

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Lélis Espartel

**ANÁLISE DE FENÔMENOS HIDRÁULICOS:
EMPREGO DE CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE**

Porto Alegre
julho 2015

LÉLIS ESPARTEL

**ANÁLISE DE FENÔMENOS HIDRÁULICOS:
EMPREGO DE CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Rafael Manica
Coorientadora: Patricia Buffon

Porto Alegre
julho 2015

LÉLIS ESPARTEL

**ANÁLISE DE FENÔMENOS HIDRÁULICOS:
EMPREGO DE CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE**

Porto Alegre, julho de 2015

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Rafael Manica
Dr. em Recursos Hídricos e Saneamento
Ambiental pela UFRGS
Orientador

Eng. Patricia Buffon
Eng. Ambiental pela UFRGS
Coorientadora

Prof. Jean Marie Désir
UFRGS
Coordenador

Profa. Carin Maria Schmitt
Dra. pelo PPGA/UFRGS
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Luiz Augusto Magalhães Endres
(UFRGS)
Dr. em Engenharia Mecânica pela UFRGS

Prof. Eder Daniel Teixeira
(UFRGS)
Dr. em Recursos Hídricos e Saneamento
Ambiental pela UFRGS

Prof. Rafael Manica
(UFRGS)
Dr. em Recursos Hídricos e Saneamento
Ambiental pela UFRGS

Eng. Patricia Buffon
(UFRGS)
Eng. Ambiental pela UFRGS

Dedico este trabalho a todas as pessoas que já me ensinaram e que ainda irão me ensinar.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar ao meu orientador Rafael Manica, um amigo que fiz ao longo dessa faculdade e que trouxe a ideia de tratar a respeito deste importante assunto: rompimento de barragem.

Agradeço a minha coorientadora Patricia Buffon que tratou este trabalho como se dela fosse desde o primeiro *take* de filmagem. Todos os ensinamentos e manuseios da valiosa câmera de alta velocidade foram de fundamental importância para a existência deste TCC.

Agradeço ao Cristian Schenk a toda equipe do Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade (Necod) pelos aprendizados diários durante a montagem do modelo e realização dos ensaios no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH). Eles sempre deram suporte, foram solícitos e não posso esquecer de agradecer as doses de café.

Agradeço ao Leonardo Cirimbelli, amigo e colega que me auxiliou nos primeiros passos para a montagem do projeto de pesquisa, garantindo um estruturado ponto de partida para o restante do trabalho.

Meus pais e irmãos que são o suporte da minha vida e não me deixam cair nunca.

Se ele ousar dizer uma só palavra, é porque ele tem o
vocabulário bem limitado.

Roberto Bolaños

RESUMO

Na busca pela compreensão e entendimento de uma infinidade de fenômenos físicos, o primeiro enfoque se dá através da observação deste fenômeno. Após, busca-se uma forma de registrar as informações obtidas através dessa observação. A visualização de escoamentos é uma técnica utilizada desde os primórdios da Engenharia e, com o passar dos anos, entram na pauta dos estudos técnicos fenômenos cada vez mais complexos, que exigem uma grande quantidade de dados para permitir estudos conclusivos. Neste viés, o presente trabalho se propõe a avaliar a eficiência e eficácia da câmera de vídeo de alta velocidade como ferramenta de análise do fenômeno hidráulico que ocorre instantaneamente após a ruptura de uma barragem hipotética. Esta abordagem se dá através de dois tipos de filmagens do fenômeno, uma utilizando câmera de alta velocidade (capta uma alta taxa de quadros por segundo, em torno de 500 a 1200) e outra com uma câmera comum, que capta 24 quadros por segundo. Assim, é desenvolvida uma metodologia de filmagem e através das imagens geradas é possível definir parâmetros geométricos e cinemáticos da onda de ruptura. Esses parâmetros são comparados entre si.

A ruptura da barragem é feita através de um modelo de uma barragem hipotética. Em um canal de pequeno porte, com 4,0 x 0,12 x 0,40 metros e inclinação de 1,2°, foi instalada uma placa de acrílico, a uma distância de 2,46 metros do início do canal. Essa placa replica o barramento de um curso de água e quando retirada abruptamente simula o rompimento instantâneo de uma barragem. Ao todo foram registrados experimentos com 6 diferentes configurações, onde houve uma variação do nível de água a montante (5 a 30 cm) e a jusante (0 a 5 cm), gerando 21 cenários de simulação. Os vídeos foram registrados em formato digital e depois tratados com *softwares* de computador. Os resultados apresentaram que em menos de dois décimos de segundo foi formada uma onda em formato de cunha que avança com velocidade que varia de acordo com a altura do nível da água no barramento, na ordem de 1 metro por segundo.

Apenas as imagens providas da câmera de alta velocidade permitiram a avaliação do tempo dispendido na retirada da placa, identificação do ponto de estabilização da onda, identificação da evolução das formas iniciais da onda (logo após a ruptura) e avaliação da velocidade instantânea de propagação. Por fim, é possível concluir que este evento é muito veloz para ser compreendido apenas pela visão humana, e nesse ponto é onde se destaca a utilização da câmera de alta velocidade como suporte de análise para o fenômeno hidráulico em questão.

Palavras-chave: Visualização de Fenômeno Hidráulico. Câmera de Alta Velocidade.
Ruptura Instantânea de Barragem.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esboços de Fenômenos Hidráulicos desenhados por Leonardo da Vinci.....	14
Figura 2 – Sequência de fotos, por Eadweard Muybridge em 1887.....	15
Figura 3 – Diagrama das etapas do trabalho	18
Figura 4 – Representação esquemática de uma câmera fotográfica.....	26
Figura 5 – A abertura do diafragma é medida em um valor chamado "f". Quanto menor o valor f, mais aberto estará o diafragma	27
Figura 6 – Imagem comparativa entre um diafragma fechado (esquerda) e um diafragma aberto (direita)	27
Figura 7 – Imagem comparativa com diferentes velocidades de abertura do obturador: quanto menor o tempo de abertura, maior a velocidade (indicado na figura em fração de segundos).....	28
Figura 8 – Impacto da ruptura da barragem de Taum Sauk no Missouri, Estados Unidos, em 2005	31
Figura 9 – Definição do arranjo para análise da ruptura, com fundo fixo.....	33
Figura 10 – Croqui das condições iniciais, considerando um suporte móvel no fundo do modelo.....	34
Figura 11 – Arranjo de filmagem utilizado por Hsu	35
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.....	37
Figura 13 – Comparação entre a frente de onda obtida através de imagens feitas em laboratório (linhas pretas contínuas) e dados medidos (quadrados azuis)	42
Figura 14 – Imagens registradas do modelo físico, com o tempo após a ruptura expostos em segundos abaixo de cada quadro.	43
Figura 15 – Comparação entre os dados obtidos através de imagens do laboratório (linha com pontos) e utilizando a equação de águas rasas (linha contínua)	44
Figura 16 – Desenho esquemático do canal	45
Figura 17 – Croqui do posicionamento da câmera em relação ao canal	48
Figura 18 – Síntese das filmagens	50
Figura 19 – Características geométricas da onda	53
Figura 20 – Avaliação da Instantaneidade do movimento	56
Figura 21 – Análise de qual NA, no ponto de ruptura da barragem, se mantém constante após estabilização da onda.....	58
Figura 22 – Análise da distância percorrida pela onda até a retirada completa da placa e até a estabilização da altura da onda em $4H_{dam}/9$, no ponto de ruptura.	58
Figura 23 – Detalhamento da evolução dos primeiros 17 centímetros da onda de ruptura da barragem, com nível a montante de 10 centímetros.....	59

Figura 24 – Detalhamento da evolução dos primeiros 17 centímetros da onda de ruptura da barragem, com nível a montante de 15 centímetros.....	60
Figura 25 – Detalhamento da evolução dos primeiros 17 centímetros da onda de ruptura da barragem, com nível a montante de 20 centímetros.....	60
Figura 26 – Velocidades Instantâneas para o nível de água da barragem de 10 cm.	62
Figura 27 – Velocidades Instantâneas para o nível de água da barragem de 15 cm.	62
Figura 28 – Velocidades Instantâneas para o nível de água da barragem de 20 cm.	63
Figura 29 – Velocidades Médias para o nível de água da barragem de 10 cm.	63
Figura 30 – Velocidades Médias para o nível de água da barragem de 15 cm.	64
Figura 31 – Velocidades Médias para o nível de água da barragem de 20 cm.	64
Figura 32 – Gráfico entre a Velocidade Média quando a onda atinge comprimento de 17 cm por nível de água no barramento.	65
Figura 33 – Resultados obtidos através da análise da ruptura da barragem de 10 cm, comprimento da onda por tempo.....	66
Figura 34 – Resultados obtidos através da análise da ruptura da barragem de 10 cm, espessura da onda por tempo.	66
Figura 35 – Resultados obtidos através da análise da ruptura da barragem de 10 cm, velocidade média da onda por tempo.	66
Figura 36 – Resultados obtidos através da análise da ruptura da barragem de 15 cm, comprimento da onda por tempo.....	67
Figura 37 – Resultados obtidos através da análise da ruptura da barragem de 15 cm, espessura da onda por tempo.	68
Figura 38 – Resultados obtidos através da análise da ruptura da barragem de 15 cm, velocidade média da onda por tempo.	68
Figura 39 – Resultados obtidos através da análise da ruptura da barragem de 20 cm, comprimento da onda por tempo.....	69
Figura 40 – Resultados obtidos através da análise da ruptura da barragem de 20 cm, espessura da onda por tempo.	69
Figura 41 – Resultados obtidos através da análise da ruptura da barragem de 20 cm, velocidade média da onda por tempo.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais técnicas de visualização de escoamentos.....	23
Tabela 2 – Especificações da câmera Fastec HiSpec 2 Color	46
Tabela 3 – Características de cada enquadramento	49
Tabela 4 – Plano de ensaios realizados	52
Tabela 5 – Ensaios escolhidos para análise detalhada.....	54
Tabela 6 – Quantidade de quadros disponível para analisar a onda de ruptura da barragem..	55
Tabela 7 – Resultados obtidos através da aplicação da Equação de Hunt para uma altura de barramento de 10 cm	77
Tabela 8 – Resultados obtidos através da aplicação da Equação de Hunt para uma altura de barramento de 15 cm	78
Tabela 9 – Resultados obtidos através da aplicação da Equação de Hunt para uma altura de barramento de 20 cm	79

LISTA DE SIGLAS

CCD – Charge-Coupled Device

CMOS – Complementary Metal-Oxide-Semiconductor

IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas

NA – Nível de Água

Necod – Núcleo de Estudos de Corrente de Densidade

PAE – Planos de Ação de Emergência

PNSB – Plano Nacional de Segurança de Barragem

SNISB – Sistema Nacional de Informações de Segurança de Barragem

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

∂ – derivada parcial

∇ – operador nabla

∇^2 – operador laplaciano

cm – unidade de comprimento centímetro

d_s – espessura da frente de onda de ruptura

ε – rugosidade

f – valor de abertura do diafragma de uma câmera fotográfica

f_D – fator de perda de carga de Darcy

g – aceleração da gravidade

H_{dam} – altura do reservatório

H_{ruptura} – altura da lâmina da água no ponto onde ocorre a ruptura da barragem

L – comprimento do reservatório

m – unidade de comprimento metro

p – pressão hidrostática

R_H – raio hidráulico

S_0 – inclinação do canal

S_f – inclinação da linha da água

t – tempo

U – velocidade da frente de onda

V_H – velocidade de equilíbrio uniforme

x_s – comprimento da frente de onda

μ – unidade de comprimento micrometro

ρ – massa específica da água

ϕ – potencial de velocidade

\Re – número de Reynolds

SUMÁRIO

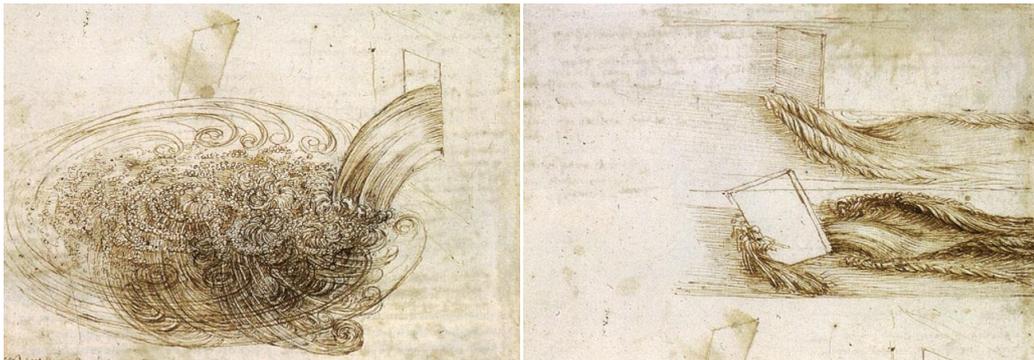
1 INTRODUÇÃO	14
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	16
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	16
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	16
2.2.1 Objetivo principal	16
2.2.2 Objetivos secundários	16
2.3 HIPÓTESE	17
2.4 PRESSUPOSTO	17
2.5 PREMISSA.....	17
2.6 DELIMITAÇÕES.....	17
2.7 LIMITAÇÕES	17
2.8 DELINEAMENTO.....	18
3 VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS	20
3.1 CÂMERAS FILMADORAS	24
3.1.1 Lentes ou Objetiva	26
3.1.2 Diafragma	26
3.1.3 Sensor Eletrônico	27
3.1.4 Velocidade do Obturador e Tempo de Exposição	27
3.1.5 Câmera de Alta Velocidade	28
3.2 VISUALIZAÇÃO DE FENÔMENOS HIDRÁULICOS	29
3.2.1 Escolha do Fenômeno Hidráulico	29
3.2.2 Modelo Físico em Laboratório	33
3.2.2.1 Concepção da Geometria do Modelo	33
3.2.2.2 Arranjo do Experimento	35
3.2.2.3 Embasamento teórico	35
3.2.2.4 Resultados Existentes	41
4 APARATO EXPERIMENTAL	45
4.1 MODELO DE RUPTURA DA BARRAGEM.....	45
4.2 CÂMERAS UTILIZADAS	45
4.2.1 Câmera de Alta Velocidade	46
4.2.2 Câmera Digital	47
5 METODOLOGIA	48
5.1 ENQUADRAMENTO DE FILMAGEM.....	48

5.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	51
5.3 PLANO DE ENSAIOS REALIZADOS	51
5.4 DADOS OBTIDOS	53
6 RESULTADOS	54
6.1 ESCOLHA DOS ENSAIOS PARA ANÁLISE DETALHADA	54
6.2 ANÁLISE QUALITATIVA DO FENÔMENO HIDRÁULICO – RUPTURA DE BARRAGEM.....	55
6.3 AVALIAÇÃO DO TEMPO DE ABERTURA DA PLACA VERTICAL	56
6.4 ANÁLISE DA GEOMETRIA DA PROPAGAÇÃO DA ONDA DE RUPTURA	59
6.5 ANÁLISE DAS VELOCIDADES DA ONDA DE RUPTURA.....	61
6.6 COMPARAÇÃO COM EQUAÇÃO ANALÍTICA	65
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
8 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	73
REFERÊNCIAS	74
APÊNDICES	77

1 INTRODUÇÃO

A visualização de escoamento é uma técnica utilizada desde os primórdios da Engenharia. Ainda no século XV, Leonardo da Vinci esboçou desenhos da incidência de um jato em uma superfície livre e a passagem de um escoamento por placas retangulares (Figura 1), possivelmente baseados na sua própria observação destes fenômenos. Também através da visualização, entre os séculos XIX e XX, Reynolds fez reconhecidos avanços sobre a transição laminar-turbulenta de escoamento em dutos e Prandtl sobre escoamento em regiões próximas a paredes (ABRANTES et al., 2012).

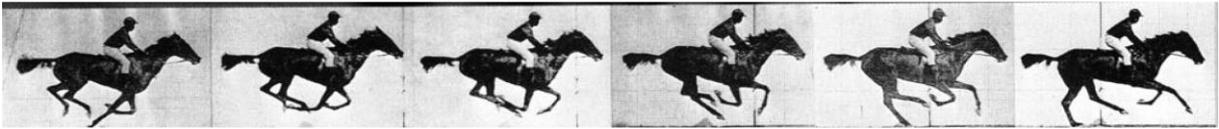
Figura 1 – Esboços de Fenômenos Hidráulicos desenhados por Leonardo da Vinci



(fonte: MANSUR; VIEIRA, 2004)

Desta época até os dias de hoje, a evolução nos meios de visualização e registros de imagem evoluiu e o primeiro passo se deu no sequenciamento de câmeras utilizado por Muybridge, em meados de 1880, para fotografar cavalos em movimento (BALCH, 1999). O resultado é apresentado na Figura 2. Um tempo depois houve a difusão das câmeras com o uso de filme, que precisava ser revelado para visualização das fotos, e, por fim, chega-se às atuais câmeras digitais, convencional e de alta velocidade, cuja gama de campos de aplicação abrange testes de impacto, explosões, balística, resposta do corpo humano, análise de fluidos, etc.

Figura 2 – Sequência de fotos, por Eadweard Muybridge em 1887



(fonte: BALCH, 1999)

O presente trabalho se propõe a fazer a análise de um fenômeno hidráulico utilizando uma câmera de alta velocidade, com a capacidade de registrar até 1200 quadros por segundo, o que resulta num elevado nível de detalhamento destes fenômenos. Aliado a isto, serão realizadas análises convencionais, com o objetivo de fazer um comparativo dos métodos e assim avaliar a eficácia e eficiência das filmagens com esse tipo de equipamento como forma de visualização de fenômenos hidráulicos.

O objeto de estudo é a frente de onda oriunda da ruptura de uma barragem, a qual será observada através de um modelo físico, em escala reduzida. O risco de uma barragem entrar em colapso nunca pode ser ignorado, mesmo que o projeto venha de um estudo minucioso e sua execução tenha sido exemplar. Como causas principais de falhas de barragens, se pode elencar (MARCHE¹, 2008 apud ANCEY, 2014):

- a) falta de capacidade dos vertedouros;
- b) devido à problemas de fundação;
- c) percolação pelo maciço.

Desastres históricos como o rompimento, ocorrido em 1889, da Barragem de *South Fork* do Rio *Little Conemaugh*, localizado no estado da *Pennsylvania*, Estados Unidos, causa da morte de 2209 pessoas, são reproduzidos até hoje, porém, devido a avanços técnicos, não mais com essa escala de magnitude. Mas, ainda em 2014, houve o rompimento de uma barragem de rejeitos da Herculano Mineração, em Itabirito, região central de Minas Gerais, o resultado foi a morte de pelo menos dois funcionários e um total de oito feridos (MOTA; MENEZES, 2014).

Une-se, assim, a proposta de avaliar o desempenho da câmera como uma ferramenta de análise de fenômenos hidráulicos, aliada a um objeto de estudo que carece de um aprofundamento em termos de pesquisa e conhecimento.

¹ Marche, C. 2008 **Barrages, crues de rupture et protection civile**. Montréal: Presses internationales polytechniques.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: é eficaz e eficiente a utilização de uma câmera de alta velocidade como ferramenta para análise do rompimento de uma barragem hipotética?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

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

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é a verificação da eficácia e eficiência da utilização de uma câmera de alta velocidade como ferramenta para identificação e avaliação de fenômenos hidráulicos que compõe o processo da formação e propagação da frente de onda oriunda da ruptura de uma barragem hipotética.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) desenvolvimento de uma metodologia, em modelo reduzido, de visualização de fenômenos hidráulicos oriundos da ruptura de uma barragem, utilizando câmera de alta velocidade;
- b) registro em mídia de fenômenos hidráulicos que regem a frente de onda oriunda da ruptura de uma barragem, resultando na criação de um acervo digital.
- c) identificação de elementos geométricos e cinemáticos característicos desse fenômeno hidráulico.

2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que a utilização da câmera de alta velocidade com o objetivo de avaliar os fenômenos hidráulicos que compõe o processo da formação e propagação da frente de onda advinda da ruptura de uma barragem hipotética é, sim, uma ferramenta eficaz e eficiente no âmbito de análise de fenômenos hidráulicos.

2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que:

- a) o modelo de ruptura de barragem idealizado por Stansby et al. (1998) representa de forma adequada o pior cenário do rompimento de uma barragem hipotética;
- b) o efeito da viscosidade junto à parede é considerado insignificante;
- c) os efeitos hidráulicos que ocorrem mais a jusante da barragem (zona de dispersão do canal utilizado) é considerado insignificante na formação dessa onda a montante.

2.5 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que o fenômeno a ser estudado é muito rápido e sua observação apenas pelo olho humano é insuficiente para compreendê-lo por completo, sendo, portanto, essencial a busca de tecnologia que auxilie este processo.

2.6 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a análise da ruptura instantânea da barragem por câmera de alta velocidade em comparação com câmera digital com taxa usual de captura de quadros – 24 quadros por segundo.

2.7 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) a barragem hipotética será representada por uma placa plana vertical;
- b) o fluido utilizado nos experimentos será exclusivamente água limpa e sobre um fundo fixo;

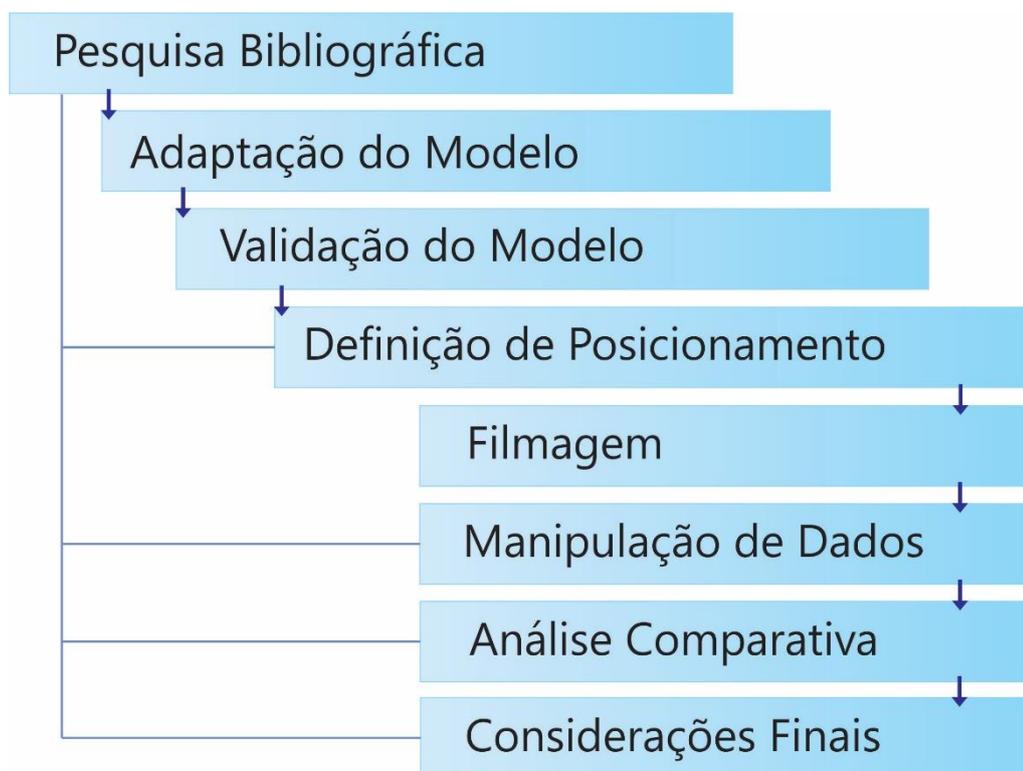
c) utilização da câmera *FASTEC HISPEC 2 COLOR* e *NIKON D5000*.

2.8 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir que estão representadas na Figura 3 e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) adaptação do modelo em escala reduzida;
- c) validação do modelo;
- d) definição do posicionamento dos aparatos de filmagem;
- d) filmagem da ruptura da barragem;
- e) manipulação dos dados;
- f) análise comparativa;
- g) considerações finais.

Figura 3 – Diagrama das etapas do trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

A pesquisa bibliográfica serviu como um lastro que sustenta as hipóteses levantadas ao longo de todo o trabalho. A literatura existente sobre o assunto norteou a concepção do modelo, os

métodos de visualização através da câmera de alta velocidade, além das formas de medição utilizando a câmera e equações analíticas que retornassem os dados de interesse.

Após a pesquisa bibliográfica, a primeira atividade foi a adaptação de um modelo em escala reduzida de uma barragem hipotética. Adaptou-se um canal bidimensional de vidro já existente no Necod (Núcleo de Estudos de Corrente de Densidade) do IPH/UFRGS, no qual foi acoplada uma placa de acrílico que simula a barragem propriamente dita. Considerou-se que a retirada abrupta desta placa configura o rompimento instantâneo da barragem. Após a adaptação do modelo, uma série de ensaios-teste foram realizados para verificar se a resposta do modelo físico estava acontecendo conforme o esperado e, caso não, corrigi-lo quando necessário.

Houve outra atividade que ocorreu concomitante com os ensaios-testes, relativa à câmera de alta velocidade. Ela produziu vídeos dos ensaios-teste supracitados, com o propósito de averiguar questões como iluminação, contraste dos traçadores com o fluido, abertura do obturador, tempo de exposição e quantidade de quadros por segundo necessárias para o nível de detalhamento desejado, de forma a padronizar todos os ensaios seguintes.

Assim que tanto o modelo quanto a câmera estavam ajustados, foram realizadas as filmagens da ruptura da barragem hipotética, com câmera de alta velocidade e de velocidade usual. Após possuir os dados em mídia virtual, uma análise comparativa foi realizada, confrontando os dados obtidos entre eles e com os valores oriundos de soluções analíticas. Desta forma, pode-se avaliar o desempenho da câmera de alta velocidade como uma ferramenta de análise de fenômenos hidráulicos.

Ao final de todas as etapas, foi possível concluir se o montante de trabalho e tempo empregado para obter esses resultados, em um determinado nível de detalhamento, qualidade e confiança, tornou o uso da câmera de alta velocidade um meio eficaz e/ou eficiente de análise de fenômenos hidráulicos.

3 VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS

O assunto de visualização de escoamento é introduzido por Mansur e Vieira (2004), eles apontam o sentido da visão como um importante instrumento de análise. Nesse sentido, os autores destacam que o sucesso de um trabalho científico depende de um variado leque de 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 a ferramenta de análise escolhida;
- c) interpretação consistente destes resultados, dentro de um determinado contexto.

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

Os autores, ainda, apontam que existe uma ferramenta inerente ao corpo humano capaz de processar um enorme conjunto de informações num pequeno intervalo de tempo: o sentido da visão. O sistema de captação de imagem pela íris, formação na retina e envio da informação via rede neural ao cérebro constitui um instrumento extremamente eficiente de diagnóstico e análise. Uma única imagem pode condensar milhões de dados, facilitando sobremaneira a compreensão de eventos físicos, químicos e biológicos. Em vista disto, aliado ao avanço tecnológico que permite imagens cada vez mais bem definidas e detalhadas, o uso científico de tratamento de imagens tem se proliferado de forma espantosa, tornando-se corriqueiro em muitos ramos das ciências (MANSUR; VIEIRA, 2004).

Enquanto Abrantes et al. (2012) recordam que a visualização de escoamento não é uma novidade e sim uma técnica já utilizada por diversos expoentes da engenharia desde o seu desenvolvimento, os primeiros passos envolvendo registro de escoamentos podem ser vistos nos desenhos do polímata italiano Leonardo da Vinci. Neles, são apresentados os estudos

sistemáticos em mecânica dos fluidos utilizando a visualização de escoamentos com as técnicas de registro disponíveis à época.

Outros experimentos clássicos da contribuição da visualização de escoamentos para o entendimento e avanço da dinâmica de fluidos foram realizados por Reynolds e por Prandtl por exemplo. Através de técnicas que implementaram traçadores/corantes em um escoamento, Reynolds fez considerações sobre a transição do regime de escoamento laminar para turbulento. Suas ideias são aplicadas até os dias atuais, em problemas corriqueiros da engenharia, tais como: dimensionamento de condutos ou asas de avião. Prandtl realizou estudos sobre escoamento em regiões próximas a paredes e assim desenvolveu o conceito de camada limite, lugar no qual o escoamento de um fluido pode ser dividido em duas áreas: uma mais próxima da parede, dominada pela viscosidade; e outra, mais distante, na qual a viscosidade pode ser desprezada sem efeitos significativos na solução (ABRANTES et al., 2012). Tais conceitos são aplicados, inclusive, no presente trabalho.

Em um estudo datado no fim da década de 60, quando as técnicas de visualização eram precárias se comparadas as que existem hoje em dia, Stephen Kline demonstra que seu entendimento da importância da visualização vai ao encontro com o pensamento dos estudiosos atuais.

Fluidos em movimentos podem formar padrões complexos que não conseguem ser compreendidos empiricamente. Nesses casos, a intuição falha quando é tentado imaginá-los. Existem tantos detalhes em determinados fluxos que eles acabam sendo omitidos quando se analisa unicamente as equações que os governam. No entanto, imagens visuais, fotos e vídeos destes fluxos podem nos mostrar o real padrão de escoamento com a inclusão de toda a abundância de detalhes que o escoamento possui (KLINE, 1969). Nesse sentido, Guillermo et al. (2014) destaca que as câmeras de vídeo comuns têm como característica registrar imagens a 30 quadros por segundo, e aliada à capacidade de registro de imagem pelo olho humano, promove o efeito de movimento, ao passar essas imagens quadro-a-quadro em ordem cronológica linear.

Kline (1969) ainda expõe que grandezas, tais como: velocidade, frequência, densidade, entre outras, podem ser medidas através da visualização de escoamento, por exemplo, em vídeos, e justifica a utilização desta técnica para determinar a natureza geral de um escoamento, comparando com o conhecimento do movimento do fluido através de uma equação teórica.

Balch (1999) atesta que o vídeo deu aos pesquisadores e engenheiros, uma nova ferramenta à gravação de objetos que se movem rápido, aleatórios na natureza, de grande tamanho ou velocidade. As aplicações mais comumente utilizadas são:

- a) solução de problemas em linha de produção;
- b) diagnóstico de máquinas, testes destrutivos;
- c) montagem automatizada;
- d) embalagem;
- e) fabricação e conversão de papel;
- f) testes de impacto, de choque e de queda;
- g) combustão;
- h) balística;
- i) aerodinâmica;
- j) visualização de fluxo;
- k) desempenho humano.

Um escoamento real, possivelmente, irá transpor singularidades, como pequenas mudanças de geometria ou outras condições de fronteira. No entanto, acontece que vários destes fluxos são sensíveis a mudanças dessas condições, ou seja, as pequenas alterações causadas pelas singularidades podem causar uma significativa mudança no padrão de um escoamento. Como exemplo, um leve incremento da rugosidade em uma superfície pode fazer um escoamento mudar seu regime, passando de laminar para turbulento. Esta sensibilidade a pequenas mudanças significa que a equação teórica (munida de todas as informações necessárias que afetam este escoamento) consegue resolver dentro de uma visão macro do sistema, sem precisão suficiente para prever as alterações no padrão de escoamento. (KLINE, 1969).

Unindo as tabelas apresentadas por Mansur e Vieira (2004) e Kline (1969), se apresenta a tabela 1, que contém as principais técnicas de visualização, qual o fluido indicado para a aplicação desta técnica e suas limitações.

Tabela 1 – Principais técnicas de visualização de escoamentos

Metodologia de visualização	Agente	Técnica	Meio	Medição	Limitação
Por traçadores na superfície sólida	Mecânicos	Filmes de óleo	Gasoso, Líquido	Deslocamento; qualitativo	Escoamentos de baixa velocidade
		Gotas de óleo	Gasoso, Líquido		
		Injeção de corantes líquidos	Gasoso, Líquido		
		Injeção de fumaça	Gasoso		
		Tufos de superfície	Gasoso, Líquido		
	Físicos	Sublimação	Gasoso		
		Evaporação	Gasoso		
		Filmes solúveis	Líquido		
		Cristais líquidos	Gasoso, Líquido		
		Filmes sensíveis à temperatura	Gasoso, Líquido		
	Químicos	Filmes sensíveis à pressão	Gasoso, Líquido		
		Corrosão eletrolítica	Líquido		
		Reação química superficial	Líquido		
		Coloração superficial	Líquido		
Por traçadores no interior do escoamento	Mecânicos	Grade de tufos	Gasoso, Líquido	Direção da velocidade; transição; separação; reacoplação	Sem limitação básica
		Sonda de tufos	Gasoso, Líquido		
	Injeção direta	Partículas sólidas	Gasoso, Líquido		
		Corantes líquidos	Líquido		
		Fumaças, vapores e névoas	Gasoso	Direção da velocidade; transição; separação; reacoplação	Sem limitação básica
		Reagentes químicos	Líquido		
	Bolhas de hidrogênio	Líquido	Deslocamento; quantitativo	Limitado a líquidos eletrolíticos	
	Elétricos	Faiscamento	Gasoso		
	Globais	Partículas em suspensão	Gasoso, Líquido		
	Por meios óticos		Shadowgrafia	Gasoso, Líquido	$\partial^2\rho/\partial x^2$; quantitativo
		Schlieren	Gasoso, Líquido	$\partial\rho/\partial x$; quantitativo	
		Interferometria	Gasoso, Líquido	ρ ; quantitativo	
		Holografia a laser	Gasoso, Líquido		
		Absorção de emissões	Gasoso, Líquido		
		Método de Moiré	Líquido		
		Estereofotografia	Líquido		
		Birefringência	Líquido	Stress cisalhante; qualitativo	Baixa velocidade, soluções especiais apenas
		Termografia	Gasoso, Líquido		

(fonte: adaptado de MANSUR; VIEIRA, 2004; KLINE, 1969)

Dentre as técnicas expostas na tabela 1, existem três que merecem evidência por serem os pilares da análise do escoamento, nesta pesquisa. Mansur e Vieira (2004) traçam as seguintes características destas técnicas: traçadores, *shadowgrafia* e tomografia.

Traçadores são perfeitamente adequados para aplicação em meio líquido ou gasoso, a injeção direta de traçadores alia baixo custo e relativa facilidade de implementação. O processo de injeção pode ser efetuado por intermédio de orifícios confeccionados na própria superfície de um modelo de ensaio ou, ainda, com o auxílio de uma ou mais agulhas posicionadas no interior do escoamento. A injeção do filete de corante deve ocorrer de forma a introduzir a menor perturbação possível no escoamento. Embora existam alguns produtos fabricados especialmente para a visualização de escoamentos em meio líquido, os traçadores mais frequentemente empregados são os corantes alimentícios e os corantes para pinturas solúveis em água e o nanquim.

A técnica *shadowgrafia*, que utiliza a variação do índice de refração do meio para revelar discontinuidades em meios transparentes como o meio líquido. No estudo de problemas envolvendo superfícies livres, se pode, inclusive, estabelecer uma analogia entre as ondas de gravidade e as ondas de choque. A *shadowgrafia* pode ser empregada na determinação da segunda derivada dos campos de concentração ou de densidade de escoamentos estratificados, e, em geral, é utilizada em associação com a presença traçadores no interior do escoamento.

A tomografia faz uso de algoritmos computacionais bastante complexos, a tomografia permite a reconstrução de uma imagem a partir da distribuição de propriedades físicas da matéria em diferentes planos paralelos entre si. As técnicas de visualização de escoamento por tomografia de ultrassom, raio X, raio gama, ultravioleta, rádio frequência e ressonância magnética nuclear podem ser utilizadas indiferentemente em meio líquido, em escoamentos multifásicos e em escoamentos estratificados, constituindo uma poderosa ferramenta para a análise do movimento de fluidos não transparentes, ou quando a região de interesse se localiza em zonas de difícil acesso ótico.

3.1 CÂMERAS FILMADORAS

Versluis (2012) comenta que imagens de câmera de alta velocidade têm sido a chave para uma série de descobertas nos mais variados âmbitos de pesquisa. O trabalho pioneiro foi feito por Muybridge, em 1887, que visava responder a seguinte pergunta acerca de corrida de cavalos:

existe um momento durante o galope, em que os quatro cascos do cavalo não estão em contato com o solo, de uma só vez? Para responder tal questão ele planejou um sistema que consistia em doze câmeras individuais programadas para capturar a foto milissegundos uma após a outra.

O autor ainda ressalta que no âmbito de fenômenos hidráulicos, os primeiros estudos foram realizados por Worthington², que trabalhou com *splashes* por toda sua carreira, em estudos de impactos sólidos e fluídos. Seus estudos se embasaram em fotos tiradas com uma iluminação por vela de ignição durante o tempo de três microssegundos. Guillermo et al. (2014) destaca 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 entender o funcionamento de uma câmera de alta velocidade, é necessário primeiro rever o básico acerca de como uma câmera normal trabalha, seja ela manual ou digital. Dentre essas duas, Balch (1999) aponta que as câmeras digitais oferecem vantagens como facilidade de uso, quando comparadas com câmeras analógicas. Duas vantagens devem ser ressaltadas: mídia de gravação reutilizável e capacidade de reprodução imediata. A tecnologia também oferece específicos custos-benefícios, já não são necessários produtos químicos ou filme para ser adquirido. A câmera digital de alta velocidade pode ser usada repetidamente, sem a preocupação do custo de mídia descartáveis.

Antes de começar qualquer estudo é necessário conhecer as ferramentas que estão disponíveis e que poderão ser utilizadas. Uma câmera fotográfica possui uma gama de peças com funções específicas e modos de utilização que exercem influência no resultado das fotos e filmagens. Villegas³ (2009 apud SANTOS, 2014, p. 3) dá uma sucinta explicação do funcionamento da câmera digital:

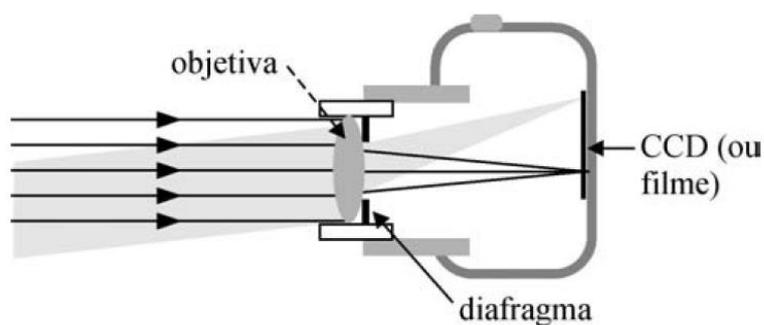
No processo digital, a luz passa pelas lentes, depois pelo diafragma, depois pelo obturador da câmera (estes últimos devidamente regulados pelo fotógrafo) e é captada por um sensor eletrônico. Após a exposição, os dados captados pelo sensor, passam pelo chip da câmera e se tornam um arquivo no cartão de memória, pronto para ser processado.

2 Conhecimentos específicos sobre Splash podem ser encontrados em: WORTHINGTON, A. M. **A study of splashes**. London: Green and Co., 1908.

3 VILLEGAS, A. **O controle da cor: gerenciamento de cores para fotógrafos**. Balneário Camboriú: Photos, 2009.

Uma explicação mais completa é dada por Ourique et al. (2010): um conjunto de lentes, também chamado de objetiva, que funcionam como uma única lente de qualidade elevada, produzem uma imagem real e invertida do objeto a ser fotografado. O controle da quantidade de luz que passa pela objetiva é realizado pelo diafragma, dispositivo que controla a abertura da lente. Essa luz incide sobre um dispositivo semiconductor (sensor), o qual, sob a ação da luz, produz um código binário a ser decodificado pela eletrônica da câmera e assim restituir a imagem em uma tela. A luz é processada durante um intervalo de tempo, em geral da ordem do centésimo de segundo, denominado velocidade do obturador ou tempo de exposição (OURIQUE et al., 2010). A Figura 4 mostra uma configuração esquemática desse funcionamento.

Figura 4 – Representação esquemática de uma câmera fotográfica



(fonte: OURIQUE et al., 2010)

3.1.1 Lentes ou Objetiva

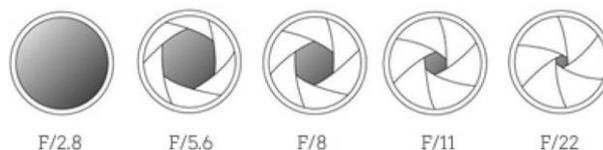
Responsável por focalizar a imagem o conjunto de lentes, chamado de objetiva, concentra os raios de luz na direção exata para formar a imagem nítida do objeto fotografado, sobre o sensor (NEVES; PEREIRA, 2007; OURIQUE et al., 2010).

3.1.2 Diafragma

Responsável pelo controle da quantidade de luz por tempo de exposição, fica localizado na lente e controla sua abertura. Formado por várias lâminas que vão se superpondo, é um mecanismo que define o diâmetro de uma abertura central até formar um determinado tamanho que restringe a entrada de luz no momento do disparo (Figura 5 e Figura 6). Se chegar pouca luz em um determinado intervalo de tempo, será absorvida pouca luz, formando uma imagem muito escura. Se chegar muita luz nesse mesmo intervalo de tempo, será absorvida muita luz,

formando uma imagem muito clara, podendo gerar o efeito de imagem “estourada”. Em suma, se busca uma imagem balanceada (OURIQUE et al., 2010; REGINA, 2013).

Figura 5 – A abertura do diafragma é medida em um valor chamado "f". Quanto menor o valor f, mais aberto estará o diafragma



(fonte: REGINA, 2013)

Figura 6 – Imagem comparativa entre um diafragma fechado (esquerda) e um diafragma aberto (direita)



(fonte: NEVES; PEREIRA, 2007)

3.1.3 Sensor Eletrônico

Na fotografia digital existe um dispositivo – sensor *CMOS*⁴ ou *CCD*⁵ – que é um componente eletrônico que converte a luz em um padrão de cargas elétricas que se traduzem em dados digitais binários que são decodificados pela eletrônica da câmera, fazendo a leitura dos padrões de luzes e restituindo a imagem em uma tela (OURIQUE et al., 2010; SANTOS, 2014).

3.1.4 Velocidade do Obturador e Tempo de Exposição

A luz é processada durante um intervalo de tempo chamado de velocidade do obturador ou tempo de exposição. Essa nomenclatura ambígua se dá pelo fato de que o obturador é um mecanismo que controla o tempo de exposição de um sensor digital à luz. Quanto maior a velocidade do obturador, menor o tempo de exposição. O obturador funciona como uma espécie

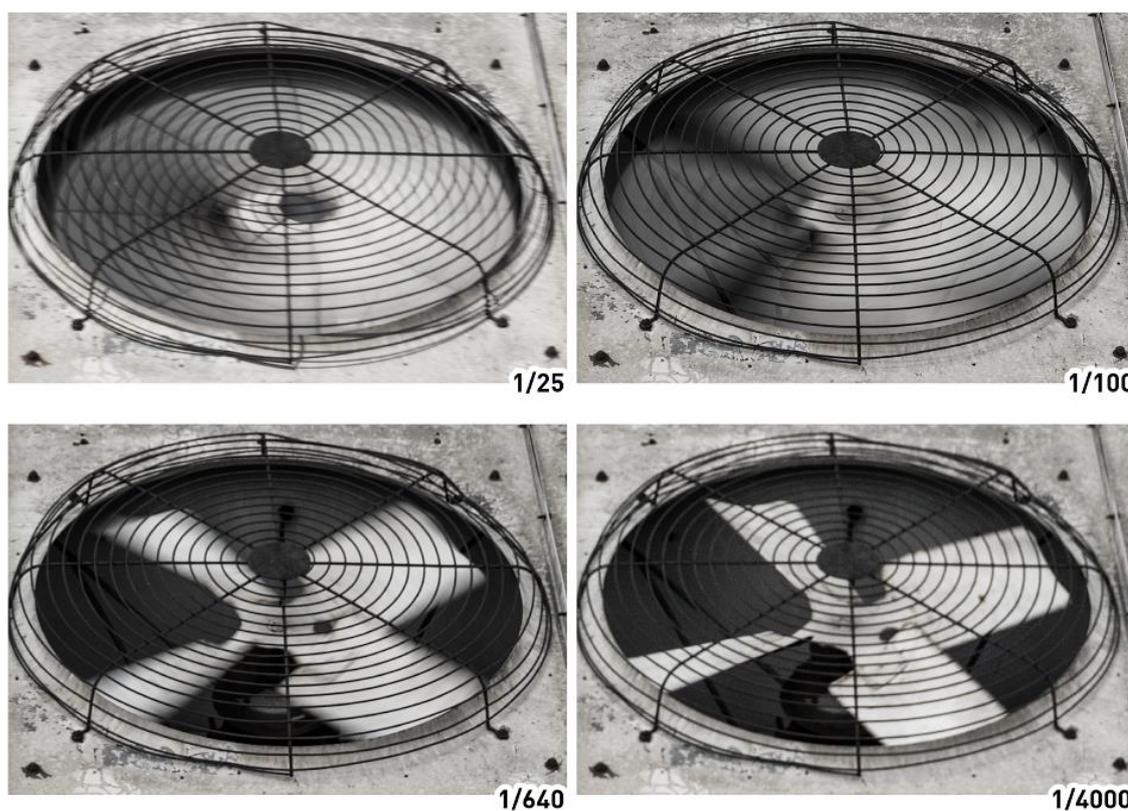
4 *CMOS* – *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*, em português: semicondutor metal-óxido complementar.

5 *CCD* – *Charge-Coupled Device*, em português: dispositivo de carga acoplada.

de cortina que permite que a luz passe por ela e chegue até o sensor digital (OURIQUE et al., 2010; REGINA, 2013).

A velocidade do obturador é geralmente da ordem de frações de segundo. Fotografias com o obturador aberto por mais tempo causam efeito de movimento, continuidade. Fotografias em que o obturador é aberto e fechado de forma extremamente rápida são as que conseguem captar a imagem detalhada, como se o tempo tivesse parado. Uma comparação de imagens é exposta na Figura 7. (OURIQUE et al., 2010; REGINA, 2013).

Figura 7 – Imagem comparativa com diferentes velocidades de abertura do obturador: quanto menor o tempo de abertura, maior a velocidade (indicado na figura em fração de segundos)



(fonte: DALBELLO, 2013)

3.1.5 Câmera de Alta Velocidade

Cooke (2005) aponta três tópicos como os principais fatores que envolvem a filmagem em alta velocidade: detecção, sincronização e registro de imagem e eles serão discutidos individualmente a seguir.

A detecção é importante porque os eventos a serem registrados são demasiadamente rápidos ou transitórios para o olho humano perceber, e muitas vezes ocorrem em intervalos no qual não é possível saber com antecedência quando deve ser acionado o disparo. Isso geralmente é feito usando sensores de som ou vibração, ou pela interrupção de um feixe de luz. No caso deste trabalho, era possível prever quando se daria o evento a ser filmado e assim o gatilho pôde ser disparado manualmente.

Uma vez detectada a imagem, haverá uma breve, mas inevitável demora antes da imagem pode ser gravada. Embora o tempo necessário para responder a um sensor ou um *flash* para disparar geralmente possa ser ignorado. Por isso a sincronização, medição precisa ou, pelo menos, controle do intervalo entre a detecção e o registro da imagem é essencial para uma filmagem de qualidade. Neste trabalho foi utilizada iluminação constante exterior ao aparato de filmagem.

Finalmente, a ação deve ser registrada. Há duas maneiras de fazer isso - ou uma velocidade do obturador muito rápida deve ser utilizada na câmara ou a ação deve ser congelada usando um breve pulso de luz. A utilização de um obturador requer uma poderosa fonte de luz que dure mais tempo do que o intervalo em que o obturador é aberto.

3.2 VISUALIZAÇÃO DE FENÔMENOS HIDRÁULICOS

Dentre os diversos tipos de aplicação das técnicas de visualização com câmera de alta velocidade, neste trabalho será focado nos fenômenos hidráulicos que compõem o processo da formação da frente de onda oriunda da ruptura de uma barragem.

3.2.1 Escolha do Fenômeno Hidráulico

A maioria dos estudos e pesquisas a respeito de uma barragem são focadas na sua segurança, ou seja, melhorias que garantam a sua estabilidade e evitem seu rompimento. Pouco se discute sobre o que fazer, se, de qualquer forma, ela vier a romper e uma onda de grande magnitude for gerada devido a essa ruptura, incidindo em tudo que estiver a jusante dessa barragem.

Atualmente, existem em torno de 45.000 barragens ao redor do mundo exercendo atividades como produção hidroelétrica, abastecimento de água e regulação de vazão de rios (ANCEY, 2014). Além destas, também é válido destacar o significativo número de barragens que servem como reservatório para a irrigação de lavouras agrícolas.

Com o avanço de técnicas de projeto e execução, o risco de colapso tem diminuído. Entretanto, a existência de uma enorme quantidade de barragens colabora para que o risco de que ao menos uma delas falhe seja significativo. O rompimento de uma única barragem é uma catástrofe que além de danos materiais, pode provocar a morte de centenas ou milhares de pessoas (ANCEY, 2014). Abaixo, são apresentados diversos rompimentos de barragem e suas consequências:

- a) barragem de Molare (Itália): em agosto de 1935, na borda sul dos Alpes italianos e a nordeste de Gênova, o rompimento dessa barragem foi ocasionado por uma chuva de 135 milímetros em um dia e causou a morte de aproximadamente 100 pessoas (ANCEY, 2014).
- b) Malpasset (França): em 2 de dezembro de 1959, a barragem do rio Reyran atingiu a vila de Fréjus causando a morte de 423 pessoas (ANCEY, 2014).
- c) Vajont (Itália): em 9 de outubro de 1963, as pequenas vilas Longarone, Pirago, Rivalta, Villanova e Faè foram atingidas, esta foi a barragem que mais causou mortes, totalizando 1909 vítimas (ANCEY, 2014).
- d) Usina Euclides da Cunha (Brasil): em 20 de janeiro de 1977, o rompimento da barragem da Usina Hidrelétrica de Euclides da Cunha produziu uma onda de cheia que rompeu outras três barragens localizada a jusante, paralisando quatro usinas hidrelétricas. Nove cidades foram afetadas por inundações, com milhares de pessoas desabrigadas (RIO PARDO..., 1977).

De acordo com Marche⁶ (2008 apud ANCEY, 2014), a análise de falhas de barragens em todo o mundo levam a diversas causas de projeto, tais como: capacidade insuficiente do seu vertedouro (representa 35% das rupturas documentadas); problemas de fundação (com 25% das rupturas documentadas); altura de uma barragem de concreto, com cerca de 0,6% de chances de romper as barragens com até 100 metros de altura, entre outros exemplos. A Figura 8 exemplifica o impacto do rompimento de uma barragem, através de uma imagem aérea. É possível observar na imagem da esquerda a barragem de Taum Sauk, dos Estados Unidos, em perfeito estado de funcionamento, enquanto que à direita se tem a imagem após seu rompimento. A onda de ruptura dizimou a uma parte da floresta, possivelmente reconfigurando o antigo caminho do córrego que foi barrado. Essa ruptura alagou o vilarejo a jusante.

⁶ Marche, C. 2008 **Barrages, crues de rupture et protection civile**. Montréal: Presses internationales polytechniques.

Figura 8 – Impacto da ruptura da barragem de Taum Sauk no Missouri, Estados Unidos, em 2005



(fonte: ANCEY, 2014)

O estudo do impacto da ruptura é importante para avaliar o risco de uma barragem. Existem duas situações independentes que devem ser levadas em consideração na avaliação do rompimento de uma barragem: as suas causas e suas consequências. Embora acidentes com barragens impliquem na liberação de grandes volumes de água para jusante, podendo causar grandes prejuízos, raramente o comportamento da onda de ruptura leva a uma correlação entre causas e efeitos consistente e que possa ser generalizada. Desta forma, o planejamento e a implantação de empreendimentos necessitam englobar também a análise de seus impactos em caso de acidentes, independentemente de suas causas, como fator inerente ao risco. Isto significa que, ainda durante o estudo de concepção destes empreendimentos, o cálculo do risco do empreendimento como um todo será afetado pela existência do conhecimento prévio dos impactos decorrente de falhas diversas e da forma de tratá-las (UEMURA et al., 2007).

Em 2010, foi criada a lei 12.334/2010, que atualmente rege a segurança das barragens e que também expõe a necessidade de planos emergenciais para caso de ruptura. Nesta lei se estabeleceu o Plano Nacional de Segurança de Barragem (PNSB) e o Sistema Nacional de Informações de Segurança de Barragem (SNISB). No que tange ao objeto deste trabalho – onda de ruptura de barragem – os artigos 11 e 12 citam os Planos de Ação de Emergência (PAE) (BRASIL, 2010):

Art. 11. O órgão fiscalizador poderá determinar a elaboração de PAE em função da categoria de risco e do dano potencial associado à barragem, devendo exigí-lo sempre para a barragem classificada como de dano potencial associado alto.

Art. 12. O PAE estabelecerá as ações a serem executadas pelo empreendedor da barragem em caso de situação de emergência, bem como identificará os agentes a serem notificados dessa ocorrência, devendo contemplar, pelo menos:

I – identificação e análise das possíveis situações de emergência;

II – procedimentos para identificação e notificação de mau funcionamento ou de condições potenciais de ruptura da barragem;

III – procedimentos preventivos e corretivos a serem adotados em situações de emergência, com indicação do responsável pela ação;

IV – estratégia e meio de divulgação e alerta para as comunidades potencialmente afetadas em situação de emergência.

Parágrafo único. O PAE deve estar disponível no empreendimento e nas prefeituras envolvidas, bem como ser encaminhado às autoridades competentes e aos organismos de defesa civil.

Observa-se que não é definido um grau de detalhamento e escala que deve ser analisado no ítem I. A lei ainda é pouco profunda, ela simboliza que existe a possibilidade de ruptura de barragem, mas não indica as reais condições sob as quais este problema deve ser resolvido. De fato, após a ruptura de barragem existem poucas medidas que possam ser tomadas a fim de diminuir seu impacto. 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. Nesse viés, sobre as possíveis situações de emergência pós-rompimento de estruturas hidráulicas de barramento, Uemura et al. (2007) classificam os impactos da seguinte maneira:

- a) diretos – efeitos da perda do barramento e das estruturas em si, danos gerados pela perda do volume reservado, a interrupção do atendimento proporcionado pela barragem, prejuízos com a falta de energia, água, etc. Impacto pela cheia efluente, como a destruição de pontes e estradas, inundação de áreas urbanas e rurais, danificação de propriedades e outros bens e principalmente perdas de vida em função das cheias.
- b) indiretos – originados pelos desdobramentos do impacto direto, como doenças de veiculação hídrica, desabastecimento de alimentos e remédios na região atingida, perda do valor das propriedades, etc.

Stansby et al. (1998), estudaram a dinâmica de ondas de ruptura e justificam seu trabalho alegando que fluxos oriundos da falha de uma barragem são um problema prático importante na Engenharia Civil e que, após a ocorrência de diversos desastres, seu estudo é um elemento previsto em lei, nos Estados Unidos, e necessário ainda na concepção de uma barragem e seu ambiente circundante.

Após a exposição de um leque de considerações sobre a onda de ruptura de barragem, suas causas e consequências, é notável que ainda existe uma lacuna a ser pesquisada no que tange a se aprofundar nos fatores que regem estes movimentos, com vista a aumentar o acervo técnico acerca deste assunto, colaborar com futuras pesquisas, minimização de impactos e fornecer embasamento para a regulamentação que guia as ações antes e depois deste fenômeno e seus

desdobramentos. Sendo, por isso então, que este fenômeno foi escolhido como objeto de análise com câmera rápida.

3.2.2 Modelo Físico em Laboratório

Este capítulo irá apresentar estudos experimentais que servirão como base para este trabalho, destacando suas principais características em termos de:

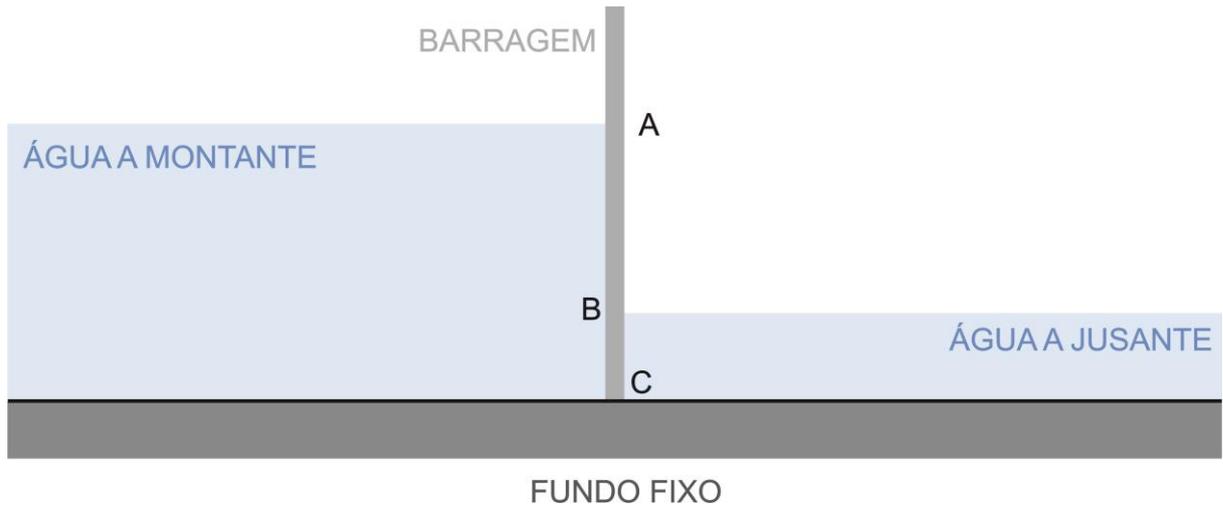
- a) embasamento teórico – ciência das equações que regem o movimento da onda de ruptura e quais as variáveis importantes de serem observadas neste evento;
- b) geometria – aspectos de forma e tamanhos utilizados nos modelos físicos para representar com veracidade a onda de ruptura de barragem e seus mecanismos de simulação dessa onda;
- c) arranjo da filmagem – posicionamento adequado dos aparatos para extrair o melhor aproveitamento dos equipamentos e técnicas disponíveis;
- d) resultados obtidos – o conhecimento do que foi produzido e registrado em mídia, de forma que possa guiar a relevância dos resultados do presente trabalho.

3.2.2.1 Concepção da Geometria do Modelo

Stansby et al. (1998) realizaram estudos sobre os estágios iniciais da onda de ruptura instantânea de uma barragem, aplicando este fenômeno a um modelo físico em escala reduzida. Buscando simular essa onda, é possível encarar como um problema de caráter bidimensional que é idealizado pela remoção instantânea de uma barreira entre duas massas de água em repouso, com níveis diferentes, acima de um fundo fixo horizontal (Figura 9).

Os autores apontam que esta mesma configuração tem sido um caso de teste para simulações numéricas, isto é, provavelmente porque existem soluções analíticas se a suposição da pressão hidrostática é feita de modo que reduza o problema bidimensional a um problema unidimensional. Na prática, a liberação de água será mais gradual do que essa idealização e depende da interação água/solo ou fissura de concreto em uma trinca. No entanto, a liberação instantânea pode ser considerada o pior cenário possível e, portanto, é uma situação de fundamental interesse.

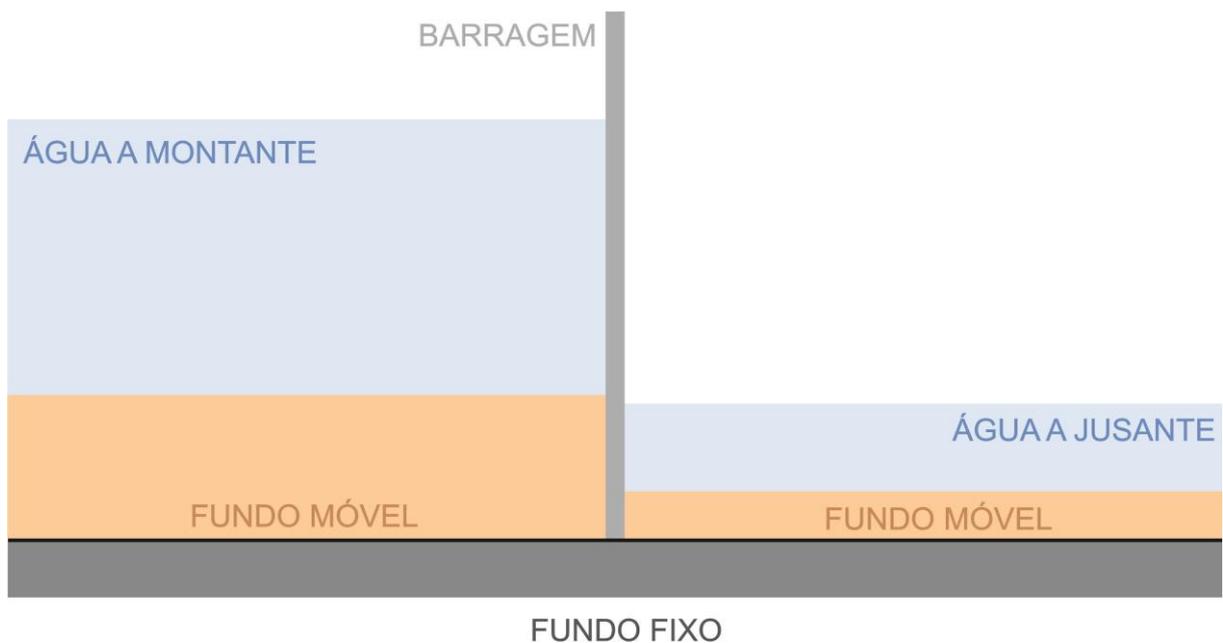
Figura 9 – Definição do arranjo para análise da ruptura, com fundo fixo.



(fonte: adaptado de STANSBY et al., 1998)

O estudo da celeridade da frente de onda de Leal et al. (2006) também aponta este mesmo modelo como uma forma adequada de simular a ruptura instantânea de uma barragem, A diferença deste modelo está na consideração de um fundo móvel. O autor expõe que a maioria das experiências de ondas de ruptura de barragem foi realizada em calhas retangulares retas equipadas com uma comporta, funcionando como a barreira a ser retirada rapidamente. Esse ato simula a falha instantânea e completa da barragem. Os experimentos de ondas de ruptura de barragem apresentam condições iniciais como esboçado na Figura 10.

Figura 10 – Croqui das condições iniciais, considerando um suporte móvel no fundo do modelo.



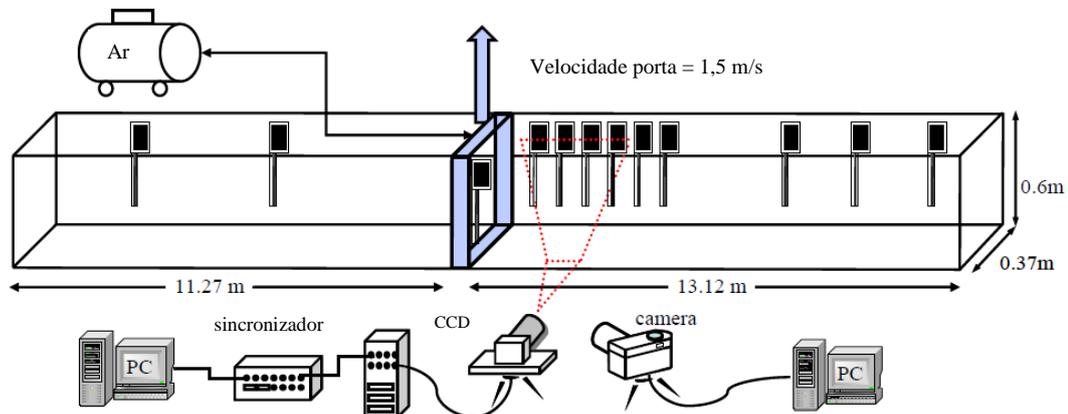
(fonte: adaptado de LEAL et al., 2006)

3.2.2.2 Arranjo do Experimento

O arranjo de um canal de superfície livre, utilizado como um modelo em escala reduzida da ruptura de uma barragem, filmado por uma câmera digital, já foi utilizado por Hsu et al. (2012). Em seu experimento, com objetivo de observar qualitativamente a transformação da frente de onda durante a ruptura de uma barragem em estágios evolutivos distintos, ele utilizou um canal de aproximadamente 27 metros de comprimento, 0,40 metros de largura e 0,60 metros de altura. As paredes laterais foram construídas com vidro liso e a comporta, fixada a uma distância de 11,27 metros do início do canal, era controlada por um compressor de ar. O nível da água a montante foi variado entre 40 cm e 30 cm, enquanto que a jusante o experimento foi feito com quatro alturas diferentes: 1,5 cm, 3,0 cm, 6,0 cm e 9,0 cm.

Estes experimentos foram gravados por uma câmera digital de alta velocidade com sensor de gravação sendo um dispositivo de carga acoplada, a taxa de aquisição de quadros desta câmera foi de 3 Hertz e através das imagens digitalizadas foi possível determinar a posição da frente de onda em função do tempo. A Figura 11 mostra um croqui do arranjo proposto por Hsu et al. (2012).

Figura 11 – Arranjo de filmagem utilizado por Hsu



(fonte: Hsu et al., 2012)

3.2.2.3 Embasamento teórico

Para representar a ruptura instantânea de uma barragem com uma lâmina de água a jusante, Stansby et al. (1998) sugerem um modelo no qual um fluido viscoso inicialmente se encontra em dois níveis diferentes de água, separados por uma placa vertical, ABC, como mostrado na

Figura 9. Esse sistema proposto se encontra sobre um fundo fixo, não sendo consideradas rupturas em fundo móvel, que vão paulatinamente erodindo o solo.

Em um tempo $t = 0$ – instante inicial quando ocorre a simulação de ruptura da barragem – a placa ABC é removida rapidamente, fazendo com que haja 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 se torna constante em AB (atmosférica). Este ajuste do campo de pressão resulta em um movimento instável.

Pode-se calcular o ajuste do campo de pressão a partir das equações de conservação de massa e quantidade de movimento. Assim que a placa é removida, uma vez que as velocidades são zero em $t = 0$, as equações de quantidade de movimento se tornam:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\nabla\phi_1) = -\frac{1}{\rho}\nabla p_1 + \vec{g} \quad \text{equação (1)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\nabla\phi_2) = -\frac{1}{\rho}\nabla p_2 + \vec{g} \quad \text{equação (2)}$$

Onde,

p_1 é a pressão hidrostática na área 1 antes da placa ser removida, em Pa;

p_2 é a pressão hidrostática na área 2 antes da placa ser removida, em Pa;

$\phi = \phi(x,t)$ é potencial de velocidades e $x = (x,y)$, em m/s;

ρ é a massa específica, em kg/m³;

$\vec{g} = (0,-g)$, é a aceleração da gravidade, em m/s².

Aplicando o divergente destas equações,

$$\nabla^2 p_1 = 0 \quad \text{equação (3)}$$

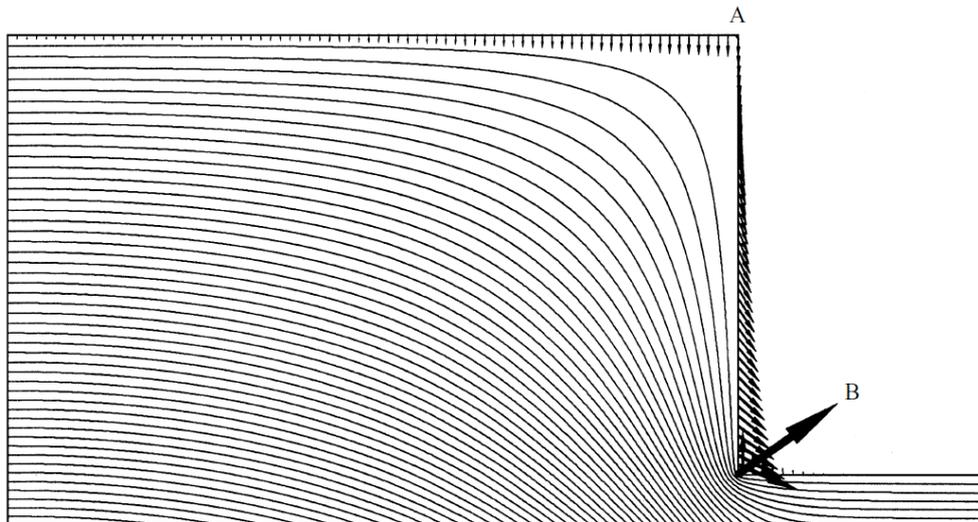
$$\nabla^2 p_2 = 0 \quad \text{equação (4)}$$

desde que $\nabla^2 \phi_1 = 0$, $\nabla^2 \phi_2 = 0$.

As condições de contorno devem ser dadas por $p_2 = p_1 = 0$ por toda a superfície livre, $\partial p_1 / \partial x = \partial p_2 / \partial x$ na interface entre 1 e 2 (BC), garantindo que a velocidade normal a essa interface é contínua em toda ela, e $\partial p_1 / \partial y = \partial p_2 / \partial y = \rho \vec{g}$ por toda a camada base horizontal. Em grandes distâncias da interface, a mudança de pressão é insignificante devido à liberação em $t = 0$ e se monta $\partial p_1 / \partial x = \partial p_2 / \partial x = 0$.

Agora é possível resolver $\nabla^2 p = 0$ (omitindo sufixos 1 e 2) e os contornos de pressão são mostrados na Figura 12 para uma profundidade na ordem de 0,1 metro. Há claramente uma singularidade no canto B. Os resultados apresentados foram obtidos numericamente em uma malha uniforme usando uma aproximação de diferenças finitas. Não há resultados semelhantes para as ordens de profundidade de 0 e 0,45 metros (STANSBY et al., 1998).

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: STANSBY et al., 1998)

As acelerações de fluxo são dadas por (1), (2) e vetores são mostrados na superfície pelas setas na Figura 12. Nota-se que a flecha do canto B é, teoricamente, de comprimento infinito, devido

à singularidade. A superfície no ponto A cai verticalmente com aceleração gravitacional e superfícies a grandes distâncias da interface permanecem estacionárias.

A singularidade é fisicamente impossível, mas esta análise indica que haverá formação de jato em B. O desenvolvimento de fluxo em um tempo pequeno pode ser considerado ainda mais além, removendo artificialmente a singularidade de forma que se suavize o canto em B e calculando a vazão totalmente não-linear, como escoamento potencial com superfície livre (STANSBY et al., 1998).

Chanson (2004) afirma que a ruptura de uma barragem em um canal seco a jusante pode ser resolvida pelo método das características. Considerando o modelo abordado no item 3.2.2.1, caracterizado pela existência de um barramento em um canal retangular, que quando retirado de forma abrupta gera uma onda negativa que se propaga a montante e uma onda de ruptura que se move a jusante. Também existe uma considerável aceleração vertical durante os instantes iniciais do movimento do fluido, esta aceleração não é considerada pelo método das características e a distribuição de pressões se assume hidrostática.

Porém, a solução de uma onda de ruptura de barragem em um canal inclinado, seco a jusante, foi descrita por Hunt⁷ (1982) apud Chanson (2004), onde a equação cinemática da onda pode ser resolvida de forma analítica. O primeiro passo é encontrar o valor da espessura da onda, as demais variáveis ou são condição de contorno ou são de fácil obtenção, como a velocidade de equilíbrio uniforme para uma determinada altura de reservatório.

$$\frac{V_H \cdot t}{L} = \frac{1 - (d_S/H_{dam})^2}{(d_S / H_{dam})^{3/2}} \quad \text{equação (5)}$$

$$V_H = \sqrt{\frac{8\vec{g}}{f_D} H_{dam} \cdot S_0} \quad \text{equação (6)}$$

⁷ HUNT, B. Asymptotic solution for dam-break problems, **Journal of Hydraulic Division**, Proceedings, ASCE, 108, No HY1, 115-126, 1982.

$$S_0 = \frac{H_{dam}}{L} \quad \text{equação (7)}$$

Onde,

V_H é a velocidade de equilíbrio uniforme para H_{dam} , em m/s;

t é o tempo com $t = 0$ no momento da ruptura, em segundos;

L é o comprimento do reservatório, em metros;

d_s é a espessura da frente de onda de ruptura, em metros;

H_{dam} é a altura do reservatório, em metros;

S_0 é a inclinação do canal, em m/m;

f_D é o fator de perda de carga de Darcy, considerado constante, adimensional;

\bar{g} é a aceleração da gravidade, em m/s².

O fator de perda de carga de Darcy é calculado para canais de superfície livre através da iteração da seguinte fórmula:

$$f_D = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{12 \cdot R_H} + \frac{2,51}{\Re \sqrt{f_D}} \right) \quad \text{equação (8)}$$

Onde,

f_D é o fator de perda de carga de Darcy, adimensional;

R_H é o raio hidráulico do canal, em metros;

\Re é o número de Reynolds do fluxo, adimensional;

ε é a rugosidade do canal, em metros.

Para encontrar o comprimento da frente de onda de ruptura, a equação a seguir é aplicada.

$$\frac{x_S}{L} = \frac{3/2}{d_S / H_{dam}} - \frac{d_S}{2 \cdot H_{dam}} - 1 \quad \text{equação (9)}$$

Onde,

x_S é o comprimento da frente de onda de ruptura, em metros;

L é o comprimento do reservatório, em metros;

d_S é a espessura da frente de onda de ruptura, em metros;

H_{dam} é a altura do reservatório, em metros.

Por fim, a velocidade da frente de onda é calculada através da seguinte fórmula:

$$\frac{U}{V_H} = -\frac{3}{4} \cdot \frac{V_H \cdot t}{L} + \sqrt{\frac{x_S + L}{L} + \left(\frac{3}{4} \frac{V_H \cdot t}{L}\right)^2} \quad \text{equação (10)}$$

Onde,

U é a velocidade da frente de onda de ruptura, em m/s;

V_H é a velocidade de equilíbrio uniforme para H_{dam} , em m/s;

t é o tempo com $t = 0$ no momento da ruptura, em segundos;

x_S é o comprimento da frente de onda de ruptura, em metros;

L é o comprimento do reservatório, em metros.

Estas equações são válidas para $S_0 = S_f$, onde S_f é a declividade da linha da água e para quando a superfície livre é paralela com o fundo do canal.

Por fim, Chanson (2004) expõe que para canais secos sem nível de água a jusante e sem declividade, a altura da água se mantém constante no ponto de ruptura da barragem ($x = 0$), obedecendo a seguinte equação:

$$H_{ruptura} = \frac{4}{9} \cdot H_{dam} \quad \text{equação (11)}$$

Onde,

$H_{ruptura}$ é a altura da lâmina da água no ponto onde ocorre a ruptura da barragem, em metros.

H_{dam} é a altura do reservatório, em metros.

3.2.2.4 Resultados Existentes

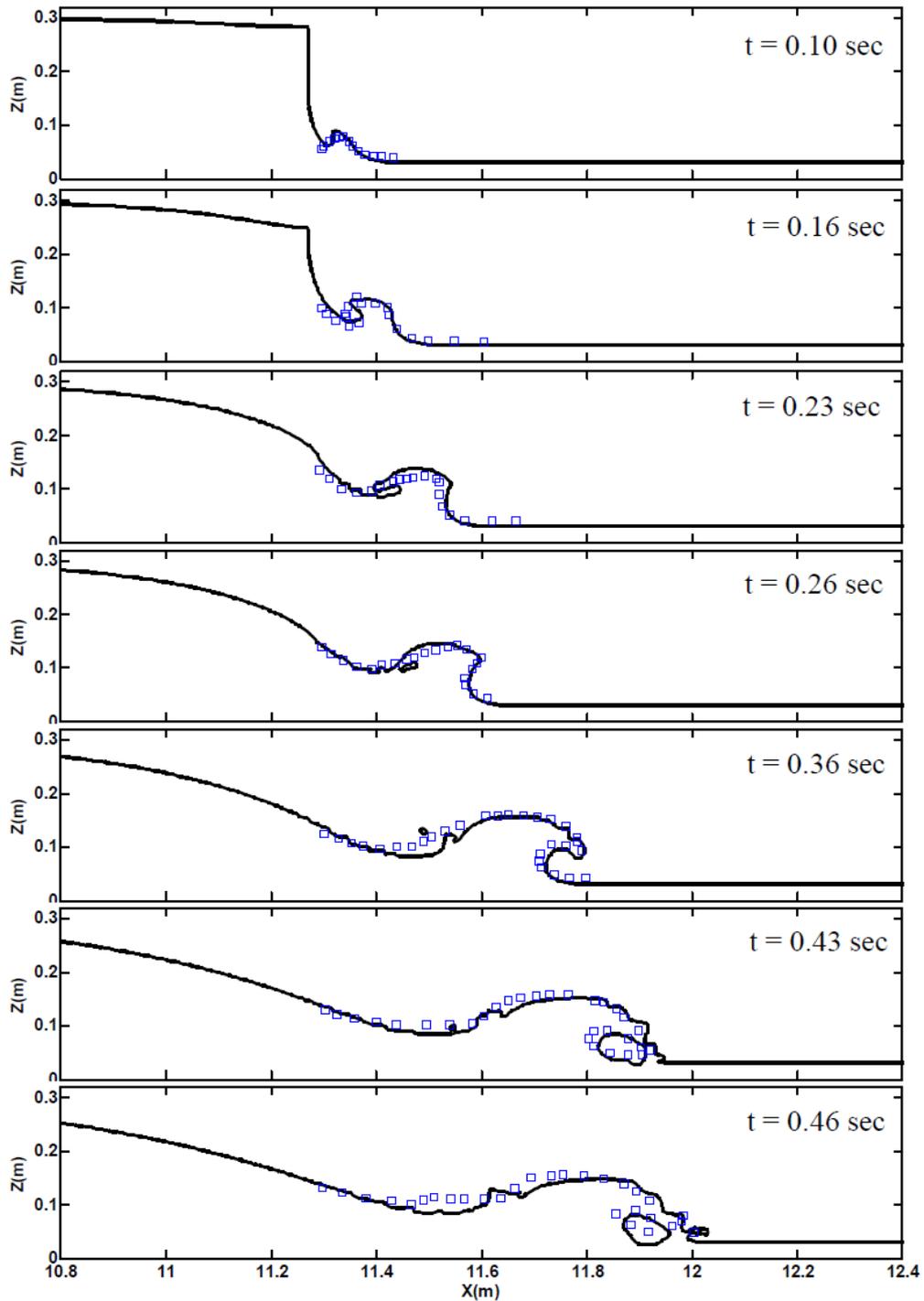
O trabalho de Hsu et al. (2012) apresenta o perfil da frente de onda gerado em uma simulação e compara os resultados obtidos através das filmagens (em linhas pretas contínuas) com resultados obtidos através de dados medidos através de medidores de onda (quadrados azuis), expostos na Figura 13. Esses perfis são advindos de um modelo, cuja situação inicial possuía profundidade a montante de 30 centímetros e a jusante de 10 centímetros.

As imagens gravadas por Stansby et al. (1998) vão ao encontro dos resultados mostrados por Hsu et al. (2012). Em fotos capturadas a 25 quadros por segundo e digitalizadas em uma malha quadrada de 512 x 512 pixels com 256 tons de cinza, pode-se observar a simulação da onda de ruptura no modelo físico (Figura 14). A profundidade a montante e a jusante mantém as medidas de Hsu et al. (2012). A seção focal da câmera foi direcionada em três locais distintos, acompanhando a propagação da onda a jusante. As três primeiras imagens apresentam a câmera na sua posição inicial com uma mudança ainda mais a jusante feita nas próximas duas imagens. Já a última imagem foi captada de uma terceira posição, sendo essa a mais a jusante de todas. A Figura 15 traz uma comparação entre os valores quantificados através das imagens feitas no modelo em escala reduzida, comparada com os valores calculados através da equação de águas rasas.

Esses resultados mostram que o modelo físico representa adequadamente o fenômeno, pois ambos os modelos, feitos em um intervalo de doze anos obtiveram resultados semelhantes. Outro forte indício da consistência do modelo físico é que quando ele foi comparado aos resultados provindos de medições instrumentadas, as conclusões baseadas nas filmagens foram congruentes com o resultado medido instrumentalmente. Por fim, conclui-se também, que as equações conseguem mostrar a tendência do movimento, mas sem todas as suas nuances,

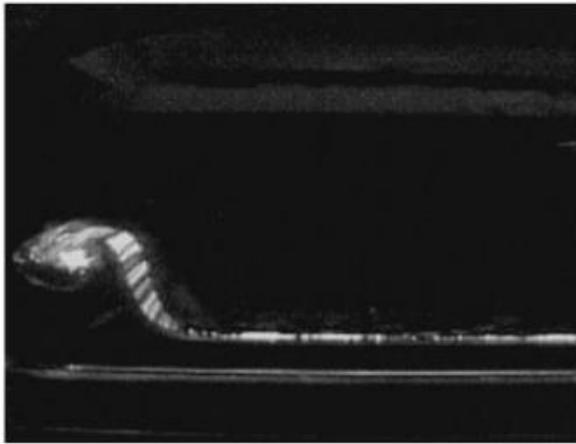
linearizando os resultados quando possível, conforme mostrado na Figura 15, demonstrando mais uma vez a importância de uma análise conjunta baseada na visualização do fenômeno hidráulico, para se ter uma real compreensão do movimento.

Figura 13 – Comparação entre a frente de onda obtida através de imagens feitas em laboratório (linhas pretas contínuas) e dados medidos (quadrados azuis)

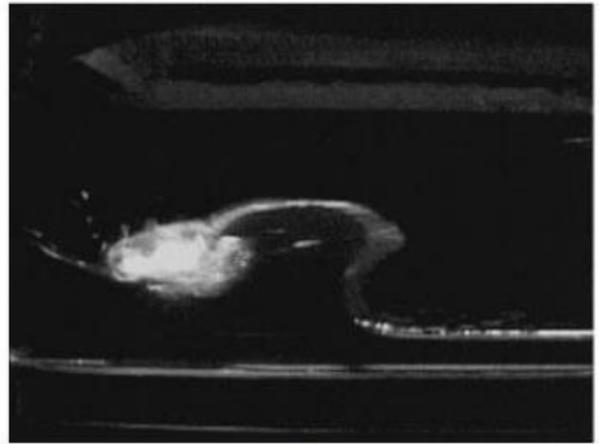


(fonte: HSU et al., 2012)

Figura 14 – Imagens registradas do modelo físico, com o tempo após a ruptura expostos em segundos abaixo de cada quadro.



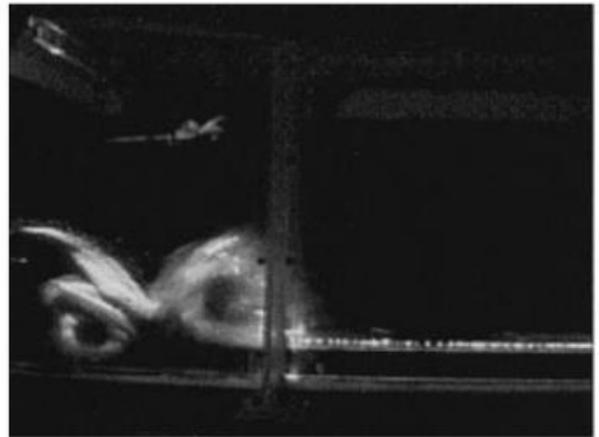
$t = 0.20$ s



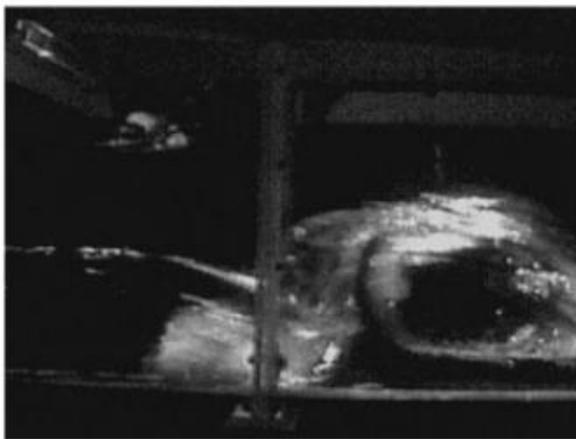
0.36 s



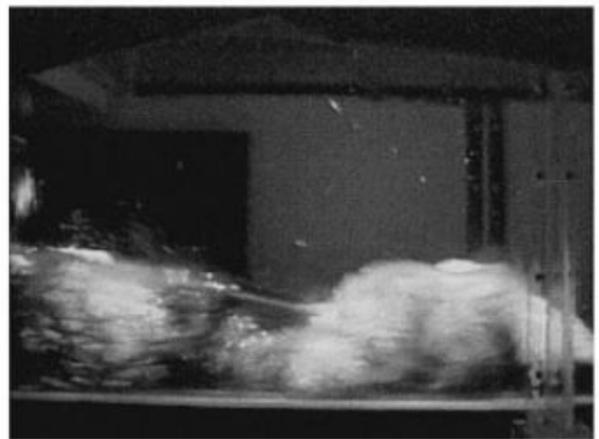
0.44 s



0.60 s



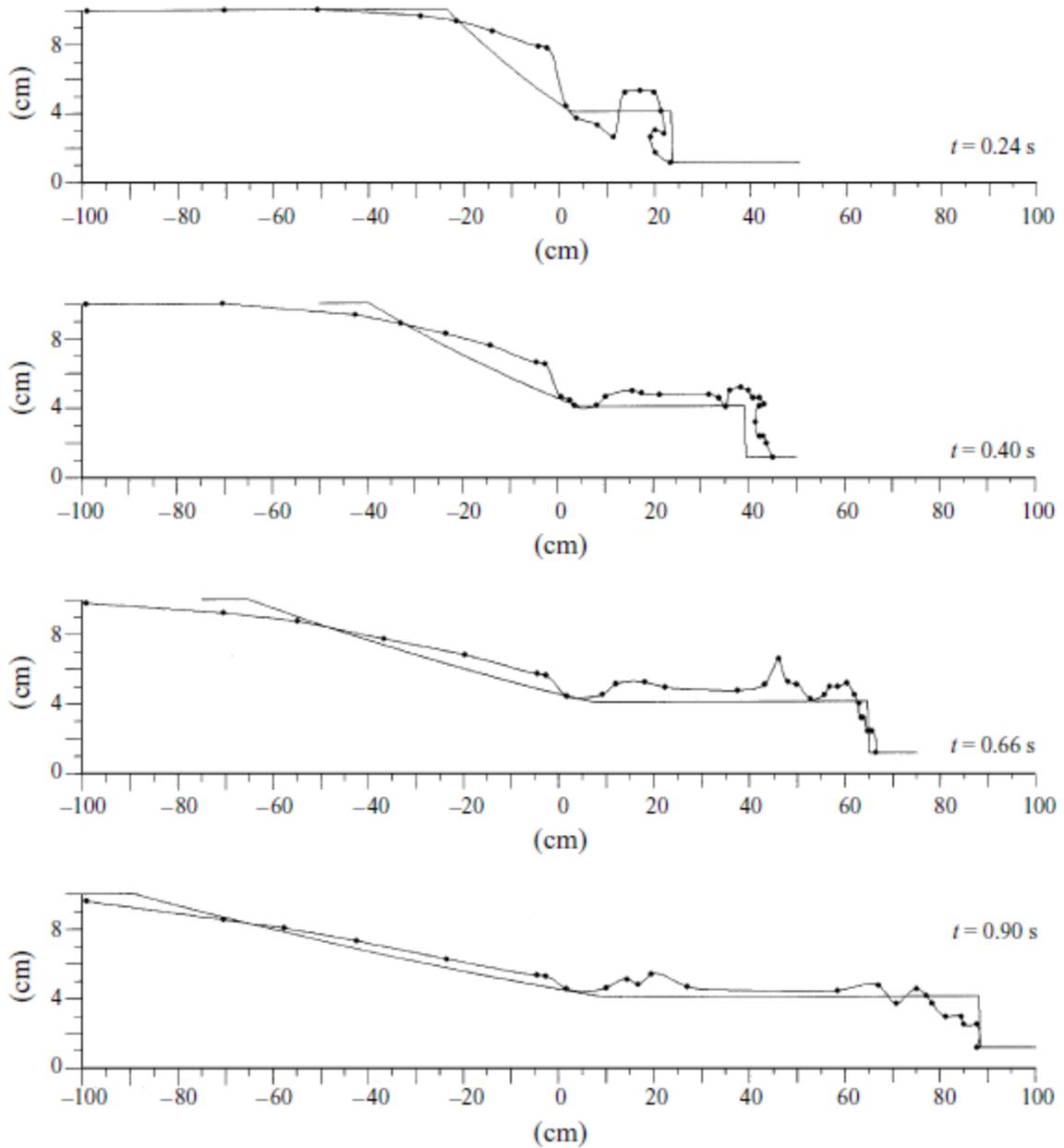
0.76 s



1.26 s

(fonte: STANSBY et al., 1998)

Figura 15 – Comparação entre os dados obtidos através de imagens do laboratório (linha com pontos) e utilizando a equação de águas rasas (linha contínua)



(fonte: STANSBY et al., 1998)

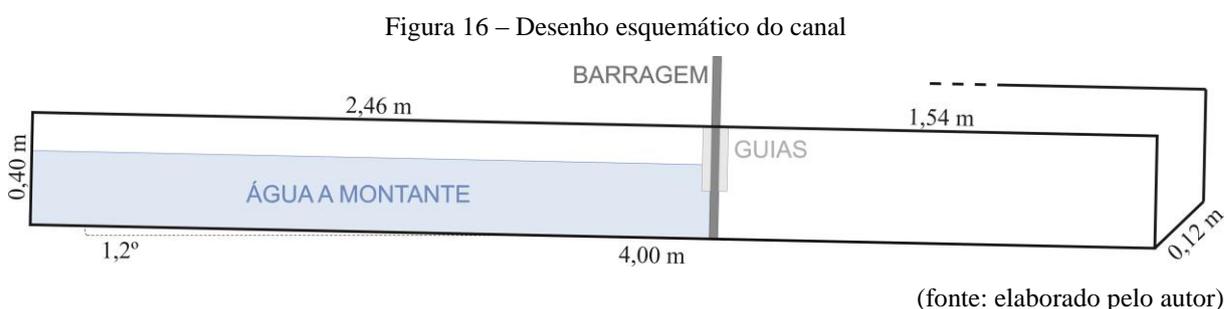
4 APARATO EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentado o aparato utilizado para a realização dos experimentos do evento de rompimento de barragem. Os experimentos foram realizados nas instalações do Neced, localizado no IPH da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

4.1 MODELO DE RUPTURA DA BARRAGEM

A ruptura da barragem foi modelada a partir da adaptação de um canal de vidro que possui inclinação de 1,2 graus 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, de forma a estancar o fluxo da água e criar um desnível, simulando assim o barramento de um curso d'água. A retirada abrupta da placa equivale à ruptura instantânea de uma barragem hipotética.

A placa se movimenta verticalmente com o auxílio de guias de acrílico que foram acopladas no canal com o uso de silicone. As dimensões da placa são de um retângulo de 65,8 por 12,2 cm e as guias possuem 23 cm de altura e 1,5 cm de largura. A placa vertical e as guias possuem espessura de 1 cm. A Figura 16 representa um croqui com as dimensões do canal de vidro.



4.2 CÂMERAS UTILIZADAS

O presente trabalho fez uso de 2 câmeras para realizar as filmagens: a câmera de alta velocidade *Fastec HiSpec 2 Color* e a câmera digital *Nikon D5000*.

4.2.1 Câmera de Alta Velocidade

A *Fastec* é uma câmera de alta velocidade que consegue gravar a uma alta taxa de quadros ou *frames* por segundo (fps) os seus vídeos, com possibilidade de gravação a partir de 506 fps até praticamente 300000 fps. Para se ter uma ideia de ordem de grandeza, um filme cinematográfico comum utiliza uma taxa de 36 quadros por segundo em suas filmagens. A quantidade de quadros captados por segundo pela *Fastec* é função das dimensões da área do enquadramento da câmera e da duração da filmagem, por exemplo: quanto mais ampla for a área do enquadramento, menor será a quantidade de fps.

Ainda, ela é operada diretamente por um *software* próprio, através de um computador conectado à câmera.

Este aparelho conta com as seguintes especificações apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Especificações da câmera Fastec HiSpec 2 Color

Característica	Especificação
sensor	CMOS, 1280 x 1024 pixels, 10-bit monocromático ou cores RGB[1] com filtro BAYER ativo
tamanho do Pixel	14 x 14 μm
sensibilidade à Luz	3.200 ISO monocromático ou 1.600 ISO colorido
banda espectral	400 - 900 nm
taxa de gravação	Até 506 quadros por segundo com melhor resolução, até 298.851 quadros por segundo com resolução reduzida
memória da imagem	4 Gigabytes
tempo de gravação	6,4 segundos com a melhor resolução, maiores tempos de gravação com variação da resolução e taxa de quadros
obturador	obturador global eletrônico de 2 μs até 1 segundo em 2 μs passos
formato do quadro	BMP, TIF, DNG, JPG ou AVI, formato do arquivo
interface da câmera / computador	1000/100 Ethernet interface (gigabit ethernet)
gatilho	contato físico, TTL sinal externo ou gatilho por software
peso	0,9 quilos. sem lentes
temperatura do ambiente de operação	+ 5 °C até + 45 °C
fonte de energia	10 – 30 V DC fonte externa.

(fonte: FASTEC IMAGING, [20--])

Foram utilizados 3 holofotes de luz incandescente de 1000 Watt cada, sendo dois incidindo na mesma altura do nível da água e um terceiro instalado acima do canal, para se obter a iluminação

necessária às filmagens. Além disso, também foi utilizado um tripé para posicionar a câmera. Através desse vídeo com alto grau de detalhamento, foi proposto definir:

- a) forma geométrica da onda – comprimento e espessura – em cada instante de tempo;
- b) velocidade de propagação da onda;
- c) identificação do desenvolvimento inicial para a formação da onda.

4.2.2 Câmera Digital

Também foi utilizada a câmera digital *Nikon D5000*, com uma taxa de 25 quadros por segundo. Através dessas filmagens, foi possível:

- a) comparar o desempenho de uma câmera normal com uma de velocidade rápida;
- b) filmar a progressão da onda ao longo de todo o canal;
- c) fazer um registro global de todo o procedimento do ensaio.

5 METODOLOGIA

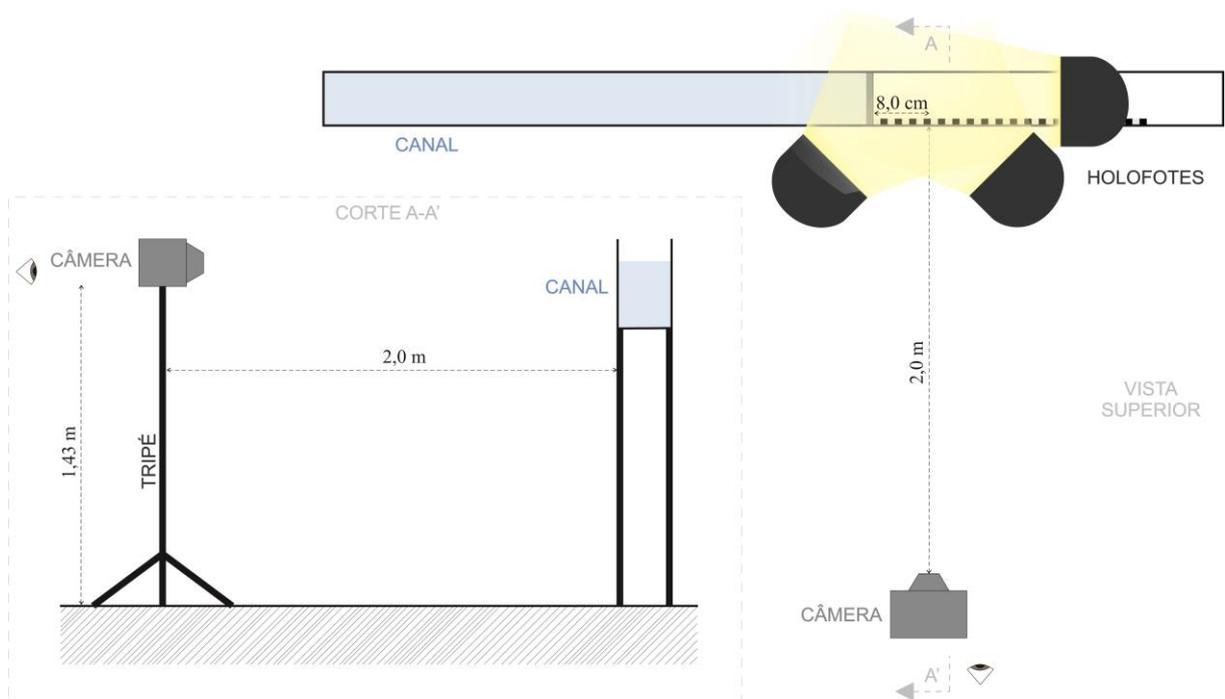
Neste capítulo é apresentado o procedimento experimental aplicado nas simulações de rompimento de barragem e o plano de ensaios realizados.

5.1 ENQUADRAMENTO DE FILMAGEM

A câmera de alta velocidade foi posicionada a uma distância aproximada de 2 metros do canal, a 8 centímetros a jusante da placa de acrílico e a uma altura de 1,43 metros do solo (Figura 17). A configuração manual da câmera é apresentada a seguir:

- a) abertura do obturador: entre $f/4,0$ e $f/5,6$;
- b) *zoom*: 75
- c) foco: 1,5

Figura 17 – Croqui do posicionamento da câmera em relação ao canal



(fonte: elaborado pelo autor)

Partindo desse posicionamento, ao se alterar a área de captura e a taxa de quadros por segundo, foi possível definir 6 enquadramentos diferentes, que são detalhados a seguir.

O enquadramento 1 capturou uma imagem de 1280 x 700 *pixels*, em uma área de 40 x 24 cm, filmado pela super câmera a uma taxa de 739 quadros por segundo, e pela câmera digital *Nikon*. Já o enquadramento 2 capturou uma imagem de 704 x 700 *pixels*, em uma área de 21 x 21 cm, filmado somente pela super câmera, a uma taxa de 1190 quadros por segundo.

Outros dois enquadramentos foram utilizados apenas para os cenários com o nível da água à montante igual a 30 centímetros: o enquadramento 3, onde a altura da lâmina d'água a jusante foi igual a 5 cm, com a tela em 1200 x 700 *pixels*, com área de 36 x 22 cm, a 835 quadros por segundo e o enquadramento 6 de 704 x 1000 *pixels*, área de 20 x 30 cm, a 639 quadros por segundos, sendo o canal vazio a jusante

Os outros dois enquadramentos, 4 e 5, tiveram como objetivo registrar dados complementares e se utilizou somente a câmera *Nikon*. O enquadramento 4 foi realizado concomitantemente à gravação da câmera rápida, de forma a registrar o procedimento experimental. O enquadramento 5 engloba todo o canal e consegue capturar a progressão da onda ao longo do mesmo. Na Tabela 3 está exposta uma síntese das informações que definem cada enquadramento, enquanto que a Figura 18 traz um enfoque visual dessa mesma síntese.

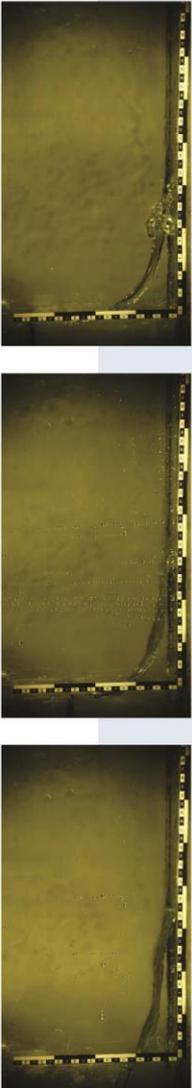
Tabela 3 – Características de cada enquadramento

Câmera	Enquadramento	Área (cm)	Resolução (pixel)	Quadros por segundo
Fastec	1	40 x 24	1280 x 700	739
Nikon	1			24
Fastec	2	21 x 21	704 x 700	1190
Fastec	3	36 x 22	1200 x 700	835
Nikon	4			24
Nikon	5			24
Fastec	6	20 x 30	704 x 1000	639

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 18 – Síntese das filmagens

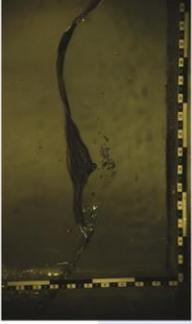
Enquadramento 1 – 1280x700 (Alturas a montante de 10, 15 e 20 cm)



Enquadramento 2 – 704x700 (Alturas a montante de 5, 10, 15, 20 cm e 20 cm com 2 cm a jusante)



Enquadramento 3 – 1200x700 (H = 30 cm, com lâmina de 5 cm a jusante)

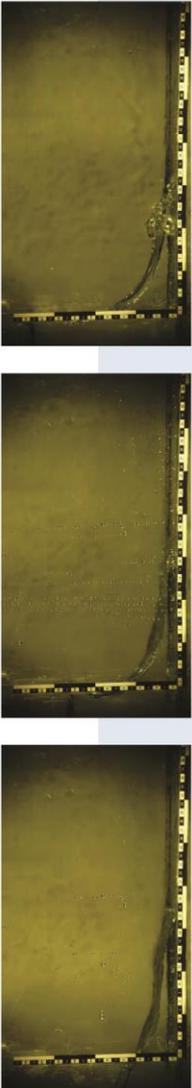


Enquadramento 4 – 4 filmagens (H = 5, 10, 15 e 20 cm) do ensaio de uma forma global. Além de ser um ângulo diferente, também registra como foi feito o ensaio.

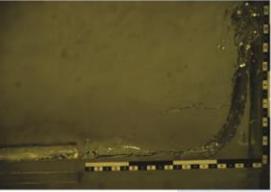


CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE

Enquadramento 5 – 4 filmagens (H = 10, 15, 20 cm e 20 cm com 3 cm a jusante) que abrangem toda extensão a jusante do canal.



Enquadramento 6 – 704x1000 (H = 30 cm)



CÂMERA NORMAL

Enquadramento 1 (Alturas a montante de 10, 15 e 20 cm)



(fonte: elaborado pelo autor)

5.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O experimento para simular a ruptura da barragem iniciava com o posicionamento dos equipamentos de filmagem, dos quais fazem parte: câmeras sobre tripé de sustentação, computador conectado a câmera de alta velocidade para navegação e 3 holofotes.

Após, era colocada vaselina nas laterais e no fundo da placa com o intuito de estancar a passagem de água pela placa e facilitar sua retirada. Então o canal era preenchido com água até os níveis escolhidos para cada ensaio. Caso o cenário fosse com uma lâmina de água a jusante, era feito o seguinte procedimento: primeiro o canal era preenchido até alcançar o nível de jusante desejado, após, era instalada a placa, onde se seguia enchendo apenas o lado a montante até o nível de barramento escolhido. Para facilitar a identificação do nível da água foi colocado corante de forma a ele se espalhar sobre a superfície. Para simular uma onda de ruptura instantânea, se retira a placa de acrílico, exercendo manualmente uma força cisalhante para cima. As guias garantem que a placa seja retirada perpendicularmente ao fluxo de água. Após a retirada da placa, que represava a coluna de água, não havia mais nada que evitasse o desenvolvimento e a progressão da onda.

Devido ao fato de estar acumulando energia junto ao barramento, o seu rompimento resulta na formação brusca de uma onda rápida. Para registrar este fenômeno que acontece na ordem dos segundos, foi realizada uma bateria de filmagens com as duas câmeras, na qual é possível utilizar diferentes enquadramentos e condições iniciais de contorno, como exposto na Figura 18.

5.3 PLANO DE ENSAIOS REALIZADOS

Nesse trabalho foram realizados 21 ensaios que englobam diferentes cenários de ruptura e diferentes enquadramentos e câmeras utilizadas, apresentados na Figura 18. Definiram-se 3 alturas de nível a montante da barragem – 10, 15 e 20 centímetros – utilizados nos dois enquadramentos da câmera de alta velocidade, juntamente com a filmagem realizada pela câmera digital. Casos isolados, como a utilização do nível de água a montante de 5 e 30 centímetros, foram utilizados para verificar se a tendência encontrada nos três ensaios escolhidos pode ser extrapolada para valores superiores ou inferiores. Por fim, foi verificada a

resposta do modelo para rupturas com lâmina de água a jusante, estes dados não serão tratados e ficam como acervo técnico para futuras pesquisas. A Tabela 4 contém o plano de ensaio.

Tabela 4 – Plano de ensaios realizados

Nº	Câmera	Enquadramento	Altura a Montante (cm)	Altura a Jusante (cm)	Identificação	Objetivo
1	Fastec	1	10	0	E1_P1_N10-0	Detalhe da Ruptura
2	Fastec	1	15	0	E1_P1_N15-0	
3	Fastec	1	20	0	E1_P1_N20-0	
4	Nikon	1	10	0	E2_P1_N10-0	
5	Nikon	1	15	0	E2_P1_N15-0	
6	Nikon	1	20	0	E2_P1_N20-0	
7	Fastec	2	5	0	E1_P2_N5-0	Detalhe da Ruptura
8	Fastec	2	10	0	E1_P2_N10-0	
9	Fastec	2	15	0	E1_P2_N15-0	
10	Fastec	2	20	0	E1_P2_N20-0	
11	Fastec	2	20	3	E1_P2_N20-3	
12	Fastec	3	30	5	E1_P3_N30-5	Detalhe da Ruptura
13	Nikon	4	5	0	E2_P4_N5-0	Registro de Ensaio
14	Nikon	4	10	0	E2_P4_N10-0	
15	Nikon	4	15	0	E2_P4_N15-0	
16	Nikon	4	20	0	E2_P4_N20-0	
17	Nikon	5	10	0	E2_P5_N10-0	Progressão da Onda
18	Nikon	5	15	0	E2_P5_N15-0	
19	Nikon	5	20	0	E2_P5_N20-0	
20	Nikon	5	20	3	E2_P5_N20-3	
21	Fastec	6	30	0	E1_P6_N30-0	Detalhe da Ruptura

(fonte: elaborado pelo autor)

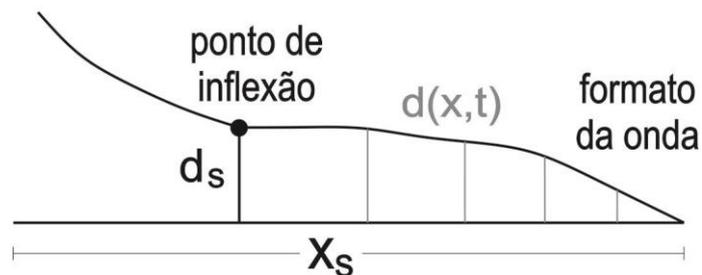
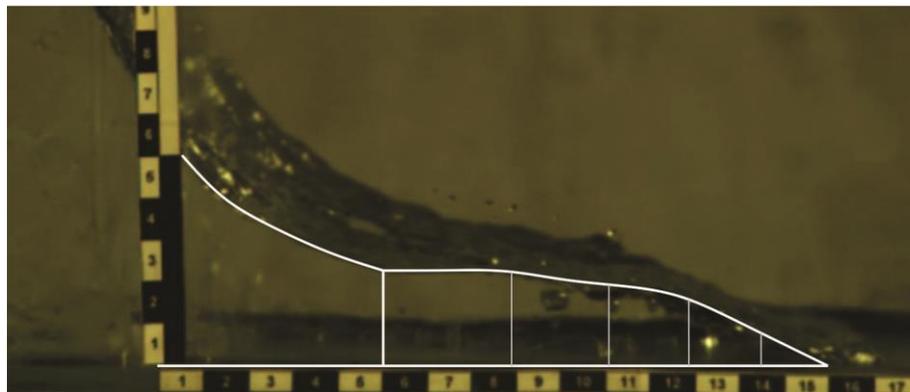
5.4 DADOS OBTIDOS

Ao fim de cada ensaio, analisando a geometria da onda, quadro a quadro, foi possível obter os seguintes parâmetros:

- comprimento da frente de onda x_s em função do tempo, sendo $x_s = 0$ no instante $t = 0$, momento de início de movimento da massa de água;
- espessura d da frente de onda em função do tempo e da posição;
- ponto de inflexão da frente de onda em função do tempo, correspondente à espessura $d(x,t)$ da frente de onda;
- velocidade da frente de onda;
- tempo decorrido para retirar por completo a placa que estanca o fluxo de água, caracterizando assim a instantaneidade do fenômeno.

A Figura 19 expõe o significado físico de cada uma dessas magnitudes.

Figura 19 – Características geométricas da onda



(fonte: elaborado pelo autor)

6 RESULTADOS

Neste capítulo são expostos os dados provindos dos experimentos em laboratório e também o tratamento dado a eles.

6.1 ESCOLHA DOS ENSAIOS PARA ANÁLISE DETALHADA

Para fazer a análise da propagação da frente de onda gerada, foram escolhidos os seguintes cenários (Tabela 5) para terem seus dados analisados, através de *softwares* de edição de vídeo (*Virtual Dub, Movie Maker, XnView e Corel Draw*).

Tabela 5 – Ensaios escolhidos para análise detalhada

Cenário (-)	Numeração Tabela 4 (-)	Câmera (-)	Enquadramento (-)	H _{dam} (cm)	H _{dam} (cm)	H _{dam} (cm)
1	1, 2, 3	Fastec	1	10	15	20
2	8, 9, 10	Fastec	2	10	15	20
3	4, 5, 6	Nikon	1	10	15	20

(fonte: elaborado pelo autor)

A escolha destes cenários se baseou no fato de ter sido encontrado na literatura uma maioria de ensaios com lâmina de água a jusante. Assim, com o propósito de estudar algo menos pesquisado, se escolheu ensaios com o canal seco a jusante. Os níveis de água no barramento foram escolhidos de forma a serem condizentes com as dimensões do canal.

Estes vídeos, então, foram analisados quadro por quadro, individualmente, a fim de encontrar o intervalo de tempo exato que continha o fenômeno da ruptura da barragem. Considerando que o fenômeno hidráulico começa no instante em que é possível identificar o movimento da água de montante para jusante e o ponto máximo de análise é o instante em que a frente de onda alcança a distância de 17 centímetros da placa. Esse ponto final foi escolhido devido ao fato do enquadramento 2 ter uma área de captura que abrange apenas até os 17 cm a jusante da barragem, assim sendo, qualquer dado provindo de outro enquadramento, que ultrapassasse este comprimento de onda, não teria com o que ser comparado.

A partir disso é possível mensurar tanto o tempo de duração deste fenômeno, quanto o número de quadros que registraram o mesmo. O número de quadros pode ser considerado como a quantidade de pontos conhecidos para analisar a formação de onda de ruptura de barragem. Os resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Quantidade de quadros disponível para analisar a onda de ruptura da barragem

Câmera (-)	Enquadramento (-)	H_{dam} (cm)	Tempo (seg.)	Frames (un.)
Fastec	1	10	0,1678	124
		15	0,1502	111
		20	0,1272	94
Fastec	2	10	0,1689	201
		15	0,1370	163
		20	0,1269	151
Nikon	1	10	0,2079	5
		15	0,1663	4
		20	0,1247	3

(fonte: elaborada pelo autor)

A análise da Tabela 6 permite compreender o quão exíguo é o tempo de duração deste fenômeno, também é possível perceber que quanto maior o nível de água (NA) no barramento, mais rápido se desloca a onda, quando se dá o rompimento da barragem. A diferença de duração entre os ensaios realizados pela câmera de alta velocidade Fastec e os filmados pela câmera digital de velocidade normal Nikon, se dão pela dificuldade em precisar o deslocamento da onda registrada pela Nikon, pois são poucos os dados (quadros) por ela fornecidos.

6.2 ANÁLISE QUALITATIVA DO FENÔMENO HIDRÁULICO – RUPTURA DE BARRAGEM

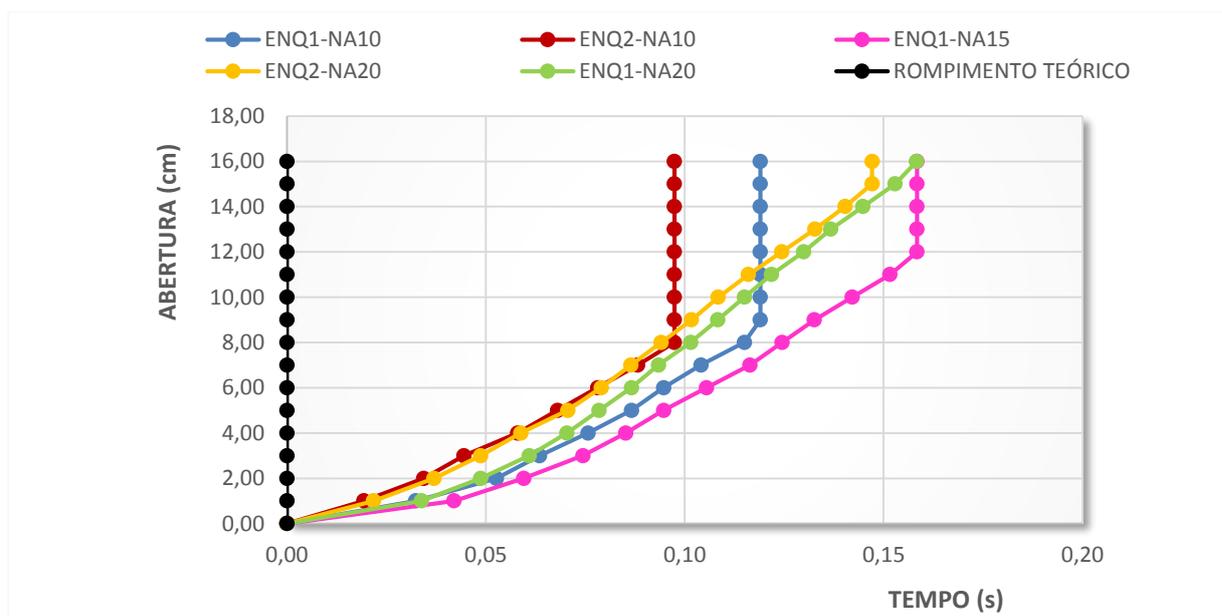
Antes de iniciar uma análise mais detalhada com a super câmera, os vídeos globais (enquadramentos 4 e 5) realizados pela câmera normal, foram vistos de maneira a verificar de forma genérica o comportamento do experimento. Assim, tão logo a comporta é aberta, uma frente de onda muito rápida se forma a 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. Devido ao

comprimento do canal experimental ser um pouco curto a jusante, quando a onda chega ao fim do canal, ela retorna e forma um ressalto hidráulico que avança para montante, porém, se entende que o fenômeno de interesse ocorre antes da onda se chocar com o fim do canal, assim, tudo que acontece após esse choque é desconsiderado, pois não influencia o que o presente trabalho se propõe a estudar.

6.3 AVALIAÇÃO DO TEMPO DE ABERTURA DA PLACA VERTICAL

Um dos pressupostos deste trabalho é considerar a abertura da placa vertical representando uma ruptura instantânea. De antemão, é sabido que a placa vertical no modelo não consegue reproduzir esse fenômeno fielmente. Entretanto, através do detalhamento fornecido apenas pela câmera rápida é possível avaliar o tempo que levou este rompimento da barragem, dito instantâneo. Considera-se que a barragem rompe por completo quando a massa de água não está em contato com nenhuma área da barragem, sendo assim, a Figura 20 fornece uma análise do tempo despendido para diversos eventos do rompimento da barragem. Não foi possível identificar o tempo de abertura para o enquadramento 2, nível de água do barramento de 15 cm, devido ao fato de não existir um ponto identificável onde seria possível acompanhar o seu deslocamento, para os demais foram identificados pontos como gotas de água, reflexo da placa e do seu fundo, etc.

Figura 20 – Avaliação da Instantaneidade do movimento



(fonte: elaborado pelo autor)

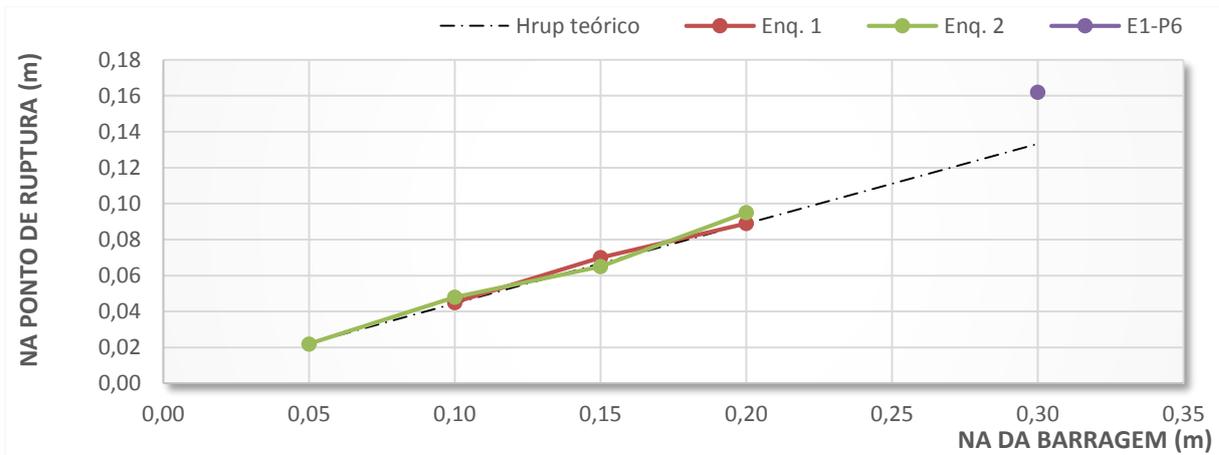
A interpretação da Figura 20 aponta que quanto menor o nível de água na barragem, se chega na condição teórica de ruptura instantânea com uma abertura menor, pois existe uma altura menor a ser vencida. A velocidade da placa entre sua condição de repouso até 1 cm de abertura é influenciada pela quantidade de água a montante, pois quanto maior o nível de água, maior é o empuxo no fundo da placa. Do primeiro centímetro em diante, a placa tem uma velocidade praticamente constante para todos os ensaios.

Complementando os dados da Figura 20, é exposta a distância percorrida pela onda até o rompimento da barragem (quando a massa de água não se encontra mais em contato com nenhum ponto da placa vertical):

- a) Enquadramento 1, NA 10 cm: 0,080 metros
- b) Enquadramento 1, NA 15 cm: 0,170 metros
- c) Enquadramento 1, NA 20 cm: 0,195 metros
- d) Enquadramento 2, NA 10cm: 0,080 metros
- e) Enquadramento 2, NA 15 cm: 0,125 metros
- f) Enquadramento 2, NA 20 cm: Não foi possível identificar.

Como o fim da avaliação da onda foi considerado em 17 centímetros de comprimento, pode-se perceber que alguns dos ensaios chegaram ao fim sem ter a placa completamente retirada. Como forma de avaliar esta influência, foi testada a proposição de Chanson (2004) para canais horizontais de que a onda tende a estabilizar seu NA no ponto de ruptura da barragem e este valor é equivalente a $\frac{4}{9}$ do NA da barragem. Foi possível verificar estes dados através da análise quadro a quadro das imagens fornecidas pela câmera de alta velocidade. O resultado está exposto na Figura 21.

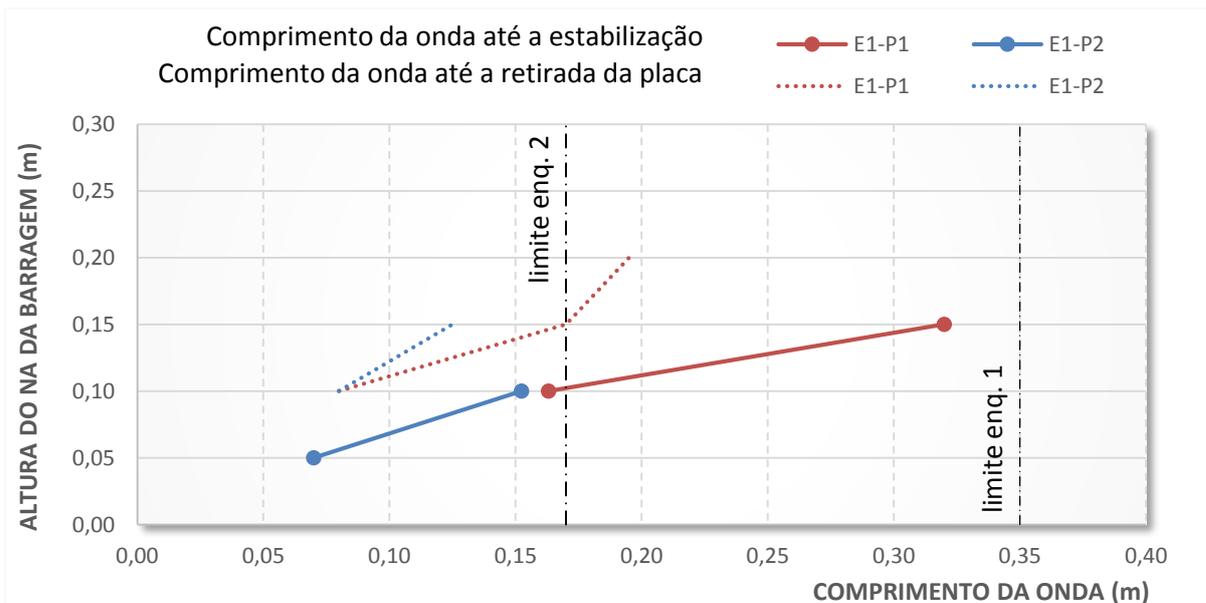
Figura 21 – Análise de qual NA, no ponto de ruptura da barragem, se mantém constante após estabilização da onda.



(fonte: elaborado pelo autor)

Essa figura mostra que a condição imposta por Chanson (2004) para canais horizontais, também pode ser verificada para este canal, cuja inclinação é de 1,2 graus. Salienta-se que aqui foi possível verificar essa condição para o enquadramento 6, que possuía um NA na barragem de 30 cm e canal seco a jusante. Já a Figura 22 aponta o quanto a onda propagou enquanto a placa era retirada e o quanto ela propagou até a onda obter a condição de estabilização no ponto de ruptura.

Figura 22 – Análise da distância percorrida pela onda até a retirada completa da placa e até a estabilização da altura da onda em $4H_{dam}/9$, no ponto de ruptura.



(fonte: elaborado pelo autor)

Após analisar essas informações, entende-se que enquanto a placa está sendo retirada, ela influencia no formato da onda e que essa influência acaba quando a onda consegue chegar na condição que a sua espessura no ponto de ruptura não decresce mais.

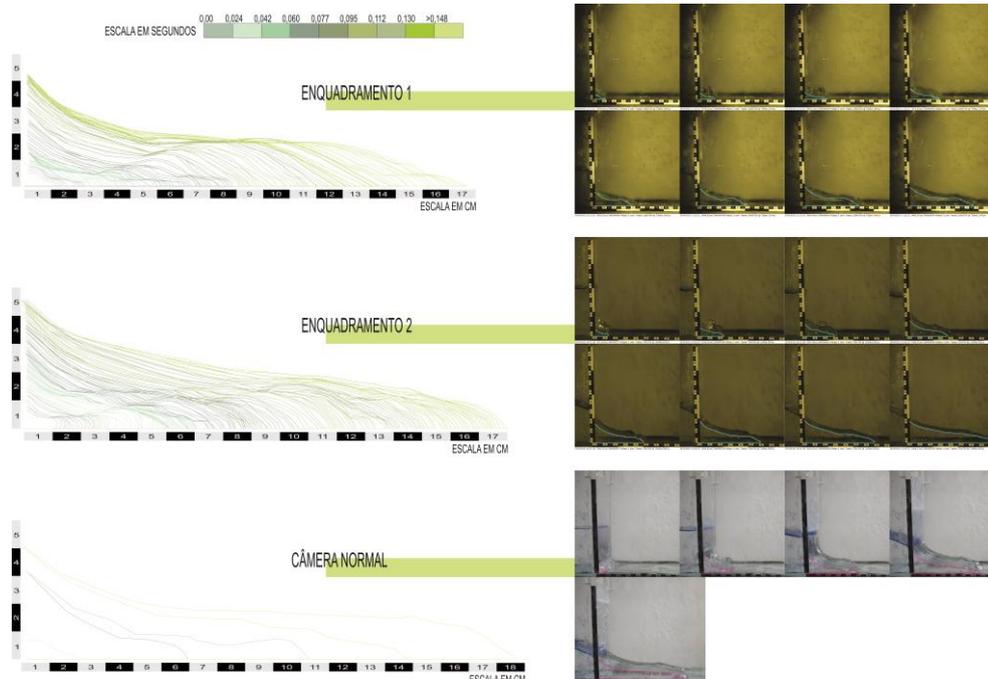
6.4 ANÁLISE DA GEOMETRIA DA PROPAGAÇÃO DA ONDA DE RUPTURA

A partir de cada quadro das filmagens escolhidas neste trabalho, conforme exposto no item 6.1, anterior, através da Tabela 5, foi possível definir o contorno da propagação da onda a cada seguinte intervalo de tempo, intervalo esse, imposto pela quantidade de quadros capturadas por segundo em cada enquadramento:

- a) 1,35 ms, para o enquadramento 1;
- b) 0,84 ms, para o enquadramento 2;
- c) 42,67 ms, para a filmagem com a câmera digital Nikon.

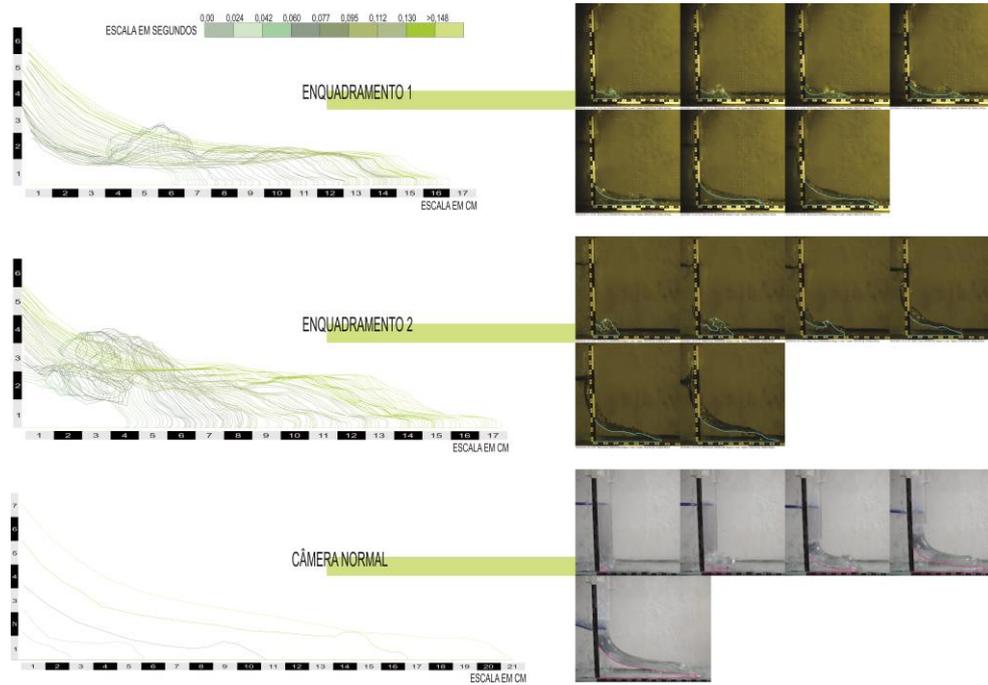
O resultado pode ser conferido a partir da Figura 23 até a Figura 25.

Figura 23 – Detalhamento da evolução dos primeiros 17 centímetros da onda de ruptura da barragem, com nível a montante de 10 centímetros.



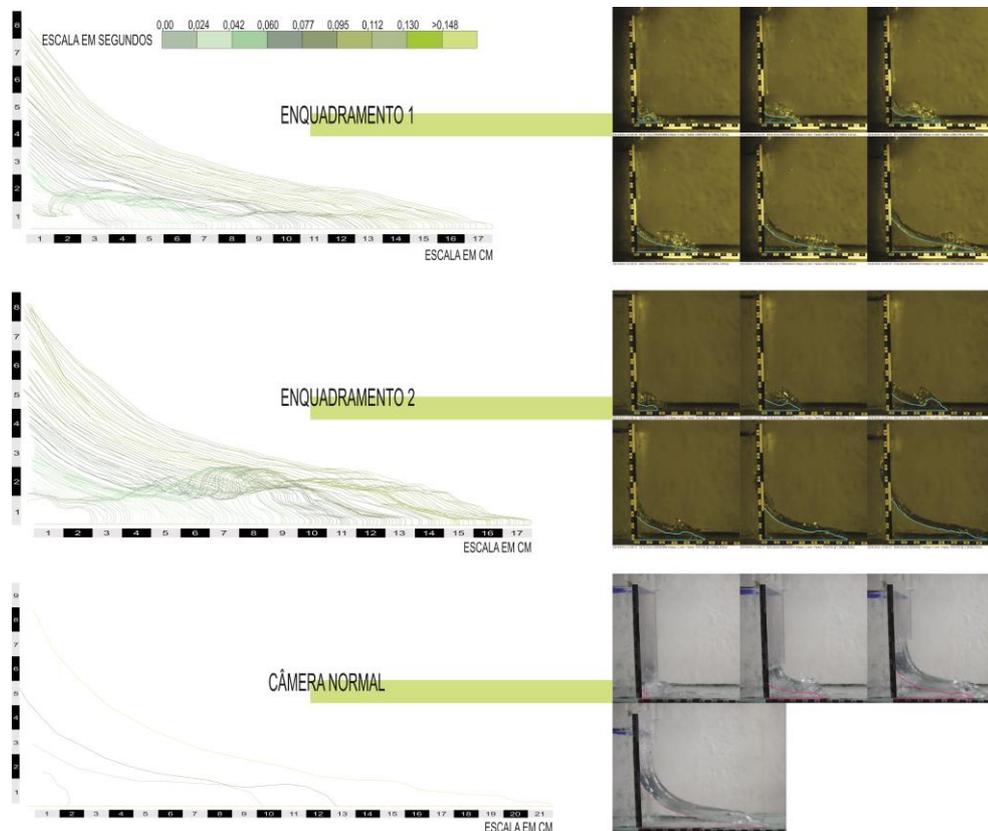
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 24 – Detalhamento da evolução dos primeiros 17 centímetros da onda de ruptura da barragem, com nível a montante de 15 centímetros.



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 25 – Detalhamento da evolução dos primeiros 17 centímetros da onda de ruptura da barragem, com nível a montante de 20 centímetros.



(fonte: elaborado pelo autor)

Através da análise das figuras anteriores, a câmera de alta velocidade permite identificar que a partir do rompimento a onda surge como se estivesse inflando, expandindo rapidamente para frente e para cima, depois de atingir uma determinada altura o formato de onda observado é de uma cunha que ainda tende a aumentar de espessura, porém com uma taxa de aumento que tende a diminuir.

Nota-se que devido à resistência do fundo, inicialmente se forma uma cabeça na frente da onda, com uma espessura maior. Essa cabeça tende a diminuir ao longo do movimento. Quanto maior a altura da barragem, mais alongada e menos espessa é a cabeça da onda. Especificamente na Figura 24, cujo nível d'água possuía uma altura de 15 cm, foi detectada uma alteração de geometria em ambos ensaios registrados com a câmera rápida. Essa alteração deve estar vinculada ao movimento de retirada da placa, influenciando no resultado final. No entanto, após a estabilização da onda, aos 0,13 segundos, o seu comportamento foi condizente com os ensaios das demais alturas.

A câmera digital Nikon de velocidade usual (24 *fps*) registrou em torno de 5 quadros deste evento, com essa informação é possível identificar qual o formato da onda, mas não se compreende como que um reservatório em situação de repouso se transforma numa onda com este formato específico. Um alto registro de quadros é justificado porque o evento acontece em um piscar de olhos, sem metáforas. Segundo Rose (1989), uma piscadela dura em torno de dois décimos de segundo. O presente estudo conferiu que 2 décimos de segundo é um espaço de tempo suficiente para a onda avançar horizontalmente o equivalente a, cerca de, 85% da sua altura a montante.

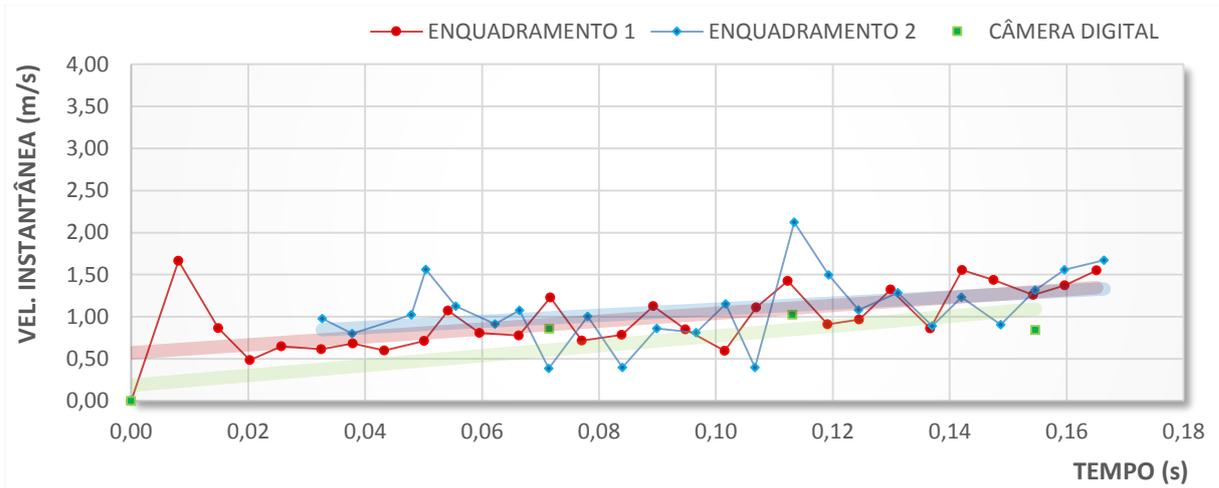
6.5 ANÁLISE DAS VELOCIDADES DA ONDA DE RUPTURA

Através da análise da propagação da frente de onda com o tempo (Figura 23 à Figura 25), foi possível estabelecer as velocidades instantâneas e a velocidade média da onda de ruptura formada nos experimentos.

Na Figura 26 até a Figura 28 são apresentados os valores de velocidade instantâneas para cada intervalo de tempo. O detalhamento fornecido pela câmera rápida permite observar que a velocidade instantânea se desenvolve entre picos altos e baixos, dentro de uma tendência. Para nível de barramento de 10 cm, a tendência é um aumento de velocidade instantânea, enquanto que para os barramentos de 15 e 20 cm, a tendência mostrou que a velocidade diminui

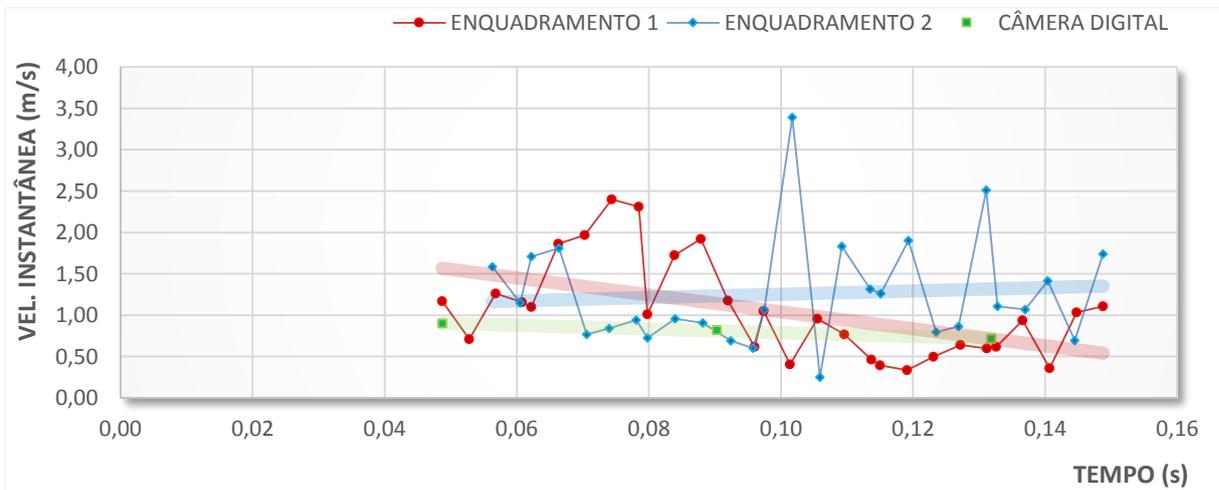
lentamente ao longo do tempo. Esse padrão de desenvolvimento da velocidade não é percebido se analisado unicamente com a câmera digital Nikon, que consegue capturar quadros a cada 0,4 segundos, mostrando apenas a tendência da velocidade e não como ele se desenvolve.

Figura 26 – Velocidades Instantâneas para o nível de água da barragem de 10 cm.



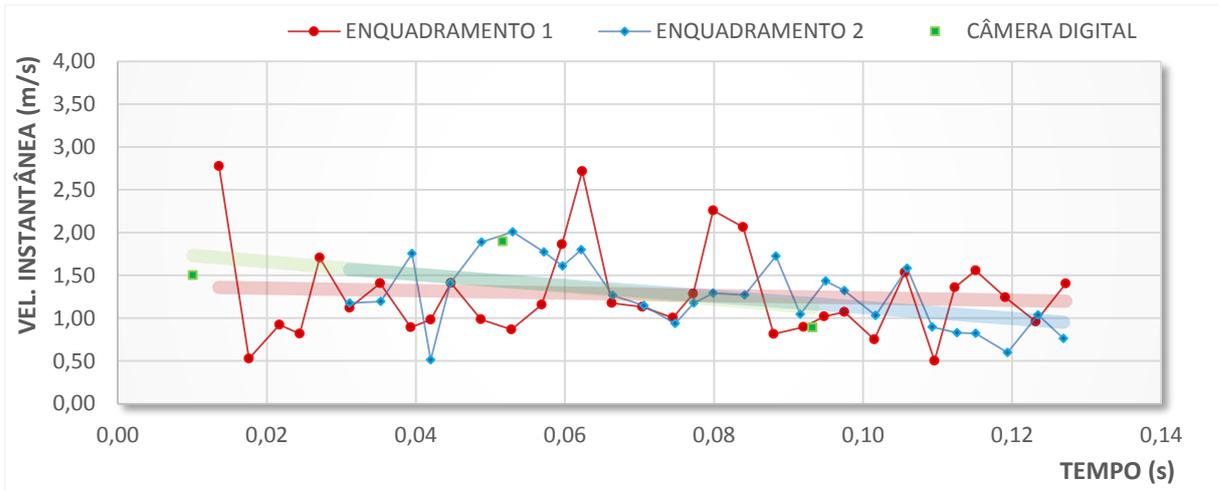
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 27 – Velocidades Instantâneas para o nível de água da barragem de 15 cm.



(fonte: elaborado pelo autor)

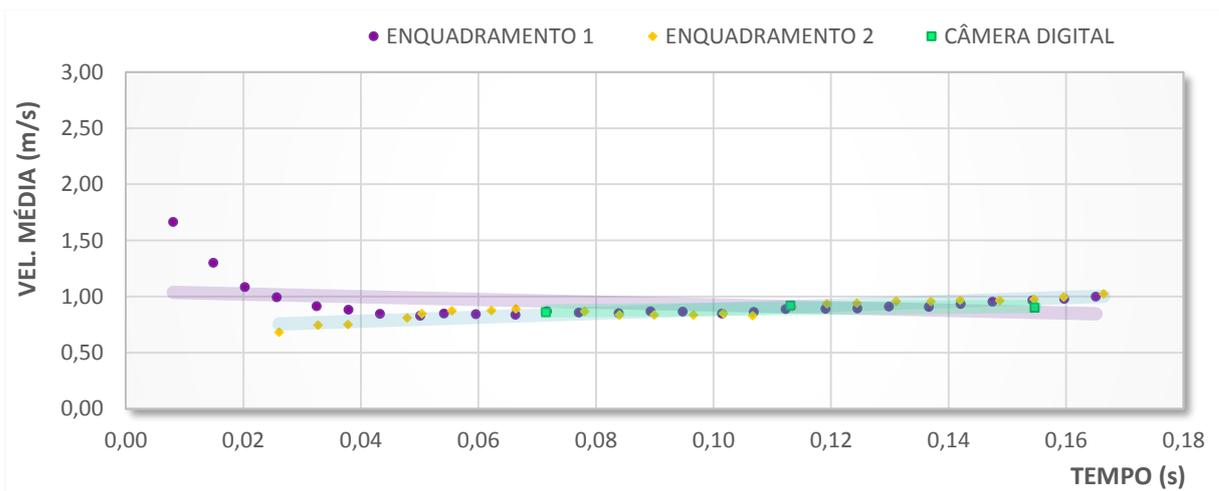
Figura 28 – Velocidades Instantâneas para o nível de água da barragem de 20 cm.



(fonte: elaborado pelo autor)

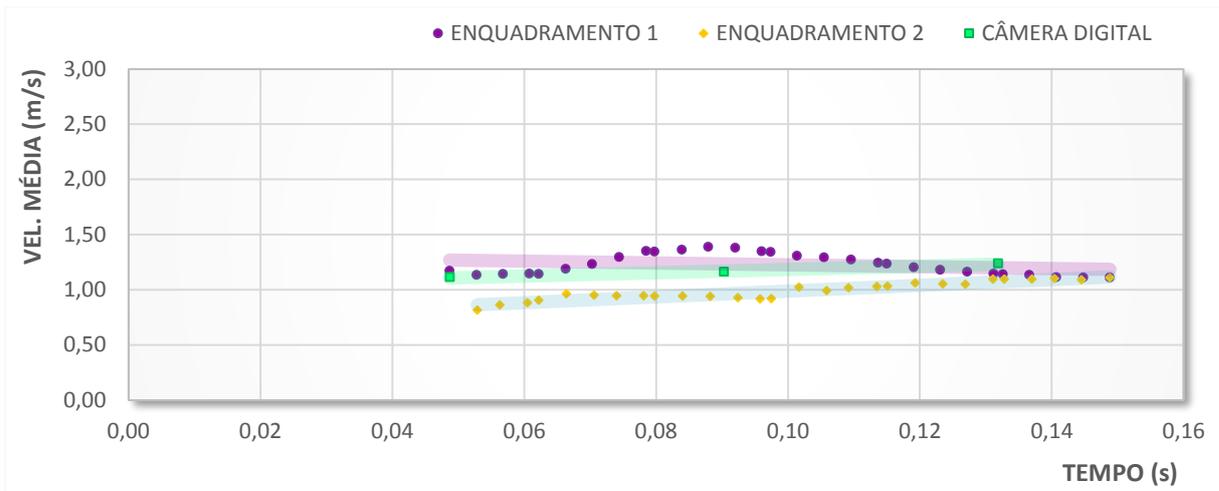
Em termos da média das velocidades instantâneas observadas nesses experimentos, se verificou que as mesmas aumentaram de acordo com a altura do nível de água a montante, conforme é apresentado desde a Figura 29 até a Figura 31. Essa tendência de aumento de velocidade se deve à maior energia potencial existente numa barragem de maior altura. Com o rompimento, essa energia potencial se transforma em energia cinética. O evento ocorreu em um intervalo de tempo de aproximadamente 15 décimos de segundo.

Figura 29 – Velocidades Médias para o nível de água da barragem de 10 cm.



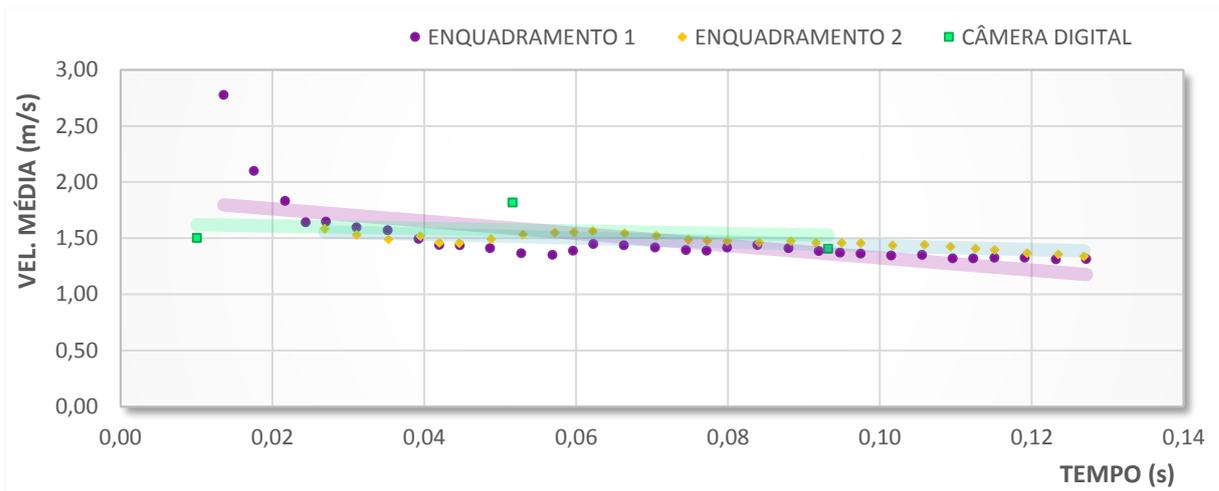
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 30 – Velocidades Médias para o nível de água da barragem de 15 cm.



(fonte: elaborado pelo autor)

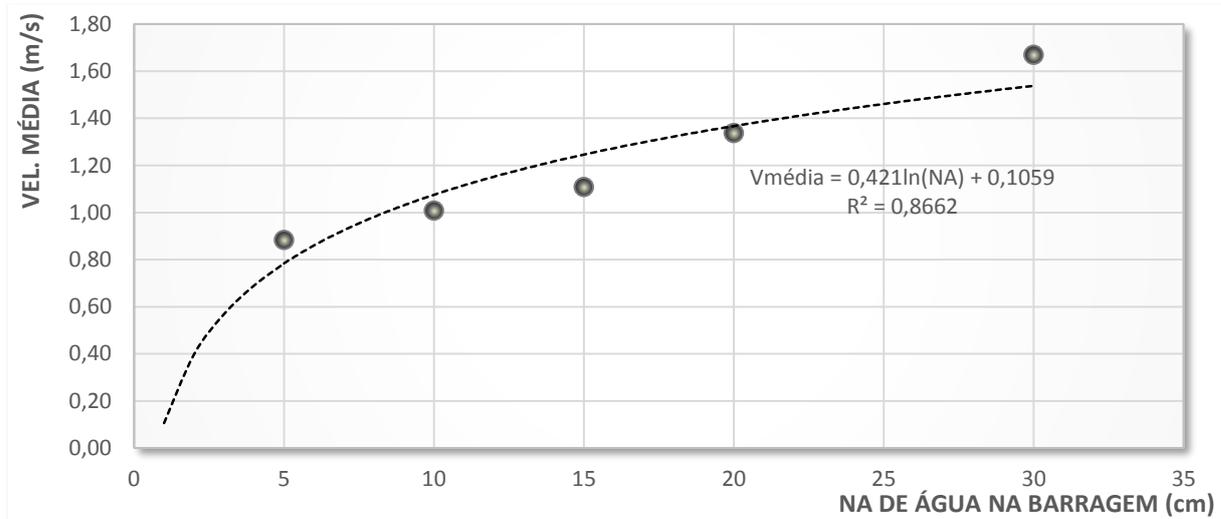
Figura 31 – Velocidades Médias para o nível de água da barragem de 20 cm.



(fonte: elaborado pelo autor)

Na Figura 32 é plotada a velocidade média quando a onda atinge 17 cm de comprimento em função do nível de água no barramento. Foi possível incluir os dados providos das filmagens com NA da barragem de 5 cm (enquadramento 2) e NA da barragem de 30 cm (enquadramento 6), estes dados não foram tratados da mesma forma que os cenários escolhidos no capítulo 6.1 (Tabela 5). Para as filmagens com 5 e 30 cm de água a montante, apenas foi definido o instante inicial da ruptura e o instante em que ela atinge o comprimento de 17 centímetros.

Figura 32 – Gráfico entre a Velocidade Média quando a onda atinge comprimento de 17 cm por nível de água no barramento.



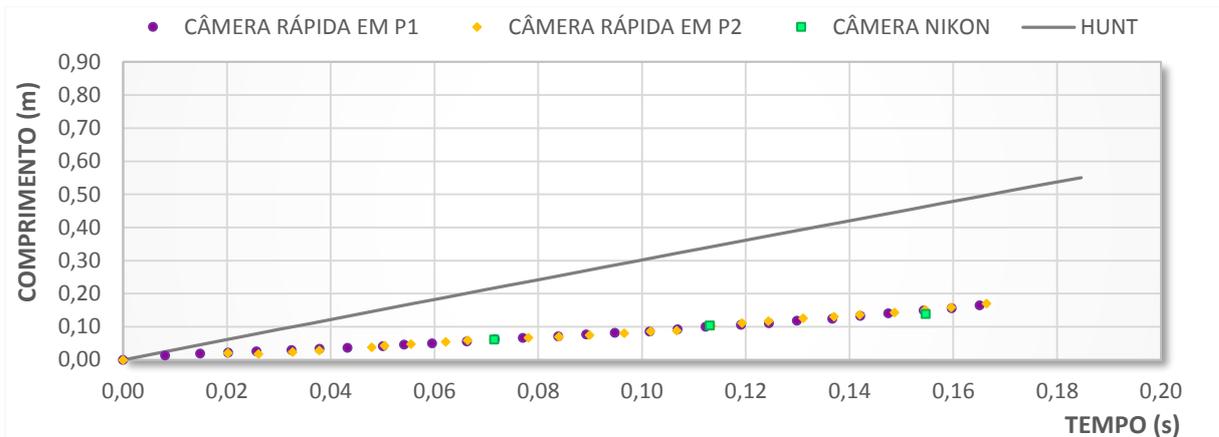
(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando esse gráfico, infere-se que existe uma relação próxima à logarítmica, entre a velocidade média da propagação da onda e a altura de barramento. Considerando que quando o NA da barragem é zero, a velocidade também é zero, nota-se que com o aumento do NA a velocidade também aumenta, mas a uma taxa maior no início e com uma tendência de estabilização ao longo do tempo. Salienta-se que um ponto que fugiu da tendência foi o de NA = 15 cm, ensaio este que apresentou alteração de geometria da onda.

6.6 COMPARAÇÃO COM EQUAÇÃO ANALÍTICA

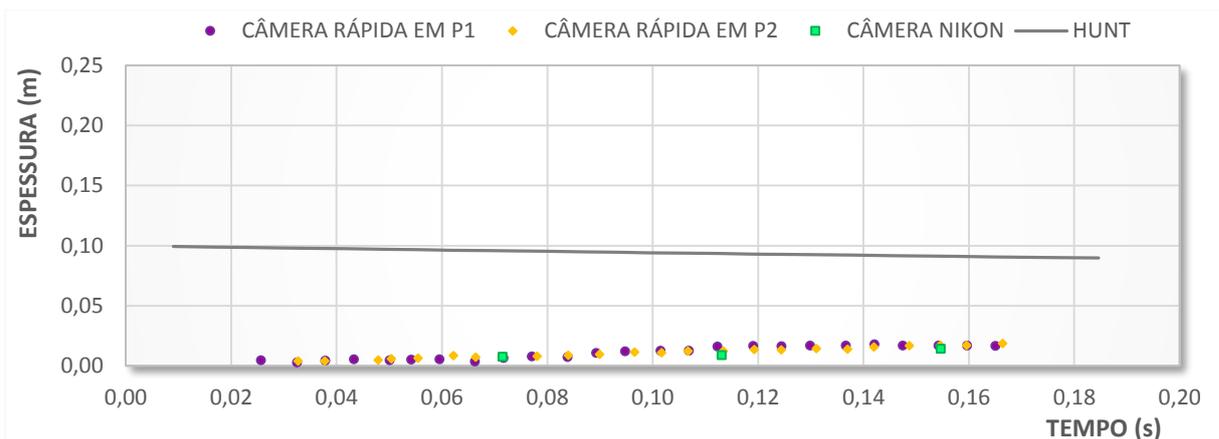
Os gráficos gerados a partir dos dados detalhados no apêndice, que foram construídos pela análise das imagens fornecidas pela câmera são comparados com os resultados advindos da equação de Hunt (item 3.2.2.3) e são expostos a partir da Figura 33 até a Figura 41.

Figura 33 – Resultados obtidos através da análise da ruptura da barragem de 10 cm, comprimento da onda por tempo.



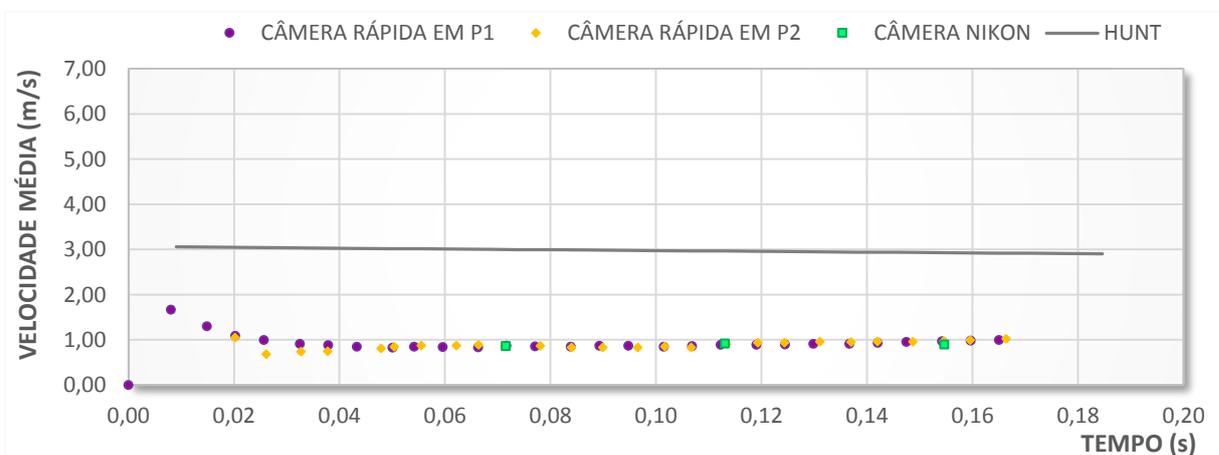
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 34 – Resultados obtidos através da análise da ruptura da barragem de 10 cm, espessura da onda por tempo.



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 35 – Resultados obtidos através da análise da ruptura da barragem de 10 cm, velocidade média da onda por tempo.

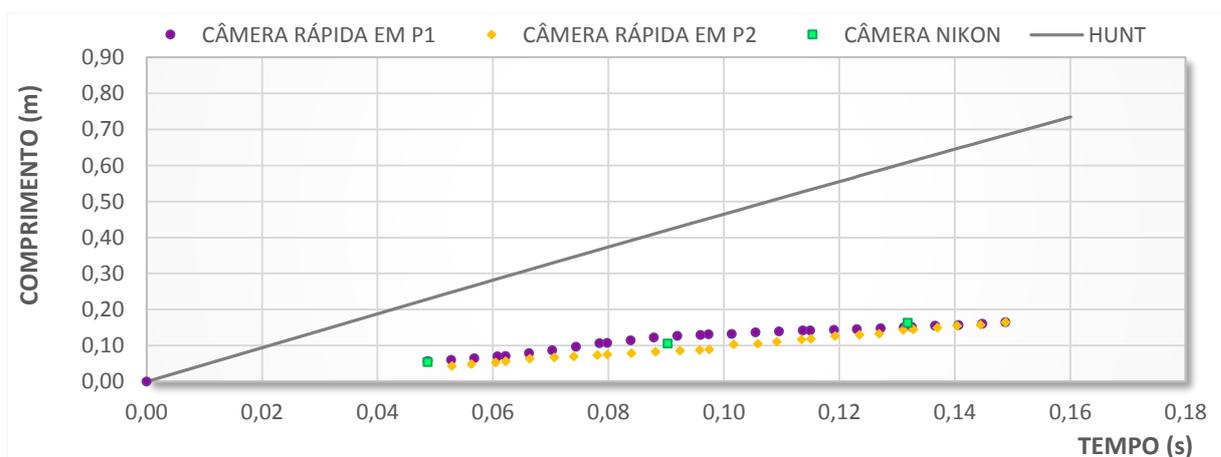


(fonte: elaborado pelo autor)

Pela análise dos gráficos referente ao NA de 10 cm, se verifica que os resultados obtidos com as equações de Hunt para prever o comportamento da onda de ruptura não foram compatíveis com o experimental (espessura, comprimento e velocidade). Nem considerando os valores absolutos, nem em tendência de movimento. A equação aponta que a espessura da onda tende a diminuir, enquanto que foi visto pela análise com câmera de alta velocidade, que a tendência dessa espessura é aumentar. Porém, ambas situações fazem sentido, pois a equação de Hunt, parte da premissa que a ruptura é instantânea, ou seja, no tempo zero já não existe mais barragem, assim, a sua espessura tende sempre a diminuir, enquanto o comprimento aumenta. Por outro lado, no experimento físico, a espessura da onda nos seus momentos iniciais é limitada pela velocidade de retirada da placa, tendendo assim a aumentar primeiro e depois diminuir.

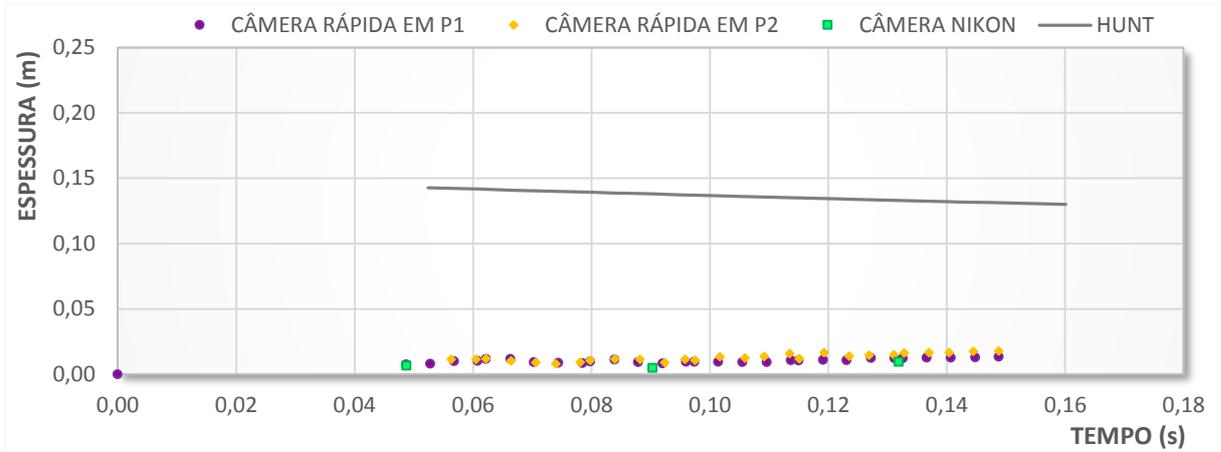
Segundo a equação de Hunt o comprimento da onda aumenta mais rapidamente do que o detectado pelo ensaio físico. A taxa de aumento do comprimento da onda, nada mais é do que a própria velocidade de propagação da onda e esta, por sua vez, é calculada a partir da velocidade em regime uniforme, para uma altura de 10 cm. Como o cenário dos ensaios não condizem com as condições de regime uniforme, os resultados de velocidade e comprimento de onda divergem dos calculados analiticamente. Não sendo aconselhável utilizar as equações de Hunt como forma de prever os resultados dos ensaios propostos neste trabalho.

Figura 36 – Resultados obtidos através da análise da ruptura da barragem de 15 cm, comprimento da onda por tempo.



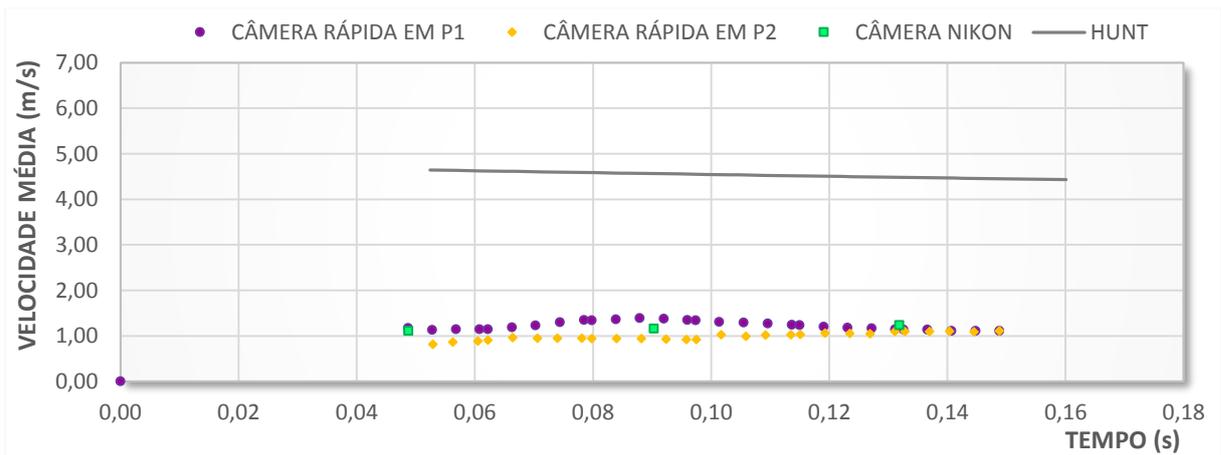
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 37 – Resultados obtidos através da análise da ruptura da barragem de 15 cm, espessura da onda por tempo.



(fonte: elaborado pelo autor)

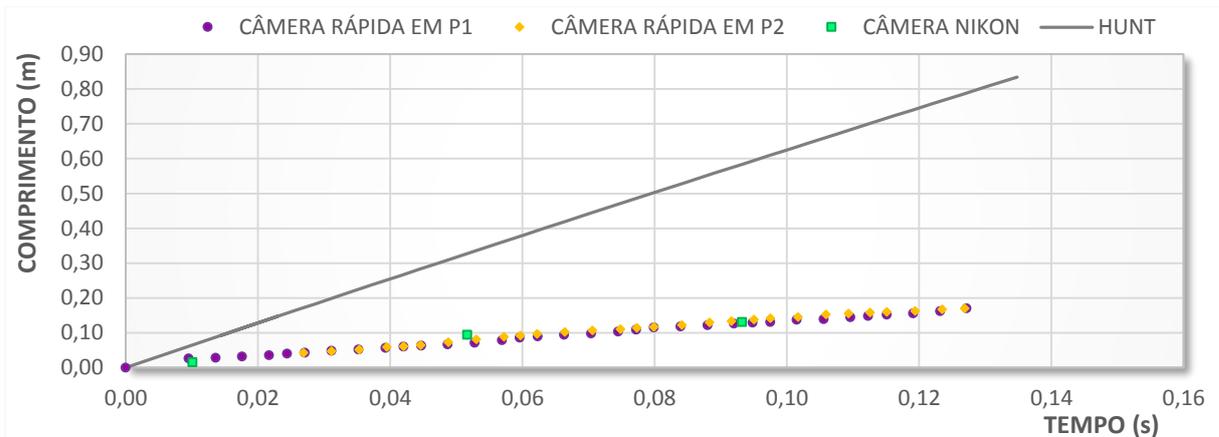
Figura 38 – Resultados obtidos através da análise da ruptura da barragem de 15 cm, velocidade média da onda por tempo.



(fonte: elaborado pelo autor)

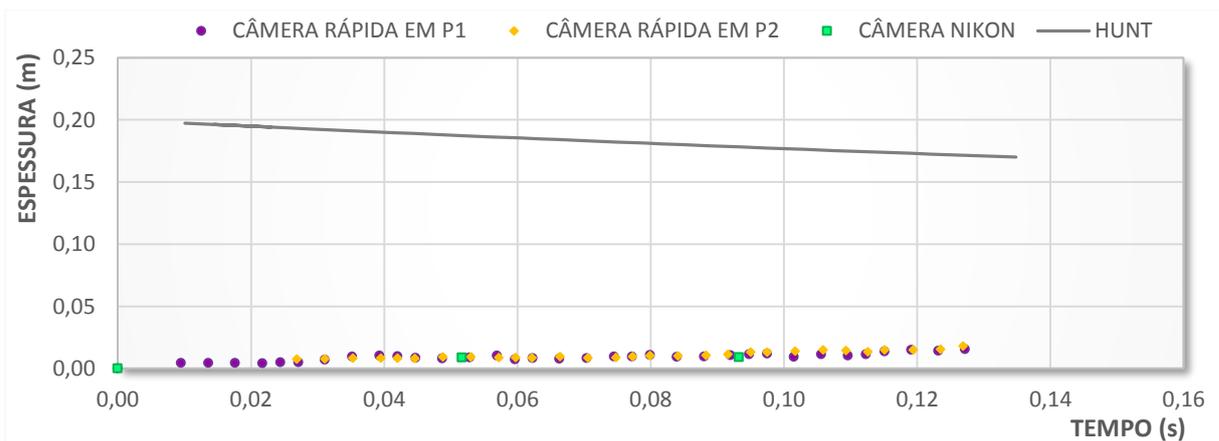
A equação analítica para barramento de 15 cm apresentou as mesmas diferenças em relação a espessura e comprimento que a barragem de 10 cm. A espessura apresenta valores maiores que tendem a diminuir e o comprimento tem uma taxa de crescimento maior que o registrado pelas câmeras. A velocidade calculada analiticamente é muito sensível no que tange ao aumento da barragem. Sua equação, com as condições de contorno impostas pelo ensaio físico, aponta que V_H equivale a praticamente 30 vezes o nível de água na barragem. Enquanto que o conferido pelas medições foi uma equivalência da velocidade média da onda no entorno de 5 a 10 vezes o nível de água na barragem.

Figura 39 – Resultados obtidos através da análise da ruptura da barragem de 20 cm, comprimento da onda por tempo.



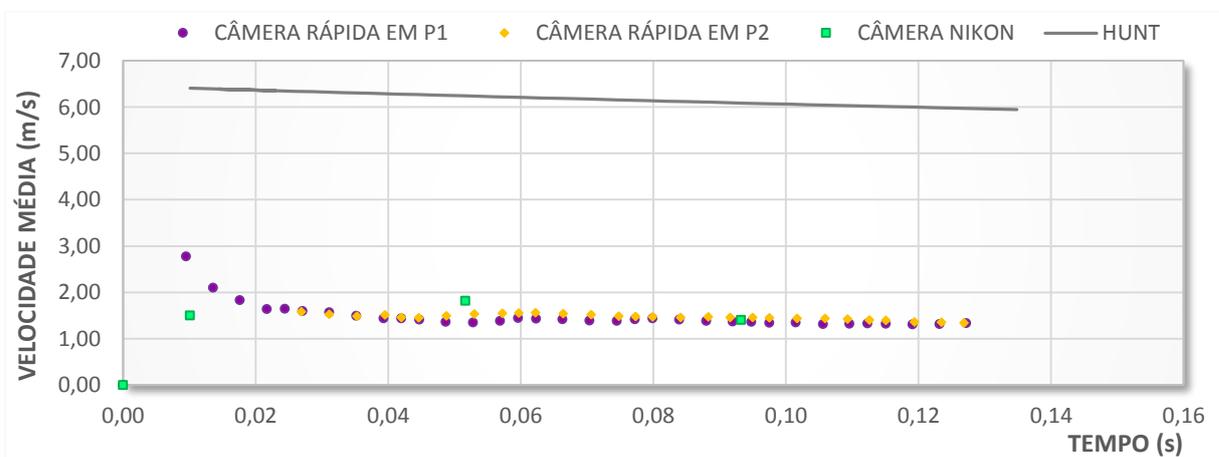
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 40 – Resultados obtidos através da análise da ruptura da barragem de 20 cm, espessura da onda por tempo.



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 41 – Resultados obtidos através da análise da ruptura da barragem de 20 cm, velocidade média da onda por tempo.



(fonte: elaborado pelo autor)

O terceiro cenário de altura de barramento confirma as considerações anteriores, onde a espessura diminui ao longo do tempo, o comprimento de onda aumenta a uma taxa mais elevada e a velocidade aumenta significativamente. Assim, é possível afirmar que a solução analítica de Hunt não deve ser aplicada para essas condições de contorno, devido à significativa diferença encontrada nos resultados aqui apresentados. Isso mostra a importância de existir um método diferenciado de análise que apresente resultados mais consistentes.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A premissa deste trabalho se confirma ao fim dos estudos realizados, ou seja, a ruptura instantânea de uma barragem ensaiada no modelo reduzido foi muito rápida para ser percebida com detalhe pela visão humana, sendo, portanto, essencial a busca de tecnologia que auxilie este processo. O método de análise enfocado foi a filmagem do fenômeno com uma câmera rápida. Esse método pode ser considerado eficiente devido aos seguintes aspectos:

- a) Apenas uma filmagem tem como resposta: velocidade, comprimento, e espessura da onda, formato geométrico da onda e tempo de retirada da placa;
- b) Minutos após a realização do ensaio, os dados brutos já estão disponíveis em arquivos digitais;
- c) Aparatos físicos, como a própria câmera, tripé e holofotes, são relativamente leves e também desmontáveis, podendo ser transportados com facilidade para qualquer lugar onde seja necessária a filmagem de algum ensaio em modelos reduzidos.

E a eficácia da câmera de alta velocidade se dá através da comparação com os resultados da câmera de velocidade normal, tendo ambas partindo das mesmas condições de eficiência, a câmera rápida utilizada oferece uma quantidade de pontos entre 125 a 300 vezes maior. Desse modo, se pode dizer que as análises realizadas com as informações geradas pela câmera de alta velocidade foram mais completas que as obtidas com uma câmera com taxa usual (24 fps) de aquisição de quadros por segundo.

Os enquadramentos da câmera, sendo o número um com maior área de captura e menos quadros por segundo e número dois, ao contrário, com mais quadros por segundo e menos área de captura, são complementares. O primeiro traz uma maior quantidade de informações sobre a progressão da onda enquanto o segundo registra uma informação de maior qualidade em relação a um tempo e espaço mais curtos. Porém, ambos enquadramentos esbarram na questão da resolução, para compreender de uma forma mais aguçada os estágios iniciais da formação de onda, que ocorrem na ordem de centésimos de segundo. É necessária uma quantidade maior de pixels por área. Em relação à progressão da onda, a resolução utilizada neste trabalho deu plenas condições de análise.

Os objetivos secundários, inerentes à busca da resposta para a questão principal deste trabalho, foram atingidos de tal forma, que agora é possível afirmar que existe uma metodologia de visualização do rompimento de barragem, exposto no capítulo 5. Também estão registrados em mídia mais de 20 cenários de ensaio de ruptura de barragem, sendo que 9 foram utilizados nesta pesquisa e todos estão disponíveis para futuras pesquisas, formando, assim, um acervo técnico de vídeos sobre o fenômeno. Das filmagens aqui analisadas foi possível distinguir os elementos geométricos e cinemáticos que caracterizam a onda de ruptura e confrontar esses dados com uma equação teórica, proposta por Hunt⁸ (1982) apud Chanson (2004), chegando a resultados que mostram que as condições de contorno aplicadas nos ensaios com modelo reduzido não respondem de forma consistente com a solução idealizada por Hunt.

Como principais dados obtidos pela super câmera, é válido salientar os seguintes:

- a) a abertura da placa teve uma velocidade próxima de 0,9 m/s, sendo a mais rápida realizada em 0,09 segundos e a mais demorada em 0,16 segundos;
- b) a estabilização do ponto de ruptura pelo qual a onda se propaga, proposto por Chanson (2004) para canais horizontais como 4/9 da altura do NA da barragem, pode também ser verificada para os experimentos realizados com inclinação de 1,2° com a horizontal.
- c) foi possível identificar, com considerável nível de detalhamento, o formato geométrico com o qual a onda se desenvolveu ao longo dos seus primeiros 17 cm de propagação. Com um início rápido e pouco definido a onda foi tomando formato de cunha ao longo de sua propagação.
- d) a partir dessa mesma análise da forma geométrica, também foi possível identificar as velocidades instantâneas com as quais a onda se propagou ao longo do tempo. Foi identificado que a onda avança em picos altos e baixos de velocidade, que ficam entre 0,3 e 3 m/s.
- e) a velocidade média quando a onda atinge 17 cm de comprimento aumenta de forma logarítmica em função do NA na barragem. O valor para um NA de 5 cm é de 0,9 m/s e para NA de 30 cm é aproximadamente 1,7 m/s.

⁸ HUNT, B. Asymptotic solution for dam-break problems, **Journal of Hydraulic Division**, Proceedings, ASCE, 108, No HY1, 115-126, 1982.

8 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após estudar as nuances e vislumbrar as possibilidades de que a utilização da câmera de alta velocidade é capaz, é possível ver este trabalho como um passo inicial para uma sequência de estudos e pesquisas no âmbito de rompimento de barragens. E, para tal, existem algumas recomendações observadas para futuros ensaios:

- a) aumento do comprimento do canal a jusante;
- b) utilização de um sistema com peso e roldana para retirada da placa a uma velocidade pré-estabelecida e constante em todos os ensaios;

Seguindo este caminho, é notável que este experimento ainda pode ser incrementado de diferentes formas, das quais se destacam:

- a) alteração da declividade, inclusive realizando ensaios para canal plano.
- b) realização do ensaio com diferentes níveis a jusante, e não apenas se restringir ao enquadramento da área próxima à retirada da comporta e, sim, acompanhar a formação e progressão da onda.
- c) alteração da rugosidade do canal.
- d) introdução de sedimentos na água, gerando uma mistura com propriedades diferentes da água utilizada neste ensaio.

REFERÊNCIAS

ABRANTES, J. K.; PAULA, I. B. de; AZEVEDO, L. F. A. Medição de Escoamentos Turbulentos Utilizando Velocimetria por Imagem de Partículas. In: CARMO, B. S.; ASSI, G. R. da S.; MENEGHINI, J. R.; ARANHA, J. A. P.; VOLPE, E. V. (Ed.) **Turbulência**. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2012. v. 8. p. 133-210.

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://lhe.epfl.ch/cours/masterGC/cours-hydraulique.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2014

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: 25 nov. 2014.

BRASIL. **Decreto Lei 12.334**, de 20 de setembro de 2010. Dispõe sobre a Política Nacional de Segurança de Barragens. Brasília, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm>. Acesso em: 25 set. 2010.

CHANSON, H. **The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction**, 2 ed. Oxford: Elsevier, 2004.

COOKE, J. **High Speed Photography**: a guide to imaging rapid movement and transient events." [S. l.]: HiddenWorlds, 2005. Disponível em: <<http://www.hidden-worlds.com/highspeed/text/welcome.htm>> Acesso em: 29 maio 2015.

DALBELLO, E. **O que é a velocidade na fotografia?** [S. l.]: Photopro, 2013. Disponível em: <<http://www.photopro.com.br/imagens/raiz/EDB2/velocidade.jpg>>. Acesso em: 29 maio 2015.

FASTEC IMAGING. **Operator's Manual**: HiSpec 1 & 2 Cameras, HiSpec 4 & 5 Cameras, Director 2 Software, Digital Motion Analysis Recorders. San Diego: Fastec Imaging Corp., [20--], version 1.1.0. Disponível em: <http://downloads.techimaging.com/docs/HiSpec_Director_2_Operators_Manual_1.03.pdf>. Acesso em: 29 maio 2015.

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.

HSU, H. C.; FREYERMUTH, A. T.; HSU, T. J.; HWUNG, H. H. Numerical and experimental study of dam-break flood propagation and its implication to sediment erosion. **Coastal Engineering**, [S. l.], n. 33, 2012. Disponível em: <https://journals.tdl.org/icce/index.php/icce/article/view/6495/pdf_500>. Acesso em 25 nov. 2014.

KLIN, S. J. **Film notes for Flow Visualization**. Stanford: National Committee for Fluid Mechanics Films, 1969. Disponível em: <<http://web.mit.edu/hml/ncfmf/05FV.pdf>>. Acesso em 25 nov. 2014.

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 nov. 2014.

MANSUR, S. S.; VIEIRA, E. Del R. Visualização Experimental de Escoamentos⁹. 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.

MOTA, T.; MENEZES, E. Soterramento de barragem de mineradora mata trabalhadores em Itabirito (MG). **R7 Notícias**, 10 set. 2014. Não paginado. Disponível em: <<http://noticias.r7.com/minas-gerais/soterramento-em-barragem-de-mineradora-mata-trabalhadores-em-itabirito-mg-10092014>>. Acesso em: 25 nov. 2014.

NEVES, M. C. D.; PEREIRA, R. F. Adaptando uma câmera fotográfica manual simples para fotografar o céu. **Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia**. [S. l.], n. 4, p. 27-45, 2007. Disponível em: <http://www.relea.ufscar.br/num4/A2_n4.pdf>. Acesso em 25 nov. 2014.

OURIQUE, P. A.; GIOVANNINI, O.; CATELLI, F. Fotografando estrelas com uma câmera digital. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [S. l.], v. 32, n. 1, 2010. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/321302.pdf>>. Acesso em 25 nov. 2014.

REGINA, C. **Aprenda a fotografar em 7 lições**. 2. ed. [S. l.: s. n.], 2013. Disponível em: <http://www.dicasdefotografia.com.br/downloads/aprenda_a_fotografar_em_7_licoes.pdf>. Acesso em 19 nov. 2014.

RIO PARDO rompe 4 barragens e inunda 9 cidades. **Folha de São Paulo**, São Paulo, ano 56, n. 17.456, p. 1, 21 jan. 1977. Disponível em: <<http://acervo.folha.com.br/fsp/1977/01/21/2/>> Acesso em: 25 nov. 2014.

ROSE, K. J. Rapidez de reflexos. **Super Interessante**, Local, ed. 24, p. set. 1989. Disponível em: <<http://super.abril.com.br/saude/rapidez-reflexos-439150.shtml>>. Acesso em: 29 maio 2015.

SANTOS, L. P. Luz, Câmera e Ausência de luz. 2014. 18 f. **e-Com**, [S. l.], v. 7, n.1, 2014. Disponível em: <<http://revistas.unibh.br/index.php/ecom/article/view/1055/700>>. Acesso em: 25 nov. 2014.

⁹ 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.

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. Disponível em: <<http://goo.gl/daU7Ee>>¹⁰ Acesso em: 25 nov. 2014.

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 25 nov. 2014.

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: 25 nov. 2014.

¹⁰ Também disponível em:

<<http://journals.cambridge.org/download.php?file=%2FFLM%2FFLM374%2FS0022112098001918a.pdf&code=8486c2492a28f676bcc11dafcdd37ae9>>

APÊNDICES

Aqui são expostas as tabelas que geraram os gráficos da Figura 33 à Figura 41. Essas tabelas comparam os resultados obtidos através da solução analítica proposta por Hunt com os dados provindos diretamente da análise dos vídeos feitos pelas câmera rápida e câmera digital normal.

Tabela 7 – Resultados obtidos através da aplicação da Equação de Hunt para uma altura de barramento de 10 cm

HUNT				CÂMERA RÁPIDA EM P1				CÂMERA RÁPIDA EM P2				CÂMERA NIKON			
t	xs	ds	v	t	xs	ds	v	t	xs	ds	v	t	xs	ds	v
(s)	(m)	(m)	(m/s)	(s)	(m)	(m)	(m/s)	(s)	(m)	(m)	(m/s)	(s)	(m)	(m)	(m/s)
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,0090	0,0276	0,0994	3,0570	0,0081	0,0135		1,6627	0,0084							
0,0166	0,0507	0,0990	3,0498	0,0149	0,0194		1,2987	0,0151							
0,0226	0,0689	0,0986	3,0442	0,0203	0,0220		1,0828	0,0202	0,0213		1,0527				
0,0301	0,0918	0,0982	3,0372	0,0257	0,0255	0,0045	0,9912	0,0261	0,0178		0,6826				
0,0361	0,1100	0,0978	3,0317	0,0325	0,0296	0,0026	0,9122	0,0327	0,0243	0,0040	0,7426				
0,0421	0,1281	0,0974	3,0261	0,0379	0,0333	0,0043	0,8796	0,0378	0,0284	0,0041	0,7505				
0,0496	0,1509	0,0970	3,0192	0,0433	0,0366	0,0054	0,8446	0,0479	0,0387	0,0047	0,8083				
0,0556	0,1690	0,0967	3,0138	0,0501	0,0414	0,0045	0,8265	0,0504	0,0426	0,0058	0,8457				
0,0616	0,1870	0,0963	3,0084	0,0542	0,0458	0,0052	0,8451	0,0555	0,0484	0,0065	0,8713				
0,0691	0,2096	0,0959	3,0016	0,0596	0,0502	0,0054	0,8418	0,0622	0,0545	0,0084	0,8761				
0,0737	0,2233	0,0956	2,9975	0,0663	0,0554	0,0036	0,8353	0,0664	0,0590	0,0071	0,8888				
0,0796	0,2412	0,0953	2,9922	0,0717	0,0620	0,0065	0,8650	0,0714	0,0610	0,0075	0,8537	0,0716	0,0614	0,0075	0,8582
0,0871	0,2634	0,0949	2,9856	0,0771	0,0659	0,0077	0,8545	0,0781	0,0677	0,0081	0,8666				
0,0931	0,2813	0,0945	2,9804	0,0839	0,0712	0,0073	0,8488	0,0840	0,0700	0,0088	0,8337				
0,0991	0,2991	0,0942	2,9752	0,0893	0,0773	0,0106	0,8656	0,0899	0,0751	0,0095	0,8354				
0,1066	0,3215	0,0938	2,9686	0,0948	0,0820	0,0119	0,8646	0,0966	0,0805	0,0115	0,8337				
0,1128	0,3400	0,0934	2,9632	0,1015	0,0860	0,0127	0,8470	0,1017	0,0864	0,0109	0,8497				
0,1187	0,3573	0,0931	2,9582	0,1069	0,0920	0,0126	0,8603	0,1067	0,0884	0,0121	0,8285				
0,1261	0,3793	0,0927	2,9519	0,1123	0,0997	0,0159	0,8875	0,1134	0,1026	0,0123	0,9051				
0,1321	0,3969	0,0924	2,9468	0,1191	0,1058	0,0165	0,8887	0,1193	0,1115	0,0136	0,9344	0,1131	0,1039	0,0089	0,9189
0,1381	0,4146	0,0921	2,9417	0,1245	0,1111	0,0163	0,8920	0,1244	0,1170	0,0133	0,9404				
0,1456	0,4367	0,0917	2,9354	0,1299	0,1182	0,0169	0,9100	0,1311	0,1256	0,0143	0,9581				
0,1516	0,4543	0,0914	2,9304	0,1367	0,1240	0,0168	0,9074	0,1370	0,1309	0,0139	0,9551				
0,1576	0,4718	0,0911	2,9254	0,1421	0,1324	0,0180	0,9321	0,1420	0,1370	0,0158	0,9649				
0,1651	0,4938	0,0907	2,9192	0,1475	0,1402	0,0167	0,9506	0,1487	0,1431	0,0169	0,9622				
0,1711	0,5113	0,0904	2,9143	0,1543	0,1488	0,0169	0,9642	0,1546	0,1509	0,0171	0,9758				
0,1771	0,5287	0,0901	2,9094	0,1597	0,1562	0,0169	0,9780	0,1596	0,1586	0,0171	0,9940	0,1547	0,1390	0,0141	0,8986
0,1846	0,5506	0,0897	2,9033	0,1651	0,1646	0,0165	0,9968	0,1664	0,1700	0,0186	1,0217				

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 8 – Resultados obtidos através da aplicação da Equação de Hunt para uma altura de barramento de 15 cm

HUNT				CÂMERA RÁPIDA EM P1				CÂMERA RÁPIDA EM P2				CÂMERA NIKON			
t	xs	ds	v	t	xs	ds	v	t	xs	ds	v	t	xs	ds	v
(s)	(m)	(m)	(m/s)	(s)	(m)	(m)	(m/s)	(s)	(m)	(m)	(m/s)	(s)	(m)	(m)	(m/s)
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,0524	0,2464	0,1428	4,6414	0,0487	0,0569	0,0078	1,1690	0,0488				0,0488	0,0542	0,0067	1,1114
0,0568	0,2668	0,1422	4,6321	0,0528	0,0598	0,0081	1,1334	0,0529	0,0431		0,8152				
0,0611	0,2867	0,1416	4,6230	0,0568	0,0649	0,0101	1,1423	0,0563	0,0485	0,0116	0,8619				
0,0654	0,3066	0,1411	4,6139	0,0608	0,0695	0,0104	1,1432	0,0605	0,0533	0,0117	0,8818				
0,0669	0,3135	0,1409	4,6108	0,0622	0,0711	0,0118	1,1423	0,0622	0,0563	0,0120	0,9044				
0,0714	0,3338	0,1403	4,6016	0,0663	0,0787	0,0118	1,1869	0,0664	0,0639	0,0103	0,9618				
0,0757	0,3536	0,1398	4,5927	0,0703	0,0866	0,0093	1,2313	0,0706	0,0671	0,0091	0,9503				
0,0801	0,3738	0,1392	4,5836	0,0744	0,0964	0,0088	1,2957	0,0740	0,0700	0,0080	0,9453				
0,0845	0,3940	0,1387	4,5746	0,0785	0,1059	0,0086	1,3487	0,0781	0,0738	0,0094	0,9452				
0,0859	0,4004	0,1385	4,5717	0,0798	0,1072	0,0100	1,3433	0,0798	0,0751	0,0109	0,9405				
0,0903	0,4206	0,1380	4,5628	0,0839	0,1143	0,0113	1,3618	0,0840	0,0791	0,0119	0,9414				
0,0946	0,4402	0,1374	4,5541	0,0879	0,1219	0,0093	1,3874	0,0882	0,0829	0,0115	0,9398	0,0903	0,1049	0,0049	1,1615
0,0990	0,4602	0,1369	4,5452	0,0920	0,1268	0,0084	1,3781	0,0924	0,0858	0,0092	0,9284				
0,1033	0,4798	0,1364	4,5367	0,0960	0,1293	0,0096	1,3464	0,0958	0,0878	0,0117	0,9168				
0,1048	0,4866	0,1362	4,5337	0,0974	0,1307	0,0097	1,3421	0,0975	0,0896	0,0109	0,9194				
0,1091	0,5061	0,1357	4,5252	0,1014	0,1323	0,0096	1,3052	0,1017	0,1039	0,0135	1,0215				
0,1135	0,5260	0,1352	4,5165	0,1055	0,1363	0,0094	1,2916	0,1059	0,1049	0,0125	0,9909				
0,1179	0,5459	0,1347	4,5079	0,1096	0,1394	0,0093	1,2720	0,1092	0,1110	0,0138	1,0164				
0,1223	0,5658	0,1342	4,4993	0,1137	0,1413	0,0108	1,2429	0,1135	0,1166	0,0159	1,0277				
0,1237	0,5721	0,1340	4,4966	0,1150	0,1418	0,0106	1,2333	0,1151	0,1187	0,0120	1,0310				
0,1281	0,5919	0,1335	4,4881	0,1191	0,1432	0,0111	1,2024	0,1193	0,1267	0,0167	1,0616				
0,1324	0,6112	0,1330	4,4799	0,1231	0,1452	0,0107	1,1795	0,1235	0,1300	0,0140	1,0525				
0,1369	0,6309	0,1325	4,4715	0,1272	0,1478	0,0126	1,1622	0,1269	0,1329	0,0146	1,0475	0,1319	0,1630	0,0096	1,2359
0,1412	0,6501	0,1320	4,4633	0,1312	0,1502	0,0123	1,1450	0,1311	0,1435	0,0151	1,0944				
0,1427	0,6568	0,1318	4,4605	0,1326	0,1511	0,0123	1,1395	0,1328	0,1454	0,0164	1,0946				
0,1470	0,6760	0,1314	4,4524	0,1366	0,1549	0,0128	1,1336	0,1370	0,1498	0,0168	1,0938				
0,1514	0,6956	0,1309	4,4442	0,1407	0,1563	0,0128	1,1111	0,1404	0,1547	0,0167	1,1015				
0,1558	0,7152	0,1304	4,4360	0,1448	0,1606	0,0131	1,1089	0,1445	0,1575	0,0178	1,0900				
0,1601	0,7343	0,1299	4,4280	0,1488	0,1650	0,0135	1,1089	0,1488	0,1650	0,0178	1,1089				

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 9 – Resultados obtidos através da aplicação da Equação de Hunt para uma altura de barramento de 20 cm

HUNT				CÂMERA RÁPIDA EM P1				CÂMERA RÁPIDA EM P2				CÂMERA NIKON			
t	xs	ds	v	t	xs	ds	v	t	xs	ds	v	t	xs	ds	v
(s)	(m)	(m)	(m/s)	(s)	(m)	(m)	(m/s)	(s)	(m)	(m)	(m/s)	(s)	(m)	(m)	(m/s)
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,0101	0,0648	0,1974	6,4074	0,0095	0,0264	0,0044	2,7748					0,0101	0,0151		1,4993
0,0230	0,1473	0,1941	6,3545	0,0136	0,0285	0,0044	2,0974								
0,0144	0,0926	0,1963	6,3895	0,0176	0,0322	0,0044	1,8305								
0,0187	0,1196	0,1952	6,3722	0,0217	0,0356	0,0042	1,6395								
0,0259	0,1655	0,1934	6,3430	0,0244	0,0402	0,0049	1,6467								
0,0287	0,1836	0,1927	6,3315	0,0271	0,0432	0,0049	1,5943	0,0269	0,0426	0,0074	1,5835				
0,0330	0,2104	0,1917	6,3146	0,0311	0,0488	0,0070	1,5703	0,0311	0,0475	0,0078	1,5285				
0,0373	0,2378	0,1907	6,2975	0,0352	0,0525	0,0096	1,4914	0,0353	0,0526	0,0082	1,4888				
0,0417	0,2651	0,1896	6,2805	0,0393	0,0565	0,0102	1,4383	0,0395	0,0599	0,0082	1,5170				
0,0445	0,2831	0,1890	6,2693	0,0420	0,0603	0,0097	1,4366	0,0420	0,0612	0,0083	1,4573				
0,0474	0,3010	0,1883	6,2583	0,0447	0,0630	0,0084	1,4094	0,0446	0,0649	0,0081	1,4544				
0,0516	0,3275	0,1873	6,2420	0,0487	0,0665	0,0080	1,3649	0,0488	0,0728	0,0093	1,4917				
0,0560	0,3546	0,1863	6,2254	0,0528	0,0712	0,0087	1,3489	0,0530	0,0812	0,0092	1,5325	0,0516	0,0939	0,0087	1,8173
0,0603	0,3816	0,1854	6,2090	0,0569	0,0789	0,0103	1,3858	0,0572	0,0887	0,0088	1,5502				
0,0632	0,3994	0,1847	6,1982	0,0596	0,0862	0,0074	1,4461	0,0597	0,0927	0,0089	1,5526				
0,0660	0,4171	0,1841	6,1876	0,0623	0,0894	0,0083	1,4345	0,0622	0,0972	0,0086	1,5624				
0,0703	0,4433	0,1831	6,1718	0,0663	0,0939	0,0079	1,4161	0,0664	0,1025	0,0097	1,5436				
0,0746	0,4701	0,1822	6,1558	0,0704	0,0980	0,0082	1,3922	0,0706	0,1073	0,0085	1,5199				
0,0790	0,4968	0,1813	6,1400	0,0745	0,1033	0,0095	1,3862	0,0748	0,1112	0,0088	1,4872				
0,0818	0,5144	0,1806	6,1296	0,0772	0,1094	0,0097	1,4167	0,0773	0,1142	0,0096	1,4772				
0,0847	0,5319	0,1800	6,1193	0,0799	0,1149	0,0109	1,4385	0,0799	0,1175	0,0102	1,4712				
0,0889	0,5578	0,1791	6,1041	0,0839	0,1182	0,0093	1,4089	0,0841	0,1229	0,0101	1,4611				
0,0933	0,5843	0,1782	6,0887	0,0880	0,1219	0,0095	1,3851	0,0883	0,1301	0,0107	1,4737				
0,0975	0,6101	0,1774	6,0737	0,0920	0,1260	0,0106	1,3692	0,0916	0,1336	0,0113	1,4582	0,0932	0,1309	0,0090	1,4043
0,1005	0,6281	0,1768	6,0633	0,0948	0,1290	0,0115	1,3603	0,0950	0,1384	0,0133	1,4573				
0,1034	0,6455	0,1762	6,0533	0,0975	0,1310	0,0118	1,3435	0,0975	0,1418	0,0133	1,4539				
0,1076	0,6711	0,1753	6,0387	0,1015	0,1371	0,0094	1,3510	0,1017	0,1461	0,0138	1,4365				
0,1119	0,6973	0,1745	6,0237	0,1056	0,1392	0,0113	1,3180	0,1059	0,1527	0,0151	1,4422				
0,1162	0,7228	0,1736	6,0093	0,1096	0,1446	0,0103	1,3195	0,1093	0,1558	0,0146	1,4252				
0,1190	0,7400	0,1731	5,9996	0,1123	0,1488	0,0112	1,3252	0,1126	0,1585	0,0134	1,4077				
0,1220	0,7578	0,1725	5,9896	0,1151	0,1523	0,0137	1,3232	0,1151	0,1606	0,0149	1,3951				
0,1263	0,7832	0,1717	5,9754	0,1191	0,1561	0,0150	1,3111	0,1194	0,1631	0,0150	1,3663				
0,1306	0,8091	0,1708	5,9610	0,1232	0,1619	0,0142	1,3141	0,1235	0,1674	0,0154	1,3555				
0,1348	0,8343	0,1700	5,9470	0,1272	0,1700	0,0154	1,3365	0,1269	0,1700	0,0179	1,3396				

(fonte: elaborado pelo autor)