

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS  
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

MATHEUS ROCHA DE SOUSA

**MEDIÇÃO DA ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE D'ÁGUA EM EXPERIMENTOS 2D  
USANDO ANÁLISE DE IMAGENS: UMA FERRAMENTA DE VALIDAÇÃO NA  
ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA**

Manaus  
2022

MATHEUS ROCHA DE SOUSA

**MEDIÇÃO DA ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE D'ÁGUA EM EXPERIMENTOS 2D  
USANDO ANÁLISE DE IMAGENS: UMA FERRAMENTA DE VALIDAÇÃO NA  
ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Naval da  
Escola Superior de Tecnologia da Universidade  
do Estado do Amazonas, para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Naval.

Orientador: Prof. Dr. Jassiel Vladimir  
Hernández Fontes

Manaus  
2022

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

**Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.**

S725m Sousa, Matheus Rocha  
m Medição da elevação da superfície d'água em experimentos 2D usando análise em imagens: uma ferramenta de validação na engenharia naval e oceânica / Matheus Rocha Sousa. Manaus : [s.n], 2022.  
64 f.: color.; 7 cm.

TCC - Graduação em Engenharia Naval - Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2022.

Inclui bibliografia

Orientador: Jassiel Vladimir Hernández Fontes

1. Elevação d'água. 2. análise por imagens. 3. erro.  
4. experimentos hidrodinâmicos 2D. I. Jassiel Vladimir Hernández Fontes (Orient.). II. Universidade do Estado do Amazonas. III. Medição da elevação da superfície d'água em experimentos 2D usando análise em imagens: uma ferramenta de validação na engenharia naval e oceânica

**Elaborado por Jeane Macelino Galves - CRB-11/463**

MATHEUS ROCHA DE SOUSA

**MEDIÇÃO DA ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE D'ÁGUA EM EXPERIMENTOS 2D  
USANDO ANÁLISE DE IMAGENS: UMA FERRAMENTA DE VALIDAÇÃO NA  
ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Naval da  
Escola Superior de Tecnologia da Universidade  
do Estado do Amazonas, para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Naval.

Aprovado em 11 de outubro de 2022.

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Jassiel Vladimir Hernández Fontes  
Universidade do Estado do Amazonas

---

Prof. Dr. José Ramón Hechavarría Pérez  
Universidade do Estado do Amazonas

---

Prof. Me. Harlysson Wheiny Silva Maia  
Universidade do Estado do Amazonas

---

Dr. Irving David Hernández  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Manaus  
2022

À minha vó e minha mãe que agora me  
acompanham do céu.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me ajudar a aguentar o longo caminho que eu levei até chegar aqui.

Agradeço a minha vó por ter me ensinado a ser forte nos momentos mais difíceis e a minha mãe que me ensinou a manter sempre o sorriso no rosto. Queria muito que vocês duas estivessem aqui.

Agradeço ao meu irmão, minha cunhada e a Sebastiana e demais familiares e vizinhos por todo o carinho e suporte que tiveram comigo.

Agradeço à minha sobrinha Laura Helena que tenho o imenso carinho de cuidar e que é minha principal razão para continuar lutando.

Aos meus amigos Karol, Polyana, Kalena, Kleyphide, Caio, Lorena, Riara, Arthur e Lucas pelos bons momentos.

Agradeço a minha gatinha Gabriela que me espera chegar em casa todos os dias.

Agradeço ao meu professor Jassiel Fontes que com certeza somou imensamente o curso de Engenharia Naval e me auxiliou em grande parte da minha trajetória acadêmica.

Este trabalho foi parcialmente apoiado pelo Governo do Estado do Amazonas com recursos da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas – FAPEAM por meio do projeto de pesquisa intitulado “Acidentes com embarcações na região amazônica: identificação de causas e alternativas de prevenção”, chamada N°010/2021 – CT&I Áreas Prioritárias.

A todos vocês, o meu muito obrigado!

## RESUMO

Na Engenharia Naval e Oceânica, diversos fenômenos complexos de interação fluido-estrutura são comumente avaliados por meio de experimentos hidrodinâmicos bidimensionais simplificados. As medições obtidas por meio desses experimentos, tais como a evolução espacial e temporal da elevação da superfície d'água, são de grande importância para a validação de modelos analíticos e numéricos. Com a evolução constante dos dispositivos ópticos e a contínua diminuição do seu custo, a medição baseada em imagens tem sido aplicada para quantificar o movimento da superfície d'água em experimentos, utilizando sensores "virtuais". No entanto, ainda podem existir erros na medição final, causados por diversos tipos de distorções nas imagens utilizadas. O estudo destes erros nas medições é relevante para a determinação do nível de confiabilidade dos dados gerados a partir de imagens. O presente trabalho consiste na avaliação de erros devido a distorções de imagens nas medições de séries temporais de elevação da superfície d'água em ensaios hidrodinâmicos bidimensionais. Foi avaliada a influência da variação de diversas distorções das imagens nas medições da elevação da superfície d'água, incluindo variação da projeção azimutal, foco, ruído e escala. Para isto, foram utilizados vídeos de experimentos hidrodinâmicos disponíveis na literatura, relacionados com o problema de embarque de água no convés de uma estrutura fixa. Séries temporais de elevações de água em diferentes posições foram obtidas a partir desses vídeos, utilizando técnicas de processamento e análise de imagens de uso livre. Os resultados demonstraram que os efeitos devido às distorções de escala e ruído foram as mais consideráveis. Por outro lado, as distorções devido às distorções azimutal e foco apresentaram menos diferenças com relação às medições dos casos de referência. Este tipo de estudos pode contribuir na pesquisa que utiliza medições baseadas na análise de imagens, pois é recomendado expressar as medições com um nível de erro associado.

**Palavras-chave:** Elevação d'água, análise por imagens, erro, experimentos hidrodinâmicos 2D

## ABSTRACT

In Naval and Ocean Engineering, several complex phenomena of fluid-structure interactions are commonly evaluated through simplified two-dimensional hydrodynamic experiments. The measurements obtained through these experiments, such as the spatial and temporal evolution of the water surface elevation, are of great importance for the validation of analytical and numerical models. With the constant evolution of optical devices and the continuous decrease in their cost, image-based measurements have been applied to quantify water surface movement in experiments, using “virtual” sensors. However, there may still be errors in the final measurement, caused by different types of distortions in the images used. The study of these errors in measurements is relevant to determine the level of reliability of data generated from images. The present work consists in the evaluation of errors in measurements, based on images, of time series of water surface elevation in two-dimensional hydrodynamic tests. For this, videos of hydrodynamic experiments available in the literature were used, related to the problem of shipping water on the deck of a fixed structure. Time series of water elevations at different positions were obtained from these videos, using open-source image processing and analysis techniques. The influence of varying image distortions on water surface elevation measurements was evaluated, including variation in azimuthal projection, focus, noise, and scale. The results showed that the effects due to scale and noise distortions were the most considerable. On the other hand, the distortions due to the azimuthal and focus distortions showed less differences in relation to the measurements of the reference cases. This type of studies can contribute to research that uses measurements based on image analysis, as it is recommended to express measurements with an associated error level.

**Keywords:** Water elevation, image analysis, error, 2D hydrodynamic experiments

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – (a) Exemplos de interações fluido-estrutura que podem acontecer com embarcações. Imagem utilizada sob a licença Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0 ( <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/</a> ). (b) Exemplo de comparação de resultados numéricos com experimentais em um caso de embarque d’água em uma embarcação. Imagem utilizada sob a licença Creative Commons CC BY 4.0 ( <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/</a> ). .....	14
Figura 2 – Exemplos de diversos tipos de análises experimentais nos quais se utilizam instalações simplificadas para tentar entender conceitos básicos relacionados com a propagação da superfície livre d’água. (a) Dispositivo de conversão de energia das ondas sendo testado com ondas regulares. (b) Estrutura de proteção costeira do tipo Cubipod que será testada com uma onda quebrando. (c) Estudo realizado para avaliar o transporte de sedimentos durante a ocorrência de ondas. (d) Mesa excitadora de movimento em seis graus de liberdade (esquerda) e tanque simplificado (direita) para estudar o movimento de líquidos em tanques (Sloshing). (e) Seção de embarcação simplificada (esquerda) a ser testada com ondas regulares (direita) para avaliar seus movimentos. (f) Instalação simplificada do laboratório MARIN, na Holanda, com equipamentos de medição que permitem capturar detalhes do movimento. Todas as imagens foram utilizadas sob a licença Creative Commons CC BY 4.0 ( <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/</a> ). .....	15
Figura 3 – Exemplo dos detalhes capturados durante o processo de quebra de uma onda utilizando uma câmera de alta velocidade para medições de PIV. Imagen utilizadas sob a licença Creative Commons CC BY 4.0 ( <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/</a> ). .....	17
Figura 4 – Exemplo de um sensor de elevação da superfície d’água convencional do tipo capacitivo, instalado em uma instalação experimental 2D. ....	18
Figura 5 – Contrapontos dos métodos de medição de elevação d’água. ....	20
Figura 6 – Definição de um sensor “virtual” para medir a variação da superfície d’água (VWP, Virtual Wave Probe). ....	21
Figura 7 – Visualização da distribuição espaço-temporal d’água embarcada em uma estrutura, obtida a partir de 33 VWP’s distribuídos ao longo do convés. ....	22
Figura 8 – Exemplo de aplicação para medir a variação da superfície livre com vários sensores virtuais. Na figura, VL significa “Virtual Level” (sensores virtuais de nível). ....	23
Figura 9 – Aparato experimental. ....	29
Figura 10 – Exemplo das imagens obtidas durante o experimento de Hernández et al. (2018a). ....	29

Figura 11 – Exemplo de interação d’água com a estrutura fixa no caso de estudo 1 apresentado em Hernández et al. (2018a).....	30
Figura 12 – Tela inicial do ImageJ. ....	31
Figura 13 – Etapa 1: Procedimento realizado durante a Digitalização das imagens.....	33
Figura 14 – Etapa 2: Procedimento realizado durante o Processamento das imagens. ....	34
Figura 15 – Etapa 3: Procedimento realizada durante a análise binária de imagens.....	35
Figura 16 – Graus de deformação azimuth.....	37
Figura 17 – Diferentes deformações do focus da imagem. ....	39
Figura 18 – Diferentes níveis de aplicação de noise. ....	40
Figura 19 – Variação de scale da imagem.....	41
Figura 20 – Comparação entre as imagens com deformações avaliadas e o caso de referência. ....	42
Figura 21 – Influência da distorção azimuth a 30mm do início do convés onde as abscissas representam o tempo e as ordenadas a elevação d’água.....	43
Figura 22 – Influência da distorção focus a 30mm do início do convés, onde as abscissas representam o tempo e as ordenadas a elevação d’água.....	44
Figura 23 – Influência da distorção de noise a 30mm do início do convés onde as abscissas representam o tempo e as ordenadas a elevação.....	45
Figura 24 – Influência da distorção scale a 30mm do início do convés, onde as abscissas representam o tempo e as ordenadas a elevação d’água.....	46
Figura 25 – Análise do pior cenário de todas as condições em comparação com o vídeo original. ....	48
Figura 26 – Porcentagem de erro associado nos dois graus de deformação azimuth em função do tempo. ....	49
Figura 27 – Porcentagem de erro associado nos três graus de deformação focus em função do tempo. ....	50
Figura 28 – Porcentagem de erro associado nos quatro graus de deformação noise em função do tempo. ....	51
Figura 29 – Porcentagem de erro associado nos cinco graus de deformação de scale em função do tempo. ....	52
Figura A1 – Posição arbitrária longitudinal para visualização da declaração da posição da matriz xroi. Imagem do experimento de Hernández et al. (2018a). ....	57

Figura A2 – Posições padronizadas do plugin VWP_H_FractionA, caso não seja alterado o padrão, o software executa as elevações para todas estas posições mostradas. Imagem do plugin do experimento de Hernández et al. (2018a).....	58
Figura A3 – Linha traçada no convés cujo tamanho real é 195mm. Imagem do experimento de Hernández et al. (2018a).....	58
Figura A4 – Dado de escala no plugin VWP_H_FractionA. Imagem do plugin do experimento de Hernández et al. (2018a).....	59
Figura A5 – Fluxograma de etapas do procedimento até a geração do arquivo binário. Imagens do experimento de Hernández et al. (2018a).....	60
Figura A6 – Fluxograma da geração dos resultados. Imagens do experimento de Hernández et al. (2018a).....	62
Figura A7 Time-lapse do experimento. Imagens do experimento de Hernández et al. (2018a). .....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Casos de teste para avaliar o efeito de diferentes distorções nas imagens de entrada nas séries temporais medidas de elevações d'água. ....	36
--	----

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	12
1.1. Descrição do problema .....	12
1.2. Estado da arte .....	24
1.3. Justificativa.....	26
1.4. Objetivos .....	27
1.4.1. Objetivo Geral.....	27
1.4.2. Objetivos Específicos.....	27
1.5. Estrutura do trabalho .....	27
2. METODOLOGIA .....	28
2.1. Software ImageJ.....	31
2.2. Procedimento de análise.....	32
2.3. Casos de estudo.....	35
2.4. Análise de diferenças entre os resultados.....	36
3. RESULTADOS .....	37
4. CONCLUSÕES.....	52
REFERÊNCIAS .....	53
APÊNDICE A – DOCUMENTAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE IMAGEJ .....	57
APÊNDICE B: TIME LAPSE DO CASO DE ESTUDO .....	63

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Descrição do problema

Na Engenharia Naval e Oceânica são estudados vários problemas nos quais estruturas fixas e flutuantes interagem com diversos tipos de escoamento. As análises desenvolvidas para avaliar tais interações consistem na utilização de métodos analíticos, numéricos e experimentais. No entanto, o uso de dados experimentais torna-se indispensável para validar as análises analíticas e numéricas (STERN et al., 1999). Stern et al. (1999) e Babuska e Oden (2004) definem a validação como o processo de comparar resultados numéricos com dados experimentais ou obtidos a partir de observações físicas.

Considerando as medições experimentais como tópico de estudo, o presente trabalho considera uma análise dos possíveis erros que podem ser associados na medição de elevações da superfície d'água por técnicas de imagens, obtidas em experimentos hidrodinâmicos realizados em instalações bidimensionais (2D), ou seja, nos quais o escoamento se propaga entre duas paredes paralelas. É importante mencionar que os experimentos hidrodinâmicos chamados de “bidimensionais” podem não ser completamente 2D devido aos possíveis efeitos viscosos presentes na superfície livre d'água ou gerados a partir da interação fluido-estrutura. No entanto, para fins de discussão do presente trabalho, são considerados experimentos 2D aqueles realizados comumente em instalações com duas paredes paralelas restringindo o escoamento. Alguns exemplos que podem descrever este tipo de instalações são canais hidrodinâmicos (HERNÁNDEZ-FONTES et al., 2020a; SARMENTO, 1992), tuneis de cavitação (LIU; HIGUCHI; IKOHAGI, 1999), tanques retangulares de vidro ou acrílico (HERNÁNDEZ-FONTES et al., 2018; KOCAMAN; OZMEN-CAGATAY, 2012; STANSBY; CHEGINI; BARNES, 1998), entre outros.

Na vida real, a maioria dos fenômenos que acontecem quando uma embarcação ou estrutura marinha interage com a água são extremamente complexos. Por exemplo, a Figura 1a ilustra vários dos problemas nos quais pode estar submetida uma embarcação interagindo com a água, causando carregamentos significativos nela. Estes problemas têm sido e são motivo de pesquisa pela comunidade científica nas últimas décadas, sendo os experimentos bidimensionais ferramentas muito importantes nos primeiros estágios de análise desses problemas.

Segundo a figura 1a, toda estrutura flutuante está sujeita a diversos tipos de momentos fletores e esforços cortantes que devem ser considerados na análise estrutural e dinâmica de

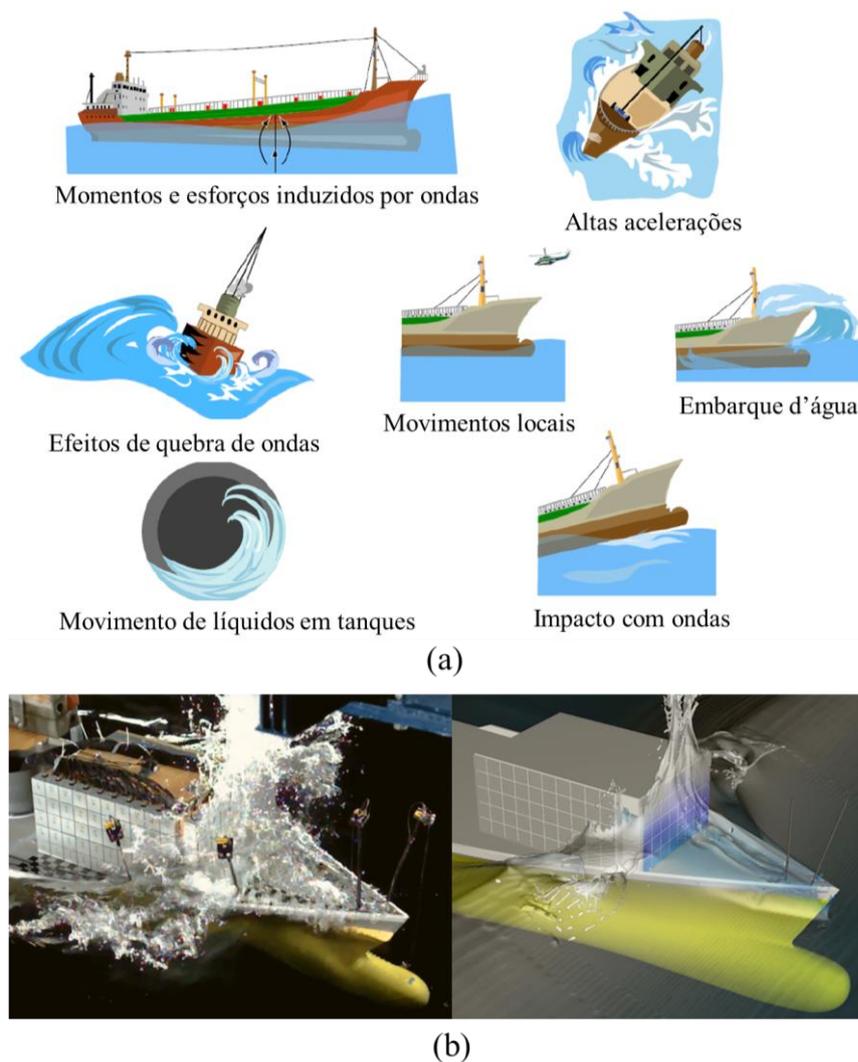
navios e sistemas navais (RAJENDRAN; FONSECA; SOARES, 2015). Além disso, movimentos significantes podem ocorrer, causando altas acelerações das embarcações e outros sistemas flutuantes. Com relação as altas acelerações, é importante mencionar que as embarcações devem operar de maneira segura para evitar efeitos negativos na tripulação (BOCCADAMO; ROSANO, 2019). Outros problemas relevantes são os efeitos de quebra de ondas quando estas interagem com estruturas, o que pode causar interações violentas (HERNÁNDEZ-FONTES et al., 2020b). Também, diversas cargas dinâmicas (ou seja, em movimento) podem ocorrer constantemente em estruturas e sistemas flutuantes, sendo necessário avaliar os possíveis efeitos na sua estabilidade (CARTER; RIZVI, 2021). Estas cargas dinâmicas também podem se dever ao embarque d'água no convés (*green water* ou *wave overtopping*), sendo um tópico de pesquisa ativa recentemente (AREU-RANGEL et al., 2020; CHUANG; CHANG; MERCIER, 2018; FONTES et al., 2021). De maneira similar, o problema de impacto do casco com as ondas (*slamming*) tem sido tópico de pesquisa recente devido aos danos estruturais que as embarcações podem ter (DRUMMEN; HOLTSMANN, 2014; FALTINSEN; LANDRINI; GRECO, 2004; WANG; GUEDES SOARES, 2017). Finalmente, pode ser mencionado o problema de movimento de líquidos em tanques (*Sloshing*). Muitas vezes, os movimentos inesperados da superfície livre dos líquidos dentro deles pode causar carregamentos inesperados induzidos na estrutura (CHEN; XUE, 2018).

Na vida real, os diversos problemas mencionados na Figura 1a acontecem de maneira muito complexa, sendo difícil pesquisar detalhes durante a interação de escoamentos com estruturas, seja utilizando ferramentas analíticas ou numéricas e experimentais. Um exemplo da complexidade do problema de embarque d'água é mostrado na Figura 1b. Uma comparação de uma imagem tomada experimentalmente é feita com um resultado obtido por meio de uma simulação de fluidodinâmica computacional (CFD, *Computational Fluid Dynamics*) de maneira tridimensional (3D). Embora os resultados sejam bem parecidos, ainda existem comportamentos do fluido que são difíceis de reproduzir e analisar experimentalmente neste tipo de estudos 3D. Pode-se observar que existe a quebra da onda durante a interação, que ocasiona um efeito de *splash*, com efeitos viscosos que precisariam ser estudados na simulação. Os mecanismos de geração deste tipo de escoamentos requerem de pesquisa sistemática e controlada para capturar detalhes da evolução do escoamento.

Por este motivo, diversos estudos ainda são desenvolvidos na Engenharia Naval e Oceânica utilizando instalações simplificadas 2D. A partir daqui, entende-se como um experimento 2D aquele no qual o escoamento é restrito por duas paredes verticais, que

usualmente são feitas de acrílico ou vidro para permitir a visualização do escoamento em duas dimensões principalmente, embora possam acontecer pequenos efeitos 3D na superfície livre. Com este tipo de estudos, é possível realizar experimentos sistemáticos e controlados que permitam identificar detalhes do escoamento e aumentar a velocidade de captura de sensores e câmeras para capturar detalhes do escoamento, como feito em Hernández-Fontes et al. (2018), Ma et al. (2020), Essen et al. (2020), entre outros.

Figura 1 – (a) Exemplos de interações fluido-estrutura que podem acontecer com embarcações. Imagem utilizada sob a licença Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>). (b) Exemplo de comparação de resultados numéricos com experimentais em um caso de embarque d'água em uma embarcação. Imagem utilizada sob a licença Creative Commons CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).



Fonte: (a) Chrysostomidis e Liu (2011); (b) van Essen et al. (2020).

Alguns experimentos que são realizados em instalações experimentais 2D e que envolvem a propagação de escoamentos com superfície livre podem ser vistos na Figura 2. Nesses tipos de experimentos, o movimento da estrutura e d'água são comumente medidos, sendo a elevação d'água um dado importante a ser obtido.

A Figura 2a mostra um exemplo de ensaio para avaliar o movimento de um cilindro oscilante interagindo com ondas, projetado para estudo de conversão da energia das ondas. Outro tipo de aplicação é visto na Figura 2b, onde um conjunto de estruturas do tipo *Cubipod*® (GÓMEZ-MARTÍN et al., 2018) são utilizadas para fins de proteção costeira, visando minimizar a energia das ondas incidentes.

A Figura 2c mostra uma aplicação comum na Engenharia Civil (área de Hidrologia ou Hidráulica), na qual está sendo estudado o transporte de sedimentos, considerando a propagação de ondas e estruturas submersas.

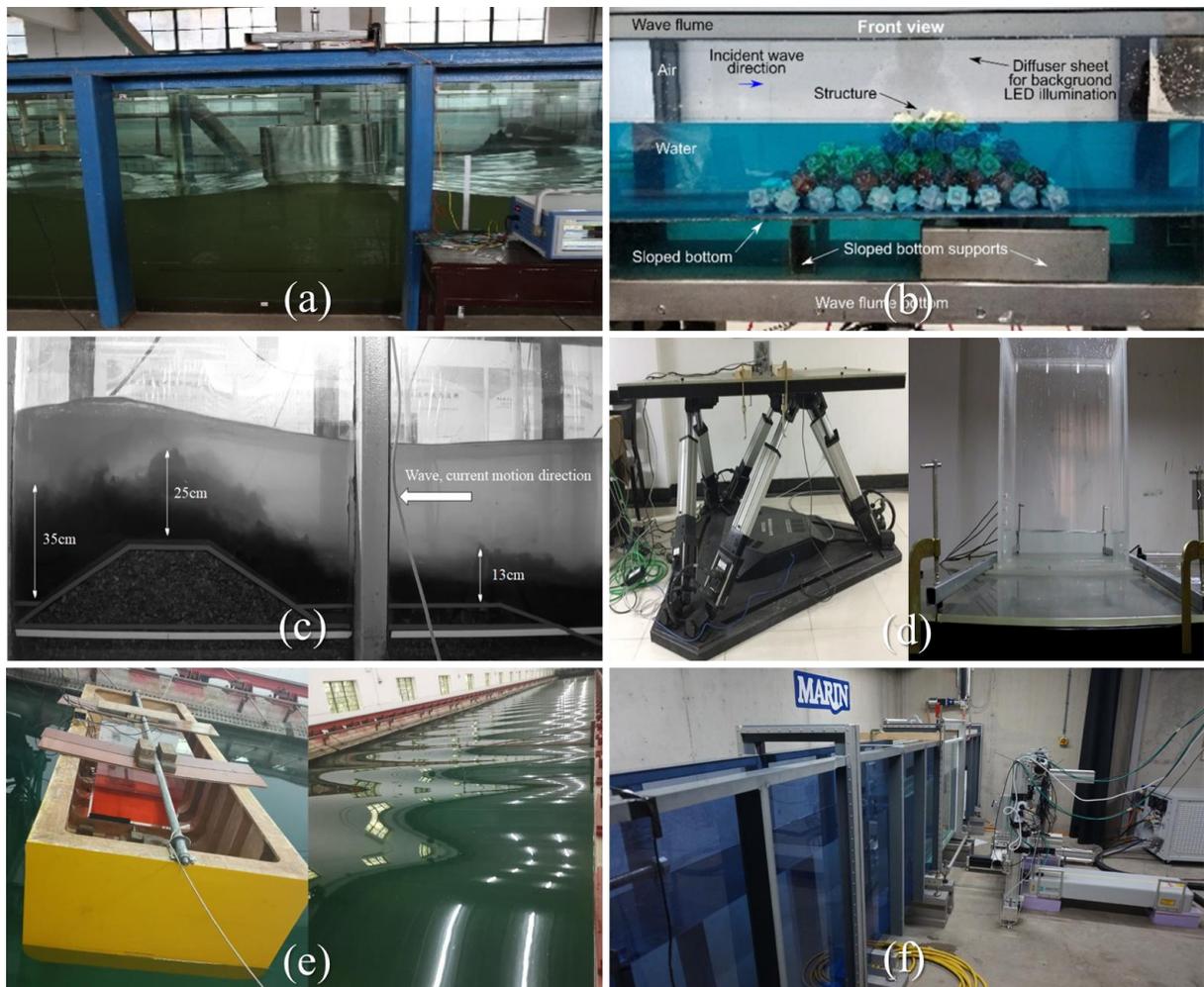
A Figura 2d mostra dois elementos necessários para estudar o problema de movimento de líquidos em tanques (vide Figura 1a). Nestes estudos, é utilizada uma mesa que se movimenta em várias direções, suportando um tanque com água. Assim, os movimentos do líquido dentro do tanque podem ser avaliados de maneira mais detalhada. Um exemplo pode ser visto em Lyu et al. (2017).

Na área naval, é comum avaliar o movimento de diversas estruturas em condições de ondas regulares e irregulares utilizando instalações 2D. Na Figura 2e pode ser visto o exemplo de um teste feito com uma seção de embarcação retangular.

Embora o uso de instalações 2D simplifique o estudo de diversos fenômenos que envolvem a propagação da superfície livre, elas podem ajudar a realizar pesquisa básica de detalhe por meio de experimentos controlados e usando velocidade de captura e resolução suficiente nos sensores. Um exemplo do uso recente desta capacidade foi mostrado no laboratório de pesquisa MARIN, como mostrado na Figura 2f, onde é possível observar a configuração de um canal hidrodinâmico (instalação 2D) e um sistema de visualização de velocimetria por imagem de partículas (PIV, *Particle Image Velocimetry*). A pesquisa desenvolvida visou o estudo da física que ocorre durante a quebra de ondas, que é um dos problemas complexos listados acima na Figura 1.

Figura 2 – Exemplos de diversos tipos de análises experimentais nos quais se utilizam instalações simplificadas para tentar entender conceitos básicos relacionados com a propagação da superfície livre d'água. (a) Dispositivo de conversão de energia das ondas sendo testado com

ondas regulares. (b) Estrutura de proteção costeira do tipo *Cubipod*® a ser testada com uma onda quebrando. (c) Estudo realizado para avaliar o transporte de sedimentos durante a ocorrência de ondas. (d) Mesa excitadora de movimento em seis graus de liberdade (esquerda) e tanque simplificado (direita) para estudar o movimento de líquidos em tanques (*sloshing*). (e) Seção de embarcação simplificada (esquerda) a ser testada com ondas regulares (direita) para avaliar seus movimentos. (f) Instalação simplificada do laboratório MARIN, na Holanda, com equipamentos de medição que permitem capturar detalhes do movimento. Todas as imagens foram utilizadas sob a licença *Creative Commons CC BY 4.0* (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

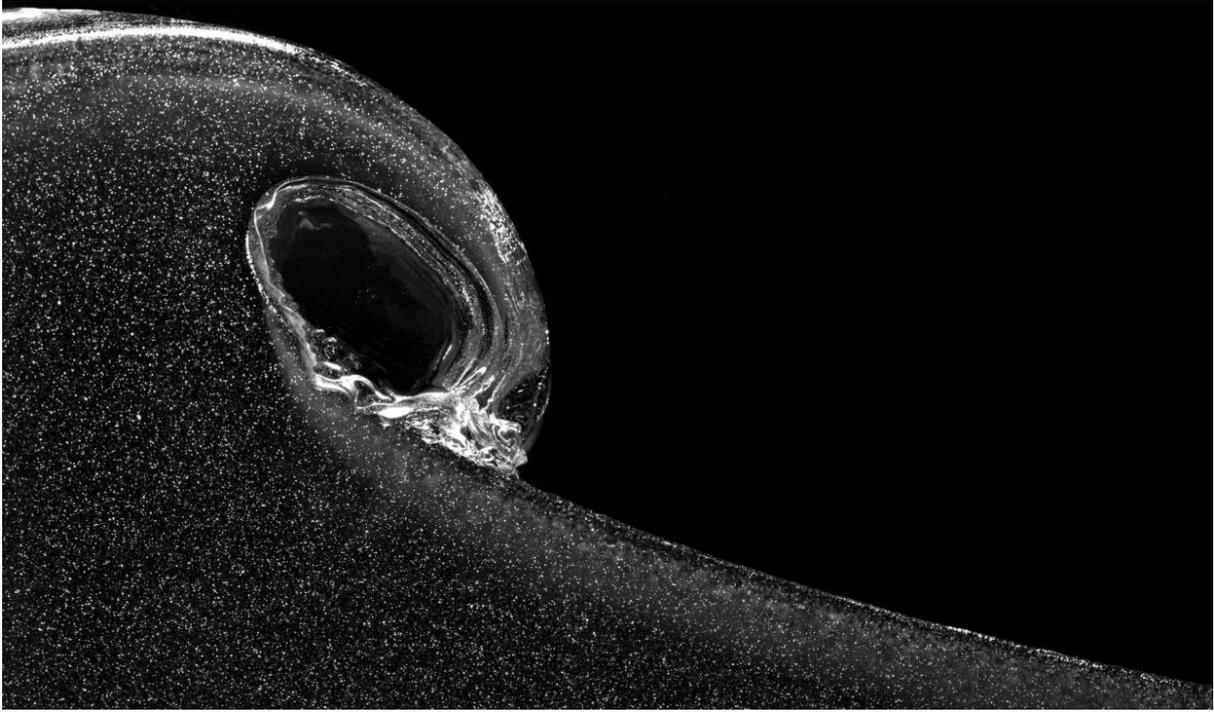


Fonte: (a) Qin et al. (2021); (b) Escudero et al. (2021) ; (c) Yan et al. (2020); (d) Chen e Xue (2018); (e) He et al. (2022); (f) van Essen et al. (2020).

Com a configuração mostrada na Figura 2f, foi possível aumentar a resolução e velocidade de aquisição da câmera do sistema PIV para capturar detalhes do escoamento, como mostrado na Figura 3. É evidente que este tipo de técnicas experimentais permite capturar

detalhes do fluido que podem ser quantificados (medidos), proporcionando dados úteis para a validação de modelos analíticos ou numéricos.

Figura 3 – Exemplo dos detalhes capturados durante o processo de quebra de uma onda utilizando uma câmera de alta velocidade para medições de PIV. Imagens utilizadas sob a licença *Creative Commons* CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).



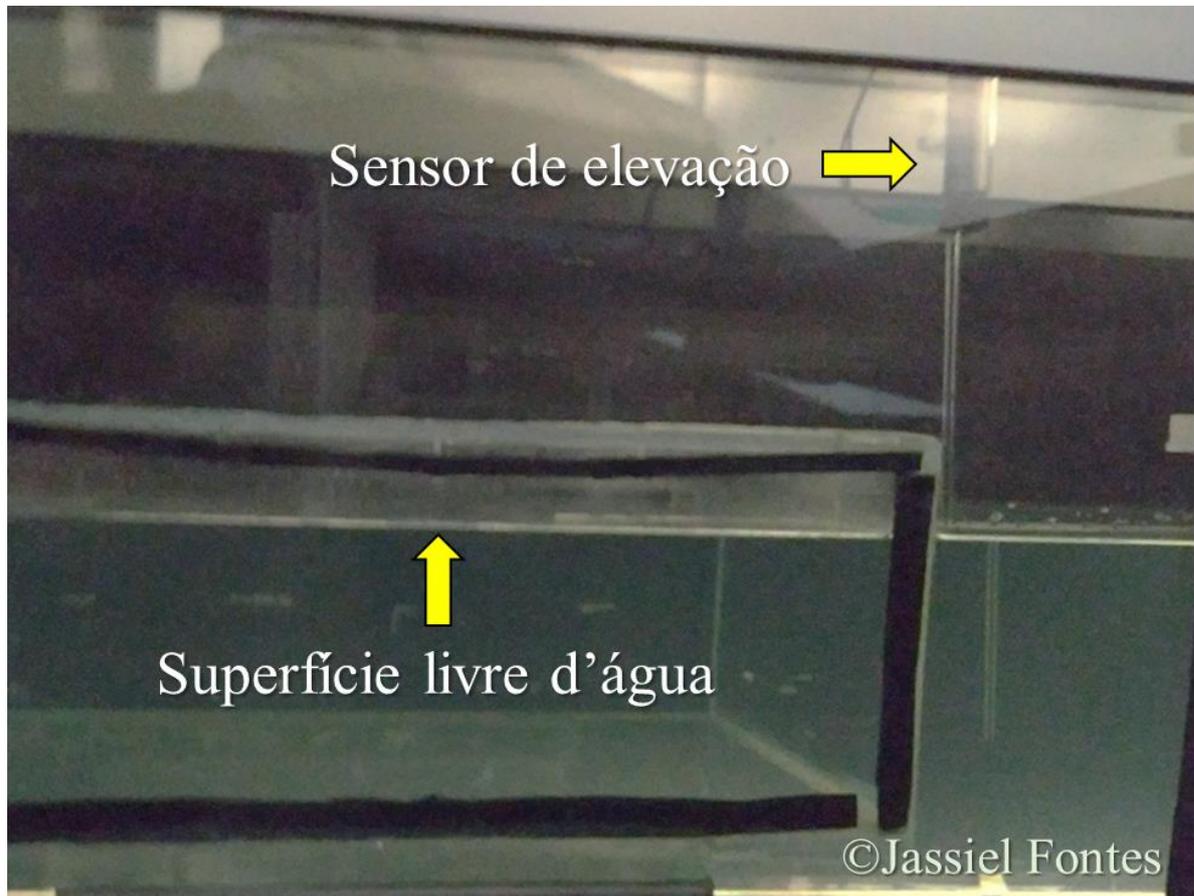
Fonte: van Essen et al. (2020).

Em muitos dos estudos experimentais 2D que envolvem escoamentos com superfície livre d'água, a medição da sua evolução (i.e., variação) espacial e temporal é uma das atividades mais comuns, sendo empregadas diversas técnicas experimentais de medição.

Habitualmente, a obtenção de séries temporais de elevação da superfície d'água em experimentos hidrodinâmicos é feita através da utilização de sensores físicos de medição da elevação da superfície livre, chamados de *wave probes* convencionais. Estes sensores são formados por sondas, que comumente são instaladas mantendo contato com a água, que operam por princípios elétricos de capacitância, resistência ou condutividade. A Figura 4 mostra um exemplo de um *wave probe* convencional instalado em um canal hidrodinâmico (instalação 2D) para medir a elevação da superfície livre. Pode-se verificar que o sensor é fixado na parte superior do canal, obstruindo o escoamento. O sensor mostrado não é fixo na parte inferior, estando sujeito a pequenas vibrações durante o movimento do fluido. Contudo, a aplicação destes método clássico é propensa a alguns problemas, incluindo os seguintes: dificuldade em

instalação, geração de cavitação, necessidade de mapeamento espacial em casos de aplicação de várias sondas, entre outros (HERNÁNDEZ et al., 2018a).

Figura 4 – Exemplo de um sensor de elevação da superfície d'água convencional do tipo capacitivo, instalado em uma instalação experimental 2D.



Fonte: Jassiel Fontes, 2019.

Hernández et al. (2018a) evidencia mais detalhadamente os problemas na utilização de *wave probes* rígidos convencionais em estudos hidrodinâmicos em instalações 2D:

- *Wave probes* convencionais são sensores com limitação em tamanho e comprimento e de difícil instalação em aparatos experimentais de pequeno porte. Além do mais, as dimensões desses equipamentos devem ser selecionadas corretamente de maneira a não gerar perturbações no fluxo d'água durante o experimento.
- Um *wave probe* convencional somente é capaz de produzir históricos de tempo do perfil (elevação) da superfície d'água, sendo este o local onde foi instalado. Desta forma, faz-se necessário a distribuição de vários *wave probes* ao longo da região de interesse na instalação

experimental, para assim conseguir mapear o comportamento da onda uniformemente e não somente em um ponto específico.

Por estes empecilhos, mostra-se relevante a empregabilidade de métodos de processamento e análise de imagem para medir as elevações d'água como uma metodologia alternativa ao uso de *wave probes* convencionais. As principais vantagens da utilização de medições por imagem (*wave probes* virtuais) em contraponto com o uso de *wave probes* convencionais podem ser vistas na Figura 5 onde:

- No uso de *wave probes* convencionais, é necessário preocupar-se tanto com a instalação do experimento em si: tanque, comportas, água, estrutura, cabos etc.; como é preciso preocupar-se também com a própria instalação da sonda no experimento, de forma a fixar corretamente e não comprometer o funcionamento dele. Já com o uso de imagens, a câmera não compromete o experimento pois ele será instalado a certa distância dele, sem obstruir o escoamento.
- O sensor *wave probe* convencional somente pode fazer a medição no local onde foi instalado. Desta maneira, somente será possível medir o comportamento d'água em vários pontos específicos simultaneamente, só se for instalado um sensor em cada local específico que se deseja avaliar. Em caso de não houver sensores físicos suficientes para avaliar múltiplos pontos específicos do experimento, seria necessário realizar um experimento por vez e em cada passo; a posição da sonda seria alterada, trazendo a dificuldade de montar e desmontar o aparato várias vezes. Enquanto isso, na utilização de câmeras para captar o movimento, somente seria necessário realizar o experimento uma vez, gravando um ou vários vídeos (caso existam repetições). O vídeo seria processado através de software para obter medições de elevação d'água. O software poderia ser configurado para avaliar diversos pontos na região de interesse do experimento (dependendo da resolução do vídeo).
- O *wave probe* convencional é um instrumento específico de laboratório, que precisa de um sistema de aquisição de dados para ser usado, que seria menos acessível em comparação com as câmeras (ainda mais com o advento de *smartphones*). Além disso, seria necessário ter vários *wave probes* convencionais para a realização do experimento em mais de um ponto específico, enquanto, com o uso de medição por imagens, somente uma câmera seria necessária para realizar a medição da elevação d'água (para o caso de uma medição 2D). Pelo menos duas câmeras (2 lentes) seriam necessárias para uma medição 3D (CANG; HE; QIAO, 2019).
- O *wave probe* convencional pode não ser adequado para o experimento por não atender ao dimensionamento requerido. Os sensores deste tipo encontrados comercialmente têm

limitações tanto de seu tamanho como de seu comprimento, ou seja, elas possuem uma limitação inerente quanto ao seu suporte. De certa forma, os sensores estarão limitados à escala do experimento que será realizado. Em contraste, as câmeras podem aumentar significativamente a área de cobertura de informações, seja com a troca de suas lentes ou até mesmo mudando o ângulo e posicionamento dela. Desta forma, em casos de pesquisa de medições em condições amenas como em laboratórios (ESCUDERO et al., 2021), até condições mais deveras como em alto mar (ROSSI et al., 2021), a utilização de câmeras conseguiria se adequar com mais coerência às necessidades.

Figura 5 – Contrapontos dos métodos de medição de elevação d'água.

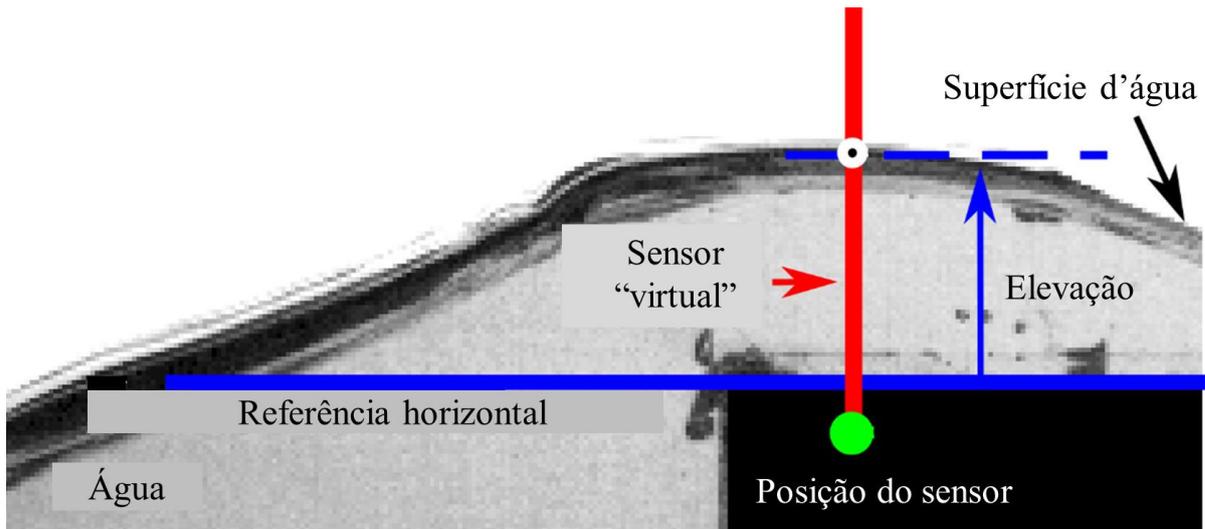


Fonte: Elaboração própria

Com a constante evolução dos dispositivos de captação de imagem, assim com a diminuição dos seus custos, tornando-se cada vez mais acessíveis tanto para uso pessoal como acadêmico, podemos afirmar que a medição da elevação da superfície d'água baseada em imagem tem um grande potencial em se tornar uma alternativa à utilização de *wave probes* convencionais. A aquisição por imagens aliadas à utilização de softwares específicos para o processamento e a análise delas, podem então ser aplicados no rastreamento do movimento d'água em experimentos hidrodinâmicos com a utilização de sensores "virtuais" durante a

programação. Um sensor virtual deste tipo (VWP, *virtual wave probe*) consiste em uma região definida ao longo do eixo horizontal da imagem, dentro da qual será avaliada a variação no tempo da elevação da superfície d'água. A Figura 6 ilustra a definição de um VWP para o caso de um sensor posicionado acima o convés de uma estrutura, como mostrado na Figura 1a.

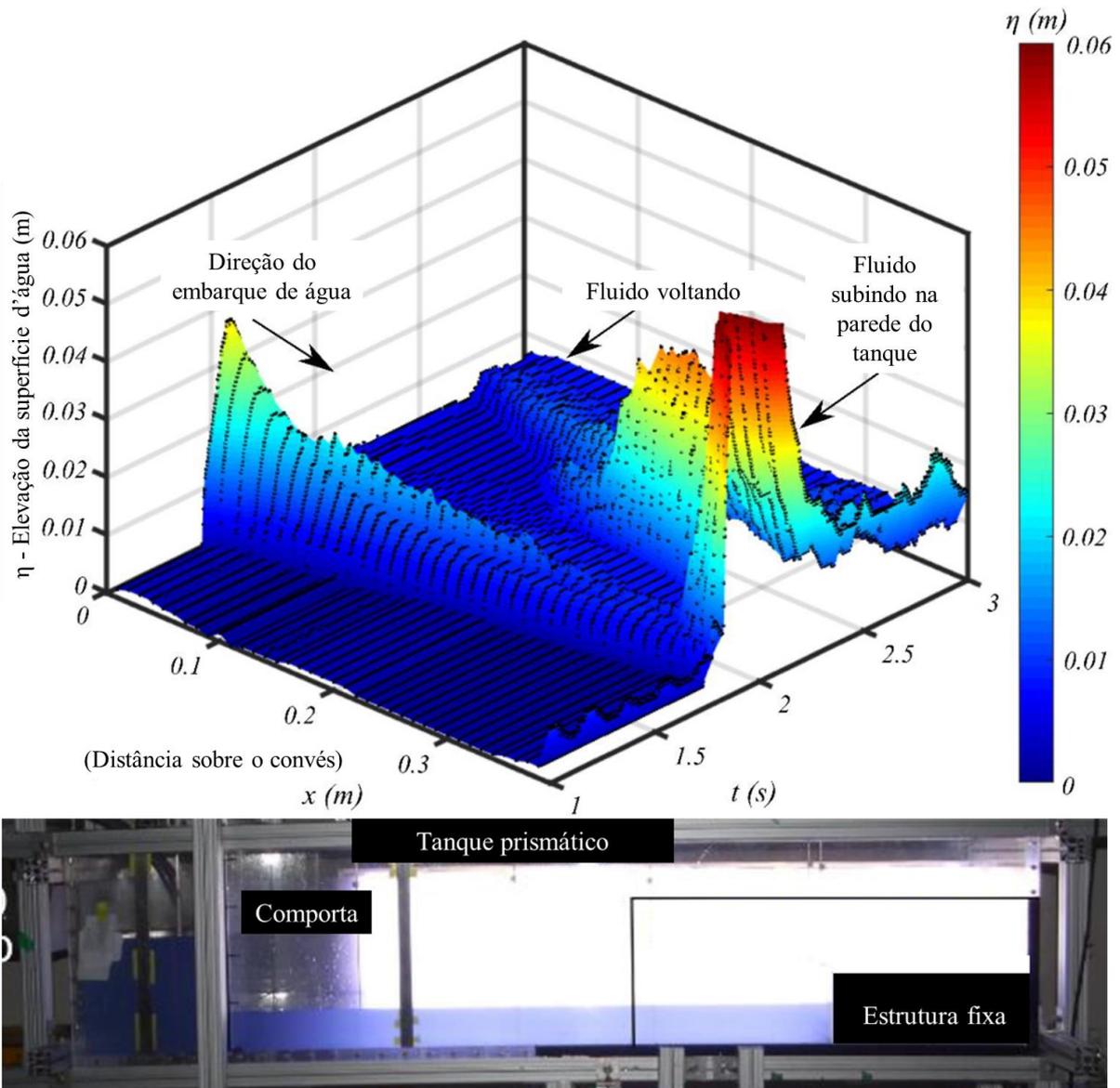
Figura 6 – Definição de um sensor “virtual” para medir a variação da superfície d'água (VWP, *Virtual Wave Probe*).



Fonte: Fontes et al. (2021).

Um exemplo das vantagens de utilizar sensores “virtuais” para medir elevação d'água em ensaios experimentais é mostrado na Figura 7, que mostra as medições obtidas em uma instalação bidimensional na qual foram pesquisados eventos de embarque d'água no convés de uma estrutura fixa (HERNÁNDEZ-FONTES et al., 2019). Foram considerados 33 VWP's distribuídos acima do convés da estrutura, sendo separados a cada 10 mm. Com as medições foi possível realizar uma visualização espaço-temporal da evolução d'água embarcada no convés.

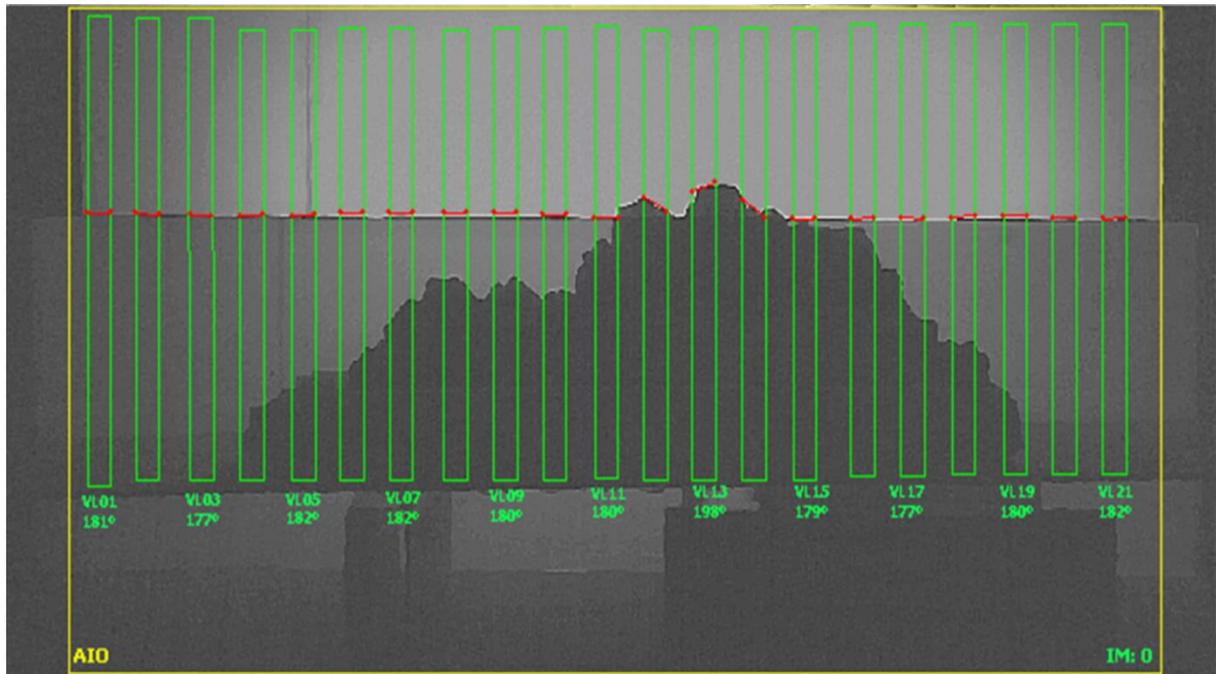
Figura 7 – Visualização da distribuição espaço-temporal d'água embarcada em uma estrutura, obtida a partir de 33 VWP's distribuídos ao longo do convés.



Fonte: Hernández-Fontes et al. (2019).

A Figura 8 mostra um outro exemplo de definição de vários VWP's para medir a evolução da superfície d'água em várias posições (ESCUDERO et al., 2021). Nessa imagem, os retângulos em verde representam as regiões dos *wave probe* virtuais, dentro das quais será quantificada a variação da superfície livre definida com as linhas vermelhas. Os valores médios da posição dessas linhas são considerados para o cálculo da elevação temporal. Maiores detalhes podem ser consultados em Escudero et al. (2021).

Figura 8 – Exemplo de aplicação para medir a variação da superfície livre com vários sensores virtuais. Na figura, VL significa “*Virtual Level*” (sensores virtuais de nível).



Fonte: Escudero et al. (2021).

Embora o uso de medição de elevação d’água utilizando sensores “virtuais” apresente diversas vantagens, ainda existem diversas fontes de erros que precisam ser avaliadas. Por exemplo, ainda podem ser encontradas certas falhas relacionadas com a captação de dados de imagem, pois não é possível uma câmera converter um cenário real em uma imagem virtual com absoluta precisão; a imagem virtual será alvo de aberrações ópticas naturalmente no processo de captação. Em outras palavras, podem existir erros decorrentes aos diferentes tipos de distorções que um dispositivo óptico para a conversão de uma imagem real em algo virtual. O estudo destes erros nas medições é importante para determinar o nível de imprecisão que os resultados mostram.

Em inúmeras áreas da engenharia, como a Engenharia Naval e Oceânica, o estudo dos possíveis erros encontrados durante os processos de medição por imagens são informações cobradas pelas autoridades internacionais em metrologia, para melhorar os procedimentos de validação de modelos analíticos e numéricos (DE SANTO et al., 2004; DE SANTO; LIGUORI; PIETROSANTO, 2000), contribuindo assim no desenvolvimento de estruturas mais confiáveis. Em virtude de tais fatos mencionados, este trabalho visa avaliar os efeitos de distorções nas imagens de entrada, nas medições de elevações d’água em ensaios hidrodinâmicos 2D, obtidas

a partir de técnicas de medição baseadas em imagens. Para a análise será utilizada a metodologia proposta por Hernández et al. (2018a), incluindo o software disponibilizado para obter medições de elevação temporal da superfície d'água. As imagens de entrada do software serão submetidas a diversas mudanças, incluindo variações da projeção *azimuth*, *focus*, *noise* e *scale*.

## 1.2. Estado da arte

Podemos afirmar que o uso de medições obtidas por meio de imagens digitais tem ganhado alta relevância na comunidade acadêmica, tanto pela sua praticidade quanto pelos seus inúmeros ramos de aplicação. Entretanto, torna-se necessária a análise de erros que tais medições podem acarretar durante toda a cadeia de processos, que se estende durante a obtenção de um sistema real até a sua conversão em uma imagem digital.

Até o momento atual, é impossível transformar algo real em uma imagem digital com plena exatidão porque o dispositivo óptico é obrigado a aplicar deformações na imagem para que algo visto no mundo real consiga ser visualizado digitalmente. De Santo et al. (2000) afirma que é necessário ter o entendimento acerca da propagação da incerteza por todo o aparato em experimentos que utilizam imagens e o mesmo afirma que a incerteza associada ao sistema por medições em imagens pode ser decomposta nos seguintes passos:

Passo 1: referente à modelagem da incerteza que abrange a câmera

Passo 2: referente à modelagem do processo voltado à digitalização

Passo 3: referente à determinação da incerteza associada com os resultados dos algoritmos voltados para o processamento de imagem.

Em seus experimentos, De Santo et al. (2000) conseguiu corresponder seus resultados teóricos tanto com a verificação numérica (onde foi aplicada a lei de propagação e a correlação entre grandezas) quanto com a validação experimental (onde previamente foi validado o próprio modelo do sistema de digitalização de imagens).

Zhou et al. (2015) citaram uma análise mais específica do erro proveniente das imagens digitais com relação aos sistemas reais. Eles verificaram que durante a correlação das imagens, irá acontecer uma interpolação de intensidade de *subpixels* para gerar o produto final, e, como resultado, este processo ocasiona diversos erros no sistema gerado e que tal erro captado nas imagens seja proporcional com a direção do componente de alta frequência do padrão *speckle*.

Zhou et al. (2015) também afirmaram que o ruído tem a capacidade de inserir uma energia adicional nas altas frequências e como resultado, pode ser percebido um aumento no erro sistemático; assim como o ruído também tem a capacidade de elevar o erro aleatório proporcionalmente com a própria potência do ruído. A forma de otimização do volume de erros

associados foi a inserção de uma pré-filtragem nas imagens analisadas, a qual veio antes da correlação delas com a finalidade de que os ruídos conseguissem ser amenizados. Ao avaliar os resultados obtidos com a utilização do filtro, foi concluído que os erros sistemáticos foram reduzidos.

Partindo para o campo da hidrodinâmica, Gilmore et al. (2013) afirma a suma importância das medições da elevação d'água, incluindo a análise de erro nas medições, principalmente em se tratando da gestão dos recursos hídricos. Há demais aplicações encontradas no dia a dia, dentre as quais podem ser citadas as seguintes: análise dos volumes de abastecimento d'água, das descargas d'água das chuvas, e as taxas de transporte de nutrientes; todos estes parâmetros só são obtidos através de medições de elevação d'água.

Além disso, conseguimos rever mais aplicações com o estudo do movimento d'água segundo Li et al., (2019), onde é evidenciada a dificuldade na obtenção de dados de medição da vazão d'água em rios de montanha e que a ao mesmo tempo são dados relevantes para a estimativa de inundações futuras e ciclagem biogeoquímica global. Para a conclusão de seus experimentos, os autores usaram métodos de programação em conjunto com captação de dados por imagem para avaliar o comportamento d'água.

A união do estudo de elevação d'água com a utilização de medições por imagens gera inúmeros benefícios por evoluir a atual maneira de se realizar estudos hidrodinâmicos voltados neste segmento; porém, conforme já mostrado pelos vários autores citados, converter um sistema real em uma imagem digital gera erros que necessitam ser investigados.

A abordagem de Gilmore et al. (2013) consistiu em executar tais estudos de elevação d'água enquanto se identificavam e avaliavam os efeitos das fontes de incerteza que certamente prejudicam o experimento. Em seus estudos, foram analisados parâmetros que englobam tanto o foco como a resolução da imagem, iluminação, a distorção da lente e as diversas perspectivas utilizadas. Como resultado de suas pesquisas, uma das principais fontes de incerteza que mais impactam na conversão de uma imagem real para virtual são a resolução e a distorção da imagem que, embora levadas em consideração pelo software elaborado, ainda conseguem gerar um aumento significativo na incerteza.

Goldstein (2000) possui uma abordagem semelhante, em suas análises por imagens afirma que há duas fontes principais de erro quando se trata da medição das distâncias presentes em uma imagem digital: são estes o erro intrínseco da pixelização da imagem (é um erro de natureza aleatória que acontece devido ao tamanho diferente de zero dos pixels da imagem) e os erros de registro específicos da modalidade.

Badadani et al., (2018) pesquisou com métodos de correlação de imagem digital, metodologia esta que aplica deformação em um padrão de manchas continuamente com a superfície de teste, de forma que a distribuição irá ter efeitos significativos na precisão da medição dos resultados obtidos. Em seus experimentos, foram avaliadas as incertezas envolvidas nas medidas de deformação com a criação de dois padrões de manchas em uma amostra.

Uma outra metodologia que também pode compensar as dificuldades da utilização de *wave probes* convencionais é através da utilização do instrumento *LiDAR* bidimensional, como proposto por Blenkinsopp et al., (2012). Tal instrumento utiliza de sensoriamento remoto óptico com a utilização de laser de varredura para aferir dados de elevação d'água. Em comparação com *wave probes* convencionais, o *LiDAR* consegue trabalhar de forma menos intrusiva no experimento e mede todo o campo de onda, aplicado principalmente em regiões costeiras. Porém em comparação com dados por uso de câmeras, o *LiDAR* torna-se menos acessível. Em seus resultados obtidos, a utilização de tal metodologia assemelha-se com os resultados já encontrados por uso de *wave probes* convencionais.

Partindo para a avaliação das medições de elevação d'água por captação de imagem, Hernández et al. (2018a) propõe a análise de elevações d'água para experimentos hidrodinâmicos bidimensionais, fundamentada no uso de imagens binárias e possibilitando código aberto no uso de tal método.

Hernández-Fontes et al. (2020d) propõem uma metodologia baseada nas limitações do método proposto em Hernández et al. (2018a), que não pode ser empregado para identificar contornos nem para rastrear as elevações de superfícies d'água de múltiplos valores diretamente. Ou seja, seu objetivo foi examinar elevações da superfície d'água em múltiplos valores. Em ambos os artigos, é partido a premissa de executar operações que desconsideram aritmética inteira para assim usar de imagens binárias na realização de operações lógicas. Desta forma é reduzido significativamente o tempo computacional necessário para executar as tarefas de análise de dados. Diferenciar os objetos da cena é o principal ponto na formação das imagens binárias, ponto este possível graças a segmentação que separa o primeiro plano de seu fundo. Ademais, os artigos mencionados validam as medições virtuais com as obtidas por meio de sensores convencionais.

### 1.3. Justificativa

As medições da variação (espacial e temporal) da elevação d'água, obtidas em experimentos hidrodinâmicos bidimensionais, são fundamentais para efetuar a validação de

modelos analíticos e numéricos. Porém, para serem obtidos um grau de precisão com a realidade é necessário que sejam averiguadas as diversas fontes de erro que a obtenção das medições pode apresentar. Principalmente, estas práticas são necessárias porque o estudo de tais erros são requisitos de organizações internacionais de metrologia e de Engenharia Naval e Oceânica para melhorar os processos de validação. Em vista disso, torna-se necessário realizar estudos de análise de erros como o proposto no seguinte trabalho.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo Geral**

Explicar os conceitos de medição de elevações da superfície livre d'água em ensaios hidrodinâmicos bidimensionais utilizando técnicas de processamento e análise de imagens, avaliando o efeito da variação da projeção *azimuth*, *focus*, *noise* e *scale* na medição das séries temporais de elevação.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- a) Apresentar o conceito de medição de elevação da superfície d'água utilizando técnicas de processamento e análise de imagens.
- b) Utilizar software livre para análise e processamento de imagens, baseado no software *ImageJ*.
- c) Estudar e documentar, em português, a metodologia de medição de elevações d'água proposta por Hernández et al. (2018a), incluindo o caso de estudo.
- d) Avaliar os efeitos das variações da projeção *azimuth*, *focus*, *noise* e *scale* nas medições de elevação d'água no caso de estudo.
- e) Discutir as diferenças entre os resultados em termos de erros obtidos.

## **1.5. Estrutura do trabalho**

O presente trabalho de conclusão de curso está organizado como segue: O Capítulo 2 apresenta a Metodologia que foi seguida. Este capítulo inclui a descrição do método, software e caso de estudo utilizados para realizar a medição por imagens. Serão apresentados os procedimentos de processamento e análise dos vídeos do caso de estudo para obter as séries temporais de elevação. Também, serão apresentados os casos de estudo das variações da projeção *azimuth*, *focus*, *noise* e *scale*. Posteriormente, no Capítulo 3 são mostrados os

resultados dos casos de estudo, discutindo as diferenças em termos de erros. Finalmente, as principais conclusões e trabalhos futuros são mostrados no Capítulo 4.

## 2. METODOLOGIA

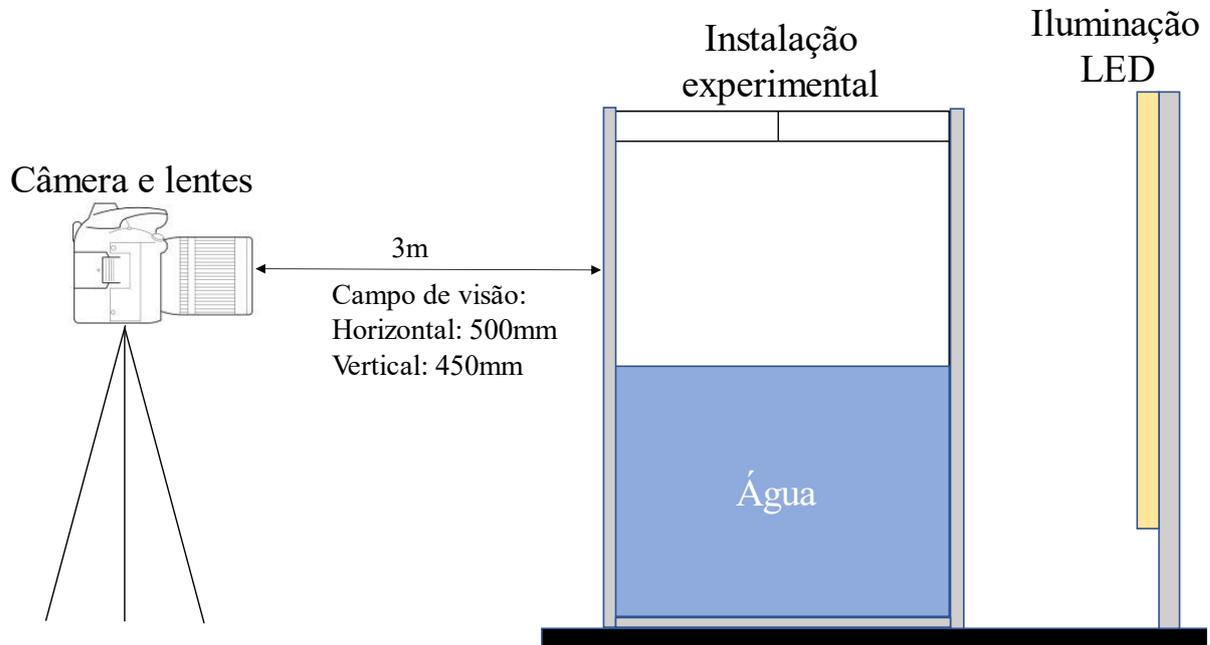
Para realizar a análise do efeito das distorções nas medições de elevação d'água utilizando técnicas de processamento e análise de imagens, o presente estudo segue a metodologia proposta em Hernández et al. (2018a), que propuseram uma técnica de medição de elevações da superfície d'água (superfície única) em ensaios hidrodinâmicos bidimensionais, através do processamento e análise de imagens obtidas com uma câmera de alta velocidade. Como caso de estudo, eles consideraram o problema de embarque d'água (vide Figura 1), utilizando o conceito de *wet dam-break* para gerar as interações fluido-estrutura (HERNÁNDEZ-FONTES et al., 2020c, 2018). Os métodos de processamento e análise propostos foram desenvolvidos para serem usados no software *ImageJ*. Os scripts e os vídeos utilizados no artigo de Hernández et al. (2018a) foram disponibilizados para uso livre e se encontram no repositório do site *Mendeley Data* (HERNÁNDEZ et al., 2018b), podendo ser descarregados livremente por qualquer usuário.

Em geral, os dados experimentais foram obtidos em um aparelho experimental construído e instalado no Laboratório de Tecnologia Oceânica (LabOceano / COPPE-UFRJ), Brasil. A instalação bidimensional experimental consiste em um tanque com ~1000 mm de comprimento, ~334 mm de largura e ~450 mm de altura. Como mostrado na Figura 7. Dentro do tanque há uma estrutura retangular cuja finalidade é a representação do convés de uma embarcação de maneira simplificada. Uma comporta separa dois reservatórios d'água de diferentes níveis. Quando a comporta é removida de maneira instantânea, é gerada uma onda de “choque” (parecida a uma onda solitária do tipo *bore*) que interage com a estrutura, causando os eventos de embarque d'água. A água embarcada escoia sobre o convés, impactando a parede do tanque e voltando ao reservatório.

Na Figura 9 podemos observar a instalação experimental. Basicamente, a câmera usada é uma câmera usada para medir movimentos, do tipo QUALISYS monocromática de alta velocidade, usada com uma lente adicional Nikon AF DC-NIKKOR 105 mm f/2D. A câmera foi direcionada ao tanque, que contém água colorida de azul, para captar os movimentos da água. Iluminação LED foi utilizada na parte traseira do tanque para aumentar a diferenciação da água dos demais componentes da cena. Vídeos de ~2 segundos foram capturados e salvados em um disco duro logo depois dos experimentos. A câmera tem um sensor CMOS com

resolução de 1,3 *Mpixel* e os vídeos foram captados a 500 *fps* (*frames per second* – imagens por segundo).

Figura 9 – Vista simplificada do aparato experimental.



Fonte: Hernández et al. (2018a).

A Figura 10 mostra uma imagem característica que foi obtida durante os experimentos, mostrando a parte do reservatório d'água (parte esquerda) e a estrutura retangular (parte direita). As estruturas verticais são sensores de elevação convencionais, que foram utilizados no trabalho de Hernández et al. (2018a) para validar as medições baseadas em processamento a análise de imagens.

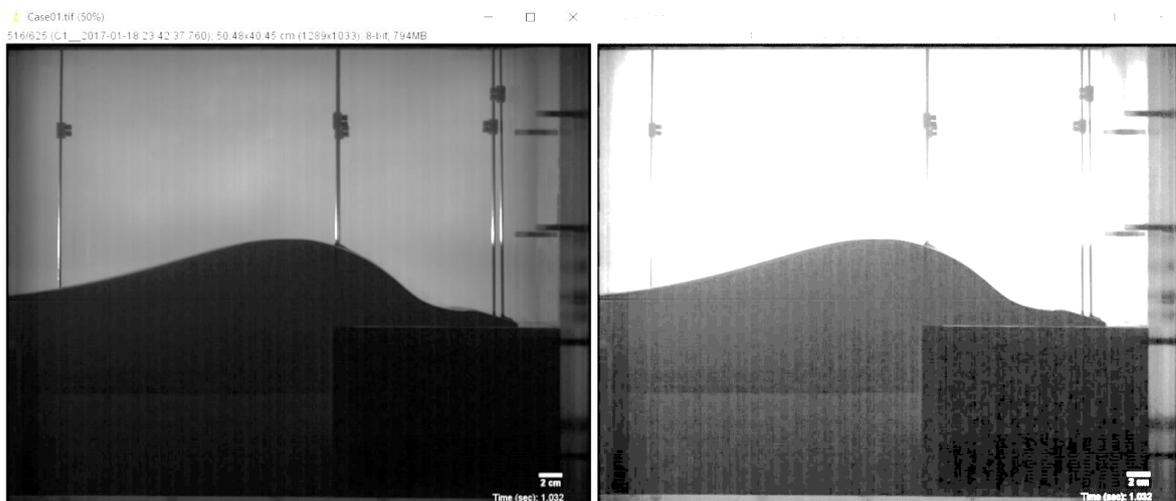
Figura 10 – Exemplo do aspecto das imagens (sem tratamento) obtidas durante o experimento de Hernández et al. (2018a).



Fonte: Repositório Mendeley Data (HERNÁNDEZ et al., 2018b).

Durante o experimento, foi feita a gravação dos acontecimentos na estrutura interna fixa como mostrada na Figura 10. Há uma comporta que separa dois volumes d'água (um maior do que outro) em seu estado de repouso. Para que a onda seja gerada, a comporta é removida rapidamente para que o volume d'água maior seja liberado, interagindo com o volume menor que está em contato com a estrutura. Na Figura 11, pode ser observado o comportamento da onda atuando no convés, ou seja, quando a água sai do estado de repouso o convés (onde há o desnível) sofre a ação da onda.

Figura 11 – Exemplo de interação d'água com a estrutura fixa no caso de estudo 1 apresentado em Hernández et al. (2018a). A imagem da direita tem o brilho aumentado para facilitar a visualização da estrutura.



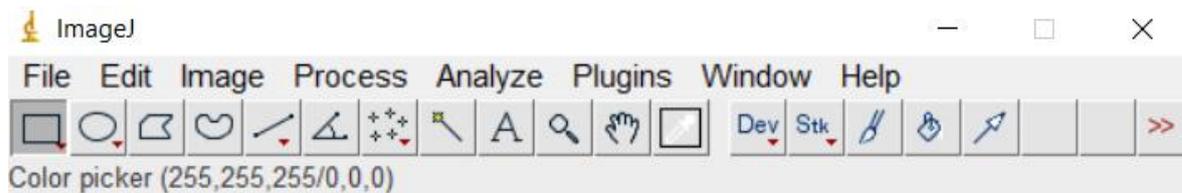
Fonte: Repositório Mendeley Data (HERNÁNDEZ et al., 2018b).

## 2.1. Software ImageJ

Os métodos de processamento e análise de imagens propostos em Hernández et al. (2018a) foram programados em scripts (plugins) para uso no software *ImageJ*. O *ImageJ* é um software voltado para edição, processamento e análise de imagens que utiliza programação em *Java* (IMAGEJ, 2022). Ademais, é um software de domínio público, dispensando a requisição de licença para sua utilização.

De maneira similar a Hernández et al. (2018a), neste projeto, o software *ImageJ* foi utilizado para o processamento dos dados de elevação d'água referentes aos experimentos laboratoriais. Na Figura 12 podemos observar a tela inicial do software com todas as suas funcionalidades.

Figura 12 – Tela inicial do *ImageJ*.



Fonte: software *ImageJ*.

Uma breve explicação acerca da utilização deste software voltado para este estudo pode ser feita seguindo a Figura 12. Na tela inicial do software, os vídeos dos experimentos são carregados e assim pode ser feita a aplicação de códigos nestes vídeos através dos *plugins* disponibilizados (HERNÁNDEZ et al., 2018b). São dois plugins, relacionados com a fase de processamento e análise de imagens proposta por eles. Na pasta do software são incluídos os códigos em *Java*. Com o software são executados esses *plugins*, os quais permitem abrir, processar, e analisar os vídeos. Qualquer mudança de parâmetro tem de ser feita nos arquivos dos plugins, que podem ser abertos com qualquer processador de texto (e.g., Bloco de notas). Após aplicados os plugins de trabalho (processamento e análise) no vídeo, os resultados obtidos (séries temporais de elevação d'água nas posições especificadas) são exportados com a extensão ".csv", podendo ser lidos no software *Excel*. Informações do uso e instalação do *ImageJ* podem ser obtidas em ImageJ (2022), sendo possível obter versões instaláveis e portáteis. De forma geral, o software *ImageJ* será a forma computacional para o processamento dos casos de estudos de elevação da superfície d'água. Nele, os vídeos serão carregados e, através dos *plugins*, o mapeamento de elevação da superfície d'água será feito, tendo como saída os dados de elevação em função do tempo.

## 2.2. Procedimento de análise

Como já introduzido, Hernández et al. (2018a) propõe uma metodologia alternativa e de código aberto com fundamentação na utilização de imagens binárias para medir a elevação da superfície d'água a partir de vídeos obtidos em experimentos hidrodinâmicos bidimensionais. Em resumo, os resultados (medições de elevação) são obtidos após o vídeo passar pelas etapas de digitalização, processamento e análise de imagens:

1. Digitalização das imagens: as imagens de vídeo são obtidas, em seguida, são feitas correções nelas para que possam ser salvas como “pilhas” de imagens (*stacks* ou grupos) ajustadas em tons de cinza.
2. Processamento das imagens: é feito um tratamento nas imagens para obtenção de pilhas de imagens binárias.
3. Análise binária das imagens: utilizam-se operações morfológicas na análise das imagens binárias para a obtenção das séries temporais de elevação d'água.

A primeira etapa é mostrada na Figura 13 onde teremos a digitalização da imagem em si. Seguindo Hernández et al. (2018a), esta etapa é dividida em 3 passos como segue:

1. Primeiramente ocorrerá a aquisição das imagens, onde tanto o tipo de câmera como a preparação do local (iluminação, organização do experimento, posicionamento de câmera etc) serão levados em conta. Uma ilustração simplificada da preparação do experimento no trabalho de Hernández et al. (2018a) pode ser visualizada na Figura 9. Nesta etapa alguns problemas de captação das imagens podem ser encontrados, pois o reflexo natural do fluido pode ocasionar ruídos durante o experimento. A técnica experimental utilizada para poder compensar este fator foi a inserção de corante azul na água para permitir a diferenciação da água com outros componentes da cena. Além disso, foram detectados alguns problemas de iluminação no experimento, problema este concertado com inserção de um painel de luz LED na cena na parte posterior da instalação experimental (Figura 9).
2. Em seguida, temos a correção de lente e calibração de imagem. Nesta etapa, uma tabela de padrões circulares (*LaVision* Tipo 31), foi considerada para obter uma série de imagens as quais foram capturadas para fazer a cobertura da área de interesse. Além disso, Em seguida, foram determinados os coeficientes tanto da câmera como das lentes com o propósito de evitar a distorção nas imagens digitalizadas e calibrar as imagens, obtendo uma equivalência entre pixels e milímetros.

3. Por fim, utilizando o software *ImageJ*, as imagens são salvas em formato de pilhas calibradas em escala de cinza. Vídeos ilustrativos foram disponibilizados no repositório *Mendeley Data* (HERNÁNDEZ et al., 2018b). Para fins do presente trabalho, foi utilizado o vídeo do Caso 1 apresentado em Hernández et al. (2018a).

Figura 13 – Etapa 1: Procedimento realizado durante a etapa de Digitalização das imagens.



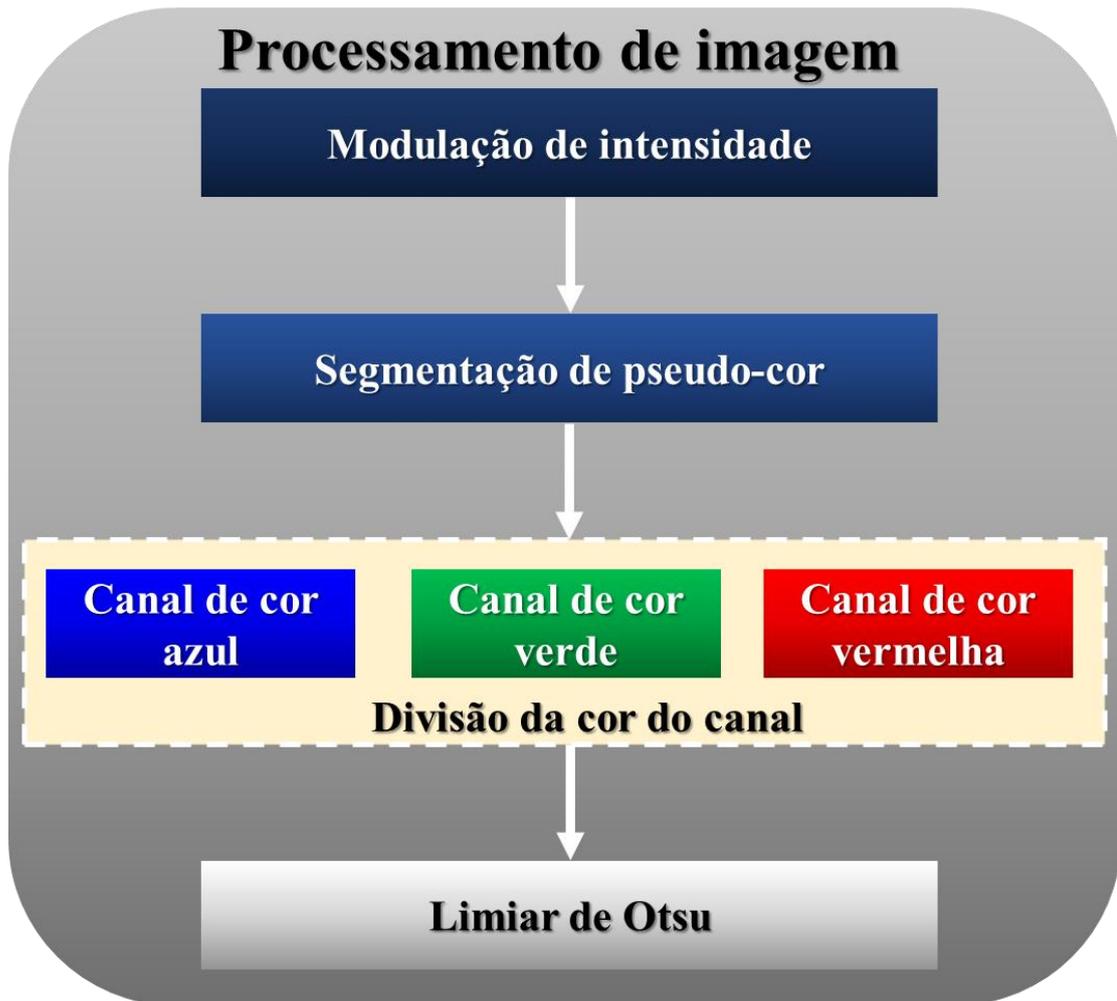
Fonte: Traduzido e adaptado de Hernández et al. (2018a).

A segunda fase (processamento) é mostrada na Figura 14 e descrita a seguir:

1. O primeiro passo na etapa do processamento de imagens diz respeito à modulação da intensidade. Nesta fase, com a finalidade de otimizar a região de interesse do estudo, as pilhas de imagens em escala de cinza calibradas são alocadas na memória, sendo a saída do último passo da etapa da digitalização de imagens.
2. Em seguida temos a segmentação de *pseudo-cor*, onde é realizado um melhoramento da imagem com a transformação da saída do passo anterior, referente à escala cinza das imagens em espaços individuais, para que dessa forma, a saturação possa ser variável. Dessa maneira, facilita-se a identificação da imagem através das cores aplicadas.
3. Na terceira etapa, as imagens são separadas através do passo anterior em 3 canais de cores RGB: azul, verde e vermelha. Com isso, são geradas 3 novas pilhas de imagens, cada uma com seu canal de cor correspondente e tendo a água bem diferenciada do restante dos elementos da gravação.

4. Por fim, o canal mais assertivo a ser escolhido em Hernández et al. (2018a) é o canal azul devido a que permitiu um melhor contraste entre as componentes da cena. O método de Otsu foi selecionado com a finalidade de converter a pilha de imagens resultadas do canal azul do passo anterior em uma pilha binária de imagens com a distinção do fluido do fundo da imagem.

Figura 14 – Etapa 2: Procedimento realizado durante a etapa de Processamento das imagens.

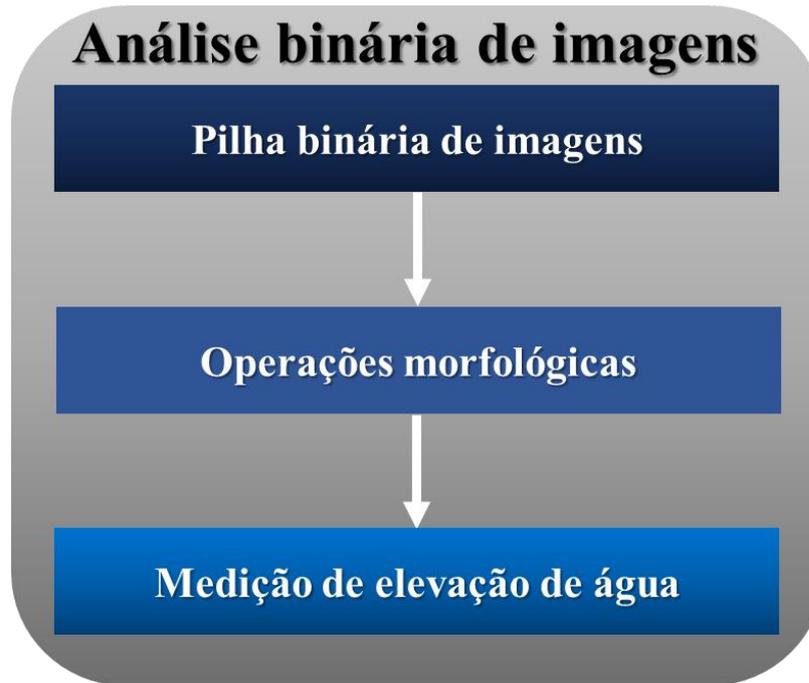


Fonte: Traduzido e adaptado de Hernández et al. (2018a).

A terceira etapa (análise das imagens) é mostrada na Figura 15, a qual foi disponibilizada em um *plugin* para uso no *ImageJ*. O uso do *plugin* requer abrir as imagens binárias criadas na seção anterior para serem analisadas utilizando operações morfológicas. Basicamente, a variação da área, definida por pixels brancos ou pretos, nas regiões de interesse, foi quantificada para relacionar a variação da elevação da superfície d'água e obter como saída, o arquivo com as medições desejadas. Com este procedimento é possível avaliar a variação da coluna d'água definida em uma área específica. O método utilizado para este procedimento é o de fração de

área, onde ocorre a descrição da densidade de pixels da imagem através de valores binários: 1 ou 0 referente ao preto e branco, dentro do espaço da região de interesse conhecida. Após realizar todos estes processos citados, teremos o resultado (saída do *software*), referente aos resultados das medições temporais de elevação d'água. Mais detalhes poder ser vistos em Hernández et al. (2018a).

Figura 15 – Etapa 3: Procedimento realizado durante a etapa de Análise binária das imagens.



Fonte: Traduzido e adaptado de Hernández et al. (2018a).

### 2.3. Casos de estudo

O presente estudo tem como objetivo avaliar os efeitos que têm algumas distorções no vídeo usado como entrada do software nos resultados das medições da elevação da superfície d'água. O vídeo do caso de estudo # 1 de Hernández et al. (2018a), disponibilizado na base de dados online (HERNÁNDEZ et al., 2018b) foi descarregado e utilizado com os scripts disponibilizados. Para a obtenção dos resultados com o vídeo em seu estado original, as etapas definidas na subseção anterior foram atendidas. Quatro tipos de distorções foram forçados artificialmente no vídeo original (Tabela 1): *azimuth* (efeito devido a uma rotação do dispositivo de captura), *focus* (efeito de variação de foco), *noise* (efeito de granulado na imagem) e *scale* (efeito de mudança de escala), gerando novos vídeos. De tal forma, as mesmas etapas foram repetidas para todos os casos de estudo, com a diferenciação da digitalização alterada. Os

apêndices A e B mostram detalhes do procedimento usado para configurar e implementar o software durante a presente aplicação.

O caso de estudo de referência corresponde ao experimento 1 descrito em Hernández et al. (2018a), cujos vídeos em formato .avi se encontram no repositório de livre acesso no site Mendeley Data (HERNÁNDEZ et al., 2018b). O caso corresponde a evento de embarque d'água gerado com condições *wet dam-break*  $h_0=0,144$  m e  $h_1=0,180$  m (ver detalhes na referência). Este caso de estudo foi considerado para verificar o efeito da variação da projeção azimutal, variação de foco, incremento de ruído e variação de escala das imagens de entrada nas séries temporais adquiridas de elevações d'água. As imagens do vídeo foram gravadas a 500 *fps*. A proporção de pixel nas imagens é 1 e a escala é 2,55364 *pixels/mm*. Apenas foi considerada a fase dos experimentos de  $0 < \text{tempo} < 1,25$  segundos. Esta fase inclui apenas o embarque de água e propagação desta sobre o convés, antes de interagir com a parede do tanque, evitando assim o escoamento de retorno sobre o convés, pois este tipo de escoamento tinha efeitos tridimensionais significantes na superfície livre.

Tabela 1 Casos de teste para avaliar o efeito de diferentes distorções nas imagens de entrada nas séries temporais de elevações da superfície d'água medidas.

<b>Tipo de análise de distorção</b>	<b>Nome do caso de estudo</b>					
Efeitos da projeção azimutal ( <i>azimuth</i> )	Original	<i>Azimuth 2.35°</i>		<i>Azimuth 1.6°</i>		
Efeitos da variação de foco ( <i>focus</i> )	Original	S02px	S04px		S06px	
Efeitos do incremento de ruído ( <i>noise</i> )	Original	SD05	SD15	SD25	SD35	
Efeitos de variação de escala ( <i>scale</i> )	Original	SC050	SC060	SC070	SC080	SC090

Fonte: Elaboração própria.

#### 2.4. Análise de diferenças entre os resultados

Os resultados da análise de imagens são séries temporais de elevação da superfície d'água. Para fins comparativos será avaliado o erro associado em todos os graus de deformação para todas as condições aplicadas. A forma utilizada para obtenção deste cálculo foi através da formulação do erro absoluto onde:

$$Er[\%] = 100 * \frac{x_i - x_v}{x_i} \quad (1)$$

sendo:

$Er$  [%] – Percentual de erro relativo;

$x_i$  – Valor da medição da deformação aplicada;

$x_v$  – Valor real do vídeo original;

### 3. RESULTADOS

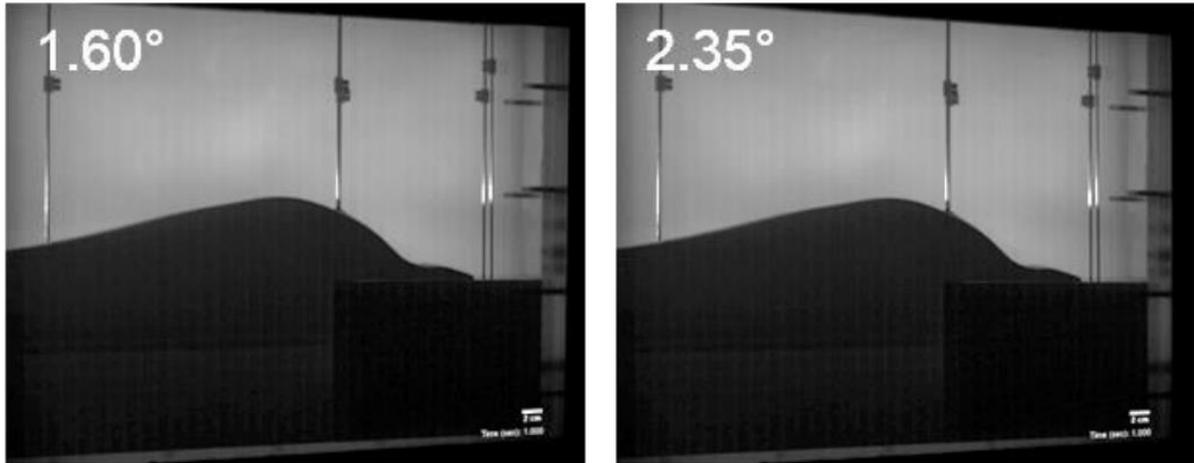
Nesta seção são apresentados todos os resultados obtidos pelo procedimento medição de elevação da superfície d'água utilizando técnicas de processamento e análise de imagens. Os procedimentos específicos do presente trabalho são descritos no Apêndice A (Documentação do procedimento de utilização do software *ImageJ*). Os resultados foram obtidos utilizando o caso de referência de Hernández et al. (2018a) e os vídeos nos quais foram aplicadas as aberrações ópticas já citadas, comparando a discrepância entre as séries temporais de elevações d'água obtidas. Quanto às deformações aplicadas:

Na análise da variação da projeção *azimuth*, foram aplicados dois graus de deformação, sendo estes:

- a. *Azimuth* 2.35°;
- b. *Azimuth* 1.60°.

De forma geral, tanto o uso incorreto de lentes para cada cena e a má calibração de uma câmera pode aumentar a distorção *azimuth* nas cenas captadas. Essa distorção pode ser bem evidenciada em cenas nas quais o objeto real possui linhas retas, pois durante a captação da imagem, tal efeito causa rotações que podem distorcer as linhas visualizadas. Como visto na Figura 16, foram aplicados dois graus desta distorção para o presente estudo.

Figura 16 – Graus de deformação da projeção *azimuth*.



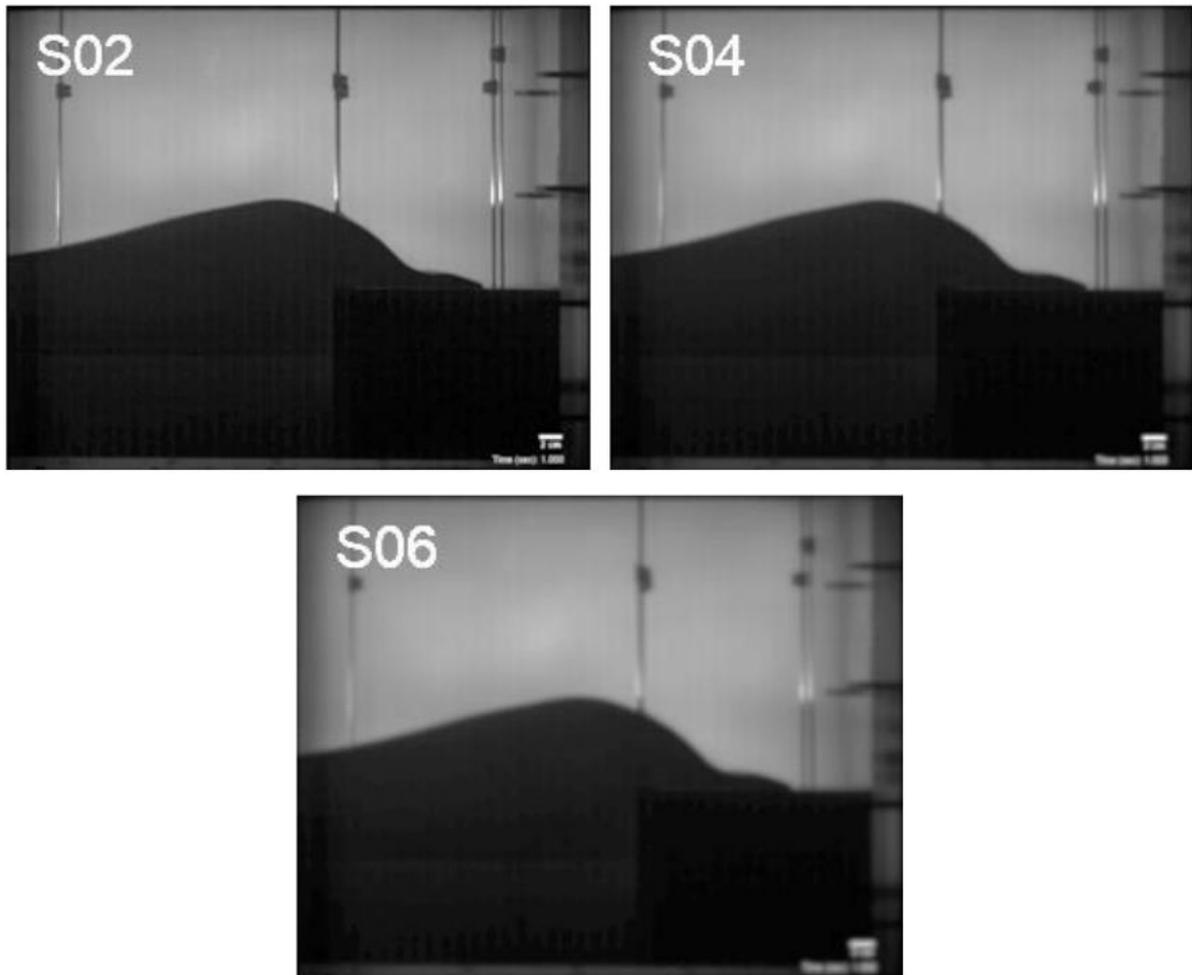
Fonte: Imagem modificada (HERNÁNDEZ et al., 2018b).

Na análise da variação do *focus* da imagem, foram aplicados três graus de deformação, sendo estes:

- a. S02px;
- b. S04px;
- c. S06px.

É possível que até o momento atual, não tenha sido possível criar uma câmera com capacidade de captação igual ou superior aos olhos humanos. Por isto, o foco de uma câmera inerentemente terá erros associados, que podem influenciar nos resultados encontrados. A forma mais coerente de minimizar os efeitos desta distorção é aplicar manualmente o foco inteiramente no fluido que é a ênfase principal deste estudo e, desta forma, o fundo da cena recebe um foco menor da câmera. Durante o aumento desta deformação o foco da cena filmada foi variado em três níveis. Na Figura 17 podem ser observados os níveis de deformação de foco aplicados.

Figura 17 – Diferentes níveis de variação do *focus* da imagem.



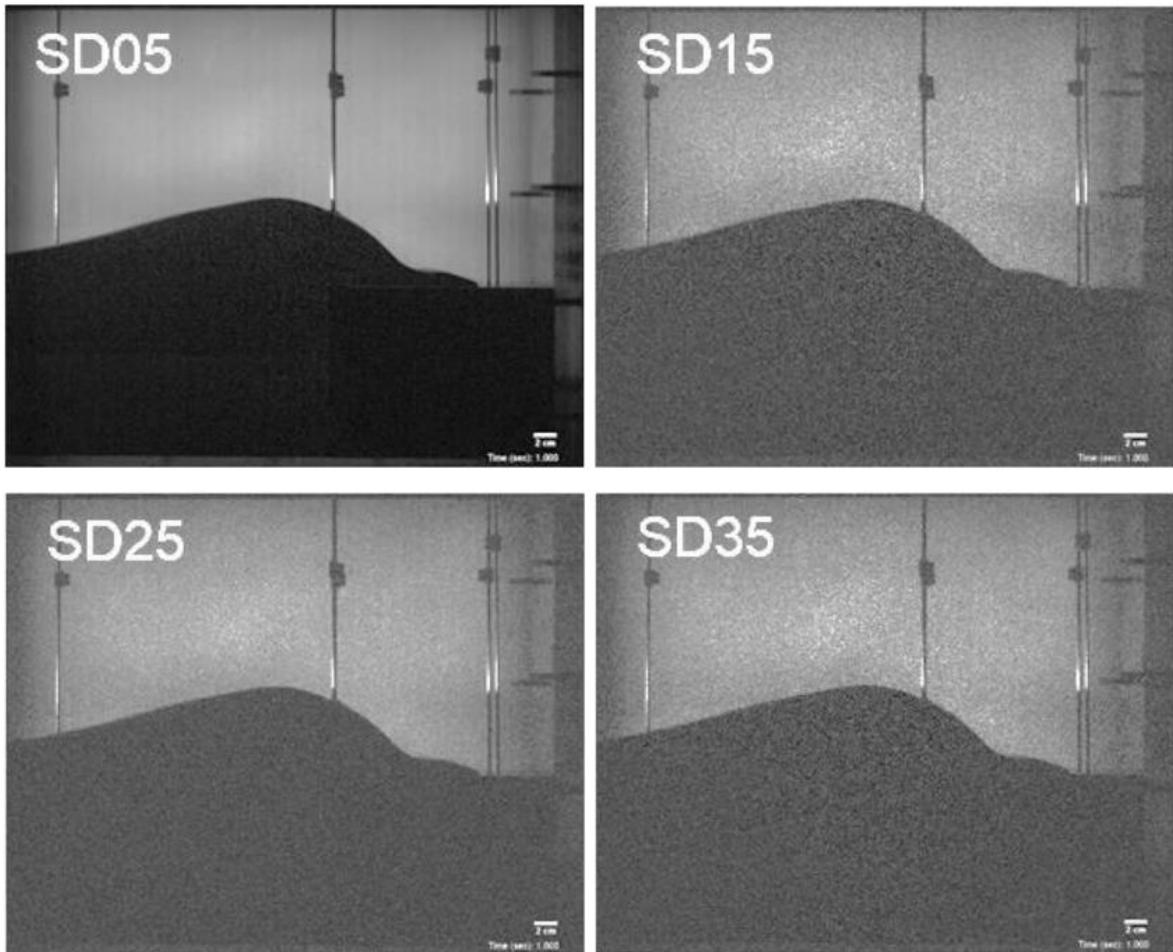
Fonte: Imagem modificada (HERNÁNDEZ et al., 2018b).

Na análise da aplicação de ruído (*noise*) nas imagens, foram aplicados quatro graus de deformação, sendo estes:

- a. NS\_SD05;
- b. NS\_SD15;
- c. NS\_SD25;
- d. NS\_SD35.

A distorção de ruído (*noise*) ocasiona ruídos na imagem que são condizentes com os granulados muito comuns em gravações com câmeras analógicas. Tal efeito estará sempre presente em qualquer câmera, seja em maior ou menor grau devido a captação de sinal. Nas câmeras, a captação de sinal é através da iluminação que irá atingir seu sensor. Na Figura 18 são ilustrados os quatro graus de variação de ruído considerados.

Figura 18 – Diferentes níveis de aplicação de *noise*.



Fonte: Imagem modificada (HERNÁNDEZ et al., 2018b).

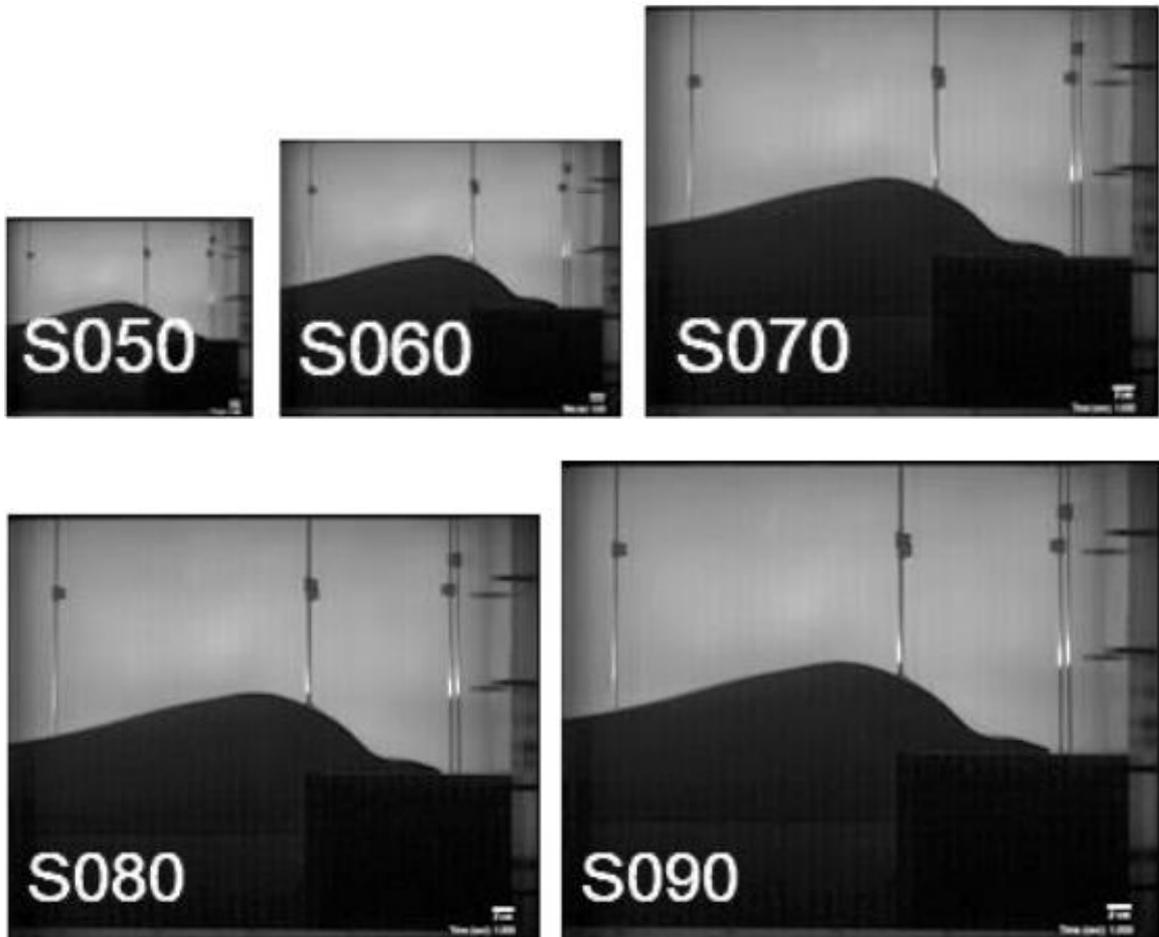
Na análise da variação das escalas nas imagens, foram aplicados cinco graus de variação, sendo estes:

- a. SC050;
- b. SC060;
- c. SC070;
- d. SC080;
- e. SC090.

A deformação de *scale* é decorrente ao fator de escala que a própria câmera utiliza para identificar as dimensões dos objetos que estão sendo captados. O software das câmeras faz o seu processamento para dimensionar as imagens captadas da forma mais próxima possível da realidade. Assim como os outros tipos de deformações citadas, a variação da *scale* também estará presente inerentemente nas imagens captadas, de acordo com o ângulo, distância,

posicionamento de câmera, as imagens terão proporções que diferem da vida real. Neste estudo, foram aplicados cinco graus de variação de *scale* para análise, como mostra a Figura 19.

Figura 19 – Variação de *scale* da imagem.



Fonte: Imagem modificada (HERNÁNDEZ et al., 2018b).

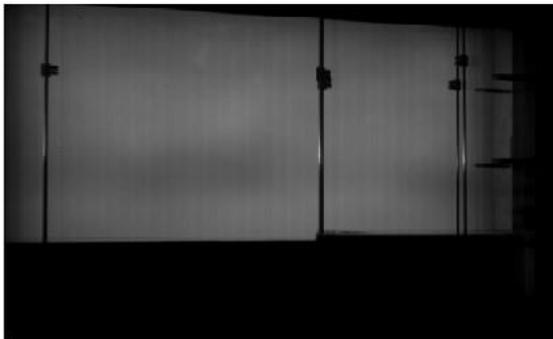
Podemos observar na Figura 20 a diferença existente entre os 4 métodos de deformação aplicados com relação ao caso de referência. Com relação à variação *azimuth*, é quase imperceptível a diferença com o caso original, mas ela se dá por uma rotação de câmera diferente do padrão utilizado. Como mostrado na Figura 20, a variação da projeção *azimuth* se difere pela rotação da câmera. Para o caso de *focus*, pode-se ver que a imagem fica embaçada para a aferição decorrente de uma má distância focal utilizada. Para o caso do *noise*, pode-se ver que há forte granulação na imagem. Por fim, na variação de *scale*, as dimensões de captura são escaladas de forma desigual às outras imagens apresentadas.

Figura 20 – Comparação entre as imagens nas quais foram implementadas as deformações avaliadas e a imagem do caso de referência.

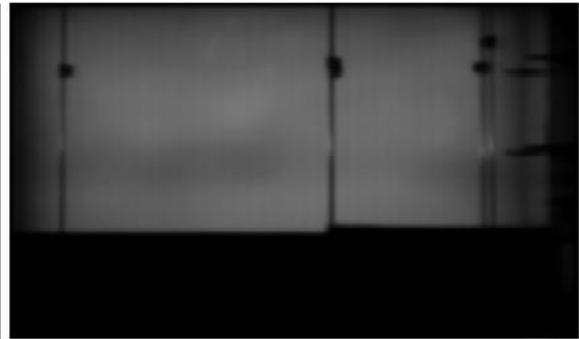


(a) Caso Original

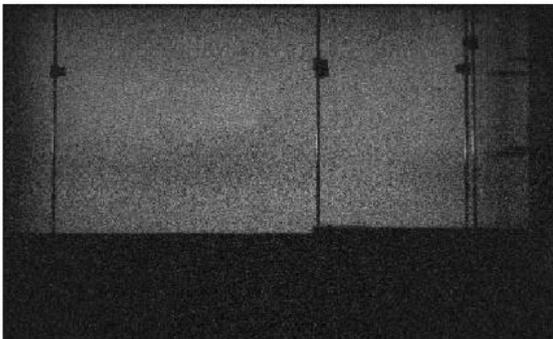
(b) Azimutal



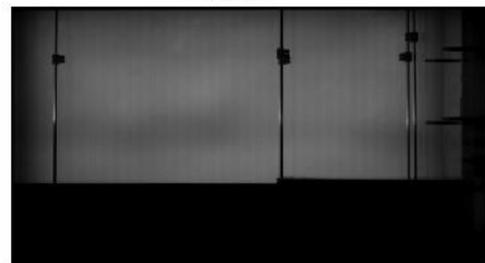
(c) Foco



(d) Noise



(e) Escala

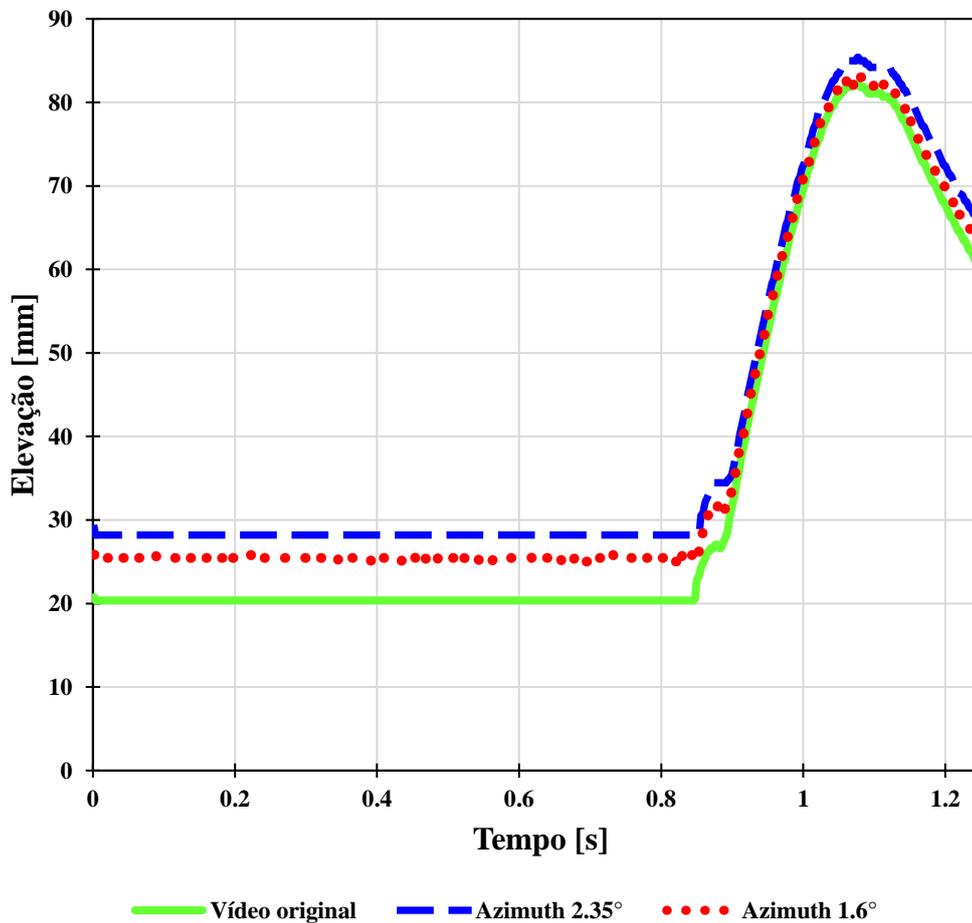


Fonte: Imagem modificada (HERNÁNDEZ et al., 2018b).

A Figura 21 mostra os resultados do efeito da variação do *azimuth* nas séries temporais de elevação da superfície d'água obtidas. As medições foram feitas a 30 mm do início do convés da estrutura (ver Anexo 1). Podemos notar que no início do movimento as linhas horizontais

têm valores iniciais diferentes, quando a elevação começa a variar significativamente, a tendência das curvas permanece similar. Percebe-se que a variação do *azimuth* influencia no aumento da elevação d'água obtida. Tal deformação tem o padrão de aumentar os valores aferidos desde o tempo inicial do experimento. Durante o intervalo de 0,9 segundos até 1,2 segundos, o comportamento de ambas as deformações aplicadas têm uma diferença mínima possível com relação ao vídeo original. Porém, de 1,2 segundos em diante as curvas começam a permanecer mais distantes uma da outra.

Figura 21 – Efeito da variação da projeção *azimuth* nas medições de elevação de superfície d'água a 30 mm do início do convés. As abscissas representam o tempo em segundos e as ordenadas a elevação d'água em metros.

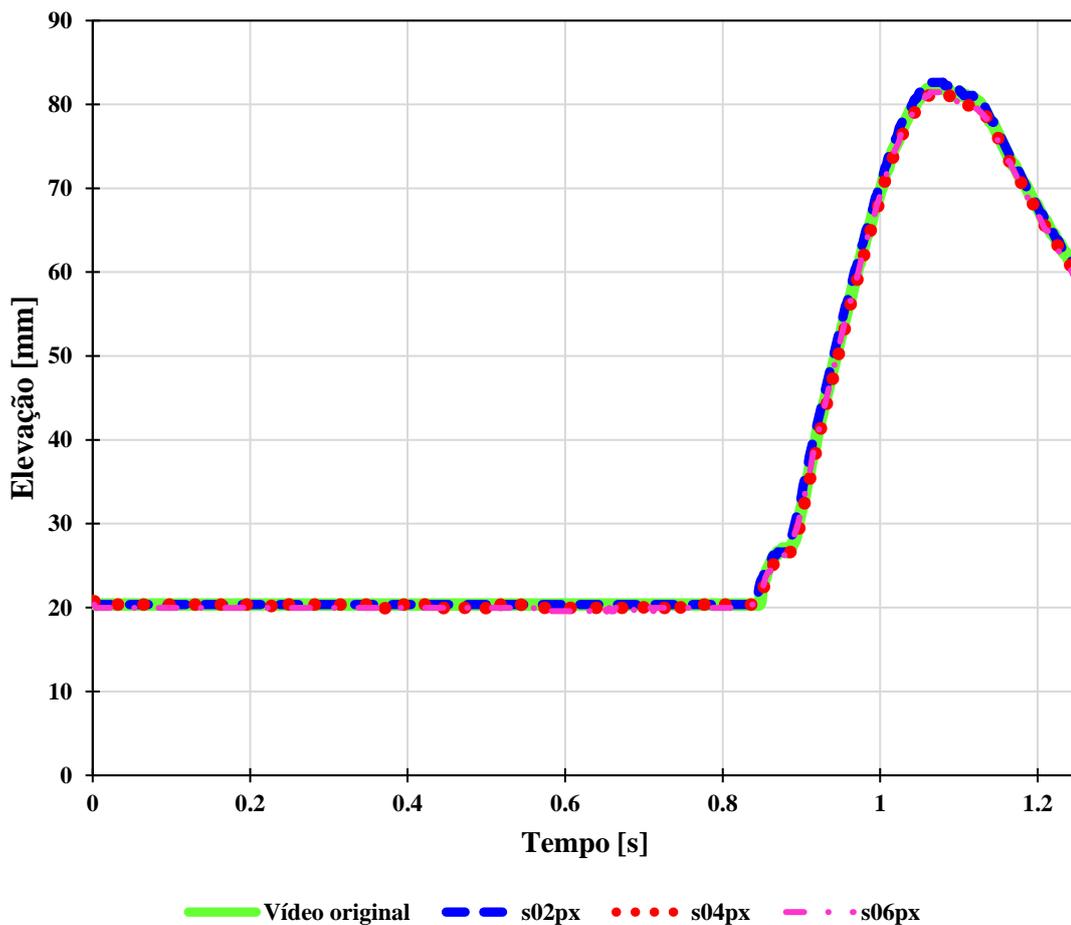


Fonte: Elaboração própria.

Como mostrado na Figura 22, o efeito causado pela variação do *focus* é bem diferente visivelmente com relação ao vídeo original. No entanto, embora esta condição esteja aplicada, o software obteve a definição do gráfico de elevação com poucos erros associados e a tendência

das curvas estão quase coincidentes. Ou seja, pode ser inferido que a distorção de *focus* pouco afeta as aferições obtidas; até mesmo o maior dos graus de deformação de *focus* s06px consegue ter resultados bem aferidos da elevação da elevação da superfície d'água.

Figura 22 – Efeito da variação do *focus* nas medições de elevação de superfície d'água a 30 mm do início do convés. As abscissas representam o tempo em segundos e as ordenadas a elevação d'água em metros.

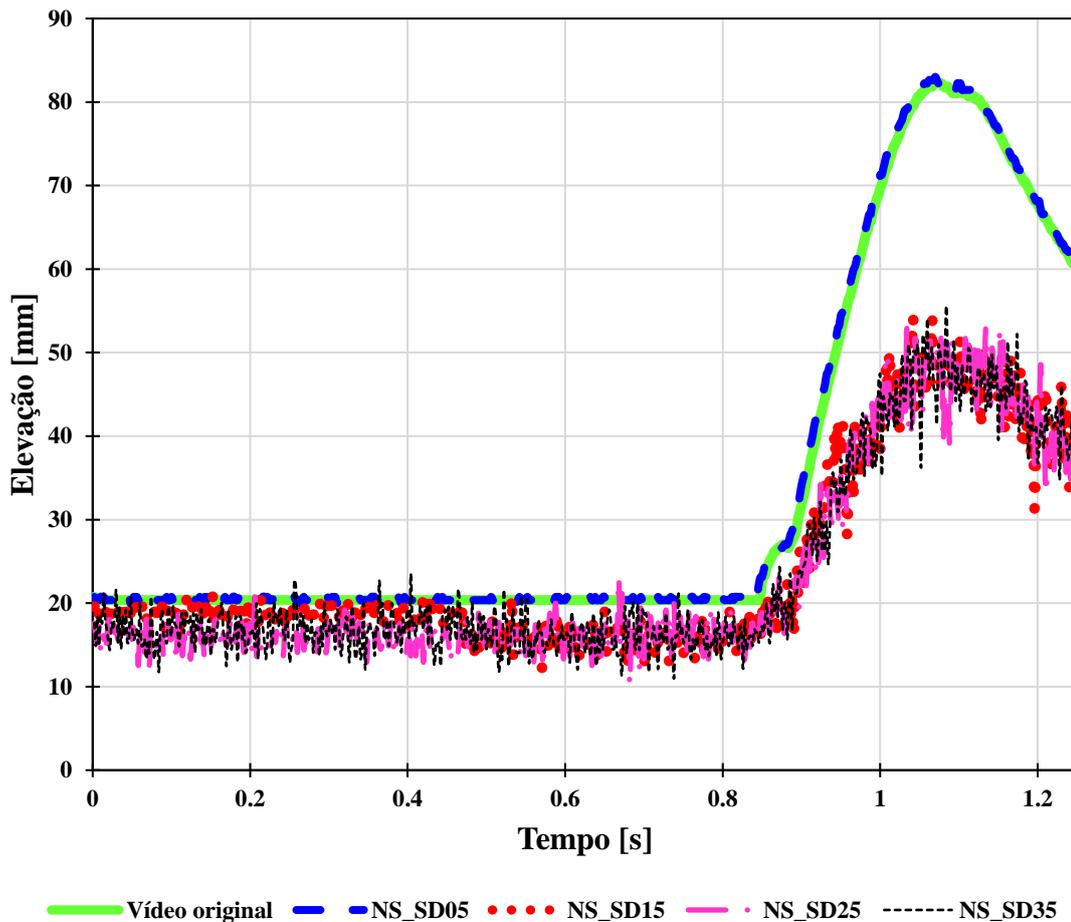


Fonte: Elaboração própria.

Como mostrado na Figura 23, a variação de *noise* apresenta alta granulação e podemos ver, como mostrado na Figura 28, que a tendência das curvas apresenta comportamento bem variável para altos graus deste tipo de distorção. Podemos observar que em pequenos graus de *noise*, o software ainda consegue representar precisamente a elevação d'água até NS\_SD05, porém um grau acima desta deformação inutiliza o plugin de mapeamento. Parece que o método não consegue mais diferenciar a água do fundo e dos ruídos associados. O software sequer

consegue mais obter um padrão para as curvas associadas e o erro associado torna-se extremamente perceptível.

Figura 23 – Efeito da variação do *noise* nas medições de elevação de superfície d’água a 30 mm do início do convés. As abscissas representam o tempo em segundos e as ordenadas a elevação d’água em metros.

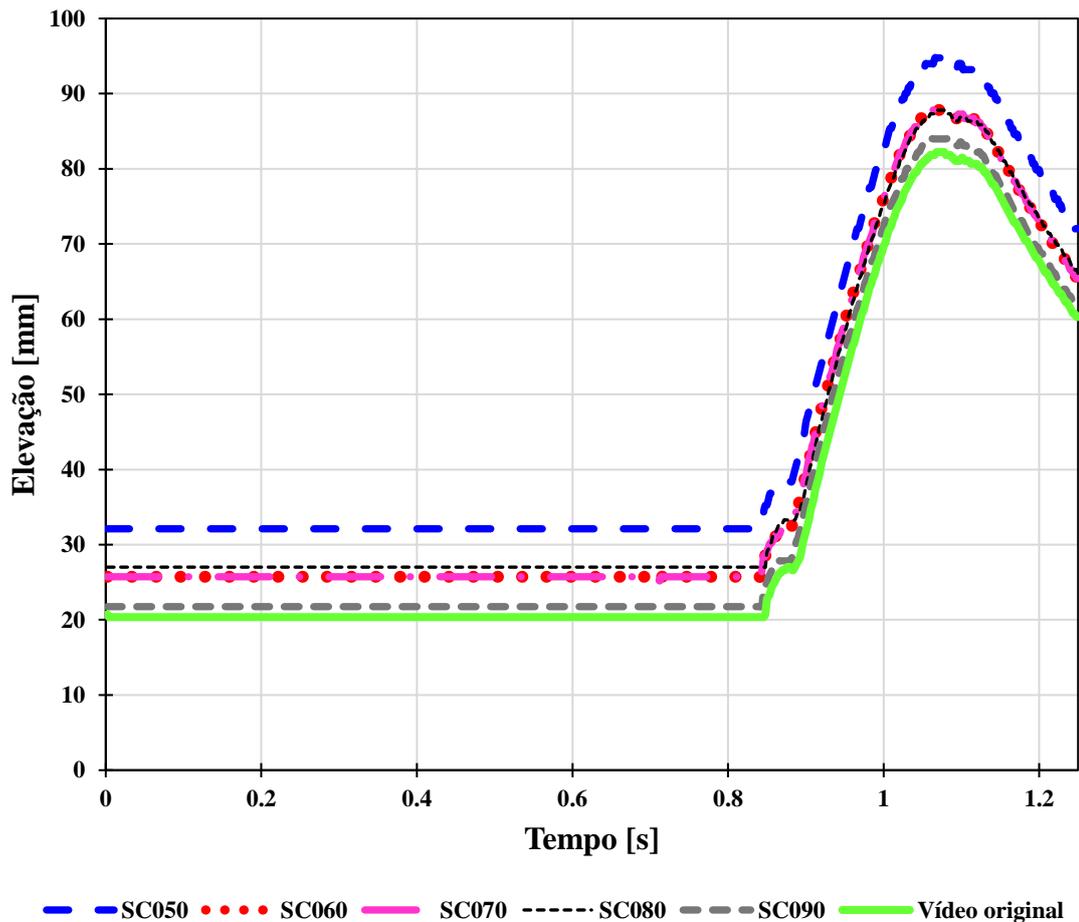


Fonte: Elaboração própria.

Como mostrado na Figura 24, com relação aos resultados de variação da *scale*, as dimensões das imagens obtidas a partir desta variação diferem das demais. A Figura 29 mostra a comparação das séries temporais de elevação obtidas para este caso de estudo. Podemos ver pela tendência das curvas que todas estas possuem o mesmo formato geométrico, porém a escala faz com que a proporção dos valores obtidos se defira em cada grau de deformação. De forma geral, o software consegue mapear de maneira aceitável o comportamento d’água, mas os diferentes graus de *scale* inseridos o faz perder gradativamente a precisão de dimensionamento. Na menor das escalas (SC050), o software extrapola as dimensões bem acima da elevação real.

Pode-se observar que dentre todas as outras deformações, esta resultou numa medição de onda de quase 100 mm, sendo que no caso real a água atinge pouco mais de 80 mm.

Figura 24 – Efeito da variação da *scale* nas medições de elevação de superfície d'água a 30 mm do início do convés. As abscissas representam o tempo em segundos e as ordenadas a elevação d'água em metros.



Fonte: Elaboração própria.

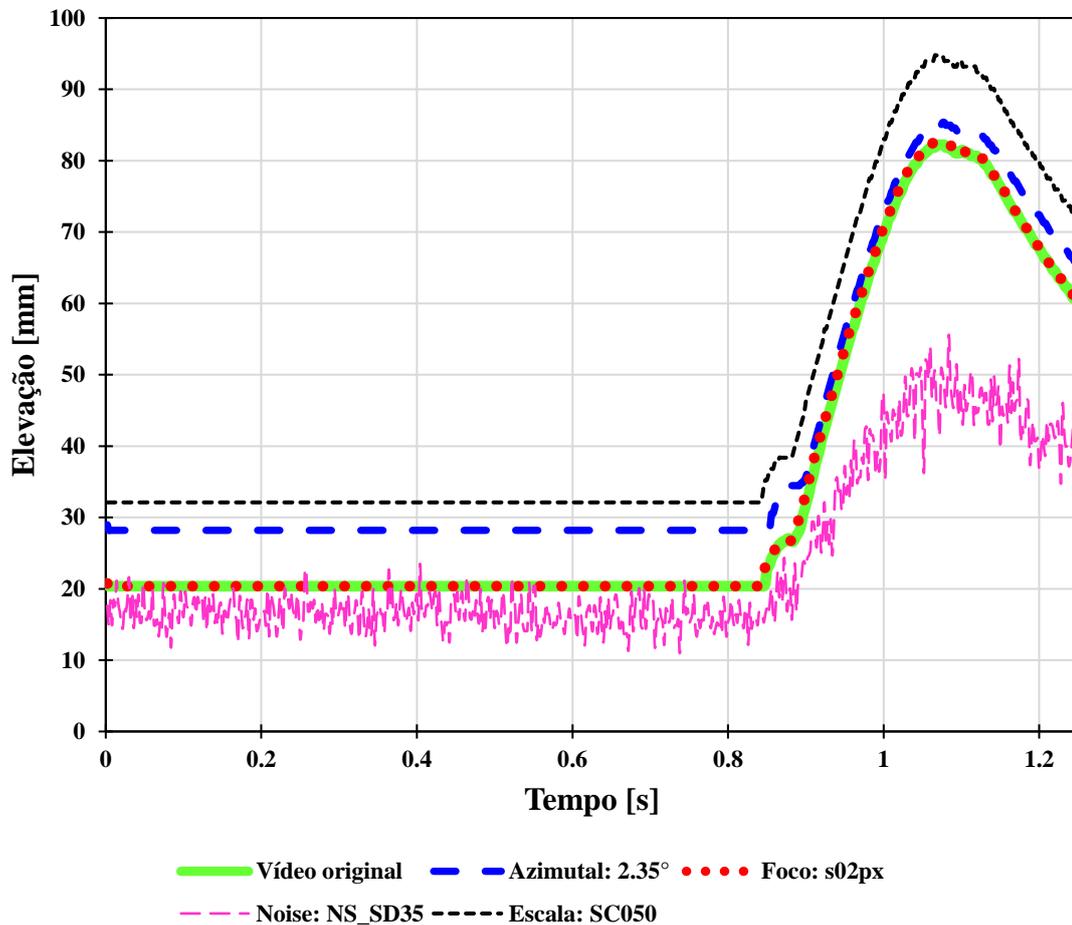
Agora, conforme a Figura 25, podemos analisar a influência das maiores deformações de cada um dos quatro casos de estudo avaliados em comparação com o caso original, para que dessa forma consigamos perceber a diferença destes cenários. Ou seja, o vídeo original foi comparado com a maior deformação dos casos: *azimuth*, *focus*, *noise* e *scale*. Na figura, podemos ver que dentre todas as deformações aplicadas, a de *focus* é a que melhor consegue se igualar com o próprio vídeo original, até em seu pior cenário, o software consegue manter os resultados aferidos coerentemente com a realidade.

Analisando a distorção de *noise*, diferentemente das outras, o método diminui a medição da elevação. Esta tem os menores valores obtidos com o pico da onda menor do que 60 mm, enquanto no caso original ela chega acima de 80 mm. Ademais, dentre todas as outras deformações, o pior cenário de *noise* impossibilita o software de mapear o comportamento da onda; a curva desta deformação apresenta o maior comportamento aleatório dentre as outras analisadas.

Com relação à variação da projeção *azimuth*, o software consegue mapear o comportamento da elevação d'água, porém o aumento da inclinação da imagem pode fazer com que os valores aferidos na programação aumentem proporcionalmente. O valor inicial de elevação na deformação *azimuth*, que deveria estar próximo de 20mm, tende para 30 mm. Quando acontece a elevação significativa d'água, os resultados se aproximam, mas quando a maior elevação medida é ultrapassada, os resultados começam a distanciar dos valores reais.

Por fim, analisando o pior cenário na variação de *scale*, o software mapeia coerentemente o comportamento d'água, mas não consegue converter os valores da escala adotada com os valores reais. O erro de *scale* trouxe a maior discrepância entre a maior medição d'água aferida chegando a quase 100 mm, sendo este o maior erro aferido no pico da onda.

Figura 25 – Análise do pior cenário de todas as condições em comparação com o vídeo original.

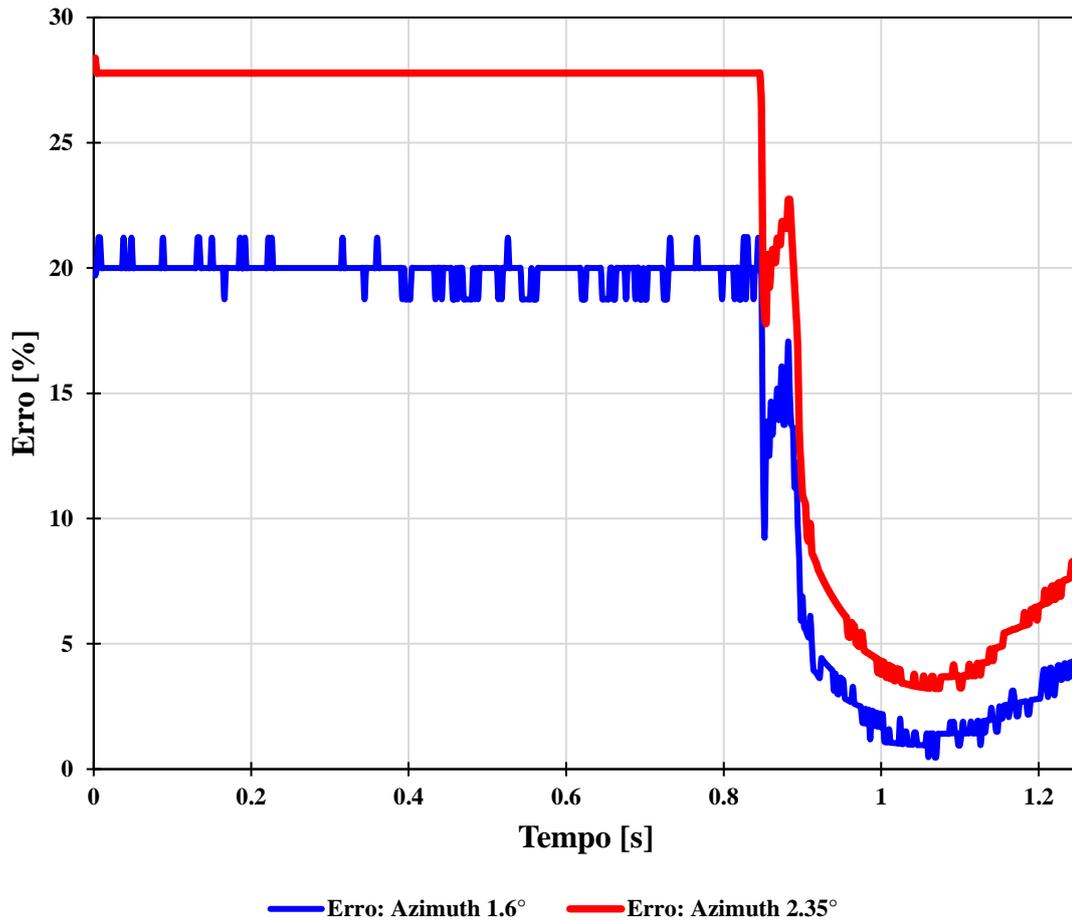


Fonte: Elaboração própria.

A Figura 26 mostra a variação temporal do erro associado com a variação do *azimuth*, calculado com a Equação (1) e considerando os dados do vídeo original como valores de referência. Neste caso, o maior erro encontrado foi de 28,38% em se tratando da deformação aplicada a inclinação de 2.35°. Pode ser observado que os maiores percentuais de erros encontrados são na primeira metade dos dados considerados do experimento, enquanto numa inclinação de 2.35° o erro segue constante. Na inclinação de 1.35° o erro tem alguns acréscimos e decréscimos. No início da segunda metade do experimento, o erro decai para ambas as condições. O menor erro encontrado neste espaço de tempo e em parâmetro global é de 0,47% chegando a ser bem próximo dos dados do vídeo original. Podemos afirmar que os resultados encontrados para esta deformação antes d'água iniciar o movimento podem não ser confiáveis. Porém, próximo do momento de pico da onda, os resultados encontrados têm a sua maior

proximidade com os resultados reais. No entanto, após este pico, os erros voltam a ter um comportamento crescente.

Figura 26 – Porcentagem de erro associado nos dois graus de deformação *azimuth* em função do tempo.

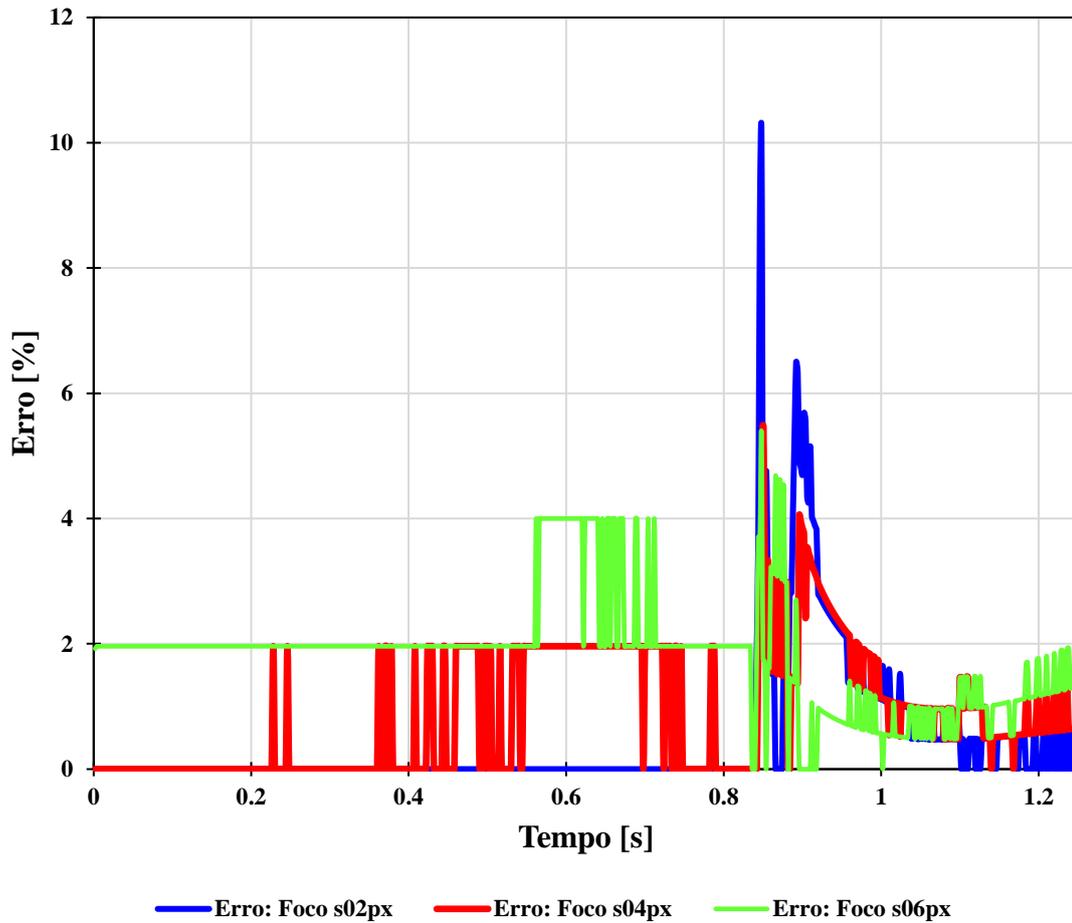


Fonte: Elaboração própria.

Em seguida, segue a análise percentual de erro para a deformação de *focus*, a qual é mostrada na Figura 27. Como esperado, tal deformação apresenta os menores erros associados. Em quase todo o experimento os erros mantêm-se abaixo de 6%. O maior erro registrado dessa deformação foi no *focus* aplicado em *s02px*, no valor de 10,17%. Em contrapartida, as demais variações de *focus* aplicadas não excedem 6%, mostrando valores bem próximos dos resultados do vídeo original. Na primeira metade do experimento, os erros de todos os três graus aplicados se mantêm com uma constância parcial, apresentando variações em pequenos intervalos. Ademais, nos três casos eles apresentam um erro máximo no intervalo de 0,8 segundos até 1

segundo. Após disso, atingem um mínimo local, crescendo novamente com a magnitude do erro próximo ao final do experimento.

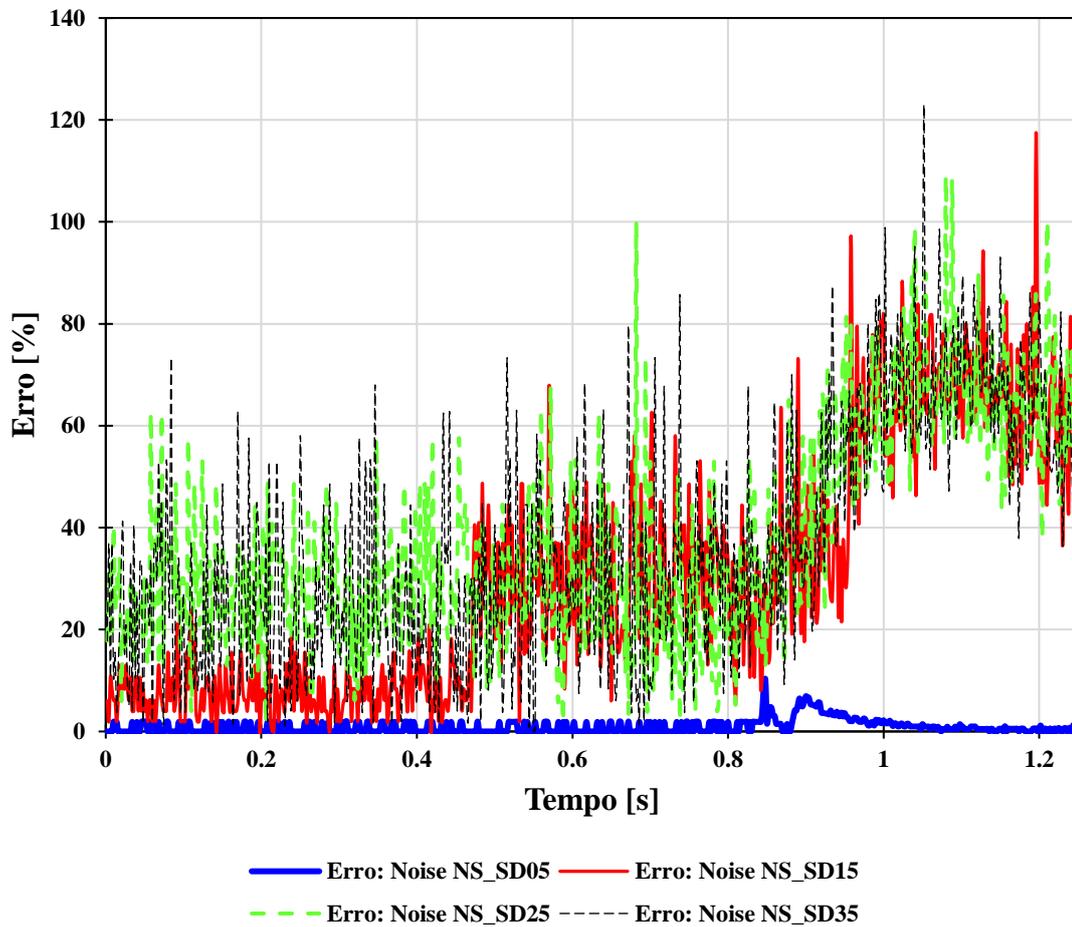
Figura 27 – Porcentagem de erro associado nos três graus de deformação *focus* em função do tempo.



Fonte: Elaboração própria.

Em seguida, a Figura 28 mostra a análise de erro considerando os quatro graus de deformação *noise*. No primeiro grau de deformação, NS\_SD05, são perceptíveis alguns erros mínimos. O software ainda consegue obter uma aproximação excelente em se tratando da comparação com os resultados do vídeo original. O maior erro nesta condição é de 10,17% e, em grande parte, o comportamento da curva aproxima-se de 0. Já para os demais graus desta deformação, nenhum valor obtido poderia se considerar confiável, pois os erros encontrados passam até mesmo de 100%. Ou seja, o método do software não consegue mapear com praticamente nenhuma precisão os resultados obtidos.

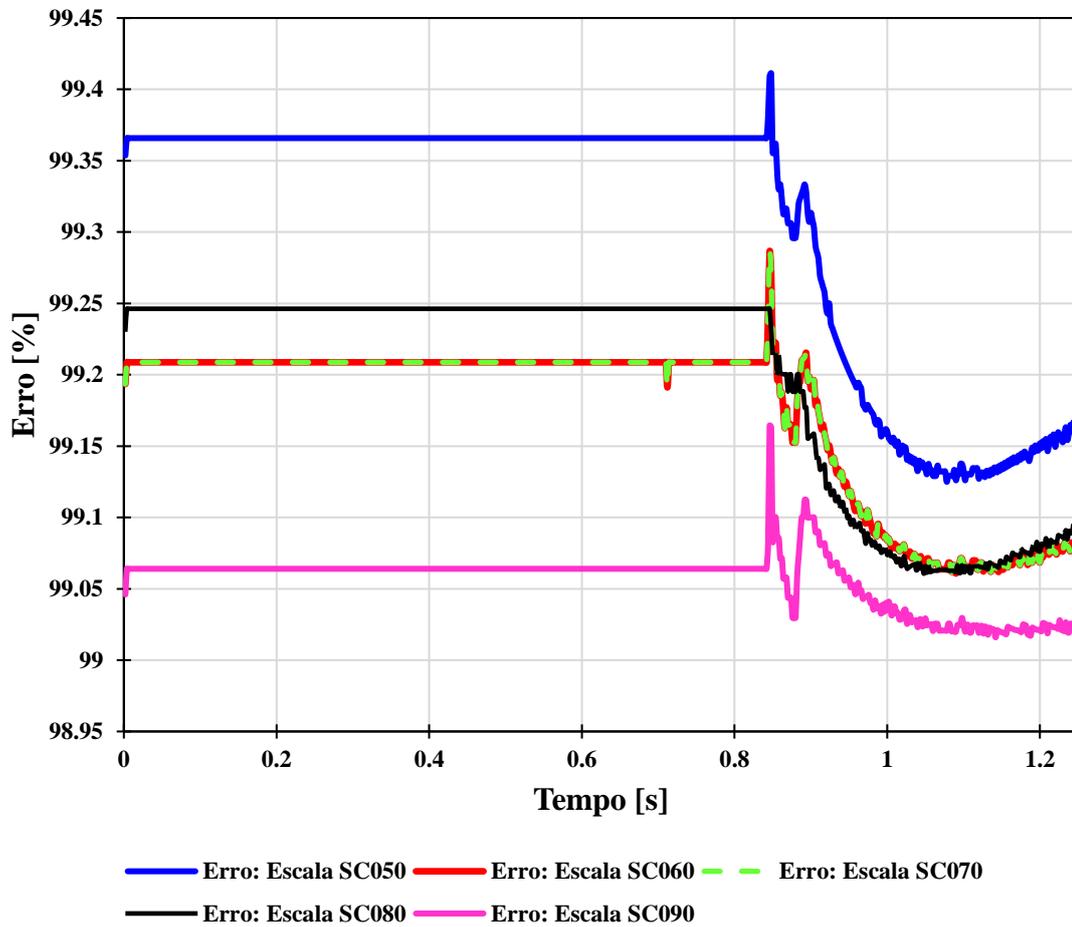
Figura 28 – Porcentagem de erro associado nos quatro graus de deformação *noise* em função do tempo.



Fonte: Elaboração própria.

Por último, a Figura 29 mostra a análise de erros associados com a variação de *scale*. No início do experimento, todas as curvas apresentam um erro constante e bastante elevado em todos os casos. Quando a água começa o movimento em si, todas as curvas sobem em um pico de erro máximo e após isso começam a diminuir. No final do experimento, quatro curvas mostram um comportamento crescente em relação ao seu erro associado, com exceção do *scale* SC090, que mostra uma possível constância na faixa de erro em uma faixa um pouco acima de 99%. Em geral, pode-se concluir que nenhum grau desta deformação pode ter apresentado resultados confiáveis.

Figura 29 – Porcentagem de erro associado nos cinco graus de deformação de *scale* em função do tempo.



Fonte: Elaboração própria.

#### 4. CONCLUSÕES

Dados experimentais relacionados com variáveis hidrodinâmicas são de relevância na validação de modelos analíticos e numéricos na Engenharia Naval e Oceânica. O presente trabalho considerou a avaliação de possíveis erros na medição de elevações da superfície d'água em experimentos bidimensionais utilizando técnicas de imagens, causados por possíveis deformações que as imagens de entrada possam ter. De forma geral, foram analisados os efeitos que vários tipos de distorções das imagens de entrada: *azimuth*, *focus*, *noise* e *scale*. Foram utilizados os métodos, software e vídeo de referência propostos em Hernández et al. (2018a), que propôs uma metodologia open-source de processamento e análise de imagens para obter medições de elevação d'água a partir de vídeos obtidos em experimentos hidrodinâmicos bidimensionais.

Em geral, os resultados mostraram que os efeitos devido às distorções de *scale* e *noise* inerentemente precisam ser considerados em medições por imagens de elevação da superfície d'água devido ao seu alto potencial de comprometer os resultados encontrados. Em contrapartida, os resultados encontrados referente às deformações *azimuth* e de *focus* mostram poucas diferenças em se comparando com os resultados do vídeo original. Com relação às distorções estudadas, conclui-se o seguinte:

Projeção *azimuth*: Aberração resultante da rotação do dispositivo de captura. O comportamento do gráfico apresentado mostra erros médios. Até o início da detecção da elevação d'água, o programa detectou certa diferença na elevação inicial e conforme aumentou o grau de deformação. Esta elevação inicial afastou-se cada vez mais do vídeo original. Porém, durante o percurso da interação do fluido com a estrutura, as séries temporais de elevação resultaram em medidas bem semelhantes para as variações avaliadas.

*Focus*: Aberração causada pela incorreta posição do dispositivo de captura ou uso de uma distância focal incorreta. Os resultados obtidos para esta deformação foram os melhores apresentados, as séries temporais estavam aproximadamente sobrepostas, com diferenças decimais de valores.

*Noise*: Esta aberração pode ser causada por um aumento de granulação nas imagens e alterações na iluminação. Segundo os resultados obtidos, em pequenos graus aplicados desta deformação, ela se mostra com insignificantes divergências em relação ao vídeo original. Porém percebe-se que nas maiores variações dessa deformação, o programa não consegue obter os dados de elevações de forma coerente.

*Scale*: Variação que pode ser devida à redução da resolução do dispositivo de captura ou mudança de posição. As curvas dos resultados obtidos apresentaram estar relevantemente paralelas entre si, porém não conseguem estar sobrepostas. Conforme a resolução dos vídeos se altera em níveis significantes de variação, o programa não capta precisamente as medidas de elevações.

Espera-se que o estudo realizado possa contribuir na quantificação de erros associados a medições de elevação da superfície d'água em experimentos bidimensionais, utilizando técnicas de análise de imagens.

## REFERÊNCIAS

AREU-RANGEL, O. et al. Green water loads using the wet dam-break method and SPH. **Ocean Engineering**, v. 108392, p. 1–16, 2020.

- BABUSKA, I.; ODEN, J. T. Verification and validation in computational engineering and science: basic concepts. **Computer methods in applied mechanics and engineering**, v. 193, n. 36–38, p. 4057–4066, 2004.
- BADADANI, V.; SRIRANGA, T.; SRIVATSA, S. R. Analysis of uncertainty in digital image correlation technique for strain measurement. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 10, p. 20912–20919, 2018.
- BLENKINSOPP, C. E. et al. Application of LiDAR technology for measurement of time-varying free-surface profiles in a laboratory wave flume. **Coastal Engineering**, v. 68, p. 1–5, 2012.
- BOCCADAMO, G.; ROSANO, G. Excessive Acceleration Criterion: Application to Naval Ships. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 7, n. 12, p. 431, 2019.
- CANG, Y.; HE, H.; QIAO, Y. Measuring the wave height based on binocular cameras. **Sensors**, v. 19, n. 6, p. 1338, 2019.
- CARTER, V. G.; RIZVI, M. J. Computational Analysis of Flight Deck Structural Behaviour under Variable Loadings. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 9, n. 11, p. 1262, 2021.
- CHEN, Y.; XUE, M.-A. Numerical simulation of liquid sloshing with different filling levels using OpenFOAM and experimental validation. **Water**, v. 10, n. 12, p. 1752, 2018.
- CHRYSSOSTOMIDIS, C.; LIU, Y. **Design of Ocean Systems (2.019), Spring 2011, Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare, Spring 2011.**, 2011. Disponível em: <<https://ocw.mit.edu/courses/2-019-design-of-ocean-systems-spring-2011/>>. Acesso em: 13 set. 2022
- CHUANG, W.-L.; CHANG, K.-A.; MERCIER, R. Kinematics and dynamics of green water on a fixed platform in a large wave basin in focusing wave and random wave conditions. **Experiments in Fluids**, v. 59, n. 6, p. 100, 2018.
- DE SANTO, M. et al. Standard uncertainty evaluation in image-based measurements. **Measurement**, v. 36, n. 3–4, p. 347–358, 2004.
- DE SANTO, M.; LIGUORI, C.; PIETROSANTO, A. Uncertainty characterization in image-based measurements: a preliminary discussion. **IEEE transactions on instrumentation and measurement**, v. 49, n. 5, p. 1101–1107, 2000.
- DRUMMEN, I.; HOLTSMANN, M. Benchmark study of slamming and whipping. **Ocean Engineering**, v. 86, p. 3–10, 2014.
- ESCUADERO, M. et al. Virtual Level Analysis Applied to Wave Flume Experiments: The Case of Waves-Cubipod Homogeneous Low-Crested Structure Interaction. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 9, n. 2, p. 230, 2021.
- FALTINSEN, O. M.; LANDRINI, M.; GRECO, M. Slamming in marine applications. **Journal of Engineering Mathematics**, v. 48, n. 3–4, p. 187–217, 2004.

FONTES, J. V. et al. On the evolution of different types of green water events. **Water**, v. 13, n. 9, p. 1148, 2021.

GILMORE, T. E.; BIRGAND, F.; CHAPMAN, K. W. Source and magnitude of error in an inexpensive image-based water level measurement system. **Journal of hydrology**, v. 496, p. 178–186, 2013.

GOLDSTEIN, A. Errors in ultrasound digital image distance measurements. **Ultrasound in medicine & biology**, v. 26, n. 7, p. 1125–1132, 2000.

GÓMEZ-MARTÍN, M. E. et al. Cubipod® Armor Design in Depth-Limited Regular Wave-Breaking Conditions. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 6, n. 4, p. 150, 2018.

HE, T. et al. CFD simulation and experimental study on coupled motion response of ship with tank in beam waves. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 10, n. 1, p. 113, 2022.

HERNÁNDEZ, I. et al. Water elevation measurements using binary image analysis for 2D hydrodynamic experiments. **Ocean Engineering**, v. 157, p. 325–335, 2018a.

HERNÁNDEZ, I. et al. **Water elevation measurements using binary image analysis for 2D hydrodynamic experiments. Mendeley Data, V3.** , 2018b. Disponível em: <<https://doi.org/10.17632/9vwdgv2g5z.3>>

HERNÁNDEZ-FONTES et al. Green water evolution on a fixed structure induced by incoming wave trains. **Mechanics Based Design of Structures and Machines**, p. 1–29, 2020a.

HERNÁNDEZ-FONTES et al. Violent water-structure interaction: Overtopping features and vertical loads on a fixed structure due to broken incident flows. **Marine Structures**, v. 74, p. 102816, 2020b.

HERNÁNDEZ-FONTES et al. Patterns and vertical loads in water shipping in systematic wet dam-break experiments. **Ocean Engineering**, v. 197, p. 106891, 2020c.

HERNÁNDEZ-FONTES, J. V. et al. On the generation of isolated green water events using wet dam-break. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, v. 140, n. 5, 2018.

HERNÁNDEZ-FONTES, J. V. et al. Green water on a fixed structure due to incident bores: guidelines and database for model validations regarding flow evolution. **Water**, v. 11, n. 12, p. 2584, 2019.

HERNÁNDEZ-FONTES, J. V. et al. A simplified and open-source approach for multiple-valued water surface measurements in 2D hydrodynamic experiments. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 2020d.

IMAGEJ. **ImageJ: Image Processing and Analysis in Java**. Disponível em: <<https://imagej.nih.gov/ij/>>. Acesso em: 19 set. 2022.

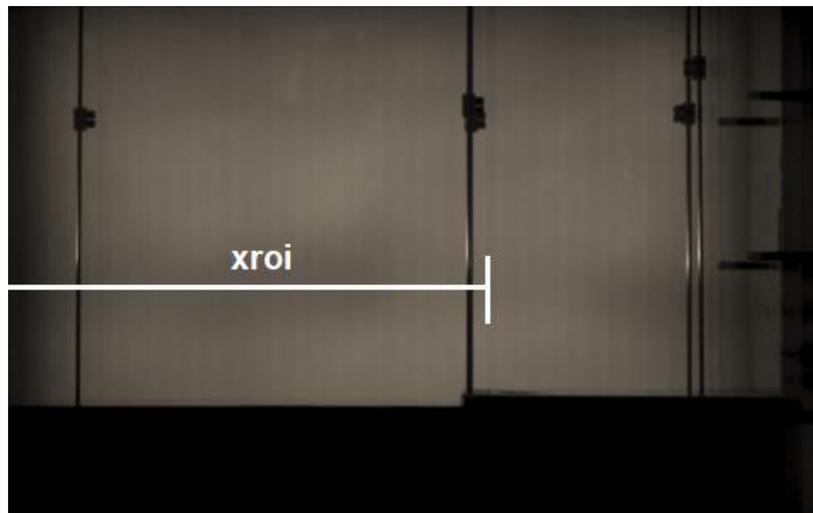
KOCAMAN, S.; OZMEN-CAGATAY, H. The effect of lateral channel contraction on dam break flows: Laboratory experiment. **Journal of Hydrology**, v. 432, p. 145–153, 2012.

- LI, W.; LIAO, Q.; RAN, Q. Stereo-imaging LSPIV (SI-LSPIV) for 3D water surface reconstruction and discharge measurement in mountain river flows. **Journal of Hydrology**, v. 578, p. 124099, 2019.
- LIU, S.; HIGUCHI, J.; IKOHAGI, T. Experimental study of cavity flow behavior on a 2-D hydrofoil. **JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering**, v. 42, n. 4, p. 641–648, 1999.
- LYU, W. et al. Experimental and numerical investigation of sloshing using different free surface capturing methods. **Applied Ocean Research**, v. 68, p. 307–324, 2017.
- MA, Y. et al. Experimental study of plunging solitary waves impacting a vertical slender cylinder. **Ocean Engineering**, v. 202, p. 107191, 2020.
- QIN, S. et al. Flume experiments on energy conversion behavior for oscillating buoy devices interacting with different wave types. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 9, n. 8, p. 852, 2021.
- RAJENDRAN, S.; FONSECA, N.; SOARES, C. G. Simplified body nonlinear time domain calculation of vertical ship motions and wave loads in large amplitude waves. **Ocean Engineering**, v. 107, p. 157–177, 2015.
- ROSSI, G. B. et al. Measurement of Sea Waves. **Sensors**, v. 22, n. 1, p. 78, 2021.
- SARMENTO, A. Wave flume experiments on two-dimensional oscillating water column wave energy devices. **Experiments in fluids**, v. 12, n. 4, p. 286–292, 1992.
- STANSBY, P.; CHEGINI, A.; BARNES, T. The initial stages of dam-break flow. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 374, p. 407–424, 1998.
- STERN, F. et al. **Verification and validation of CFD simulations**. [s.l.] IOWA INST OF HYDRAULIC RESEARCH IOWA CITY, 1999.
- VAN ESSEN, S. et al. Linking experimental and numerical wave modelling. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 8, n. 3, p. 198, 2020.
- WANG, S.; GUEDES SOARES, C. Review of ship slamming loads and responses. **Journal of Marine Science and Application**, v. 16, n. 4, p. 427–445, 2017.
- YAN, B.; ZHANG, R.; ZHANG, P. Flume Experiment on the Sediment-Retaining Effect of Submerged Breakwaters under the Combined Action of Waves and Currents. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 8, n. 5, p. 340, 2020.
- ZHOU, Y. et al. Image pre-filtering for measurement error reduction in digital image correlation. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 65, p. 46–56, 2015.

## APÊNDICE A – DOCUMENTAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE IMAJES

No presente estudo foram utilizados o software livre e o vídeo disponibilizado na pesquisa de Hernández et al. (2018a). Os plugins têm como nome *VWP Segmentation* e *VWP\_H\_FractionA*, correspondendo às etapas de processamento e análise de imagens, respectivamente. Com a execução dos vídeos citados no *ImageJ*, os plugins do software trabalham da seguinte maneira: são declarados a localização longitudinal da região de interesse (ROI), onde uma matriz de valores separados por vírgula é adotada. Valores da localização no eixo X precisam ser definidos em unidades de "pixels". Por esta matriz declarada, é possível determinar onde são localizadas as posições (na cena) que serão averiguadas. Ou seja, o plugin pode ser alterado para estudos de determinados casos, considerando vários sensores virtuais. No caso deste trabalho, foi configurado apenas para a posição localizada a 30mm do convés. A Figura A1 ilustra a maneira na qual é considerada a posição do sensor virtual no script (*xroi*).

Figura A1 – Posição arbitrária longitudinal para visualização da declaração da posição da matriz *xroi*. Imagem do experimento de Hernández et al. (2018a).



Fonte: Repositório Mendeley Data (HERNÁNDEZ et al., 2018b).

De maneira geral, pelo conhecimento das posições que são desejadas para medir a elevação d'água, é possível executar a alteração do plugin do software para que seja determinado em quais localidades (em pixels) se deseja fazer o estudo de onda. Podemos observar na Figura A2 as posições que vêm por padrão no software e que podem ser alteradas conforme a necessidade.

Figura A2 – Posições padronizadas do plugin *VWP\_H\_FractionA*. Caso não seja alterado o padrão, o software executa as elevações para todas estas posições mostradas. Imagem do plugin do experimento de Hernández et al. (2018a).

```

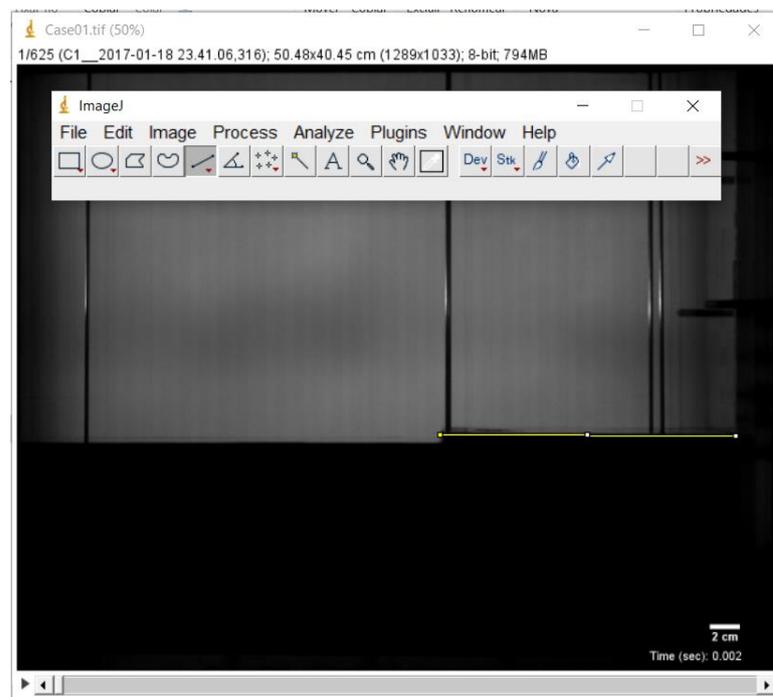
*/
xroi = newArray(78,103,129,154,180,205,231,256,282,307,333,358,
                384,409,435,460,486,511,537,562,588,613,639,664,
                690,715,720,741,766,792,817,843,868,894,919,945,
                970,996,1021,1047,1072,1098,1123,1149);
/*

```

Fonte: Repositório Mendeley Data (HERNÁNDEZ et al., 2018b).

Ademais, é necessário averiguar se a escala do software e a escala do vídeo estão equivalentes. A forma mais simples de verificá-la para o presente caso de estudo é traçando uma linha no convés (com a ferramenta “linha” do *ImageJ*) e definindo o valor de 195 mm (que é seu comprimento real). Através deste procedimento, deve-se confirmar a nova escala adquirida na aba “*Analysis*” do *ImageJ* e então modificar a escala no plugin, para que estejam devidamente correspondentes. Na Figura A3, é mostrada a linha sendo traçada através do convés cujo dado de tamanho é conhecido, para assim executar possível correção de escala.

Figura A3 – Linha traçada no convés cujo tamanho real é 195 mm. Imagem do experimento de Hernández et al. (2018a).



Fonte: Repositório Mendeley Data (HERNÁNDEZ et al., 2018b).

Após esta correção de tamanho (caso necessário), é mostrado na Figura A4 o dado do plugin *VWP\_H\_FractionA* que será necessário alterar em caso de que existam escalas diferentes entre o software e vídeo.

Figura A4 – Dado de escala no plugin *VWP\_H\_FractionA*. Imagem do plugin do experimento de Hernández et al. (2018a).

```

*/
fps = 500;
ratio = 2.55364;
aspect = 1.000;
/*

```

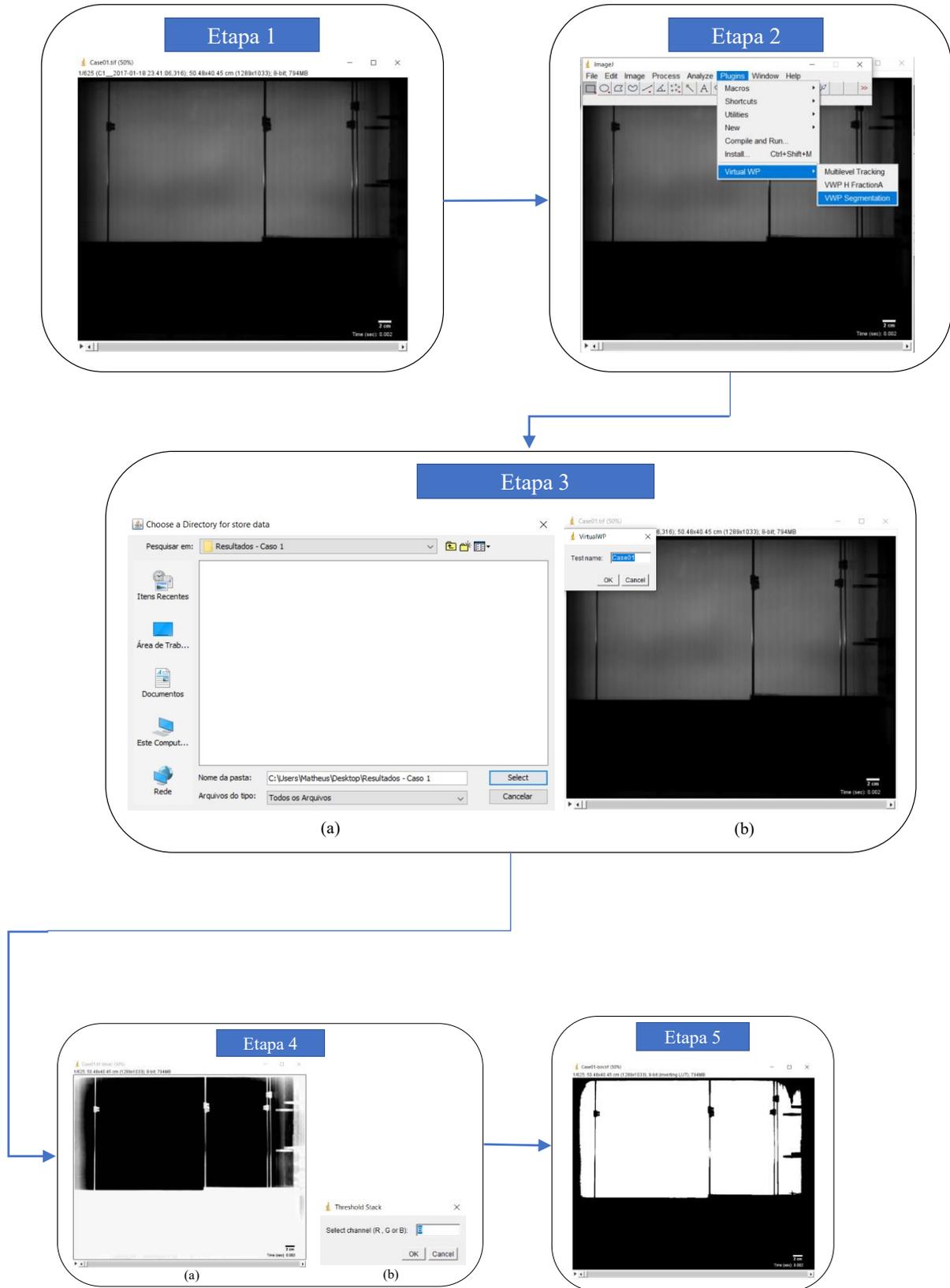
Fonte: Repositório Mendeley Data (HERNÁNDEZ et al., 2018b).

O procedimento para a plotagem de gráficos do caso 1 de Hernández et al. (2018a) consiste nas seguintes etapas que podem ser visualizadas na Figura A5:

1. É aberto o arquivo do caso 1 (em formato TIF) utilizando o *ImageJ*:
  - a. Nesta parte deve-se ter salvado o caso 1, que pode ser acessado através do no repositório Mendeley Data doi:10.17632/9vwdgv2g5z.1 de Hernández et al., (2018);
  - b. As formas de abertura do arquivo no *ImageJ* podem ser tanto arrastando o arquivo para a janela do programa ou indo importando manualmente clicando em “*File*” e em seguida “*Import*”, no *ImageJ*, para então selecionar o caso 1 para ser aberto.
2. Aplica-se o plugin *VWP Segmentation*:
  - a. Junto com os arquivos salvos do *Mendeley Data*, na pasta referente ao software *ImageJ* há dois plugins programados em *Java* dentro do *Virtual WP*. Estes serão os plugins que serão responsáveis pelo mapeamento do comportamento d’água durante o experimento;
  - b. Para executar este código deve-se clicar em *Plugins* e em seguida *VWP Segmentation*.
3. Nesta etapa é preciso definir o local onde o software irá gerar os arquivos de resposta e o nome do arquivo:
  - a. Aconselha-se criar uma pasta própria para a geração dos arquivos do software durante a programação;

- b. O nome que será a entrada do arquivo deve coincidir com o nome do arquivo que foi importado, que seria “Caso01”.
4. Seleciona-se o canal azul:
  - a. Nesta etapa o software irá segmentar o arquivo em três canais: azul, vermelho e verde. Ou seja, haverá três pilhas de imagem cada uma correspondendo ao seu determinado canal e com a água destacada dos outros elementos da cena.
    - b. Como o fluido foi misturado com corante azul para conseguir ter uma cor mais vívida para o experimento, é necessário selecionar o canal azul por ser o canal com maior correspondência com o experimento.
5. É gerado o arquivo em binário do caso 1:
  - a. Dentro da pasta selecionada a etapa 3, será gerado um arquivo binário referente ao canal selecionado;
  - b. O software nesse momento converteu o vídeo em preto e branco, onde foi diferenciado o experimento em preto com o fundo da cena em branco.

Figura A5 – Fluxograma de etapas do procedimento até a geração do arquivo binário. Imagens do experimento de Hernández et al. (2018a).

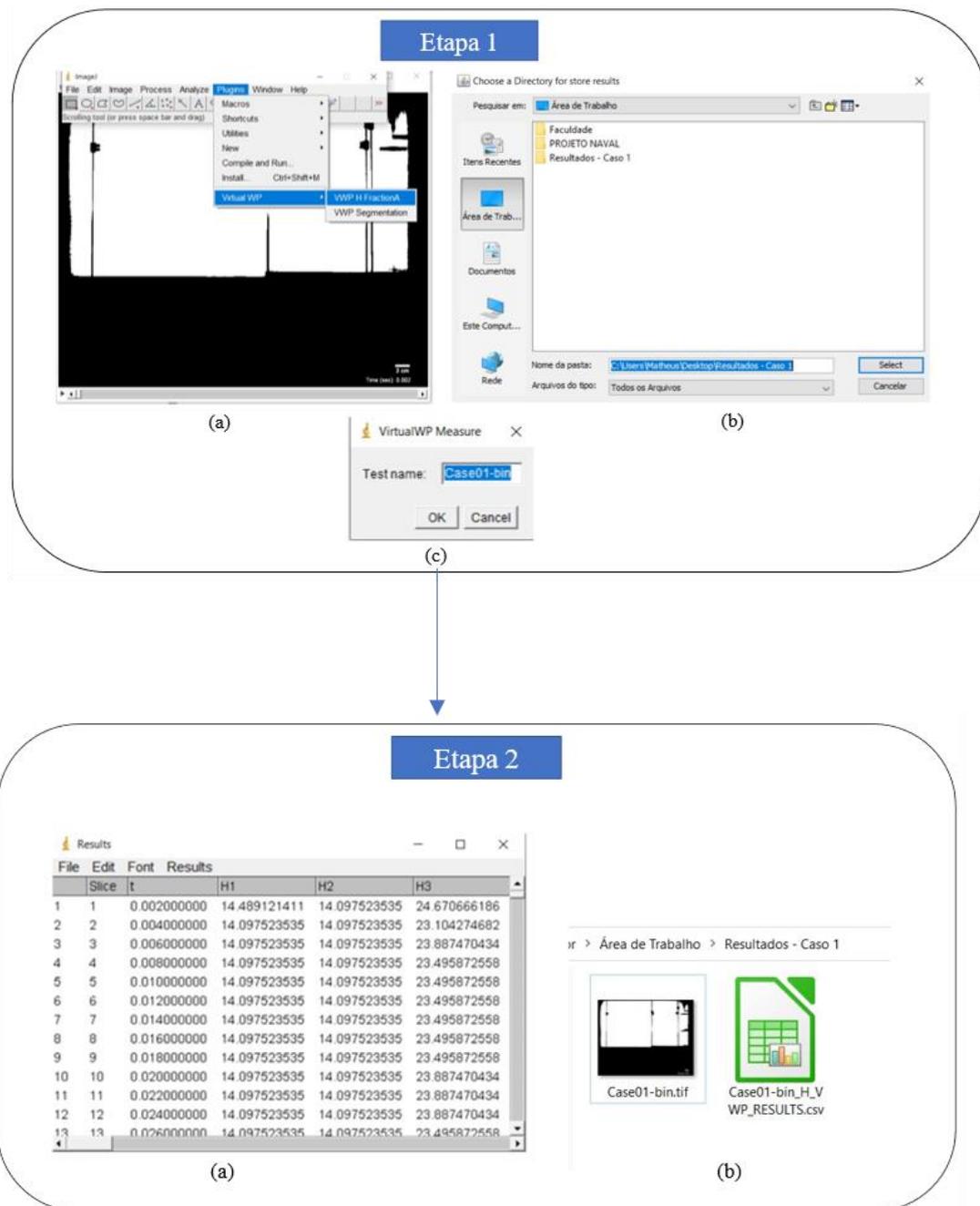


Fonte: Repositório Mendeley Data (HERNÁNDEZ et al., 2018b).

Agora, segue a descrição de um segundo fluxograma com a continuação das etapas a serem seguidas pela Figura A6:

1. É aberto o arquivo binário gerado no *ImageJ* para aplicação do plugin *VWP H FractionA*, que por fim irá gerar um arquivo em formato *.csv* que pode ser aberto em editores de planilhas de dados, como o *Microsoft Excel*.
2. O gráfico de séries temporais, por fim, é gerado manualmente na planilha onde as abscissas correspondem ao tempo (coluna *t*) e as ordenadas correspondem ao sensor requerido (colunas *H's*).

Figura A6 – Fluxograma da geração dos resultados. Imagens do experimento de Hernández et al. (2018a).



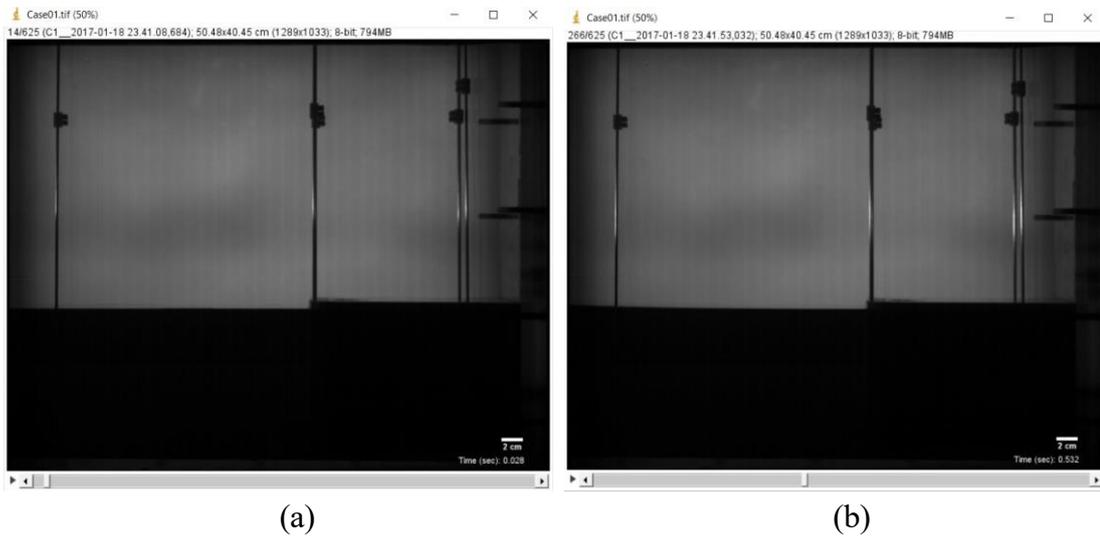
Fonte: Repositório Mendeley Data (HERNÁNDEZ et al., 2018b).

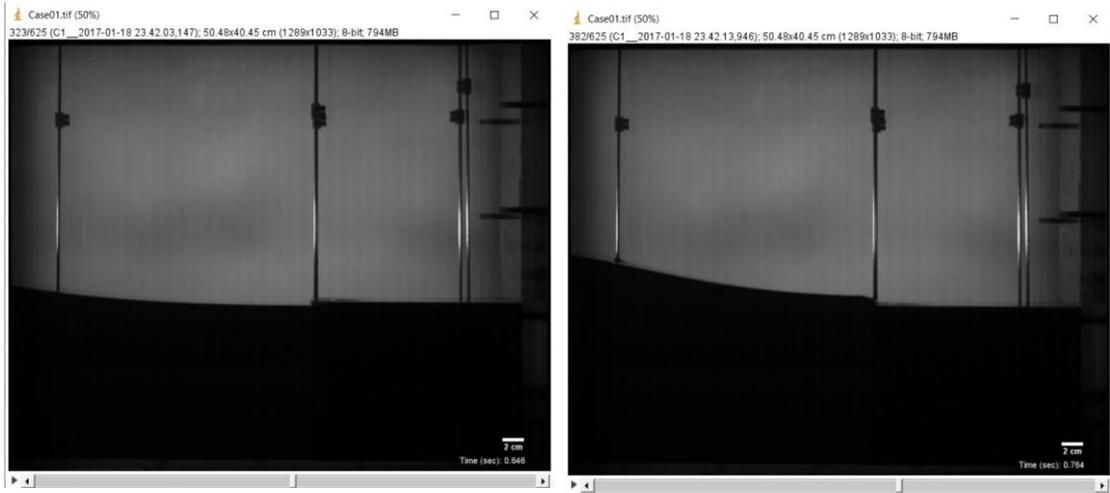
## APÊNDICE B: TIME LAPSE DO CASO DE ESTUDO

O caso de estudo considerado tem 1,250 segundos trabalhados em 625 frames. A Figura B1 mostra o comportamento da elevação d'água em 10 cortes ao longo do vídeo. A partir do time-lapse do caso de estudo, segue a seguinte análise sobre os cortes do vídeo:

Nas imagens (a) e (b), o experimento encontra-se em repouso, há somente a presença dos equipamentos, ou seja, ainda não há manifestação d'água em movimento interagindo com a estrutura fixa. Em (c), podemos observar o início da manifestação d'água na parte esquerda do vídeo. A água se nesta região devido a abertura da comporta, encontrando energia suficiente para continuar escoando. Em (d), podemos observar o aumento da elevação d'água novamente na parte esquerda do vídeo, assim como a água chegando ao convés. Esta fase recebe o nome de *bow run-up*. Em (e), podemos observar a onda aumentando seu volume e propagando-se com maior rapidez. Em (f), podemos observar a onda propagando-se em cima do convés com uma altura significativa. Em (g), podemos observar a onda já completamente com convés e atingindo a parede do experimento. Por fim em (h), podemos observar a quebra da onda após o choque de sua colisão com a parede do experimento.

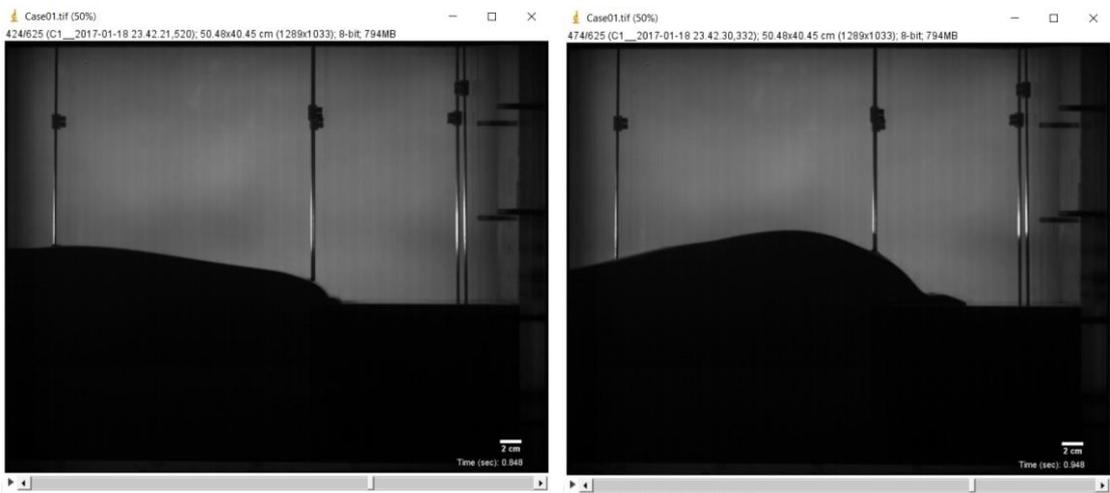
Figura B1. *Time-lapse* do experimento. Imagens do experimento de Hernández et al. (2018a).





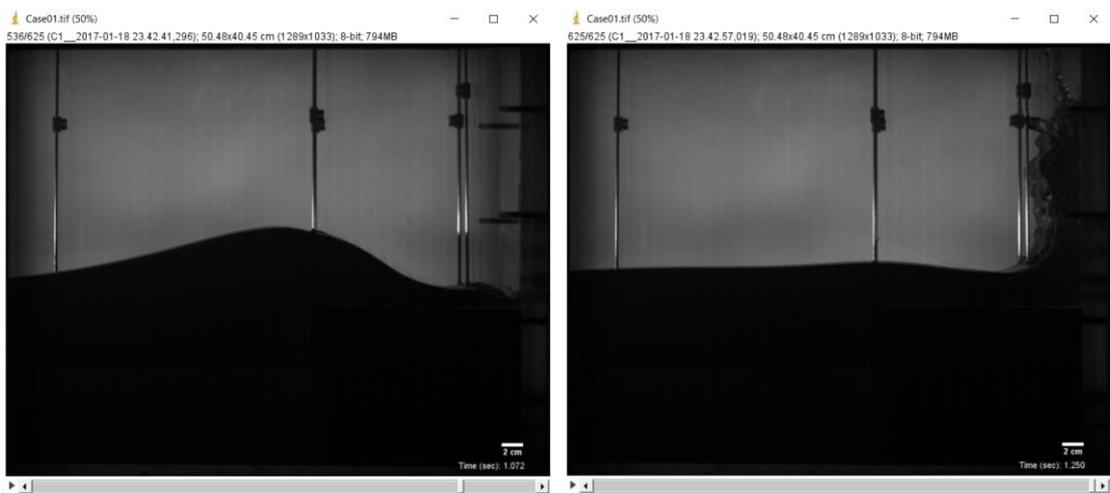
(c)

(d)



(e)

(f)



(g)

(h)

Fonte: Repositório Mendeley Data (HERNÁNDEZ et al., 2018b).



*water*



Article

---

# On the Evolution of Different Types of Green Water Events

---

Jassiel V. H. Fontes, Irving D. Hernández, Edgar Mendoza, Rodolfo Silva, Eliana Brandão da Silva, Matheus Rocha de Sousa, José Gonzaga, Raíssa S. F. Kamezaki, Lizeth Torres and Paulo T. T. Esperança

**Special Issue**

Advances in Coastal and Ocean Engineering

Edited by

Dr. Amir Etemad Shahidi



<https://doi.org/10.3390/w13091148>