

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE ENGENHARIAS, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

GRASIELE DA SILVA GOUVEIA

MODELAGEM FÍSICA REDUZIDA DO RESERVATÓRIO ALAGADOS DA CIDADE
PONTA GROSSA

PONTA GROSSA

2024

GRASIELE DA SILVA GOUVEIA

MODELAGEM FÍSICA REDUZIDA DO RESERVATÓRIO ALAGADOS DA CIDADE
PONTA GROSSA

Trabalho apresentado à disciplina de OTCC
como requisito parcial para a obtenção do título
de Bacharelado em Engenharia Civil, da
Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof Dr Marcos Rogério Szeliga

PONTA GROSSA

2024

GRASIELE DA SILVA GOUVEIA

MODELAGEM FÍSICA REDUZIDA DO RESERVATÓRIO ALAGADOS DA CIDADE
PONTA GROSSA

Este Trabalho de Conclusão de Curso será julgado como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Ponta Grossa.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcos Rogério Szeliga

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof.^a Dr.^a Eloise Aparecida Langaro

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof. Dr. Guilherme Araújo Vuitik

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Ponta Grossa, ____ de _____ de 202_

Este trabalho é dedicado aos meus pais Helena Aparecida da Silva e Adir Goveia que foram pilares da minha vida, obrigada pelo apoio incondicional em todos os momentos difíceis da minha trajetória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, que me deu o dom da vida e me proporcionou inúmeras bênçãos.

Aos meus pais, Helena Aparecida da Silva e Adir Goveia que sempre me apoiaram desde o primeiro momento que falei do curso, sendo meus melhores alicerces. Não têm palavras que expressem minha total admiração e o quão importante são para mim, sempre foi por vocês.

As minhas irmãs, Adriele, Mariele e Taniele, que foram um refúgio em meio ao caos da faculdade, me mimando com vários momentos e pixs.

Aos meus sobrinhos, João Pedro, Lucas Gabriel, Adir Henrique, Carolina Vitória e Anthony Eduardo, um dia vocês entenderão porque era tão difícil estar no parquinho se divertindo todo final de semana, mas muito obrigada pelos risos e trabalhos rabiscados.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcos Rogério Szeliga, pela orientação, que sempre utilizou a filosofia do: “Grasiele, o óbvio também precisa ser dito.” Sua paciência e dedicação tornaram as coisas mais fáceis e tangíveis neste trabalho.

A todos os professores que compartilharam seus conhecimentos comigo, desde o fundamental, em especial Prof. Igor Abrami, que em todas as aulas e projetos conseguia mostrar a beleza da matemática, instigando curiosidade para uma área de opiniões controversas.

Aos professores do departamento de Engenharia Civil da UEPG, que sempre foram além da teoria, demonstrando sempre um amor pela profissão, em especial Dr^a Maria Magdalena Ribas Döll, que foi minha primeira orientadora, os momentos compartilhados nunca serão esquecidos, obrigada por sempre subir meu sarrafo. Aos professores Giovana Katie Wiecheteck e Rafael Jansen Mikami que participaram durante a qualificação, suas considerações foram valiosas ao aperfeiçoamento do meu trabalho.

Agradeço também a todos os colegas da faculdade, em especial: Elaine, Flávia, Gabriel, Gustavo Brassanini e Gustavo do Prado (grupo selete) que viveram essa fase comigo desde os grupos de trabalho, às provas de concreto, aos dias bonitos (normais) da Grasi, aos momentos de fofoca, vocês tornaram a caminhada mais prazerosa e fácil. Aos meus amigos Isabela, Fernanda e Yan que viveram este momento comigo, sendo grande suporte emocional meu muito obrigada.

As palavras aqui expressam minha profunda gratidão por tudo que vivi nesta temporada. Obrigada a todos que fizeram parte desta trajetória. Hoje posso afirmar com propriedade que não há sensação melhor que perceber que o curso é o abraço casa que tanto sonhei.

RESUMO

O presente trabalho propõe a modelagem física reduzida para estudo do comportamento hidrodinâmico do reservatório Alagados que está localizado na cidade de Ponta Grossa. Este é um tema relevante na pesquisa acadêmica visto que o Brasil é um país que utiliza da construção de reservatórios para suprir as necessidades de abastecimento de água e geração de energia elétrica, e este reservatório opera para as duas necessidades. No desenvolvimento da modelagem, procura-se investigar a viabilidade de emprego da metodologia de redução em escala, considerando apenas uma área reduzida do reservatório, de forma a embasar os procedimentos e verificar resultados. Utilizando um sistema de aquisição de dados por imagens e processamento digital, são obtidas estimativas das conformações hidrodinâmicas que são úteis para tomadas de decisões no gerenciamento da operação do reservatório em situações normais, bem como, em cenários simulados relacionados às mudanças climáticas. Considerando a alta redução, escala 1/2500, utilizada neste trabalho para a impressão 3D do modelo, estuda-se a hipótese de que os parâmetros determinados em ensaios de aquisição de dados, atuem de maneira consistente representando a realidade de forma satisfatória, e que dados do modelo possam ser utilizados como aceitáveis quando extrapolados para o reservatório real, ao menos em um contexto exploratório, presumindo-se uma aproximação da hidrodinâmica real. Neste trabalho as variáveis de medição estão restritas à superfície livre do escoamento e suas respostas em desenvolvimento subsequente poderão ser conformadas para o volume total por meio de processos numéricos de otimização. A obtenção da rede de corrente na superfície do reservatório poderá embasar prognósticos acerca da qualidade da água, podendo ocorrer estimativas da eutrofização, deposição de sedimentos, circulação de nutrientes, propagação de poluentes, regimes do escoamento, capacidade de fornecimento de água para captação e geração de energia, entre outras questões hidrológicas e hidrodinâmicas.

Palavras-chave: Modelagem física; comportamento hidrodinâmico; processamento de imagens.

ABSTRACT

The present work proposes reduced physical modeling to study the hydrodynamic behavior of the Alagados reservoir located in Ponta Grossa. This is a relevant topic in academic research since Brazil is a country that uses the construction of reservoirs to meet the needs of water supply and electricity generation, and this reservoir operates for both needs. Using an image data acquisition and digital processing system, the modeling is expected to provide estimates for decision-making in managing reservoir operations in normal situations and simulated scenarios related to climate change. Considering the high reduction, scale 1/2500, used in this work for the 3D printing of the model, we study the hypothesis that the parameters determined in data acquisition tests act in a consistent way representing the reality satisfactorily and that data from the model can be used as acceptable when extrapolated to the real reservoir. In this context, the measurement variables will be restricted to the free surface of the flow and their responses will be conformed to the total volume through numerical optimization processes. Obtaining the current network on the surface of the reservoir may support prognoses about water quality, and estimates of eutrophication, sediment deposition, nutrient circulation, propagation of pollutants, flow regimes, and water supply capacity for energy capture and generation, among other hydrological and hydrodynamic issues, may occur.

Keywords: Physical modeling; hydrodynamic behavior; image processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Imagem de satélite – Reservatório Alagados	Erro! Indicador não definido.
Figura 2– Impressora GTMax 3D – Laboratório de Recursos Hídricos – Engenharia Civil – UEPG.....	23
Figura 3– Bancada de ensaios	25
Figura 4- Imagem da área de interesse em instante “i” de um ensaio genérico	27
Figura 5- Imagem da área de interesse em instante “i+1” de um ensaio genérico.....	27
Figura 6- Imagem binária no instante “i” de um ensaio genérico.....	28
Figura 7- Imagem binária no instante “i+1” de um ensaio genérico	29
Figura 8- Imagem binária no instante “i” com sobreposição da plotagem de marcadores para centroides de um ensaio genérico.....	30
Figura 9- Imagem binária no instante “i+1” com sobreposição da plotagem de marcadores para centroides de um ensaio genérico.....	30
Figura 10- Plotagem de marcadores dos centroides de um ensaio genérico com sobreposição das coordenadas obtidas para os instantes “i” e “i+1”	31
Figura 11- Alvo de calibração	32
Figura 12- Transformada de Coordenadas	34
Figura 13- Seção de estudo – Modelo reduzido	35
Figura 14- Posicionamento e detecção do relacionamento para cálculo dos deslocamentos.....	36
Figura 15- Campo de velocidades genérico.....	37
Figura 16- Linhas de corrente.....	38
Figura 17- Instalação da bancada de ensaios.....	40
Figura 18- Vista superior do modelo.....	41
Figura 19- Vista do escoamento em ângulo inclinado.....	42
Figura 20- Plotagem de centroides para o ensaio de vazão moderada.....	45
Figura 21- Plotagem de vetores velocidade no instante 0,0 segundos para o ensaio de vazão moderada- Vetores com coordenadas esparsas	46
Figura 22- Refinamento da malha vetorial, vetores com coordenadas regularizadas e mapa de cores representativo das velocidades.....	47
Figura 23- Isolinhas de velocidades para o ensaio de vazão moderada.....	48
Figura 24- Isolinhas de velocidades com áreas contornadas para o ensaio de vazão moderada.....	49
Figura 25- Linhas de corrente para o ensaio de vazão moderada	50
Figura 26- Plotagem de centroides em cinco instantes para o ensaio de vazão alta	53
Figura 27- Plotagem de vetores velocidade em quatro instantes para o ensaio de vazão alta, vetores com coordenadas esparsas.....	53
Figura 28- Plotagem de vetores velocidade em malha regularizada e mapa de cores	54
Figura 29- Mapa de isolinhas de velocidades – Ensaio de vazão alta	55
Figura 30- Mapa de isolinhas de velocidades – Ensaio de vazão alta	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Dados hidrocinemáticos de operação e velocidades aferidas	43
Tabela 2- Algumas velocidades aferidas no ensaio de vazão alta	44
Tabela 3 Dados hidrocinemáticos de operação e velocidades aferidas	51
Tabela 4 Algumas velocidades aferidas – Ensaio de vazão alta	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Dados climatológicos da cidade de Ponta Grossa	14
--	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 PROBLEMA	12
1.2 HIPÓTESE	13
1.3 OBJETIVOS	13
1.3.1 Objetivo geral	13
1.3.2 Objetivos específicos	13
1.4 JUSTIFICATIVA	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 RESERVATÓRIO	16
2.2 MODELAGEM FÍSICA REDUZIDA	16
2.3 ANÁLISE DIMENSIONAL E A TEORIA DOS MODELOS	17
2.4 VARIÁVEIS HIDRODINÂMICAS	18
2.5 REDES DE CORRENTES	19
3 MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1 IMPRESSÃO 3D E MONTAGEM DA BANCADA DE ENSAIOS	22
3.2 DISPOSITIVOS DE CONTROLE	23
3.3 PROCEDIMENTOS – ENSAIOS DE PRODUÇÃO, AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS	24
3.3.1 Bancada de ensaios	24
3.3.2 A iluminação	26
3.3.3 Precisão de cronometragem	31
3.3.4 A definição de imagens	31
3.3.5 A correção de deformação na imagem e conversão de medidas na imagem para o objeto real	32
3.3.6 A sincronização e acompanhamento dos flutuantes com o escoamento;	34
3.4 ELEMENTOS GEOMÉTRICOS E MATEMÁTICOS DE RESPOSTAS	35
3.4.1 Elementos necessários para obtenção e análise de resultados	35
3.4.2 A detecção de partículas flutuantes e sua disposição no mapa da seção	36
3.4.3 O campo de velocidades	37
3.4.4 As linhas de corrente	37

3.4.5 Critério de semelhança e escalas de conversão	38
3.4.6 Software.....	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1 ENSAIO DE VAZÃO MODERADA	43
4.1.1 Dados gerais	43
4.1.2 Resultados do processamento digital.....	44
4.2 ENSAIO DE VAZÃO ALTA	51
4.2.1 Dados gerais	51
4.2.2 Resultados do processamento digital.....	52
4.3 DISCUSSÃO COMPARATIVA.....	56
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

Um reservatório é uma construção de uma estrutura artificial que pode ser construída em vale natural ou lagoas artificiais, sua principal função é regular a vazão, através do armazenamento da água, que pode ser controlada por meio de abertura e fechamento de comporta (Cruz; Fabrizy, 2023). Outras funções do reservatório são mitigar inundações, garantir o abastecimento de água e fornecer energia hidrelétrica local (Lehner, *et al.*, 2011).

O Brasil é um país que utiliza de reservatórios para suprir as necessidades de abastecimento d'água e energia elétrica. A alteração do ambiente aquático de um ambiente lótico para um ambiente lântico, provoca desequilíbrios na estrutura físico-química e hidrobiológica do meio aquático, podendo gerar grandes impactos ambientais (Bastos, 1998).

O estudo hidrodinâmico possibilita o conhecimento e entendimento de variáveis que compreendem, entre outras, o tempo de residência hidráulica, a circulação hidrodinâmica, as taxas de renovação e a compartimentação do ambiente aquático.

Para o estudo de corpos hídricos dependentes principalmente do regime hidrológico e de ventos, faz-se necessário o uso da modelagem hidrodinâmica, além da caracterização ambiental que estuda as variações físicas, químicas e biológicas dos corpos hídricos (Lopardo, 2002).

Os modelos computacionais são ferramentas que permitem uma visão dinâmica e espacial de processos em ambiente de corpos d'água naturais, especialmente em lagos e reservatórios. A utilização de modelos computacionais, matemáticos, para a estimativa de padrões de circulação e transporte da água, auxiliam no gerenciamento de programas de monitoramento ambiental, além da importância dos estudos dos projetos face à complexidade desses ambientes. Porém, a modelagem reduzida ainda é indispensável em diversas situações em que a modelagem matemática, por si só, pode recair em contextos inviáveis para consecução técnica e econômica dos modelos de predição (Rosman, 2001).

Assim, esse estudo se concentra no comportamento hidrodinâmico em um modelo reduzido do reservatório Alagados e verificar a viabilidade da modelagem altamente reduzida para adequar sua implantação em laboratório, além da metodologia de aquisição e processamento de dados.

1.1 PROBLEMA

O estudo hidrodinâmico em reservatórios é necessário para fomentar conhecimento sobre um reservatório da cidade, contribuindo com estimativas e prognósticos em médio e longo prazo, por meio da simulação de diversos eventos, seja em operação normal ou mesmo aqueles

relacionados às mudanças climáticas e seus efeitos sobre a capacidade de suprir as necessidades de abastecimento pela companhia de saneamento do Paraná (SANEPAR) e os aspectos relacionados à quantidade e qualidade da água.

O reservatório também é destinado à geração de energia elétrica por meio da Pequena Central Hidrelétrica (PCH) São Jorge operada pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL), caracterizando o uso múltiplo da água. A rede de corrente é um dos parâmetros analisado sendo capaz de servir de base para definições gerenciais, embasando ações relacionadas à manutenção, previsibilidade e informações que afetam o abastecimento de água da cidade de Ponta Grossa.

1.2 HIPÓTESE

Por meio da modelagem física reduzida, os parâmetros determinados devem atuar de maneira consistente e compatível com a realidade. Sendo eles: a vazão do reservatório, a distribuição de velocidades, a rede de corrente, as regiões de estagnação, os curtos-circuitos, os tempos de detenção, a compartimentação entre outros fatores,

Os parâmetros podem definir diferentes regimes de escoamento em áreas específicas, e com demais interpretações e análises que conduzem a um diagnóstico em discussão. Tais resultados podem consistir a metodologia empregada, incluindo as possibilidades de investigação de resultados na simulação de eventos extremos.

A questão que norteia o desenvolvimento desse trabalho se resume na resposta à hipótese de que um modelo reduzido, com alta escala de redução, possa proporcionar resultados satisfatórios na reprodução em escala de fenômenos naturais como o escoamento, sendo, ainda nesta fase de desenvolvimento, a aplicação restrita às variáveis de superfície, porém com etapas previstas em desenvolvimento subsequente da sua calibração e extrapolação para todo o volume do corpo hídrico por meio de funções numéricas de otimização.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Investigar a viabilidade da utilização da modelagem física reduzida com alta taxa de redução e aquisição e processamento dados por meio de técnicas de visão computacional com grandezas hidrodinâmicas para conversão ao corpo hídrico real do Reservatório Alagados.

1.3.2 Objetivos específicos

- Construir o modelo reduzido a partir de arquivos digitais de elevação;

- Obter os campos de velocidades, as linhas de corrente descritivas do escoamento no reservatório extraindo dados matemáticos, geométricos e físicos na alimentação de programa computacional;
- Obter a partir dos resultados experimentais variáveis hidrodinâmicas como: tempo de detenção hidráulica, circulação hidrodinâmica, taxas de renovação e a compartimentação do ambiente aquático.

1.4 JUSTIFICATIVA

A água é tida como recurso escasso, seu gerenciamento é dado por meio da Lei 9.433/97, esta lei é responsável pela racionalização que atua na disponibilidade e qualidade da água além do abastecimento, irrigação, geração de energia e outros

No que tange à qualidade da água, as informações obtidas podem proporcionar bases para gestão acerca dos fenômenos de eutrofização, deposição de sedimentos, recirculação de nutrientes, propagação de poluentes e as circunstâncias relacionadas à biota aquática.

Nos aspectos quantitativos a hidrodinâmica se alia às variáveis morfológicas e hidrológicas para estabelecer o panorama de vulnerabilidade do corpo hídrico às situações de escassez e/ou de eventos extremos, possibilitando predições, simulações e respostas em apoio às tomadas de decisões gerenciais.

Dados climatológicos foram obtidos da Climate-data, uma organização não governamental, que realizou um levantamento climático. Os dados de temperatura (°C), chuva (mm), umidade e dias chuvosos foram datados do período de 1991 – 2021 e as horas de sol no período de 1999 – 2019. No Quadro 1, constam os dados climáticos médios para a cidade de Ponta Grossa.

Quadro 1- Dados climatológicos da cidade de Ponta Grossa

	Jan	fev	Mar	Abril	Maio	Jun	Jul	Agost	Set	Out	Nov	Dez
Temperatura média (°C)	21,4	21,5	20,8	19,1	15,7	14,6	14,1	15,5	17,3	19	19,6	21
Temperatura mínima (°C)	18,1	18,1	17,4	15,4	12	10,8	10	10,8	12,9	15	15,7	17,2
Temperatura máxima (°C)	25,8	25,9	25,3	23,8	20,3	19,5	19,3	21,4	22,9	24,2	24,4	25,7
Chuva (mm)	215	162	121	77	96	98	88	73	138	144	134	159
Umidade (%)	81	82	79	77	78	80	78	73	73	77	77	78
Dias chuvosos (d)	17	15	13	7	7	6	6	5	8	11	12	14
Horas de sol (h)	6,9	7,2	6,6	6,5	5,9	6,5	7	7,9	7,2	6,9	6,9	7,4

Fonte: Adaptado de Climate, 2021.

A variação de precipitação no ano devido as estações, instiga a produção de materiais para prever o comportamento do corpo hídrico, além das médias históricas, considerando cenários em face às mudanças climáticas com chuvas intensas concentradas e/ou estiagens prolongadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RESERVATÓRIO

Para a construção do reservatório são necessárias estruturas físicas denominadas de barragens, que são responsáveis pelo represamento e isolamento do curso de água. O acúmulo de água resultante da construção de barragens são os reservatórios (Brasil, 2020).

Brasil, (2020) distribui a competência pela segurança das barragens conforme a utilização. Se o reservatório é destinado ao acúmulo de água, a responsabilidade é da instituição que forneceu o direito de uso dos recursos hídricos e se a destinação for geração de eletricidade a responsabilidade é da instituição que concedeu ou autorizou o uso do potencial hidráulico.

A represa em estudo é um reservatório artificial de água que abastece a população do município de Ponta Grossa (PR), além de ser utilizado para gerar energia elétrica. A represa é alimentada pelo Rio Jotuba e Rio Pitangui, cuja bacia hidrográfica a montante da barragem abrange parte dos municípios de Ponta Grossa, Carambeí e Castro.

De acordo com Lemos (2001 p. 554 *apud*, Goulart 2014) o reservatório possui extensão de aproximadamente 10,7 km, no trecho entre a barragem da Usina de São Jorge e a entrada no reservatório do rio Pitangui e de 9,0 km da barragem até a entrada do rio Jotuba. Na localização da cota de 918,60 m a profundidade máxima do reservatório é próxima de 14 m. Sua largura varia de 200 a 800 m, o que resulta numa área de superfície d'água de aproximadamente 7,315 km² e o volume é cerca de 27,7 milhões de m³ de água.

Em relação à base da barragem o nível mínimo de operação é de 5,0 m (nível do volume morto), o nível máximo de operação é de 10,0 m, o nível máximo maximorum é de 11,7 m e a cota de coroamento é de 12,0 m. (COPEL, 2024).

2.2 MODELAGEM FÍSICA REDUZIDA

Modelos hidráulicos reduzidos geralmente são usados para dados comparativos entre um protótipo e um modelo real, os dados podem confirmar as propriedades hidráulicas de um projeto desde que respeitados os critérios de redução de escala, simulando o estudo de fenômenos hidráulicos em menor escala. Os modelos reduzidos (físicos) proporcionam uma ampla variedade de operações em laboratório, as quais podem ser extrapoladas para o protótipo no sentido de predição dos efeitos reais no protótipo.

A modelagem física pode ser aplicada em diferentes áreas de estudo. No Paraná, o Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza participa do desenvolvimento do Setor Elétrico Brasileiro e em obras internacionais, na construção de diversas usinas hidrelétricas, com atuação importante na modelagem física reduzida. Entre inúmeros trabalhos desenvolvidos

cita-se a modelagem em ensaio de desvio de rio de acordo com a topografia do leito, onde foi realizado uma análise comparativa dos resultados obtidos em relação a uma modelagem computacional bidimensional. O modelo reduzido foi construído na escala geométrica 1:100 e operado segundo critério de semelhança de Froude e em acordo com as especificações técnicas do projeto (Castro, et al; 2022).

Outra aplicação direta da modelagem foi utilizada no trabalho sobre impacto de ressalto hidráulico sobre uma viga em vertedouros afogados onde Takeda e Ota (2024) construíram um modelo de vertedouro típico de baixa queda em escala 1:25 conforme critério de semelhança de Froude.

Os trabalhos citados concluíram de maneira geral que a aplicação da modelagem reduzida apresenta resultados consistentes de acordo com literatura, todavia uma ressalva importante é a necessidade da continuidade dos estudos em ambos os trabalhos para aprimoramento. Neste sentido, salienta-se a escala utilizada, o critério de semelhança e, especialmente, mesmo considerando o alto nível de especialização do CEHPAR, o sempre necessário aprimoramento dos trabalhos, o que vem de encontro às metodologias empregadas neste próprio trabalho. No presente trabalho essas metodologias incorrem em alta redução para impressão 3D, aquisição de dados por imagens e seu processamento digital.

2.3 ANÁLISE DIMENSIONAL E A TEORIA DOS MODELOS

A análise dimensional é aplicada para resolver problemas que possuem muitas variáveis que dificultam encontrar a solução por métodos analíticos. A alternativa adotada é produzir modelos matemáticos em escala que condiz com a realidade, isso permite uma racionalização na pesquisa.

A análise dimensional conduz à Teoria dos Modelos, que consiste em produzir um modelo em escala utilizando números adimensionais que estejam relacionados às origens do fenômeno físico estudado. O modelo deve respeitar condições para ter um valor prático. A primeira condição é que o modelo e o protótipo deverão possuir semelhança geométrica, a segunda condição é existir semelhança cinemática. Uma terceira condição pode ser necessária para predição dos efeitos dinâmicos, quando a ação das forças atuantes for um dos objetivos da modelagem e seria, neste caso, a semelhança dinâmica. A escala de semelhança é a relação entre a grandeza do modelo e a grandeza do protótipo (Brunetti, 2008).

O reservatório Alagados é um corpo hídrico em que o escoamento ocorre por ação da gravidade. Nesta situação a modelagem utiliza o critério de Froude cujo adimensional é dado pela equação (1):

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (1)$$

Onde Fr é o número de Froude, v é a velocidade, L é um comprimento característico (profundidade nos escoamentos em canais) e g é a aceleração da gravidade. Através da fórmula, temos que se mantido o escoamento constante, o número de Froude será fornecido em razão da profundidade.

Para se trabalhar em modelagem reduzida com um critério de semelhança, é necessário que o adimensional do modelo tenha valor igual ao adimensional no protótipo (construção, obra, dispositivo ou local real). Se o critério adotado é a Semelhança de Froude, então implica em que o número de Froude no modelo seja igual ao número de Froude no protótipo.

2.4 VARIÁVEIS HIDRODINÂMICAS

A hidrodinâmica tem por objeto o estudo do movimento dos fluidos e suas causas e efeitos. As variáveis hidrodinâmicas são essenciais para interpretar o funcionamento e comportamento hidrológico de uma rede de drenagem. Através desses dados é possível uma simulação para prevenção de secas e enchentes, principalmente nas redes urbanas (Andrade *et al*, 2020).

A velocidade (v) é a razão entre a vazão ou descarga (Q) numa determinada seção, pela área da seção de escoamento (A). No Sistema Internacional de Unidades (SI), a velocidade é expressa em m/s, mas pode ser também utilizado m/h, a equação da velocidade está descrita na equação (2)

$$v = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

A aceleração é uma grandeza que mede a taxa de variação da velocidade, logo a aceleração é dada por uma derivada (taxa de variação no cálculo diferencial). Quando a velocidade é constante a aceleração é zero. No SI, sua unidade é m/s², e sua equação está descrita na equação (3)

$$a = dv/dt \quad (3)$$

A força é o agente da dinâmica responsável por alterar o estado de repouso ou movimento de um corpo, logo ao aplicar uma força o corpo pode acelerar ou se deformar como estabelecem as leis de Newton. Existem diferentes tipos de força na natureza, tais como a força

gravitacional e a força de empuxo. No SI, força tem a unidade de kg.m/s², mas comumente é utilizado a unidade Newton (N).

$$dF = m.dv/dt \quad (4)$$

Por meio da segunda Lei de Newton, tem-se que a diferencial da força resultante que age sobre um corpo é igual ao produto da massa do corpo pela derivada da velocidade em relação ao tempo (aceleração).

2.5 REDES DE CORRENTES

Uma linha de corrente é uma linha imaginária, contínua, tangente em todos os pontos aos vetores velocidade. Devido as propriedades vetoriais as linhas de correntes não podem se intersectarem. Esta propriedade é válida para um escoamento permanente, mudando o regime de escoamento, vigora o estudo euleriano, com linhas de corrente para diferentes tempos (Sotelo, 1994).

A linha de corrente é definida por um vetor diferencial de arco ds e um vetor de velocidade paralelos, que representam a equação diferencial da linha de corrente, que pode ser descrita como na equação 4 e com suas componentes x , y e z :

$$ds = v dt \quad (5)$$

$$dx = v_x dt \quad (6)$$

$$dy = v_y dt \quad (7)$$

$$dz = v_z dt \quad (8)$$

O escoamento em reservatórios pode ser analisado utilizando as equações de continuidade e a equação de Manning. Pela equação da continuidade pode-se afirmar que a velocidade de escoamento é inversamente proporcional à área da seção transversal.

A equação de Manning é uma equação empírica que relaciona a equação da resistência ao escoamento (Porto, 2001) e integra parâmetros geométricos e hidráulicos de um trecho de rio. Como é mostrado na equação (9):

$$\frac{\eta \cdot Q}{\sqrt{I}} = A \cdot R_h^{\frac{2}{3}} \quad (9)$$

Da equação de Manning tem-se que o coeficiente η é adimensional e se relaciona com o tipo de revestimento das paredes do reservatório, Q é a vazão volumétrica, I é declividade do

fundo do canal, A é área da seção transversal e R_h é Raio Hidráulico que consiste na razão entre área molhada e perímetro molhado do reservatório.

Daniel Bernoulli conseguiu formular a equação fundamental da hidrodinâmica dos fluidos. Tal equação é a relação entre pressão, velocidade e altura em vários pontos de uma linha de corrente.

Dado duas seções retas de áreas A_1 e A_2 e sejam p_1 e p_2 as pressões nessas seções. A densidade do fluido é " d " e a velocidade do fluxo é v_1 e v_2 . Logo sendo F_{r1} e F_{r2} as forças de pressão exercidas pelo fluido restante sobre o fluido contido no tubo. A soma algébrica dos trabalhos realizados pelas forças F_{r1} e F_{r2} é igual a soma das variações das energias cinética e potencial entre as seções. Realizando simplificações matemáticas na equação temos:

$$p_1 + \frac{d \cdot v_1^2}{2} + d \cdot g \cdot h_1 = p_2 + \frac{d \cdot v_2^2}{2} + d \cdot g \cdot h_2 \quad (10)$$

Percebe-se o Teorema de Stevin na equação de Bernoulli. Para um líquido em repouso, quando as velocidades v_1 e v_2 são nulas.

$$p_1 + d \cdot g \cdot h_1 = p_2 + d \cdot g \cdot h_2 \quad (11)$$

$$p_1 - p_2 = d \cdot g \cdot h_2 - d \cdot g \cdot h_1 \quad (12)$$

$$\Delta p = d \cdot g \cdot (h_2 - h_1) \quad (13)$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O reservatório de estudo está localizado no segundo planalto paranaense, em uma bacia da junção do rio Pitangui e do rio Jotuba, na região dos Campos Gerais, sua localização abrange os municípios de Ponta Grossa, Castro e Carambeí, no Estado do Paraná, Brasil.

O reservatório abastece a população do município de Ponta Grossa, a jusante da barragem, além de ser utilizado pela Usina Hidrelétrica São Jorge. O processo é aplicado a uma seção do reservatório (Área de estudo) próxima à barragem que pode ser observada na Figura 1.

Figura 1- Imagem de satélite do Reservatório Alagados



Fonte: Google Earth, 2024.

Com os resultados deste trabalho, a verificação de conformidades e a viabilidade da aplicação, os estudos serão aprimorados e estendidos à toda área do manancial em trabalhos futuros.

As etapas principais são: montagem, operação de um sistema de produção e aquisição de dados, cujo processamento digital proporcionam as condições para que tais dados possam ser analisados, verificando a viabilidade de seu emprego para a modelagem física reduzida do Reservatório Alagados em escala de alta redução.

Nesta intenção é montado um modelo geométrico reduzido - escala 1:2500 - com impressão 3D baseada em Modelo Digital de Elevação (MDE)– arquivos disponibilizados pelo Instituto Água e Terra – IAT.

Os arquivos foram processados no software QGIS e a base de dados exportados para o software AutoCAD, cujo processamento resulta nos arquivos de impressão

StereoLithography (STL) operados em impressora 3D, são os procedimentos que viabilizam a construção do modelo reduzido.

O modelo é operado em situações de vazão e nível em escala compatível - modelo de similitude - para reproduzir efeitos, nesta escala, que por meio de equações de conversão possam ser extrapolados para o reservatório real. Neste intento, considerando que a grandeza física com influência preponderante no escoamento produzido é a gravidade, o modelo de similitude a ser empregado é o Modelo de Froude. A utilização deste modelo implica na igualdade do número de Froude no modelo reduzido e no reservatório real estabelecendo as escalas de conversão entre as medidas no modelo reduzido e as equivalentes no reservatório.

Busca-se estabelecer os campos de velocidades na superfície do reservatório, identificar os caminhamentos de fluxos, as áreas compartimentadas e seus respectivos regimes, os tempos de detenção hidráulica, os circuitos preferenciais e demais características que se demonstrem relevantes em função da geometria do reservatório e o regime hidrológico.

O modelo é instalado em bancada em escala laboratorial e munido de sistemas de controle, de produção e aquisição de dados com possibilidade de abranger uma ampla gama de situações equivalentes aos eventos naturais, inclusive os extremos.

3.1 IMPRESSÃO 3D E MONTAGEM DA BANCADA DE ENSAIOS

Nesta etapa de desenvolvimento da tecnologia de modelagem física altamente reduzida, salienta-se o emprego da produção do modelo físico com a impressão 3D do relevo utilizando MDE, o que viabiliza a produção do modelo em escala de laboratório. Nesta escala as medições de valores, especialmente aquelas relacionados às distâncias, são obtidas por meio de imagens digitais de alta resolução e convertidas para medições reais por processamento digital de imagens garantido alto nível de precisão.

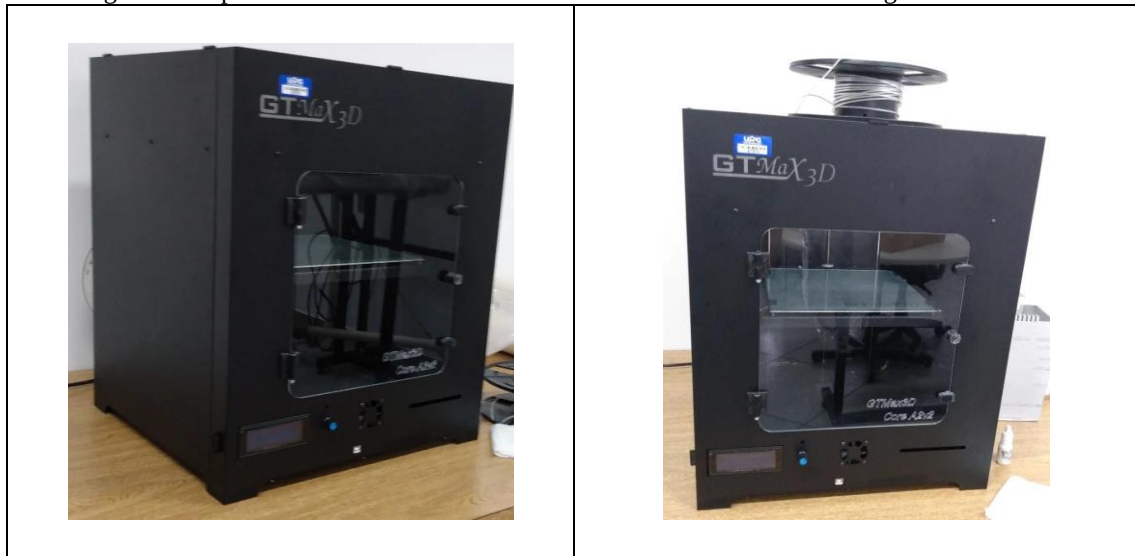
Os intervalos de tempo entre imagens também são determinados por extração computacional de propriedades das respectivas imagens, não havendo, portanto, cronometragens manuais entre obtenção de cenas. Considerando a implementação gradual de algoritmos e suas consolidações, vários dos cálculos são procedidos antecipadamente em planilhas eletrônicas que proporcionam a visualização de todas as variáveis numéricas. Dessa forma embasa-se a entrada de dados, seu processamento e saída no programa computacional em desenvolvimento que se estabelece na plataforma Matlab® em conjunto com o *ToolBox* de processamento de imagens.

Para desenvolvimento do modelo para impressão 3D são utilizados os MDE da região do reservatório Alagados. Os dados obtidos nesta etapa têm seu processamento no software

QGIS, e posteriormente são adequados os módulos de impressão no software AutoCAD para exportação de arquivos de impressão.

São realizadas as impressões de módulos 16x16 cm para composição do modelo reduzido em uma matriz com 18 módulos. A impressão realizada é executada por uma impressora 3D, que possui área de impressão de aproximadamente 220x220x240 mm, a velocidade de impressão é em média de 60 mm/s. O filamento utilizado é de alta performance (ABS MG94 1.75), apropriado para utilizar neste tipo de máquina. Na Figura 2 é possível observar a impressora utilizada, além do filamento adotado.

Figura 2– Impressora GTMax 3D – Laboratório de Recursos Hídricos – Engenharia Civil – UEPG



Fonte: A autora, 2024.

Para realização de todos os experimentos, o modelo reduzido é instalado em uma bancada com a integração de dispositivo de controle de entrada de vazão para medição de volume na saída e câmera de aquisição de imagens operada em lapso de tempo.

Na operação são realizados ensaios com diferentes vazões, buscando utilizar descrições próximas às que acontecem no sistema real, entre vazões e níveis mínimo e máximo, para analisar o comportamento do modelo, e assim produzir dados, para prever respostas às possibilidades de cenários que possam vir a ocorrer no reservatório real.

3.2 DISPOSITIVOS DE CONTROLE

Buscando precisão e controle na circulação da água no modelo reduzido é empregada uma bureta milimetrada, em vazões reduzidas, medição de volume e respectiva cronometragem do tempo de ensaio.

Objetivando o monitoramento do modelo e a obtenção de dados para processamento e definição de deslocamentos de partículas da unidade de tempo, a aquisição de imagens é por

meio do uso de uma câmera digital, que é instalada a uma altura condizente com a amplitude de tomada de cena, abrangendo a área de estudo e reduzindo a deformação de perspectiva.

A câmera tem seu posicionamento na parte superior em modo de aquisição *lapse of time* para registro de imagens de propagação de flutuantes na superfície da água no modelo. Essa operação proporciona dados da posição (coordenadas) de flutuantes em cada instante, e por uma técnica computacional denominada de Particle Tracking Velocimetry (PTV), em tradução literal Velocimetria por Rastreamento de Partículas (VRP), obtém-se os deslocamentos dos flutuantes que no intervalo de tempo entre aquisições de imagens proporcionam os vetores velocidade.

3.3 PROCEDIMENTOS – ENSAIOS DE PRODUÇÃO, AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS

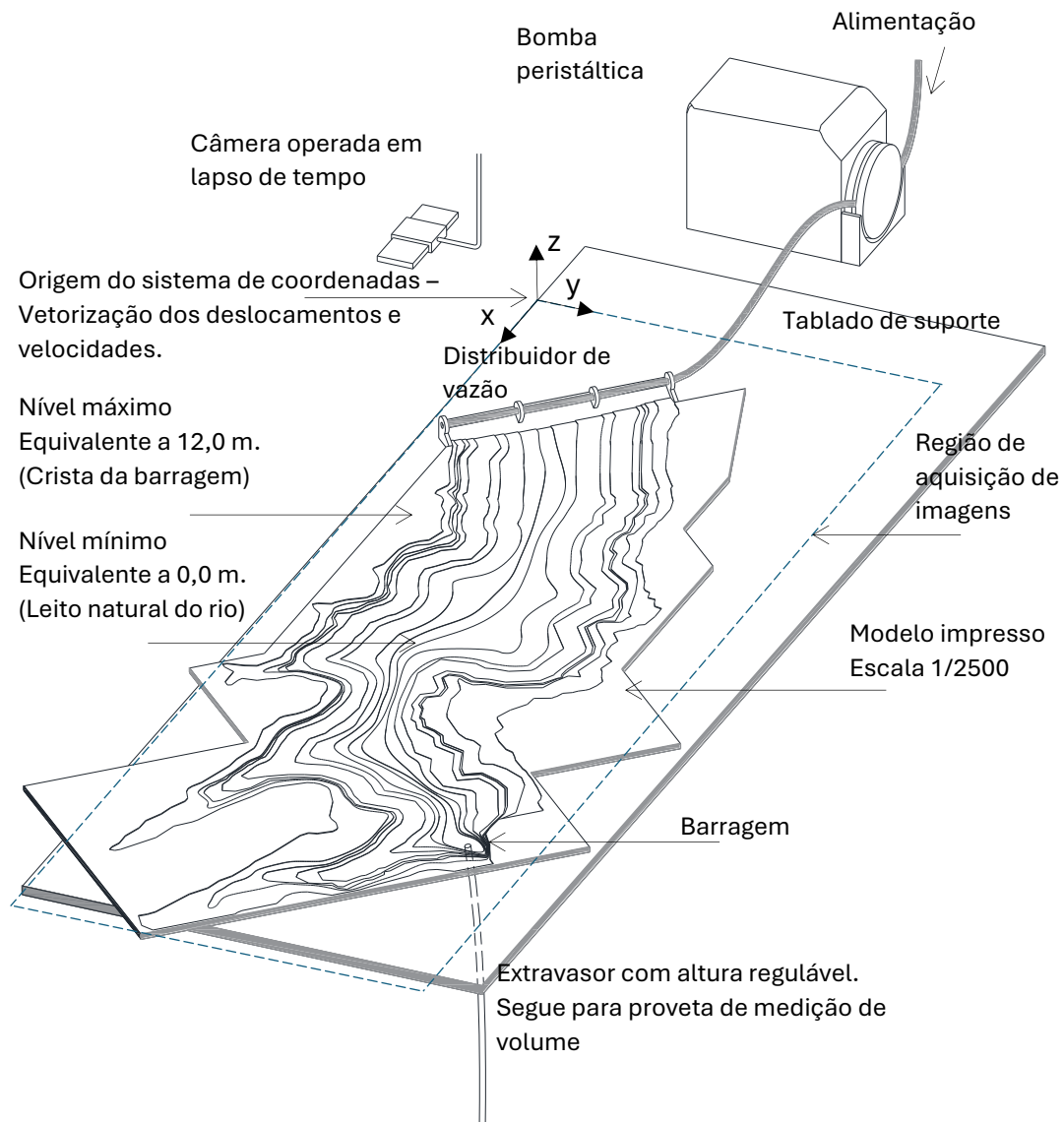
Os procedimentos são padronizados conforme ensaios em testes preliminares, porém os materiais e métodos utilizados seguem conceitos preestabelecidos e que proporcionam as bases para processamento computacional conduzindo aos resultados decorrentes das aquisições de dados. A precisão e a qualidade dos dados adquiridos e seu processamento está sujeita a fatores como:

- A bancada de ensaios;
- A iluminação
- A detecção de películas flutuantes;
- A precisão de cronometragem;
- A definição das imagens;
- A correção de deformação na imagem e a conversão de medidas na imagem para o objeto real;
- A sincronização e acompanhamento dos flutuantes com o escoamento;

3.3.1 Bancada de ensaios

Uma visão geral da instalação experimental está apresentada no esquema da Figura 3 onde os níveis máximo e mínimo indicados se referem à cota da base da barragem.

Figura 3– Bancada de ensaios



Fonte: A autora, 2024.

Na Figura 3, ressalva-se a eventual substituição do instrumento de alimentação, bomba peristáltica por bureta milimétrica devido a menor vazão de alimentação do sistema, que trabalhará com vazões da ordem de alguns mililitros por minuto, produzindo um escoamento no modelo próximo a um regime laminar.

Considerando-se a necessidade de ter um número de Froude único no modelo e no reservatório real, as medições em ensaios serão restritas a grandezas cinemáticas, distâncias, velocidades e acelerações, exclusivamente na superfície do escoamento, tendo em vista as pequenas profundidades de operação, de 0,2 mm a 4 mm.

A alimentação do sistema se dirige ao distribuidor de vazões, peça impressa em 3D com finalidade de suporte da tubulação de alimentação perfurada no comprimento do suporte

com a finalidade de distribuir a vazão ao longo do eixo transversal ao escoamento. Essa distribuição se dá por gotejamento ao longo do eixo, sobre uma rampa de distribuição com certa uniformidade, mais intensa na região mais profunda da seção, que procura atingir o volume sem provocar turbulência.

Próximo à barragem situa-se o dreno de saída o qual está conectado a uma proveta de medição. Essa medição ocorre a partir do momento de vazão contínua, estabelecimento do regime permanente considerando toda a área de estudo e lançamento de flutuadores. Neste instante é acionada a câmera em modo de lapso de tempo.

O intervalo entre cada aquisição de imagem é determinado em ensaios prévios de acordo com a vazão a ser operada.

3.3.2 A iluminação

A iluminação é fundamental para obtenção de fotografias consistentes e com reproduções livres de elementos espúrios. O ambiente de aquisição, no contexto da aquisição de dados de flutuantes no escoamento, deverá ter uma iluminação reduzida, reflexos intensos e porções brilhantes evitadas. O equipamento de aquisição deve ser configurado para ambiente escuro, modo noite, foto celeste.

A bancada de ensaios possui pintura preta e as partículas flutuantes são brancas. Garante-se, dessa forma, o contraste e a detecção dessas partículas em algoritmo computacional, produzindo a separação entre fundo de imagem – bancada – e primeiro plano – partículas flutuantes – viabilizando o encontro das coordenadas desses flutuantes (coordenadas dos centroides) e vetorização de seus deslocamentos na unidade de tempo.

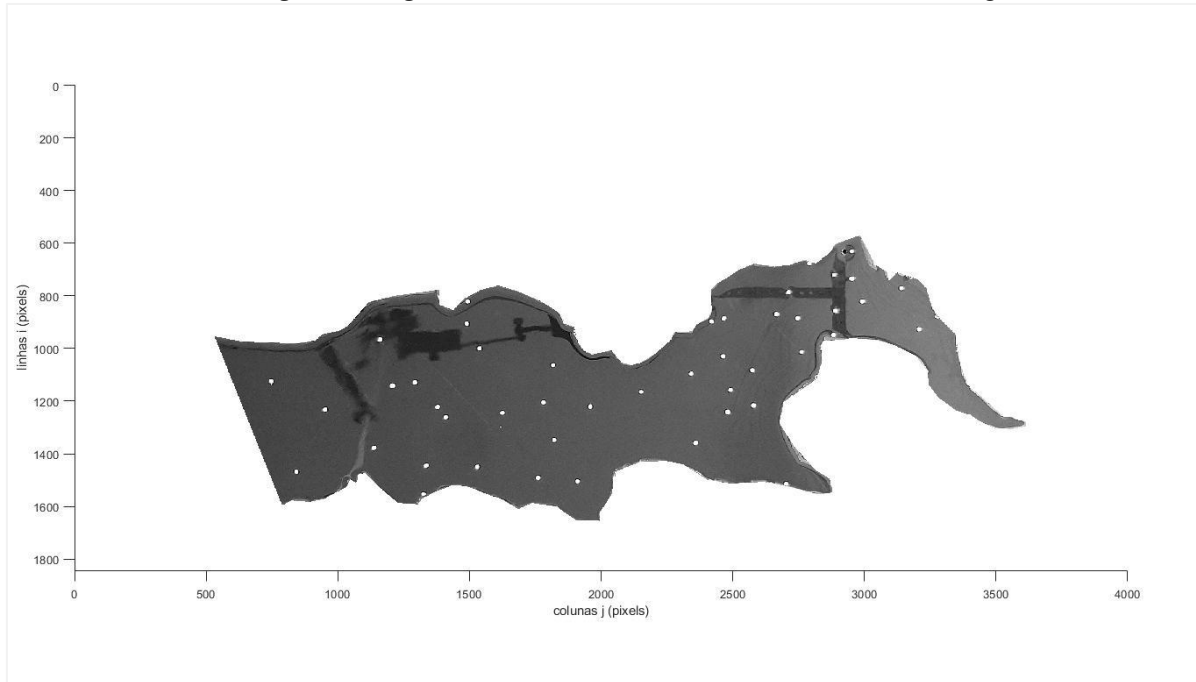
As figuras seguintes proporcionam noção da aquisição de imagens e processamento digital, utilizando parte de um ensaio genérico. Na formulação do sistema de coordenadas a representação gráfica é rotacionada no intento de serem obtidos fluxos positivos no sentido do eixo x.

A Figura 4 contém uma imagem original convertida para escala de cinza e recortada por meio de uma poligonal que demarca a área de interesse por meio da criação de uma máscara digital (verdadeiro/falso) que exclui o conteúdo externo à poligonal de interesse. Esse procedimento é essencial para eliminar elementos espúrios externos que poderiam comprometer a detecção dos flutuantes.

Nota-se o intenso contraste entre os flutuantes e o fundo de imagem o que beneficia a pronta e precisa identificação via software dos elementos flutuantes. As imagens são reproduzidas a partir de matrizes numéricas e sua representação incorre no eixo vertical

invertido. Posteriormente, após a obtenção de dados numéricos, para obtenção e representação de resultados em gráficos convencionais, procede-se a reversão do eixo vertical.

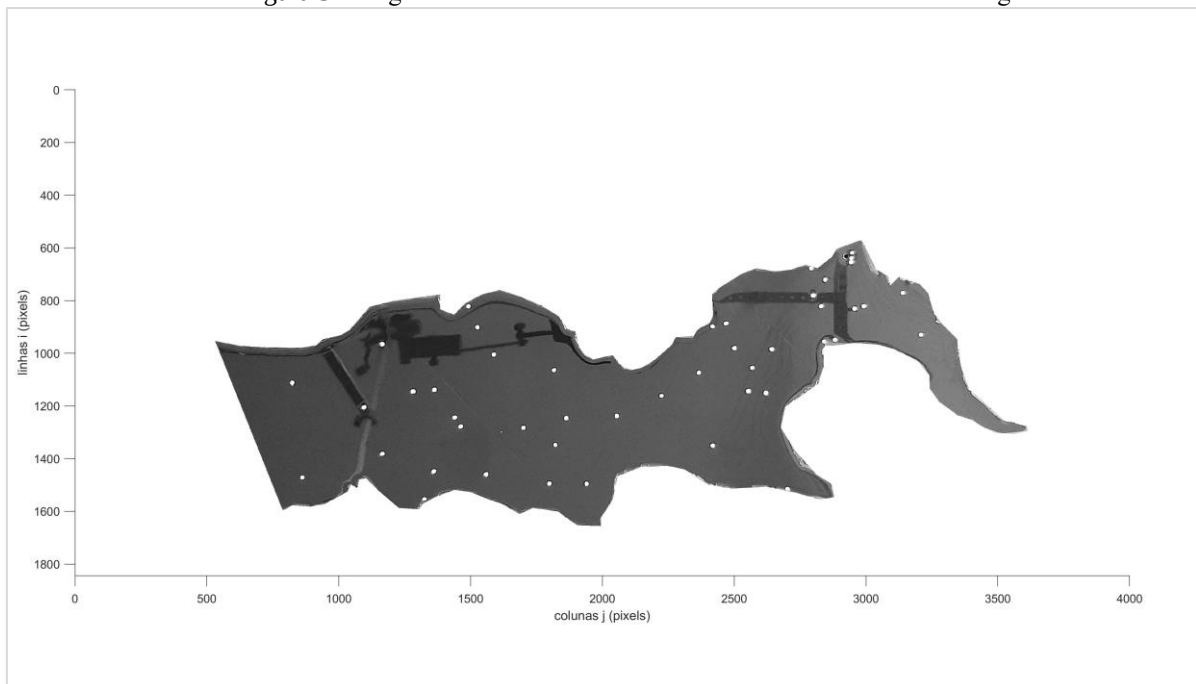
Figura 4- Imagem da área de interesse em instante “i” de um ensaio genérico



Fonte: Extração do software em desenvolvimento pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – UEPG – 2024 – Disciplina Elementos de Gerenciamento em Recursos Hídricos.

A Figura 5 contém a imagem do mesmo ensaio em instante “i+1”. Pode-se notar o deslocamento dos flutuantes de um instante para o outro, exceto em determinadas posições onde ocorrem velocidades nulas ou muito baixas caracterizando regiões de estagnação.

Figura 5- Imagem da área de interesse em instante “i+1” de um ensaio genérico



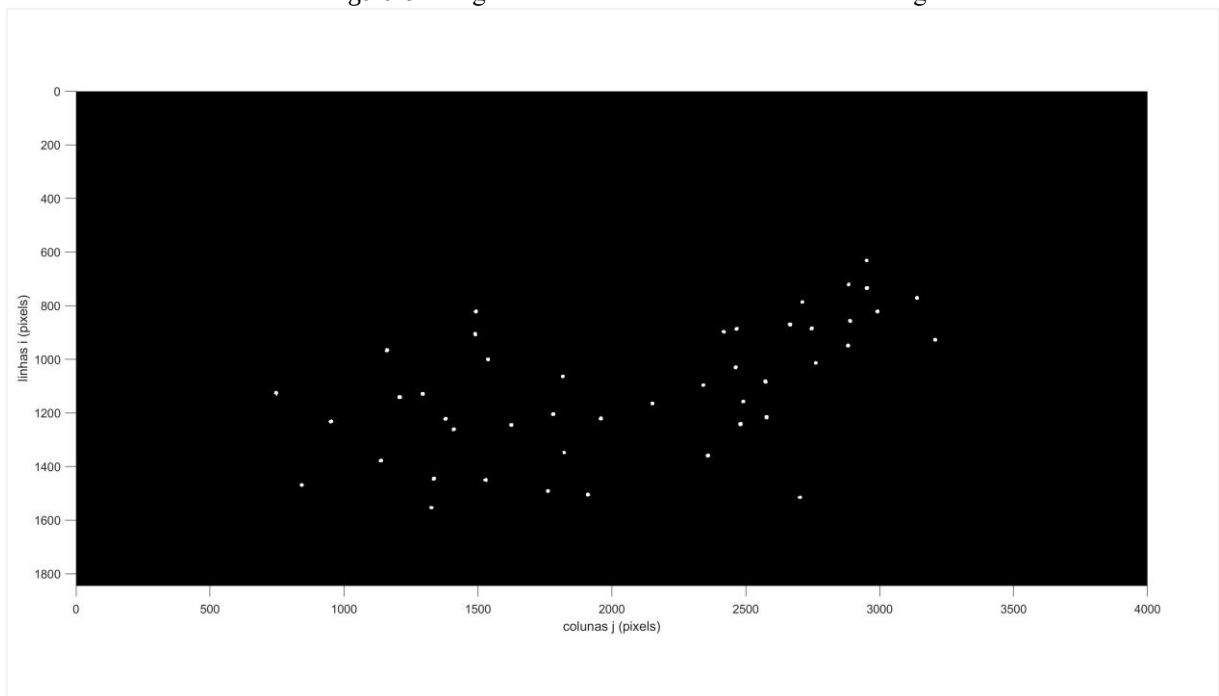
Fonte: Extração do software em desenvolvimento pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – UEPG – 2024 – Disciplina Elementos de Gerenciamento em Recursos Hídricos.

No carregamento das imagens são extraídas e armazenadas em variáveis específicas as informações de resolução e instante da tomada da cena, além da criação da matriz numérica que promove a visualização da imagem digital.

Na sequência cada imagem passa por alguns filtros digitais que possuem a função de separar o fundo da imagem em segundo plano dos flutuantes em primeiro plano. Estes filtros basicamente atribuem valor 0 – falso para os pixels com intensidade inferior a determinado limiar, 250 neste trabalho, e para regiões com pixels conectados que tenham um conjunto de pixels inferior a 50 unidades ou superior a 150 unidades. Para os demais pixels é atribuído o valor 1 – verdadeiro criando a imagem binária preto (0) e branco (1).

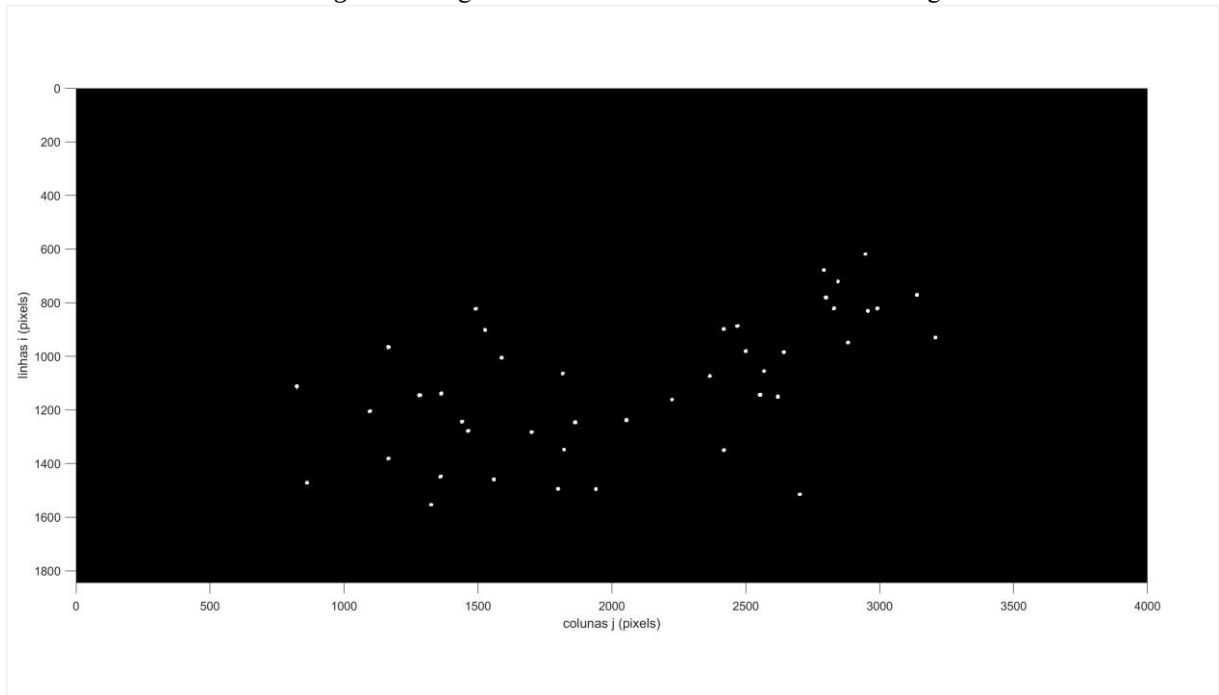
As regiões de pixels conectados que correspondem aos limiares descritos certamente correspondem às imagens de flutuantes pois estes possuem características peculiares como intensidade superior a 250 na imagem em escala de cinza e conjunto de pixels em torno de 100 unidades na imagem binarizada. As imagens binárias passam a ter o aspecto indicado nas Figura 6 e Figura 7.

Figura 6- Imagem binária no instante “i” de um ensaio genérico



Fonte: Extração do software em desenvolvimento pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – UEPG – 2024 – Disciplina Elementos de Gerenciamento em Recursos Hídricos.

Figura 7- Imagem binária no instante “i+1” de um ensaio genérico

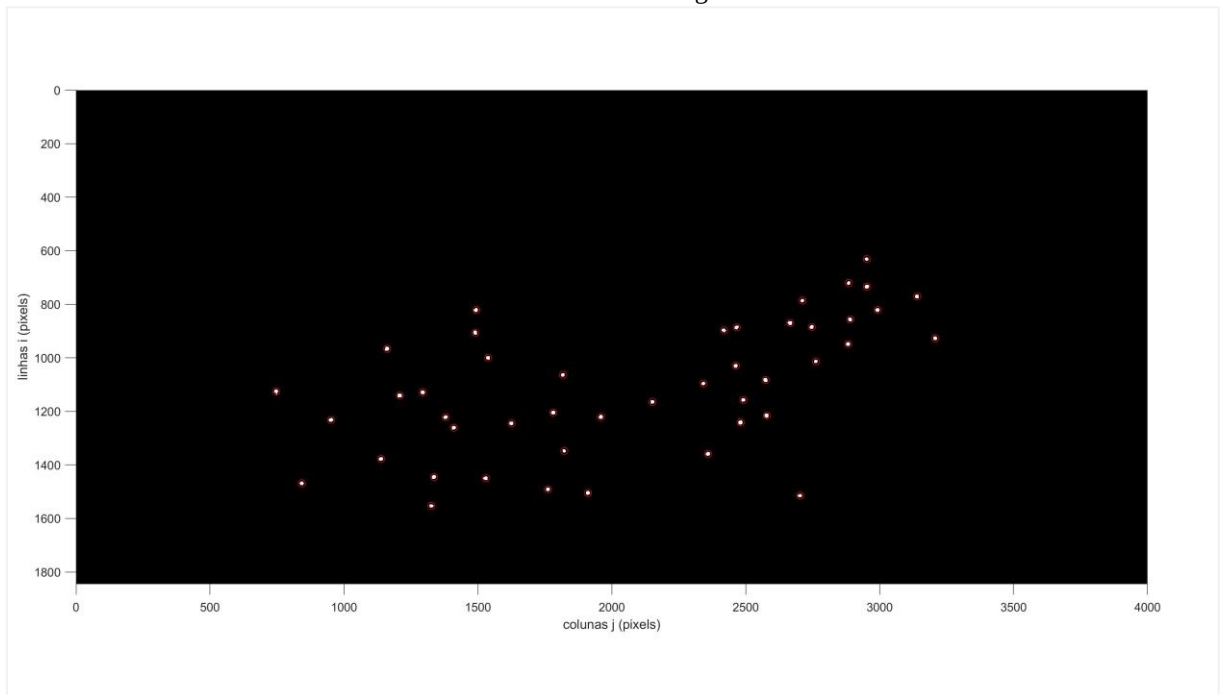


Fonte: Extração do software em desenvolvimento pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – UEPG – 2024 – Disciplina Elementos de Gerenciamento em Recursos Hídricos.

Após a binarização e definição das regiões conectadas que correspondem aos flutuantes, uma rotina de processamento de imagens conduz ao cálculo do centroide de cada região com pixels conectados. As Figura 8 e Figura 9 correspondem às reproduções das imagens binarizadas sobrepostas pela plotagem dos centroides calculados para cada uma das regiões de flutuantes. Pode-se observar que nem todas as regiões de uma imagem tem sua correspondente região em outra imagem. Isso pode ocorrer quando algumas das películas saíram da área de interesse ou estacionaram em local de velocidade nula ou aderiram a outra película conformando elemento único.

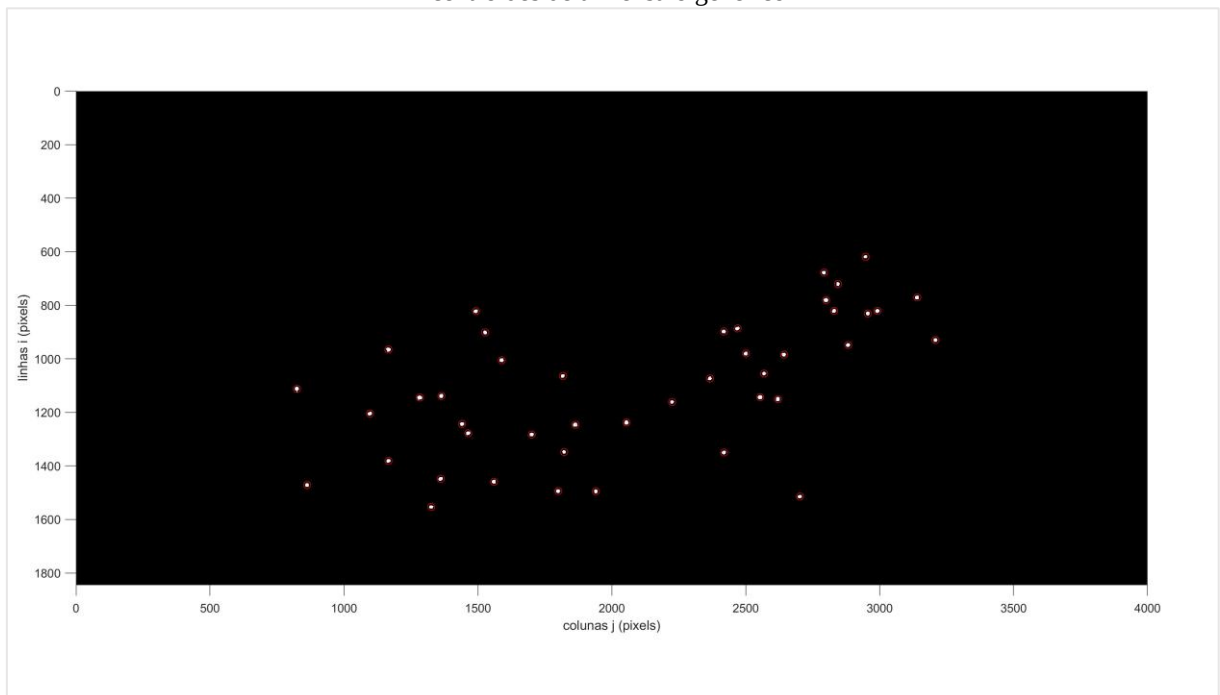
Normalmente um elemento único, sem correspondente em imagem subsequente ou anterior, produzirá uma região de pixels conectados que será anulada no processo de binarização. Em outros eventuais casos sem correspondência o vetor deslocamento é zerado ou suprimido. A Figura 10 ilustra a sobreposição dos centroides obtidos para as imagens do ensaio genérico, aqui exemplificado, nos instantes “i” e “i+1”, podendo-se observar com maior clareza os deslocamentos das partículas de um instante para outro.

Figura 8- Imagem binária no instante “i” com sobreposição da plotagem de marcadores para centroides de um ensaio genérico



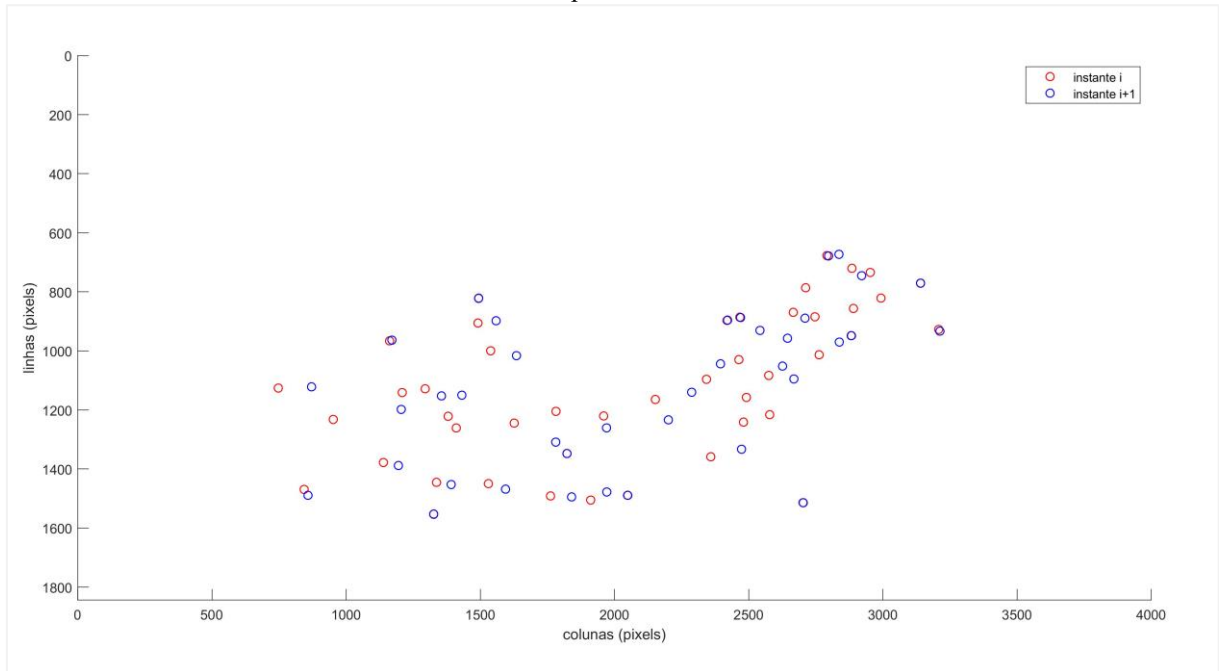
Fonte: Extração do software em desenvolvimento pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – UEPG – 2024 – Disciplina Elementos de Gerenciamento em Recursos Hídricos.

Figura 9- Imagem binária no instante “i+1” com sobreposição da plotagem de marcadores para centroides de um ensaio genérico



Fonte: Extração do software em desenvolvimento pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – UEPG – 2024 – Disciplina Elementos de Gerenciamento em Recursos Hídricos.

Figura 10- Plotagem de marcadores dos centroides de um ensaio genérico com sobreposição das coordenadas obtidas para os instantes “i” e “i+1”



Fonte: Extração do software em desenvolvimento pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – UEPG – 2024 – Disciplina Elementos de Gerenciamento em Recursos Hídricos.

3.3.3 Precisão de cronometragem.

Ao se tirar um instantâneo, fotografia capturada, o arquivo guarda informações como formato, resolução, local, data, hora, minuto e segundo. As informações de tempo são retiradas via rotina computacional para determinação precisa do intervalo de tempo entre cada foto do ensaio realizado. Essa informação, em conjunto com a informação de posição e deslocamento em direções x e y proporciona o vetor velocidade.

3.3.4 A definição de imagens

Utilizando-se imagens com definição 4K (3840 x 2160 pixels) pode-se ter uma escala de conversão nestes ensaios de aproximadamente 3,8 pixels para um milímetro, em uma área que tenha um comprimento focalizado de até 1 m. Uma foto com definição 8K (7680 x 4320 pixels) a escala será de aproximadamente 7,7 pixels para um milímetro. As maiores resoluções garantem resultados mais precisos, porém acarretam grande esforço computacional. Neste trabalho são utilizadas imagens com resolução de 1844 linhas e 4000 colunas – 7,4 MPixels, conferindo uma conversão média em escala linear de 4 pixels para 1 milímetro na extensão do modelo que atinge aproximadamente um metro de comprimento em sua região de interesse.

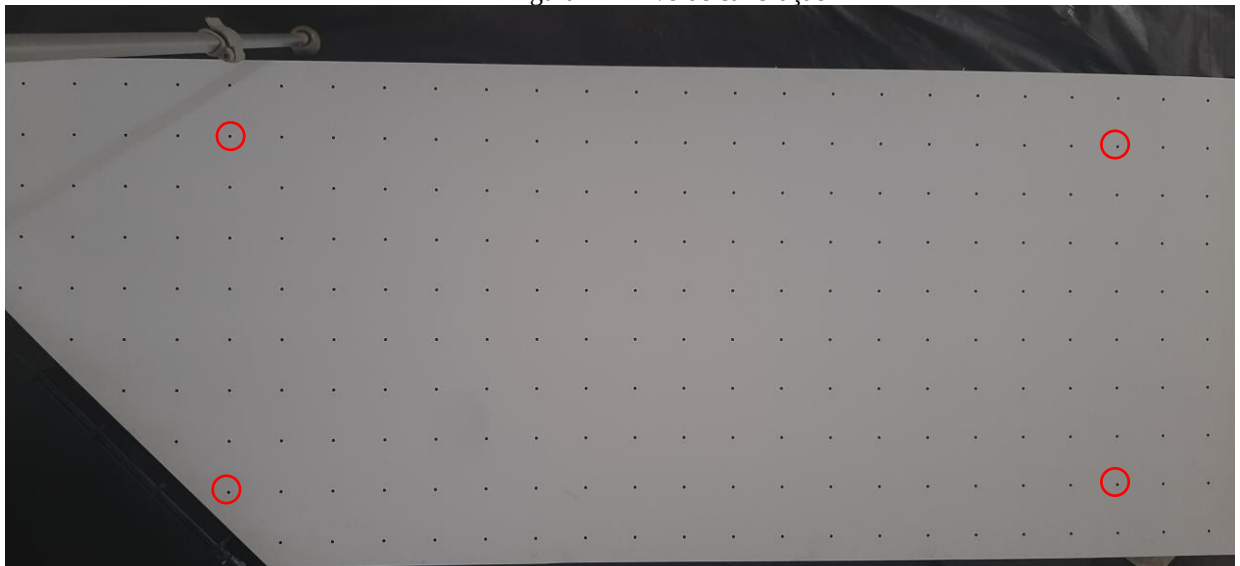
Porém, este trabalho envolve um processo de correção da deformação e conversão de coordenadas de pixels na foto para milímetros no modelo físico que não utiliza uma relação linear entre essas medidas. Trata-se de um algoritmo que correlaciona a imagem de um alvo de calibração com marcas previamente conhecidas de coordenadas em milímetros.

3.3.5 A correção de deformação na imagem e conversão de medidas na imagem para o objeto real

O sistema de coordenadas indicado na Figura 3 tem suas coordenadas conhecidas e em milímetros. Essas coordenadas conhecidas servem para balizar e ajustar as imagens que tem coordenadas em pixels. Esse processo de ajuste além de eliminar a distorção de perspectiva na foto cria uma correlação de conversão de pixels para milímetros que é utilizada em algoritmo computacional para a criação dos resultados gráficos e numéricos em unidades como mililitros, minutos, milímetros, mililitros por minuto, mililitros por segundo, milímetros por minuto ou milímetros por minuto.

O sistema de coordenadas em milímetros é definido a partir de um alvo de calibração. Este objeto – alvo de calibração – é uma placa de PVC impressa com um grid que se constitui por uma malha de pontos espaçados 50 mm entre si, horizontal e verticalmente, como pode ser observado na foto da Figura 11.

Figura 11- Alvo de calibração



Fonte: Extração do software em desenvolvimento pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – UEPG – 2024 – Disciplina Elementos de Gerenciamento em Recursos Hídricos.

Ao iniciar um ensaio de tomada de cenas de movimentação de flutuantes, o primeiro passo é obter a foto do alvo de calibração que é posicionado sobre o modelo reduzido. Após

essa foto que serve para calibração das coordenadas a placa é retirada, o ensaio é iniciado e a câmera de aquisição de dados não pode sofrer nenhuma alteração de posicionamento, focagem, ou qualquer configuração. Sua operação deve ocorrer remotamente por computador, sem toque em qualquer botão de acionamento ou em seus suportes.

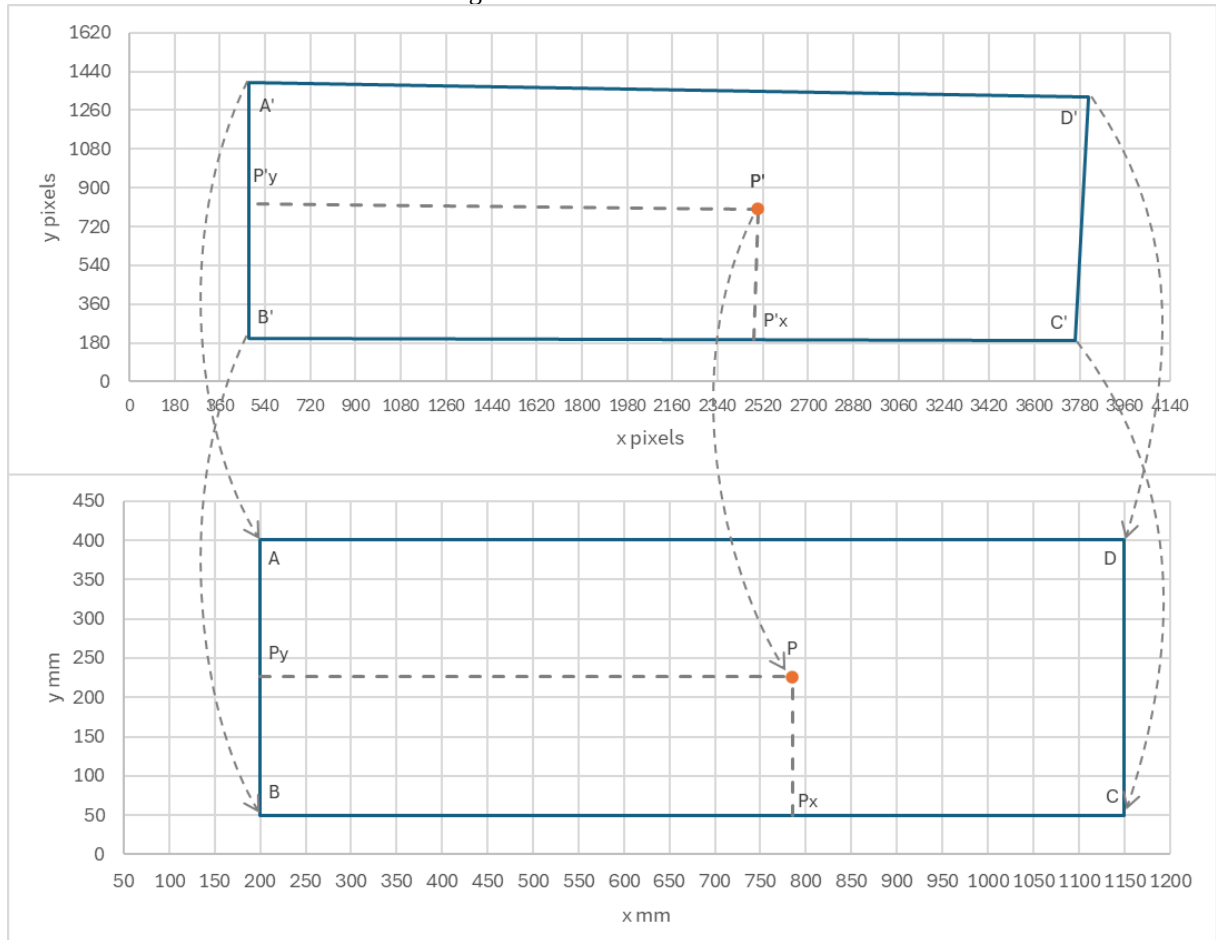
A foto de calibração é utilizada para conferir coordenadas em milímetros para todas as imagens obtidas do ensaio de movimentação de flutuantes e não podem ocorrer alterações no ângulo aquisição nem quaisquer alterações de características das aquisições de cenas em todo o ensaio.

Com a Figura 11 mostra-se a escolha de 4 pontos com coordenadas conhecidas, por exemplo os pontos: $[A' B' C' D'](\text{pixels}) \rightarrow [A B C D](\text{mm}) = [(200 \ 400) (200 \ 50) (1150 \ 50)(1150 \ 400)] (\text{mm})$.

Qualquer área quadrangular de interesse, de ângulos retos, pode ser escolhida sobre o grid de forma a configurar os vértices na sequência ABCD com coordenadas conhecidas em milímetros. O processamento desta imagem alvo corresponde à obtenção das coordenadas em pixels dos pontos escolhidos associadas às coordenadas conhecidas em milímetros e aplicação da Transformada de Coordenadas para o sistema cartesiano de projeção ortogonal.

Com auxílio dos gráficos representados na Figura 12, demonstra-se o processo de transformada, onde um ponto P' qualquer com coordenadas em pixels obtidas da foto de calibração é transformado para um ponto P com coordenadas em milímetros reais.

Figura 12- Transformada de Coordenadas



Fonte: Extração do software em desenvolvimento pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – UEPG – 2024 – Disciplina Elementos de Gerenciamento em Recursos Hídricos.

As retas A'B' e C'D' devem ser convergentes e se interceptam em um ponto PF1, bem como as retas A'D' e B'C' que se interceptam em um ponto PF2. Por processo numérico que determina as equações das retas e suas interseções, os pontos PF1 (Ponto de Fuga 1) e PF2 (Ponto de Fuga 2) têm suas coordenadas calculadas em pixels.

A seguir também são calculadas as equações das retas P'PF1 e P'PF2 cujas interseções P'_x e P'_y respectivamente com as retas B'C' e A'B' determinam as coordenadas de projeção de P' em convergência sobre essas retas. A partir destes resultados a obtenção das coordenadas de P em milímetros ocorre por meio das equações:

$$P_x = \frac{(P'_x - B'_x)(C_x - B_x)}{(C'_x - B'_x)} + B_x \quad (14)$$

$$P_y = \frac{(P'_y - B'_y)(A_y - B_y)}{(A'_y - B'_y)} + B_y \quad (15)$$

3.3.6 A sincronização e acompanhamento dos flutuantes com o escoamento;

Os flutuantes, elementos de distinção do deslocamento superficial do escoamento, desempenham função fundamental na aquisição de dados. Para esses elementos foram estudados alguns materiais flutuantes, porém as películas circulares de papel, com espessura de 0,07 mm e gramatura de 80 g/m² apresentaram desempenho suficiente em testes iniciais.

As principais características observadas foram:

- Excelente acompanhamento do fluxo superficial apresentando ótima aderência ao escoamento;
- Baixa interferência eletrostática permitindo a não aglomeração das películas;
- Flutuação estável, com área de aproximadamente 4 mm² não rompendo a superfície cuja tensão superficial mantém as películas emersas;
- Pequena espessura, não atingindo o fundo sólido em qualquer situação;
- Películas brancas com alta visibilidade contrastando com o fundo escuro;
- Baixa massa, aproximadamente $3,2 \cdot 10^{-4}$ g por película, conferindo negligenciável ação de movimentação por inércia.

3.4 ELEMENTOS GEOMÉTRICOS E MATEMÁTICOS DE RESPOSTAS

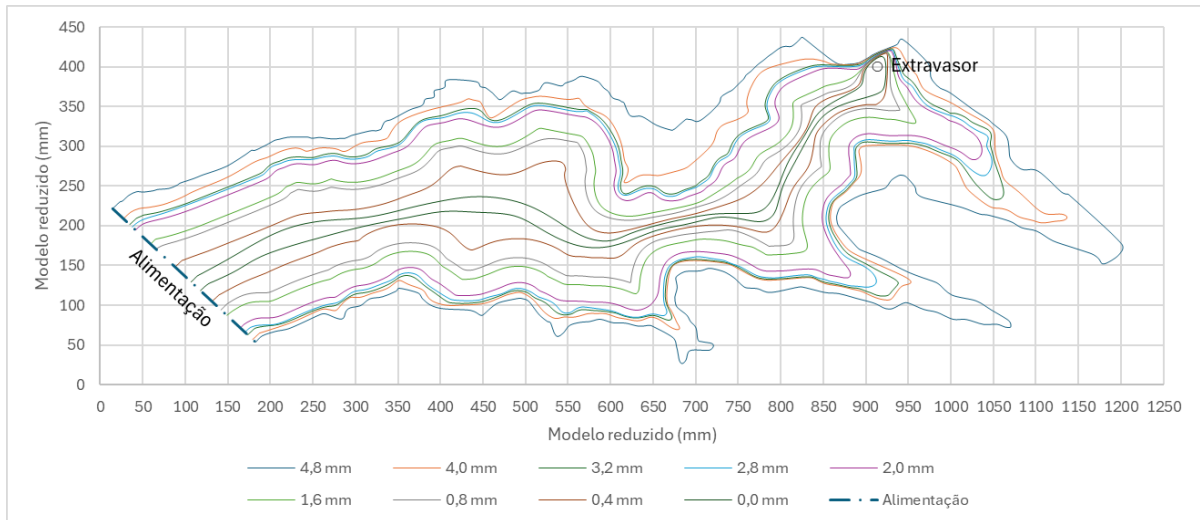
3.4.1 Elementos necessários para obtenção e análise de resultados

Alguns procedimentos, nesta fase de desenvolvimento são realizados manualmente e outros são processados automaticamente, como as saídas numéricas e gráficas de processamento computacional com algoritmos desenvolvidos na Linguagem MatLab, já implementados, que fornecem resultados para as diversas entradas de dados adquiridos nos ensaios no modelo físico.

A delimitação da área de estudo e as influências geométricas representadas são características em que se nota uma direta interferência no fenômeno estudado e sua configuração com respectivos resultados devem ter uma interpretação preponderante nesse estudo, considerando o caráter de verificação de viabilidade do trabalho.

Alguns elementos apresentados são as respostas gráficas com formação das redes de corrente, o mapa do campo de velocidades na superfície do escoamento para as diferentes vazões e níveis de operação, os mapas de isolinhas de velocidades e as escalas de conversão dos dados medidos no modelo para o reservatório real. O modelo da seção de estudo do reservatório está representado por meio do gráfico da Figura 13

Figura 13- Seção de estudo – Modelo reduzido



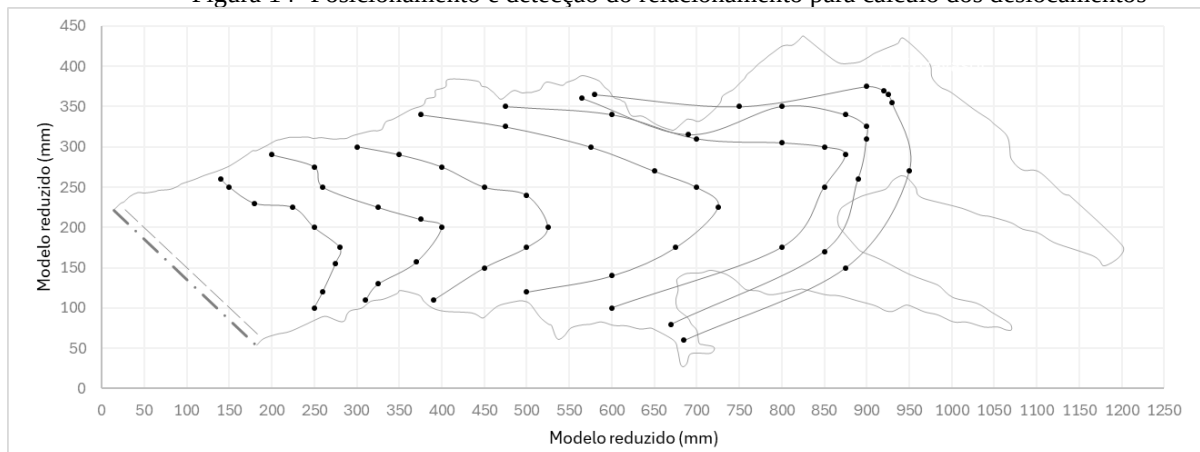
Fonte: Extração do software em desenvolvimento pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – UEPG – 2024 – Disciplina Elementos de Gerenciamento em Recursos Hídricos.

No gráfico da Figura 13 estão representadas as curvas de nível do leito, a seção de alimentação, e o extravasor no modelo reduzido, com localização próxima ao barramento. Todas as coordenadas que geram essas curvas são elementos de base para produção de outros termos de cálculo e respostas nesse programa. Com base no perímetro de máximo nível do reservatório (4,8 mm) serão apresentados demais elementos de resposta.

3.4.2 A detecção de partículas flutuantes e sua disposição no mapa da seção

No gráfico da Figura 14 representado de acordo com as características da imagem adquirida, com vetorização das coordenadas, encontra-se um exemplo aleatório da distribuição das partículas no espaço segundo seu deslocamento em frames sucessivos de aquisição.

Figura 14- Posicionamento e detecção do relacionamento para cálculo dos deslocamentos



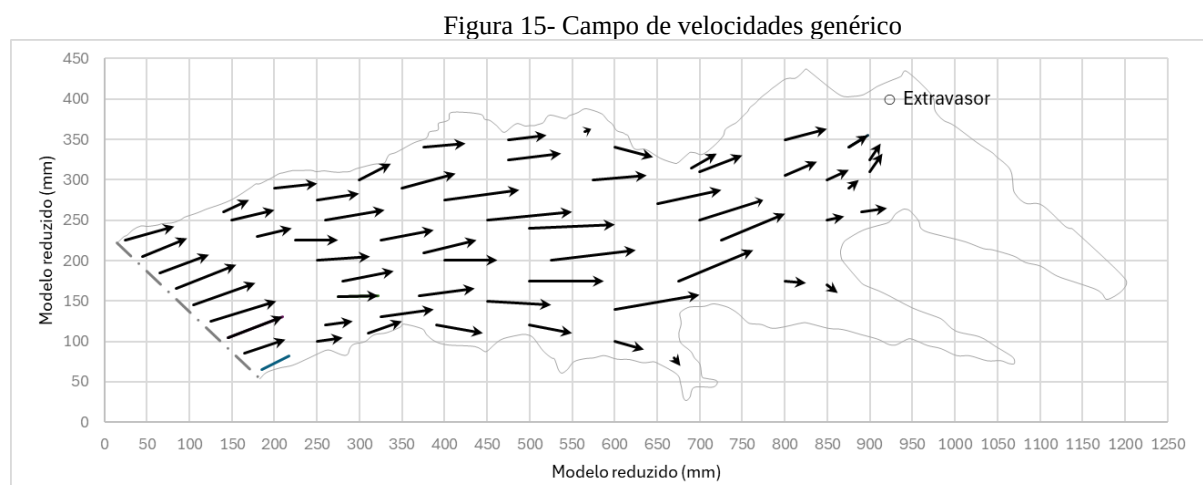
Fonte: Extração do software em desenvolvimento pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – UEPG – 2024 – Disciplina Elementos de Gerenciamento em Recursos Hídricos.

Nesse gráfico constam os resultados para uma suposta aquisição com 6 frames que foram justapostos em um único sistema de coordenadas demonstrando o caminhamento dos flutuantes ao longo do tempo. Como cada curva têm seus pontos em sequência associados a uma série nominada, a associação entre séries das curvas promove a relação que identifica qual coordenada de flutuante se deslocou para a coordenada do mesmo flutuante em instante seguinte conforme a relação interséries.

Essa relação interséries decorre da construção de uma matriz lógica, 0 ou 1, falso ou verdadeiro, para cada associação entre duas curvas no que tange aos seus pontos. Uma associação entre pontos falsa implica em anulação de vetor, uma associação entre pontos verdadeira implica no cálculo do deslocamento.

3.4.3 O campo de velocidades

Os dados adquiridos digitalmente indicam coordenadas de partículas em cada instante de aquisição de imagem. Essa informação processada resulta em vetores velocidade. Com a Figura 15 demonstra-se o um campo de velocidades genérico.

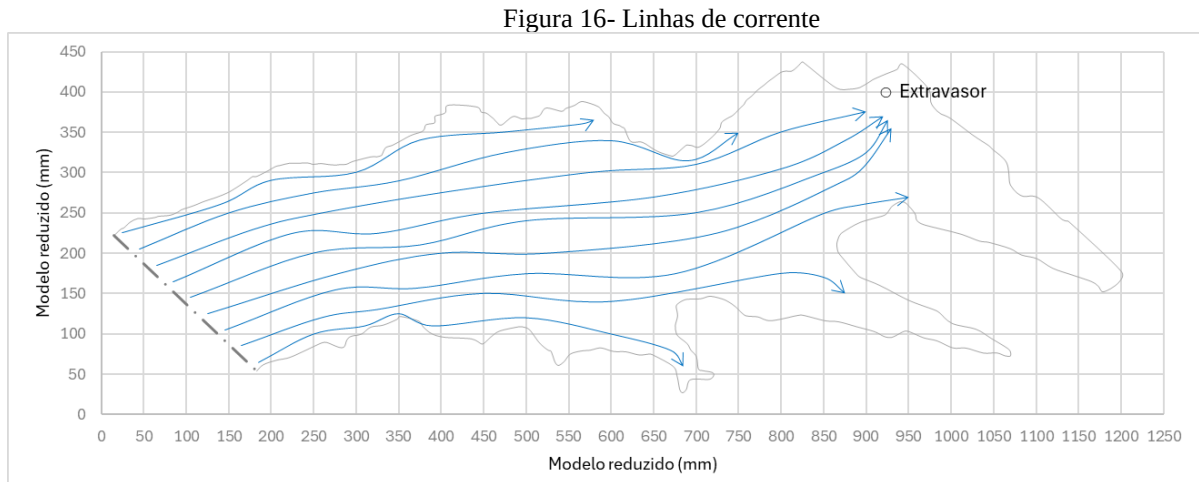


Fonte: Extração do software em desenvolvimento pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – UEPG – 2024 – Disciplina Elementos de Gerenciamento em Recursos Hídricos.

A vetorização da razão deslocamento/tempo, com instante de partida “i” e de chegada “i+1” define o vetor velocidade com coordenada de atuação no instante “i”.

3.4.4 As linhas de corrente

As linhas de corrente são curvas tangentes aos vetores velocidade. Essas linhas são plotadas por algoritmo do TooBox de processamento de imagens e podem ter aspecto semelhante ao que se apresenta na Figura 16.



Fonte: Extração do software em desenvolvimento pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – UEPG – 2024 – Disciplina Elementos de Gerenciamento em Recursos Hídricos.

Nessa representação da Figura 16 pode-se ter uma noção clara da trajetória das partículas no decorrer do tempo, dos fluxos que comporão a maior parte da vazão, das regiões de estagnação e do tempo de detenção em escalas percentuais do volume que entra no reservatório.

3.4.5 Critério de semelhança e escalas de conversão

O critério de semelhança para escoamentos sob ação da gravidade implica na igualdade do número de Froude no modelo e no reservatório real. Para estimar as velocidades e vazões de operação no modelo, consonantes com as velocidades e vazões reais verificadas no reservatório, é necessário estabelecer as escalas de velocidades e vazões, igualando o adimensional Fr no modelo e no reservatório real:

$$Fr_M = Fr_R$$

$$\frac{v_M}{\sqrt{g_M L_M}} = \frac{v_R}{\sqrt{g_R L_R}}$$

Admitindo-se aceleração da gravidade idêntica no modelo e real:

$$\frac{v_M}{\sqrt{L_M}} = \frac{v_R}{\sqrt{L_R}}$$

Escala de velocidades (λ_v)

$$\lambda_V = \frac{v_M}{v_R} = \frac{\sqrt{L_M}}{\sqrt{L_R}} = \sqrt{\lambda L}$$

$$\lambda_V = \lambda L^{1/2} \quad (15)$$

Onde λL é a escala de construção do modelo.

Escala de vazões (λQ):

$$\lambda Q = \lambda_V \cdot \lambda L^2$$

$$\lambda Q = \lambda L^{1/2} \cdot \lambda L^2$$

$$\lambda Q = \lambda L^{5/2} \quad (16)$$

Considerando as escalas de conversão de velocidades e vazões e a escala geométrica de construção do modelo, as expressões para cálculo das velocidades e vazões no reservatório real a partir de medições no modelo são, respectivamente:

$$V_R = 50 V_M \quad (17)$$

$$Q_R = 3,125 \cdot 10^8 \cdot Q_M \quad (18)$$

3.4.6 Software

Em paralelo está a fase de adaptação do software de processamento de imagens utilizando a plataforma Matlab®, cujos algoritmos como entrada, processamento e saída são semelhantes aos já empregados em trabalho anterior, no qual Schafranski (2022) utilizou a aquisição e processamento de imagens para comparar a floculação em tratamento de água para abastecimento produzida por meio convencional com a floculação onde ocorre adição de micro areia.

As adaptações basicamente se referem à obtenção das coordenadas de partículas flutuantes e não a sua coordenada e tamanho, ao deslocamento das partículas de um instante para outro e não à sua variação de envergadura. Também são implantadas rotinas relacionadas mais estritamente aos objetivos do presente trabalho.

Neste software que carrega as imagens em um lote representativo de um ensaio completo, realiza-se:

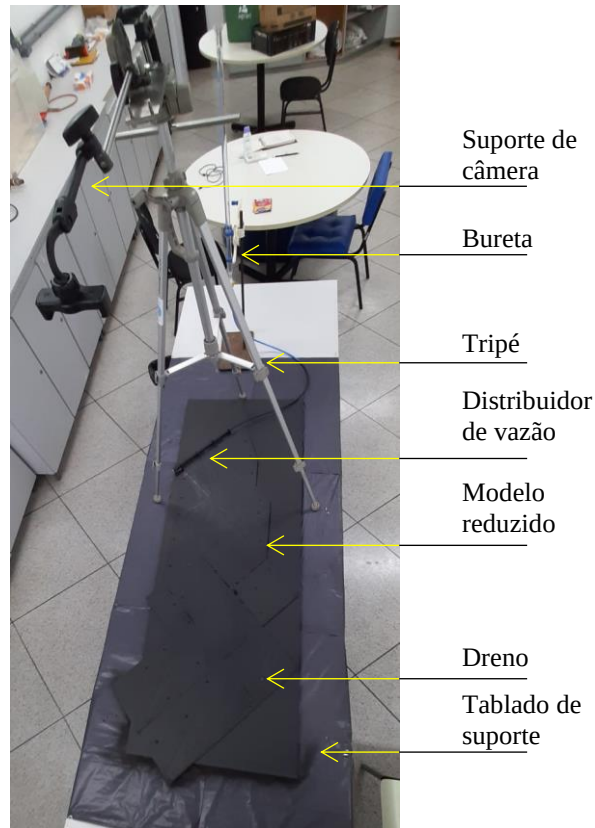
- A correção da distorção de perspectiva por um processo matemático de transformação de projeção;
- A escalagem da imagem, para que suas dimensões em pixels se compatibilizem com as dimensões em milímetros do modelo;

- A binarização da imagem que ocasiona a separação do fundo preto e das películas flutuantes brancas;
- A vetorização das coordenadas das partículas para cada imagem produzida no ensaio e o correspondente deslocamento das partículas entre os instantes de aquisição, proporcionado dados de velocidades;
- O posicionamento dos vetores velocidade em um campo de velocidades adaptado a uma malha regular de coordenadas;
- O mapa de cores das isolinhas de velocidades;
- O mapa de cores de regiões de velocidades;
- O gráfico de linhas de corrente.

Além dos resultados gráficos e numéricos obtidos diretamente no software, esses são exportados para planilhas de cálculo padronizadas, com as quais se extraem outros resultados gráficos e numéricos que são do interesse nos objetivos deste trabalho.

Com a Figura 17 mostra-se a instalação de testes na qual é utilizada uma bureta graduada para controle de vazão e não uma bomba peristáltica, ainda, nesta fase de testes.

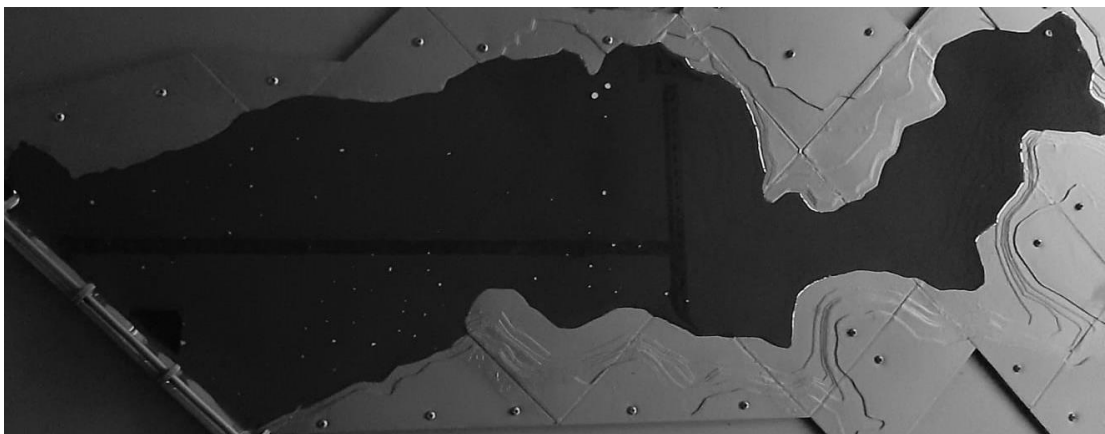
Figura 17- Instalação da bancada de ensaios



Fonte: A autora, 2024.

A Figura 18 contém uma imagem de fase, com tomada de cena em vista superior com direção vertical sobre a superfície contendo partículas flutuantes em nível mínimo de operação do modelo.

Figura 18- Vista superior do modelo

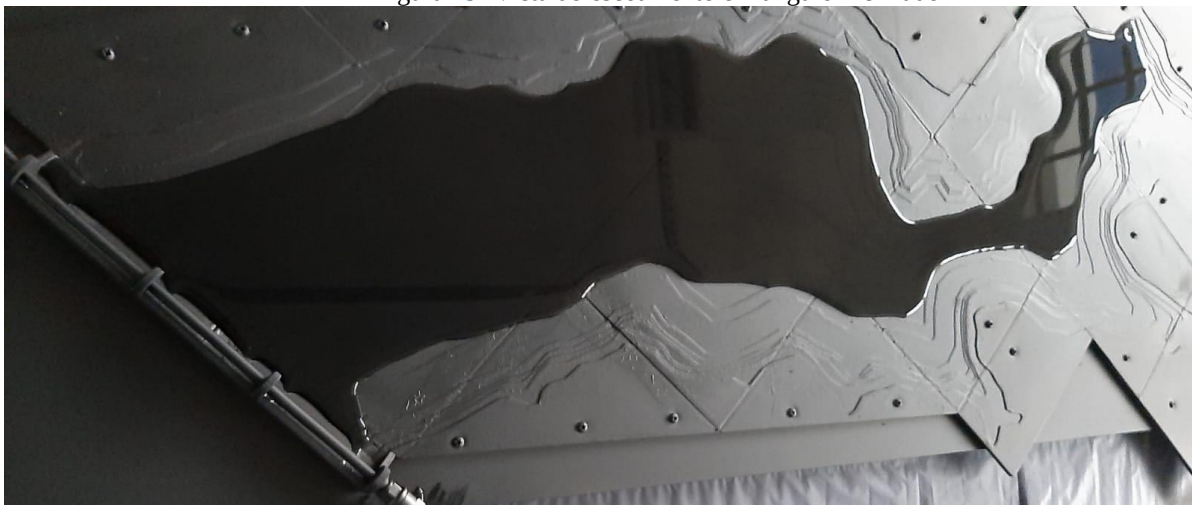


Fonte: A autora, 2024.

Com a Figura 19 em imagem de instante anterior à adição de flutuantes, mostra-se a superfície da água com sua conformação de acordo com as curvas do modelo e especialmente

a reflexão quase especular da luz nessa superfície, demonstrando ausência de turbulência e a possível caracterização do escoamento laminar.

Figura 19- Vista do escoamento em ângulo inclinado



Fonte: A autora, 2024.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para efeito de respostas e avaliação da sensibilidade do sistema em modelagem altamente reduzida foram realizados ensaios com vazão moderada e vazão alta, ambos com relação à operação usual da PCH São Jorge, a qual, desconsiderando os vertimentos em situações de extravazão, corresponde a praticamente 95% do destino da água do reservatório.

Os resultados se apresentam por meio de alguns valores numéricos de interesse e especialmente por gráficos que proporcionam a noção da distribuição das grandezas físicas na área de estudo.

Salienta-se que em se tratando de uma área de estudo específica e recortada do reservatório real estes resultados possam em função de condições de contorno e de entrada sofrerem influências nas variáveis envolvidas no estudo. Neste caso a análise envolve uma questão de coerência com resultados esperados, não admitindo-se totalmente, ainda, neste estudo de viabilidade que tais variáveis retratem de forma fidedigna o comportamento real. Porém, que possam situarem-se como uma predição consistente diante das restrições que são apresentadas nas discussões.

4.1 ENSAIO DE VAZÃO MODERADA

4.1.1 Dados gerais

A Tabela 1 apresenta dados hidro cinemáticos do ensaio de vazão moderada, correspondente a uma operação modelada equivalente, por semelhança, a aproximadamente a operação com vazão máxima turbinada na PCH São Jorge.

Tabela 1- Dados hidro cinemáticos de operação e velocidades aferidas

Vazão média - Q			
Qm		Qr	
mL/s	m ³ /s	mL/s	m ³ /s
0,035	3,50E-08	1,094E+07	10,938
Velocidade máxima - v			
vm		vr	
mm/s	m/s	mm/s	m/s
0,914	9,14E-04	45,688	0,0457
Velocidade média - U			
Um		Ur	
mm/s	m/s	mm/s	m/s
0,335	3,35E-04	16,735	0,0167

Fonte: A autora – 2024

Na Tabela 1 os índices “m” e “r” referem-se ao modelo e reservatório, respectivamente.

Na Tabela 2 foram selecionados alguns vetores velocidade com coordenadas e velocidades mais expressivas aferidas no modelo e respectivas coordenadas e velocidades calculadas pela similitude de Froude no protótipo (reservatório).

Tabela 2- Algumas velocidades aferidas no ensaio de vazão alta

Modelo			Reservatório		
x mm	y mm	v (mod) mm/s	x m	y m	v(res) m/s
278,57	246,59	0,657	111,43	98,63	0,033
337,72	215,15	0,884	135,09	86,06	0,044
411,91	242,02	0,406	164,77	96,81	0,020
436,66	245,64	0,383	174,66	98,26	0,019
532,38	211,50	0,453	212,95	84,60	0,023
628,80	218,52	0,476	251,52	87,41	0,024
774,28	274,78	0,401	309,71	109,91	0,020
782,50	237,21	0,737	313,00	94,89	0,037
806,42	259,15	0,788	322,57	103,66	0,039
832,87	321,91	0,914	333,15	128,76	0,046
846,15	346,53	0,853	338,46	138,61	0,043
860,62	279,67	0,519	344,25	111,87	0,026

Fonte: A autora – 2024

Também são características do ensaio:

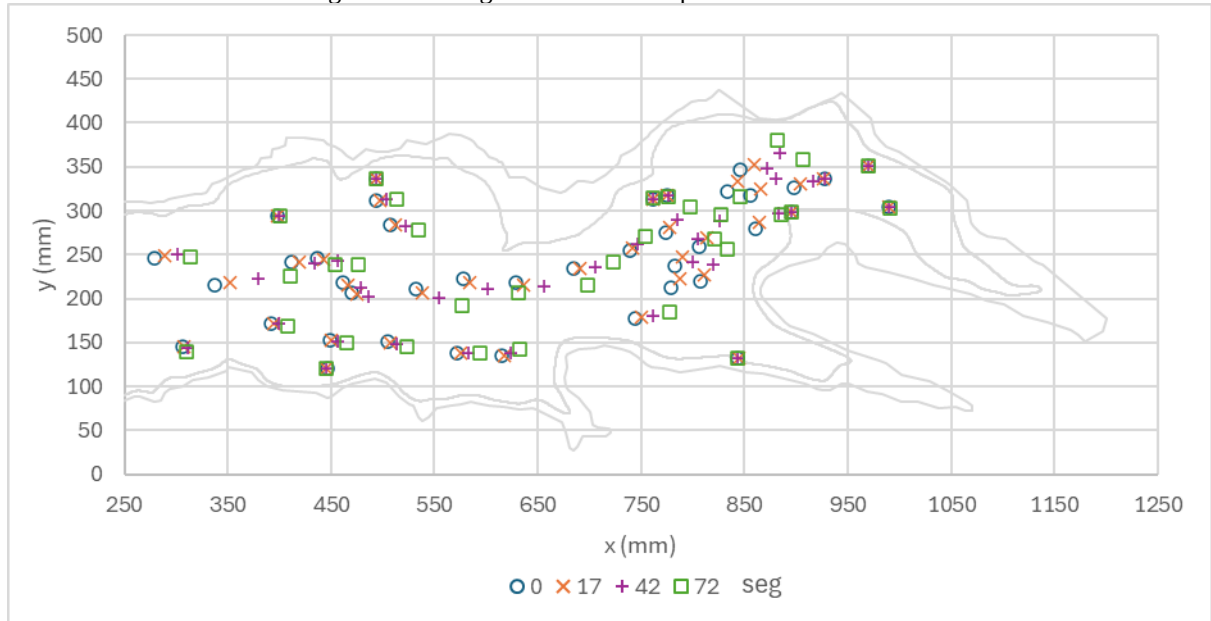
- Número de flutuadores: 40;
- Número de frames capturados: 50
- Número de frames processados: 4
- Duração total do ensaio: 28 minutos
- Nível de operação: 3,2 mm no modelo, equivalente à cota 8,0 m acima da base da barragem ou leito natural do rio.
- Saída gráfica: Posicionamento de flutuantes, Campo de velocidades em coordenadas esparsas; Campo de velocidades em coordenadas regularizadas; Isolinhas de velocidades; Áreas de velocidades e Linhas de corrente.

4.1.2 Resultados do processamento digital

No gráfico da Figura 20 estão plotados simultaneamente os centroides de flutuadores em quatro instantes distintos e subsequentes. O conjunto de 4 frames (instantâneos) subsequentes foi escolhido por conter os 40 flutuadores simultaneamente na região da área de estudo em maior número em relação a outras escolhas, reduzindo, desta forma, a eliminação

automática de vetores velocidade por aplicação de matriz lógica, que ocorre quando qualquer flutuador do conjunto tenha entrado posteriormente ou deixado a área no período considerado.

Figura 20- Plotagem de centroides para o ensaio de vazão moderada

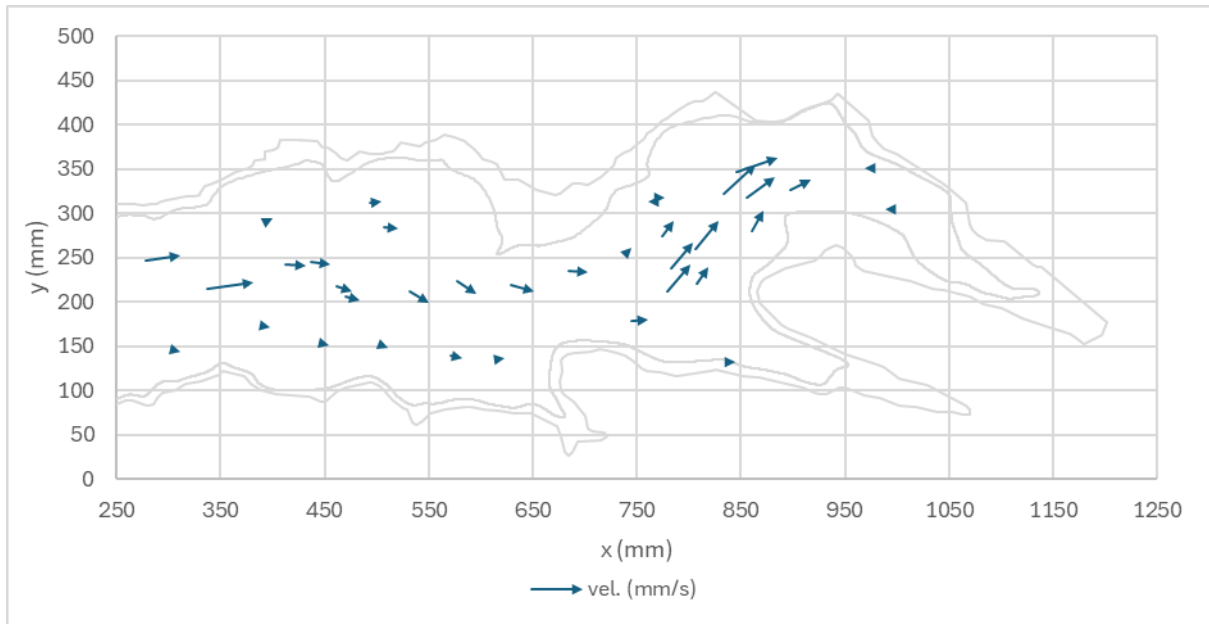


Fonte: Extração do software em desenvolvimento pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – UEPG – 2024 – Disciplina Elementos de Gerenciamento em Recursos Hídricos.

No gráfico da Figura 21 percebe-se a sobreposição de alguns centroides e evolução de outros. A sobreposição indica velocidade nula ou muito próxima de zero. A evolução indica deslocamentos e consequentes velocidades proporcionando cálculo vetorial a cada um dos períodos entre frames. Considerando o processamento de 4 frames são calculados 3 vetores para cada flutuador em 3 posições distintas.

A Figura 21 contém o gráfico de plotagem vetorial para o instante do primeiro frame de aquisição, considerado para efeito de cálculo como instante zero (0 segundos).

Figura 21- Plotagem de vetores velocidade no instante 0,0 segundos para o ensaio de vazão moderada- Vetores com coordenadas esparsas



Fonte: Extração do software em desenvolvimento pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – UEPG – 2024 – Disciplina Elementos de Gerenciamento em Recursos Hídricos.

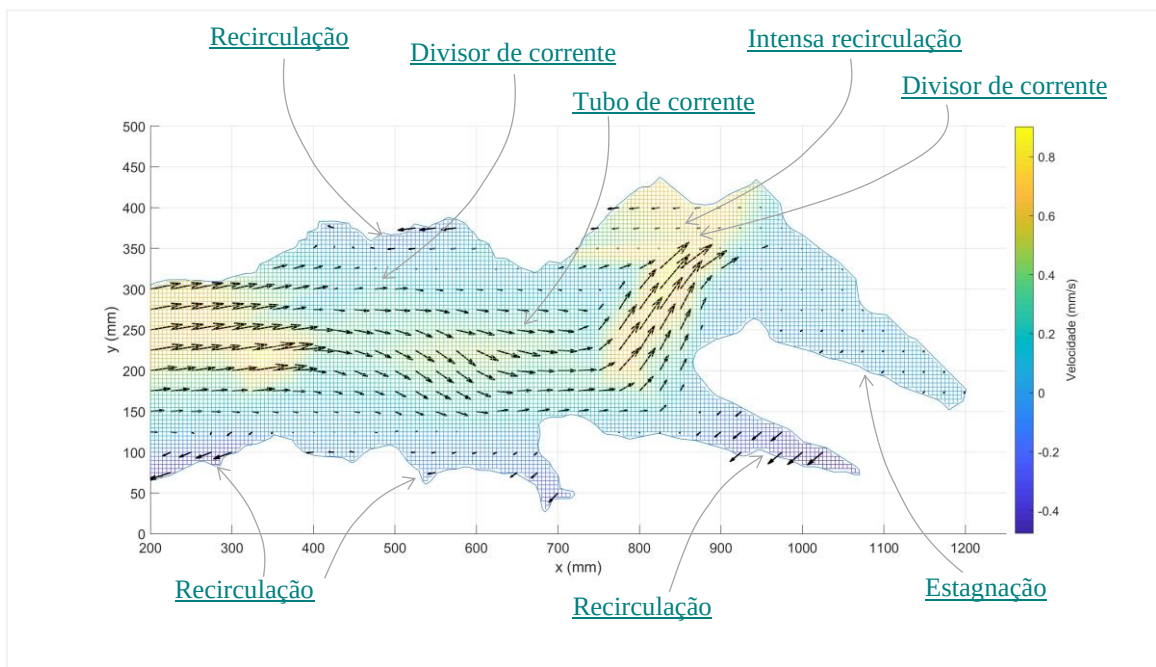
No gráfico da Figura 21 os vetores são posicionados em coordenadas conforme o centroide dos flutuantes no instante “i”, o deslocamento é calculado para os centroides no instante “i+1”, a velocidade, levando em conta o intervalo de tempo entre “i” e “i+1” é calculada como a resultante das componentes nas direções x e y. O mesmo procedimento é realizado para os instantes subsequentes considerando o incremento de “i”.

Pode-se notar a maior intensidade das velocidades em torno de uma região central da área e no sentido do sumidouro, orifício de extravasão do modelo que procura reproduzir a tomada da água para turbinamento, localizado aproximadamente na coordenada (920; 380). Nota-se também menores intensidades de velocidades, atuando gradativamente com a proximidade das margens e regiões de velocidades nulas ou muito lentas em alguns pontos de reentrâncias das margens.

Uma abordagem mais esclarecedora e intuitiva é possível por meio da interpolação de vetores para toda a região, refinamento e regularização da malha de coordenadas com vetores aplicados nos “nós” da malha. Com aplicação de um algoritmo de refinamento e interpolação linear e em conjunto com um mapa de cores, pode se visualizar uma descrição mais esclarecedora da distribuição superficial de velocidades e dos caminhos preferenciais de propagação da vazão que ocorre no corpo estudado.

A Figura 22 apresenta a malha regularizada com definição de 5 mm de suas células quadradas, vetores aplicados em “nós” mediante essa definição e o respectivo mapa de cores de velocidades, onde pode-se perceber, inclusive, a presença de velocidades negativas, sugerindo áreas de recirculação, divisores de corrente e a formação do tubo de corrente, principal meio de propagação da vazão na região estudada.

Figura 22- Refinamento da malha vetorial, vetores com coordenadas regularizadas e mapa de cores representativo das velocidades

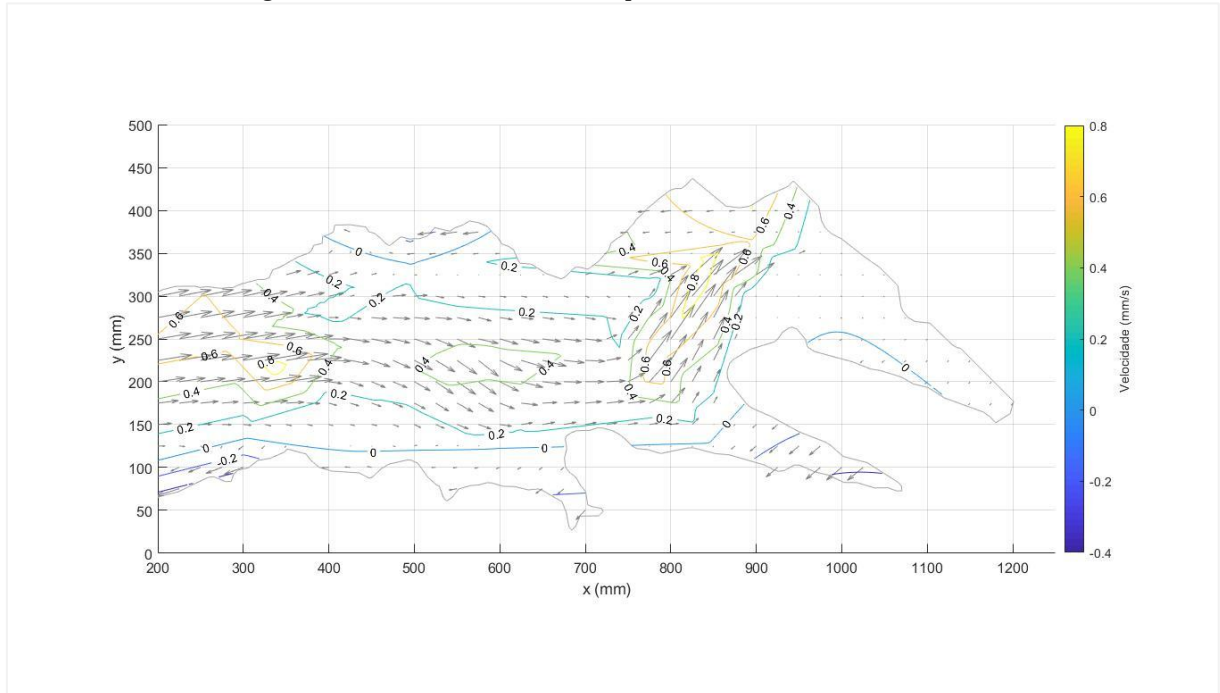


Fonte: Adaptado da extração do software em desenvolvimento pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – UEPG – 2024 – Disciplina Elementos de Gerenciamento em Recursos Hídricos.

Na aproximação ao sumidouro nota-se a separação do fluxo em uma parcela que será extravasada e outra que recirculará em sentido anti-horário junto à margem esquerda, criando, aparentemente, uma situação permanente. Um fenômeno semelhante, porém, menos intenso, ocorre junto à margem esquerda com divisor da corrente aproximadamente em torno da coordenada (450; 320). Na margem direita ocorrem regiões de recirculação, aparecendo velocidades negativas, e de estagnação em uma região quase que isolada a partir aproximadamente da coordenada (900; 300). A priori, pode-se estabelecer a hipótese de que tais regiões só terão renovação de suas águas por meio de eventos pluviométricos diretos e/ou pelo escoamento superficial lateral afluente por ocasião destes eventos.

A delimitação de áreas com características diferenciadas relativas ao movimento da água em suas extensões pode ter algumas identificações auxiliadas por meio do traçado das isolinhas de velocidades. Um gráfico de isolinhas relacionado ao ensaio de vazão moderada está representado na Figura 23.

Figura 23- Isolinhas de velocidades para o ensaio de vazão moderada

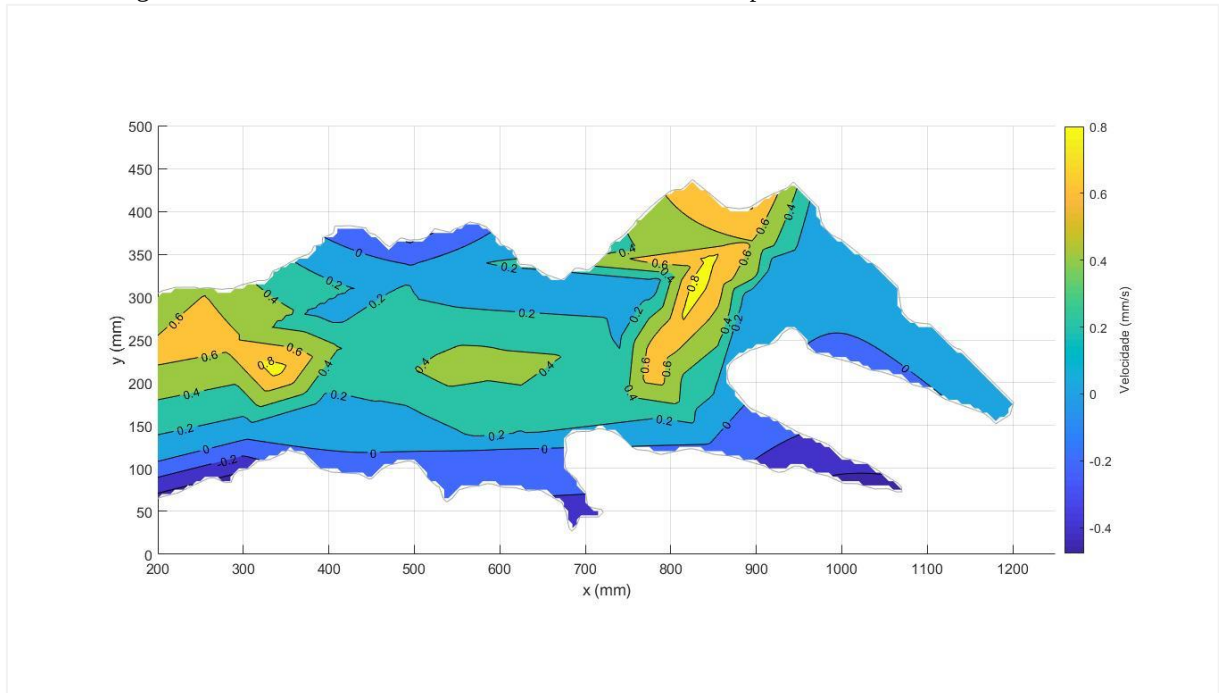


Fonte: Extração do software em desenvolvimento pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – UEPG – 2024 – Disciplina Elementos de Gerenciamento em Recursos Hídricos.

Neste gráfico pode-se identificar “ilhas” de velocidades e a delimitação de regiões que correspondem ao tubo de corrente formador da região da vazão principal do corpo hídrico, como, por exemplo, as regiões com velocidades acima de 0,2 mm/s e regiões de baixo ou nulo movimento com velocidades abaixo de 0,2 mm/s no modelo, equivalente a 0,01 m/s no reservatório.

Uma separação dessas regiões fica mais clara ao se plotar as isolinhas por áreas contornadas conforme aparece na Figura 24

Figura 24- Isolinhas de velocidades com áreas contornadas para o ensaio de vazão moderada



Fonte: Extração do software em desenvolvimento pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – UEPG – 2024 – Disciplina Elementos de Gerenciamento em Recursos Hídricos.

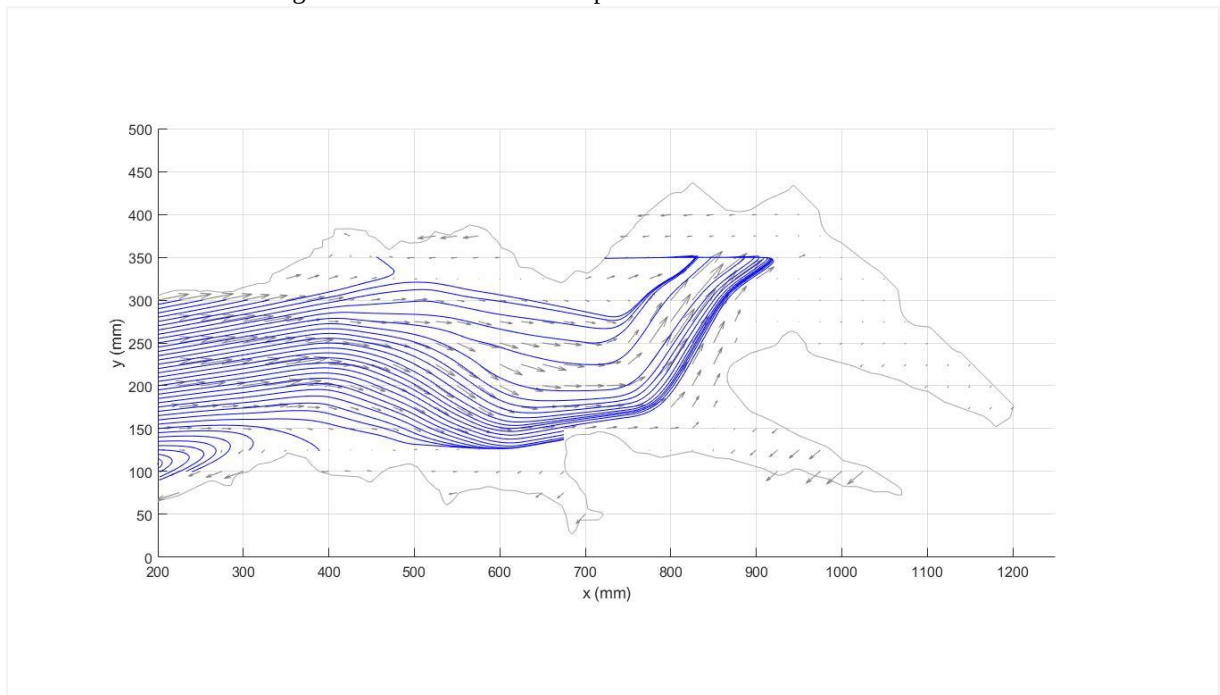
Na Figura 24 pode-se observar o contorno da velocidade 0,2 mm/s do qual para seu interior nota-se as velocidades crescentes, para o exterior velocidades decrescentes, uma faixa de transição entre 0,2 mm/s e 0,0 mm/s e no sentido de encontro às margens velocidades negativas que promovem as recirculações que ocorrem devido ao arraste com os contornos sólidos do corpo hídrico. Pode-se deduzir a definição do tubo de corrente que se promove a partir da velocidade 0,2 mm/s e/ou pouco além dessa marca para a formação principal do fluxo que extravasa do sistema como pode ser visto com a construção das linhas de corrente (*stream lines* na rotina Matlab®) em gráfico da Figura 25.

Considerando a poligonal fechada da velocidade 0,2 mm/s, com extração de dados da matriz numérica de isolinhas é verificado que a área da região abrangida corresponde a 115425 mm² no modelo, correspondente a 72.140,63 m² no reservatório e perfazendo 51,96% da área da poligonal total da superfície neste ensaio. Estes dados são úteis para futuras implementações relacionadas aos volumes e a terceira dimensão (z) considerando as profundidades e as seções transversais do corpo da água.

Por meio de algoritmo de processamento dos vetores interpolados para a malha regular são obtidas as curvas tangentes aos vetores velocidade. Essas tangentes constituem as linhas de

corrente que em sua definição, em escoamentos permanentes, coincidem com a trajetória das partículas em movimento. A Figura 25 contém o gráfico das linhas de corrente traçadas para o ensaio de vazão moderada.

Figura 25- Linhas de corrente para o ensaio de vazão moderada



Fonte: Extração do software em desenvolvimento pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – UEPG – 2024 – Disciplina Elementos de Gerenciamento em Recursos Hídricos.

Chama-se a atenção para os divisores de corrente e as áreas de recirculação mencionados na Figura 22 e especialmente para o “Tubo de corrente” que se identifica na região da isolinha de 0,2 mm/s mencionada na Figura 24.

Por meio da extração de dados a partir da matriz numérica geradora das linhas de corrente são obtidos alguns valores característicos associados a comprimento, velocidade e ao tempo de detenção hidráulico.

No espaço do tubo de corrente, a linha de corrente mais longa, até atingir o sumidouro, possui o comprimento de 833,46 mm no modelo, correspondente a 2083,66 m no reservatório, uma velocidade média no seu percurso de 0,424 mm/s no modelo, correspondente a 0,0212 m/s no reservatório e levando o tempo de 1.966,93 segundos para cumprir o percurso no modelo o que corresponde a 27,319 horas no reservatório.

No espaço do tubo de corrente, a linha de corrente mais curta, até atingir o sumidouro, possui o comprimento de 670,85 mm no modelo, correspondente a 1.677,13 m no reservatório, uma velocidade média no seu percurso de 0,405 mm/s no modelo, correspondente a 0,0203 m/s

no reservatório e levando o tempo de 1.655,02 segundos para cumprir o percurso no modelo o que corresponde a 22,986 horas no reservatório.

No espaço do tubo de corrente, principal meio da extravazão do reservatório, por extração de dados de cada linha de corrente, o tempo de permanência médio das partículas no corpo hídrico, extrapolado por similitude ao reservatório é de 25,15 horas.

4.2 ENSAIO DE VAZÃO ALTA

4.2.1 Dados gerais

A Tabela 3 apresenta dados hidrocinemáticos do ensaio de vazão alta, correspondente a uma operação modelada equivalente, por semelhança, a aproximadamente o dobro da operação com vazão máxima turbinada na PCH São Jorge.

Tabela 3 Dados hidrocinemáticos de operação e velocidades aferidas

Vazão média - Q			
Qm		Qp	
mL/s	m ³ /s	mL/s	m ³ /s
0,065	6,50E-08	2,031E+07	20,313
Velocidade máxima - v			
vm		vp	
mm/s	m/s	mm/s	m/s
1,708	1,71E-03	85,399	0,0854
Velocidade média - U			
Um		Up	
mm/s	m/s	mm/s	m/s
0,633	6,33E-04	31,636	0,0316

Fonte: A autora – 2024

Na Tabela 3 os índices “m” e “r” referem-se ao modelo e reservatório, respectivamente.

Na Tabela 4 foram selecionados alguns vetores velocidade com coordenadas e velocidades mais expressivas aferidas no modelo e respectivas coordenadas e velocidades calculadas pela similitude de Froude no protótipo (reservatório).

Tabela 4 Algumas velocidades aferidas – Ensaio de vazão alta

Modelo			Reservatório		
x mm	y mm	v (mod) mm/s	x m	y m	v(res) m/s
275,55	250,84	0,559	110,22	100,34	0,0280
291,04	193,78	0,727	116,42	77,51	0,0364
306,93	242,23	0,756	122,77	96,89	0,0378
360,71	226,68	0,790	144,28	90,67	0,0395
472,26	242,53	0,555	188,90	97,01	0,0278
530,40	205,58	0,665	212,16	82,23	0,0332
550,26	237,66	0,603	220,11	95,06	0,0302
599,87	183,98	1,253	239,95	73,59	0,0626
681,40	220,15	1,030	272,56	88,06	0,0515
708,58	212,90	1,247	283,43	85,16	0,0624
702,86	187,07	0,841	281,14	74,83	0,0420
797,62	214,52	0,853	319,05	85,81	0,0427

Fonte: A autora – 2024

Também são características do ensaio:

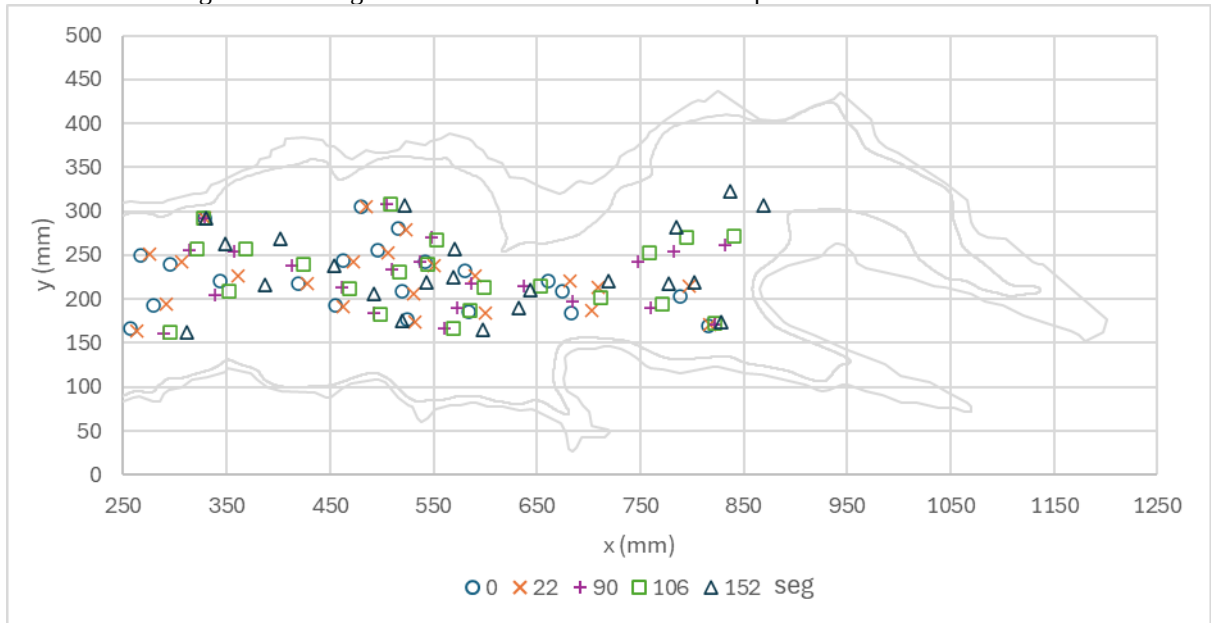
- Número de flutuadores: 25;
- Número de frames capturados: 21
- Número de frames processados: 5
- Duração total do ensaio: 22 minutos
- Nível de operação: 3,2 mm no modelo, equivalente à cota 8,0 m acima da base da barragem ou leito natural do rio.
- Saída gráfica: Posicionamento de flutuantes, Campo de velocidades em coordenadas esparsas; Campo de velocidades em coordenadas regularizadas; Isolinhas de velocidades; Áreas de velocidades e Linhas de corrente.

4.2.2 Resultados do processamento digital

Considerando o processamento de 5 frames são calculados 4 vetores velocidade para cada flutuador em 4 posições distintas. Os frames que são empregados decorrem de não haver perda de informação de um instante para outro, como por exemplo, flutuador fora da área de aquisição ou preso à margem.

Para demonstração no gráfico da Figura 26 estão plotados simultaneamente os centroides de flutuadores em quatro instantes distintos e subsequentes.

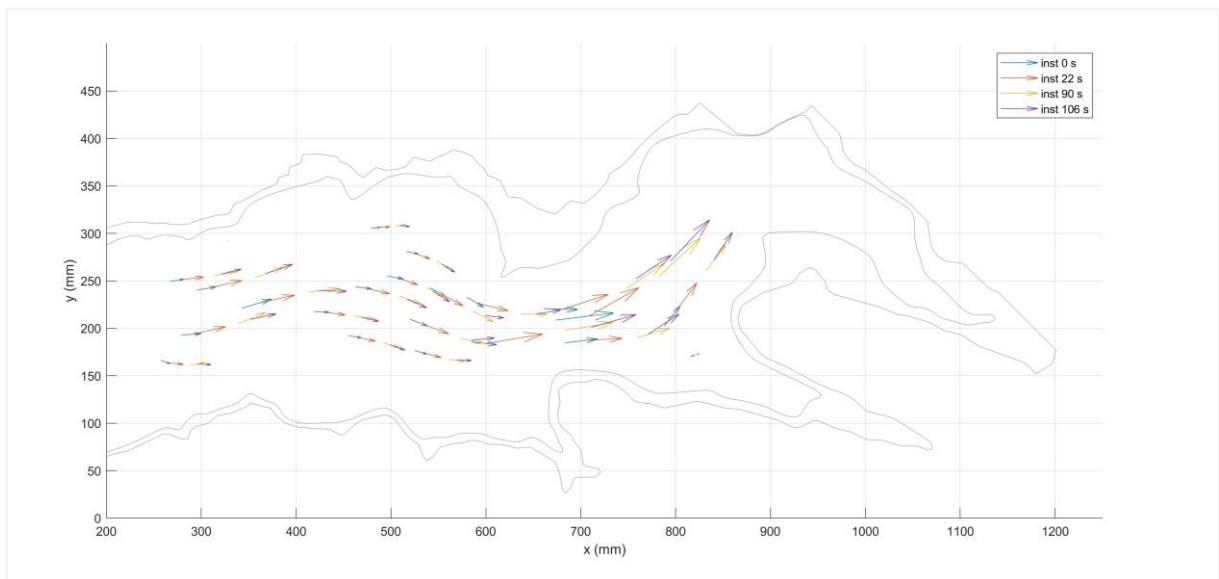
Figura 26- Plotagem de centroides em cinco instantes para o ensaio de vazão alta



Fonte: Extração do software em desenvolvimento pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – UEPG – 2024 – Disciplina Elementos de Gerenciamento em Recursos Hídricos.

A Figura 27 contém o gráfico de plotagem vetorial para os instantes do primeiro ao quinto frame de aquisição, considerado para efeito de identificação os instantes 0, 22, 90 e 106 segundos.

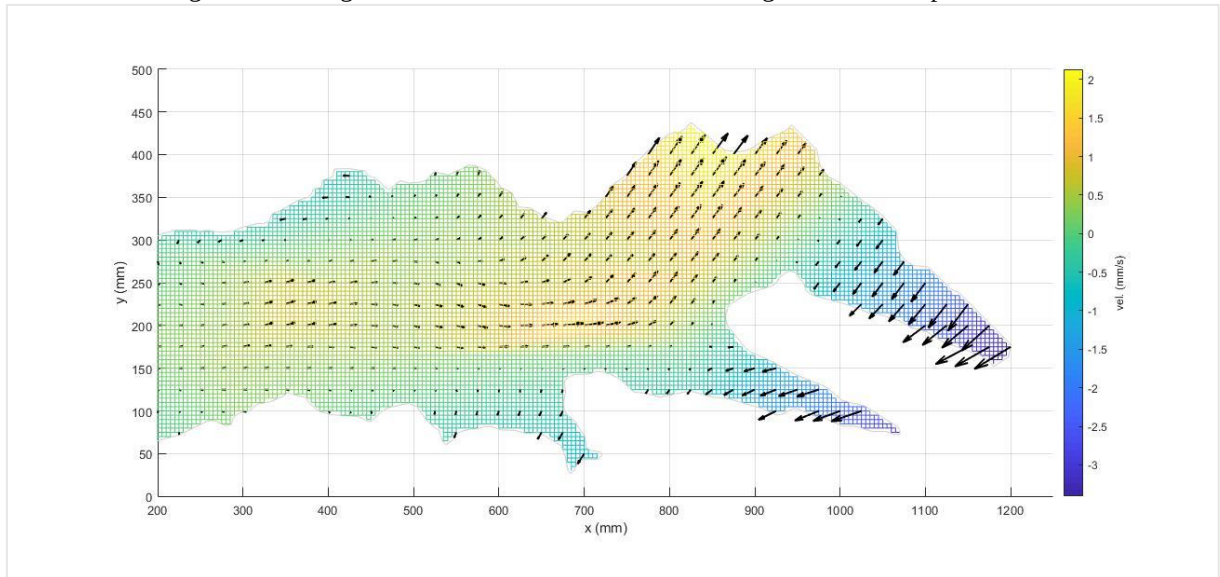
Figura 27- Plotagem de vetores velocidade em quatro instantes para o ensaio de vazão alta, vetores com coordenadas esparsas



Fonte: Extração do software em desenvolvimento pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – UEPG – 2024 – Disciplina Elementos de Gerenciamento em Recursos Hídricos.

Com a Figura 27 percebe-se a formação mais compacta do tubo de corrente, havendo aparentemente, um arraste mais intenso da corrente principal provocando um curto-circuito em direção ao sumidouro. No entanto, ao analisar a interpolação para as bordas, como se mostra na Figura 28 nota-se a manutenção das recirculações nas reentrâncias das margens e intensificação das velocidades negativas.

Figura 28- Plotagem de vetores velocidade em malha regularizada e mapa de cores

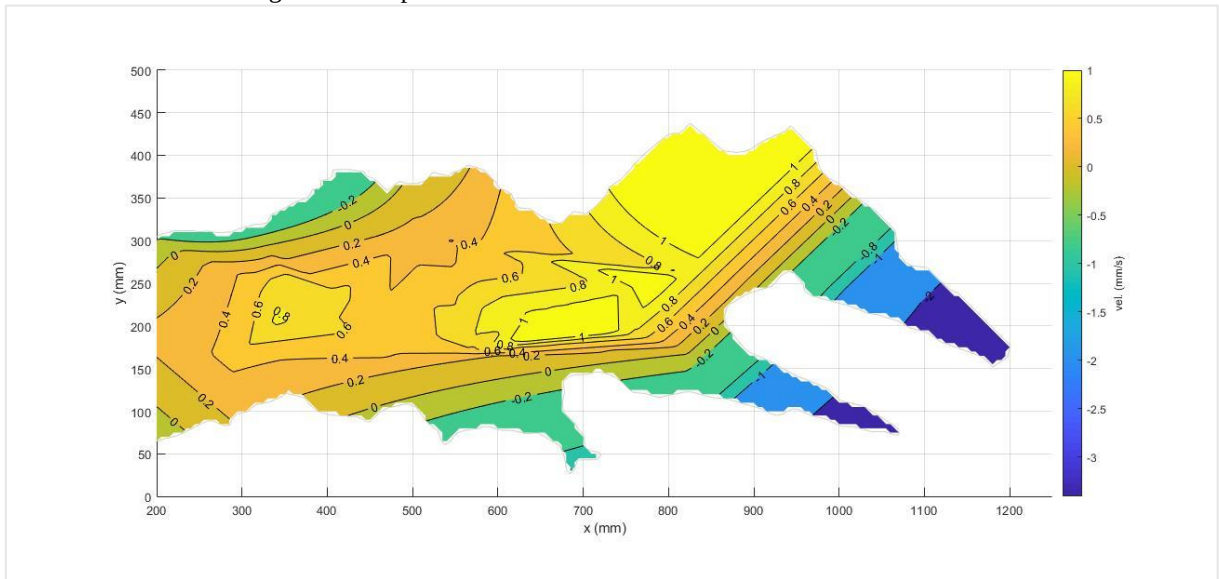


Fonte: Extração do software em desenvolvimento pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – UEPG – 2024 – Disciplina Elementos de Gerenciamento em Recursos Hídricos.

Com a Figura 29 mostra-se o resultado do mapa de isolinhas de velocidades sendo nítida a expansão do tubo de corrente com velocidades iguais ou acima de 0,2 mm/s, as quais contribuem majoritariamente para a vazão de saída do modelo. Nota-se no circuito longitudinal do modelo, em seu eixo mediano, a aceleração, a desaceleração e retorno à aceleração que, a priori, se coaduna com os contornos do reservatório.

Interessante notar que neste ensaio não ocorreu recirculação próxima ao sumidouro, havendo uma corrente com direcionamento constante à saída. Outra característica importante com o aumento das velocidades foi o refluxo intensificado que pode ser notado pelo mapa de cores nas reentrâncias e áreas periféricas no modelo onde se produzem velocidades negativas.

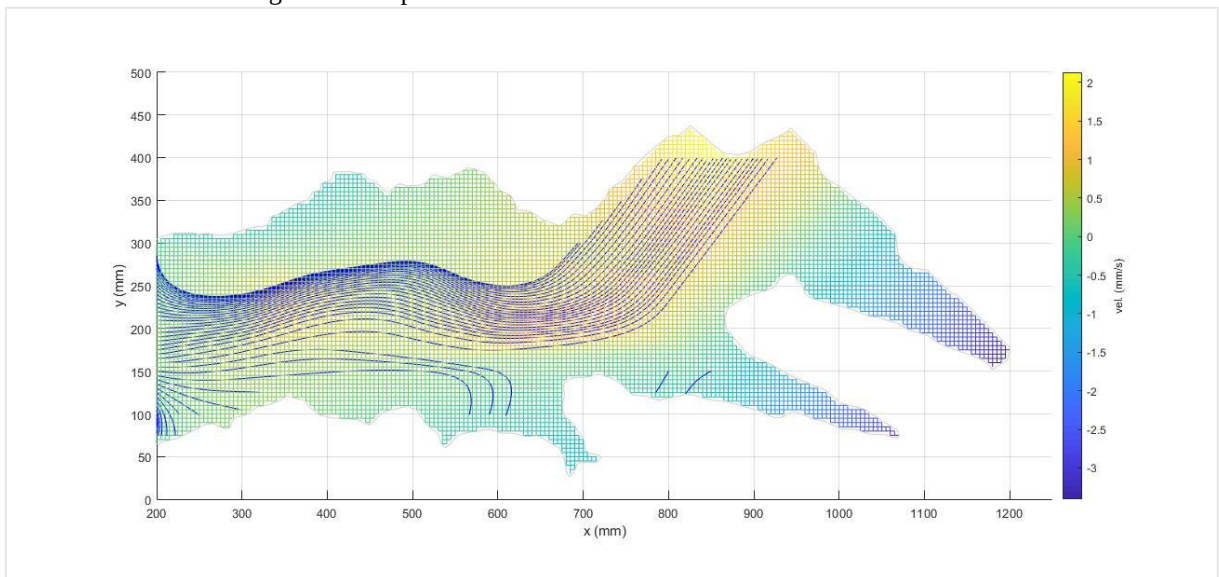
Figura 29- Mapa de isolinhas de velocidades – Ensaio de vazão alta



Fonte: Extração do software em desenvolvimento pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – UEPG – 2024 – Disciplina Elementos de Gerenciamento em Recursos Hídricos.

A poligonal fechada da velocidade 0,2 mm/s, tem uma área de 134325 mm² no modelo, correspondente a 83.953,13 m² no reservatório e perfazendo 60,47% da área da poligonal total da superfície neste ensaio.

Figura 30- Mapa de isolinhas de velocidades – Ensaio de vazão alta



Fonte: Extração do software em desenvolvimento pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – UEPG – 2024 – Disciplina Elementos de Gerenciamento em Recursos Hídricos.

No espaço do tubo de corrente, a linha de corrente mais longa, até atingir o sumidouro, possui o comprimento de 830,99 mm no modelo, correspondente a 2.073,99 m no reservatório,

uma velocidade média no seu percurso de 0,771 mm/s no modelo, correspondente a 0,0386 m/s no reservatório e levando o tempo de 1.077,04 segundos para cumprir o percurso no modelo o que corresponde a 14,96 horas no reservatório.

Nesse espaço, a linha de corrente mais curta, até atingir o sumidouro, possui o comprimento de 683,17 mm no modelo, correspondente a 1.707,92 m no reservatório, uma velocidade média no seu percurso de 0,754 mm/s no modelo, correspondente a 0,0377 m/s no reservatório e levando o tempo de 906,06 segundos para cumprir o percurso no modelo o que corresponde a 12,58 horas no reservatório.

No espaço do tubo de corrente, principal meio da extravazão do reservatório, por extração de dados de cada linha de corrente, o tempo de permanência médio das partículas no corpo hídrico, extrapolado por similitude ao reservatório é de 13,72 horas.

4.3 DISCUSSÃO COMPARATIVA

Ambos os ensaios apresentaram coerência entre seus resultados relacionados às velocidades e a distribuição no espaço. Considerando que não houve variação do nível da água entre os ensaios, um incremento de vazão de 0,035 mL/s (ensaio de vazão moderada) para 0,065 mL/s (ensaio de vazão alta), correspondente a 185,71%. O acréscimo de vazão resultou em um incremento da velocidade média de 0,335 mm/s para 0,633 mm/s, 188,96%, mantidas as seções transversais constantes.

Decorrente das distribuições das velocidades no espaço, verificou-se que o ensaio de alta vazão apresenta maior abrangência superficial no escoamento para a formação da vazão. Nesta análise, uma contribuição de velocidades propositivas para a vazão, considerada em comum, uma velocidade igual ou superior a 0,2 mm/s em ambos os ensaios, abrangendo no ensaio de vazão moderada uma área superficial de 115425 mm² e no ensaio de vazão alta uma área superficial de 134325 mm², 116,37%. Para analisar a coerência desses números deve-se considerar a seção transversal, que apesar de fixa para o escoamento total quando associada a ambos os ensaios, cresce para a porção do escoamento com as maiores velocidades do primeiro ensaio para o segundo.

Os tempos médios de detenção hidráulica, extrapolados para o reservatório, no primeiro ensaio de 25,15 horas e no segundo ensaio de 13,72 horas resultam em 54,55% de decréscimo de um ensaio para outro. A detenção hidráulica comparativa, na proporção inversa à velocidade média que apresenta uma razão inversa de 56,08% também confere uma avaliação de coerência de resultados. No cálculo da vazão em proporção inversa, esse percentual atinge 53,84%.

As pequenas diferenças entre os índices calculados, além de outras eventuais interferências, podem estar associadas a um fator preponderante: A profundidade do escoamento e a distribuição das velocidades na terceira dimensão.

Considera-se a possibilidade de formulação de estudos específicos futuros para ponderar a influência da profundidade por meio da variação de nível entre ensaios ou de flutuadores com base parcialmente submersa, porém, avalia-se neste momento que a variação da velocidade com a profundidade não é expressiva e que uma calibração da distribuição das velocidades nas seções transversais poderá ser feita por modelagem matemática.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Velocimetria por Imagens de Partículas ou a Velocimetria por Rastreamento de Partículas são tecnologias reconhecidas mundialmente e se caracterizam pela precisão milimétrica na obtenção de dados de posicionamento real de elementos de interesse por processamento de imagens. Quanto aos valores, coordenadas, deslocamentos, velocidades, distâncias, instantes e variáveis envolvidas não existe nesse trabalho, fator de dúvida.

Considerando o aspecto de introdução desta metodologia em um modelo altamente reduzido e as particularidades que se apresentam em sua execução, as questões principais, ainda a serem investigadas, consistidas ou desenvolvidas são:

- Análise da terceira dimensão;
- Implementação das rotinas que possibilitem a repetição de ensaios de forma automatizada, as quais, neste trabalho, estão em fase de desenvolvimento envolvendo muitas operações em planilhas auxiliares e transferências manuais, prejudicando a agilidade de consistir resultados e repetição de ensaios;
- Melhorias na execução do modelo, com alguns dispositivos para alimentação e extravasão que evitem aparecimento de turbulência, elemento que foi comum na saída da distribuição de alimentação;
- Eliminar a defasagem na distribuição da alimentação ao longo do seu eixo;
- Eliminar a aglomeração de flutuantes na saída com inclusão no modelo de um canal de fuga;
- Determinação do nível de confiabilidade das respostas quando um valor medido em modelo é extrapolado para o real, função de importância fundamental que só poderá ser consistida quando se efetuarem extrações do modelo confrontadas com medições diretas no reservatório real.

São restrições implícitas da modelagem aqui introduzida, o corpo da água isento de turbulência de qualquer origem, sem precipitação pluviométrica direta ou de contribuições de afluentes laterais. Essas condições, a princípio, não podem ser reproduzidas propriamente no modelo.

Com os resultados deste trabalho, será expandido a metodologia para o volume, não só superfície. Além da verificação de conformidades e a viabilidade da aplicação, os estudos serão aprimorados e estendidos à toda área do manancial em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Leila Nalis Paiva da Silva et al. **Implicações nas variáveis hidrodinâmicas com a construção da usina hidrelétrica Colider, Mato Grosso.** Geográfica, p. 1181. Ciência Geográfica - Bauru - XXIV - Vol. XXIV- (3): Janeiro/ Dezembro - 2020

BASTOS, R. K. X. **Impactos da construção de centrais hidrelétricas relacionados com a água: pressupostos para a avaliação e proposição de medidas mitigadoras.** In: Simpósio Brasileiro de pequenas e médias centrais hidrelétricas, 1998, Poços de Caldas. **Anais:**São Paulo: CMGB, 1998. p.63-75.

BRASIL. **Lei n. 9433 de 08 de janeiro de 1997.** Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 1997.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Consultoria Jurídica. **Lei Nº 14.066.** Brasília, 2020
Clima Ponta Grossa: Temperatura, Tempo e Dados climatológicos Ponta Grossa.
Disponível:<<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/parana/ponta-grossa-4493/#climate-graph>>. Acesso em: 9 dez. 2023.

Castro, S.I. Misawa, T.J. Ota, J. J. **Aplicação de modelagens física e computacional em ensaio de desvio de rio.** In: Anales del xxx congreso latinoamericano de hidráulica 2022 - Volúmen 1 - mecánica de los fluidos e hidráulica fundamental p 126-134.

CRUZ, C.H.; FABRIZY, N. L. P. **Impactos ambientais de reservatórios e perspectivas de uso múltiplo.** Revista Brasileira de Energia, v. 4, n. 1, 1995.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos.** 2º edição revisada, São Paulo: Pearson Prentice Hall 2008.

COPEL – Companhia Paranaense de Energia. **Monitoramento hidrológico – Alagados.**
Disponível em: <https://www.copel.com/site/copel-geracao/monitoramento-hidrologico/>
Acesso em 01 de julho de 2024.

DE LEMOS, Clarice Farian et al. **Assoreamento da represa de alagados pela contribuição de sedimentos da bacia hidrográfica do alto curso do Rio Pitangui/PR.** Geosciences= Geociências, v. 33, n. 4, p. 549-557, 2014.

LEHNER, Bernhard et al. **High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management.** Frontiers in Ecology and the Environment, v. 9, n. 9, p. 494-502, 2011.

LOPARDO, Nicolas. **Estudo hidrodinâmico e correlação com sólidos suspensos e turbidez na Lagoa Itapeva do litoral norte do estado do Rio Grande do Sul.** 2002.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica.** EESC USP – PROJETO REENGE, 2º Edição São Carlos, SP, 2001

ROSMAN, P. C. C.; 2011. **Referência Técnica do SISBAHIA – Sistema base de hidrodinâmica ambiental,** Programa COPPE: Engenharia Oceânica, Área de Engenharia

Costeira e Oceanografica, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/>. Acesso em: 9 dez. 2023.

SCHAFRANSKI, A. P. N. **Avaliação dos processos de floculação em escala de bancada Jar test para tratamento convencional e com injeção de micro areia utilizando processamento digital de imagens**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2023. Disponível em: <https://tede2.uepg.br/jspui/handle/prefix/3869> Acesso em 01 de julho de 2024.

SOTELO, G. **Hidráulica General**. Vol 1 Fundamentos. 15º Edição. Balderas: Grupo Noriega Editores, 1994.

Takeda, R,S, O; Ota,J,J (2024) **Impacto de ressalto hidráulico sobre a viga inferior de comportas em vertedouros afogados por jusante**. In:Encontro nacional de engenharia de sedimentos p.1-8