 m/s para cada aumento de centímetro na diferença de nível de água a montante e a jusante da placa. Ao analisar os dois grupos supracitados de forma única, entendeu-se que a curva logarítmica é a que melhor representa a variação de velocidade de todos os ensaios.

7.4 MOMENTO DE QUEBRA DA ONDA

Nas análises anteriores verificou-se que em função da configuração inicial dos níveis de água a montante e a jusante do barramento (M e J), ocorreram dois tipos diferentes de quebra (rebentação) da onda de ruptura: tubular ou ascendente, conforme descrito no capítulo 4.4.2 na Figura 7. A definição do padrão de quebra se dá em função da relação R_N (razão entre os níveis de montante e jusante) apresentada no capítulo 7.2.2.

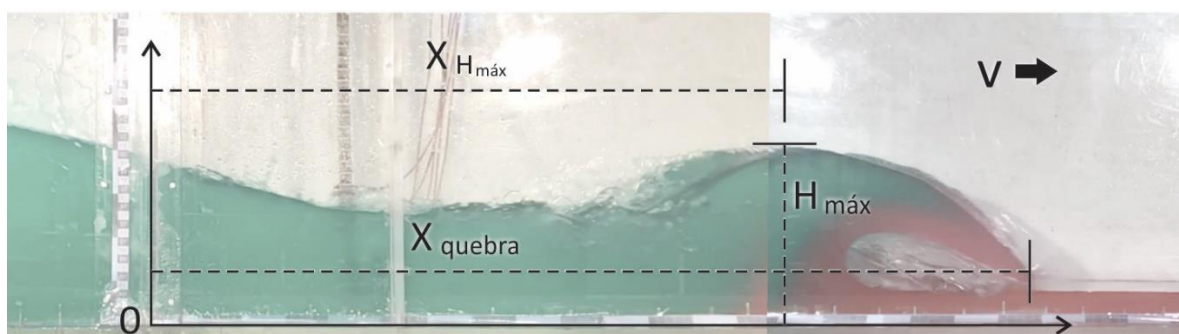
Ondas de ruptura em que o nível de água a montante (M) excede em mais de 5 vezes o nível a jusante (J), quebram de forma tubular. Dos 9 ensaios com presença de nível de água a jusante, 6 indicaram quebra tubular. Nesse sentido, foram utilizados para os cálculos apresentados nesse capítulo os seguintes ensaios (e suas devidas repetições) da segunda e terceira série de experimentos:

- a) M10-J2
- b) M20-J2
- c) M20-J4
- d) M40-J2
- e) M40-J4
- f) M40-J8

Posteriormente a identificação dos tipos de quebra realizados pelas diferentes configurações de ensaio e análise de desenvolvimento geométrico e de velocidade das ondas de ruptura, observou-se a possibilidade de correlações entre ordens de grandeza geométricas e físicas do fenômeno hidráulico estudado nessa pesquisa. Definiu-se o momento de quebra como o momento em que ocorre o primeiro contato entre a massa líquida que está em queda e a linha d'água a jusante dessa massa em movimento.

As variáveis de mais relevância envolvidas no processo de rebentação (quebra) da onda estão expostas na Figura 51.

Figura 51 – Variáveis importantes no momento de quebra da onda.



Fonte: elaborado pelo autor.

Sendo,

$H_{MÁX}$, altura máxima que a frente de onda atinge no momento de quebra, em metros (m);

$X_{Hmáx}$, distância em relação à placa, na qual ocorre a altura máxima ($H_{máx}$), em metros (m);

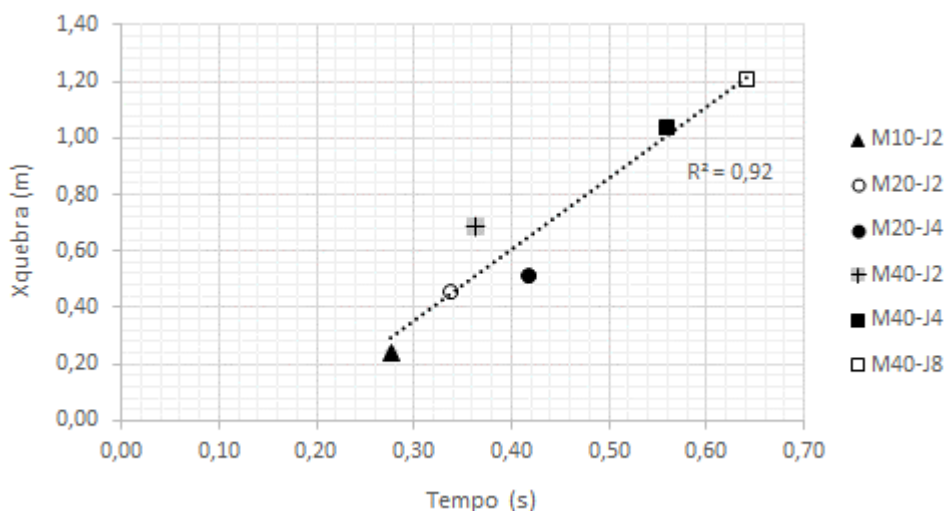
X_{QUEBRA} , distância em relação à placa em que a massa líquida encosta na linha d'água a jusante, em metros (m);

v , média de velocidade do deslocamento da onda, em metros por segundo (m/s).

7.4.1 Velocidade média até a quebra da onda de ruptura

O primeiro tópico a ser analisado é a correlação dos valores da velocidade média desenvolvida pelas ondas com quebra tubular até a arrebenção. A Figura 52 apresenta a relação entre a distância percorrida pela onda de ruptura e o tempo em que ocorre esse fenômeno.

Figura 52 – Relação entre distância percorrida pela onda e o tempo em que ocorre a quebra tubular.



Fonte: elaborado pelo autor.

A análise da Figura 52 apresenta uma relação proporcional entre tempo e distância, dado que quanto maior o tempo dispendido para ocorrer a quebra, mais ela se desenvolve ao longo do canal. Foi adicionado ao gráfico uma tendência de ajuste linear que indica uma alta correlação, sendo $R^2 = 0,92$.

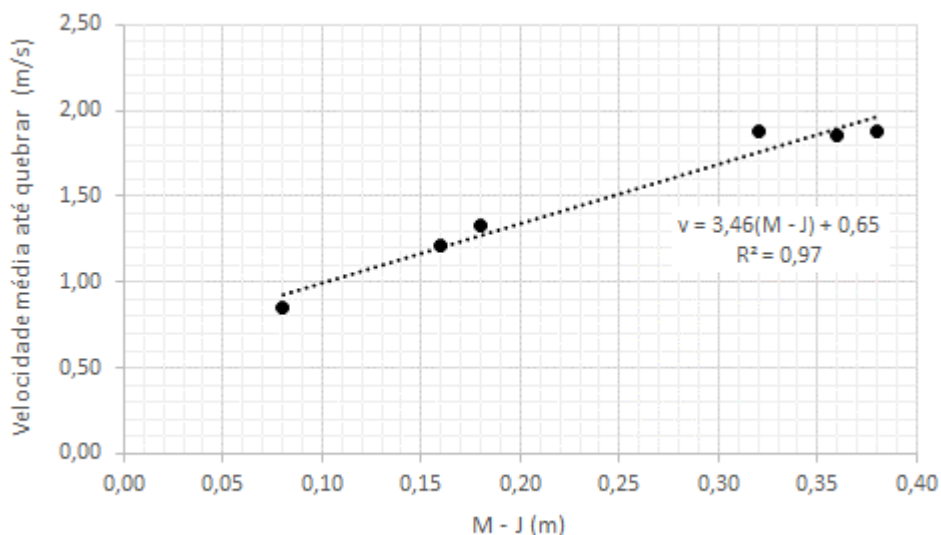
A primeira quebra ocorre na onda oriunda de um cenário com nível água no reservatório em 10 centímetros e 2 centímetros a jusante (M10-J2), essa onda arrebenta após percorrer 20 centímetros. Depois é a M20-J2, que quebra aproximadamente nos 45 centímetros. Um pouco mais próximo de 50 centímetros, é onde ocorre a quebra da M20-J4. Os locais de quebra das ondas com 20 centímetros de água a montante são os com maior proximidade, dentre os ensaios analisados.

A onda M40-J2 quebra nos 65 centímetros, M40-J4 arrebenta próxima dos 100 centímetros de deslocamento e por fim, a M40-J8 quebra passando os 120 centímetros. É perceptível que quanto mais alto o nível de água a montante e a jusante, mais distante ocorre a arrebentação da onda de quebra tubular.

A Figura 53 apresenta a velocidade média com que a onda se deslocou até arrebentar (razão entre distância percorrida e o tempo até ocorrer a quebra). Relaciona-se a velocidade média com a diferença de altura entre os níveis a montante (M) e a jusante (J). O intuito é

visualizar como a diferença entre níveis afeta nos valores da velocidade da onda antes de ocorrer a primeira quebra.

Figura 53 – Diferença de altura entre os níveis a montante e jusante da placa metálica, relacionada com a velocidade da frente de onda, na quebra tubular.



Fonte: elaborado pelo autor.

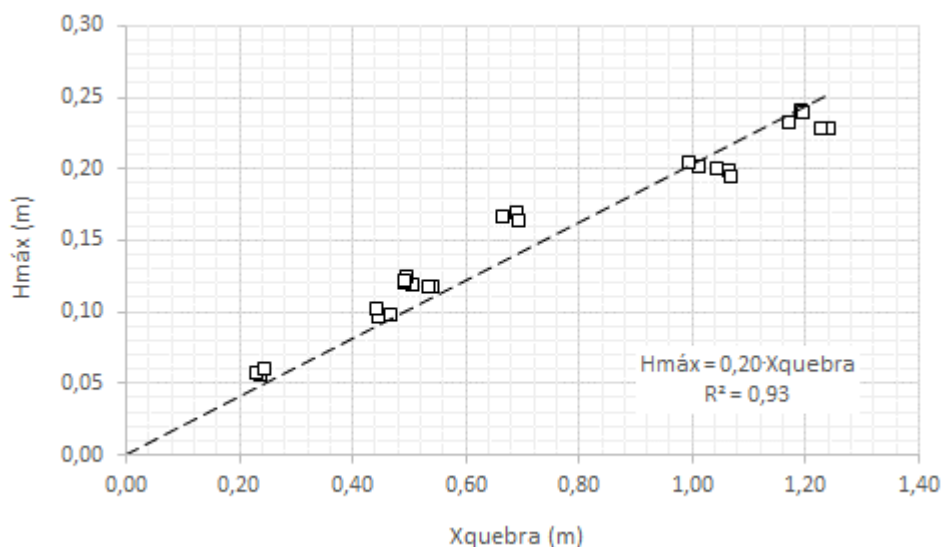
Pela análise da Figura 53 fica evidenciado que para os ensaios realizados com quebra tubular, a velocidade média da onda, até o momento da quebra, cresce linearmente em função do aumento da diferença entre os níveis do canal. Os dados aferidos possuem uma correlação linear de 0,97. Ao entender o processo de deslocamento da onda como uma transformação de energia potencial (função da altura do nível de água no barramento) em energia cinética (função da velocidade), percebe-se que as únicas grandezas que podem impactar nas equações de energia são a altura dos níveis de água e a velocidade da onda.

7.4.2 Correlações geométricas da onda de ruptura no momento da quebra

O formato da onda de ruptura no momento de quebra tem três variáveis principais: a altura máxima atingida pela onda ($H_{MÁX}$); o ponto na horizontal em que essa altura máxima ocorre ($X_{Hmáx}$); e a distância percorrida pela onda até o momento da quebra (X_{QUEBRA}), todos previamente apresentados na Figura 51.

O gráfico apresentado na Figura 54 expõe a relação entre $H_{MÁX}$ e X_{QUEBRA} .

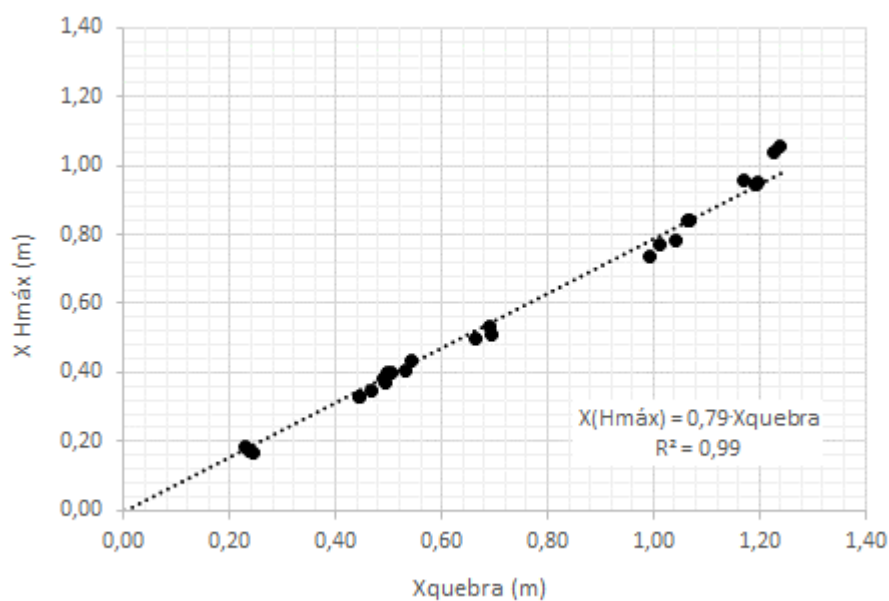
Figura 54 – Relação entre a altura máxima ($H_{MÁX}$) e a distância percorrida pela onda no momento da quebra (X_{QUEBRA}).



Fonte: elaborado pelo autor.

É possível conferir na Figura 54 que a altura máxima que a onda atinge no momento da quebra, pode ser aproximada, com uma relação R^2 de 0,93, para 20% da distância percorrida pela onda. No mesmo sentido, a Figura 55 apresenta a relação entre $X_{HMÁX}$ e X_{QUEBRA} .

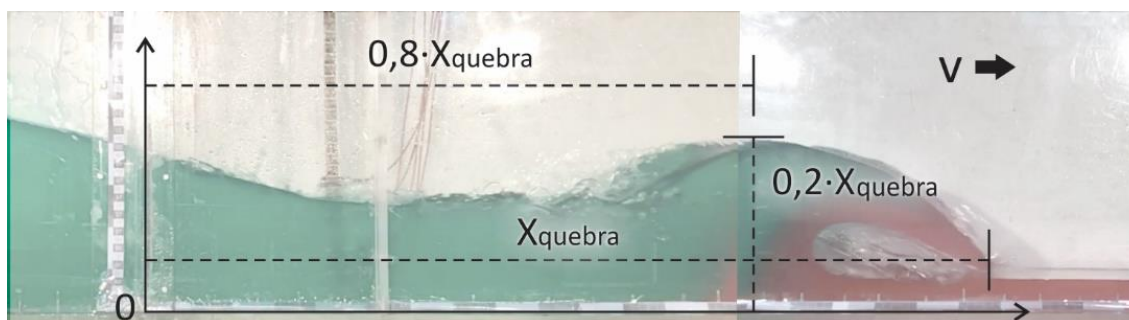
Figura 55 – Relação entre a distância horizontal ($X_{HMÁX}$) em que ocorre a altura máxima e a distância total (X_{QUEBRA}) percorrida pela onda no momento da quebra.



Fonte: elaborado pelo autor.

Ao analisar a Figura 55, identifica-se que o local em que ocorre a altura máxima também é padrão. $X_{HMÁX}$ possui 80% do comprimento de X_{QUEBRA} , com uma relação $R^2 = 0,99$. A consistência das relações entre as principais medidas geométricas da onda, indicam um formato padrão da quebra tubular da onda de ruptura, independentemente das configurações iniciais do experimento. A Figura 56 ilustra a relação de grandezas geométricas de uma quebra tubular padrão de uma onda de ruptura.

Figura 56 – Medidas padrões da onda de ruptura com quebra tubular, no momento da quebra.



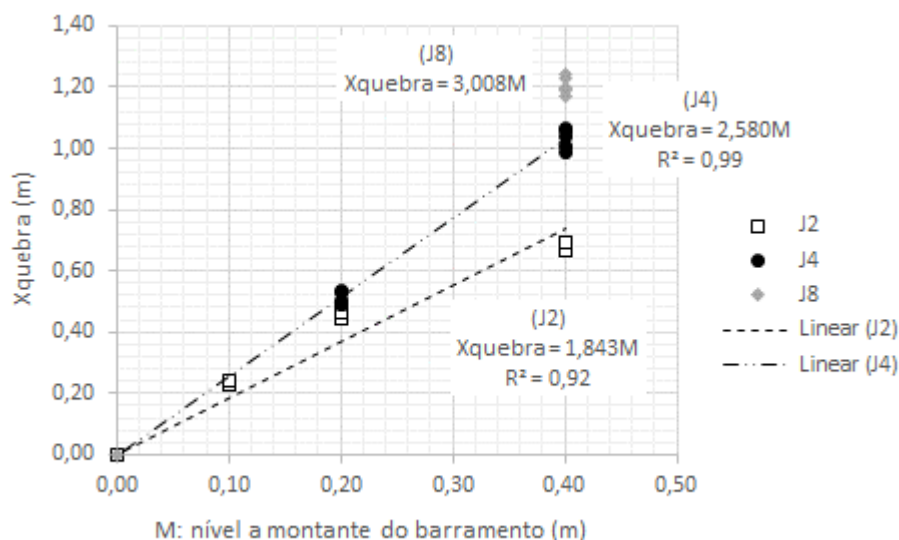
Fonte: elaborado pelo autor.

Com as medidas apresentadas na Figura 56, é possível calcular a altura máxima e o ponto que ela ocorre, em função do comprimento da onda no momento da quebra. Restando saber, como se dá essa variação da distância percorrida pela onda após a retirada do barramento.

Dentro dos ensaios realizados nessa pesquisa, as únicas condições experimentais que variaram foram os níveis iniciais a montante e a jusante do barramento, dessa forma, o comprimento da onda no momento da quebra deve ser uma função desses níveis iniciais.

A Figura 57 relaciona o comprimento da onda no momento da quebra com as alturas a montante, na configuração inicial. Os ensaios foram agrupados em função da sua altura a jusante do barramento antes da ruptura do barramento, sendo J2 igual a uma lâmina de água de 2 centímetros, J4 com 4 centímetros e J8 com 8 centímetros de água a jusante.

Figura 57 – Comprimento da onda de ruptura no momento da quebra, em função da altura de montante pré-ruptura.

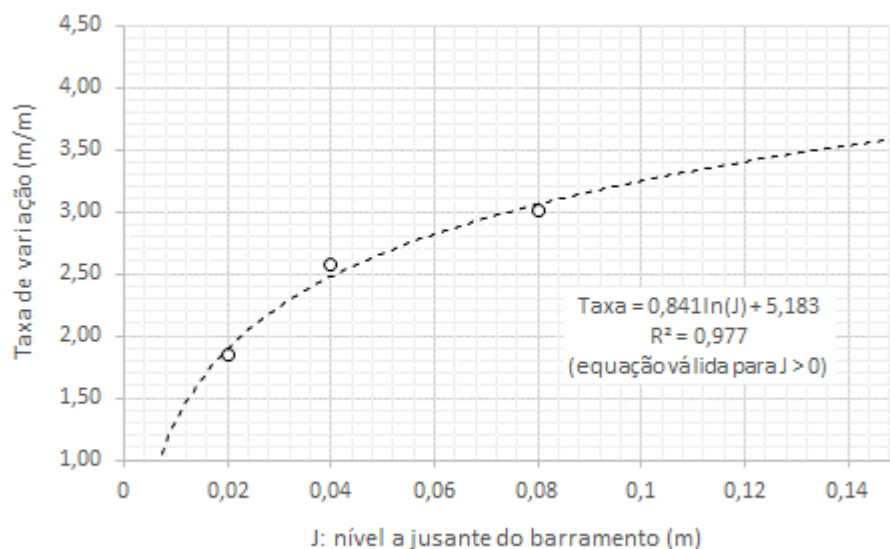


Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados vistos na Figura 57 mostram que a distância percorrida pela onda até o momento de ruptura aumentou em função do nível de montante do ensaio. Entretanto, a taxa com que ocorre esse aumento é função do nível de jusante pré-ruptura. Para os ensaios com nível de jusante de 2 e 4 centímetros foi possível realizar aproximações lineares, com relações R^2 maiores que 0,9. Para o ensaio com 8 centímetros de lâmina a jusante, utilizou-se apenas a média dos pontos do ensaio M40-J8, sem caracterizar uma aproximação linear.

A Figura 58 apresenta a relação entre a taxa de variação de X_{QUEBRA} e os níveis da lâmina de água a jusante do barramento no início da ruptura.

Figura 58 – Relação entre a taxa de variação do aumento da distância percorrida pela onda até o momento da quebra e o nível de jusante ($J > 0$).



Fonte: elaborado pelo autor.

É possível identificar na Figura 58 uma relação logarítmica entre a taxa de variação e os níveis de jusante. Dessa forma é possível equacionar os níveis de montante (M) e jusante (J), na configuração do inicial do experimento, para calcular a distância percorrida pela onda até sua quebra.

$$X_{QUEBRA} = (0,841 \cdot \ln(J) + 5,183)M \quad (\text{equação 17})$$

Os resultados experimentais são comparados com os resultados da equação 17 e apresentados através da Tabela 12.

Tabela 12 – Valores médios do comprimento da onda de ruptura no momento da quebra para as 6 configurações de ensaio com $R_N > 5$, caracterizando quebras tubulares de onda.

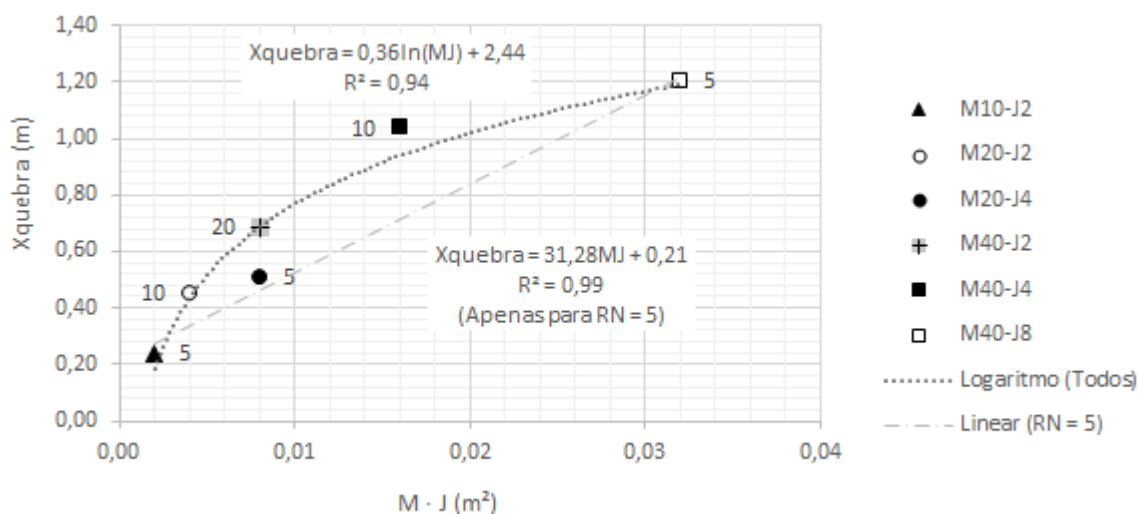
ENSAIO	R_N (-)	M (m)	J (m)	X_{QUEBRA} experimental (m)	X_{QUEBRA} calculado (m)	Erro relativo (%)
M10-J2	5	0,10	0,02	0,236	0,189	19,8%
M20-J2	10	0,20	0,02	0,451	0,379	16,0%
M40-J4	20	0,40	0,02	0,683	0,758	10,9%
M20-J4	5	0,20	0,04	0,510	0,495	2,8%
M40-J4	10	0,40	0,04	1,036	0,991	4,3%
M40-J8	5	0,40	0,08	1,203	1,224	1,7%

Fonte: elaborado pelo autor.

A curva proposta se ajustou melhor aos resultados com 4 e 8 centímetros de altura a jusante, com erros relativos na ordem de 2% a 4%. O erro para os ensaios com J2, ficou entre 10 a 20%. A ordem de grandeza do erro relativo demonstra que a equação é aplicável e reproduz o que é visto de forma experimental.

Um segundo viés da análise das alturas dos níveis de água a montante (M) e jusante (J) do barramento em relação ao momento de quebra da onda de ruptura, é apresentado ao se propor uma relação entre o produto dessas alturas com a distância percorrida pela onda até quebrar, apresentada na Figura 59. Essa área teórica, originada da multiplicação entre os níveis envolvidos no processo de ruptura (M·J), se propõe a criar um parâmetro que mensure a quantidade de água que interage na seção pós-ruptura da barragem e o quanto isso pode impactar no momento da quebra da onda de ruptura.

Figura 59 – Distância percorrida pela onda até a arrebentação, em função do produto das alturas de montante e jusante da placa (os dados estão rotulados com seus respectivos valores de R_N).



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 59 apresenta no seu eixo vertical a distância percorrida pela onda até a quebra e no eixo horizontal está o produto entre a altura de montante e jusante. Os dados são legendados em função dos níveis de água a montante (M) e jusante (J) e são rotulados no gráfico com a relação R_N (essa relação foi explicada no item 7.2.2). O gráfico também apresenta duas linhas de tendência, uma logarítmica, levando em consideração todos os valores e outra linear, que considera apenas os dados que tiveram $R_N = 5$.

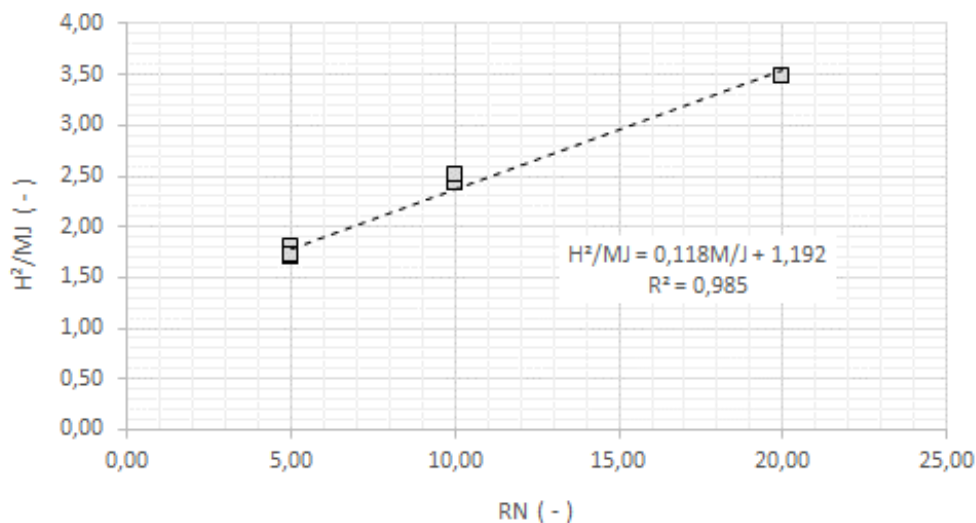
Analisando primeiramente o comportamento de todos os dados, é possível identificar que tanto o aumento do nível de montante quanto de jusante, impactam no aumento da distância percorrida pela onda antes de quebrar. A maior parcela de responsabilidade em relação ao aumento da distância percorrida, é do nível de água de montante, visto que todas as ondas M40 percorrem maiores distâncias que as M20 e essas quebram ainda depois de M10.

Porém, ao se deter em uma análise específica para cada um desses grupos, evidencia-se que o nível de jusante também tem uma parcela, embora menor, de responsabilidade em relação ao aumento da distância percorrida. Pois, quando se realiza uma comparação restrita aos ensaios com mesmo nível de montante, verifica-se que as ondas que percorrem as maiores distâncias são as que possuem maior nível a jusante. O resultado é uma aproximação logarítmica com $R^2 = 0,93$.

Ratifica-se que o nível de montante se sobrepõe ao nível de jusante, no quesito influência na distância percorrida pela onda. Ao comparar os resultados de M40-J2 com M20-J4, percebe-se que o produto dos níveis do barramento é o mesmo, mas a distância percorrida pela onda M40-J2 é maior. Assim, uma segunda possibilidade de análise é aberta em função do valor R_N de cada um dos pontos. Realizando essa correlação para os dados de $R_N = 5$ somente, foi possível obter uma equação linear com $R^2 = 0,99$. Para as demais relações de R_N , não houve dados suficientes que permitisse uma aproximação para análise de tendência.

Em um aprofundamento na análise da altura máxima atingida pela onda, de forma a conseguir comparar todos os resultados sob mesmas condições, buscou-se números adimensionais que balizassem o valor da altura em função das características do ensaio. Foi proposto, então, dividir o quadrado da altura pelo produto entre os níveis a montante e a jusante dos ensaios e para esse adimensional, deu-se o nome de altura relativa. Foi feita a correlação da altura relativa com o valor de R_N de cada ensaio. A Figura 60 expõe os resultados encontrados.

Figura 60 – Análise adimensional da altura máxima relativa aos níveis de água a montante e jusante do barramento pré ruptura.



Fonte: elaborado pelo autor.

Observa-se no gráfico da Figura 60 comportamentos semelhantes para ondas de ruptura com R_N iguais. Proporções equivalentes de nível de água a montante e a jusante resultam em alturas relativas equivalentes. Os três ensaios de $R_N = 5$ (M10-J2, M20-J4 e M40-J8) apresentaram altura relativa na ordem de 1,75, enquanto os dois ensaios de $R_N = 10$ (M20-J2 e M40-J4) possuíram uma altura relativa na ordem de 2,50 e o único ensaio de $R_N = 20$ (M40-J2) teve altura relativa de 3,50.

A equação 18 descreve o comportamento da altura relativa em função da relação entre níveis a montante e a jusante do barramento, vista na Figura 60:

$$\frac{H_{MÁX}^2}{M \cdot J} = 0,118R_N + 1,192 \quad (\text{equação 18})$$

Manipulando a equação 18, de forma a isolar a altura máxima, tem-se uma terceira aproximação para calcular a altura máxima da onda, em função dos níveis iniciais de água no barramento.

$$H_{MÁX \text{ CALCULADA}} = \sqrt{0,118M^2 + 1,192MJ} \quad (\text{equação 19})$$

Os erros relativos da altura máxima calculada em comparação com os dados medidos experimentalmente, são da ordem de 3%.

7.4.3 Síntese das análises relacionadas ao momento de quebra da onda de ruptura

A primeira análise (item 7.2.2) identifica que as ondas em que a quebra é tubular, possuem relação de nível (R_N) maior ou igual a 5, estabelecendo a proporção mínima necessária entre os níveis de montante e jusante para ocorrer a quebra tubular.

A análise específica do momento da quebra tubular da onda, ocorre no capítulo 7.4. Inicia-se estabelecendo a velocidade média da onda até a ocorrência da arrebenção. Os resultados encontrados variaram de 0,8 a 2 m/s e são diretamente proporcionais a diferença de altura de os níveis iniciais de montante (M) e jusante (J) do barramento. A velocidade aumenta a uma taxa de 0,035 m/s para cada avanço de 1 centímetros da diferença entre M e J.

A sequência da análise correlaciona as variáveis da onda e realiza aproximações que permitem calcular os principais parâmetros de formato no momento da quebra tubular, destacando:

- a) $H_{MÁX} = 0,2 \cdot X_{QUEBRA}$
- b) $X_{Hmáx} = 0,8 \cdot X_{QUEBRA}$
- c) $X_{QUEBRA} = (0,841 \cdot \ln(J) + 5,183)M$
- d) $Velocidade = 3,46(M - J) + 0,65$
- e) $H_{MÁX\text{ CALCULADA}} = \sqrt{0,118 \cdot M^2 + 1,192 \cdot MJ}$

7.5 COMPARAÇÃO COM EQUAÇÃO ANALÍTICA

Neste item os resultados obtidos através do experimento físico da onda de ruptura são confrontados com a solução analítica proposta por Chanson (2006) para canais secos sem declividade.

7.5.1 Distância percorrida em função do tempo

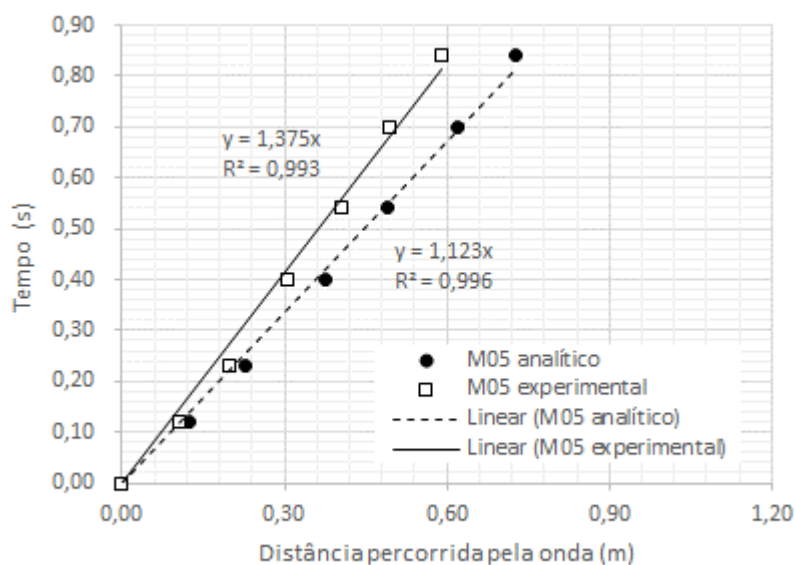
A primeira análise se dá na comparação da distância percorrida em um determinado intervalo de tempo. Para os dados experimentais, foram utilizados os resultados da segunda, terceira e quarta série, com canal seco a jusante. Enquanto que para encontrar os resultados

analíticas foram utilizadas as equações 9, 10, 11 e 12 apresentadas no capítulo 4.5.2, tendo como dados de entrada:

- temperatura $T = 15^{\circ}\text{C}$;
- aceleração da gravidade $g = 9,79 \text{ m/s}^2$;
- massa específica da água $\rho = 998,98 \text{ kg/m}^3$;
- coeficiente de viscosidade absoluto $\mu = 1,15 \cdot 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s/m}$;
- rugosidade¹⁷ $k_s = 1,50 \cdot 10^{-6} \text{ m}$.

A comparação dos resultados analíticos com os experimentais é apresentada a partir da Figura 61 até a Figura 64.

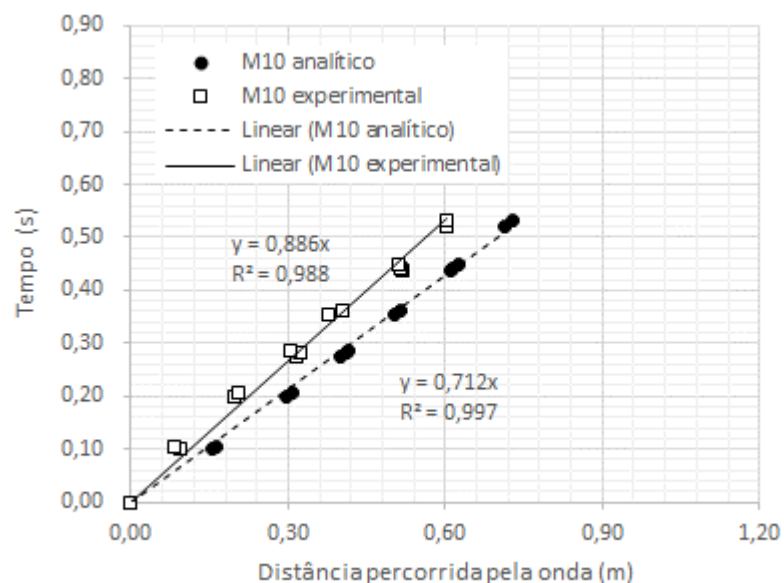
Figura 61 – Distância percorrida pela onda em função do tempo, resultados analíticos e experimentais para o ensaio M05-J0.



Fonte: elaborado pelo autor.

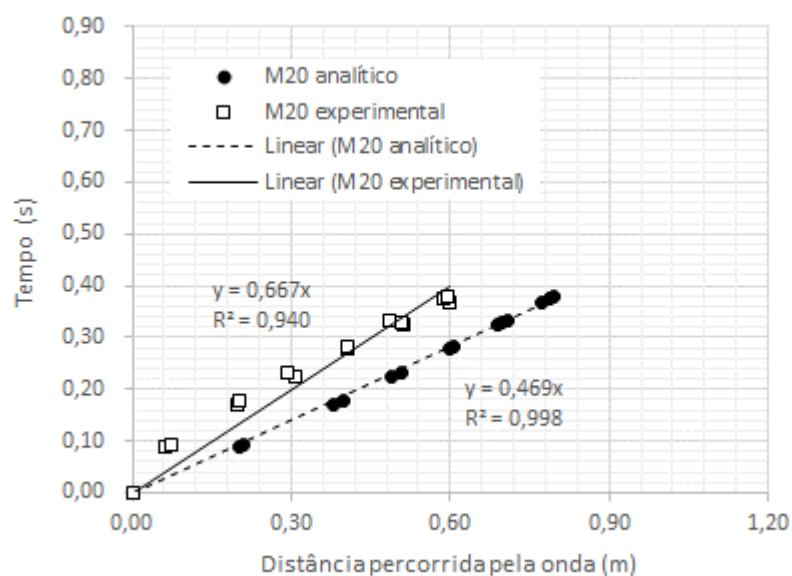
¹⁷ Em Chanson (2006), foi utilizado o conceito de rugosidade equivalente de areia, sendo esse o tamanho do grão de areia, que no experimento de Nikuradse (1933) resultaria em uma mesma resistência que a rugosidade absoluta do material utilizado nos estudos. Para os estudos da presente pesquisa, optou-se pela utilização da rugosidade de materiais termoplásticos (acrílico) encontrada na literatura, como em Azevedo Netto (1998), no valor de 0,0015 milímetros.

Figura 62 – Distância percorrida pela onda em função do tempo, resultados analíticos e experimentais para o ensaio M10-J0.



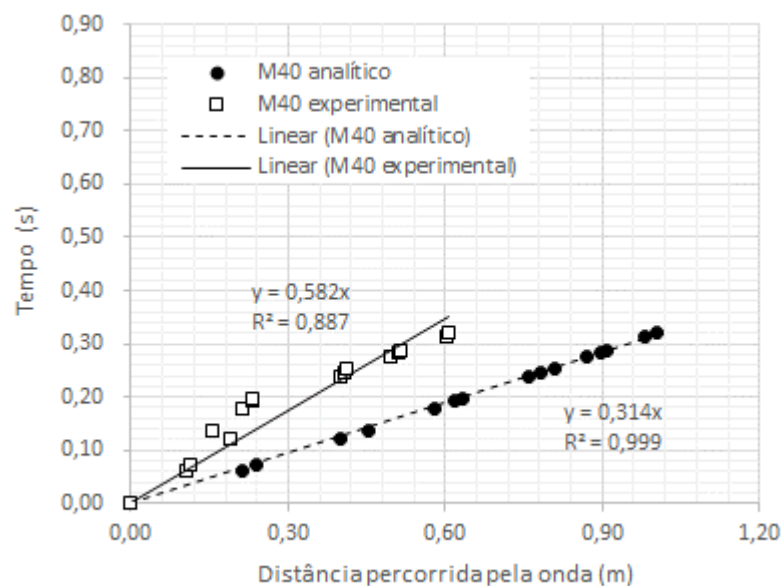
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 63 – Distância percorrida pela onda em função do tempo, resultados analíticos e experimentais para o ensaio M20-J0.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 64 – Distância percorrida pela onda em função do tempo, resultados analíticos e experimentais para o ensaio M40-J0.

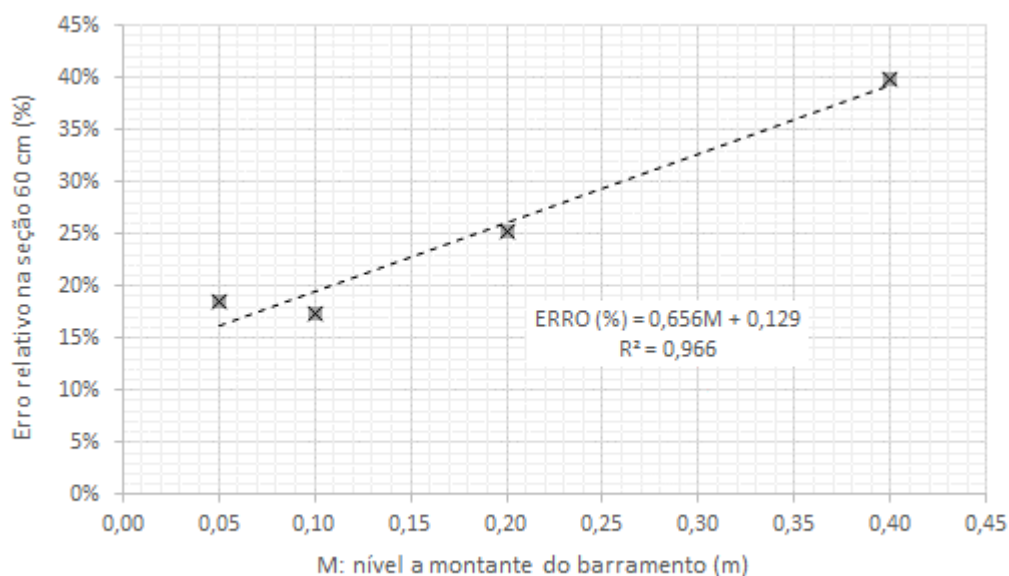


Fonte: elaborado pelo autor.

Ao analisar os quatro gráficos expostos previamente, percebe-se que as ondas analíticas progredem mais rapidamente que as ondas experimentais, isso ocorre devido às incertezas em certas suposições teóricas, como: remoção instantânea do barramento, desconsiderar aceleração vertical e inexatidão da influência da fricção em função das paredes e fundo do canal.

As quatro configurações de ensaio apresentaram uma defasagem, que em termos absolutos tende a crescer ao longo do tempo. No sentido de quantificar a diferença entre os resultados experimentais e os analíticos, calculou-se o erro relativo no momento em que a onda experimental se desenvolveu até os 60 centímetros de comprimento. Considera-se o erro relativo como o valor absoluto da diferença entre a distância experimental e a distância analítica, dividido pela distância analítica. A Figura 65 apresenta o erro relativo em função do nível a montante do barramento na configuração inicial do ensaio.

Figura 65 – Erro relativo da onda analítica em relação à onda experimental, calculado no momento em que a onda experimental alcançou o comprimento de 60 centímetros.



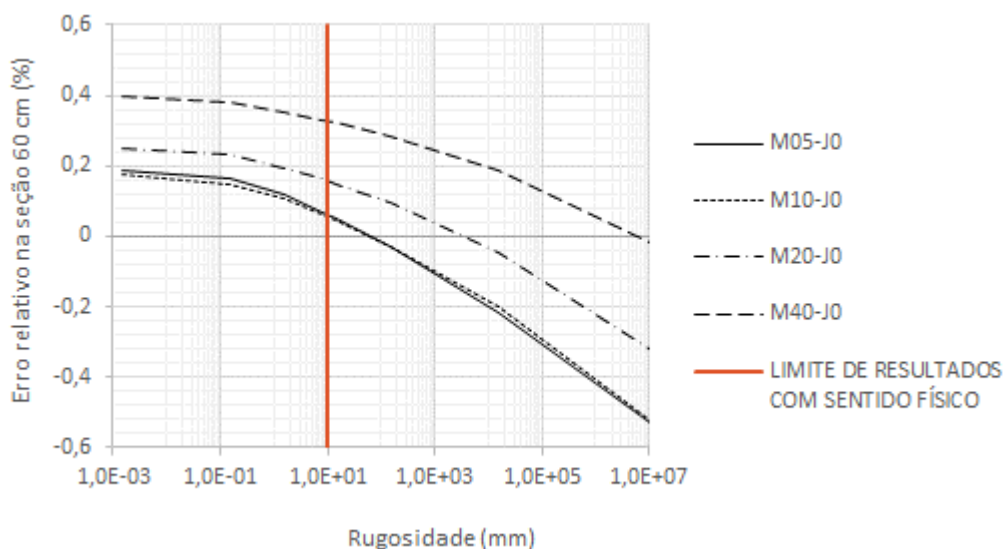
Fonte: elaborado pelo autor.

Ao analisar a Figura 65 é possível perceber que o erro relativo aumenta de forma linear em função do nível de montante, chegando a 40% para os ensaios M40.

Com base na análise do erro relativo, busca-se uma forma de corrigir os resultados encontrados analiticamente, para que eles correspondam aos resultados experimentais. Foi visto que dentre as variáveis que estão indicadas na teoria, Chanson (2006) aponta que a equação analítica é sensível em relação ao valor de k_s . Aferiu-se essa sensibilidade dentro da aplicação para essa pesquisa. Foram testados diversos valores de k_s ¹⁸, incluindo valores sem sentido físico, para o cálculo da distância percorrida pela onda. A Figura 66 apresenta o erro relativo encontrado em função da variação dos valores de k_s .

¹⁸ Foram testados valores acima de 1 centímetro, pois o intuito era analisar como a equação respondia à variação de k_s , mesmo que esses valores não possuíssem sentido físico. Nessa análise foram utilizados valores a partir de 0,0015 milímetros até 15.000 metros. Sabendo-se que k_s é a altura equivalente de areia da rugosidade da placa de acrílico (entendida nessa pesquisa como a rugosidade absoluta da placa), somente seriam aceitáveis, na realidade, valores da ordem de grandeza menor que um milímetro.

Figura 66 – Erros relativos na seção de 60 centímetros do desenvolvimento da onda em função de k_s .



Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 66 é visto que variando k_s é possível chegar a resultados em que o erro relativo é zero, para as quatro configurações ensaiadas. Porém, os valores encontrados não fazem sentido físico e também não há um valor único de k_s que minimize o erro encontrado para as quatro configurações ensaiadas ao mesmo tempo. Não sendo possível aplicar um fator de correção direto em k_s .

Por isso, buscou-se uma correção em função do nível de montante, de forma que seja possível aplicar as equações de Chanson (2006) utilizando o valor de k_s encontrado na literatura (AZEVEDO NETTO et al., 1998) para o material acrílico, que é 0,0015 milímetros. Para encontrar o fator de correção, foi medido o coeficiente angular das retas expostas nos gráficos de tempo por comprimento. Ao dividir o coeficiente angular analítico pelo coeficiente experimental, chegou-se a uma razão denominada fator de correção F.

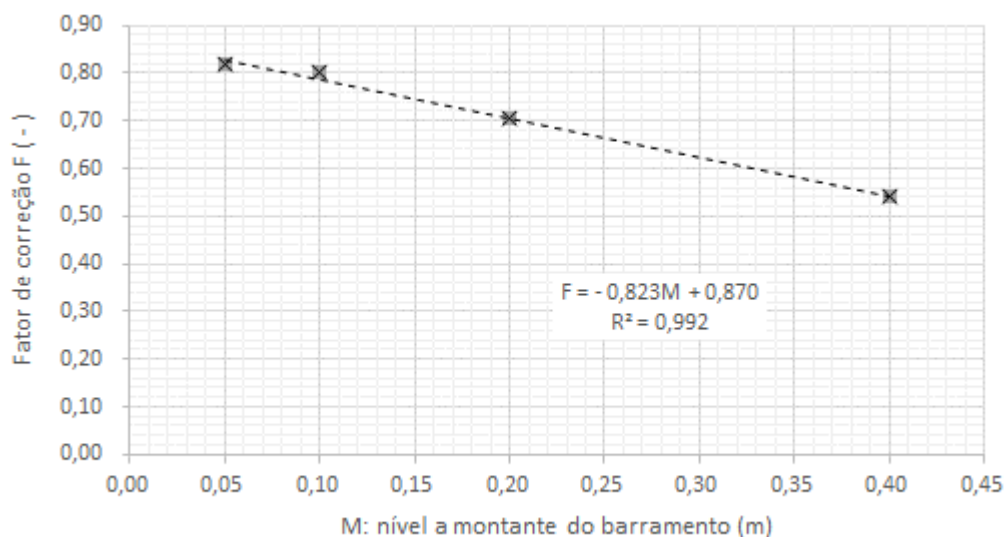
Tabela 13 – Cálculo do fator de correção F.

Nível de montante M (m)	Coefficiente angular experimental	Coefficiente angular analítico	Fator de correção F (-)
0,05	1,375	1,123	0,817
0,10	0,886	0,712	0,804
0,20	0,664	0,469	0,706
0,40	0,582	0,314	0,540

Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 67 apresenta o fator de correção F em função das alturas de montante.

Figura 67 – Fator de correção F por níveis de montante.



Fonte: elaborado pelo autor.

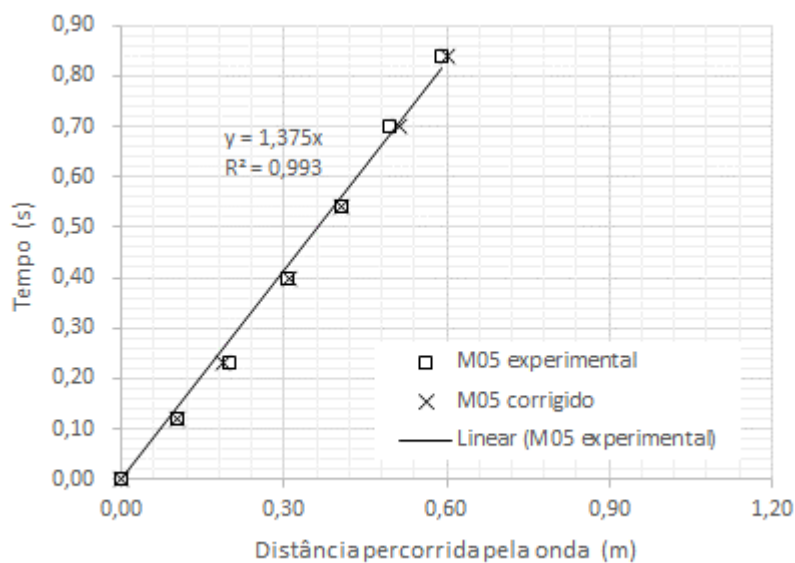
Verifica-se que o fator F é inversamente proporcional às alturas de montante e é possível realizar uma aproximação com alto índice de ajuste, $R^2 = 0,99$. Dessa forma, é possível calcular o fator de correção F para qualquer nível de montante entre 0,05 e 0,40 metros. Sendo a equação: $F = -0,823M + 0,871$.

Aplicando o fator F na equação 12, tem-se uma nova equação, que calcula o X_S corrigido pelo fator F:

$$X_{S \text{ CORRIGIDO}} = \left(X_1 + \frac{32M \left(1 - \frac{1}{2} \frac{U}{\sqrt{gM}} \right)^{9/2}}{G^{1/4} \left(\frac{U}{\sqrt{gM}} \right)^2} \right) (-0,823M + 0,871) \quad (\text{equação 20})$$

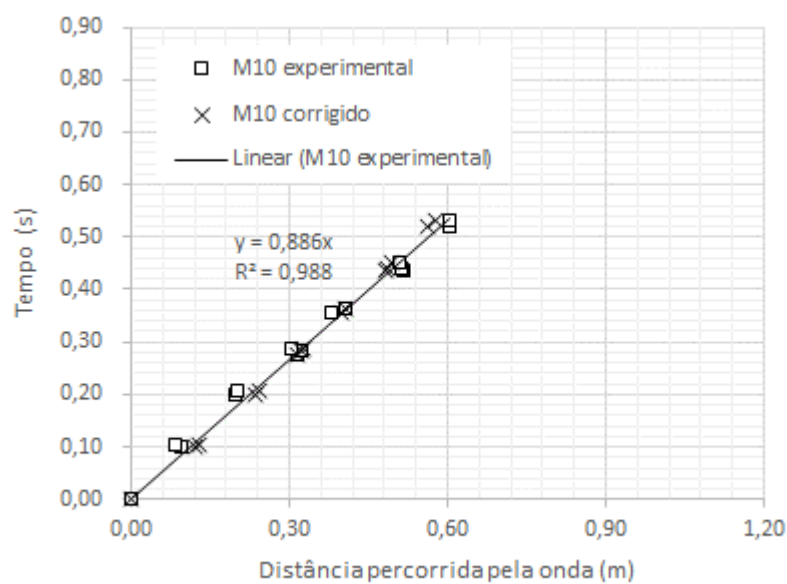
A partir da Figura 68 até a Figura 71, são apresentados os resultados experimentais, comparados com os resultados analíticos corrigidos pelo fator F.

Figura 68 – Distância percorrida pela onda em função do tempo: resultados experimentais e analíticos corrigidos para onda M05-J0.



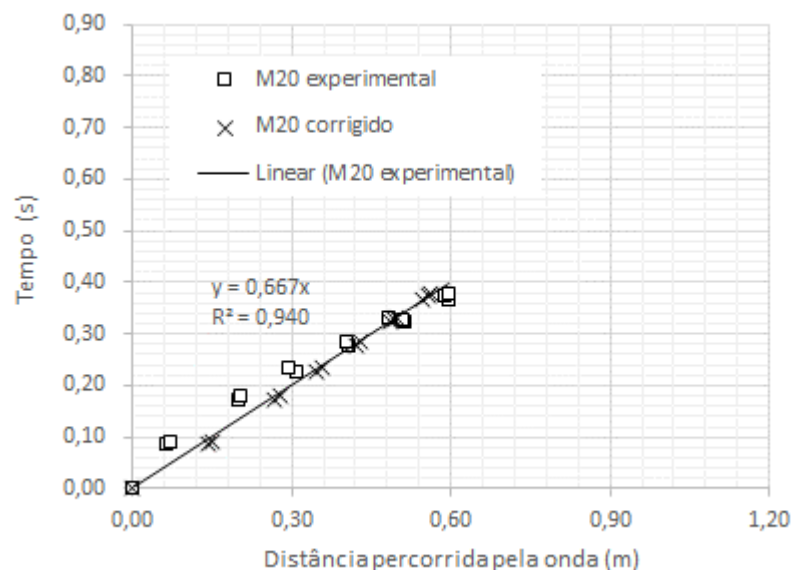
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 69 – Distância percorrida pela onda em função do tempo: resultados experimentais e analíticos corrigidos para onda M10-J0.



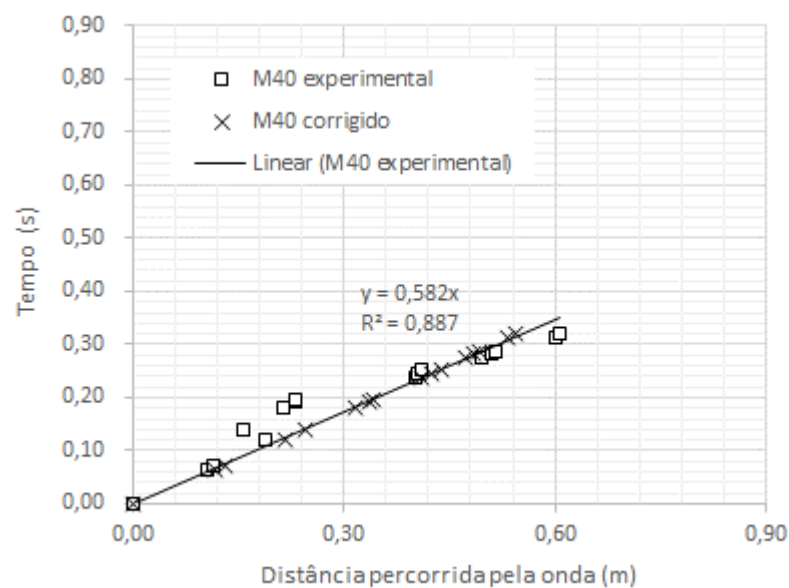
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 70 – Distância percorrida pela onda em função do tempo: resultados experimentais e analíticos corrigidos para onda M20-J0.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 71 – Distância percorrida pela onda em função do tempo: resultados experimentais e analíticos corrigidos para onda M40-J0.



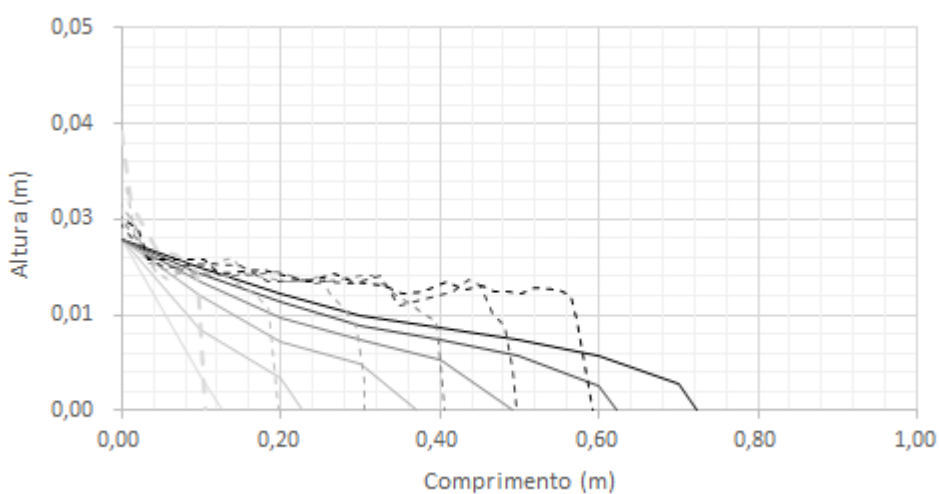
Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme esperado, os resultados corrigidos pelo fator F reproduzem de forma bastante satisfatória os resultados encontrados experimentalmente nesta pesquisa.

7.5.2 Altura da onda em função de tempo e distância percorrida

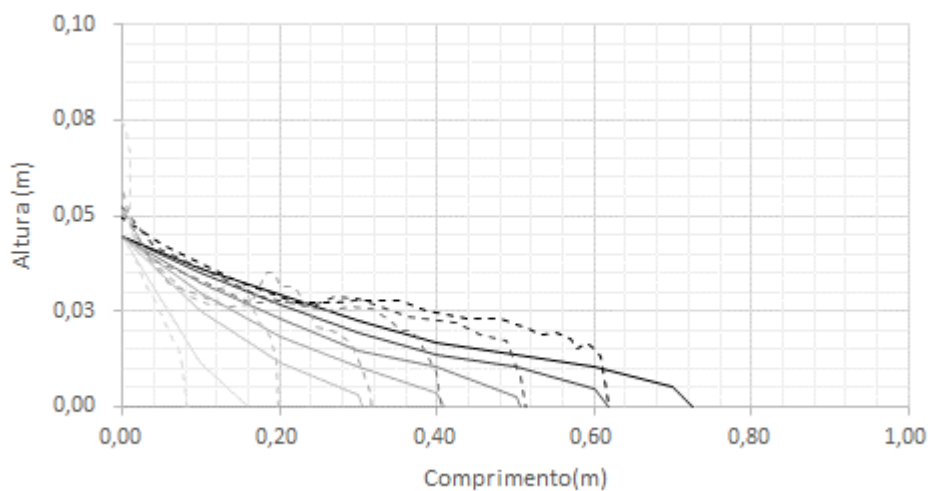
Neste item está exposto, de forma detalhada, a comparação entre a equação analítica de Chanson (2006) (equações 9, 10, 11 e 12 apresentadas no capítulo 4.5.2) e os experimentos, incluindo distância e altura para diferentes momentos, da onda teórica (linha tracejada) com o a frente de onda registrada nos ensaios físicos (linha cheia) da segunda e quarta série de experimentos, sem água a jusante (Figura 72 até a Figura 75).

Figura 72 – Comparação entre o formato geométrico oriundo das equações analíticas com o experimental, para M05-J0.



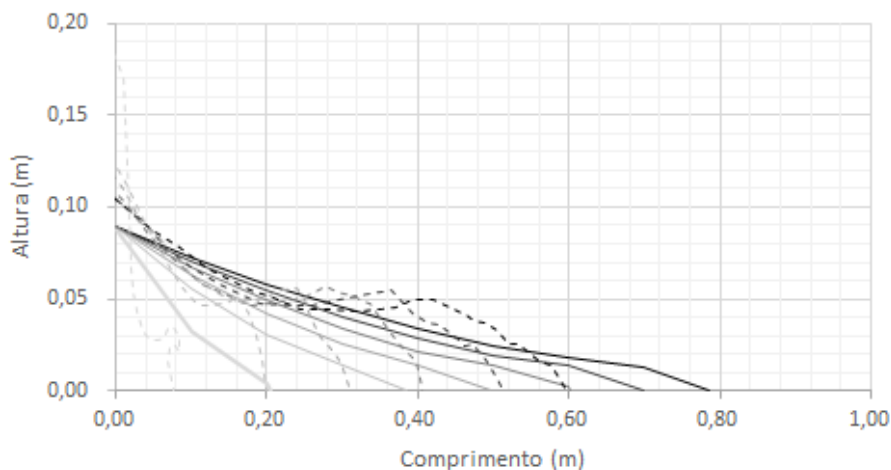
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 73 – Comparação entre o formato geométrico oriundo das equações analíticas com o experimental, para M10-J0.



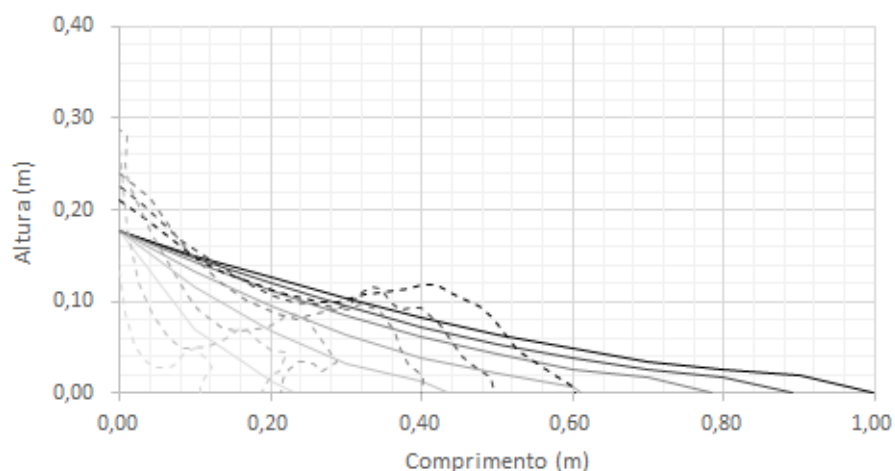
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 74 – Comparação entre o formato geométrico oriundo das equações analíticas com o experimental, para M20-J0.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 75 – Comparação entre o formato geométrico oriundo das equações analíticas com o experimental, para M40-J0.



Fonte: elaborado pelo autor.

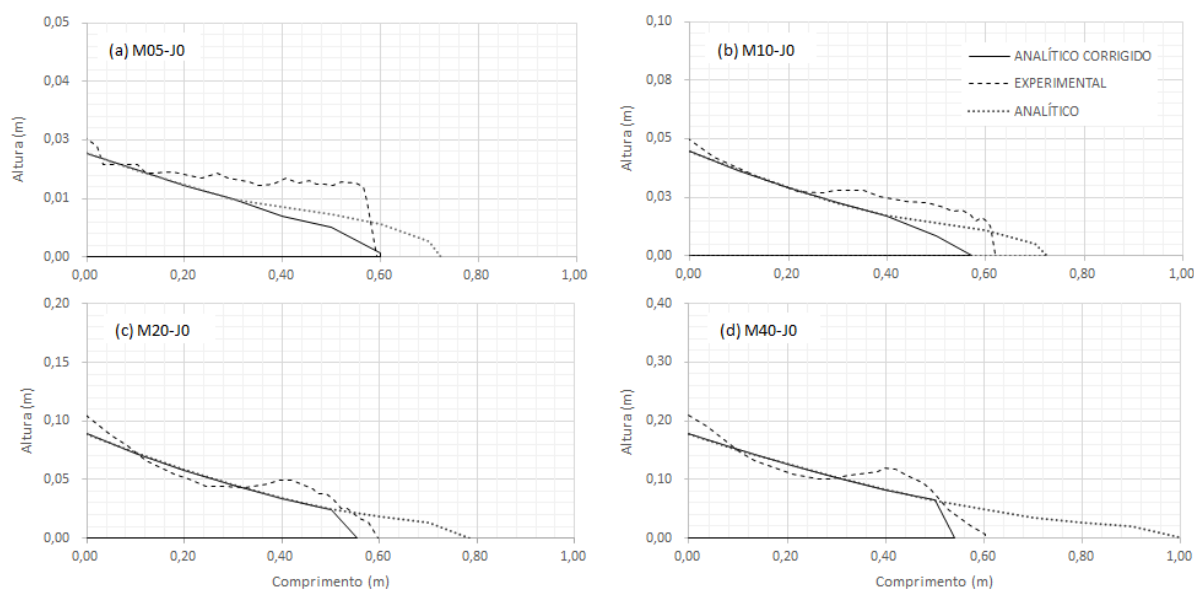
Em todos os casos a onda teórica é mais rápida, o que era esperado, frente ao que foi visto no item 7.5.1. Conforme a equação 12, a distância percorrida pela onda cresce exponencialmente em função do nível de montante, evidenciando uma maior discrepância entre os resultados analíticos e experimentais para maiores níveis a montante.

Diferenças da mesma ordem, na comparação entre resultados analíticos e experimentais, também foram encontradas nos estudos de Javadian (2016). As principais causas apontadas

residem no fato de que a modelagem física não alcança certas suposições teóricas, como a remoção instantânea do barramento, desconsideração de aceleração vertical e exatidão da influência da fricção em função das paredes e do fundo do canal. Também é em função da resistência do canal que se forma a cabeça de onda, característica do formato da onda experimental e que não é constatada no formato analítico da onda. Ainda, as relações analíticas não incluem efeitos como a resistência do ar, ruídos e demais fenômenos dissipativos.

Na busca de uma melhor reprodução da onda experimental, a Figura 76 apresenta o mesmo cálculo das alturas da onda, porém utilizando a equação 20, que calcula o X_S CORRIGIDO, para as quatro condições ensaiadas. Em prol de facilitar a visualização, apresenta-se apenas o momento que a onda experimental atinge 60 centímetros.

Figura 76 – Formato geométrico da onda experimental, analítica e analítica corrigida. (a) M05-J0; (b) M20-J0; (c) M10-J0 e (d) M40-J0.



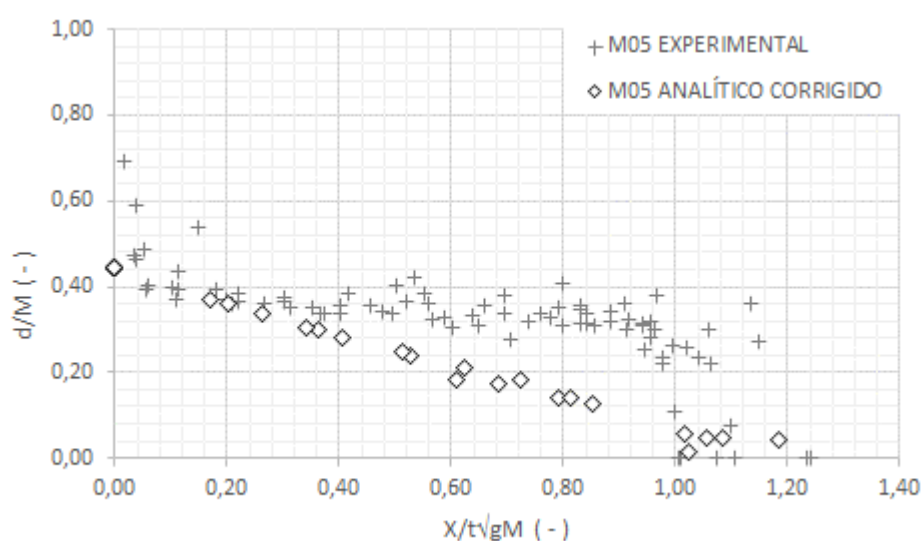
Fonte: elaborado pelo autor.

A diminuição da região de ponta, que ocorre em função do fator de correção F ser aplicada apenas em X_S e não em X_I , (respectivamente, equações 12 e 11, apresentadas no item 4.5.2) representa melhor o final pouco íngreme visto nos ensaios experimentais. A discrepância ainda se encontra na diferença de altura da onda analítica com a experimental, visto que a onda analítica não apresenta o aumento de espessura identificado nos ensaios experimentais, localizado na parte final da frente de onda.

7.5.3 Dados adimensionais

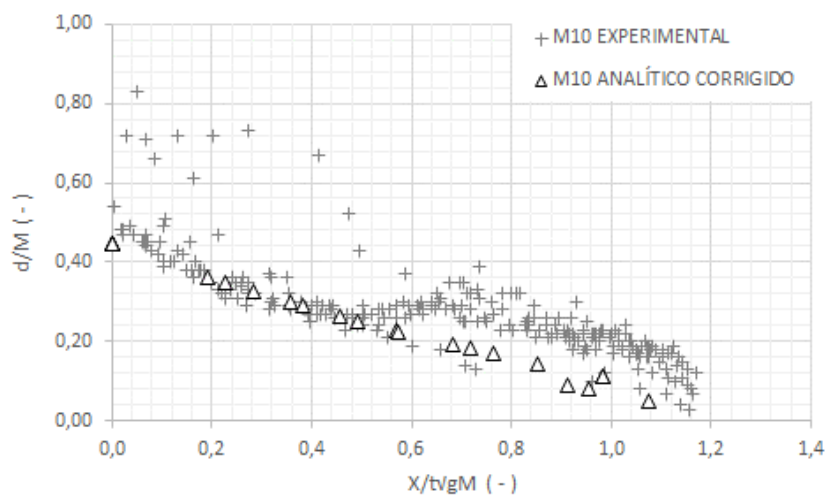
Este item propõe realizar a comparação do número adimensional de Chanson (2006), apresentado no item 4.5.2 da revisão bibliográfica, utilizando os dados experimentais e analíticos corrigidos para o cálculo desses adimensionais. Da Figura 77 até a Figura 80 são apresentados os dados adimensionais observados nos ensaios com nível a montante de 5, 10, 20 e 40 centímetros e canal seco a jusante.

Figura 77 – Dados adimensionais propostos por Chanson (2006) aplicados nos ensaios M05-J0.



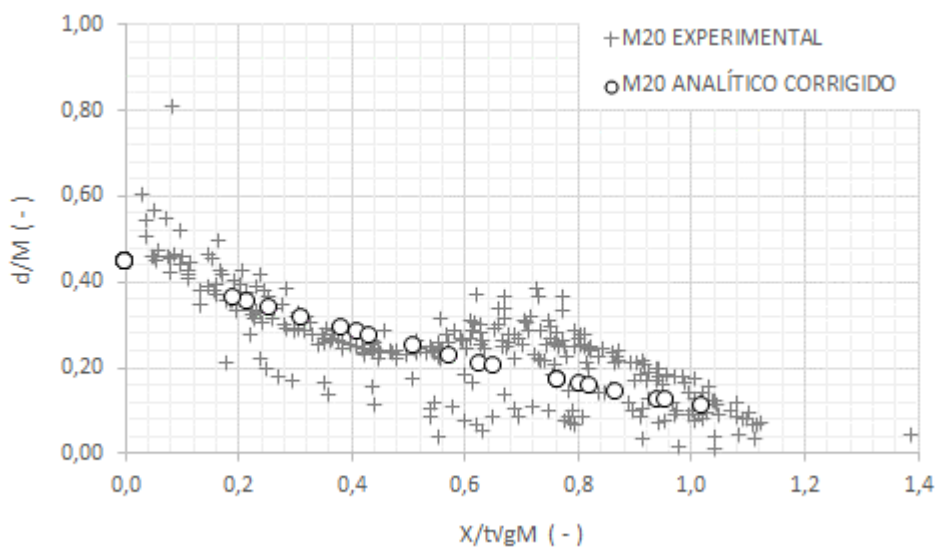
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 78 – Dados adimensionais propostos por Chanson (2006) aplicados nos ensaios M10-J0.



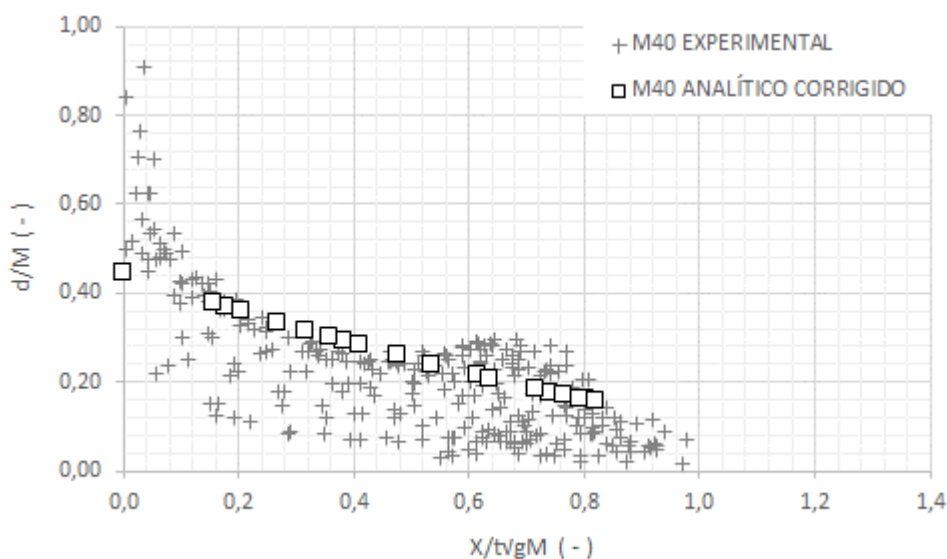
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 79 – Dados adimensionais propostos por Chanson (2006) aplicados nos ensaios M20-J0.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 80 – Dados adimensionais de Chanson para os ensaios M40-J0.



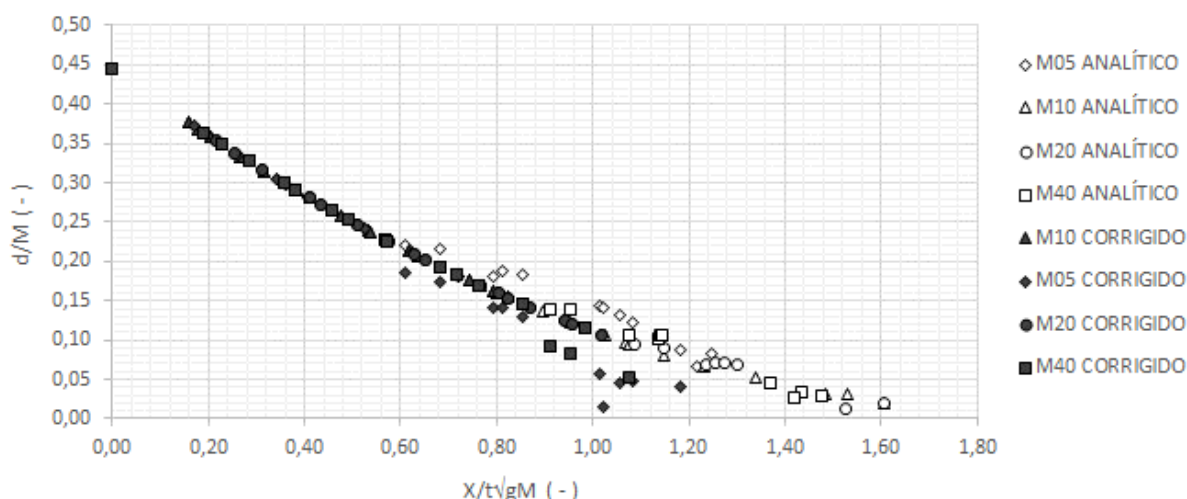
Fonte: elaborado pelo autor.

A comparação dos números adimensionais reitera os resultados já encontrados na comparação entre experimental e analítico. Os pontos que ficaram acima da linha teórica, por exemplo, são resultado da cabeça de onda formada devido à fricção da massa líquida com o canal de acrílico. Esses pontos aparecem nos quatro ensaios estudados.

Também se averigua que quanto maior o nível a montante, mais pontos são encontrados abaixo da linha teórica oriunda do resultado analítico, como pode ser conferido nos ensaios M20-J0 (Figura 79) e M40-J0 (Figura 80). A explicação para isso consiste no fato de que a equação analítica considera a ruptura instantânea e com isso a onda sempre se desloca com uma altura de $4/9$ na seção em que se encontrava o barramento. Conforme visto no item 7.1, a modelagem física se baseia em uma ruptura instantânea, mas, apesar de retirar a placa em menos de 0,15 segundos, não consegue reproduzir a instantaneidade teórica. Assim, a altura da abertura da placa limita a espessura da onda nos instantes iniciais da formação da frente de onda e isso pode ser identificado nos números adimensionais.

Ainda referente aos números adimensionais, apresenta-se a Figura 81 para comparar os resultados analíticos com os resultados analíticos corrigidos pelo fator F, exposto no item 7.5.1.

Figura 81 – Comparação entre os adimensionais analíticos e analíticos corrigidos.

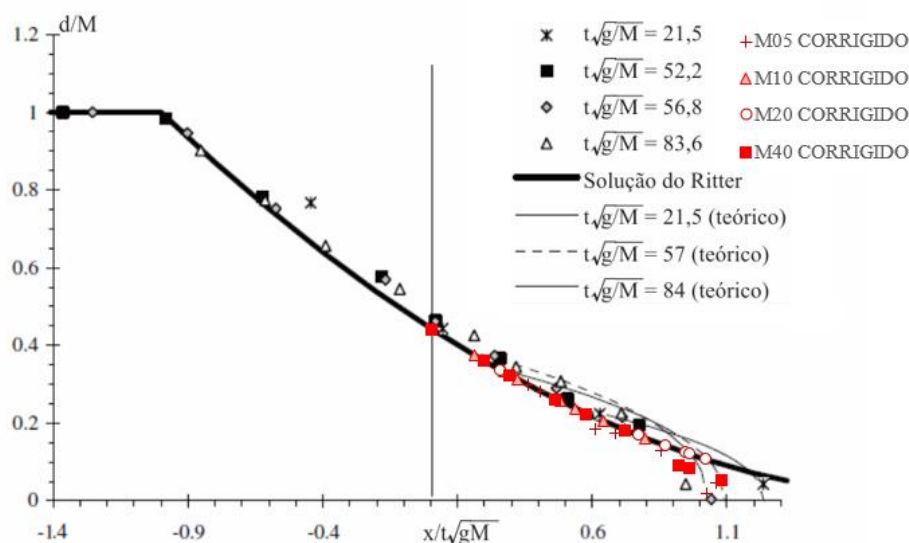


Fonte: elaborado pelo autor.

A principal diferença está exatamente no ponto que o fator F se propõe a corrigir, que é o comprimento da onda. Os adimensionais corrigidos convergem para finalizar a onda entre 1,00 e 1,20, enquanto que o adimensional analítico sem correção tem como último ponto o valor de 1,60.

O ajuste que reduz o comprimento da onda também se adequa aos resultados expostos pelo próprio Chanson (2006), conforme pode ser conferido na Figura 82.

Figura 82 – Números adimensionais oriundos dos dados analíticos corrigidos em comparação com demais resultados expostos por Chanson (2006).



Fonte: adaptado de Chanson, 2006.

Conforme pode ser conferido na Figura 82, os dados analíticos corrigidos se comportam de forma semelhante ao estudado por Chanson (2006), mostrando congruência entre os estudos propostos na presente pesquisa e os resultados da literatura. A principal diferença entre os ensaios está no intervalo de tempo analisado, enquanto a esta pesquisa aborda os momentos iniciais, analisando o fenômeno por no máximo um segundo após o rompimento, os estudos apontados por Chanson (2006) analisam o evento entre 2 e 12 segundos após o rompimento do barramento, para alturas de lâmina de água a montante de 0,115 e 0,23 metros, em um canal com comprimento de 18 metros e largura de 0,25 metros.

7.6 HIDROGRAMAS DE NÍVEL

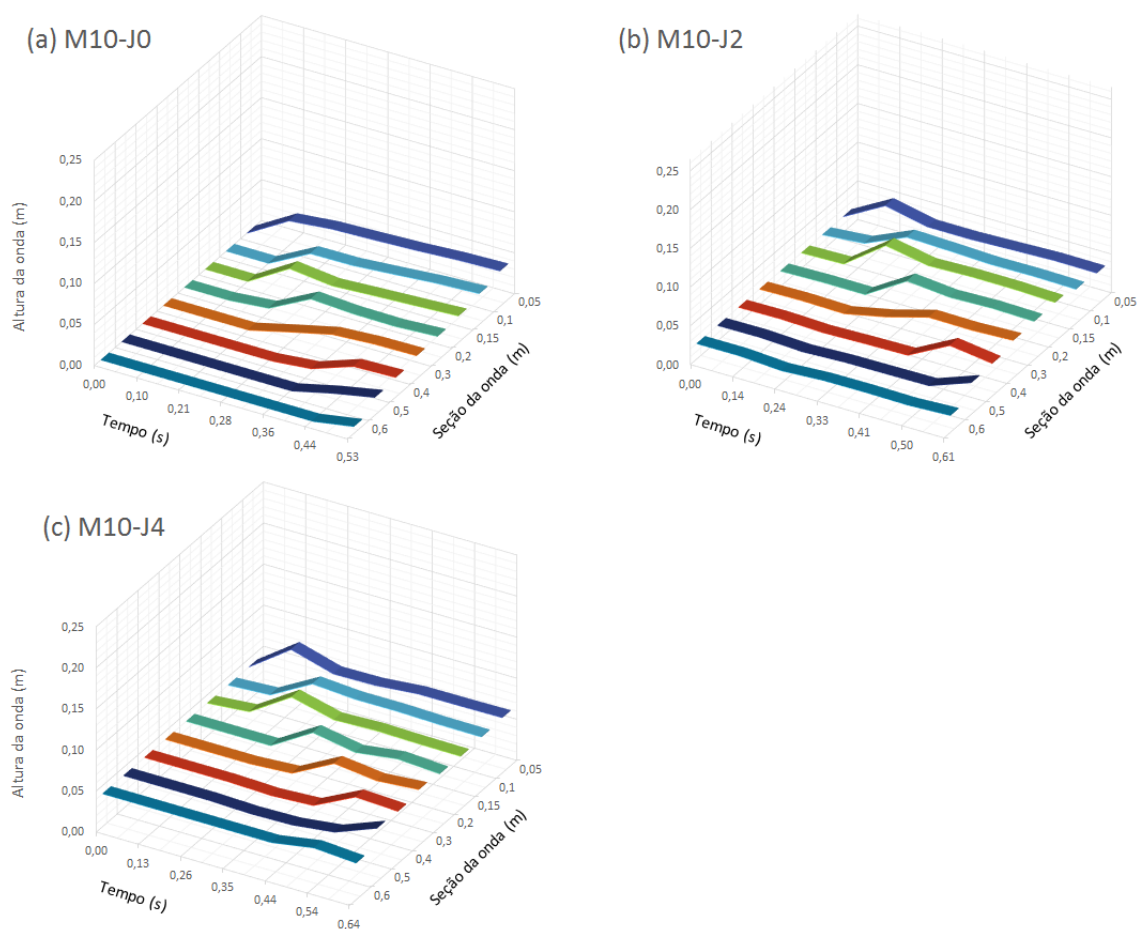
Neste capítulo os hidrogramas de nível gerados através do método detalhado no item 6.3.5 são apresentados sob a ótica de três diferentes aspectos, sendo a primeira uma avaliação de 8 diferentes seções da onda, em momentos que começam no início da ruptura e findam quando a onda atinge 60 centímetros de comprimento. A segunda e a terceira avaliação destacam as seções que tiveram os maiores picos de altura e realizam uma análise de amortecimento e de deslocamento de volume, respectivamente.

7.6.1 Hidrogramas do desenvolvimento da onda até 60 centímetros

A primeira análise divide a onda em 8 diferentes seções, que distam 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 e 60 centímetros da origem do rompimento. O hidrograma de cada seção é comparado com as demais seções de um mesmo ensaio, ou seja, a mesma condição inicial de nível de água a montante e a jusante do barramento. Os hidrogramas são apresentados através de um gráfico com 3 dimensões, em que a variação do tempo é registrada pelo eixo X (dimensão horizontal) e a variação do nível d'água é visualizada no eixo Y (dimensão vertical). O eixo perpendicular ao plano XY, aponta em qual a seção que está ocorrendo essa variação de nível.

A Figura 83 apresenta os hidrogramas das ondas com 10 centímetros a montante e 0, 2 e 4 centímetros a jusante (M10-J0, M10-J2 e M10-J4).

Figura 83 – Hidrograma de nível de 8 seções da onda gerada com nível inicial a montante de 10 centímetros. (a) M10-J0; (b) M10-J2 e (c) M10-J4.

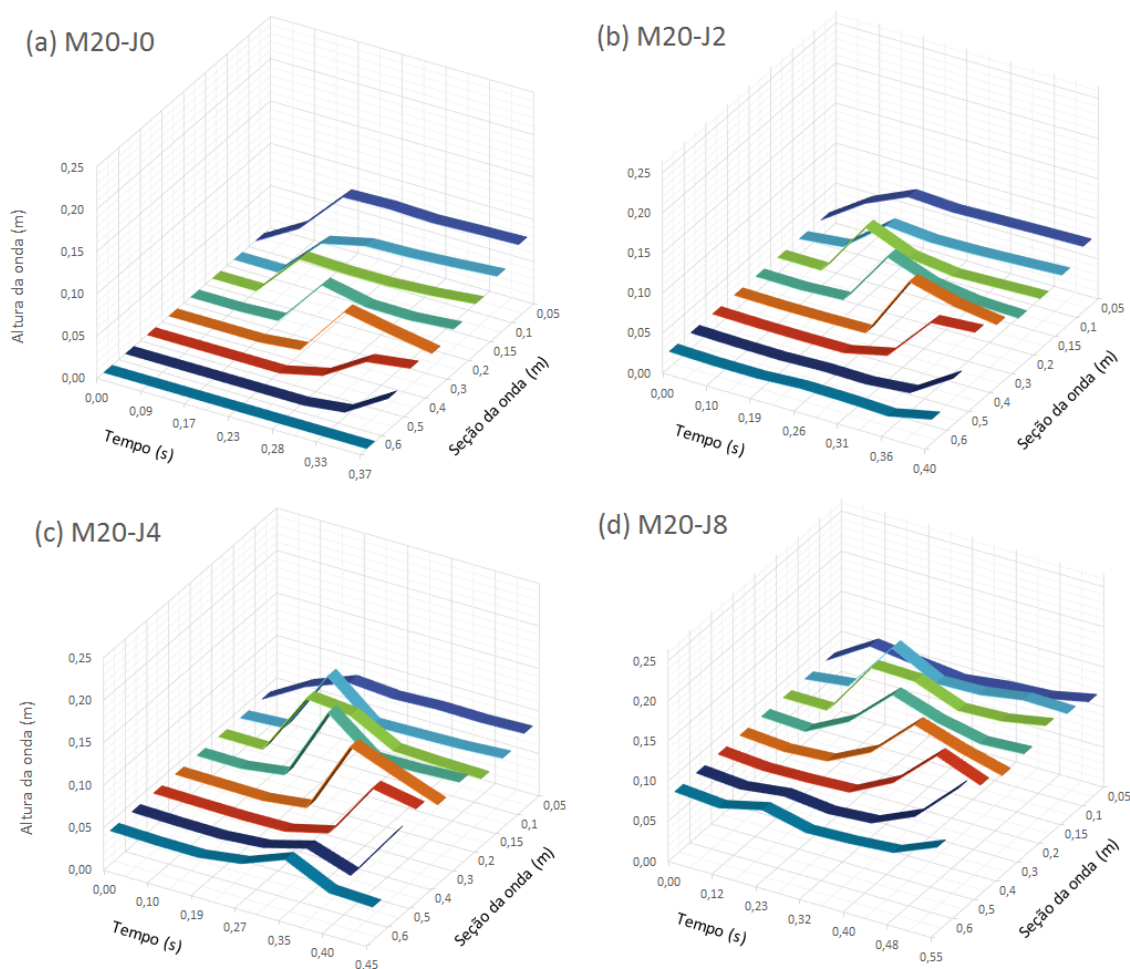


Fonte: elaborado pelo autor.

O comportamento da onda com 10 centímetros de água a montante é similar para as três situações ensaiadas (canal seco, com 2 e com 4 centímetros a jusante). Um pico de altura translada ao longo do tempo e passa por diferentes seções do canal, verifica-se também para todos os ensaios que o nível de água após o aparecimento do pico se mantém mais alto que na situação anterior (antes do pico). A principal diferença da presença de água a jusante está em um alteamento geral dos níveis marcados no eixo vertical.

A Figura 84 apresenta os hidrogramas das ondas com 20 centímetros a montante e 0, 2, 4 e 8 centímetros a jusante.

Figura 84 – Hidrograma de nível de 8 seções da onda gerada com nível inicial a montante de 20 centímetros. (a) M20-J0; (b) M20-J2; (c) M20-J4 e (d) M20-J8.



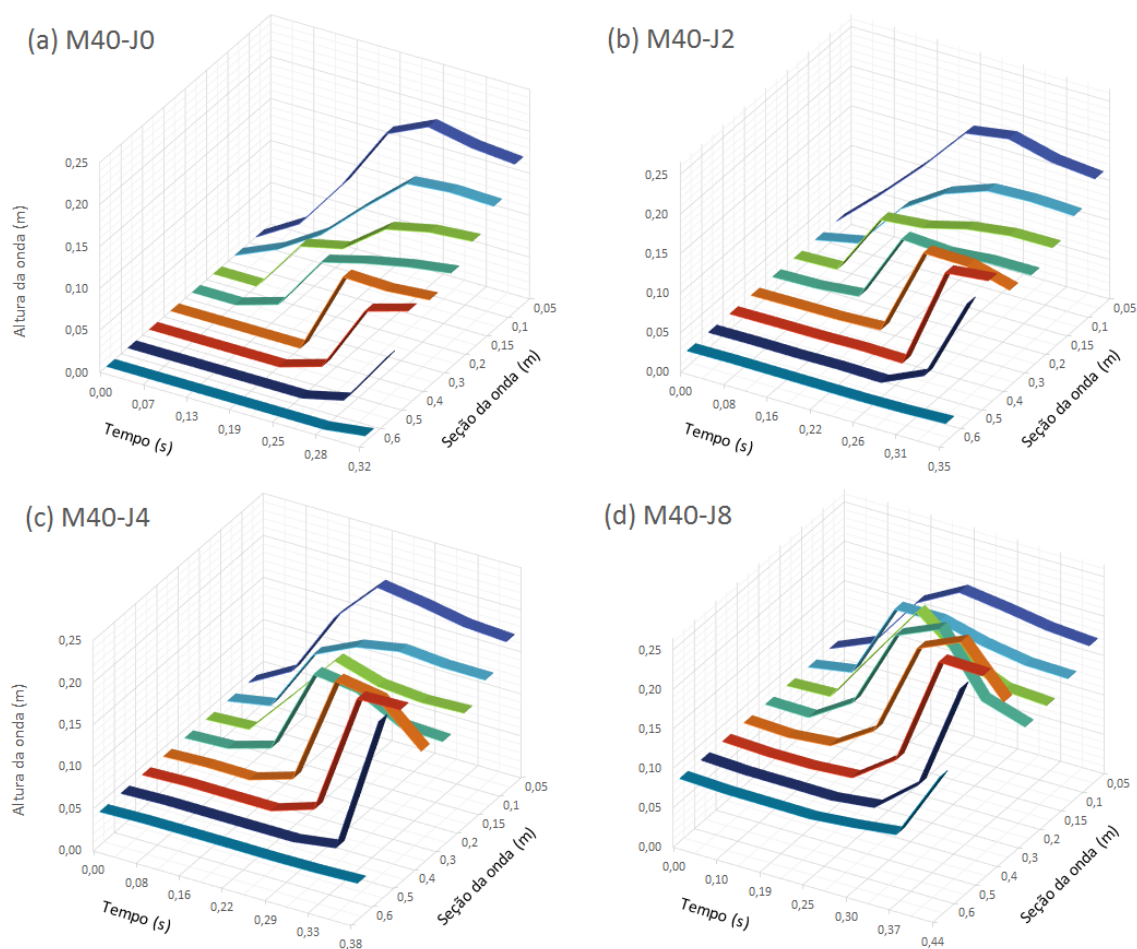
Fonte: elaborado pelo autor.

Os hidrogramas oriundos do rompimento de um reservatório com altura de 20 centímetros confirmam o conceito de onda de translação, pois o aumento do nível é evidenciado a partir das primeiras seções e esse pico translada, chegando próximo do seu máximo nas seções de 30 e 40 centímetros.

Na seção 50 e 60 centímetros é possível identificar que o hidrograma ascende, mas não há tempo suficiente para quantificar a altura do pico dessas seções. Como ocorrido em M10, a presença de água a jusante não altera de forma expressiva o formato dos hidrogramas, apenas avança verticalmente o hidrograma como um todo.

A Figura 85 apresenta os hidrogramas das ondas com 40 centímetros a montante e 0, 2, 4 e 8 centímetros a jusante.

Figura 85 – Hidrograma de nível de 8 seções da onda gerada com nível inicial a montante de 40 centímetros. (a) M40-J0; (b) M40-J2; (c) M40-J4 e (d) M40-J8.



Fonte: elaborado pelo autor.

As ondas advindas de um barramento com nível de água a montante de 40 centímetros geraram os maiores hidrogramas. É possível identificar o aumento progressivo do nível das primeiras seções, essas, as mais afetadas pela retirada da placa. A partir da seção de 20 centímetros observa-se um aumento de nível mais abrupto, configurando o pico de altura da onda. Conforme ocorrido no item 7.3.1 e nas ondas M20, as últimas seções (50 e 60 centímetros) denotam uma ascensão do nível de água, mas não é possível identificar o pico no período de tempo que a onda necessita para avançar até 60 centímetros de comprimento e é usado como parâmetro para caracterizar o fim do ensaio nessa análise.

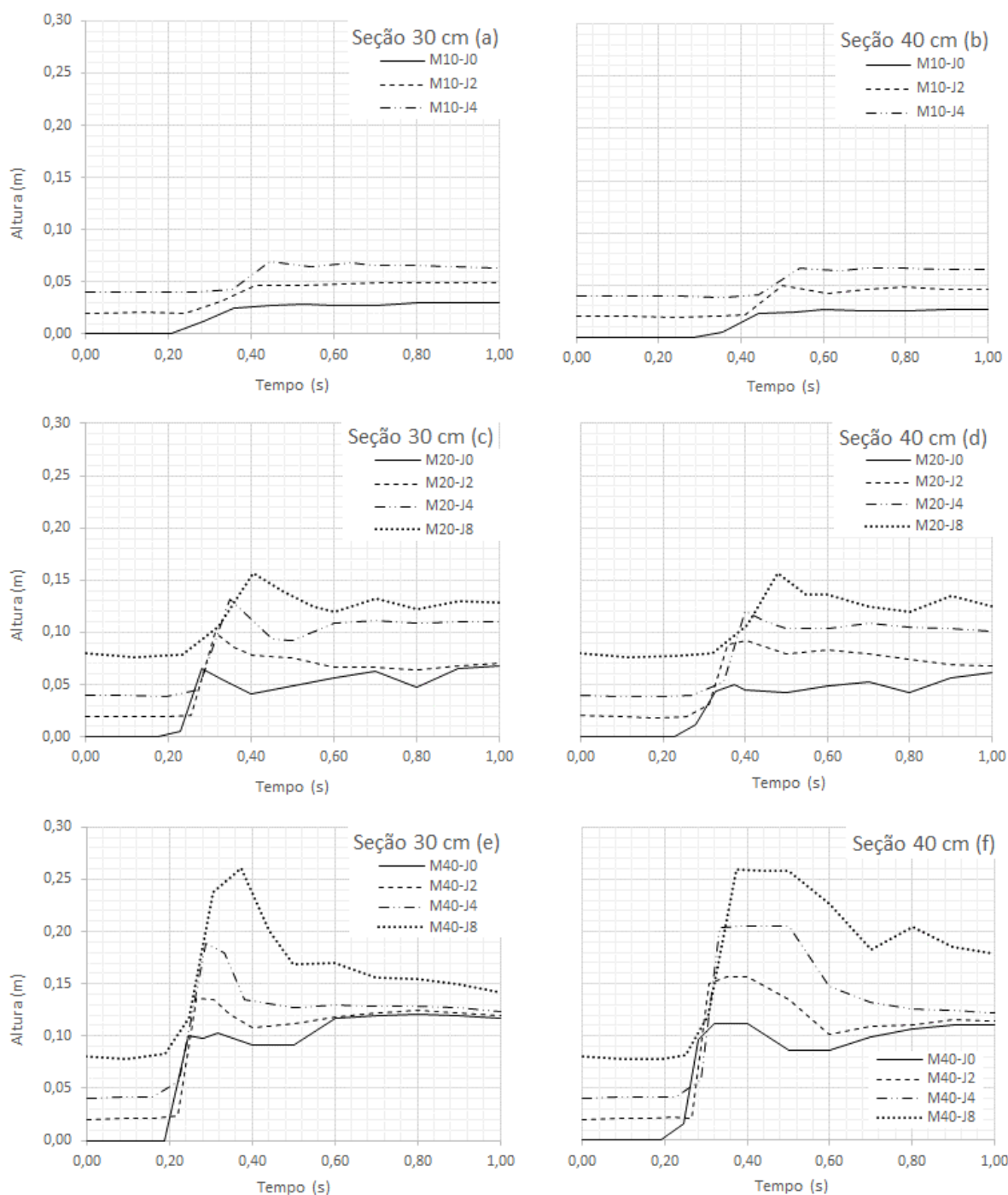
7.6.2 Análise de amortecimento nas seções 30 e 40 centímetros

No item anterior foi identificado que a maioria dos picos de altura das ondas se encontram nas seções 30 e 40 centímetros, então, para essas duas seções foram realizadas análises aprofundadas da influência desses níveis em relação ao amortecimento da onda. Dividiu-se a análise em função do nível de água a montante do barramento no instante inicial da ruptura e comparou-se os resultados em função dos diferentes níveis de lâmina de água a jusante ou ausência de água ao longo do canal.

Em uma observação prévia foi identificado que todos os ensaios atingiram suas alturas máximas em menos de um segundo. Então, para fins de padronização de análise, utilizou-se o período de 1 segundo pós-rompimento da barragem como intervalo de tempo para realização dos hidrogramas.

A Figura 86 mostra os hidrogramas de nível nas seções 30 e 40 centímetros.

Figura 86 – Hidrograma de nível apenas das seções 30 e 40 centímetros.



Fonte: elaborado pelo autor.

Ao analisar a Figura 86 é possível perceber que a lâmina de água a jusante retarda o alteamento do nível na ordem de 2 décimos de segundo, para todos os ensaios. A lâmina de água também incrementa a altura máxima identificada em cada experimento.

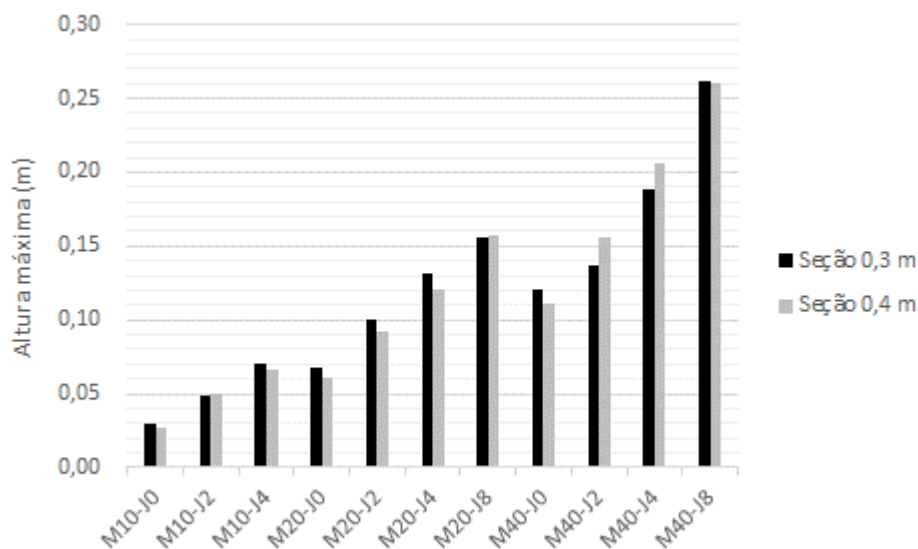
Para as ondas com 10 centímetros a montante do barramento, nos primeiros segundos há a manutenção do nível presente na configuração inicial do experimento, na sequência do hidrograma, há um alteamento de nível que se mantém majoritariamente constante ao longo de 1 segundo. Apenas o ensaio M10-J2 apresenta uma instabilidade em 0,6 segundos, em que o nível cai 1 centímetro.

O comportamento das ondas com 20 centímetros de altura no reservatório replica a manutenção do nível inicial nos primeiros segundos e então ocorre um pico de altura, na faixa de 0,3 a 0,4 segundos na seção 30 centímetros e 0,3 a 0,5 segundos na seção 40 centímetros. Após esse pico de altura a onda se atenua até encontrar uma nova situação de equilíbrio. Especificamente no caso do M20-J0, não é identificada essa atenuação pelo motivo de que sem lâmina de água a jusante, não há a quebra da onda, situação em que o nível aumenta e depois diminui.

Comportamento semelhante é visto nas ondas oriundas de uma altura no barramento de 40 centímetros, porém, neste caso os picos são ainda maiores. Conforme visto nos demais ensaios, inicialmente o hidrograma aponta o nível da configuração do ensaio e após 0,2 a 0,4 segundos há uma elevação de nível expressiva. A partir dessa elevação, todos os ensaios têm uma queda no nível de água. A queda do M40-J0 é suave e após 0,3 segundos volta a subir, inclusive ultrapassando a altura do nível inicial. O M40-J2 também tem uma queda suave seguido de um alteamento de nível, mas esse alteamento não ultrapassa o primeiro pico. M40-J4 e M40-J8 tem quedas mais bruscas e não apontam levantamento de nível após o primeiro pico na seção de 30 centímetros. Na seção de 40 centímetros o M40-J8 aponta uma queda de nível após o primeiro pico, segue então um segundo pico, aos 0,8 segundos e nova queda do nível.

De forma a extrair a principal informação dos hidrogramas e reapresentá-la de maneira que possa ser comparada entre todos os ensaios, a Figura 87 ilustra a altura máxima que cada onda atingiu nos hidrogramas das seções 30 e 40 centímetros.

Figura 87 – Altura máxima atingida pelas ondas de todos os ensaios, nas seções 30 e 40 centímetros.



Fonte: elaborado pelo autor.

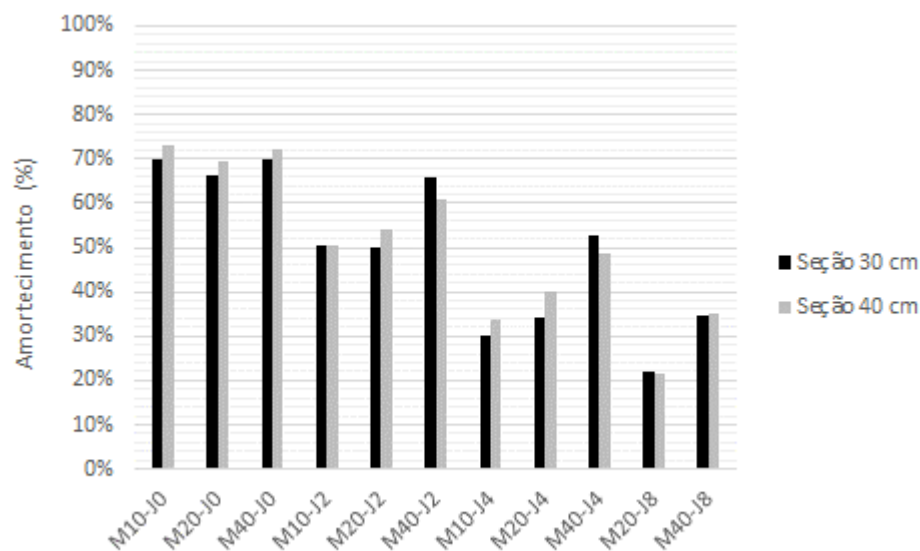
Como já discutido nos capítulos anteriores, ratifica-se que quanto maior a altura do nível de água a montante e jusante do barramento, maior é a altura alcançada pela onda de ruptura. Destaca-se a importância da influência do nível a jusante na altura da onda de ruptura, visto que pelo gráfico a altura máxima de M10-J4 é maior que a altura máxima de M20-J0, por exemplo. Isso também pode ser conferido em M20-J8, cuja altura máxima é maior que em M40-J0 e M40-J2.

No intuito de compreender o impacto que cada onda gera a jusante, será utilizado o conceito de amortecimento que exprime o quanto do nível de água foi atenuado com a propagação da onda a jusante. Essa atenuação é mensurada através da identificação de quanto vale percentualmente a diferença entre o nível de montante inicial e a altura máxima atingida pela onda, em relação ao próprio nível de montante inicial. Conforme a seguinte equação:

$$\text{Amortecimento} = \frac{\text{Nível de montante inicial} - \text{Altura máxima}}{\text{Nível de montante inicial}} \quad (\text{equação 21})$$

A Figura 88 representa a porcentagem amortecida de cada onda, nas seções 30 e 40 centímetros.

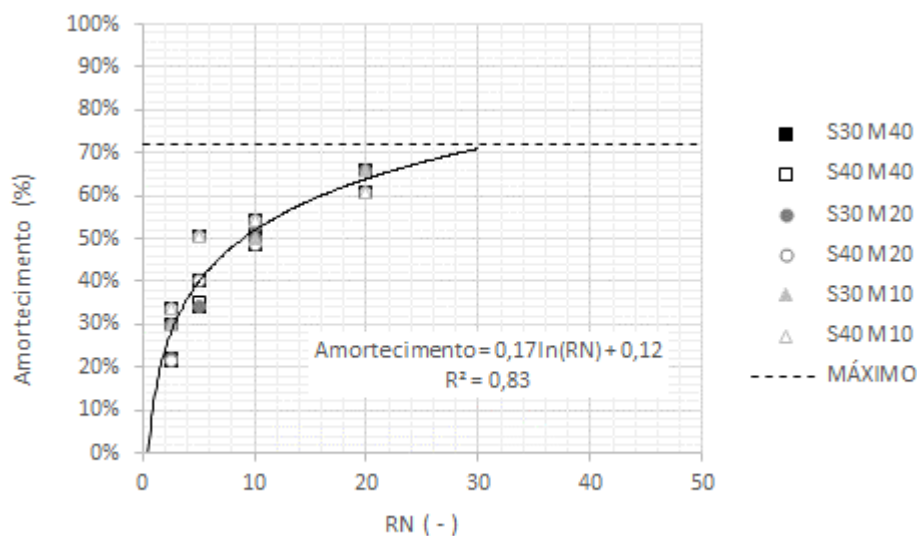
Figura 88 – Relação da altura máxima atingida pela onda em função da altura do nível de água no barramento.



Fonte: elaborado pelo autor.

Fica evidente ao se averiguar as porcentagens amortecidas em função dos níveis de água a jusante que eles possuem uma relação inversamente proporcional. Quanto menor o nível de água a jusante (até sua inexistência), maior é o amortecimento. Os níveis de água a montante e a jusante do barramento de cada ensaio podem ser classificados em função do R_N (visto no capítulo 7.2.2), sendo infinito o valor de R_N para canais secos a jusante. No sentido de correlacionar o amortecimento com R_N , é apresentada a Figura 89.

Figura 89 – Amortecimento em função do R_N .



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 89 aponta uma relação logarítmica entre o R_N e o amortecimento, com um $R^2 = 0,83$. Esses resultados embasam a importância da relação entre os níveis de jusante e montante no amortecimento de um evento de rompimento. O aumento dos valores de R_N reflete, primeiramente, em um rápido aumento do amortecimento, variando de 0% a 50% em 10 unidades de R_N , mas que tende a atingir um patamar no entorno de 72%, para R_N maiores que 30, tendendo ao infinito.

7.6.3 Síntese da análise dos hidrogramas

Os resultados oriundos dos hidrogramas permitiram primeiramente a obtenção de um ponto de vista macro de como o nível de água varia ao longo dos primeiros 60 centímetros do desenvolvimento da onda. Esses resultados foram apresentados no item 7.6.1 e apontam que as seções em que o nível alcança seu pico são as que distam 30 e 40 centímetros da origem da ruptura. Também foi possível conferir que a presença de água a jusante do barramento gera um alteamento de todos os níveis do hidrograma, mas que eles não mudam o seu caráter de desenvolvimento, mantendo a formação de um pico que se desloca para frente ao longo das seções estudadas.

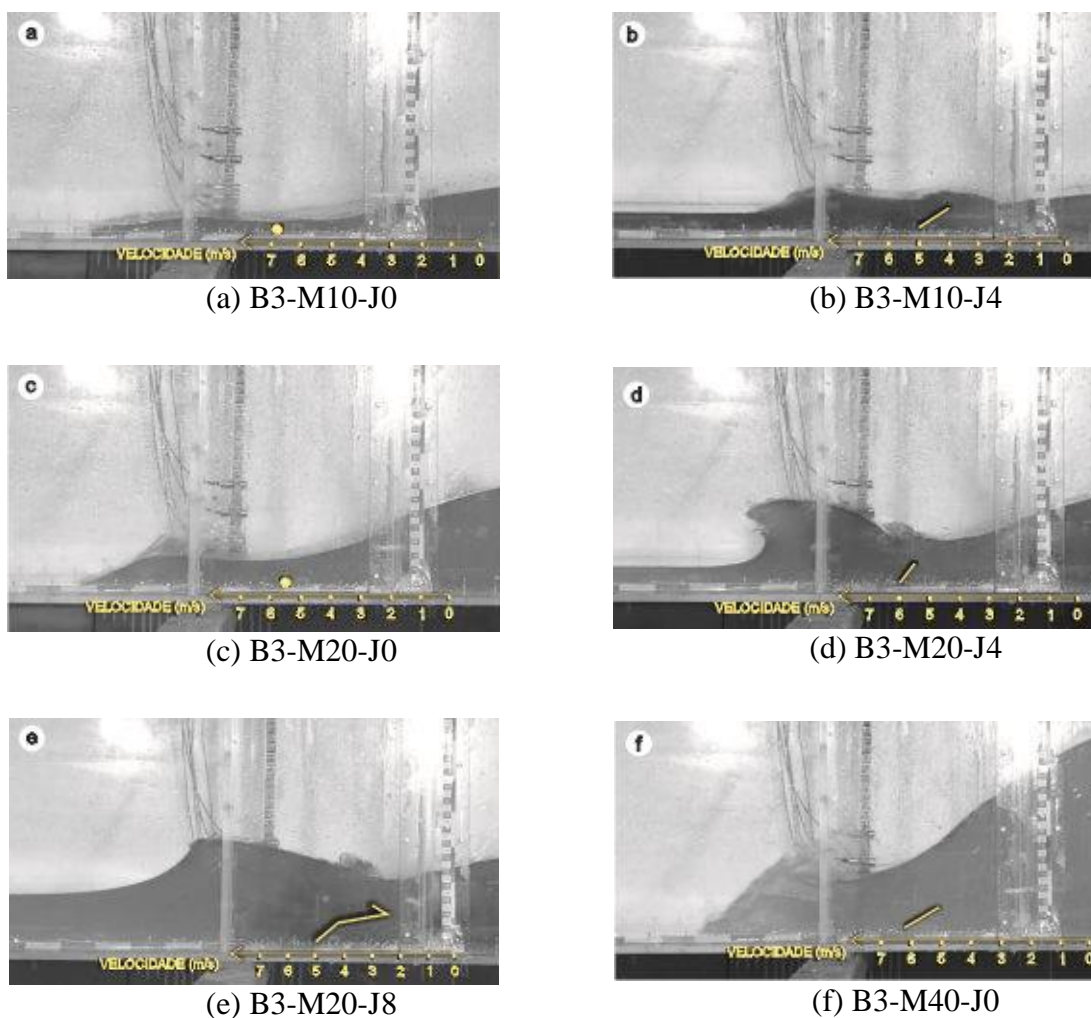
A segunda análise (7.6.2) aprofunda os estudos nas seções 30 e 40 centímetros e introduz o conceito de amortecimento. Para encontrar o quanto cada configuração de ensaio amorteceu o nível de água de montante pré-ruptura, identificou-se o nível máximo atingido por cada onda de ruptura. Foi visto que os picos de altura crescem em função tanto do aumento de nível de água a montante, quanto a jusante do barramento. Buscando uma relação entre os níveis da configuração inicial do ensaio e o amortecimento, encontrou-se uma aproximação logarítmica para a relação do amortecimento com R_N , para R_N menores que 30. Para R_N maiores que 30, o valor do amortecimento atinge o patamar máximo de 72%.

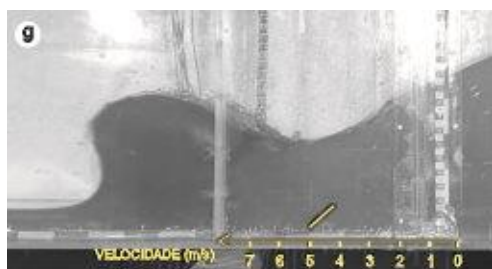
7.7 RESULTADOS REGISTRADOS PELO UVP

7.7.1 Velocidade registrada na terceira série de experimentos

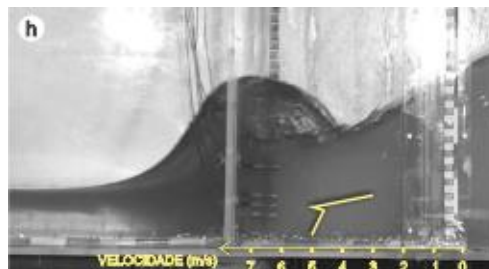
Conforme exposto no item 6.3.6, utilizou-se o aparato de medição UVP a fim de obter dados relativos a velocidade da frente de onda, que pudessem ser comparados com os resultados oriundos da utilização da câmera de alta velocidade. A Figura 90 expõe o perfil de velocidades sobreposto (linha amarela) a imagens ilustrativas, mostrando como a velocidade da frente de onda se comportou nos ensaios da terceira série de experimentos.

Figura 90 – Velocidade registrada pelo UVP.





(g) B3-M40-J4



(h) B3-M40-J8

Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando todos os ensaios de uma maneira global, os dados registrados pelo UVP¹⁹ indicaram velocidades da corrente na ordem de 5 a 6 m/s, em uma região mais próxima do fundo do canal e velocidades no entorno de 3 a 4 m/s, em uma altura de 5 a 10 centímetros do fundo. Em função da necessidade de meio líquido para a correta propagação e leitura da velocidade da onda pela sonda, não foi possível validar os resultados de todas as sondas, já que algumas ficavam expostas ao ar.

Analisando detalhadamente a Figura 90a, que refere à onda com reservatório de 10 centímetros e canal seco a jusante. Esse ensaio produziu uma onda de ruptura com baixa espessura, o que resultou na validação de apenas um ponto de velocidade, da sonda #3. Segundo a média das velocidades registradas pelo UVP, a velocidade dentro da corrente do ensaio B3-M10-J0 tem 7 m/s, um valor maior que o identificado nos demais métodos utilizados nessa pesquisa. Entende-se que nas análises anteriores esse pico de 7 m/s é amenizado em função da observância da velocidade média, seja geral, ou seja por trecho. Outro fator é que a velocidade dentro da corrente é maior devido à ausência do atrito gerado pela resistência das paredes do canal. O mesmo ocorre com a onda B3-M20-J0 (Figura 90c), com a identificação de uma velocidade de 5,5 m/s no fundo do canal.

O ensaio B3-M40-J0 (Figura 90f) também tem o canal seco a jusante, porém, devido ao reservatório possuir nível de 40 centímetros, a onda formada alcança uma altura que permitiu a validação da leitura de dois pontos de velocidade: 6 m/s no fundo e 5 m/s na sonda #4 (a 4,7 centímetros do fundo). O fato da velocidade do fundo ser mais alta é reflexo do método de abertura da placa, a retirada de baixo para cima faz com que a onda se desenvolva inicialmente

¹⁹ O experimento com reservatório no nível de 10 centímetros e a linha d'água a jusante com 8 centímetros de altura (M10-J8) não teve seus resultados apresentados, em função dessa configuração não gerar uma onda de ruptura, apenas uma leve elevação no nível de água a jusante.

pela sua camada mais baixa, que vai ganhando velocidade e crescendo ao longo do seu deslocamento. Esse mesmo comportamento pode ser conferido em B3-M10-J4 (Figura 90b) e B3-M20-J4 (Figura 90d), mesmo com níveis de reservatório mais baixo que 40 centímetros, o aumento do nível a jusante permitiu identificar também dois pontos de velocidade. O primeiro com velocidade do fundo com 5 m/s e a sonda imediatamente superior, com 4 m/s e o segundo marcou velocidade de 6 m/s no fundo e 5,5 m/s na sonda #4.

Com nível de montante em 40 centímetros e nível do canal a jusante em 4 centímetros, o ensaio B3-M40-J4 (Figura 90g) também teve apenas dois pontos com leitura consistente, contrariando o fato de que a maior altura no barramento e por consequência da onda, facilitaria a aquisição de dados pelo UVP. A leitura ocorreu apenas nas sondas #3 e #4, localizadas nas alturas 1,9 e 4,7 centímetros do canal e eram as únicas que estavam, respectivamente, submersa e parcialmente submersa na água a jusante do barramento. Identificou-se velocidade de 5 m/s no fundo e 4 m/s acima, mantendo a coerência com os demais resultados já apresentados.

Enfim, para o ensaio B3-M20-J8, com nível a jusante em 8 centímetros, foi possível manter submersas as sondas #3, #4, #5 e #8, registrando dados validados para todas elas. O ensaio com 20 centímetros no reservatório apontou um perfil de velocidade em que o fundo é mais rápido, com 5 m/s, seguido de velocidades que tendem a diminuir, sonda #4 marcando 4 m/s e sonda #5 marcando 2,5 m/s, já na sonda #8 houve o aumento de velocidade para 3 m/s. A interpretação desse resultado mantém a ideia da faixa inferior se deslocando mais rápido em razão da abertura da placa, porém, a partir que esse efeito vai passando, a onda começa a assumir uma velocidade maior na sua faixa superior, na qual não há resistência do fundo e é exatamente esse indício que é mostrado na Figura 90e.

Um comportamento semelhante é visto em B3-M40-J8 (Figura 90h), que também tem 8 centímetros de água a jusante e mantém as 4 primeiras sondas submersas. Atingindo velocidades no fundo de 5 m/s e 4,5 m/s, a onda oriunda do nível de montante em 40 centímetros, alcança a condição de maior velocidade onde não há influência no fundo mais rapidamente. A sonda #5, localizada a 6 centímetros do fundo do canal, aponta 5,5 m/s de velocidade. Entretanto, a sonda #8, logo acima, registra apenas 3 m/s de velocidade, interpreta-se que devido a formação da onda gerar uma quebra tubular, existe uma zona de interação entre a massa líquida de montante e jusante, em que a água a montante impulsiona a de jusante que

sobe e depois quebra. Essa subida do fluido de jusante antes de quebrar, gera uma desaceleração na faixa superior da onda que foi registrada pela sonda #8.

Uma análise geral dos resultados mostra que as velocidades identificadas pelo UVP são maiores que as vistas nos demais métodos utilizados nessa pesquisa. Entende-se que nas análises oriundas de imagens os picos são amenizados em função da observação da velocidade média, seja geral, seja por trecho. Outro fator que corrobora para os resultados do UVP terem registrado velocidades maiores, é que a velocidade dentro da corrente é maior devido à ausência do atrito gerado pela resistência das paredes do canal e no método que utiliza visualização de imagem registrada pela câmera, é considerada justamente a onda em contato com a parede.

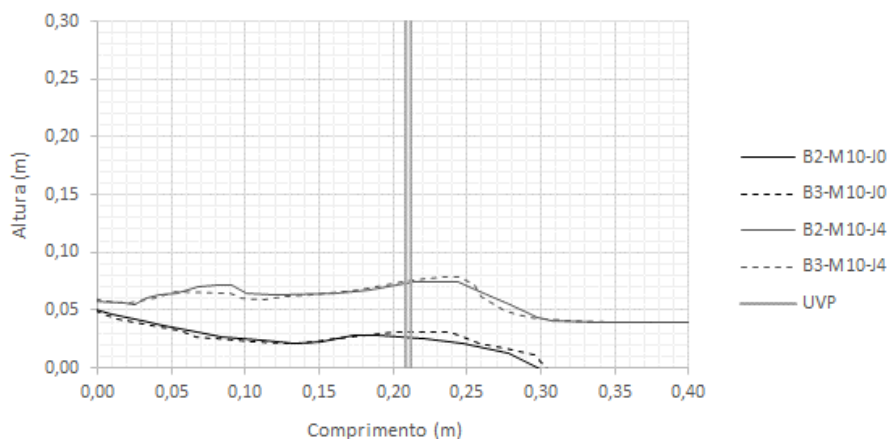
Espartel (2015), que analisou a velocidade instantânea das ondas com canal seco a jusante, identificou que ondas de ruptura se tratam de escoamentos não permanentes, ou seja, um fluxo no qual a velocidade em determinado ponto é variante com o tempo, também variando de um ponto a outro. Esse tipo de escoamento é também chamado de variável ou transitório. Dessa forma, a velocidade se desenvolve através de picos altos e baixos, o que justifica o fato do UVP ter identificado, por exemplo, a onda B3-M10-J0 mais rápida que as demais. Entende-se que no momento da aquisição dos dados pelo UVP, B3-M10-J0 estava em um pico mais alto que a média.

Em suma, a utilização do UVP expõe uma ordem de grandeza da velocidade que permite inferir certos comportamentos da onda, mas que, devido a condicionantes como a sonda estar submersa e a aquisição de dados não ser contínua, caracteriza um estudo que ainda necessita de aprofundamento e comparação com outros equipamentos de medição que se adaptem melhor ao ensaio.

7.7.2 Interferência da instalação do UVP

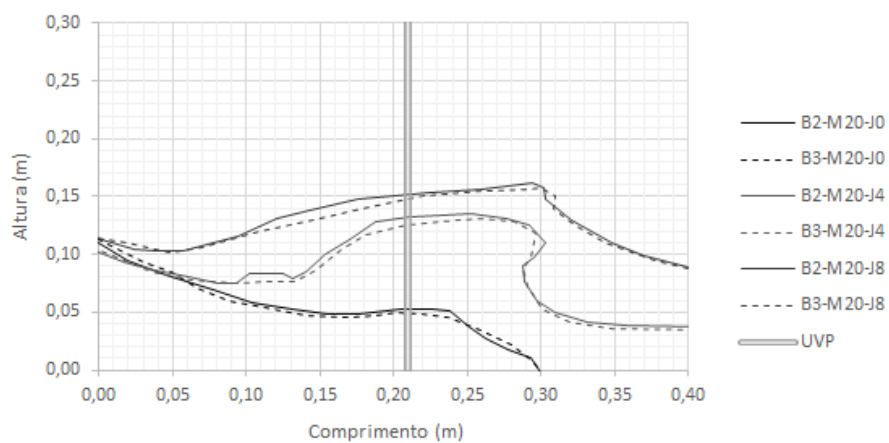
Um objetivo secundário da terceira série de ensaios foi verificar se a interferência causada pela instalação do UVP gera alguma modificação no formato da onda a jusante. A Figura 91 apresenta comparações entre ondas oriundas de ensaios da segunda e terceira série, com as mesmas condições iniciais. Lembrando, a segunda série (B2, linhas cheias) é sem o aparato de instalação do UVP e a terceira série (B3, linhas tracejadas) é com o aparato.

Figura 91 – Influência da instalação do UVP no formato das ondas M10.



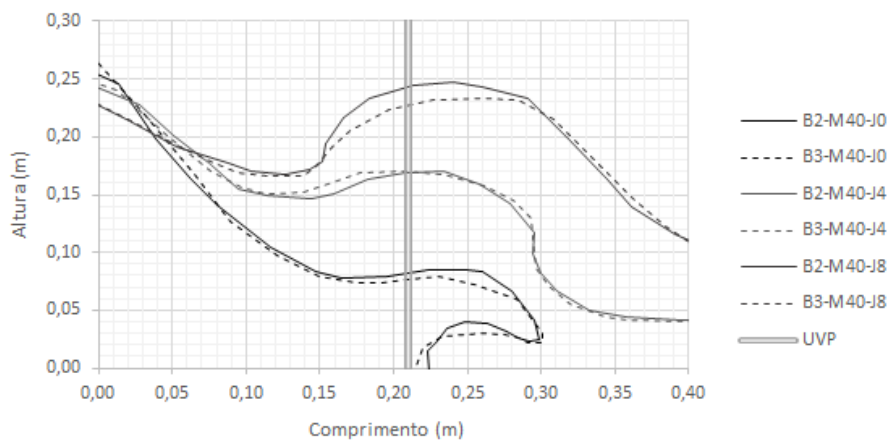
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 92 – Influência da instalação do UVP no formato das ondas M20.



Fonte: elaborado pelo autor.

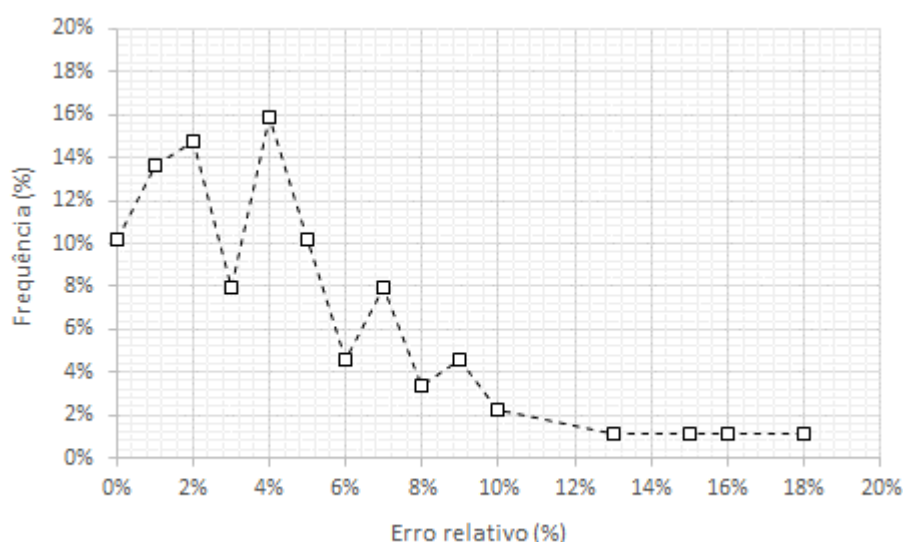
Figura 93 – Influência da instalação do UVP no formato das ondas M40.



Fonte: elaborado pelo autor.

Ao analisar a Figura 91, percebe-se que não há diferença significativa no formato das ondas de diferentes séries de ensaio. A inserção pontual das sondas, através de um aparato vertical, não influencia no desenvolvimento macro da onda, que mantém a mesma forma geométrica do escoamento dos ensaios sem o UVP. A Figura 94 apresenta a frequência observada para cada erro relativo, ao longo da comparação entre 88 ensaios da terceira série com a segunda série. Considera-se erro relativo a diferença de alturas entre B3 e B2, dividido pela altura em B3, para uma mesma distância horizontal.

Figura 94 – Erro relativo da formação de onda da terceira série de ensaios em comparação com a segunda série de ensaios.



Fonte: elaborado pelo autor.

Ao observar a Figura 94, nota-se que os erros relativos de baixa magnitude foram os mais frequentes. Um total de 60% dos ensaios de B3 possuiu uma diferença relativa menor que 4%, em comparação com B2. Também é visto que 95% tiveram um erro relativo menor que 10% e o erro relativo máximo foi de 18%. Essa análise da frequência dos erros relativos ratifica que não existe uma diferença significativa no formato da onda gerada em um canal aparatado com as sondas UVP, através de uma haste à 21 centímetros do barramento.

8 CONCLUSÕES

Esta dissertação apresentou um estudo experimental de ondas de ruptura de barragem, cuja premissa inicial foi gerar, caracterizar e compreender as grandezas hidrodinâmicas envolvidas nesse fenômeno hidráulico, empregando técnicas de modelagem física e análise via imagens adquiridas através de câmera de alta velocidade. A partir dos resultados das 4 séries de ensaios, totalizando 89 experimentos realizados, foi possível caracterizar o formato geométrico da onda e seu desenvolvimento hidrodinâmico.

Os principais parâmetros que regem o movimento da frente de onda oriunda da ruptura de uma barragem são os níveis de água a montante e a jusante do barramento antes da ruptura. Em função desses níveis, se alteram o formato e a velocidade da onda.

O valor da razão entre os níveis de água a jusante e a montante do barramento (R_N) na configuração inicial do experimento delimita o desenvolvimento da onda de ruptura em três possibilidades de formas distintas. Se R_N tender ao infinito, como é o caso dos canais secos a jusante, a onda desenvolverá um jato horizontal e sem quebra. Esse jato desenvolverá um formato mais espesso na frente, chamado de cabeça da onda. A cabeça da onda é maior, na medida em que o nível a montante também é maior.

Nesta pesquisa foram aferidos os seguintes valores de R_N : 1,25; 2,5; 5; 10 e 20. Quando o R_N for maior ou igual a 5, a onda desenvolverá um jato cogumelo e uma quebra tubular. Foram identificadas 4 etapas de desenvolvimento, que consistem em: (i) alteamento de nível de jusante a montante, (ii) acúmulo de água, (iii) projeção para frente e (iv) quebra impactando a lâmina de água a jusante. No momento em que a quebra tubular encosta as águas a jusante, observou-se que a altura máxima alcançada pela onda equivale a 20% da distância percorrida. Enquanto o ponto em que ocorre a altura máxima está situado a 80% da distância percorrida pela onda até a sua quebra.

Se R_N for menor que 5 e maior que 1,25, a onda desenvolverá um jato em transição e uma quebra ascendente. Essa quebra é caracterizada por uma dissipação de energia mais lenta, ocorrendo uma elevação de nível, seguida de uma desestabilização da onda. Também foi

verificado que o ensaio com $R_N = 1,25$ não gerou escoamento passível de ser classificado como onda de ruptura.

Em relação à velocidade desenvolvida pela onda, o aspecto mais importante é o nível de montante ser diretamente proporcional ao aumento da velocidade. Entretanto, o aumento do nível de jusante é inversamente proporcional a essa velocidade, funcionando como um obstáculo que retarda o desenvolvimento do fluxo. Os valores máximos encontrados para a velocidade das ondas de ruptura foram de 1 m/s à 3,5 m/s. Os resultados advindos do equipamento de medição de velocidade UVP apresentaram velocidades maiores (3 a 6 m/s) do que o identificado através da câmera rápida. Essa grande variação (mais de 100%) pode ser atribuída ao fato da medição por UVP ser realizada instantaneamente, enquanto a medição por imagens era uma média por trecho. Também, no UVP não houve influência das paredes do canal.

Essa pesquisa também identificou os hidrogramas de nível de 8 seções da onda de ruptura. Os picos de altura ocorreram nas seções 30 e 40 centímetros. Nessas seções, calculou-se o amortecimento da onda e os resultados encontrados apresentam 20% de amortecimento mínima (nível a jusante de 8 centímetros) e 72% de amortecimento máximo (canal seco a jusante). O amortecimento tem relação logarítmica com R_N .

Nesta pesquisa foi desenvolvida uma metodologia, através de um sistema de roldana e peso, para a geração da frente de onda. Essa metodologia triplicou a velocidade de abertura, em comparação a Espartel (2015). Ao longo do estudo reiterou-se a importância de uma rápida retirada da placa, aproximando o experimento de uma ruptura instantânea, esse é considerado o pior cenário de rompimento existente.

Ainda, os experimentos foram realizados com repetibilidade de três filmagens para cada configuração inicial, e mostraram um coeficiente de variação dos resultados na faixa considerada aceitável para níveis experimentais (< 15%).

Em termos de metodologia aplicada verificou-se que a instalação do equipamento de medição de velocidade não altera o formato da onda a jusante da haste de forma significativa, a variação foi de menos que 5% para mais da metade dos ensaios, a variação máxima aferida foi de 14%.

Os resultados encontrados via experimento foram comparados com as equações propostas por Chanson (2006). As equações teóricas calculam a distância percorrida pela onda e sua altura, em função de: tempo; alturas do nível a montante e jusante do barramento; propriedades do fluido, como viscosidade absoluta e massa específica. Constatou-se que as ondas analíticas excediam a distância percorrida pela onda experimental em uma faixa de 15% a 40%. Números próximos foram encontrados por Javadian (2016) e as principais causas apontadas residem na modelagem física que não alcança certas suposições teóricas, como a remoção instantânea do barramento, desconsideração de aceleração vertical e exatidão da influência da fricção em função das paredes e fundo do canal.

Foi proposta uma correção (fator F), visando diminuir a região de frente da onda, em que o fluido é tratado como real pelas equações de Chanson (2006), e com isso, representar de forma mais fiel, o retardo causado pela fricção das paredes e fundo do canal. Os resultados corrigidos se encaixam de forma satisfatória na curva formada pelos números adimensionais oriundos de experimentos anteriores. Ressalta-se que foi constatado, nessa pesquisa, que a correção F se ajusta para ensaios até 40 centímetros de nível de água a montante, em um canal de acrílico.

Expostas as conclusões que encerram a presente pesquisa, muda-se o enfoque e os resultados consolidados indicam novas possibilidades de estudo. Primeiramente, recomenda-se diminuir o intervalo da discretização da velocidade por trecho e a partir disso, verificar como essa velocidade se desenvolve a cada pequeno avanço no canal.

Em face dos acontecimentos recentes no Brasil, os rompimentos de barragens de rejeitos de Mariana e Brumadinho, somados ao número desse tipo de barragens existentes em situação de risco, recomenda-se realizar experimentos em que o fluido represado simule água com rejeitos. Isso pode ser realizado ao incluir algum tipo de sedimento na água, como carvão ou caulim. Os mesmos ensaios aqui propostos podem ser executados para diferentes concentrações de sedimentos misturados na água, e assim, identificar resultados específicos para barragens de rejeitos.

As equações que caracterizam o formato da onda de quebra tubular podem ser testadas experimentalmente para valores de R_N diferentes dos utilizados na presente pesquisa, que foram: 5, 10 e 20. Além disso, realizar ensaios com variados valores de R_N permitirá definir

com maior exatidão os valores de transição entre não ocorrência de quebra, quebra ascendente e quebra tubular.

Uma nova linha de estudo pode relacionar o formato da onda com diferentes maneiras de retirada da placa. Destaca-se que o estudo de rupturas instantâneas com a placa inclinada 1:2 pode representar taludes comumente vistos em barragens de terra e enrocamento.

Também recomenda-se generalizar o fator de correção F para as equações de Chanson (2006) para aferir se essa correção se ajusta aos diferentes níveis e para outras condições do canal, como maior volume no reservatório, através do aumento de seu comprimento ou da largura do canal como um todo. Expandir a correção para as alturas da onda e encontrar um método de quantificar a altura da cabeça da onda é outro importante estudo a ser desenvolvido.

Por fim, outra sugestão para estudos futuros é a busca de alternativas para as medições realizadas pelo UVP, no sentido de haver um aparato independente da filmagem, que produza resultados consistentes. A necessidade das sondas que captam a velocidade do escoamento estarem submersas é um empecilho na aquisição de dados para esse tipo de ensaio, no qual a onda se forma a partir de águas represadas a montante.

REFERÊNCIAS

- ANA, **Relatório de segurança de barragens 2017**, Agência Nacional de Águas (Brasil). Brasília: ANA, 2018.
- ANCEY, C. **Notes de cours hydraulique à surface libre: crues, vagues, et ruptures de barrage**. Lausanne: Laboratoire Hydraulique Environnementale – École Polytechnique Fédérale de Lausanne Écublens, 2014. Disponível em: <<http://lhc.epfl.ch/cours/masterGC/cours-hydraulique.pdf>> Acesso em 12 de maio de 2019.
- AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNANDEZ, M. F.; ARAÚJO, R.; ITO, A. E. **Manual de Hidráulica**. São Paulo: Edgard Blucher. 8ª ed. 669p. 1998.
- BALCH, K. **High Frame Rate Electronic Imaging**. San Diego: Motion Video Products, 1999. Disponível em: <<http://www.motionvideoproducts.com/MVP%20papers/HSV%20White%20Paper.pdf>>. Acesso em 12 de maio de 2019.
- BATTJES, J. A., LABEUR, R. J. **Unsteady flow in open channels**. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 2017.
- CARVALHO, E. Tema 113: Segurança de Barragens e Avaliação de Riscos. **XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens**. Foz do Iguaçu, 2015. Disponível em: <http://cbdb.org.br/xxxsngb/download/trabalhos_temas/12-05/tarde/Erton%20Carvalho/CBDB-RELATOR-ERTON-XXX-SNGB.pdf> Acesso em 12 de maio de 2019.
- CECH, T. V. **Principles of Water Resources: History, Development, Management, and Policy**, 3rd Edition. Danvers: John Wiley & Sons, 2010.
- CHANSON, H. Analytical solutions of laminar and turbulent dam break wave. **River Flow**. London: Taylor & Francis Group©, 2006. ISBN 0-415-40815-6
- CHAUDRY, M. H. **Open-channel flow**, Boston: Springer Science+Business Media. 2008.
- DAM ENGINEER. **RCC Dams** [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <<http://www.damengineer.com/RCC.html>> Acesso em 12 de maio de 2019.
- DEAN; R. G.; DALRYMPLE, R. A. **Water waves mechanics for engineers and scientists**. Singapore: World Scientific, 1984.
- ESHCHANOV, B. R.; STULTJES, M. G. P.; SALAEV, S. K.; ESHCHANOV, R. A. Rogun dam – path to energy independence or security threat? **Sustainability journal**, [S.l.], ed. 3, p. 1573-1592; 2011. DOI:10.3390/su3091573. Disponível em < <https://www.mdpi.com/2071-1050/3/9/1573/htm> > Acesso em 22 de abril de 2019.
- ESPARTEL, L. **Análise de fenômenos hidráulicos: emprego de câmera de alta velocidade** 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: jul. 2015.

FERREIRA, P. L. C., **Análise Comparativa entre Correntes de Densidade e Jatós**. 2013. 107 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: jan. 2013.

GIBSON, C. D. **Sea Islands of Georgia**. Athens: University of Georgia Press, 2009.

Disponível em:

<<https://books.google.com.br/books?id=13Mldw0qxBIC&printsec=frontcover&hl=pt-BR#v=onepage&q&f=false>> Acesso em 19 de março de 2019.

GUILLERMO, O. E. P.; CABRAL, P. A. de F.; MANICA, R.; ZARO, M. A. Experiência multimodal a partir de hipervídeo em super câmera lenta no contexto de um objeto de aprendizagem. In: LIMA, J. V. de.; SINGO, F.; CANTO, A.; MULLER, T.; SILVA, F. (Org.) **Objetos de Aprendizagem Multimodais: Projetos e Aplicações**. 1. ed. Barcelona: Editorial UOC, 2014. p. 139-210.

HENDERSON, F., M.; **Open Channel Flow**. New York: Macmillan Publishing, 1966.

HSU, H. C.; FREYERMUTH, A. T.; HSU, T. J.; HWUNG, H. H. On dam-break wave propagation and its implication to sediment erosion. **Journal of hydraulic Research**, [S. l.], DOI:10.1080/00221686.2013.857365, 2014. Disponível em: <<https://http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2013.857365>>. Acesso em 12 de maio de 2019.

ICOLD, Dam failures statistical analysis, **Bulletin 99**, [S. l.: s. n.], 1995.

ICOLD. **Constitution Statuts**, [S. l.: s. n.], 2011. Disponível em: <https://www.icold-cigb.org/userfiles/files/CIGB/INSTITUTIONAL_FILES/Constitution2011.pdf> Acesso em 10 de março de 2019.

JAMES, S. Learning Goal 8c: Explain how wave characteristics determine the types of breaking waves. **UBC ATSC 113 - Weather for Sailing, Flying & Snow Sports**. Nov. 2016. Não paginado. Disponível em: <https://www.eoas.ubc.ca/courses/atsc113/sailing/met_concepts/08-met-waves/8c-breaking-waves/index.html>. Acesso em 6 de janeiro de 2019.

JANBERG, N., **Roselend Dam** [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <<https://structurae.net/structures/roselend-dam/photos>> Acesso em 9 de março 2019.

JAVADIAN, M.; MAHMOUDINASAB, F.; KAVEH, R. A study on experimental model of dam break problem and comparison experimental results with analytical solution of saint-venant. **International Journal of Advanced Biotechnology and Research**, [S. l.]. v. 7, n. 5, p.1239-1245, jul. 2016. ISSN 0976-2612.

KOROBKIN, A.; YILMAZ, O. The initial stage of dam-break flow, **Springer Scientia+Business**, [S. l.]. n. 63, p. 293-308, jul. 2008. DOI: 10.1007/s10665-9237-z

KPL. Dam: Two More Dead Bodies Retrieved. **Laos News Agency**, 7 dez. 2018. Disponível em: <<http://kpl.gov.la/En/Detail.aspx?id=42124>> Acesso em 9 de março de 2019.

LE MÉHAUTÉ, B. **An introduction to hydrodynamics and water waves**. Pasadena: Springer Science + Business Media, LLC, 1976.

LEAL, J. G. A. B.; FERREIRA, R. M. L.; CARDOSO, A. H. Dam-Break Wave-Front Celerity, **Journal of Hydraulic Engineering**, [S. l.]. v. 132, n. 1, p. 69-75, jan. 2006. Disponível em: <http://www.civil.ist.utl.pt/~ruif/FCT/NetFluv/Leal_al_2006.pdf>. Acesso em 25 de fevereiro de 2019.

LIGHTILL, J. **Waves in Fluids**, Cambridge: Cambridge University Press, 1978.

LIU, H.; LIU, H. Experimental Study on Dam-Break Hydrodynamic Characteristics Under Different Conditions, **Journal of Disaster Research**, Vol. 12, No. 1, 2017. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11802-017-3470-x>> Acesso em 9 de abril de 2019.

LOPES, L. M. N.; O Rompimento da barragem de Mariana e seus impactos socioambientais, **Sinapse Múltipla**, 5 (1), jun 1-14, 2016, Betim: PUCMinas; Disponível em: <<http://periodicos.pucminas.br/index.php/sinapsemultipla> > Acesso em 15 de abril de 2019.

MADEIRO, C. Mortes, danos ambientais e sequelas marcam tragédias com barragens no país. **UOL Notícias**. 06 nov. 2015. Não paginado. Disponível em: <<https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2015/11/06/mortes-danos-ambientais-e-sequelas-marcam-tragedias-com-barragens-no-pais.htm>> Acesso em 6 de janeiro de 2019.

MANICA, R. **Geração de correntes de turbidez de alta densidade: condicionantes hidráulicos e posicionais**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos). Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MANSUR, S. S.; VIEIRA, E. Del R. Visualização Experimental de Escoamentos²⁰. In: MÖLLER, S. V.; SILVESTRINI, J. H. (Ed.) **Turbulência**. 1. ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2004. v. 4. p. 33-71.

MCCULLY, P. **Silenced Rivers: The Ecology and Politics of Large Dams**. London: Zed Books, 2001.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, Secretaria de Infra-Estrutura Hídrica. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2002. 148p. CDU 627.82. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/cadastros/barragens/inspecao/ManualdeSegurancaeInspecaodeBarragens.pdf>>. Acesso em 6 de janeiro de 2019.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Resolução n. 143 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos**, de 10 de setembro de 2012. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, em atendimento ao art. 7º da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Brasília, 2012. Disponível em: <<http://www.cnrh.gov.br/resolucoes/1922-resolucao-n-143-de-10-de-julho-de-2012/file>>. Acesso em 09 de maio de 2019.

²⁰ O mesmo texto, porém, com paginação diferente, também está disponível em: <http://www.researchgate.net/publication/257137664_VISUALIZAO_EXPERIMENTAL_DE_ESCOAMEN_TOS>, basta clicar em *view* no canto superior direito da tela.

MELLO, F. M. (Coord.); PIASENTIN, C. (Ed.) **A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI**: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens. Rio de Janeiro: CBDB, 2011.

METRO. **Brumadinho**: Fotos feitas antes e depois da lama [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <<https://www.metrojornal.com.br/foco/2019/01/31/brumadinho-antes-e-depois-fotos.html>> Acesso em 9 de março de 2019.

MONTZ, B. E.; TOBIN, G. A.; HAGEMAN III, R. R. **Natural hazards: explanation and integration**. Second edition. New York: The Guilford Press, 2017. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=AW4RDgAAQBAJ&printsec>> Acesso em 10 de março de 2019.

NIKURADSE, J., **Laws of Flow in Rough Pipes**. NACA TM 1292, Washington: National Advisory Committee on Aeronautics. 1933. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19930093938.pdf>> Acesso em 1º de maio de 2019.

OLARN, K.; SIDHU, S.; WESTCOTT, B. Substandard construction' caused Laos dam collapse, minister says. **CNN**, 27 jul. 2018. Não paginado. Disponível em: <<https://edition.cnn.com/2018/07/27/asia/laos-dam-collapse-construction-intl/index.html>> Acesso em 6 de janeiro de 2019.

OLIVEIRA, N. Minas já sofreu com outros rompimentos de barragens. **O Tempo**, 5 nov. 2015. Não paginado. Disponível em: <<http://www.otempo.com.br/cidades/minas-j%C3%A1-sofreu-com-outros-rompimentos-de-barragens-1.1159501>> Acesso em 12 de maio de 2019.

SÓRIA, M. A. Z. (ORG.); WALZ, A.; HUGHES, A.; BONNET, P.; BASSON, G. **As Barragens e a Água no Mundo**: Um livro educativo que explica como as barragens ajudam a administrar a água do mundo. [S.l.]: Comissão Internacional de Grandes Barragens (CIGB), 2008.

STANSBY, P. K.; CHEGINI A.; BARNES, T. The initial stages of dam-break flow, **Journal of Fluid Mechanics**, United Kingdom, v. 370, p. 407-424, 1998.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros**, volume 1: mecânica, oscilações e ondas, termodinâmica. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

UEMURA, S; MARTINS, J. R. S.; FADIGA, F. M. Rompimento de barragens: estudo de caso da represa Guarapiranga em São Paulo. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 17., 2007, São Paulo. **Anais eletrônicos**. São Paulo: [s. n.], 2007. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/e505bb25f73c120233cd5e1cf02ef991_0bebf8963fba1cf1ecf848cb72efe9c3.pdf>. Acesso em 12 de maio de 2019.

VERSLUIS, M. **High-speed imaging in fluids**. [S. l.: s. n.], 2012. Disponível em: <<http://core.kmi.open.ac.uk/download/pdf/11485607.pdf>>. Acesso em 12 de maio de 2019.

VIJAYAN, R. **Banasura Sagar**: India's Largest Earthen Dam [S. l.: s. n.], 2014. Disponível em: <<http://www.banasura.com/blog/banasura-sagar-india%E2%80%99s-largest-earthen-dam>>. Acesso em 9 de março 2019.

VIRTUALDUB. **What is VirtualDub?** [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em:
<<http://www.virtualdub.org/index.html>> Acesso em 9 de março de 2019.

WATSON, I.; BURNETT, A. D. **Hydrology, an environmental approach.** Boca Raton:
CRC Lewis, 1995.

WORTHINGTON, A. M. **A study of splashes.** London: Green and Co., 1908.

WYLAM, K. E., **Hazard Potential Classification Assessment for the CCR Impoundment.**
Iowa: MidAmerican Energy Company, Louisa Generating Station, 2016.

YOUSSEF, T. F., **Dams and reservoirs** [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em:
<<http://osp.mans.edu.eg/tahany/dams1.htm>> Acesso em 9 de março de 2019.

ZHANG, L.; PENG, M.; CHANG, D. e XU, Y. **Dam failure mechanisms and risk
assessment.** Hoboken: John Wiley & Sons, 2019.

APÊNDICE A

Hipóteses e deduções para a definição das equações que regem o movimento da onda de ruptura.

A equação de resistência do fluxo é dada por:

$$-\gamma A \Delta H - \tau_0 P \Delta X = \rho A \Delta X \left(v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} \right) \quad (\text{equação 1})$$

Sendo,

γ é peso específico, em N/m³;

A é a área da seção, em m²;

ΔH é a altura da lâmina da água no canal, em metros;

τ_0 é tensão de cisalhamento, em N/m²;

P é o perímetro molhado da seção, em metros;

ΔX é a comprimento longitudinal do volume de controle, em metros;

ρ é a massa específica, em kg/m³;

v é a velocidade do escoamento, em m/s.

Entendendo que o raio hidráulico (R) é o valor da área da seção dividida pelo perímetro molhado ($R = A/P$) e que a variação da energia total desse sistema ao longo de X (dH/dx) pode ser representada pela soma da altura da lâmina da água (energia potencial) com a energia cinética:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{d \left(h + \frac{v^2}{2g} \right)}{dx} \quad (\text{equação 1a})$$

Substituindo (1a) em (1), chega-se nesta expressão para o valor da tensão de cisalhamento:

$$\tau_0 = -\gamma R \left(\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \right) \quad (\text{equação 1b})$$

Colocando essa expressão para tensão de cisalhamento dentro de uma fórmula de perda de carga em canais, como a proposta por Chèzy, tem-se:

$$Sf = \frac{v^2}{C^2R} = \frac{\tau_0}{\gamma R} \quad (\text{equação 3})$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v^2}{C^2R} = 0 \quad (\text{equação 4})$$

Sendo,

- Sf é a declividade da linha de energia, em m/m;
- v é a velocidade do escoamento, em m/s;
- C é uma constante, que depende do material do canal;
- R é o raio hidráulico, em metros;
- τ_0 é tensão de cisalhamento, em N/m²;
- γ é o peso específico, em N/m³;
- dH/dx é energia ao longo de X.

Conforme as equações para escoamento uniforme, as equações (3) e (5) são verdadeiras somente se a distribuição de pressão é hidrostática, ou seja, quando a componente vertical de aceleração é negligenciável. Explicitando a energia em todas as suas componentes, tem-se:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial \Delta H}{\partial x} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} \quad (\text{equação 4a})$$

Igualando dH/dx nas equações 4, 5 e 6, tem-se uma equação para a declividade da linha de energia de um escoamento não permanente e variado:

$$Sf = -\frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\partial \Delta H}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (\text{equação 5})$$

A equação da continuidade para um escoamento variado é

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial \Delta H}{\partial t} = 0 \quad (\text{equação 2})$$

Essa mesma equação, se especificada para canais retangulares, substituindo a vazão Q, por uma vazão unitária $q = Q/B$, apresenta:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial \Delta H}{\partial t} = 0 \quad (\text{equação 2a})$$

Também é possível expandir $dQ/dx = d(A\Delta H)/dx$, o que nos leva a

$$A \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial A}{\partial x} + B \frac{\partial \Delta H}{\partial t} = 0 \quad (\text{equação 6})$$

Sendo,

dH/dx é a variação da energia potencial ao longo do eixo horizontal;

g é a aceleração gravitacional, em m/s^2 ;

dv/dt é a variação da velocidade ao longo do tempo, em m/s^2 ;

v é a velocidade do escoamento, em m/s ;

C é uma constante, que depende do material do canal;

R é o raio hidráulico, em metros;

S_f é a declividade da linha de energia, em m/m ;

γ é peso específico, em N/m^3 ;

A é a área da seção, em m^2 ;

B é a largura do canal, em metros;

ΔH é a altura da lâmina da água no canal, em metros.

APÊNDICE B

Passo a passo para a solução via método das características para resolver duas equações independentes, 4 e 5, por um lado e 2 e 6 por outro, para as duas variáveis desconhecidas v e ΔH .

A melhor aproximação para resolver esse tipo de problema é o método das características (HENDERSON, 1966), um método semigráfico em que soluções explícitas são facilmente obtidas e soluções numéricas podem ser trabalhadas para casos mais gerais, quando as soluções explícitas não são possíveis.

Para introduzir o método, é utilizada uma exemplificação em um canal retangular de largura e inclinação constante. O primeiro passo é substituir

$$\frac{\partial z}{\partial x} = -S_0 \quad (\text{equação 7a})$$

$$c^2 = gy \quad (\text{equação 7b})$$

sendo c é a celeridade da onda em escoamento de profundidade y , assim

$$\partial(gy) = \partial(c^2) = 2c\partial c \quad (\text{equação 7c})$$

multiplicando a equação (7c) por g e rearranjando, temos:

$$2c \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} = g (S_0 - S_f) \quad (\text{equação 7d})$$

sendo $q = vy$, pode-se expandir a equação para

$$v \frac{\partial y}{\partial x} + y \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (\text{equação 7e})$$

multiplicando tudo por g e substituindo $c^2 = gy$, obtém-se:

$$2vc \frac{\partial c}{\partial x} + 2c \frac{\partial v}{\partial x} + 2c \frac{\partial c}{\partial t} = 0 \quad (\text{equação 7f})$$

e dividindo-se tudo por c

$$2v \frac{\partial c}{\partial x} + c \frac{\partial v}{\partial x} + 2 \frac{\partial c}{\partial t} = 0 \quad (\text{equação 7g})$$

somando e subtraindo (7d) e (7g), temos:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v + c) \frac{\partial v}{\partial x} + 2 \frac{\partial c}{\partial t} + 2(v + c) \frac{\partial c}{\partial x} = g (S_0 - S_f) \quad (\text{equação 7h})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v - c) \frac{\partial v}{\partial x} - 2 \frac{\partial c}{\partial t} - 2(v - c) \frac{\partial c}{\partial x} = g (S_0 - S_f) \quad (\text{equação 7i})$$

rearranjando em termos de derivadas totais

$$(v + c) \frac{\partial(v + 2c)}{\partial x} + \frac{\partial(v + 2c)}{\partial t} = \frac{D_1(v + 2c)}{D_1 t} = g (S_0 - S_f) \quad (\text{equação 7j})$$

$$(v - c) \frac{\partial(v - 2c)}{\partial x} + \frac{\partial(v - 2c)}{\partial t} = \frac{D_2(v - 2c)}{D_2 t} = g (S_0 - S_f) \quad (\text{equação 7k})$$

Em que a derivada total representa a taxa de mudança da perspectiva de um observador que se move com velocidade $(v + c)$ e $(v - c)$, respectivamente. A significância desse resultado é que o caminho desses dois observadores imaginários pode ser plotado em um plano $x-t$ e uma solução completa pode ser obtida para qualquer situação de escoamento não permanente.

Aplicando em uma onda simples, que é o problema mais trivial em um escoamento não permanente, sendo $S_f = S_0 = 0$.

$$\text{família C1: } (v + c) \frac{\partial(v + 2c)}{\partial x} + \frac{\partial(v + 2c)}{\partial t} = 0 \quad (\text{equação 7})$$

A inclinação inversa da linha é $(v + c)$, enquanto $(v + 2c)$ é constante. O mesmo ocorre para o segundo grupo (família C₂), no qual a inclinação inversa é $(v - c)$ e $(v - 2c)$ é constante.

$$\text{família C2: } (v - c) \frac{\partial(v - 2c)}{\partial x} + \frac{\partial(v - 2c)}{\partial t} = 0 \quad (\text{equação 8})$$

Isso significa que para o observador que se move com velocidade $(v \mp c)$, a quantidade $(v \mp 2c)$ permanece constante.

APÊNDICE C

Nesta pesquisa também foi utilizado o Matlab, um *software* interativo voltado para o cálculo numérico. Através dele foi possível identificar a linha d'água do canal, porém devido a maior precisão das outras ferramentas utilizadas ao longo dessa pesquisa, os dados oriundos do Matlab não foram incluídos nas análises posteriores e no desenvolvimento do relatório. O Apêndice C apresenta esses dados e elucida como foram adquiridos.

Para entender esse processo primeiro é preciso saber que uma imagem digital é formada pelo agrupamento de vários pixels, sendo o pixel a menor unidade dessa imagem. A cor de cada pixel é fruto da combinação de três cores básicas: vermelha, verde e azul, cada uma dessas três cores possui 256 tonalidades (de zero a 255), da mais escura à mais clara, esse padrão de cores é chamado de *RGB*, do inglês *red* (vermelho), *green* (verde) e *blue* (azul). O código que define a cor do pixel, então, é formado pela identificação da tonalidade das cores vermelho, verde e azul (nessa ordem) que resultam no pixel. Os valores mais próximos de zero representam pixels mais escuros, enquanto que valores próximos de 255 representam o branco.

A imagem digital é interpretada pelo programa como uma matriz de três dimensões (X, Y, RGB); sendo X e Y a localização do pixel em um plano de duas dimensões e R, G e B a intensidade de cada cor que caracterizará o pixel. A Figura 95 expõe os códigos de dois pixels com coloração distinta.

Figura 95 – Código que compõe o pixel.



Fonte: elaborado pelo autor.

O aplicativo Matlab realiza a leitura dos códigos das cores de cada pixel e através de condições de contorno impostas por programação é possível identificar quais pixels formam a linha d'água e quais estão no vazio. Esses dados então são contextualizados dentro de um plano cartesiano para corresponder as medidas reais do canal de ensaio, por fim, é possível exportar esses dados para uma planilha de cálculo. Após escolher as imagens a serem analisadas, que foram extraídas do vídeo pelo software Virtualdub, conforme item 6.3.1, foi executado um algoritmo para obtenção da linha d'água, que envolve os seguintes comandos: carga da imagem, processamento, medição e exportação.

A carga da imagem consiste em indicar ao programa os arquivos de imagens prestes a serem processados. Foi utilizada planilha eletrônica para auxiliar na identificação das imagens a serem carregadas. Através da ferramenta *imread* do software, é possível carregar os arquivos *.jpeg* individualmente no software. No início da execução do script, o software pede as condições de contorno iniciais como a localização (x,y) da base do canal, a extensão avaliada do canal, a localização do zero e uma distância conhecida qualquer, munido dessa última informação, o aplicativo é capaz de compreender o valor em centímetros que representa uma determinada diferença de pixels e inferir o valor em centímetros de um único pixel, esse valor que o aplicativo utilizará para fazer as leituras da imagem.

O processamento se dá através do uso de comandos *for* e *if*, foram estabelecidos critérios lógicos para filtrar os componentes da imagem que interessam para o presente trabalho. O critério utilizado neste caso foi avaliar o produto entre os três tipos de cores “RGB” para cada um dos pixels, por exemplo [1,1,1] x [1,1,2] x [1,1,3].

Conforme é possível visualizar Figura 95, há uma diferença dos valores em RGB nos dois pixels da mesma imagem. Portanto, através do produto dos três valores, obtém-se valores altos para pixels brancos ou mais próximos de brancos, que não fazem parte da massa líquida de interesse. Através de testes, definiu-se que para as imagens analisadas na presente pesquisa, o critério seria 10^6 . A partir disso, então, é gerada uma nova matriz (Figura 96) de duas dimensões [X,Y] com valores de 0 a 1 (0 = preto, 1 = branco, entre 0 e 1 = cinza). Para os pixels cujo produto entre [X,Y,R] · [X,Y,G] · [X,Y,B] resultasse em valores acima de 10^6 , a nova matriz possuiria valor igual a 0.

Se $[X,Y,R] \cdot [X,Y,G] \cdot [X,Y,B] \geq 10^6$, então $[X,Y] = 0$, se não, $[X,Y] = 1$

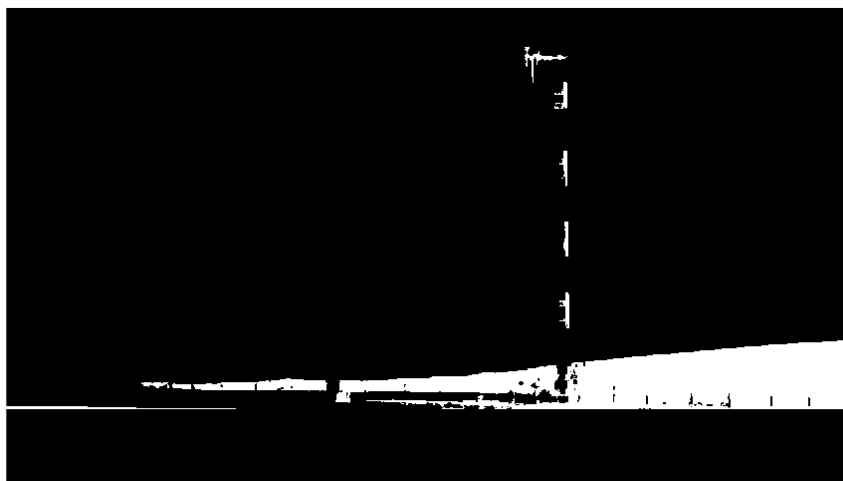
Figura 96 – Imagem em preto e branco da onda de ruptura analisada.



Fonte: elaborado pelo autor.

Posteriormente foi aplicada a ferramenta *bwareaopen* com o intuito de eliminar agrupamento de pixels que não representassem a água. Estes ruídos são produto da sujeira, de gotículas e até mesmo do reflexo da luz no acrílico do canal. Com a ferramenta, é gerada uma nova matriz (Figura 97) com uma menor quantidade de ruídos. Os critérios da ferramenta previamente citadas podem ser alterados e envolvem basicamente o número de pixels brancos (iguais a 1) agrupados.

Figura 97 – Imagem em preto e branco com aplicação de filtro para remoção de ruídos.



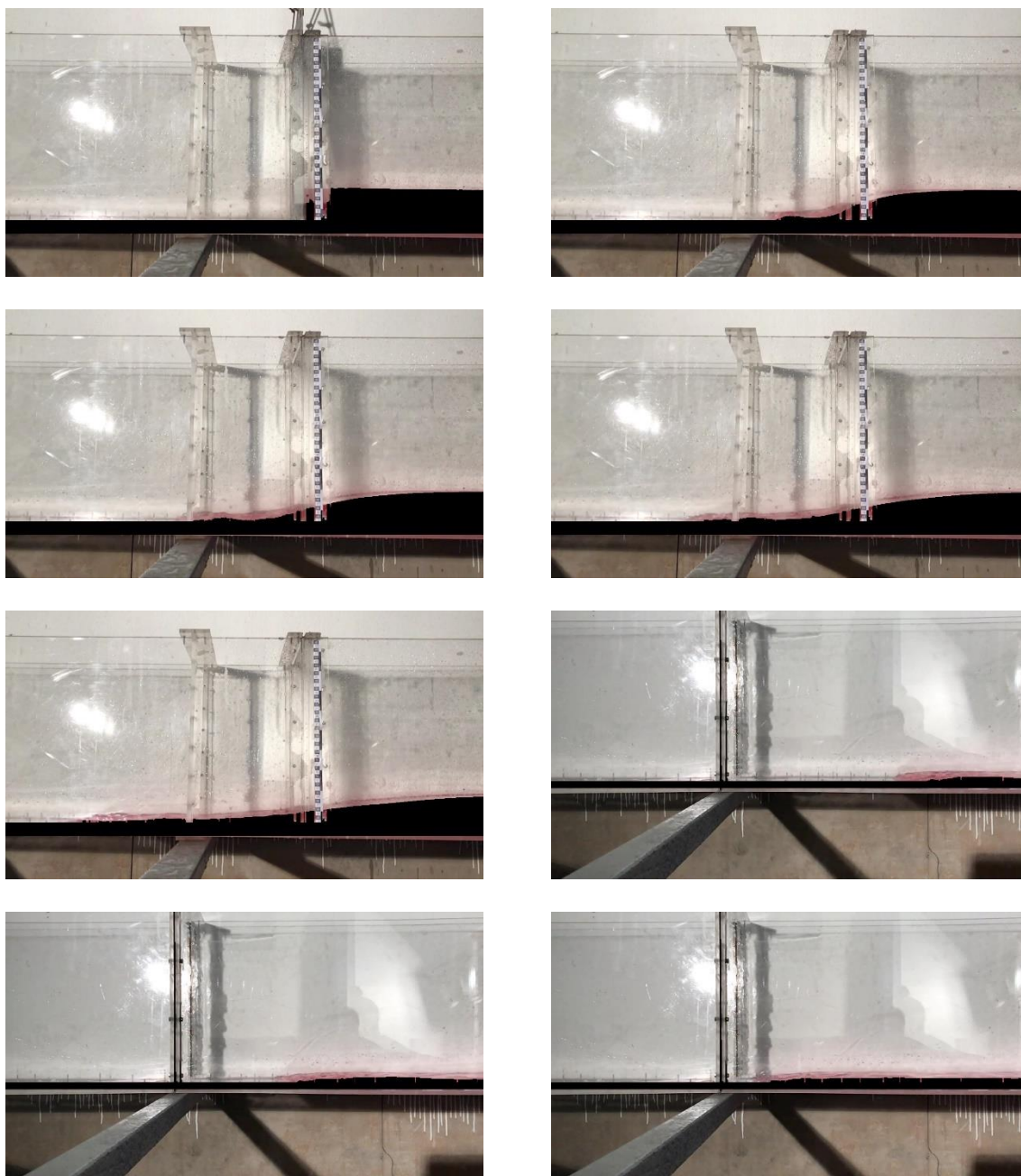
Fonte: elaborado pelo autor.

A medição é feita utilizando a matriz previamente citada, em que mede-se o número de pixels da base do canal (localização indicada iterativamente pelo usuário para cada ensaio) até

o fim da linha de água. Esse número de pixels é então multiplicado pelo fator de escala (centímetro/pixel), gerado automaticamente pelo script através dos dados de condições de contorno estabelecidos pelo usuário, para poder converter o valor de número de pixels a centímetros. O script exporta imagens que exibem em preto a medição da coluna de água, em formato *.jpeg*, para possibilitar a avaliação dos resultados de cada um dos passos supracitados. Os valores numéricos são exportados em planilhas eletrônicas. A partir da Figura 98, até a Figura 105, são expostas as imagens da identificação da água, em preto, da segunda série de ensaios realizados.

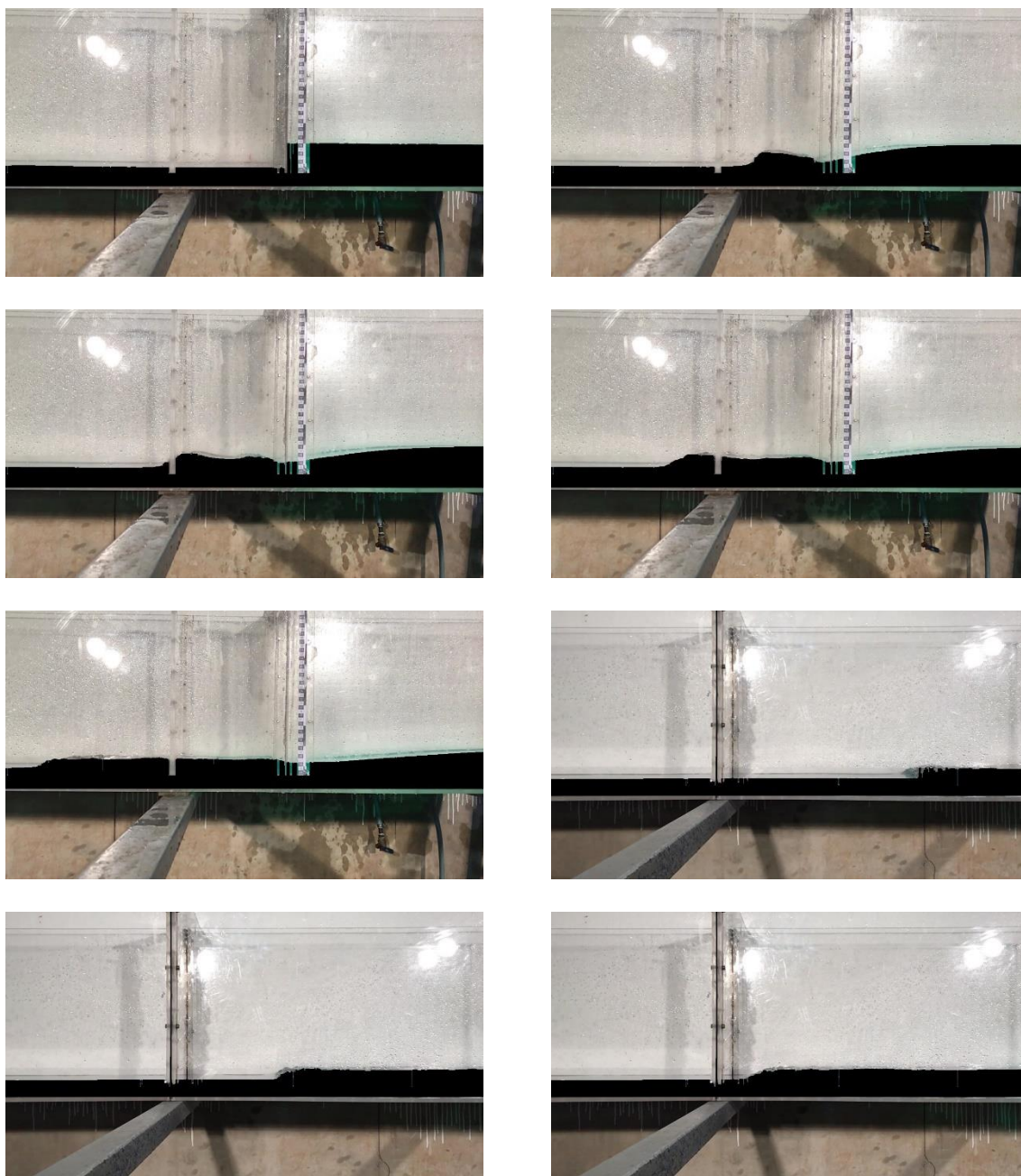
A análise via Matlab ainda carece de um aprofundamento no script da transformação dos dados imagéticos em dados calculáveis, a onda não é plenamente identificada, impossibilitando um tratamento automático de dados que permita uma análise consistente. Porém, mesmo não sendo possível utilizar o Matlab na presente pesquisa, destaca-se que esse aplicativo é uma ferramenta promissora no âmbito de análise de imagens; é necessário um aprofundamento de estudo que defina as melhores condições de filmagem (enquadramento, luz, tonalidade dos corantes) e que, juntamente com avanços na programação dos *scripts*, possa culminar em resultados satisfatórios. Escalar os dados analisados, de forma a se obter resultados de forma automática é um desafio que tem potencial para protagonizar futuros estudos. Ainda refletindo a cerca de melhorias que facilitem a utilização do Matlab, existem possibilidades de direcionar a construção do canal, condições e procedimentos de ensaio, filmagem, posicionamento da câmera em função exclusiva da análise via *software*. Entende-se que solucionar as perturbações da imagem ocasionadas por gotículas, conexões dos módulos do canal, reflexo da iluminação e padronizar a concentração de corante e enquadramento da câmera seriam um grande passo em direção a agilizar o tratamento de dados, obter bons resultados e aumentar o volume de resultados para serem postos em discussão.

Figura 98 – Formato geométrico identificado pelo Matlab, M10-J0.



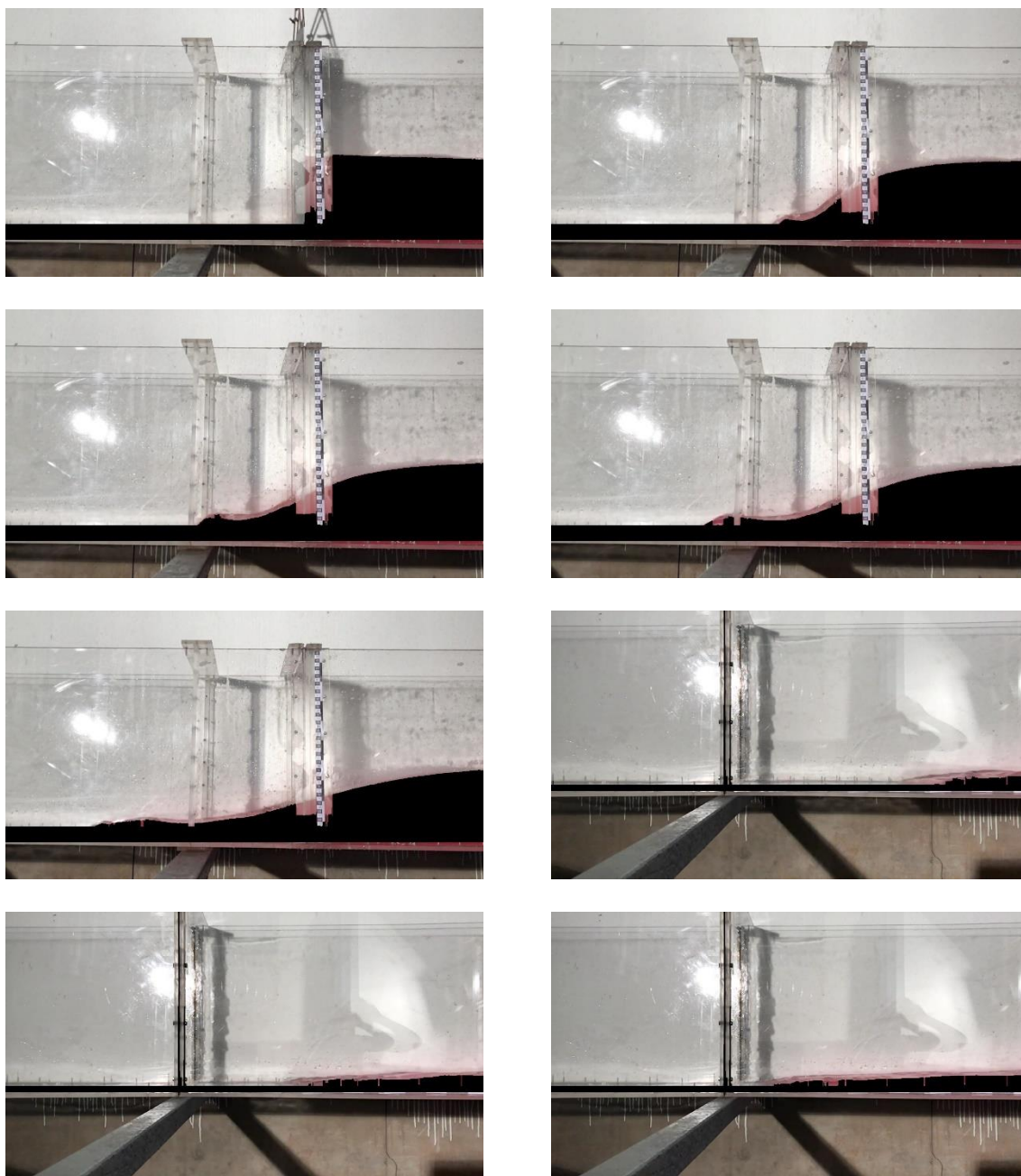
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 99 – Formato geométrico identificado pelo Matlab, M10-J4.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 100 – Formato geométrico identificado pelo Matlab, M20-J0.



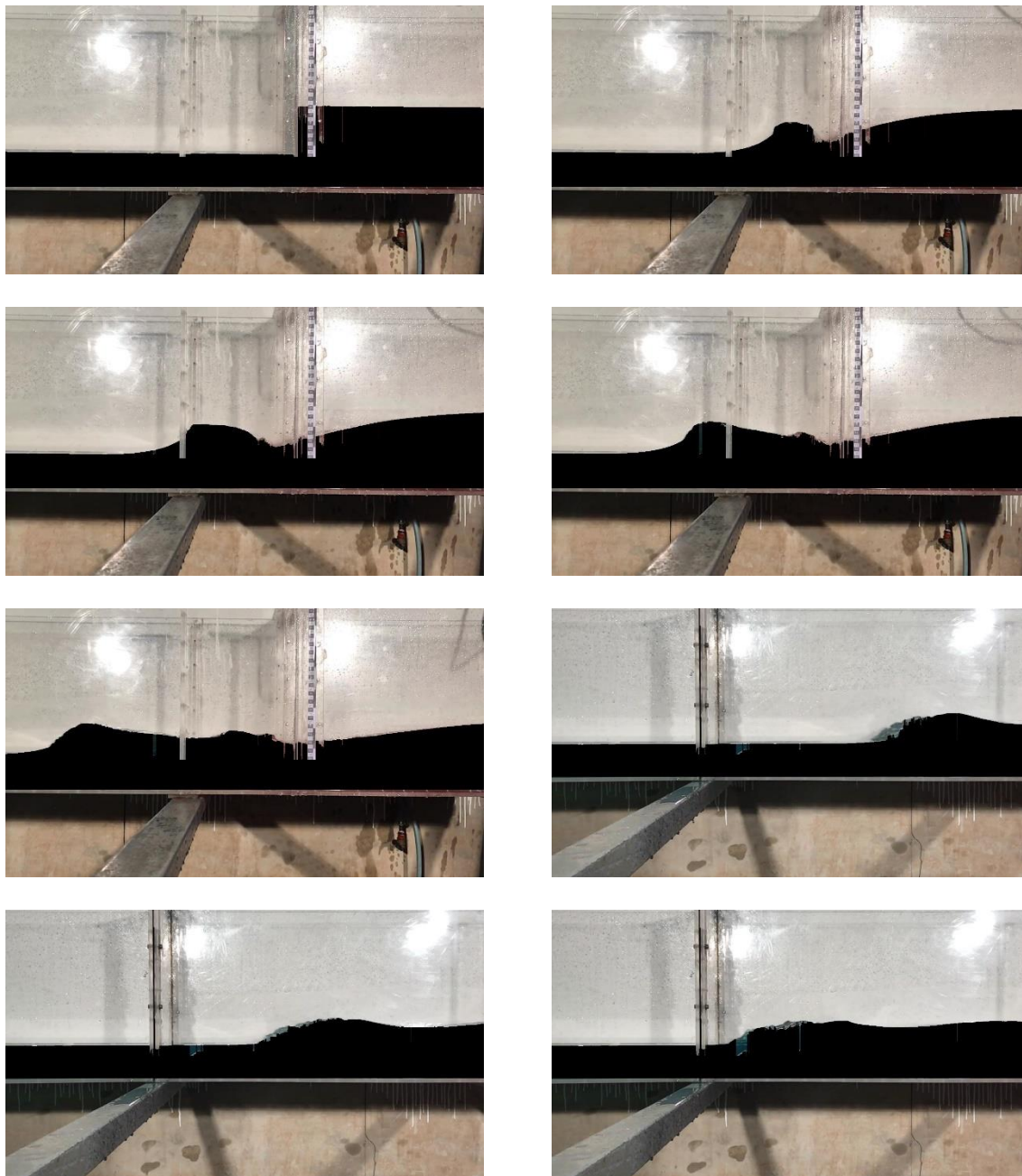
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 101 – Formato geométrico identificado pelo Matlab, M20-J4.



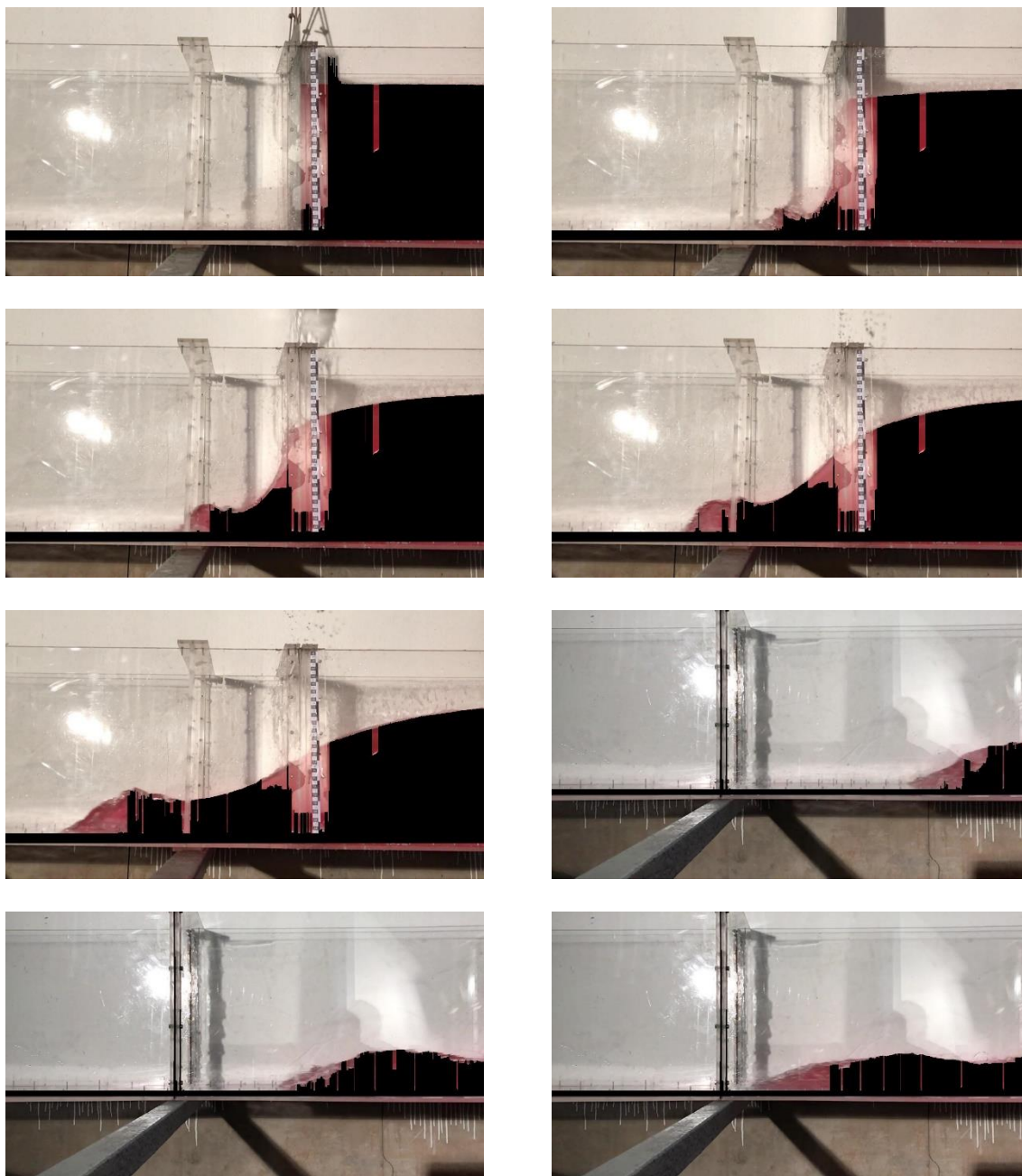
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 102 – Formato geométrico identificado pelo Matlab, M20-J8.



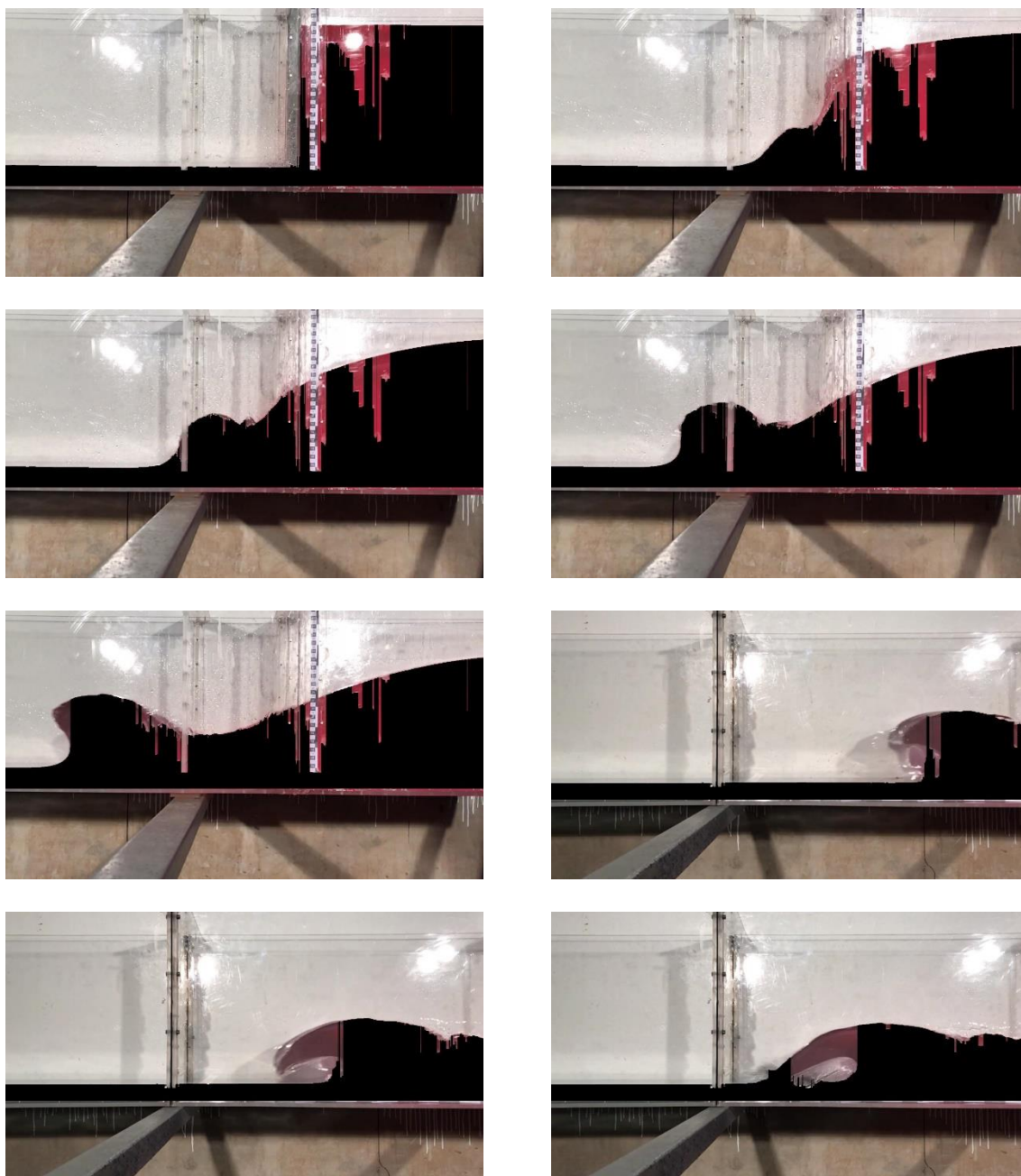
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 103 – Formato geométrico identificado pelo Matlab, M40-J0.



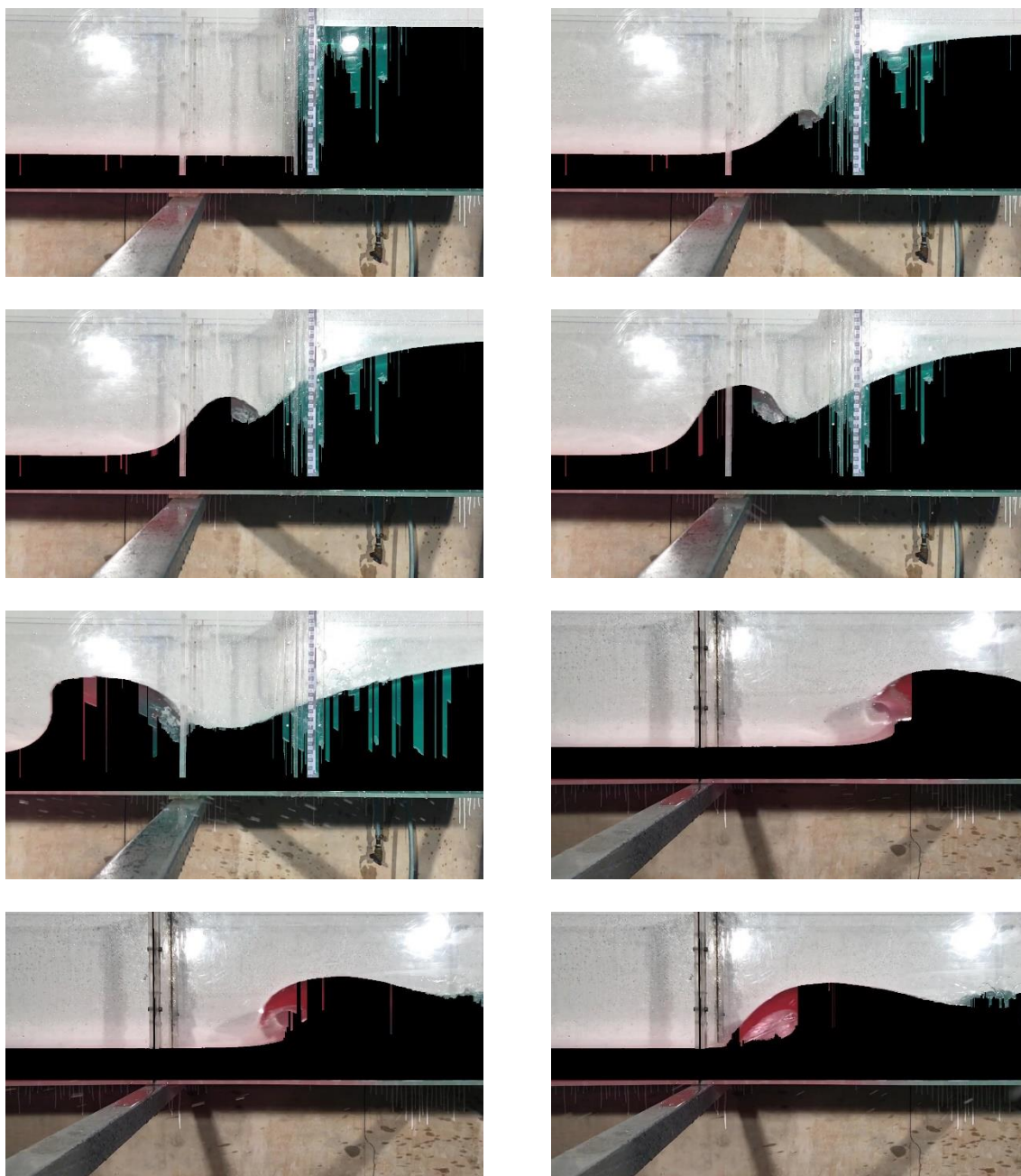
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 104 – Formato geométrico identificado pelo Matlab, M40-J4.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 105 – Formato geométrico identificado pelo Matlab, M40-J8.



Fonte: elaborado pelo autor.