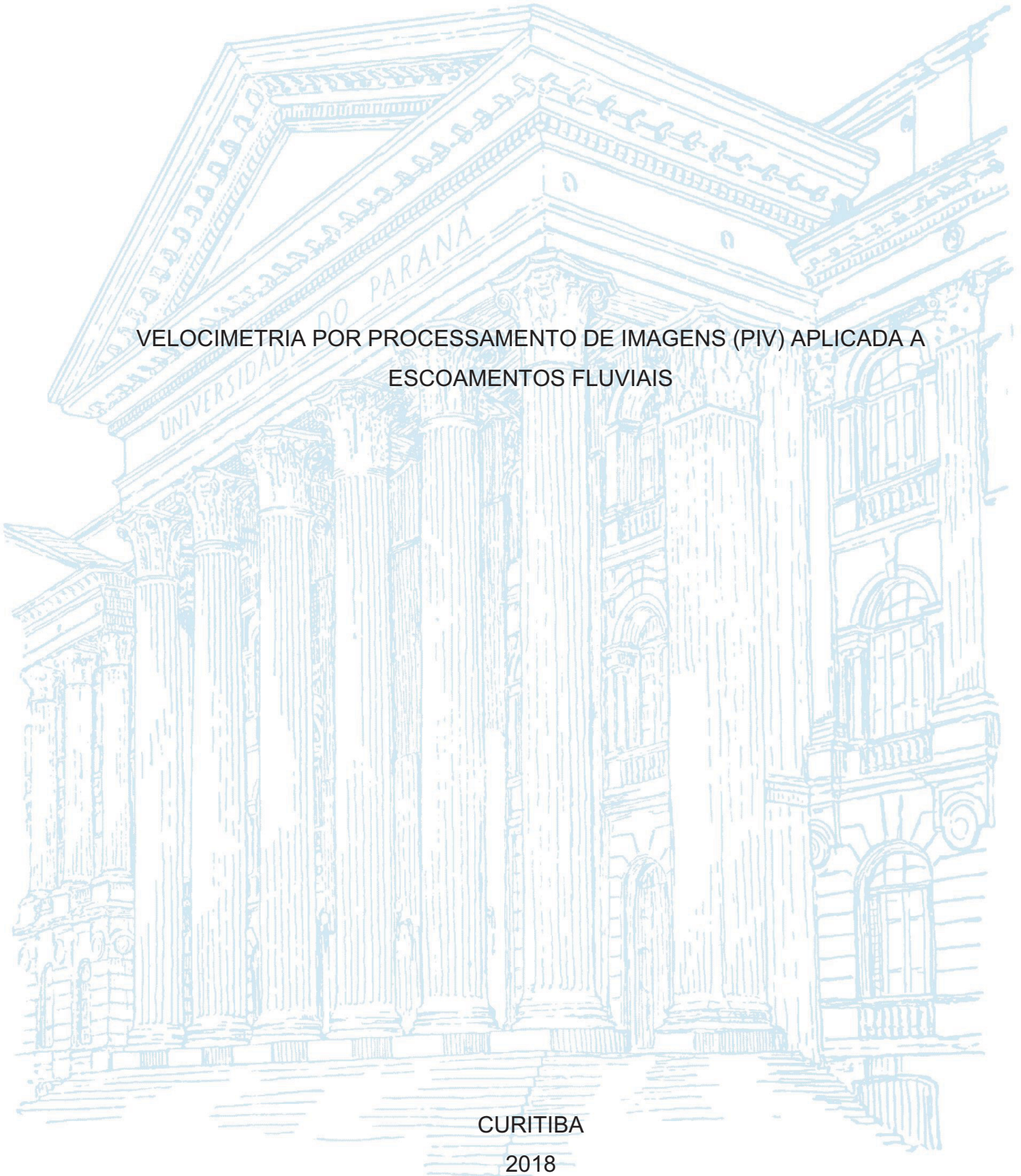


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

IVERSON ITALO SIEBERT

VELOCIMETRIA POR PROCESSAMENTO DE IMAGENS (PIV) APLICADA A  
ESCOAMENTOS FLUVIAIS



CURITIBA

2018

IVERSON ITALO SIEBERT

VELOCIMETRIA POR PROCESSAMENTO DE IMAGENS (PIV) APLICADA A  
ESCOAMENTOS FLUVIAIS

Dissertação apresentada como requisito parcial ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Michael Mannich

Coorientador: Prof. Dr. Tobias B. Bleninger

CURITIBA

2018

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

---

- S571v Siebert, Iverson Italo  
Velocimetria por processamento de imagens (PIV) aplicada a escoamentos  
fluviais / Iverson Italo Siebert. – Curitiba, 2018.
- Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental,  
2018.
- Orientador: Michael Mannich  
Coorientador: Tobias Bernward Bleninger
1. Processamento de imagens. 2. Hidráulica. 3. Escoamento. Universidade  
Federal do Paraná. II. Mannich, Michael. III. Bleninger, Tobias Bernward. IV.  
Título.

CDD: 621.20424

---

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928

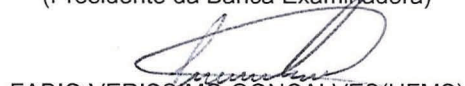
## TERMO DE APROVAÇÃO

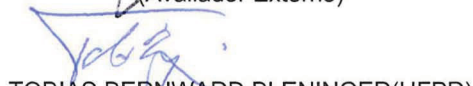
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **IVERSON ITALO SIEBERT**, intitulada: "**VELOCIMETRIA POR PROCESSAMENTO DE IMAGENS (PIV) APLICADA A ESCOAMENTOS FLUVIAIS**", após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de Mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 04 de Outubro de 2018.

  
MICHAEL MANNICH(UFPR)  
(Presidente da Banca Examinadora)

  
FABIO VERÍSSIMO GONÇALVES(UFMS)  
(Avaliador Externo)

  
TOBIAS BERNWARD BLENINGER(UFPR)  
(Avaliador Interno)

  
FERNANDO OLIVEIRA ANDRADE(UFPR)  
(Avaliador Interno)

  
ANDRE LUIZ TONSO FABIANI(UFPR)  
(Avaliador Interno)

## AGRADECIMENTOS

Em especial para meus pais, Ivo Siebert e Celina Borille Siebert, que sempre me apoiaram e seguraram a barra quando precisei.

Ao meu amigo e orientador Prof. Dr. Michael Mannich que com bom humor e irreverência de sempre constatará que estas páginas impressas também ficarão amareladas com o tempo. Ao meu coorientador Prof. Dr. Tobias Bleninger, pelo entusiasmo nesta pesquisa. A todos os professores do PPGERHA que ajudaram a embasar o conhecimento necessário para crescer.

Aos amigos e companheiros que fiz no PPGERHA durante estes três anos de caminhada que, com certeza, tornaram o trabalho muito mais leve. Em especial para minha amiga e parceira Andréia Pedroso, com quem pude compartilhar calculadora, disciplinas, listas, trabalhos, papel monolog, cafés e até mesmo o orientador, mas principalmente por ser exemplo de garra e dedicação. Para Kássia Regina Bazzo, pelos momentos filosóficos compartilhados, pois sabemos o que acontece no final. Para Elisa Stefan, por me mostrar que as pessoas podem ser diferentes. Para Karol Richter, por não desistir nunca do que quer. Para os colegas mais recentes, a turma da salinha, Alex, Bruna, “Juzinha”, Michel, Jean, Taiane, Anna Carol, “Juzona”, que além de alegrar meus dias, compartilhar cafés e almoços no RU, me mostraram que sou capaz de fazer um bolo. Ao João Mine, que chegou por último prá tirar minha cadeira e me mostrar que as pessoas podem ser diferentes (ou não).

Ao meu amigo e incentivador, Cesar Jhoji Yoshizawa, por ter me feito acreditar que nunca é tarde pra começar.

Aos funcionários e amigos do CEHPAR, que com profissionalismo e dedicação supriram todas as necessidades relacionadas ao modelo físico e me acolheram em todos os “cafés com bobagens” e “fomes zero”. Em especial ao trio parada dura da “Maretec”, Ronaldo, Roberto e Eloir. Ao pessoal da oficina, Marcos e Jader. Aos pesquisadores Carlos e Take, que me ajudaram nas tarefas mais dispendiosas. Ao Valdinei “Sabe”, que sempre esteve por perto auxiliando nas tarefas mais diversas. Por último, em especial, para quem viabilizou todo o estudo e envolvimento construído nestes anos dentro do CEHPAR, Fernando Ribas Terabe. A Construtora Triunfo S. A., por ter contribuído com a pesquisa, concedendo a utilização do modelo reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop.

A CAPES, por ter investido nesta pesquisa.

A Deus, por sempre brincar de embaralhar as cartas do destino só pra ver no que vai dar!

*“... o relógio de areia indica que o tempo  
corre mais depressa que seu próprio pó ...”  
(autor desconhecido)*

## RESUMO

Para o estudo proposto, utilizou-se a técnica de velocimetria por processamento de imagens de partículas para grandes escalas (LS-PIV), que consiste no registro fotográfico da superfície do escoamento onde previamente se adicionou traçadores flutuantes. O deslocamento de grupos de traçadores é obtido a partir da comparação de fotos sequenciais e, conhecendo-se o tempo de registro das imagens, obtém-se a velocidade superficial do escoamento. A técnica foi aplicada diretamente às obras hidráulicas do modelo reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop. Para definição do método foram realizados testes exploratórios onde foram ajustadas as configurações da imagem, o sistema de iluminação, a calibração das velocidades, os parâmetros do *software* de processamento de imagens e foram escolhidos os traçadores. Após a definição do método foi realizado um estudo detalhado das relações existentes entre o tipo da partícula traçadora e os ajustes de resolução espacial do programa de correlação estatística. Este esforço resultou na validação do método a partir do levantamentos de velocidades realizados em duas seções localizadas na área de aproximação do vertedouro. Os parâmetros e procedimentos operacionais validados foram utilizados para caracterização do escoamento em três áreas do modelo reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop: área de aproximação do vertedouro, canal de fuga do circuito de geração e região de entorno da ensecadeira de proteção por jusante. Como resultados, foram obtidos, para estas regiões, os campos de velocidades superficiais, as representações das linhas de corrente, os padrões de vorticidade e divergência e um resumo dos valores mínimos, médios e máximos das variáveis hidráulicas em função da área total do levantamento. A representação do resultado em formato gráfico quantitativo permitiu a verificação dos traçados predominantes do fluxo, das regiões de recirculação, das áreas de estagnação e separação do escoamento, de regiões de intensa turbulência e até mesmo a visualização da área de ressurgência proveniente da vazão turbinada. A técnica de LS-PIV se mostrou bastante eficiente no levantamento dos campos de velocidades relacionados ao escoamento presente nas obras hidráulicas do modelo reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop.

**Palavras-chaves:** LS-PIV. Modelo Reduzido. Escoamentos Fluviais.

## ABSTRACT

The proposed study comprises the large-scale particle image velocimetry technique (LS-PIV) application, which consists of the photographic record of the floating tracer observed onto the water surface. The displacement of groups of tracers is obtained from the comparison of sequential photos and, regarding the respective recording times, the superficial velocity of the flow is calculated. The technique was applied directly to the hydraulic works of the Sinop Hydroelectric Plant scale model. To define the method, exploratory tests were performed, where image settings, lighting system, speed calibration, the parameters of image processing software were set, and the tracers were chosen. After the method definition, a detailed study regarding the relationship between the tracer type and the spatial resolution settings of the statistical correlation program was carried out. This analysis resulted in the validation of the method from the velocity site surveys performed in two sections located in the spill approach area. The validated parameters and operational procedures were used to the flow characterization in three areas of the Sinop Hydroelectric Power Plant scale model: the spillway approaching area, the generation outlet channel and the downstream cofferdam surrounding areas. Consequently, the fields of surface velocities, the streamline representations, the vorticity and divergence patterns were reached for these regions. In addition, a summary of minimum, average and maximum values of hydraulic variables as a function of the area was delivered. The graphical representation of the quantitative result allowed the verification of flow predominant streamlines, recirculation regions, stagnation areas and flow splits, intense turbulence regions. As an unexpected result, the graphical representation provides the visualization of the resurgence flow area in the outlet channel. Thus, LS-PIV technique proved to be an effective tool in the hydraulic field surveying applied to Sinop Hydroelectric Power Plant scale model.

**Key-words:** LS-PIV. Reduced Hydraulic Model. Rivers Flows.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Medidor mecânico de velocidade de escoamento - Molinete . . . . .	26
FIGURA 2 – Medidor eletromagnético . . . . .	27
FIGURA 3 – Medidor acústico - ADCP . . . . .	28
FIGURA 4 – Densidade de partículas . . . . .	30
FIGURA 5 – Representação esquemática da técnica PIV . . . . .	32
FIGURA 6 – Sensor eletrônico CMOS . . . . .	39
FIGURA 7 – Sincronização de equipamentos eletrônicos . . . . .	40
FIGURA 8 – Mapa do coeficiente de correlação, $R$ , para correlação cruzada . . . . .	42
FIGURA 9 – LS-PIV – módulo móvel em tempo real . . . . .	48
FIGURA 10 – LS-PIV com utilização de drone (UAV) . . . . .	49
FIGURA 11 – Experimento de LS-PIV em canal de laboratório . . . . .	50
FIGURA 12 – Configuração geral do modelo reduzido – vista de montante . . . . .	53
FIGURA 13 – Configuração geral do modelo reduzido – vista de jusante . . . . .	53
FIGURA 14 – Equipamentos de operação do modelo reduzido . . . . .	54
FIGURA 15 – Configuração geral do modelo . . . . .	55
FIGURA 16 – Equipamentos de iluminação . . . . .	56
FIGURA 17 – Partículas traçadoras proveniente de materiais plásticos . . . . .	58
FIGURA 18 – Partículas traçadoras de uso corrente do CEHPAR . . . . .	59
FIGURA 19 – Medidores de velocidades pontuais do CEHPAR . . . . .	60
FIGURA 20 – Local de aplicação da técnica de LS-PIV – ENSAIO 01 . . . . .	62
FIGURA 21 – Pontos de monitoramento de velocidades – ENSAIO 01 . . . . .	62
FIGURA 22 – Preparativos para o ENSAIO 01 . . . . .	63
FIGURA 23 – Execução de teste do ENSAIO 01 . . . . .	64
FIGURA 24 – Representação esquemática da placa de calibração de velocidades . . . . .	65
FIGURA 25 – Utilização do gabarito de calibração de velocidade . . . . .	66
FIGURA 26 – Medição pontual de velocidade com micromolinete . . . . .	67
FIGURA 27 – Gabarito de referência de posição para medição pontual de velocidade . . . . .	68
FIGURA 28 – Equipamentos de medição pontual de velocidades . . . . .	68
FIGURA 29 – Verificação de ortogonalidade de imagem . . . . .	69
FIGURA 30 – Local de extração de resultados – ENSAIO 01 . . . . .	72
FIGURA 31 – Características do escoamento no canal de fuga do circuito de geração . . . . .	73
FIGURA 32 – Sistema de controle de nível/vazão . . . . .	75
FIGURA 33 – Preparação do ENSAIO 02 . . . . .	75

FIGURA 34 – Local de extração de resultados – ENSAIO 02 . . . . .	76
FIGURA 35 – Vista geral da região de jusante das estrutura de desvio de segunda fase do rio . . . . .	77
FIGURA 36 – Ensecadeira de jusante de desvio do rio . . . . .	78
FIGURA 37 – Configuração final da ensecadeira de jusante da margem direita .	79
FIGURA 38 – Ensecadeiras de jusante para desvio de segunda fase . . . . .	79
FIGURA 39 – Locais de extração de resultados – ENSAIO 03 . . . . .	80
FIGURA 40 – Fluxograma de resultados – Validação do método de LS-PIV . . .	83
FIGURA 41 – Velocidades médias por LS-PIV – Seção 01 . . . . .	84
FIGURA 42 – Melhores leituras de velocidades médias por LS-PIV – Seção 01	87
FIGURA 43 – Velocidades médias por LS-PIV – Seção 02 . . . . .	88
FIGURA 44 – Melhores leituras de velocidades médias por LS-PIV – Seção 02	90
FIGURA 45 – Aglomeração de partículas traçadoras . . . . .	93
FIGURA 46 – Aglomeração dos traçadores – Seção 02 . . . . .	93
FIGURA 47 – Ausência de partículas traçadoras . . . . .	94
FIGURA 48 – Ausência de traçadores – Teste CP-3A / Seção 01 / Config. 01 . .	95
FIGURA 49 – Resolução da janela de interrogação . . . . .	96
FIGURA 50 – Resultados para diferentes resoluções – CG-1A / Seção 01 . . .	96
FIGURA 51 – Interferências causadas por estruturas hidráulicas . . . . .	97
FIGURA 52 – Aglomeração de partículas traçadoras . . . . .	98
FIGURA 53 – Área de caracterização hidráulica – LS-PIV . . . . .	99
FIGURA 54 – Gráfico de dispersão – componentes <b>u</b> e <b>v</b> da velocidade . . . . .	100
FIGURA 55 – Campo vetorial e magnitude do campo de velocidades . . . . .	101
FIGURA 56 – Campos de velocidades – PIVLab . . . . .	102
FIGURA 57 – Linhas de corrente – PIVLab . . . . .	103
FIGURA 58 – Outros resultados – PIVLab . . . . .	104
FIGURA 59 – Características gerais da região do canal de fuga . . . . .	105
FIGURA 60 – Aglomeração no canal de fuga – Confetes pequenos . . . . .	106
FIGURA 61 – Exemplo de quadro – LS-PIV . . . . .	107
FIGURA 62 – Gráfico de dispersão – Ensaio 02 . . . . .	108
FIGURA 63 – Ajuste de vetores espúrios . . . . .	109
FIGURA 64 – Linhas de corrente e campo vetorial . . . . .	110
FIGURA 65 – Campos de velocidade instantâneos – Ensaio 02 . . . . .	111
FIGURA 66 – Vorticidade . . . . .	112
FIGURA 67 – Divergência . . . . .	113
FIGURA 68 – Aglomeração em áreas de estagnação – Confete pequeno . . . . .	114
FIGURA 69 – Configurações do teste – Parâmetros do PIVLab . . . . .	115
FIGURA 70 – Gráfico de dispersão – Ensaio 03 . . . . .	116
FIGURA 71 – Linhas de corrente e campo vetorial . . . . .	117

FIGURA 72 – Campos de velocidade médio – Ensaio 03 . . . . .	118
FIGURA 73 – Resultados auxiliares . . . . .	119
FIGURA A.1–Limpeza do modelo reduzido . . . . .	129
FIGURA A.2–Vedação e pintura do modelo reduzido . . . . .	130
FIGURA A.3–Estruturas de apoio . . . . .	131
FIGURA A.4–Suporte articulado da câmera digital . . . . .	131
FIGURA B.1–Locais para aplicação do LS-PIV . . . . .	133
FIGURA B.2–Ensaio exploratório: $Q = 3.008,0 \text{ m}^3/\text{s}$ no protótipo . . . . .	135
FIGURA B.3–Ensaio exploratório: $Q = 1.000,0 \text{ m}^3/\text{s}$ no protótipo . . . . .	136
FIGURA B.4–Ensaio exploratório: $Q = 1.000,0 \text{ m}^3/\text{s}$ no protótipo . . . . .	136
FIGURA B.5–Pontos de medição de velocidade - Montante . . . . .	137
FIGURA B.6–Medida de referência linear para o programa PIVlab . . . . .	138
FIGURA B.7–Placa de calibração - Montante . . . . .	139
FIGURA B.8–Placa de calibração - Jusante . . . . .	139
FIGURA B.9–Interferência luminosa no modelo . . . . .	141
FIGURA D.1–Seleção de imagens sequenciais . . . . .	146
FIGURA D.2–Janelas de configuração dos parâmetros de análise . . . . .	147
FIGURA D.3–Visualização prévia dos parâmetros de análise . . . . .	147
FIGURA D.4–Calibração da velocidade . . . . .	148
FIGURA D.5–Validação de vetores – Gráfico de dispersão . . . . .	149
FIGURA D.6–Validação de vetores – Eliminação manual de vetores espúrios . . . . .	150
FIGURA D.7–Visualização de resultados . . . . .	151
FIGURA D.8–Janelas de configuração – Visualização de resultados . . . . .	151
FIGURA D.9–Extração de resultados por seção . . . . .	152
FIGURA D.10–Extração de resultados por área . . . . .	153
FIGURA D.11–Análises estatísticas . . . . .	154
FIGURA E.1–Características do entorno da Seção 01 . . . . .	155
FIGURA E.2–Velocidades pontuais - Seção 01 . . . . .	156
FIGURA E.3–Características do entorno da Seção 02 . . . . .	157
FIGURA E.4–Velocidades pontuais - Seção 02 . . . . .	158
FIGURA E.5–Profundidades de medição de velocidades . . . . .	160
FIGURA E.6–Perfil vertical de velocidades – Ponto P16 . . . . .	161
FIGURA F.1 – Padrões de intensidade de densidade para confetes grandes . . . . .	163
FIGURA F.2 – Padrões de intensidade de densidade para confetes pequenos . . . . .	163
FIGURA H.1–Ortogonalidade das imagens dos testes do Ensaio 01 . . . . .	170
FIGURA H.2–Verificação da ortogonalidade da imagem – Ensaio 02 . . . . .	171

FIGURA H.3—Verificação da ortogonalidade da imagem – Ensaio 03 . . . . . 172

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Partículas traçadoras para escoamento líquido . . . . .	36
TABELA 2 – Partículas traçadoras para escoamento gasoso . . . . .	36
TABELA 3 – Características de <i>Laser</i> para aplicação da técnica PIV . . . . .	37
TABELA 4 – Programas computacionais para aplicação da técnica PIV . . . . .	43
TABELA 5 – Parâmetros auxiliares para caracterização do escoamento . . . . .	44
TABELA 6 – Equipamentos do sistema de iluminação . . . . .	56
TABELA 7 – Características gerais da câmera digital e arquivo de saída . . . . .	57
TABELA 8 – Materiais para partículas traçadoras . . . . .	58
TABELA 9 – Medidores de velocidades convencionais disponibilizados pelo CEHPAR . . . . .	59
TABELA 10 – Configuração hidráulica de operação para o ENSAIO 01 (valores de protótipo) . . . . .	61
TABELA 11 – Resolução da janela de interrogação – Algoritmo PIV . . . . .	71
TABELA 12 – Nomenclatura dos testes do Ensaio 01 . . . . .	72
TABELA 13 – Configuração hidráulica de operação para o ENSAIO 02 (valores de protótipo) . . . . .	74
TABELA 14 – Configuração hidráulica de operação para o ENSAIO 03 (valores de protótipo) . . . . .	78
TABELA 15 – Intervalos de erro – Medições LS-PIV – Seção 01 . . . . .	85
TABELA 16 – Comparativo de valores de velocidades – Seção 01 . . . . .	86
TABELA 17 – Faixa de Erro – Medições LS-PIV – Seção 02 . . . . .	89
TABELA 18 – Comparativo de valores de velocidades – Seção 02 . . . . .	90
TABELA 19 – Configurações validadas para aplicação do LS-PIV . . . . .	92
TABELA 20 – Configurações do teste – Ensaio 01 . . . . .	99
TABELA 21 – Resultados numéricos . . . . .	104
TABELA 22 – Configurações do teste – Ensaio 02 . . . . .	107
TABELA 23 – Resultados numéricos – Ensaio 02 . . . . .	113
TABELA 24 – Configurações do teste – Ensaio 03 . . . . .	115
TABELA 25 – Resultados numéricos – Ensaio 03 . . . . .	119
TABELA B.1 – Configuração hidráulica de operação da usina (valores de protótipo)	132
TABELA B.2 – Materiais para partículas traçadoras . . . . .	134
TABELA E.1 – Velocidades pontuais da Seção 01 . . . . .	156
TABELA E.2 – Velocidades pontuais da Seção 02 . . . . .	158
TABELA E.3 – Levantamento de velocidades – perfil vertical . . . . .	160

TABELA F.1 – Faixa percentual de preenchimento dos padrões de densidade de partículas . . . . .	164
TABELA G1 – Seção 01 – Confetes Grandes . . . . .	166
TABELA G2 – Seção 01 – Confetes Pequenos . . . . .	167
TABELA G3 – Seção 02 – Confetes Grandes . . . . .	168
TABELA G4 – Seção 02 – Confetes Pequenos . . . . .	169
TABELA H1 – Erros relativos percentuais – verificação de ortogonalidade . . . .	171

## LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

*fps frames per second*

*px pixel*

**ABS** Acrilonitrila Butadieno Estireno

**ADC** *Acoustic Digital Current Meter*

**ADCP** *Acoustic Doppler Current Profiler*

**ADV** *Acoustic Doppler Velocimeter*

**CCD** *Charged Coupled Device*

**CEHPAR** Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza

**CMOS** *complementary metal-oxide-semiconductor*

**CW** *Continuous Wave*

**DPIV** *Digital Particle Image Velocimetry*

**FFT** Transformada Rápida de Fourier

**HPIV** *Holographic Particle Image Velocimetry*

**JPG** *Joint Photographics Experts Group*

**LDA** *Laser Doppler Anemometry*

**LDV** *Laser Doppler Velocimetry*

**LS-PIV** *Large Scale - Particle Image Velocimetry*

**LSV** *Laser Speckle Velocimetry*

**MLSPIV** Mobile Large Scale Particle Velocimetry

**MTV** Velocimetria por Rastreamento de Moléculas

**NMR** Ressonância Magnética Nuclear

**Nd:YAG** *neodymium-doped yttrium aluminium garnet*

**OCTO** Tomografia de Coerência Óptica

**PDV** *Particle Displacement Velocimetry*

**PE** Polietileno

**PEAD** Polietileno de Alta Densidade

**PIDV** *Particle Image Displacement Velocimetry*

**PIV** *Particle Image Velocimetry*

**PLIF** Fluorescência Induzida por *Laser* Planar

**PLV** *pulsed-light velocimetry*

**PMMA** Polimetil-Metacrilato

**PP** Polipropileno

**PTV** *Particle Tracking Velocimetry*

**RMSE** Raiz do Erro Quadrático Médio

**UAV** *Unmanned Aerial Vehicles* – Veículo Aéreo Não Tripulado

**UHE** Usina Hidrelétrica

## LISTA DE SÍMBOLOS

$x$	Coordenada $x$ do plano cartesiano (m)
$y$	Coordenada $y$ do plano cartesiano (m)
$t$	Tempo (s)
$\Delta t$	Tempo incremental(s)
$p$	Partícula (índice)
$v_{px}$	Componente $x$ da velocidade da partícula (m/s)
$v_{py}$	Componente $y$ da velocidade da partícula (m/s)
$\Delta x_p$	Deslocamento da partícula em $x$ (m)
$\Delta y_p$	Deslocamento da partícula em $y$ (m)
$u_t$	Velocidade terminal da partícula (m/s)
$d_p$	Diâmetro da partícula (m)
$\rho_p$	Densidade da partícula (kg/m <sup>3</sup> )
$\mu$	Viscosidade dinâmica do fluido (kg/(ms))
$\rho_f$	Densidade do fluido (kg/m <sup>3</sup> )
$g$	Módulo da aceleração da gravidade (m/s <sup>2</sup> )
$\tau_s$	Tempo de resposta (s)
$Ar^+$	Íon de Argônio (elemento químico)
$Cr^{3+}$	Cátion de Cromo (elemento químico)
$He$	Hélio (elemento químico)
$Ne$	Neônio (elemento químico)
$i, j$	Posição na imagem (px)
$I_1, I_2$	Matriz intensidade das imagens
$N, M$	Tamanho da área de busca (px)
$R$	Coeficiente de correlação

$\mathcal{F}$	Função da Transformada de Fourier $f(x, y)$
$I_2^*$	Matriz conjugada de $I_2$
$\omega$	Vorticidade
$h$	Taxa de cisalhamento
$e$	Taxa de deformação
$\Theta$	Divergência
$E_r$	Erro relativo percentual (%)
$E_a$	Erro absoluto (m/s)
<b>u</b>	Componente horizontal do vetor velocidade (m/s)
<b>v</b>	Componente vertical do vetor velocidade (m/s)
$V_{max}$	Velocidade máxima (m/s)
$V_{med}$	Velocidade média (m/s)
$V_{min}$	Velocidade mínima (m/s)
$Q$	Vazão (m <sup>3</sup> /s)
$H$	Altura do escoamento a partir do fundo do canal (cm)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>21</b>
1.1	OBJETIVOS	24
1.1.1	Objetivos específicos	24
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>25</b>
2.1	MEDIÇÃO DE VELOCIDADE DE ESCOAMENTO	25
2.2	VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULA (PIV)	30
2.2.1	Meio fluido em análise	33
2.2.2	Partículas traçadoras	34
2.2.3	Fontes de luz	37
2.2.4	Registro das imagens	38
2.2.5	Análise estatística das imagens digitais	40
2.2.6	Pacotes computacionais para PIV	43
2.3	EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA PIV PARA FLUIDOS	44
2.3.1	Velocimetria por imagem digital de partícula (DPIV)	45
2.3.2	Velocimetria por imagem de partícula microscópica (Micro-PIV)	45
2.3.3	Técnicas PIV para três dimensões (3D)	46
2.3.4	Velocimetria por imagem de partícula para grandes escalas (LS-PIV)	47
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>51</b>
3.1	ÁREA DE ESTUDO – MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO	52
3.2	EQUIPAMENTOS DE VÍDEO E ILUMINAÇÃO	56
3.3	PARTÍCULAS TRAÇADORAS	57
3.4	MEDIÇÃO PONTUAL DE VELOCIDADES	59
3.5	VALIDAÇÃO E APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE LS-PIV	60
3.5.1	ENSAIO 01 – Validação do método de LS-PIV	61
3.5.1.1	LS-PIV aplicado à área de aproximação do vertedouro	72
3.5.2	ENSAIO 02 – LS-PIV aplicado ao canal de fuga do circuito de geração	73
3.5.3	ENSAIO 03 – LS-PIV aplicado à estrutura de desvio de segunda fase do rio	76
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>81</b>
4.1	VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE LS-PIV	81
4.1.1	Resultados dos testes de LS-PIV – Seção 01	83
4.1.2	Resultados dos testes de LS-PIV – Seção 02	87
4.1.3	Resultado da validação do LS-PIV	91
4.1.4	Efeitos indesejados	92

4.2	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE APROXIMAÇÃO DO VERTEDOURO	98
4.2.1	Considerações iniciais – ENSAIO 01	98
4.2.2	Extração dos resultados – PIVLab – ENSAIO 01	100
4.3	CARACTERIZAÇÃO DO CANAL DE FUGA DO CIRCUITO DE GERAÇÃO	104
4.3.1	Considerações iniciais – ENSAIO 02	104
4.3.2	Configuração do resultado – ENSAIO 02	106
4.3.3	Extração dos Resultados – PIVLab – ENSAIO 02	108
4.4	CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE ENTORNO DA ENSECADEIRA DE PROTEÇÃO POR JUSANTE	114
4.4.1	Considerações iniciais – ENSAIO 03	114
4.4.2	Configuração do resultado – ENSAIO 03	114
4.4.3	Extração dos resultados – PIVLab – ENSAIO 03	116
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	119
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>121</b>

	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>124</b>
--	--------------------	------------

## **APÊNDICES** **128**

### **APÊNDICE A      PREPARAÇÃO DO MODELO** **129**

A.1	REATIVAÇÃO DO MODELO	129
A.2	SISTEMA DE FIXAÇÃO DA CÂMERA DIGITAL	130

### **APÊNDICE B      ESTUDOS PRELIMINARES** **132**

B.1	TESTES EXPLORATÓRIOS NO MODELO REDUZIDO	132
B.1.1	Verificação do desempenho das partículas traçadoras para LS-PIV	133
B.1.2	Testes para medição pontual e calibração das velocidades	137
B.2	CONCLUSÕES OBTIDAS DOS TESTES PRELIMINARES	139
B.2.1	Traçador de confete de papel	140
B.2.2	Gabarito de calibração de velocidades	140
B.2.3	Ortogonalidade da imagem formada	140
B.2.4	Iluminação	141
B.2.5	Medidor de velocidade pontual	141
B.2.6	Vazões de operação dos testes no modelo reduzido	142

### **APÊNDICE C      TRATAMENTO DE IMAGEM** **143**

C.1	PROGRAMAS PARA PRÉ-PROCESSAMENTO DE IMAGENS	143
C.1.1	FFmpeg.exe	143

C.1.2	RIVeR . . . . .	144
C.1.3	Adobe Premiere . . . . .	144
<b>APÊNDICE D PIVLAB . . . . .</b>		<b>145</b>
D.1	CARREGAMENTO DE IMAGENS . . . . .	146
D.2	PARÂMETROS DE ANÁLISE . . . . .	146
D.3	ANÁLISE DE SEQUÊNCIAS DE IMAGENS . . . . .	148
D.4	CALIBRAÇÃO DA VELOCIDADE . . . . .	148
D.5	VALIDAÇÃO DE VETORES . . . . .	149
D.6	VISUALIZAÇÃO DE RESULTADOS . . . . .	150
D.7	EXTRAÇÃO DE RESULTADOS . . . . .	152
D.8	ANÁLISES ESTATÍSTICAS . . . . .	153
D.9	ARQUIVOS DE SAÍDA DE RESULTADOS . . . . .	154
<b>APÊNDICE E MEDIÇÕES PONTUAIS DE VELOCIDADE . . . . .</b>		<b>155</b>
E.1	SEÇÃO 01 . . . . .	155
E.2	SEÇÃO 02 . . . . .	157
E.3	PERFIL DE VELOCIDADES – PONTO P16 . . . . .	159
<b>APÊNDICE F DENSIDADE SUPERFICIAL DE PARTÍCULAS . . . . .</b>		<b>162</b>
<b>APÊNDICE G TABELA GERAL – ENSAIO 01 . . . . .</b>		<b>165</b>
<b>APÊNDICE H VERIFICAÇÃO DE ORTOGONALIDADE . . . . .</b>		<b>170</b>
H.1	VERIFICAÇÃO DA ORTOGONALIDADE DAS IMAGENS – ENSAIO 01 .	170
H.2	VERIFICAÇÃO DA ORTOGONALIDADE DAS IMAGENS – ENSAIO 02 .	171
H.3	VERIFICAÇÃO DA ORTOGONALIDADE DAS IMAGENS – ENSAIO 03 .	172

## 1 INTRODUÇÃO

A medição de velocidades de escoamentos fluviais costuma ser um desafio para técnicos, pesquisadores e estudiosos das mais diversas áreas de conhecimento ligadas ao aproveitamento dos recursos hídricos, estudos hidrológicos e monitoramentos ambientais diversos. Dados de velocidade de escoamento interferem diretamente na tomada de decisões relacionadas a projetos e pesquisas desta natureza.

Inúmeras técnicas e procedimentos de campo são largamente explorados para que as medições de velocidades possam retratar corretamente o escoamento estudado. Porém, em condições adversas, tal como em eventos de cheia, numa corredeira, em aproximações de vertedouros, bacias de dissipação, tomadas d'água, em locais de difícil acesso, etc., os métodos tradicionais nem sempre se mostram muito eficientes.

Locais de medição que apresentem maiores dificuldades operacionais podem comprometer a qualidade dos dados obtidos. O risco envolvido na obtenção destes dados também cresce consideravelmente. Estes riscos podem ser desde a danificação ou perda dos equipamentos de medição até mesmo a ocorrência de acidentes que envolvam a equipe técnica.

Boa parte dos problemas operacionais para medição das velocidades de escoamentos fluviais se deve ao fato de que a maioria das técnicas de medição comumente utilizadas é invasiva/intrusiva. Desta forma, é necessária a inserção de uma sonda física no escoamento para a obtenção das leituras do equipamento.

Turnipseed e Sauer (2010) reúnem em sua obra técnicas e procedimentos de campo relacionados a todo o processo de medição de vazões e velocidades de escoamentos fluviais com o emprego dos equipamentos mais comumente utilizados. Tanto medidores de velocidades mecânicos, tais como molinetes e anemômetros, e até mesmo equipamentos modernos como ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*), que possibilitam a determinação (por efeito *Doppler*) do perfil de velocidade do escoamento, necessitam de um exaustivo trabalho de campo. Este, de forma geral, consiste em percorrer seções transversais do corpo d'água com a utilização de embarcações com técnicos e/ou equipamentos a bordo e realizar leituras em pontos e profundidades pré-determinados de forma individual.

Jodeau et al. (2008) afirmam que em condições de fluxos com altas velocidades de escoamento, profundidades elevadas e existências de grandes objetos flutuantes (troncos e detritos), o emprego de equipamentos de medição intrusivos se torna inviável para a medição de velocidades de escoamentos fluviais. Desta forma é necessário a utilização de técnicas não intrusivas devido a essas condições naturais não favoráveis

para o uso de técnicas convencionais.

Uma opção para a realização de estudos em aproveitamentos hidrelétricos e conseqüentemente a obtenção de dados de velocidade é a construção de modelos reduzidos (também chamados de modelos físicos). A utilização destes modelos possibilita a obtenção de informações hidráulicas do escoamento em um ambiente controlado de laboratório. Embora a configuração do modelo também dependa da obtenção de dados de campo para sua construção e calibração, estes levantamentos são realizados em condições favoráveis anteriormente ao início da obra hidráulica, o que facilita o processo.

A medição das velocidades do escoamento pode ser realizada de forma mais simples no modelo reduzido em virtude da própria diminuição das medidas construtivas e também devido ao ambiente preparado para facilitar a movimentação da equipe técnica em torno das várias estruturas do modelo, o que favorece a operação e manuseio dos medidores de velocidades.

Apesar destas vantagens operacionais, surgem novos problemas com a redução da escala original com relação à utilização dos medidores de velocidade convencionais. A introdução de sondas e molinetes (métodos invasivos/intrusivos) em um modelo reduzido pode causar perturbações consideráveis, descaracterizando o escoamento original, quando este apresenta profundidades na mesma ordem de grandeza das sondas dos equipamentos utilizados, fato que dificilmente ocorreria em um procedimento de campo, em escala real. Mesmo medidores de velocidade por efeito *Doppler* podem ter suas leituras comprometidas quando, em escoamentos pouco profundos, a sonda é colocada muito próxima às paredes físicas do modelo, causando fenômenos de interferência das ondas sonoras (TURNIPSEED; SAUER, 2010). Algumas áreas do modelo, como por exemplo as margens, não podem ser medidas devido à baixa profundidade da coluna de água (SONTEK/YSI, INC, 2000).

Estes problemas operacionais podem ser contornados mediante a escolha do equipamento de medição mais adequado às configurações do modelo reduzido que se deseja estudar. Existe uma grande diversidade de modelos de medidores de velocidade e tamanhos de sondas disponíveis no mercado que podem contornar problemas desta natureza. No entanto, outra característica relevante deste tipo de equipamento de medição é o fato de fornecerem apenas valores pontuais da velocidade.

Havendo a necessidade da caracterização do campo de velocidades de determinada área de estudos, faz-se necessária a medição das velocidades em inúmeros pontos distintos do escoamento, levando em conta ainda a obrigatoriedade do regime permanente. Este fato acaba se tornando um inconveniente para caracterização de regiões extensas (em campo), onde o tempo de medição tende a ser longo, e o regime de escoamento geralmente se altera antes do término da coleta de dados (GUTKOSKI,

2001).

Dentro deste contexto, há pouco mais de três décadas, com o avanço da tecnologia de fabricação de computadores e o aperfeiçoamento de novas técnicas de processamento de imagem, surgiu um novo processo para a medição de velocidade em fluidos denominada PIV (originado da língua inglesa da expressão *particle image velocimetry*), velocimetria por processamento de imagem de partícula, ou simplesmente velocimetria por imagem de partícula (GUTKOSKI, 2001).

O PIV pode ser considerado como uma classe de métodos utilizados na mecânica dos fluidos experimental para obtenção de campos instantâneos do vetor velocidade a partir da medição do deslocamento de inúmeras partículas contidas no fluido, desde que essas partículas sigam fielmente o fluxo (ADRIAN; WESTERWEEL, 2011). Para várias aplicações é necessária a adição de partículas ao fluido. O deslocamento das partículas é determinado pela comparação de dois registros subsequentes de imagens dessas partículas mediante o uso de métodos estatísticos (RAFFEL; WILLERT; KOMPENHANS, 1998).

Dentre as principais vantagens do PIV, pode-se citar o fato de não ser uma técnica intrusiva, de possibilitar a medição da velocidade de regiões extensas do escoamento e de permitir a determinação de campos instantâneos de velocidades, podendo ser considerada um grande avanço em relação às técnicas tradicionais que fornecem somente medições pontuais da velocidade (RAFFEL; WILLERT; KOMPENHANS, 1998).

Esta técnica alternativa de medição instantânea de velocidade por processamento de imagens já conta com inúmeros trabalhos de pesquisa ligados às mais diversas áreas, incluindo estudos de determinação de campos de velocidade de escoamentos fluviais, o que possibilita, a partir desta informação, a identificação de regiões de recirculação, visualização de vórtices, determinação de linhas de corrente, identificação de pontos de estagnação, além de outras variáveis relativas ao escoamento.

O processamento digital de imagens com a utilização de câmeras de vídeo de alta resolução, dispositivos de armazenamento de dados com elevada capacidade e computadores dotados de processadores de alto desempenho a um custo acessível, tornaram viáveis a transformação da visualização de escoamentos de uma técnica qualitativa para uma técnica quantitativa, com nível de exatidão comparável às modernas técnicas de medição pontuais existentes (AZEVEDO; ALMEIDA, 2002).

Dentro deste contexto, com base nas pesquisas já desenvolvidas na área de velocimetria por imagem de partículas, pretende-se aliar a robustez desta técnica não intrusiva de obtenção de campos instantâneos de velocidades à consolidada área de pesquisa voltada à modelagem física em escalas reduzidas para a caracterização da

superfície do escoamento de obras de aproveitamentos hidrelétricos.

## 1.1 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo determinar campos de velocidades superficiais de escoamentos com superfície livre mediante o uso da técnica PIV. O estudo tem como enfoque principal a obtenção de campos de velocidades de escoamentos visualizados em canais e estruturas hidráulicas de obras de aproveitamentos hidrelétricos. Adicionalmente, será verificado o padrão de turbulência para o escoamento em algumas dessas estruturas. Para tanto, será utilizado o modelo reduzido da Usina Hidrelétrica (UHE) de Sinop construído no laboratório de mecânica dos fluídos do Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR), pertencente ao Instituto LACTEC - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento.

### 1.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa consistem na aplicação direta da técnica PIV e processamento dos dados por meio do *software* PIVlab (THIELICKE; E. STAMHUIS, 2014) para alguns tipos de escoamentos em análises típicas de etapas das obras civis de aproveitamentos hidrelétricos obtidas do modelo reduzido UHE Sinop. Dentre os objetivos específicos destacam-se:

- Verificar o desempenho de algumas partículas utilizadas para a aplicação da técnica de PIV para o modelo reduzido UHE Sinop;
- Definir parâmetros do *software* PIVlab (THIELICKE; E. STAMHUIS, 2014) para a aplicação da técnica de PIV especificamente para o modelo reduzido UHE Sinop;
- Validar procedimentos e parâmetros da técnica de PIV a partir da comparação direta com as medições realizadas no modelo reduzido UHE Sinop com a utilização de medidores convencionais de velocidade;
- Determinar os campos de velocidades da região de aproximação do vertedouro do modelo reduzido UHE Sinop;
- Determinar os campos de velocidades, vorticidades e divergências para a região de jusante da casa de força do modelo reduzido UHE Sinop;
- Determinar os campos de velocidades, vorticidades e divergências das regiões de entorno das ensecadeiras construídas na etapa de desvio do rio do modelo reduzido UHE Sinop.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MEDIÇÃO DE VELOCIDADE DE ESCOAMENTO

Entre os séculos XV e XVI, Leonardo da Vinci (1452-1519) iniciou as primeiras tentativas de medição de velocidade de escoamentos fluviais da história. Seu método consistia basicamente na medição do tempo de percurso de flutuadores entre duas seções conhecidas do rio. Posteriormente, já no século XVII, Edme Mariotte (1620-1684) baseado nos conceitos de continuidade postulados por Leonardo da Vinci e nos conceitos de hidrodinâmica explanados pelo matemático Benedetto Castelli (1578-1643), aperfeiçoou a técnica dos flutuadores para, a partir da medição da velocidade de escoamento, quantificar a vazão (MALDONADO; WENDLAND; PORTO, 2015).

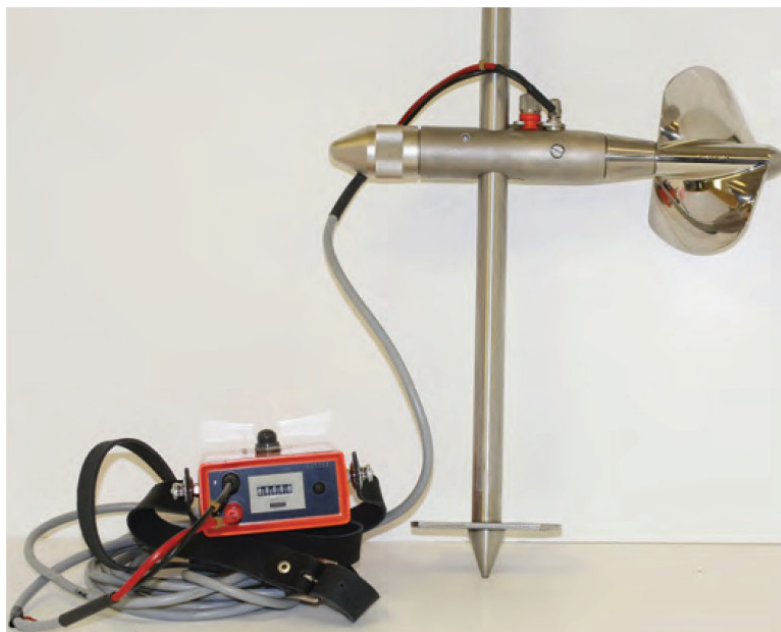
Os primeiros equipamentos destinados a medição de velocidades de fluidos tem origem no século XVIII a partir de trabalhos desenvolvidos por cientistas de renome tais como Johann Bernoulli (1667-1748), Henri Pitot (1695-1771), Giovanni Battista Venturi (1746-1822) entre outros, que, de maneira geral, mediam indiretamente a velocidade do fluido através de uma grandeza física ligada ao escoamento, tal como pressão estática e dinâmica (GUTKOSKI, 2001).

Posteriormente, surgiram outras técnicas que relacionam a velocidade pontual do fluido a sinais elétricos obtidos por efeitos mecânicos de sensores ou hélices em contato com o fluido. Exemplos de medidores deste tipo são os tubos de Pitot (dotados de sensores elétricos) e anemômetros diversos (hélice, concha, fio quente, etc.). Normalmente, estes equipamentos necessitam de calibração para diversas faixas de operação devido a não linearidade do sinal. O fato de serem intrusivos acarreta na perturbação do escoamento no próprio local da medição (GUTKOSKI, 2001).

O mais conhecido dentro desta classe de medidores mecânicos de velocidade é o molinete hidrométrico. Para medir velocidades o equipamento é dotado de um hélice e de um contador de giros. Para cada revolução da hélice do molinete, um impulso é transmitido, acionando o contador de impulsos (eletromecânico ou eletrônico) acoplado a um cronômetro de contagem regressiva. O número de rotações está relacionado com a velocidade por uma equação matemática da curva de calibração do equipamento (MALDONADO; WENDLAND; PORTO, 2015). A FIGURA 1 apresenta um medidor da marca Ott onde é possível observar esse sistema completo de medição de velocidades.

De acordo com D'Almeida Junior et al. (2010) e Santos et al. (2001), o molinete hidrométrico, a partir da medição e da integração da velocidade média na seção de um corpo hídrico, é ainda o equipamento mais usado na hidrometria de rios naturais para determinação da vazão.

FIGURA 1 – Medidor mecânico de velocidade de escoamento - Molinete



FONTE: Turnipseed e Sauer (2010)

Com o avanço da eletrônica, o surgimento de modernos sensores destinados a medir diferença de potencial elétrico, corrente elétrica, campos magnéticos, ondas sonoras, sinais ópticos entre outras propriedades físicas, proporcionaram o desenvolvimento de sofisticados métodos de medição de velocidades que, por consequência, deram origem a equipamentos com alto desempenho e precisão, amplamente empregados na hidrometria.

Turnipseed e Sauer (2010) afirmam que, dentre os diversos equipamentos desenvolvidos para medição de velocidades de fluidos a partir dos avanços tecnológicos no campo da eletroeletrônica, os medidores do tipo eletromagnéticos apresentam grande diversidade de aplicação. Estes medidores possuem vantagens em relação aos medidores mecânicos por não apresentarem partes móveis (como hélices) e fornecerem a leitura direta da velocidade. O método eletromagnético para medição de velocidade baseia-se na Lei de Faraday, na qual um condutor, no caso a água, ao atravessar um campo magnético, produz uma corrente elétrica. A partir da medição desta corrente e da distorção resultante no campo magnético, pode-se calibrar o equipamento para fornecer a velocidade pontual do fluxo. O pesquisador apresenta também variados modelos de medidores eletromagnéticos comercializados atualmente, apontando características básicas de funcionamento, limitações e vantagens. A FIGURA 2 apresenta um medidor eletromagnético da marca Ott.

A partir dos anos 80, ainda dentro do mesmo contexto de avanços tecnológicos, surgiram outros equipamentos eletrônicos de medição de velocidades, desta vez, empregando um princípio da acústica descobertos em 1842 que é baseado na mudança

FIGURA 2 – Medidor eletromagnético



FONTE: Turnipseed e Sauer (2010)

da frequência sonora em virtude do deslocamento da fonte e/ou do observador (efeito *doppler*) (GAMARO, 2008).

Turnipseed e Sauer (2010) apresentam três tipos principais de medidores acústicos de velocidade. Estes equipamentos são o ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*), o ADC (*Acoustic Digital Current Meter*) e o ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*). Apresentam características semelhantes quanto ao sistema de medição de velocidade de escoamento. A partir de emissores e receptores de sinais acústicos localizados na sonda, são medidas as diferenças de frequência sonora após esta sofrer reflexão nas partículas contidas no fluido em movimento. Desta forma, a velocidade do escoamento é obtida indiretamente pela velocidade da partícula em suspensão no fluido. A diferença básica entre estes equipamentos está na forma de manuseio e na quantidade de sensores empregados em sua fabricação. Com isso, medidores mais simples como o ADV medem apenas velocidades pontuais ligeiramente abaixo da sonda, enquanto que os outros medidores da classe acústica (ADC e ADCP) são capazes de medir as três componentes da velocidade, determinar o perfil da velocidade e a profundidade do corpo hídrico no ponto de medição. As vantagens destes tipos de medidores estão no fato de não apresentarem partes móveis, possuir alta taxa de aquisição de dados e alta precisão de leitura. Outra importante vantagem é o fato de se comportarem bem em escoamentos turbulentos e de regime não permanentes. Como desvantagens aponta-se a existência de pontos cegos de leitura (superfície, proximidade das margens e fundo), necessidade de partículas em suspensão no fluido e o alto custo de aquisição do equipamento. A FIGURA 3 apresenta o medidor acústico *Teledyne RD Instruments StreamPro ADCP* acoplado à bote específico para este modelo.

Outro dispositivo empregado na medição de velocidades de escoamento é constituído por radar de ondas eletromagnéticas. Possui princípio de funcionamento semelhante aos medidores acústicos, entretanto, os sinais emitidos neste equipamento são ondas de rádio, que da mesma forma refletem ao atingir um corpo, causando interferências nos sinais originais, o que possibilita o cálculo de velocidades entre outras

FIGURA 3 – Medidor acústico - ADCP



FONTE: Turnipseed e Sauer (2010)

propriedades deste corpo. Os equipamentos empregados na medição de velocidades de escoamentos fluviais medem apenas velocidades pontuais superficiais do fluxo, fornecendo ainda apenas uma componente da velocidade com limitada resolução espacial e temporal (MUSTE; FUJITA; HAUET, 2008).

Turnipseed e Sauer (2010) apresentam também a classe de medidores ópticos de velocidades. Consiste de um dispositivo estroboscópico projetado para medir as velocidades pontuais superficiais em canais abertos, sem a necessidade de imersão de equipamentos no fluxo. Este tipo de medidor pode ser usado principalmente nas medidas da velocidade da superfície do escoamento durante as cheias, onde é arriscado o uso de equipamento que requeiram contato com o meio fluido devido a velocidades extremamente elevadas e grande quantidade de detritos presentes no escoamento.

De acordo com Jahanmiri (2011) e Prasad (2000a), o advento do *laser* na década de 60 permitiu o desenvolvimento de técnicas não intrusivas de medição de velocidades de fluidos baseadas nesta nova tecnologia.

Uma das primeiras técnicas deste tipo foi o LDV (*Laser Doppler Velocimetry*) que correlaciona o efeito *Doppler* derivado de um pulso de *laser* para medir a velocidade de partículas que se deslocam no fluido de forma rápida e direta, com elevadas taxas de aquisição de dados e baixas incertezas sob condições controladas (GUTKOSKI, 2001).

De forma geral, as técnicas de medição de velocidades abordadas até agora tem a características comum de fornecer velocidades pontuais de escoamento (ou no

caso de alguns equipamentos de medição acústicos, fornecer o perfil de velocidades na vertical do ponto), variando grandemente em itens como quantidades de componentes de velocidades medidos, precisão, resolução temporal, resolução espacial, taxa de aquisição de dados, faixa de operação, procedimentos de medição e outras características intrínsecas à tecnologia adotada para a construção do medidor.

As medições de velocidades instantâneas de campos extensos do escoamento foram possíveis a partir do advento do *laser* e dos avanços na área da informática e da microeletrônica que propiciaram o emprego de técnicas de processamento de imagens e análise estatística de forma muito mais eficiente. Este conjunto de técnicas e procedimentos de velocimetria por imagens são conhecidos por PIV (*Particle Image Velocimetry*).

O PIV consiste na medição do deslocamento de partículas contidas no fluido entre duas imagens consecutivas com tempo pré-determinado. O seu princípio básico consiste em iluminar uma seção no interior do escoamento em dois instantes de tempo próximos (da ordem de microssegundos de intervalo entre pulsos) originalmente por meio de um plano de luz *laser* pulsada, registrando a imagem da posição das partículas traçadoras previamente distribuídas no fluido para, a partir da aplicação de algoritmos de correlação estatística, obter os vetores velocidades do plano de referência (RAFFEL; WILLERT; KOMPENHANS, 1998).

O aperfeiçoamento desta técnica deu origem a diversas aplicações, que de acordo com seu método, equipamentos e processamentos empregados, deram origem a variadas nomenclaturas, tais como, *Digital Particle Image Velocimetry* (DPIV), *Holographic Particle Image Velocimetry* (HPIV), *Particle Image Displacement Velocimetry* (PIDV), *Particle Displacement Velocimetry* (PDV), entre outras. No entanto, todas estas aplicações estão englobadas no método PIV (*Particle Image Velocimetry*) (ADRIAN, 1996).

Os avanços nas técnicas de velocimetria por imagens de partículas ocorridos nos primeiros 20 anos do surgimento do método são descritos por Adrian (2005). Neste trabalho Adrian procurou apresentar uma revisão bibliográfica onde aborda a modificação do método original até chegar as diversas variações deste e suas aplicações. Para elaboração deste estudo, o pesquisador reuniu centenas de artigos e publicações elaboradas entre 1917 e 1995 que deram origem a uma compilação de referências bibliográficas sobre os métodos de velocimetria através de imagens incluindo assuntos auxiliares dentro do contexto do método, tais como dispersão de luz por partículas, tópicos especiais em tecnologia óptica, holografia geral, imagens de partículas (ADRIAN, 1996).

De maneira geral, a abordagem técnica e matemática do método de velocimetria por processamento de imagens encontra-se disponível nos livros "Particle Image

Velocimetry - A Practical Guide” elaborado por Raffel, Willert e Kompenhans (1998) e “Particle Image Velocimetry” de Adrian e Westerweel (2011).

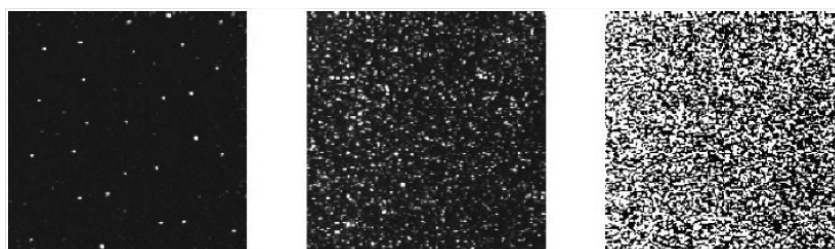
Por se tratar do método utilizado no presente estudo, será realizada uma abordagem detalhada das principais aplicações com base nos trabalhos e referências citadas por estes pesquisadores. O grande avanço deste método propiciou a publicação de inúmeros trabalhos recentes no campo de velocimetria por processamento de imagens que também serviram de referência neste estudo.

## 2.2 VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULA (PIV)

Os métodos existentes para obtenção de velocidades por imagens fazem parte de um grupo chamado *Pulsed-Light Velocimetry* (PLV), velocimetria de luz pulsada, que, de maneira geral, engloba os métodos que fazem a utilização de pulsos muito próximos de luz coerente (*laser*) no registro da posição relativa de partículas ou traçadores contidos no interior do fluido, para, a partir da medição do deslocamento destas partículas, inferir sua velocidade. Dentro deste grupo encontram-se as técnicas de Tomografia de Coerência Óptica (OCTO), de Fluorescência Induzida por *Laser* Planar (PLIF), de imageologia por Ressonância Magnética Nuclear (NMR), de Velocimetria por “Speckles” de *Laser* (LSV), de Velocimetria por Rastreamento de Partículas (PTV), de Velocimetria por Rastreamento de Moléculas (MTV) e a técnica Velocimetria por Imagem de Partícula (PIV) (ADRIAN, 1991).

Dentre as técnicas de PLV (*Pulsed-Light Velocimetry*) acima referenciadas, aquelas que utilizam materiais particulados como objeto traçador da imagem são colocadas em um sub grupo também comumente chamado de PIV. Este sub grupo engloba os métodos: LSV (*Laser Speckle Velocimetry*); PTV (*Particle Tracking Velocimetry*); PIV (*Particle Image Velocimetry*) propriamente dito. A diferença principal entre os métodos está na quantidade de partículas distribuídas por unidade de volume, sendo alta no LSV, intermediária no PIV e baixa no PTV. A FIGURA 4 apresenta os padrões de imagens formados em função da densidade de partículas contidas no fluido.

FIGURA 4 – Densidade de partículas



FONTE: Jahanmiri (2011)

LEGENDA: Padrões de imagens em função da densidade de partículas: baixa (PTV), média (PIV) e alta (LSV), da esquerda para a direita.

De acordo com Adrian (2005), a primeira dessas três técnicas de PIV a ser empregada para obtenção de campos de velocidades em mecânica dos fluidos foi o LSV (*Laser Speckle Velocimetry*), que em 1977 foi utilizado por três grupos de pesquisadores (Barker e Fourney; Dudderar e Simpkins; Grousson e Mallick) para medir velocidades de escoamentos laminares em tubos (perfil parabólico de distribuição de velocidades).

O método LSV (*Laser Speckle Velocimetry*), velocimetria por “speckles” de *laser*, consiste no uso de registro fotográfico (com dupla exposição) das partículas iluminadas por feixe de *laser* para o cálculo da velocidade. Por ser um método que utiliza alta concentração de partículas, as imagens se sobrepõem, não sendo possível reconhecê-las de forma individual. A velocidade é calculada através da medição dos “speckles”, como são chamados os padrões aleatórios dos raios de luz resultantes da interferência da emissão do *laser* sobre as partículas. Como os padrões de “speckles” estão associados a grupos de partículas, a medida do deslocamento dos “speckles” fornece o vetor velocidade do grupo de partículas traçadoras. A análise de uma imagem de “speckles” de dupla exposição não pode ser feita manualmente, pois o olho humano não é capaz de separar os campos superpostos de “speckles”. A maior dificuldade da utilização deste método está na análise das imagens, que é feita pelo método das franjas de Young (KEANE; ADRIAN, 1990), onde um feixe *laser* é passado através da imagem de dupla exposição abrangendo uma pequena sub-região da imagem. A luz difratada pelos padrões de “speckles” forma franjas de interferência. A orientação e espaçamento das franjas revela as informações sobre a direção e magnitude dos deslocamentos naquele ponto. Realizando uma varredura de toda a imagem com o feixe de *laser*, obtém-se o campo completo do escoamento (ADRIAN, 1991).

O método PTV (*Particle Tracking Velocimetry*) se aplica para baixas concentrações de partículas, onde a superposição de imagens tem baixa probabilidade de ocorrência. Desta forma, a imagem registrada corresponde àquela das partículas individuais. Caso a concentração de partículas seja suficientemente baixa, é possível realizar análises nas imagens de múltiplas exposições, seguindo individualmente cada partícula e determinando o campo de deslocamentos. Devido à baixa concentração de partículas, a resolução espacial do campo de velocidade obtido com esta técnica não é elevada (AZEVEDO; ALMEIDA, 2002).

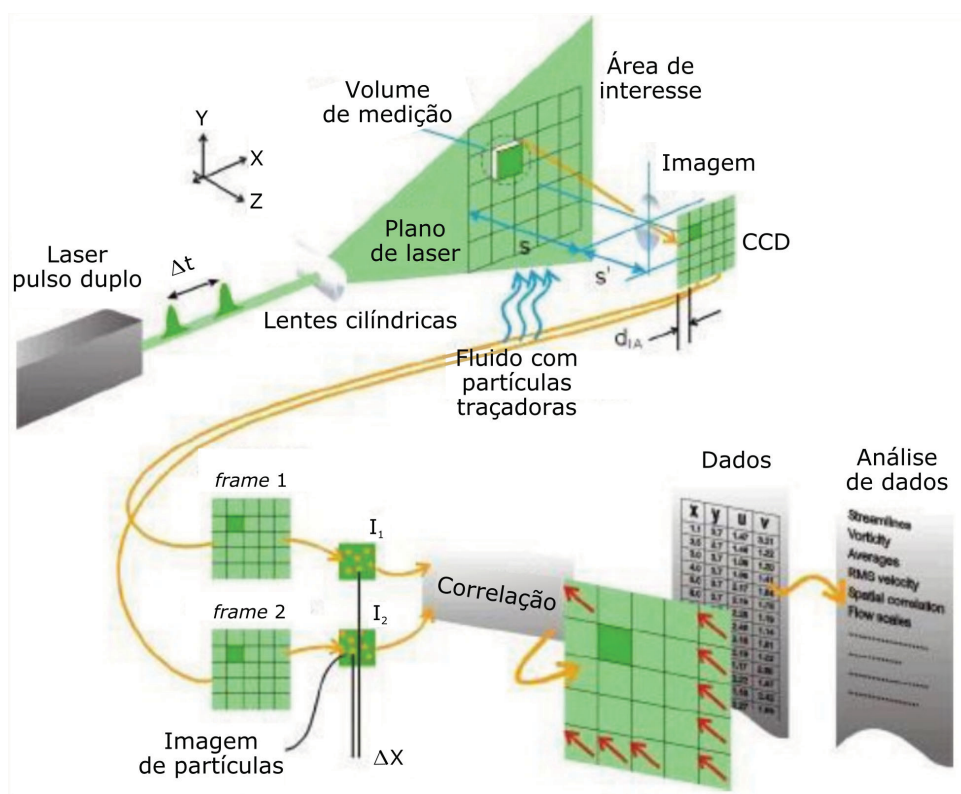
A velocimetria por acompanhamento de partículas deriva dos experimentos de visualização de escoamento que utilizavam fotografias estroboscópicas ou fotografia de trajetória de partículas. Por décadas, análises quantitativas manuais destas fotografias produziram informações sobre os campos de velocidade. A automação da análise destas imagens por meio do uso de técnicas digitais deu novo impulso à velocimetria por acompanhamento de partículas (PRASAD, 2000a).

O método PIV (*Particle Image Velocimetry*), escolhido para o desenvolvimento

deste estudo, é indicado para casos onde a concentração das partículas traçadoras situa-se em um valor abaixo daquele necessário para produzir “speckles”, mas significativamente acima dos valores que permitam o acompanhamento individual de partículas. Mesmo não tendo a concentração de partículas tão elevadas quanto no LSV, este método é considerado um sistema de velocimetria por luz pulsada de alta densidade de partículas. Este método é preferido em detrimento do LSV pela constatação de que a maioria dos experimentos em mecânica dos fluidos apresenta concentrações inferiores àquelas capazes de produzir “speckles” de *laser* (ADRIAN, 1991).

Jahanmiri (2011) utilizou uma representação esquemática mais atual da técnica PIV. Nela é demonstrada todas as etapas envolvidas na obtenção do campo de velocidades, abrangendo desde a emissão do pulso de *laser*, registro da imagem, aplicação de correlações estatísticas, até o pós processamento de resultados (FIGURA 5).

FIGURA 5 – Representação esquemática da técnica PIV



FONTE: Adaptado de Jahanmiri (2011)

De maneira geral, as técnicas de PIV (da família de velocimetria de luz pulsada) possuem os mesmos equipamentos e variam minimamente no método utilizado. Todas empregam partículas traçadoras capazes de seguir fielmente o fluido para obtenção indireta da velocidade do escoamento. As partículas contidas no fluido são iluminadas por um plano pulsado de luz coerente (*laser*). Uma câmera posicionada perpendicularmente ao plano iluminado capta a imagem das partículas em, no mínimo, dois pulsos subsequentes. A imagem é registrada em filmes fotográficos ou, atualmente,

em sensores eletrônicos de captura de sinais luminosos, como por exemplo o CCD (*charged coupled device*). Estas imagens são transferidas para um computador e algoritmos de correlação estatísticas são aplicado aos pares de imagem para determinar o deslocamento relativo de grupos pré determinados de partículas (conhecidos como janelas de interrogação). A partir do deslocamento e do conhecimento do tempo entre pulsos, é obtido um vetor velocidade para cada janela de interrogação do plano iluminado no interior do fluido (ADRIAN, 1991; RAFFEL; WILLERT; KOMPENHANS, 1998; JAHANMIRI, 2011).

A aplicação da técnica PIV envolve o conhecimento do fluido em análise, das partículas traçadoras, da fonte de iluminação das partículas, do sistema de formação da imagem, do método de captura e digitalização da imagem, do sistema de processamento das imagens e da análise dos resultados para obtenção do campo de velocidades. Na sequência serão detalhados cada um dos elementos necessários para a aplicação das técnicas de PIV atualmente utilizados para determinação de campos de velocidade instantâneos de escoamentos.

### 2.2.1 Meio fluido em análise

Azevedo e Almeida (2002) destacam observações sobre os meios fluidos (aquele em cujo escoamento se deseja determinar o campo de velocidades) com a técnica do PIV. Dentre as principais constatações, está a restrição de que o fluido seja transparente ao comprimento de onda da fonte de iluminação para garantir a visualização das partículas traçadoras dentro do plano de projeção. Este fato pode ser um limitador da utilização da técnica no caso de que não se possa garantir essa correta iluminação das partículas traçadoras, visto que a velocidade do fluido é obtida indiretamente a partir da determinação da velocidade das partículas presentes no fluido. O ar, a água e alguns óleos e polímeros transparentes costumam ser os fluidos mais comuns em que a técnica de PIV é utilizada, pois apresentam tais características favoráveis à iluminação das partículas.

Existe uma maior facilidade na aplicação da técnica de PIV em meios líquidos em virtude da grande variedade de materiais utilizados na produção de partículas traçadoras que possuem massas específicas semelhantes às dos fluidos. Este fato não é verificado no estudo de escoamento de gases como fluido de trabalho, visto que a diferença de massa específica em relação aos materiais das partículas traçadoras obriga a utilização de partículas de dimensões reduzidas para garantir o acompanhamento do movimento do fluido. Partículas pequenas dificultam o registro da imagem, obrigando a utilização de potentes fontes de iluminação e câmaras ainda mais sensíveis, aumentando o custo do sistema de medição (AZEVEDO; ALMEIDA, 2002; RAFFEL; WILLERT; KOMPENHANS, 1998).

### 2.2.2 Partículas traçadoras

As partículas traçadoras tem um papel fundamental na aplicação da técnica de velocimetria por imagem. Isto porque, de forma prática, a velocidade do escoamento é na verdade determinada pela velocidade destas partículas contidas no interior do fluido. Adrian e Westerweel (2011) apontam que o fundamento das técnicas de PIV são as determinações dos deslocamentos das partículas registradas em duas imagens consecutivas em um intervalo de tempo precisamente conhecido. Desta forma, a partir de uma primeira imagem de partícula registrada no tempo  $t$  e de uma segunda imagem da mesma partícula registrada no tempo  $t + \Delta t$ , tem-se o deslocamento  $\Delta X_p$  da partícula  $p$  e calcula-se, nas direções  $x$  e  $y$  do plano, as componentes da velocidade pela Equação 2.1:

$$(v_{px}, v_{py}) = \frac{\Delta x_p}{\Delta t}, \frac{\Delta y_p}{\Delta t} \quad (2.1)$$

onde  $v_{px}$  e  $v_{py}$  são as componentes da velocidade da partícula e  $\Delta x_p$  e  $\Delta y_p$  são os deslocamentos das partículas em  $x$  e  $y$ , respectivamente.

Prasad (2000a) aponta dois requisitos básicos que as partículas utilizadas como traçadores na técnica do PIV devem possuir: capacidade de seguir o escoamento sem que ocorram excessivos atrasos; capacidade de refletir a luz proveniente da fonte de iluminação de forma eficiente. Considerando estes critérios, Weitbrecht e G. H. Jirka (2001) atribuem a qualidade das medições de velocidade com a técnica PIV às propriedades ópticas e físicas das partículas.

A capacidade da partícula seguir o escoamento de forma a possibilitar a correta obtenção da velocidade do fluido em movimento está diretamente relacionada à influência da força gravitacional, do empuxo e das forças inerciais relacionadas às partículas (MIRANDA, 2004). Raffel, Willert e Kompenhans (1998) e Prasad (2000a) afirmam que a influência da força gravitacional deve ser considerada quando existam diferenças significativas entre as massas específicas do fluido e das partículas. Quando isto ocorre, a força de empuxo difere da força gravitacional e uma velocidade terminal da partícula em relação ao fluido é atingida tão logo ocorra o equilíbrio entre a força de empuxo, a força gravitacional e a força de arraste. Assumindo que a força de arraste possa ser aproximada pela lei de Stokes, considerando escoamento uniforme, partículas esféricas e fluido viscoso sob baixo número de Reynolds, a velocidade terminal da partícula ( $u_t$ ) é dada pela Equação 2.2:

$$u_t = \frac{gd_p^2(\rho_p - \rho_f)}{18\mu}, \quad (2.2)$$

onde  $d_p$  e  $\rho_p$  são o diâmetro e a densidade das partículas, respectivamente, e  $\mu$  e  $\rho_f$  são a viscosidade e a densidade do fluido, respectivamente. As partículas são consideradas

adequadas quando  $u_t$  apresenta um valor insignificante em comparação às velocidades reais do escoamento. Portanto, ao trabalhar com fluxos de baixa velocidade, é conveniente usar partículas fabricadas com materiais de densidades próximas a densidade do fluido, tal como, por exemplo, Polietileno (PE) e outros materiais plásticos.

De acordo com Miranda (2004), já com relação a influência das forças inerciais no percurso da partícula, estas estão relacionadas com a capacidade da partícula acompanhar variações abruptas da velocidade do fluido, por mudança de direção ou acelerações intensas, como por exemplo ocorrem nos vórtices.

Raffel, Willert e Kompenhans (1998) propõe uma forma de quantificar o tempo de resposta ( $\tau_s$ ), que é o tempo que leva para a partícula responder a estas mudanças na velocidade do escoamento, com a utilização da Equação 2.3 abaixo.

$$\tau_s = d_p^2 \frac{\rho_p}{18\mu}, \quad (2.3)$$

De maneira geral, é consenso entre os pesquisadores da técnica PIV que partículas de tamanho reduzido acompanham melhor o escoamento, tendo menos influência de fatores gravitacionais ou inerciais no atraso das partículas. Por outro lado, entra em questão o segundo requisito abordado por Prasad (2000a), que é a capacidade da partícula refletir a luz recebida pela fonte externa.

Com relação a este requisito, Jahanmiri (2011) afirma que o tamanho das partículas deve ser suficientemente pequeno para acompanhar fielmente o fluxo, mas grande o suficiente para que possa refletir a luz incidida. O pesquisador também salienta que partículas naturais presentes no fluido de trabalho podem ser usadas como traçadores para a técnica PIV, deixando claro, entretanto, que é preferível trabalhar com a adição de partículas para que possam ser controlados aspectos de contraste e tamanho.

Um tamanho ótimo deve contemplar estas duas premissas, visto que partículas muito reduzidas necessitam de fontes de luz poderosas e câmeras muito sensíveis para o registro da imagem, encarecendo consideravelmente a utilização da técnica de PIV (MIRANDA, 2004).

Outras questões levantadas por pesquisadores tem relação com o formato das partículas. Adrian e Westerweel (2011) comentam que a utilização de partículas esféricas produzem imagens que independem da rotação das partículas, favorecendo o seu registro.

A escolha do tipo de partícula a ser utilizado no experimento de obtenção do campo de velocidades depende do fluido de trabalho (que pode ser gasoso ou líquido), da ordem de grandeza da velocidade medida e do tipo da técnica PIV empregada (que varia grandemente no tipo do equipamento de emissão de luz e no registro de

imagens). Em geral, as partículas traçadoras são partículas sólidas em meios gasosos ou líquidos; bolhas de gases em meios líquidos; gotículas de líquido em meios gasosos; gotículas de líquidos em meio líquido, quando imiscível (ADRIAN; WESTERWEEL, 2011). Raffel, Willert e Kompenhans (1998) apresentam diversos tipos de partículas utilizadas para traçador em meios líquidos e gasosos. Nas TABELA 1 e TABELA 2 são apresentadas as características de dimensão de algumas partículas traçadores para líquidos e gases, respectivamente.

TABELA 1 – Partículas traçadoras para escoamento líquido

Tipo	Material	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )
Sólido	Poliestireno	10 – 100
Sólido	Alumínio	2 – 7
Sólido	Esferas de vidro	10 – 100
Sólido	Grânulos com revestimentos sintéticos	10 – 500
Líquido	Óleos diversos	50 – 500
Gasoso	Bolhas de oxigênio	50 – 1.000

FONTE: Raffel, Willert e Kompenhans (1998)

TABELA 2 – Partículas traçadoras para escoamento gasoso

Tipo	Material	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )
Sólido	Poliestireno	0,5 – 10
Sólido	Alumínio	2 – 7
Sólido	Magnésio	2 – 5
Sólido	Micro-bolhas de vidro	30 – 100
Sólido	Grânulos com revestimentos sintéticos	10 – 50
Fumaça	–	< 1
Líquidos	Óleos diversos	0,5 – 10

FONTE: Raffel, Willert e Kompenhans (1998)

A injeção de partículas deve ser feita de forma homogênea e sem causar perturbações significativamente no fluxo. Estes procedimentos podem apresentar inúmeras dificuldades dependendo do tipo de partícula e do meio fluido que se estiver trabalhando. Gotículas líquidas que evaporam rapidamente em meio gasoso; dificuldade de dispersar partículas sólidas em meio líquido; tendência das partículas sólidas em suspensão se aglomerarem; foram algumas das dificuldades apresentadas por Jahanmiri (2011) em sua pesquisa. Weitbrecht e G. H. Jirka (2001) contornaram o problema de aglomeração de partículas em um experimento de obtenção de campos de velocidades superficiais com a utilização de um revestimento especial (pintura) em partículas de Polipropileno (PP).

Existe uma grande diversidade de parâmetros e características que envolvem as partículas traçadoras para as técnicas de PIV. Um estudo detalhado sobre este assunto que pode ser utilizado para auxiliar na escolha das partículas foi produzido por Melling (1997). Este estudo consiste de uma revisão bibliográfica a respeito das partículas utilizadas na técnica PIV em relação as características de dispersão de luz, aspectos aerodinâmicos, tipos de partículas, métodos de lançamento e homogeneização das partículas no interior do fluido de trabalho. Além disso, é apresentado um resumo dos diversos materiais utilizados para fluidos de trabalho líquidos e gasosos, referenciando os pesquisadores que empregaram estes materiais em suas pesquisas.

### 2.2.3 Fontes de luz

As fontes de iluminação para a aplicação da técnica PIV tem importância fundamental para o sistema. A partir da fonte de iluminação é fornecido um feixe plano de luz monocromática, com espessura, duração e intensidades bem definidos. Tem a finalidade de promover a correta iluminação das partículas, sem que regiões fora de foco interfiram (MIRANDA, 2004).

Desde os primeiros experimentos com as técnicas que englobam o PIV, as fontes de iluminação provenientes de *lasers* tem sido amplamente utilizadas devido à capacidade de emissão de luz monocromática de alto grau de colimação, alta densidade de energia, podendo ser facilmente pulsada e configurada na forma de planos de luz de dimensões variadas (AZEVEDO; ALMEIDA, 2002).

Tanto o *laser* de onda contínua (CW) como o *laser* pulsado podem ser empregados nos experimentos de PIV. Existe, entretanto, vantagem na utilização de *lasers* pulsados devido a curta duração do pulso, que pode chegar à ordem de nanosegundos. Com isso, até mesmo partículas que trafegam em velocidades muito altas são praticamente “congeladas” durante a exposição do pulso luminoso. Os lasers mais comumente utilizados têm sido os de Hélio-Neônio (*He – Ne*), Íon de Argônio (*Ar<sup>+</sup>*), Neodímio-YAG (*Nd : YAG – neodymium-doped yttrium aluminium garnet*), entre outros (PRASAD, 2000a). A TABELA 3 apresenta algumas destas características citadas.

TABELA 3 – Características de *Laser* para aplicação da técnica PIV

Laser	Duração do Pulso (µm)	Separação do pulso (µm)	Energia por pulso (mJ)	Taxa de Repetição (Hz)
Ion-Argônio ( <i>Ar<sup>+</sup></i> )	50	500	0,1 – 1	2.000
Neodímio–YAG ( <i>Nd : YAG</i> )	0,01	0,2	50 – 400	10
Vapor de Cobre ( <i>Cu</i> )	0,025	1	1.000	0,01
Rubi ( <i>Cr<sup>3+</sup></i> )	0,01	50	5	20.000

FONTE: Azevedo e Almeida (2002)

Raffel, Willert e Kompenhans (1998) apresentam em seu livro uma discussão detalhada sobre diferentes tipos de *lasers* usados em experimentos de velocimetria por imagem de partícula, abordando características de comprimento de onda, potência de trabalho, energia e duração do pulso, frequência do pulso, pico de energia, diâmetro do feixe luminoso entre outros aspectos ópticos para produção do plano de iluminação.

Outras fontes de iluminação mais simples, como lâmpadas de flash e lâmpadas estroboscópicas, podem ser empregadas dependendo da finalidade de aplicação da técnica de PIV. Para escoamentos de líquidos de baixa velocidade o uso destas fontes de luz branca apresentam vantagens com relação ao custo (AZEVEDO; ALMEIDA, 2002).

De acordo com Raffel, Willert e Kompenhans (1998), a qualidade dos planos de luz formados por fontes incoerente é inferior àquela obtida por fontes de *laser*. Entretanto, a grande sensibilidade dos filmes fotográficos e sensores eletrônicos de câmaras CCD (*Charged Coupled Device*) às fontes de luz branca, tais como lâmpadas de Xenônio, garantem a aplicação do PIV para algumas condições.

O método de velocimetria de imagem de partículas contempla técnicas que utilizam luz natural na determinação de campos de velocidades superficiais em experimentos de campo. Com relação a iluminação natural, Hauet et al. (2008) apontam problemas que costumam ocorrer devido a variação da intensidade luminosa (forte ou fraca) e da variação de contrastes (brilho intenso e sombras) sobre a superfície da água. Para evitar o comprometimento da imagem devido a essas variações naturais, os pesquisadores indicam a utilização de fontes de iluminação artificial.

#### 2.2.4 Registro das imagens

O registro das imagens das partículas para aplicação da técnica de PIV depende de um sistema óptico que se encontre dentro de certos limites de aceitação quanto aos efeitos de difração das lentes, aberração óptica e erros associados à projeção perspectiva da imagem (RAFFEL; WILLERT; KOMPENHANS, 1998).

Historicamente, a técnica de PIV contava com a utilização de câmeras fotográficas de filme químico que necessitava de processos de revelação de imagens, seguidas de digitalização. Só após estes procedimentos, as imagens ficavam preparadas para a etapa de processamento estatístico para obtenção do campo de velocidades (ADRIAN, 1991).

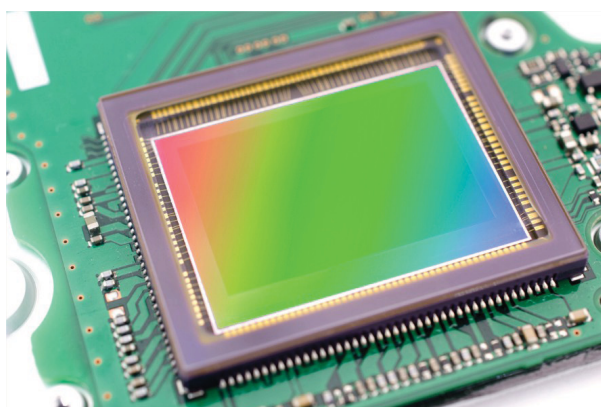
Os avanços verificados nas áreas tecnológicas impulsionaram a utilização de equipamentos eletrônicos para aquisição de imagens digitais para a aplicação da técnica de PIV. Com isso, uma das principais vantagens advindas foi a eliminação dos processos químicos para a revelação dos filmes fotográficos (AZEVEDO; ALMEIDA,

2002).

O dispositivo eletrônico responsável pela captura do sinal luminoso mais comumente utilizado é o sensor CCD (*charged coupled device*), que consiste no arranjo de milhares (ou milhões) de células eletrônicas sensíveis à luz, denominadas *pixels* (*picture element* na língua inglesa ou elementos de imagem), capazes de converter energia luminosa (fótons) em carga elétrica, proporcional à quantidade de luz que recebem (RAFFEL; WILLERT; KOMPENHANS, 1998).

O sensor CCD foi largamente utilizado na fabricação de câmeras e dispositivos de captura de imagens até início dos anos 90. A partir desta época surgiram os CMOS (*complementary metal-oxide-semiconductor*), melhorando grandemente aspectos de ruído de sinal e resolução, sendo amplamente empregados na fabricação de câmeras digitais entre outros dispositivos (JAHANMIRI, 2011). A FIGURA 6 apresenta um sensor eletrônico CMOS presentes na maioria das câmeras digitais fabricadas atualmente.

FIGURA 6 – Sensor eletrônico CMOS

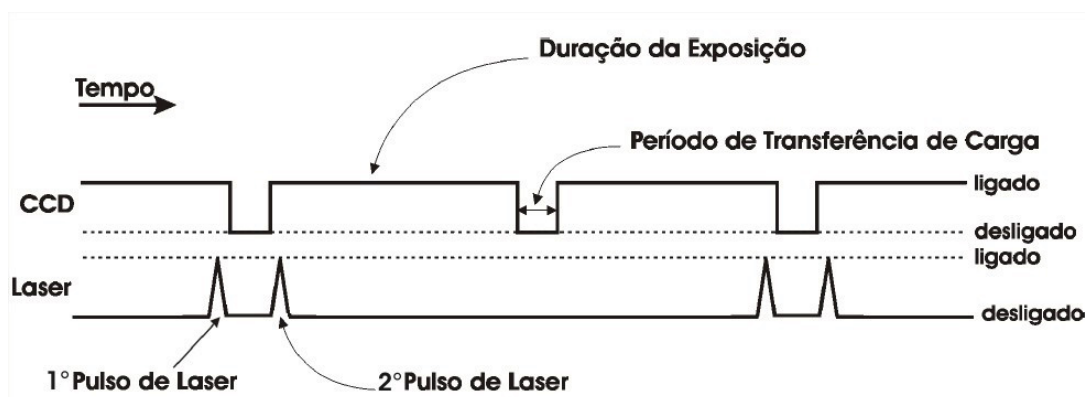


FONTE: [www.visiononline.org](http://www.visiononline.org)

NOTA: Dispositivo eletrônico de captura de imagens presentes nas câmeras digitais atuais.

Para aplicação de métodos de PIV que empregam a utilização de pulsos de luz coerente (*laser*) na iluminação das partículas traçadoras, é necessário utilizar sistemas eletrônicos de sincronização para garantir que um *frame* não seja atingido por mais de um pulso luminoso, o que invalidaria o processo de captura de imagem por este método. Este procedimento deve-se ao fato de que o tempo de exposição de cada *frame* costuma ser na ordem de 33 ms (taxa de 30 fps), com janela entre quadros na faixa de 20  $\mu$ s (transferência de carga do sensor eletrônico), enquanto que o intervalo entre pulsos de *laser* pode apresentar valores menores que a exposição do *frame*, inferiores a 500  $\mu$ s dependendo do tipo do *laser* utilizado (MIRANDA, 2004; AZEVEDO; ALMEIDA, 2002; JAHANMIRI, 2011). A FIGURA 7 apresenta um dos inúmeros esquemas de sincronização entre quadros e pulsos dos sistemas de captura de imagem digital com emprego de *laser* pulsado.

FIGURA 7 – Sincronização de equipamentos eletrônicos



FONTE: (MIRANDA, 2004)

NOTA: Sequência dos eventos de exposição, transferência de carga e pulsos de *laser*.

### 2.2.5 Análise estatística das imagens digitais

Tendo finalizada a etapa de registro de imagens de partículas, a próxima etapa para obtenção do campo de velocidades do escoamento é a validação estatística dos deslocamentos dessas partículas. Este procedimento é aplicado aos pares de imagens subsequentes, correspondentes a dois pulsos de iluminação consecutivos. Na técnica de PIV, a densidade de partículas na imagem é elevada, não possibilitando a obtenção do deslocamento individual de cada uma das partículas traçadoras. O procedimento adotado é, portanto, analisar o deslocamento de pequenas regiões na imagem contendo cerca de uma dezena de partículas e assumir que, devido às pequenas dimensões desta região, não há gradientes apreciáveis de velocidade e que as partículas ali contidas deslocam-se preservando suas distâncias relativas entre os dois instantes de tempo considerados. Esta técnica aplica-se a escoamentos predominantemente bi-dimensionais, tendo a direção principal do escoamento alinhada com o plano de luz (AZEVEDO; ALMEIDA, 2002).

Originalmente, realizava-se a análise estatística das imagens predominantemente por dois métodos: método da correlação cruzada e o método de autocorrelação. A escolha do método dependia basicamente dos equipamentos utilizados para a sincronização dos pulsos de *laser* com o meio de gravação das imagens. Para utilização de filmes fotográficos químicos no processo de gravação, devido a lentidão do mecanismo de avanço do filme, era necessário realizar a emissão de dois pulsos no mesmo *frame* (modo duplo pulso / quadro único), o que exigia o emprego do método de autocorrelação estatística para verificar os deslocamentos das partículas entre dois instantes distintos, porém na mesma imagem, além de outros procedimentos complexos para determinar o sentido do deslocamento das imagens. Já a análise estatística pelo método da correlação cruzada é utilizado até os dias de hoje por se tratar do método para operar correlações dos modos baseados em quadro duplo, que correspondem as

formas de registro de imagens com o emprego de sensores CCD e CMOS (RAFFEL; WILLERT; KOMPENHANS, 1998). Portanto, o método estatístico de autocorrelação não será abordado detalhadamente.

A aplicação do algoritmo de correlação cruzada entre duas imagens consecutivas é realizada a partir do princípio de que cada imagem é transformada em uma matriz de *pixels*, tendo cada um dos elementos desta matriz um valor correspondente a sua coloração na escala de tons de cinza, sendo zero para preto e 255 para branco (GUTKOSKI, 2001).

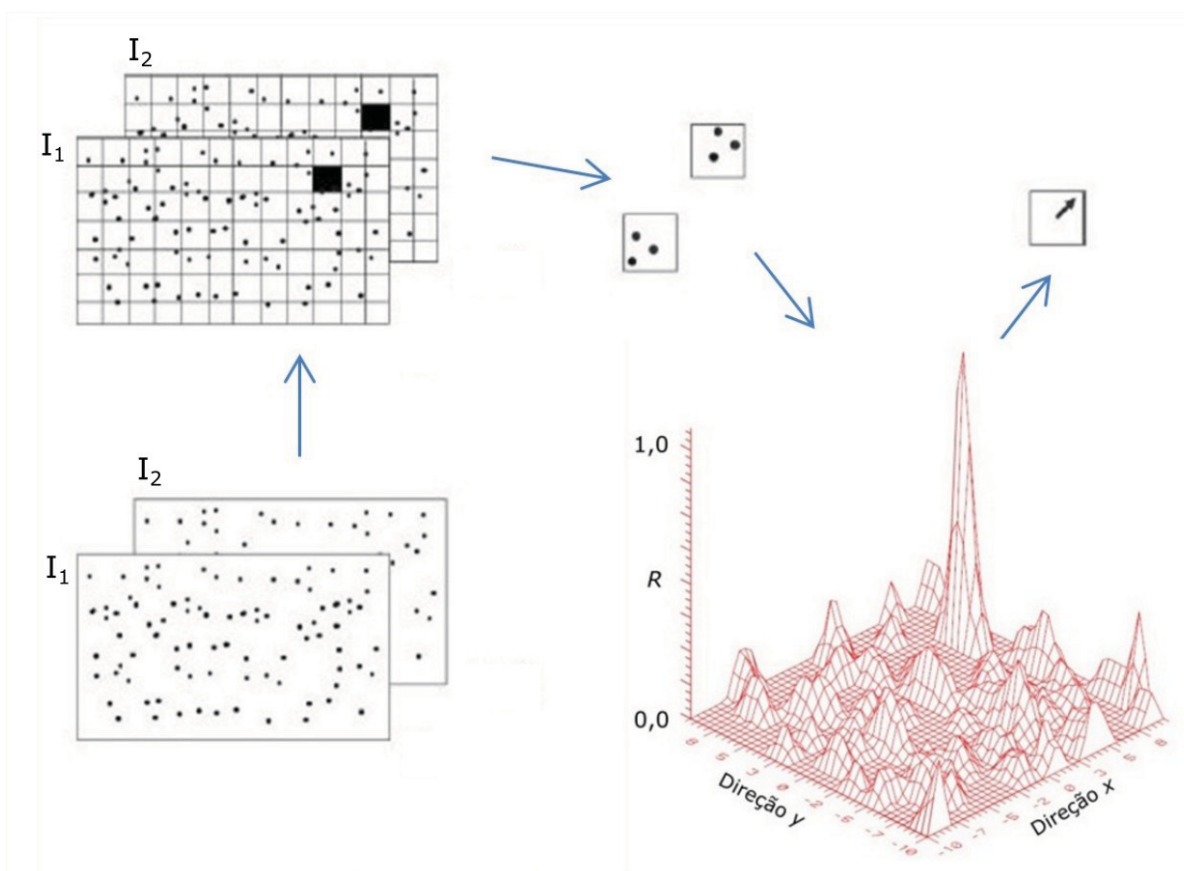
O princípio básico da correlação cruzada entre duas matrizes de valores — no caso representada pelo conjunto de *pixels* de duas imagens sequentes do mesmo conjunto de partículas, porém em tempos distintos — é selecionar uma região base na primeira imagem ( $I_1$ ) e compará-la a uma região de busca na segunda imagem ( $I_2$ ). O coeficiente de correlação  $R$ , que exprime o grau de semelhança entre as imagens  $I_1$  e  $I_2$  em função das coordenadas  $(x,y)$  é definida pela Equação 2.4:

$$R_{mn}(x, y) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M I_1(i, j) I_2(i + x, j + y), \quad (2.4)$$

onde  $i$  e  $j$  denotam a posição em *pixels* na imagem;  $I_1$  e  $I_2$  representam as matrizes das janelas de interrogação/busca;  $N$ ,  $M$  correspondem ao tamanho da área de busca em  $i$  e  $j$ .

Desta forma, a aplicação do algoritmo de correlação cruzada normalizada bi-dimensional para toda a imagem permite determinar o módulo, a direção e também o sentido de cada vetor que compõe o campo de velocidade medido. Como a função de correlação é normalizada, o coeficiente de correlação  $R$ , varia entre 0 e 1 ( $0 \leq R \leq 1$ ). Portanto, quando o padrão da região base for localizado na região de busca, o coeficiente de correlação será  $R = 1$ . Entretanto, devido às possíveis deformações que o padrão pode sofrer em razão das características do escoamento, em alguns casos encontraremos valores máximos de  $R < 1$ . Faz-se portanto necessário estabelecer um valor de  $R$  acima do qual a deformação do padrão é aceitável e abaixo do qual considera-se que a correlação não é boa o suficiente para determinar a velocidade com a exatidão desejada. Um mapa dos coeficientes de correlação para uma situação típica, é apresentado na FIGURA 8, onde as coordenadas do centro da região base, são  $(x_1=0, y_1=0)$  e as coordenadas  $(x_2, y_2)$  correspondem ao ponto onde  $R$  é máximo, isto é, ao pico mais elevado da figura (AZEVEDO; ALMEIDA, 2002).

Jahanmiri (2011) aponta que método da correlação cruzada é baseado na convolução de imagens. Desta forma, os cálculos envolvidos neste processo estatístico requerem esforços computacionais significativos. Uma alternativa mais eficiente utilizada é avaliar as funções de correlação usando transformadas rápidas de Fourier

FIGURA 8 – Mapa do coeficiente de correlação,  $R$ , para correlação cruzada

FONTE: Adaptado de Azevedo e Almeida (2002)

NOTA: Representação do pico de correlação cruzada entre duas matrizes.

bi-dimensionais (FFT). Neste método a FFT da região base é multiplicada pelo conjugado complexo da FFT da região de busca. A transformada inversa de Fourier do produto é a função de correlação procurada definida pela equação 2.5:

$$R(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{I_1(x, y)\}\mathcal{F}\{I_2^*(x, y)\}\}, \quad (2.5)$$

onde  $\mathcal{F}$  é a função da Transformada de Fourier contínua de duas variáveis  $f(x, y)$  com domínio em  $\mathcal{R}^2$  e  $I_2^*$  é a matriz conjugada de  $I_2$ .

Após uma análise automática das imagens com as técnicas descritas anteriormente, uma quantidade significativa de vetores velocidade fica disponível para análise. Se a técnica PIV é bem aplicada, apenas uma pequena fração dos vetores calculados não apresentam valores condizentes (vetores espúrios). Para remoção desses elementos, são aplicadas técnicas baseadas na comparação desses vetores com seus vizinhos e na aplicação de critérios de desvio máximo. Após identificados e removidos, esses vetores são substituídos por vetores interpolados a partir da sua vizinhança (AZEVEDO; ALMEIDA, 2002).

## 2.2.6 Pacotes computacionais para PIV

Atualmente, existe uma infinidade de *softwares* e pacotes computacionais que auxiliam na execução das etapas da aplicação da técnica de PIV que envolvem tratamento de imagem, correlação estatística e processamento de resultados. Muitos destes *softwares* são de livre distribuição e de código aberto, muitas vezes desenvolvidos para aplicação em softwares comerciais voltados para o cálculo numérico, como o MATLAB®, da *The MathWorks, Inc.*, ou desenvolvidos em linguagem de programação distribuídas gratuitamente, como a JAVA, da ORACLE®. Também são encontrados diversos pacotes de uso comercial desenvolvidos para a aplicação da técnica de PIV. A TABELA 4 apresenta diversos exemplos de pacotes para a aplicação da técnica de velocimetria por imagem de partícula (FERREIRA, 2018).

TABELA 4 – Programas computacionais para aplicação da técnica PIV

Programas computacionais para PIV	
Softwares Livres	Softwares Comerciais
PIVware	PIVtec
JPIV	PIVview
MatPiv	TSI
PIVLab	Insight
URAPIV	Dantec
DigiFlow	Dynamic Studio
PIV Sleuth	LaVision
MPIV	DaVis
GPIV	Oxford Lasers/ILA
CIV	VidPIV
OSIV	

FONTE: Ferreira (2018)

NOTA: Exemplos de programas desenvolvidos para aplicação da técnica de PIV de livre distribuição e para fins comerciais

Dentre os *softwares* livres, o PIVlab (THIELICKE; E. STAMHUIS, 2014) tem sido bem empregado para a aplicação da técnica de PIV. Foi desenvolvido para ser utilizado como um aplicativo dentro do programada MATLAB®. Sua primeira versão foi publicada em 2010, passando por diversas atualizações para melhoria do algoritmo de processamento de imagens para aplicação da técnica do PIV, o que o tornou cerca de dez vezes mais rápido no processamento estatístico do que suas primeiras versões. Possui uma interface prática, o que torna a utilização das ferramentas de processamento de imagens rápida e eficiente. Adicionalmente, diversos parâmetros do programa podem ser ajustados para melhor processar os pares de imagens obtidos dos registros fotográficos a fim de conseguir resultados precisos e confiáveis (PEREIRA, 2017).

A principal função do PIVlab (THIELICKE; E. STAMHUIS, 2014) é calcular a distribuição de velocidades a partir dos pares de imagens subsequentes obtidas na etapa do registro de imagens de partículas presentes no escoamento. Para isso, possui funções de pré processamento das imagens, utilizadas para acentuar a nitidez e o contraste das partículas; possui ferramentas de criação de máscaras para eliminar regiões sem escoamento ou sem interesse; analisa as imagens das partículas por dois métodos de correlação; possui ferramentas para filtrar vetores de velocidades espúrios; possui ferramenta de calibração de velocidades (transformação da unidade de velocidade dos vetores de *pixels/frame* para m/s); e por fim, possui ferramentas para obter, visualizar e exportar resultados de distribuições de velocidades e outros parâmetros do escoamento.

Outros parâmetros do escoamento que ajudam na quantificação e interpretação dos fenômenos estudados podem ser obtidos pela derivação dos campos de velocidades resultantes para o plano bidimensional (2D-PIV). Dentre estes parâmetros, os mais comuns para caracterização do escoamento são a vorticidade, a divergência, a taxa de cisalhamento simples, a taxa de deformação simples e a locação de vórtices (E. J. STAMHUIS, 2006). O PIVlab (THIELICKE; E. STAMHUIS, 2014) também possibilita a extração dos resultados desses parâmetros auxiliares de forma gráfica e numérica a partir de ferramentas incorporadas no *software*. A TABELA 5 apresenta a definição destes parâmetros auxiliares para caracterização do escoamento bidimensional a partir da derivação dos campos de velocidades.

TABELA 5 – Parâmetros auxiliares para caracterização do escoamento

Parâmetros	Equação	Unidade
Vorticidade	$\omega = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y$	$s^{-1}$
Taxa de cisalhamento	$h = \partial v / \partial x + \partial u / \partial y$	$s^{-1}$
Taxa de deformação	$e = \partial u / \partial x - \partial v / \partial y$	$s^{-1}$
Divergência	$\Theta = \partial u / \partial x + \partial v / \partial y$	$s^{-1}$

FONTE: Adaptado de E. J. Stamhuis (2006)

NOTA: Equações derivadas a partir da velocidade para obtenção de parâmetros auxiliares do escoamento bidimensional.

### 2.3 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA PIV PARA FLUIDOS

O constante desenvolvimento da técnica de velocimetria por imagem de partícula propiciou o surgimento de inúmeras aplicações nas mais diversas áreas da ciência e tecnologia. De acordo com a aplicação, estas novas técnicas apresentavam características e equipamentos distintos, que variavam também na sua nomenclatura. Com isso, começaram a surgir denominações tais como: Digital-PIV, Micro-PIV, Holographic-

PIV, Stereo-PIV, Tomographic-PIV, 3D-PIV, Scanning-PIV, Large Scale-PIV entre outras que, no entanto, continuam fazendo parte dos métodos de velocimetria de luz pulsada.

A presente pesquisa destina-se ao estudo das técnicas de PIV aplicadas aos meios fluidos. Entretanto, existem aplicações da técnica para outros tipos de materiais como, por exemplo, pode ser verificado nas pesquisas realizadas por Pereira (2017) que utiliza a técnica de velocimetria por processamento de imagem para monitorar a deformação em materiais sólidos, mais especificamente em madeira serrada de Pinus, Eucalipto e painéis de madeira compensado, em ensaio de flexão estática.

Na sequência discutiremos detalhes relevantes de cada uma das aplicações das técnicas de velocimetria por imagem de partícula destinadas especificamente aos meios fluidos.

### 2.3.1 Velocimetria por imagem digital de partícula (DPIV)

A técnica de velocimetria por imagem digital de partícula, ou como conhecida na língua inglesa, *digital particle image velocimetry* (DPIV), foi a implementação de processos digitais para registro de imagens associadas às técnicas de PIV e LSV. Com isso, foram removidos todos os processos de registro fotográfico convencional, que contemplavam a utilização de filmes químicos e posterior revelação. Também foram eliminados os equipamentos ópticos e mecânicos para de obtenção do sentido do escoamento, resolvendo assim as questões de ambiguidade que estavam associadas a este processo, possibilitando a implementação da correlação cruzada para a análise das imagens sequenciais. No início, esta técnica era associada a escoamentos de baixa velocidade devido as baixas taxas de aquisição de imagens (inferior a 30 Hz). Posteriormente, com o surgimento de câmeras digitais de alta resolução e taxas elevadas de captura de imagens, esta limitação foi superada, tornando a aplicação do DPIV economicamente viável (WILLERT; GHARIB, 1991).

### 2.3.2 Velocimetria por imagem de partícula microscópica (Micro-PIV)

A técnica de Micro-PIV possui as mesmas fundamentações do método original. No entanto, é aplicada para obter propriedades de escoamentos de sistemas microfluídicos das mais diversas áreas, desde biologia até nanotecnologia em geral. Possui resolução espacial na ordem de grandeza do micrômetro, necessitando partículas traçadoras compreendendo entre 100 e 300 nm de diâmetro, o que por sua vez exige sensores de captura de imagens de câmeras digitais (CCD) com alta resolução. O sistema óptico é composto por microscópio epifluorescente capaz de formar um quadro de medição de  $6,9 \mu\text{m} \times 6,9 \mu\text{m}$ , com espessura de  $1,5 \mu\text{m}$ . A correlação cruzada é usada para analisar as imagens das partículas. Nesta técnica, as limitações de resolução espacial e precisão das velocidades são influenciadas pelo limite de difração do sistema óptico

de gravação, pelo ruído no campo de imagem das partículas e pela interação do fluido com as partículas traçadoras que, devido ao baixo número de Reynolds do escoamento e da considerável influência das forças de superfície, sofrem a influência estocástica do movimento browniano de forma significativa (WERELEY; MEINHART, 2010; SANTIAGO et al., 1998).

### 2.3.3 Técnicas PIV para três dimensões (3D)

**Stereoscopic-PIV:** consiste da utilização de duas câmeras digitais posicionadas de forma a obter um registro instantâneo estereoscópico das partículas iluminadas no plano de luz, possibilitando, com isso, a reconstrução da terceira componente da velocidade a partir de algoritmos específicos. Esta reconstrução do vetor velocidade de três componentes baseia-se na distorção da perspectiva de um vetor de deslocamento visto de diferentes direções. Com isso, a terceira componente é obtida a partir de uma imagem planar, caracterizando, portanto, um sistema 2D3C (duas dimensões e três componentes) (JAHANMIRI, 2011; PRASAD, 2000b).

**Holographic-PIV:** usa o padrão de interferência da luz dispersada por partículas ao ser atingida por um feixe de luz de referência. Este padrão de interferência é gravado em um filme holográfico, que propicia a determinação da localização da partícula em profundidade. A posição no plano, em princípio, é dada pela posição do padrão de difração na imagem. Ao se iluminar o holograma gravado com o feixe de luz de referência, é possível reproduzir o campo de intensidade de luz original no volume de medição no exato instante em que foi gravado. Neste campo, a intensidade mais alta corresponde a posição do local original da partícula. O campo de intensidade reconstruído é escaneado por um sensor CCD. Com isso, é obtido um mapa de intensidade digital que pode ser usado para análise estatística de correlação cruzada para a obtenção do campo de velocidade. Apesar do grande potencial da técnica com relação ao auto rendimento na aquisição de dados, o PIV holográfico apresenta como desvantagens o meio de gravação dos padrões de interferência, que é o filme holográfico. Este requer procedimentos úmidos de revelação do filme, que torna o processo demorado. Outra desvantagem é a imprecisão no processo de reconstrução do objeto a partir do holograma, visto que podem ocorrer desalinhamentos e distorções na relocação deste holograma (ELSINGA et al., 2006; HINSCH, 2002).

**Tomographic-PIV:** é uma técnica de medição que permite determinar o movimento das partículas dentro de um volume de medição tridimensional sem a necessidade de detectar partículas individuais. A técnica baseia-se no registro simultâneo dos traçadores (iluminados por *laser*) por meio de câmeras digitais dispostas em várias direções de observação, semelhante à configuração estereoscópica de técnica PIV. A reconstrução da imagem volumétrica é baseada na distribuição da intensidade da luz

por meio de tomografia óptica. O par de tomografias reconstruídas é então analisado por meio de correlação cruzada 3D retornando o campo vetorial instantâneo de velocidade de três componentes sobre o volume de medição (JAHANMIRI, 2011; ELSINGA et al., 2006).

#### 2.3.4 Velocimetria por imagem de partícula para grandes escalas (LS-PIV)

O método LS-PIV (*Large Scale Particle Image Velocimetry*) consiste na medição do campo de velocidade superficial de escoamentos de grandes dimensões, tal como rios e lagos. Para isso, os materiais, equipamentos e métodos diferem daqueles usualmente aplicados nas técnicas de PIV, que costumam ser dotados de poderosas fontes de iluminação para destacar partículas traçadoras bastante reduzidas contidas em um plano perpendicular ao sistema de captura de imagens. Na técnica LS-PIV é possível, a partir de iluminação convencional (ou natural), de partículas traçadoras de dimensões da ordem de milímetros e câmeras filmadoras digitais posicionadas em um plano oblíquo ao escoamento, obter campos de velocidades de corpos d'água de grandes dimensões de forma mais simples (WEITBRECHT; KÜHN; G. JIRKA, 2002).

A qualidade das mediações de velocidade com técnica LS-PIV depende muito das propriedades ópticas e físicas das partículas traçadoras colocadas na superfície da água. Eles devem apresentar um forte contraste com o fundo, a densidade deve estar logo abaixo da densidade da água, e o tamanho deve ser da ordem de poucos milímetros. Uma boa visualização pode ser obtida com partículas de Polipropileno (PP) ou Polietileno (PE). As partículas podem receber um revestimento especial para aumentar o contraste da imagem e evitar a aglomeração. Cuidados especiais devem ser tomados com a utilização de partículas com densidades muito baixas, como o Poliestireno (isopor<sup>®</sup>), pois sofrem interferências das correntes de ar sobre o escoamento. Outro requisito importante para uma medição bem sucedida é a distribuição das partículas na superfície da água, que devem ser realizadas de forma homogênea sobre a superfície do escoamento, podendo-se empregar equipamentos mecânicos próprios para esta finalidade (WEITBRECHT; G. H. JIRKA, 2001).

Outra grande diferença no método LS-PIV é a não necessidade da captura de imagens em um plano ortogonal ao escoamento, podendo estes registros ser obtidos usando-se um ângulo oblíquo ao plano da superfície do escoamento. Com isso, é necessário realizar a ortoretificação das imagens para corrigir erros de perspectiva. Esta correção é realizada a partir do levantamento de coordenadas de pontos de controle distribuídos no terreno e identificáveis nas imagens capturadas. Tendo estes pontos de controle levantados, a orto-correção pode ser realizada através de modelos de colinearidade, de transformação linear direta, entre outros (JODEAU et al., 2008; CREUTIN et al., 2003)

Kim et al. (2008) utilizaram a velocimetria por imagem de partículas aplicadas a grandes escalas como base para o desenvolvimento de um novo método de medição do fluxo na superfície de rios a partir de suas margens e com a visualização em tempo real. O MLSPIV (Mobile Large Scale Particle Velocimetry) como foi chamado, consiste de um automóvel utilitário dotado de braço telescópico onde foi acoplada uma câmera de alta resolução ligada diretamente a um computador à bordo do veículo (FIGURA 9). Em um estudo de caso realizado com o módulo MLSPIV posicionado em cima de uma ponte sobre um canal (de 20 metros de largura e 0,7 metros de profundidade durante as mediações), foram monitoradas as características da superfície do escoamento com imagens instantâneas de 1.280 x 960 pixels de resolução. A mesma seção do canal foi levantada com um ADCP para comparação dos resultados. A partir do cálculo das vazões, foram obtidas diferenças de cerca de  $-5,5\%$  do ADCP em comparação ao MLSPIV, com valores apontados em  $4,9\text{ m}^3/\text{s}$  e  $5,1\text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente.

FIGURA 9 – LS-PIV – módulo móvel em tempo real



FONTE: Kim et al. (2008)

NOTA: Veículo utilitário com braço telescópico dotado de câmera digital de alta resolução para captura de imagens do escoamento diretamente das margens do rio e em tempo real de processamento de informações da superfície do escoamento.

Patalano et al. (2015) utilizaram a técnica de LS-PIV para mensurar a velocidade superficial em rios da Serra de Córdoba, na Argentina, durante eventos de grande intensidade e volume escoado. Segundo os autores, durante esses eventos de cheias repentinas, o escoamento destes rios acabam por possuir um alto nível de turbulência, com comportamento hidráulico em regime não estacionário marcado por intensas elevações do nível d'água em curto intervalo de tempo e presença de grande concentração de partículas em suspensão na superfície dos rios (sedimentos, detritos, folhas, troncos, etc.). Utilizou-se esta técnica de velocimetria por imagem devido as dificuldades de se operar com equipamentos convencionais (molinetes, ADCP, entre

outros), visto que o tempo de medição necessário muitas vezes corresponde à duração do evento de cheia, ou até mesmo maiores, tornando as medições não representativas para estes eventos não estacionários. Outro fator apontado, foram os riscos envolvidos nas medições em cheias desta natureza com relação aos equipamentos e a equipe técnica.

Ainda dentro do mesmo estudo, Patalano et al. (2015) apresentam os resultados de dois exemplos de medições de cheias com a utilização da técnica de LS-PIV para rios desta região da Argentina. Em ambos os exemplos, foram utilizadas as partículas naturais em suspensão como traçadores para a utilização do método de LS-PIV. Num primeiro exemplo (Rio San Antonio), as imagens foram registradas a partir das margens do rio, em um ângulo oblíquo ao escoamento, junto a uma seção conhecida do rio. Como resultado foram apresentadas as vazões de cheia correspondentes a um intervalo de apenas cinco minutos, que variaram de 2,47 m<sup>3</sup>/s a 126,02 m<sup>3</sup>/s. No segundo exemplo (perímetro urbano do rio Suquia) foi utilizado um UAV (*Unmanned Aerial Vehicles* – Veículo Aéreo Não Tripulado) que registrou imagens com resolução de 1.920 x 1.080 pixels à 30 fps sobrevoando a 25 metros de altura, também sobre uma seção conhecida do rio. As velocidades determinadas pela técnica de LS-PIV foram comparadas com as velocidades registradas por um ADCP, sendo as diferenças de resultados encontradas para o cálculo da vazão em torno de 1,35 %. A FIGURA 10 apresenta uma imagem registrada pelo drone durante o levantamento de velocidades pela técnica de LS-PIV. A imagem mostra também a direção do escoamento e a seção de medição do teste.

FIGURA 10 – LS-PIV com utilização de drone (UAV)



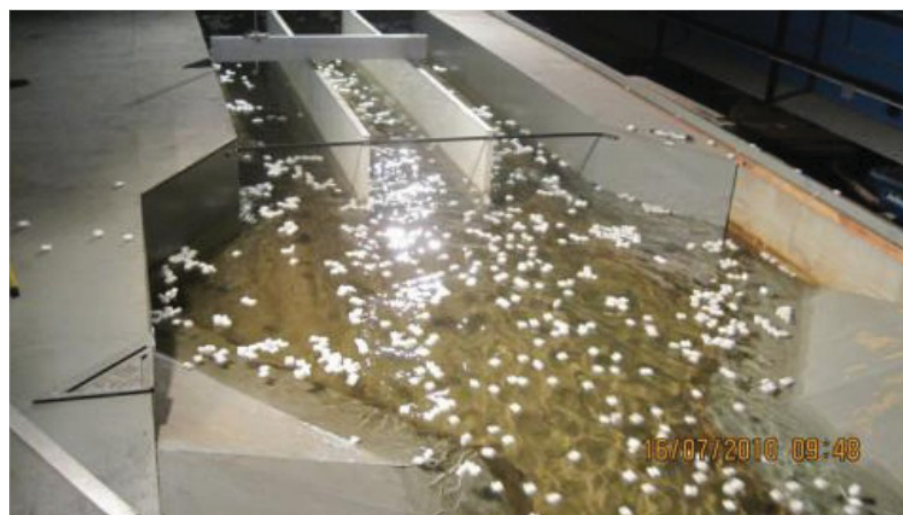
FONTE: Adaptado de Patalano et al. (2015)

NOTA: Filmagem do escoamento do Rio Suquia, (Córdoba, Argentina) a partir da utilização de veículo aéreo não tripulado para levantamento de velocidades da superfície do escoamento pela técnica de LS-PIV.

LEGENDA: Flecha: direção do escoamento. Linha tracejada: seção de monitoramento de velocidades com o ADCP.

Sutarto (2015) utilizou a técnica LS-PIV para escoamento em canal de laboratório com objetivo de mapear a estrutura de fluxo com esta técnica, testar a sensibilidade dos resultados do LS-PIV em função dos parâmetros de processamento de imagens (por exemplo, janela de interrogação e área de busca para correlação cruzada) e testar a capacidade do método LS-PIV na obtenção da magnitude e direção da velocidade do escoamento em uma estrutura de fluxo complexo. A FIGURA 11 demonstra um teste realizado no laboratório com a utilização da técnica LS-PIV, onde é possível visualizar as partículas traçadoras esféricas constituídas de Poliestireno (isopor<sup>®</sup>). O canal utilizado tem geometria trapezoidal dotado de uma repentina expansão seguida de contração para promover turbulência ao escoamento (flutuações de nível, recirculações), aumentando, com isso, a complexidade do experimento com o método de LS-PIV proposto no estudo.

FIGURA 11 – Experimento de LS-PIV em canal de laboratório



FONTE: Sutarto (2015)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A técnica de velocimetria por imagem de partículas aplicada à escoamentos relacionados às obras hidráulicas do modelo reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop se enquadra no grupo do LS-PIV (*Large Scale Particle Image Velocimetry*), que é utilizada para a medição de campos de velocidades da superfície de escoamentos fluviais.

Desta forma, o estudo proposto consistiu da realização de filmagens de partículas traçadoras adicionadas à superfície do fluido para algumas áreas pré selecionadas do modelo reduzido — com a utilização de câmera digital e sistema de iluminação convencional — e da utilização do *software* PIVlab (THIELICKE; E. STAMHUIS, 2014) para realização do pós processamento dessas imagens e implementação de algoritmo de correlação estatística.

Para o desenvolvimento do estudo proposto foi necessário implementar quatro etapas bem definidas:

**Etapa 1 – Preparação do Modelo:** consistiu da reativação do modelo reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop, com a realização de limpeza geral, pintura corretiva, revisão das estruturas hidráulicas e verificação dos sistemas de alimentação e restituição hidráulicos do modelo. Também foram instaladas estruturas de apoio para suporte de câmera digital e holofotes. A descrição dos preparativos realizados encontram-se detalhados no APÊNDICE A.

**Etapa 2 – Estudos Preliminares:** consistiu da realização de testes exploratórios no modelo reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop para verificar os procedimentos necessários para a utilização da técnica LS-PIV. Para tanto, foram testados todos os equipamentos auxiliares, tais como sistema de iluminação, câmeras digitais e medidores de velocidade convencionais. Também são avaliados materiais específicos para a aplicação da técnica de velocimetria, tais como as partículas traçadoras. São definidos métodos para calibração de velocidades diretamente no modelo reduzido. O conjunto destes testes e procedimentos criaram a base para a definição do método executado neste estudo e por serem importantes para uma maior compreensão foram detalhados no APÊNDICE B. Também faz parte desta etapa de estudos preliminares o teste de programas e procedimentos para tratamento de imagem (ver detalhes no APÊNDICE C), bem como a manipulação de ferramentas e parâmetros inerentes ao *software* PIVlab (THIELICKE; E. STAMHUIS, 2014) utilizado para extração dos resultados de PIV (ver detalhes no APÊNDICE D).

**Etapa 3 – Validação do método LS-PIV:** consistiu da comparação direta das velocidades obtidas por equipamento de medição pontual com as velocidades deter-

minadas por LS-PIV. Utilizou-se como local de estudo de validação duas seções de medição na área do reservatório em frente ao vertedouro. Os resultados e discussões desta etapa serviram para validar o método e definir parâmetros específicos do programa PIVlab (THIELICKE; E. STAMHUIS, 2014).

**Etapa 4 – Aplicação da técnica LS-PIV:** consistiu da aplicação direta da técnica de velocimetria por imagem de partículas definida com base na etapa de estudos preliminares, utilizando-se, para isso, os parâmetros validados na etapa anterior (Etapa 3). A técnica de LS-PIV foi aplicada para três áreas específicas do modelo reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop.

Na sequência deste capítulo encontram-se descritos detalhadamente todos os processos, *softwares*, equipamentos e materiais empregados na aplicação desta técnica de medição de campos de velocidade superficial de escoamentos relacionados às obras hidráulicas do modelo da UHE Sinop.

### 3.1 ÁREA DE ESTUDO – MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO

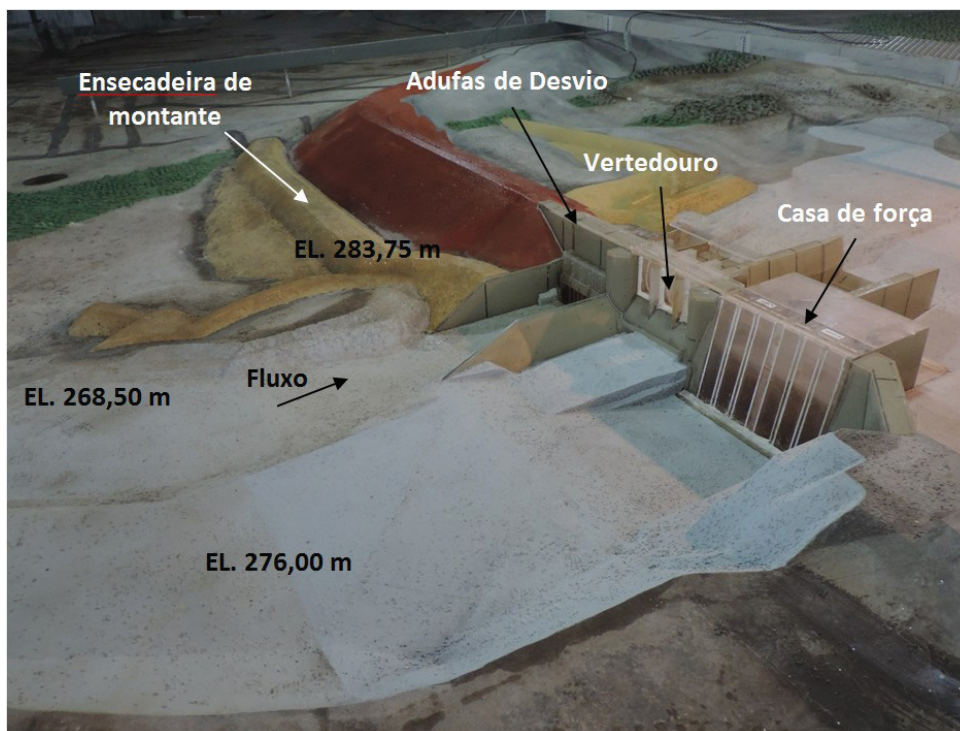
Foi utilizado o modelo reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop (localizada no Rio Teles Pires no estado do Mato Grosso), construído no Laboratório de Mecânica dos Fluídos do Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR), pertencente ao Instituto LACTEC. De acordo com CEHPAR (2014), o modelo foi construído na escala geométrica 1:100, representando a topografia e batimetria da região próxima ao aproveitamento hidrelétrico, reproduzindo um trecho de aproximadamente 2,2 km do rio Teles Pires.

De forma geral, foram reproduzidas pelo modelo reduzido as estruturas hidráulicas básicas da usina, tais como: adufas; ensecadeiras; comportas; vertedouro; casa de força; barragem; bacia de dissipação; reservatório; canal de restituição; entre outras estruturas complementares. A FIGURA 12 e FIGURA 13 apresentam o modelo reduzido da UHE de Sinop recém construído (fotos do término da construção) e suas estruturas vistas de montante e jusante da barragem, respectivamente.

O critério de semelhança de Froude, utilizado para operar este tipo de modelo físico, caracterizado pelo escoamento de superfícies livres, permite representar proporções geométricas, pressões, velocidades, vazões, etc., entre o modelo e o protótipo da usina. Com isso, este modelo pode simular com grande similaridade o funcionamento da Usina Hidrelétrica de Sinop, projetada para atender a capacidade 400 MW de potência instalada, a partir da operação de duas turbinas tipo Kaplan de 200 MW de potência cada, com queda bruta de referência de 27,6 m (CEHPAR, 2016a).

Para a alimentação do modelo foi instalada uma tubulação com diâmetro de 0,200 m dotada de um medidor do tipo Venturi (faixa de operação: 7,0 L/s a 131,0 L/s)

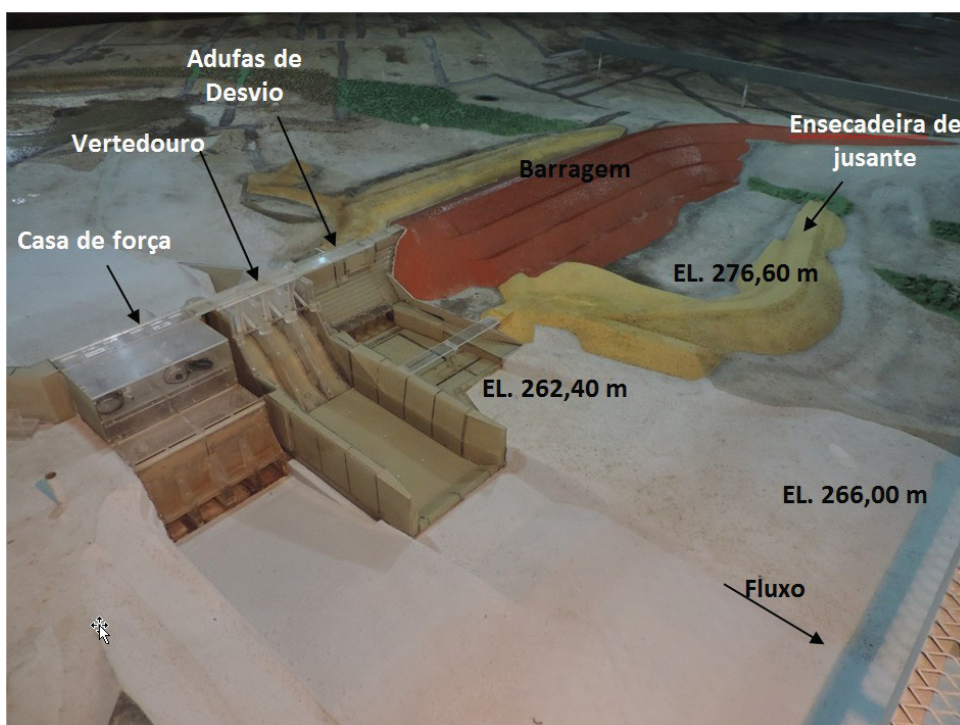
FIGURA 12 – Configuração geral do modelo reduzido – vista de montante



FONTE: CEHPAR (2014)

NOTA: Foto do término da construção, em 2014.

FIGURA 13 – Configuração geral do modelo reduzido – vista de jusante



FONTE: CEHPAR (2014)

NOTA: Foto do término da construção, em 2014.

e um medidor do tipo vertedor triangular (faixa de operação: 1,3 L/s a 18,0 L/s). Esse conjunto de medidores de vazão permite simular no modelo físico vazões de protótipo compreendidas entre 130 m<sup>3</sup>/s e 13.100 m<sup>3</sup>/s (CEHPAR, 2014). No entanto, não foi necessária a utilização da capacidade máxima dos medidores, visto que a vazão de projeto da usina é de 6.300 m<sup>3</sup>/s (correspondente a 63,0 L/s em vazão de modelo).

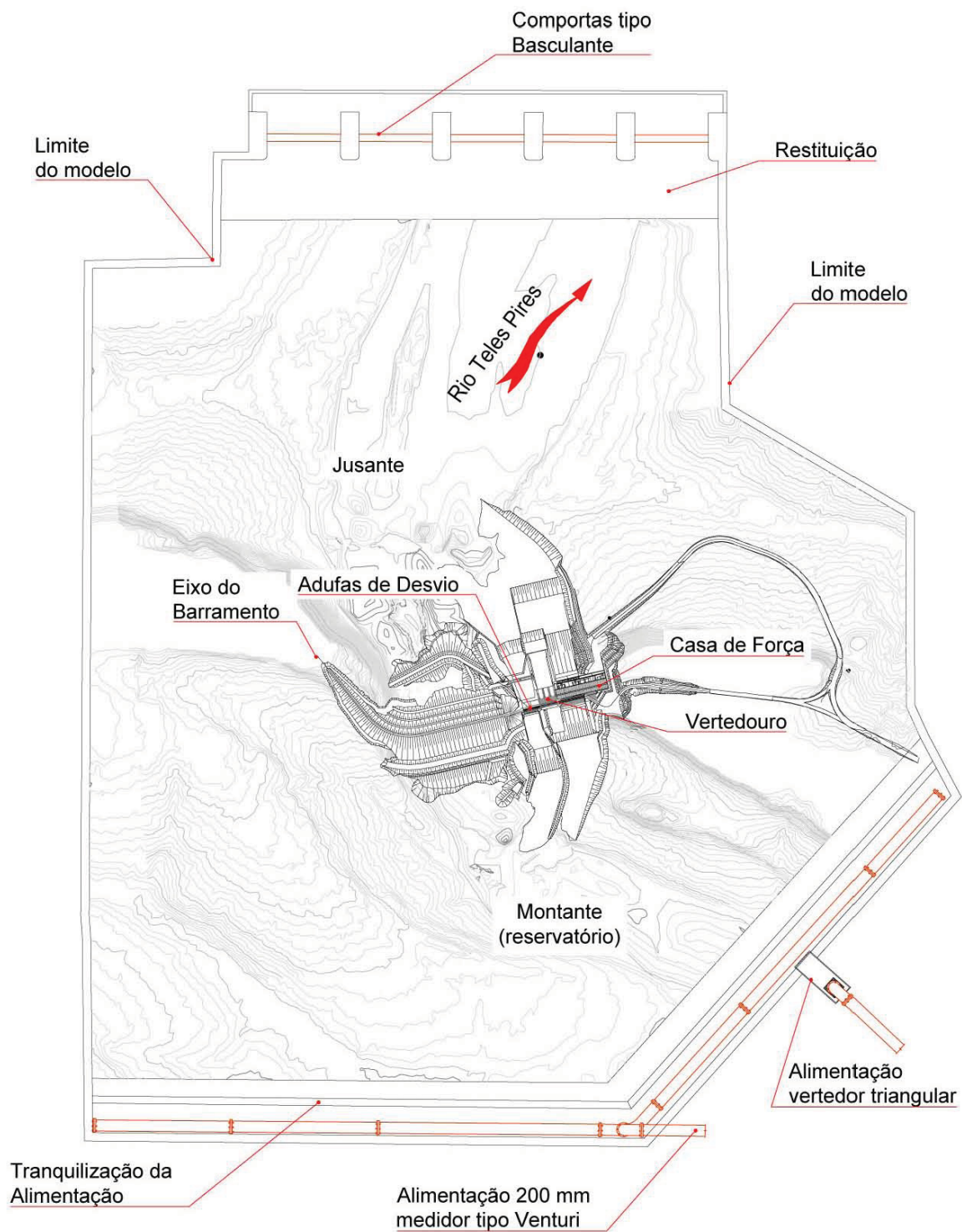
O modelo reduzido é dotado de diversas pontas limnimétricas georreferenciadas para verificação dos níveis de montante (reservatório) e de jusante da barragem. O nível do reservatório é controlado conjuntamente pela abertura das comportas, pelo ajuste da vazão de operação da casa de força e pela imposição da vazão de alimentação do modelo. O controle da vazão de alimentação é feito pelo medidor tipo Venturi ou vertedor triangular a partir do manuseio do registro de operação do ramal. O Venturi é dotado de painel hidráulico com curva de calibração (construído pelo próprio CEHPAR) e medidor eletrônico de pressão diferencial da marca SMAR, modelo HART LD301. O nível de jusante é controlado pelas comportas da restituição do modelo reduzido. A FIGURA 14 apresenta os equipamentos de controle e operação do modelo reduzido e a configuração geral é mostrada na FIGURA 15.

FIGURA 14 – Equipamentos de operação do modelo reduzido



LEGENDA: A) Ponta limnimétrica instalada a jusante da barragem. B) Equipamentos para controle do nível de jusante: ponta limnimétrica e comportas da restituição. C) Registro do ramal de alimentação, painel hidráulico e medidor diferencial de pressão. D) Vertedouro triangular e tubulação do Venturi na área de tranquilização da alimentação do modelo.

FIGURA 15 – Configuração geral do modelo



FONTE: Adaptado de CEHPAR (2015)

NOTA: Representação esquemática do modelo reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop (sem escala).

### 3.2 EQUIPAMENTOS DE VÍDEO E ILUMINAÇÃO

Para a aplicação da técnica de LS-PIV foi empregado um sistema de iluminação convencional, utilizado para destacar as partículas traçadoras da superfície do escoamento sem a necessidade de uso de fontes de luz coerente — *lasers* — como nos outros métodos de PIV. Para o registro das imagens foi utilizada uma câmera digital de alta resolução. Os equipamentos do sistema de iluminação, bem como detalhes e especificações, estão apresentados na TABELA 6 e na FIGURA 16.

TABELA 6 – Equipamentos do sistema de iluminação

Marca / Modelo	Descrição	Lúmens (lm)	Temperatura da cor (K)	Acessórios
GREIKA LD1000	Iluminador de Led composto por 1.024 Leds de alta potência	5.400	5.600 Branco Luz do dia	Bandeiras prateadas reflexivas móveis e suporte com ângulos e altura reguláveis
Galaxy Led	Holofote de iluminação de 100 W de potência composto por 294 Leds	7.000	3.000 Branco Quente	Suporte fixo
Empalux	Lâmpadas fluorescentes compactas de 46 W (iluminação do barracão)	2.760	6.400 Branco Frio	Plafon metálico

FIGURA 16 – Equipamentos de iluminação



LEGENDA: Iluminador de Led para vídeo LD1000 (esquerda). Holofote Galaxy Led (centro). Lâmpadas fluorescentes do barracão (direita).

Os registros das imagens foram realizados diretamente com o emprego da

câmera digital da marca CANON, modelo *PowerShot SX60 HS* de 16,1 megapixels mediante filmagens contínuas do escoamento. O arquivo digital da filmagem foi transferido para um computador para posterior processamento das imagens. A TABELA 7 apresenta as principais características da câmera digital, o formato e resolução do vídeo de saída empregado na pesquisa.

TABELA 7 – Características gerais da câmera digital e arquivo de saída

Câmera Digital	
Sensor de Imagem	CMOS 16,0 megapixels de 1/2,3 polegadas
Distância Focal	Zoom 65x: 3,8 – 247,0 mm (equivalente a filmes de 35 mm: 21 – 1.365 mm)
Sensibilidade	ISO 100 / 125 / 160 / 200 / 250 / 320 / 400 / 500 / 640 / 800 / 1.000 / 1.250 / 1.600 / 2.000 / 2.500 / 3.200 (Em modo P) / 6.400 (Em modo pouca luz)
Modo de Compressão	MP4 (MPEG-4 AVC/H.264)
Resolução	Full HD 1.920 x 1.080: 29,97 fps

FONTE: CANON POWERSHOT SX60 HS – MANUAL DO USUÁRIO DA CÂMERA (2014)

O posicionamento da câmera digital foi realizado de forma ortogonal à região do escoamento estudado para evitar o processo de retificação das imagens e favorecer a calibração das velocidades. Para tanto, foi utilizado um trilho metálico com um suporte móvel de câmera, ambos desenvolvidos no CEHPAR, para auxiliar no posicionamento e na estabilização da câmera. A altura de fixação foi definida mediante o ajuste do enquadramento total das áreas de levantamento. O posicionamento de fixação dos holofotes foram realizados junto aos andaimes e passarelas de apoio ao modelo. O APÊNDICE A apresenta os preparativos dessas estruturas de apoio.

### 3.3 PARTÍCULAS TRAÇADORAS

Partindo do princípio de que a escolha das partículas traçadoras está ligada às propriedades relacionadas ao acompanhamento do fluxo e da nitidez da imagem registrada, foram selecionados cinco tipos diferentes de partículas, sendo quatro destas escolhidas dentre os materiais disponíveis no próprio Centro de Hidráulica (CEHPAR).

A TABELA 8 lista os materiais utilizados para produzir partículas traçadoras para os testes de LS-PIV e aponta algumas de suas características físicas. A FIGURA 17 apresenta um exemplo de produto fabricado de Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) de fácil aquisição, que possui densidade semelhante à da água, de formato esférico e diâmetro máximos de 6 mm, que foi testado como traçador para

técnica de LS-PIV. Esta figura também mostra fragmentos de acrílico (PMMA – polimetilmetacrilato) proveniente dos cortes de chapas para construção das estruturas hidráulicas dos modelos reduzidos que, da mesma forma, foram testados no presente estudo.

TABELA 8 – Materiais para partículas traçadoras

Material	Composição	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Formato	Dimensões
Munição de air soft	Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)	1,05	Esférico	Diâm.= 6 mm
Acrílico	Polimetil-Metacrilato (PMMA)	1,18	Irregular	Partículas < 2 mm
Confete de papel comum	Fibra celulósica	0,75	Disco	Diâm.= 10 mm
Confete de papel sulfite	Fibra celulósica	0,75	Disco	Diâm.= 5 mm
Talco Industrial Branco	Silicato de Magnésio Hidratado	2,97	Pó	-

NOTA: As informações da tabela foram retiradas de catálogos de produtos, de informações provenientes das embalagens disponíveis no Centro de Hidráulica (CEHPAR) e de *sites* de comercialização.

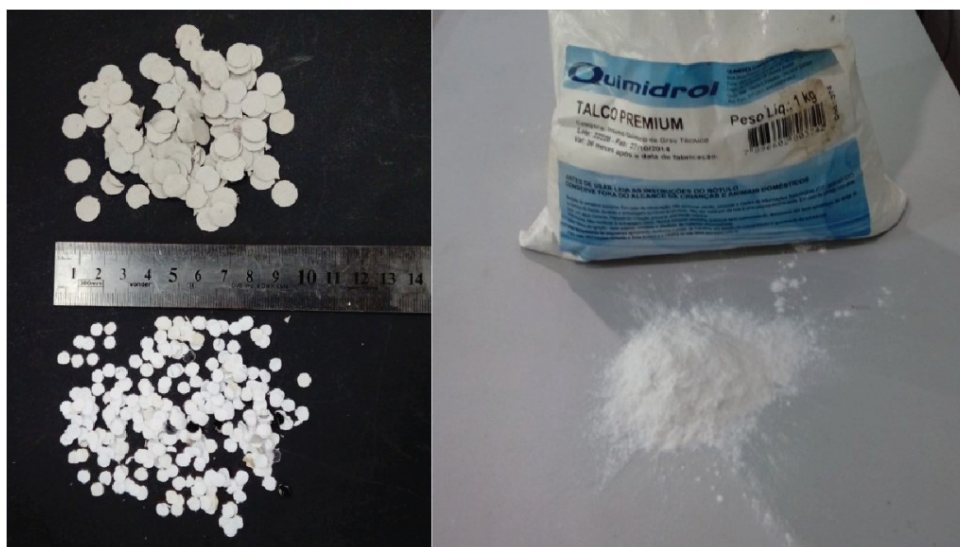
FIGURA 17 – Partículas traçadoras proveniente de materiais plásticos



LEGENDA: A esquerda, munição para *airsoft* 6 mm (ABS). A direita, fragmentos de acrílico (PMMA).

Os dois tipos de confetes de papel e o talco industrial branco (apresentados na FIGURA 18) são amplamente utilizados para experimentos diversos realizados no CEHPAR e, por este motivo, também foram testados nas aplicações da técnica de LS-PIV.

FIGURA 18 – Partículas traçadoras de uso corrente do CEHPAR



LEGENDA: A esquerda, confetes comuns (maiores) e confetes de papel sulfite (menores). A direita, talco industrial branco.

O teste de eficiência destas partículas encontram-se detalhados no APÊNDICE B por fazerem parte da etapa de definição do método de LS-PIV aplicado no modelo reduzido da UHE Sinop.

### 3.4 MEDIÇÃO PONTUAL DE VELOCIDADES

A comparação das velocidades obtidas pela técnica LS-PIV foi realizada diretamente pela medição pontual das velocidades superficiais do escoamento com a utilização de medidores convencionais. A princípio, foram disponibilizados pelo Centro de Hidráulica (CEHPAR) três tipos de medidores pontuais de velocidades, cada um com características distintas em função da faixa de velocidades de medição. A TABELA 9 apresenta os modelos e suas especificações.

TABELA 9 – Medidores de velocidades convencionais disponibilizados pelo CEHPAR

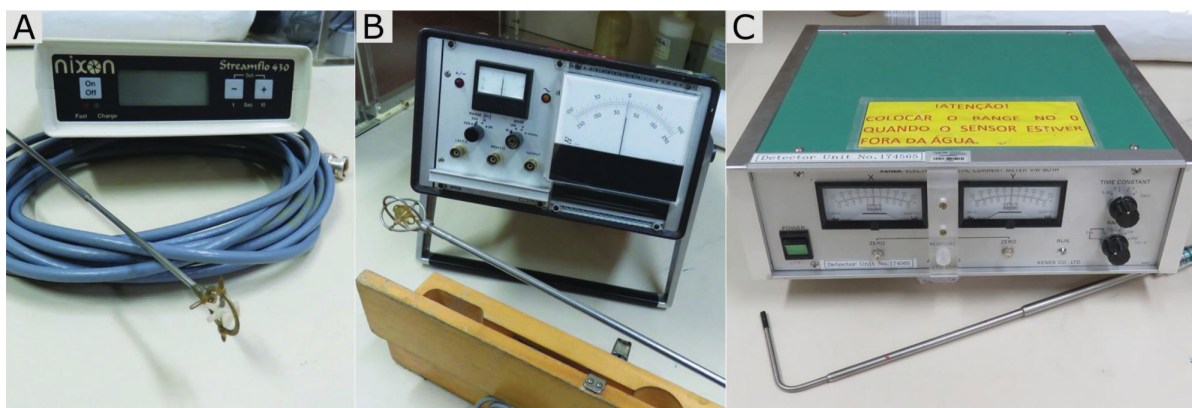
Marca / Modelo	Tipo	Amplitude (cm/s)	Faixa de Erro (%)	Características
Nixon Streamflo 430	Micromolinete eletrônico	5 – 150	+/- 1,5	1 eixo 1 direção
WVM Delft H2136	Micromolinete eletrônico	2 – 90	-	1 eixo 2 direções
KENEK VM-801H	Medidor eletromagnético	0 – 200	+/- 2,0	2 eixos 4 direções

FONTE: CEHPAR

As medições de velocidades com a utilização de equipamentos convencionais

foram realizadas apenas na etapa de validação do método. Procurou-se posicionar as sondas/hélices dos medidores o mais superficialmente possível, respeitando a profundidade mínima de submersão de cada equipamento. O detalhamento do processo de medição, incluindo a definição dos locais para o levantamento das velocidades de referência, encontram-se descritos na seção 3.5.1. A FIGURA 19 apresenta os três medidores disponíveis para a pesquisa.

FIGURA 19 – Medidores de velocidades pontuais do CEHPAR



LEGENDA: A) Micromolinet eletrônico Nixon. B) Micromolinet eletrônico Delft. C) Medidor eletromagnético KENEK.

### 3.5 VALIDAÇÃO E APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE LS-PIV

O modelo reduzido da UHE Sinop permite simular diversas configurações de escoamento que variam desde a operação isolada da casa de força até operações conjuntas entre os vertedouros e casa de força. O nível do reservatório e do rio a jusante da barragem também podem ser alterados, modificando o comportamento hidráulico do escoamento. Desta forma, é possível simular situações reais de operação hidráulica da usina.

No presente estudo, para a aplicação da técnica de velocimetria por imagem de partícula para grandes escalas (LS-PIV) foram realizados três tipos de ensaio: um aplicado à região de aproximação do vertedouro, a montante da barragem, com objetivo de validar o método de LS-PIV utilizado no estudo e, após a validação, determinar o campo de velocidades desta área do reservatório; outro aplicado ao canal de fuga do circuito de geração, para verificar a utilização da técnica de LS-PIV em regiões de escoamento turbulento; o último aplicado ao entorno de estruturas de fechamento da segunda fase do desvio do rio, para monitoramento do campo de velocidades da superfície do escoamento dessa região. Cada configuração possui diferentes ajustes de vazão, nível de montante, nível de jusante, local de aplicação da técnica de LS-PIV e equipamentos auxiliares, que variaram de acordo com o ensaio.

A escolha dos ensaios, bem como toda a configuração hidráulica adotada, foi baseada nas observações feitas nos testes preliminares realizados no início desta pesquisa (ver APÊNDICE B) e nas informações retiradas de relatórios e filmagens anteriormente realizados pela equipe técnica do CEHPAR para o modelo reduzido da UHE Sinop durante a fase de estudo solicitada pela construtora Triunfo S.A.

Serão apresentados separadamente os três ensaios realizados para o estudo da aplicação do método LS-PIV para os escoamentos relacionados às estruturas hidráulicas do modelo físico em questão.

### 3.5.1 ENSAIO 01 – Validação do método de LS-PIV

O objetivo principal do ENSAIO 01 foi aplicar a técnica de LS-PIV de forma que os valores de velocidades obtidos pudessem ser comparados com os resultados extraídos por um método convencional de medição de velocidades (medição pontual). Para tanto, foi preparada uma configuração de ensaio que permitisse a utilização de ambos os métodos de medição, selecionando, para isso, locais de aplicação onde o escoamento apresentasse um comportamento mais estável e com velocidades dentro da faixa de operação dos equipamentos disponíveis. Como objetivo secundário, a partir da validação do método, foram extraídos os campos de velocidades da área de aproximação do vertedouro.

A configuração hidráulica de operação do modelo reduzido foi baseada nos testes realizados na etapa preliminar do presente estudo e possui as características apresentadas na TABELA 10. Nesta configuração foi simulada a operação isolada do vertedouro com as comportas totalmente abertas escoando a vazão de 4.000 m<sup>3</sup>/s em valores de protótipo (40,0 L/s em modelo).

TABELA 10 – Configuração hidráulica de operação para o ENSAIO 01 (valores de protótipo)

Vazão de Protótipo (m <sup>3</sup> /s)	Nível do Reservatório (m)	Nível de Jusante (m)	Carga Hidráulica (m)
4.000	297,73	275,87	14,23

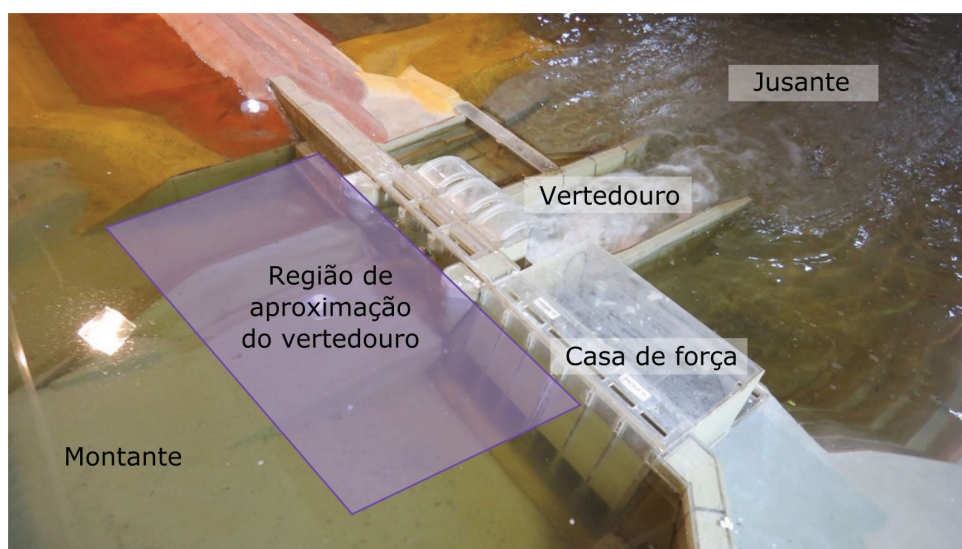
FONTE: (CEHPAR, 2015)

NOTA: O nível de água do reservatório e o nível do rio a jusante estão referenciados ao nível do mar. A carga hidráulica refere-se a altura de água sobre a crista do vertedouro com as comportas totalmente abertas.

O local de aplicação da técnica de LS-PIV e posterior leitura de velocidades pontuais foi definido na área do reservatório (a montante da barragem) na região de aproximação do vertedouro, conforme pode ser observado na FIGURA 20. Para este local foram definidos 18 pontos de monitoramento de velocidades, posicionados sob duas seções paralelas às estruturas hidráulicas. Uma das seções foi situada a 25 cm do

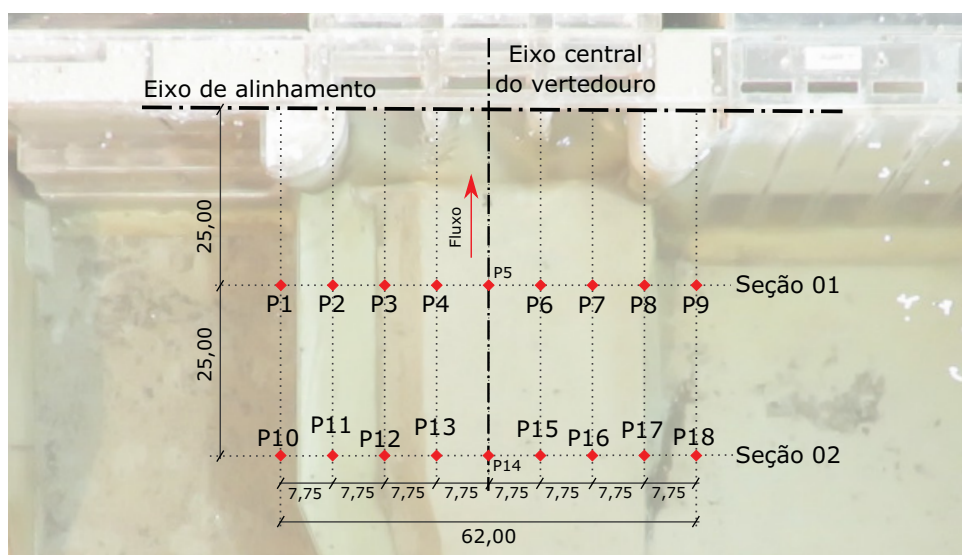
alinhamento das comportas e a outra posicionada a 50 cm deste mesmo alinhamento (em medidas de modelo). A FIGURA 21 apresenta de forma esquemática os pontos de medição de velocidades para estas seções.

FIGURA 20 – Local de aplicação da técnica de LS-PIV – ENSAIO 01



NOTA: Área do reservatório escolhida para o levantamento de velocidades para o ensaio de validação da técnica de LS-PIV

FIGURA 21 – Pontos de monitoramento de velocidades – ENSAIO 01



NOTA: Representação esquemática (sem escala) dos pontos de monitoramento de velocidades da região de aproximação do vertedouro.

LEGENDA: Distâncias em centímetros (modelo).

Para a realização dos testes do ENSAIO 01 foram inicialmente ajustados os parâmetros hidráulicos de operação. Este procedimento envolveu o ajuste da vazão do modelo (no caso, 40,0 L/s) e o ajuste do nível do rio a jusante da barragem. Somente após garantida a estabilidade dos níveis e vazão, e conseqüentemente a condição

de regime permanente do escoamento no modelo, foram iniciados os processos de aplicação da técnica de LS-PIV.

Concomitantemente, foram realizadas as montagens e posicionamentos dos equipamentos de filmagem e iluminação. A filmadora digital foi posicionada sobre a região de interesse, em uma altura que pudesse enquadrar a região sem a utilização de recursos ópticos adicionais, perfazendo um plano de filmagem ortogonal ao escoamento observado. Para isso, foram utilizados o trilho e o suporte articulado desenvolvido para tal finalidade (ver APÊNDICE A). Os equipamentos de iluminação foram posicionados de forma que os reflexos causados na superfície do escoamento não ocorressem dentro das áreas de interesse do experimento. A FIGURA 22 mostra os preparativos para o ENSAIO 01 no modelo reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop no laboratório do Centro de Hidráulica (CEHPAR).

FIGURA 22 – Preparativos para o ENSAIO 01



NOTA: Montagem e posicionamento dos equipamentos de iluminação, suporte de câmera digital e passarela de apoio para lançamento das partículas.

Com base nos resultados dos testes de desempenho de traçadores para a técnica de LS-PIV realizados na etapa de estudos preliminares (ver APÊNDICE B), dentre os materiais disponíveis para utilização, o confete de papel apresentou as melhores características para realizar o acompanhamento superficial do escoamento estudado. Os outros materiais apresentados foram descartados.

Desta forma, a partir destas definições, foram escolhidos dois tipos diferentes de confetes para realização do ensaio de validação da técnica proposta: confete de papel comum (maior), previamente testado, intitulado CONFETES GRANDES; confete de papel sulfite (menor), não testados nos testes preliminares, porém com comportamento semelhante, intitulado CONFETES PEQUENOS. Com isso, puderam ser executados diversos testes com a variação do tipo do traçador a fim de se verificar

a utilização mais adequada com relação às características de operação de cada um deles.

A câmera digital utilizada para o experimento — CANON, modelo *PowerShot SX60 HS* de 16,1 megapixels — foi pré-configurada para registrar o escoamento na resolução Full HD 1.920 x 1.080: 29,97 fps. Os demais parâmetros da câmera digital não foram alterados, sendo escolhida a configuração AUTOMÁTICA para suprir os ajustes óticos da câmera.

De maneira geral, a execução de cada teste do ENSAIO 01, após todos os preparativos acertados, consistiu da realização do lançamento manual dos traçadores de confete de papel na área de interesse e da realização da filmagem da propagação destes sobre a superfície do escoamento. A diferença dos testes se deve ao tipo de confete de papel utilizado e à forma de lançamento destas partículas. Procurou-se realizar uma filmagem por teste para melhor organização dos processos subsequentes de tratamento das imagens.

O lançamento dos traçadores na superfície do escoamento foi realizado de forma manual, diretamente sobre a área de estudo, mediante a utilização das passarelas de apoio, procurando manter uma entrada constante e mais homogênea possível a fim de não perturbar a dinâmica do escoamento. A FIGURA 23 apresenta a região de estudos durante um teste de lançamento de partículas traçadoras de confetes de papel sulfite.

FIGURA 23 – Execução de teste do ENSAIO 01



NOTA: Lançamento de confetes de papel sulfite durante os preparativos para um dos teste realizado na área de aproximação do vertedouro da UHE Sinop.

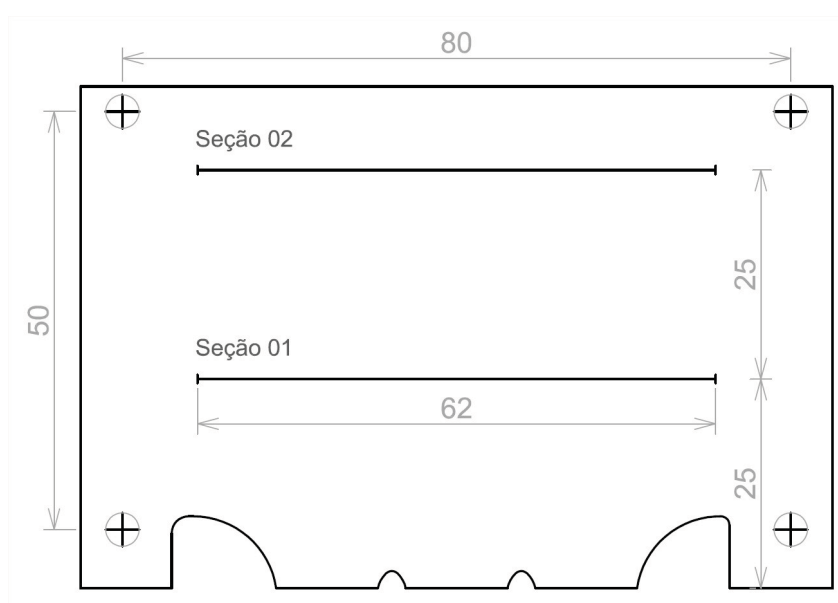
Outro procedimento adotado antes do término da filmagem foi o posicionamento, diretamente na área de estudos, de um gabarito de calibração de velocidades.

Este gabarito teve a finalidade de criar uma referência de medida nas imagens capturadas pela câmera digital no final de cada teste. Esta imagem do gabarito foi então utilizada na etapa de verificação de ortogonalidade das filmagens e calibração de velocidades.

Este procedimento foi definido a partir dos testes exploratórios para verificação da técnica de LS-PIV, onde constatou-se a necessidade de se criar referências com medidas conhecidas levantadas ao nível d'água do escoamento estudado. A utilização deste recurso também serviu para melhorar a acurácia na locação das seções de extração de velocidades realizada na etapa de processamento de dados diretamente no *software* PIVlab (THIELICKE; E. STAMHUIS, 2014).

Trata-se de uma placa flutuante de poliestireno extrudado — *Foam Board* — de 70 x 90 cm em que foram desenhadas as duas seções de medição de velocidade e quatro marcações de referência com distâncias predeterminadas. Este gabarito foi projetado para se encaixar perfeitamente aos pilares e muros de aproximação do vertedouro de forma que sua posição permanecesse inalterada durante o teste. A FIGURA 24 apresenta o desenho esquemático deste gabarito.

FIGURA 24 – Representação esquemática da placa de calibração de velocidades



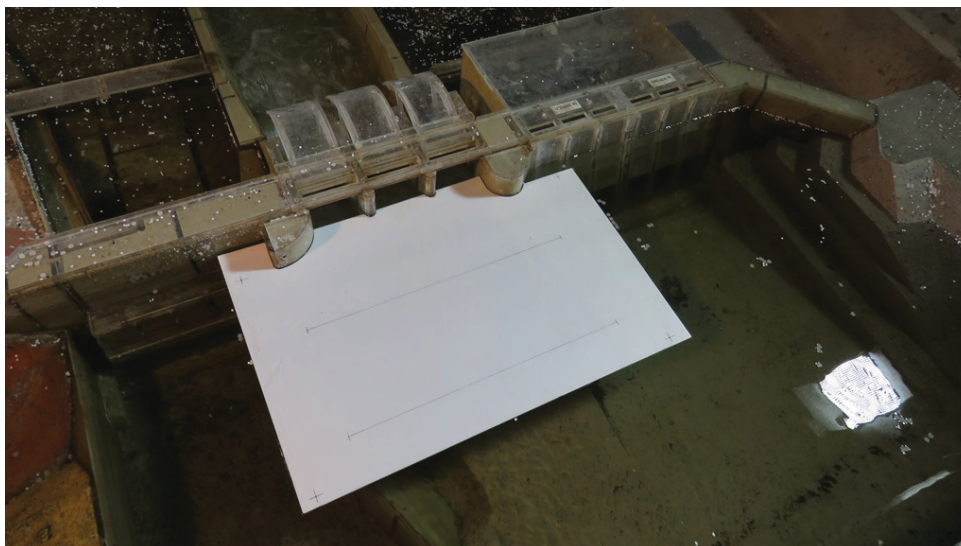
**NOTA:** Para referencição de distâncias o gabarito possui quatro marcações próximas as bordas perfazendo um quadrante de 50 cm por 80 cm que foram utilizados nos procedimentos de calibração da velocidade. Foram representadas as duas seções de tomada de velocidades, sendo uma delas — Seção 01 — posicionada a 25 cm do alinhamento do vertedouro e a outra — Seção 02 — posicionada a 25 cm da primeira seção. As seções medem 62 cm de comprimento.

**LEGENDA:** Medidas em centímetros (sem escala).

Utilizou-se esta placa de referência após o lançamento das partículas traçadoras, posicionando-a na superfície do escoamento na região de aplicação da técnica de LS-PIV de forma que sua imagem pudesse ser capturada pela câmera digital antes

mesmo de se encerrar o teste. A FIGURA 25 mostra o gabarito posicionado ao nível do escoamento encaixado nas estruturas de acrílico que compõem o vertedouro.

FIGURA 25 – Utilização do gabarito de calibração de velocidade



NOTA: Com a utilização do gabarito tem-se a materialização de medidas referenciadas ao nível do escoamento.

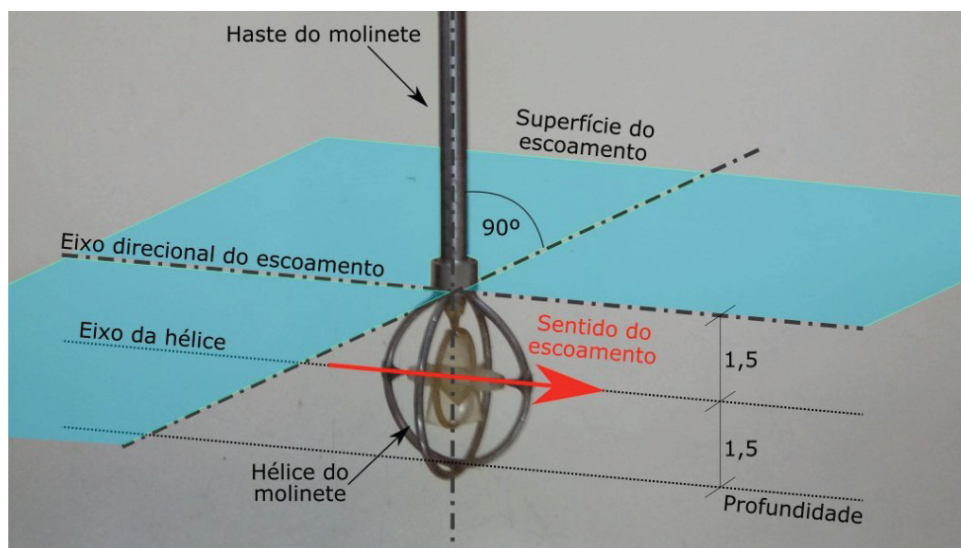
O último procedimento realizado no modelo reduzido para este ensaio de validação da técnica de LS-PIV foi o levantamento convencional das velocidades da região de aproximação do vertedouro, tomadas diretamente nos pontos das seções de controle.

Dentre os medidores de velocidade disponíveis para este projeto foi utilizado o micromolinete eletrônico Delft H2136, que possui faixa de operação de 2 a 90 cm/s, condizente com as condições hidráulicas observadas na região de estudo. O medidor eletromagnético KENEK VM-801H, a princípio, mais adequado para o ensaio, não foi utilizado por apresentar o modelo da sonda de medição com as direções dos eixos coordenados incompatíveis com a aplicação necessária para o estudo.

Para a realização das leituras de velocidade com o emprego do micromolinete Delft H2136 foi utilizado um sistema eletrônico dotado de placa de captura de sinais elétricos provenientes do medidor, acoplada diretamente a um computador. Desta forma, com a utilização de um programa desenvolvido em linguagem compatível com o sistema da LabVIEW, da National Instruments, já utilizado pelos técnicos do CEHPAR para esta finalidade, foram ajustados parâmetros relacionados à taxa e ao tempo de aquisição de dados de velocidade. Optou-se por realizar as aquisições de dados a uma taxa de 30 Hz, com tempo de aquisição de 30 s de duração, perfazendo um total de 900 leituras por ponto de medição. Desta forma, foi posicionada a sonda do medidor nos 18 pontos de monitoramento de velocidade e após o ajuste manual do prumo da haste, da profundidade da hélice no interior do fluido (cerca de 3 cm da superfície) e do

ângulo da hélice, no caso, paralelo ao escoamento (linha de corrente) no exato ponto de medição, foi acionado o sistema de captura de dados. A FIGURA 26 apresenta um desenho esquemático do posicionamento da haste e da hélice do micromolinete para levantamento dos pontos de velocidade.

FIGURA 26 – Medição pontual de velocidade com micromolinete



NOTA: Representação do posicionamento da haste do micromolinete com relação à profundidade e ângulo de operação da hélice.

LEGENDA: Profundidade em centímetros.

Também foi realizado para um único ponto — o ponto P16 — a medição do perfil de velocidade do escoamento. O ponto foi escolhido por apresentar a direção superficial do escoamento perpendicular ao eixo de levantamento de velocidades. Foram adotadas cinco profundidades de medição a partir da superfície. O objetivo desta medição foi verificar as características do escoamento quanto a profundidade.

Para garantir a correta locação e posicionamento da haste do micromolinete utilizado na medição pontual da velocidade foi construído um gabarito de referência, a partir de uma chapa de madeira compensada de 18 mm de espessura, que possui marcações coincidentes com a posição dos pontos e seções utilizados para o monitoramento da velocidade na área de estudo. A correta posição do gabarito é garantida pelo formato da peça que se encaixa na estrutura de acrílico junto ao vertedouro. Este procedimento foi adotado para diminuir as incertezas inerentes ao posicionamento das sondas/hélices dos equipamentos. A FIGURA 27 apresenta o gabarito encaixado na estrutura de acrílico do modelo reduzido da UHE Sinop. A FIGURA 28 mostra os equipamentos eletrônicos que fazem parte do sistema de captura de dados de velocidade para o micromolinete utilizado.

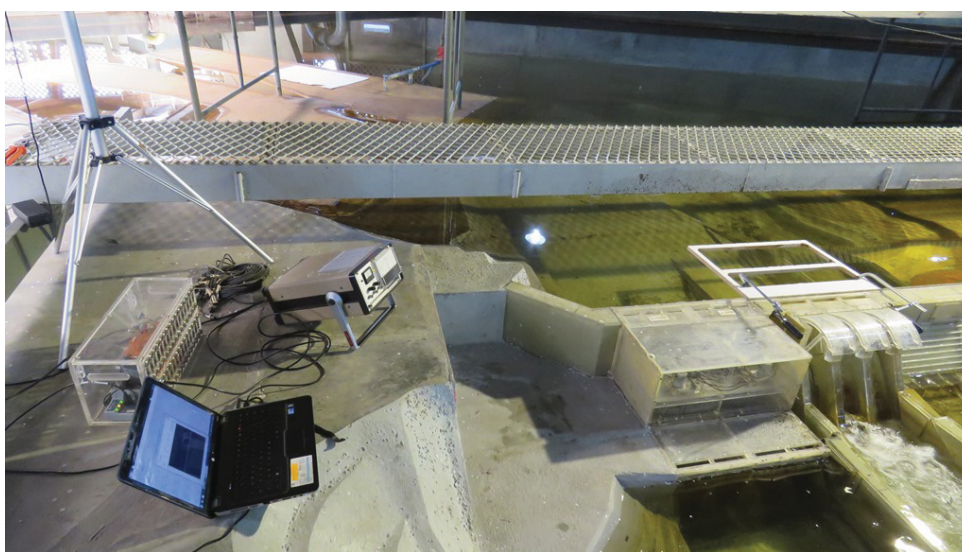
Os dois gabaritos utilizados neste ensaio foram desenvolvidos e construídos nas dependências do Centro de Hidráulica (CEHPAR). Foram baseados nos testes

FIGURA 27 – Gabarito de referência de posição para medição pontual de velocidade



NOTA: Processo de fixação do gabarito de referência de posição diretamente nas peças de acrílico da estrutura do vertedouro da usina. O gabarito possui sulcos em cada ponto de medição dentro da seção, para encaixe da haste do micromolinete.

FIGURA 28 – Equipamentos de medição pontual de velocidades



NOTA: Equipamentos eletrônicos de captura de sinal de frequência de rotação do micromolinete. Gabarito de referência de posição acoplado à estrutura do vertedouro.

e resultados obtidos da etapa de estudos preliminares para definição do método de LS-PIV aplicado aos escoamentos relacionados às estruturas hidráulicas do modelo reduzido da UHE Sinop. A descrição dos testes que deram origem aos gabaritos encontram-se no APÊNDICE B.

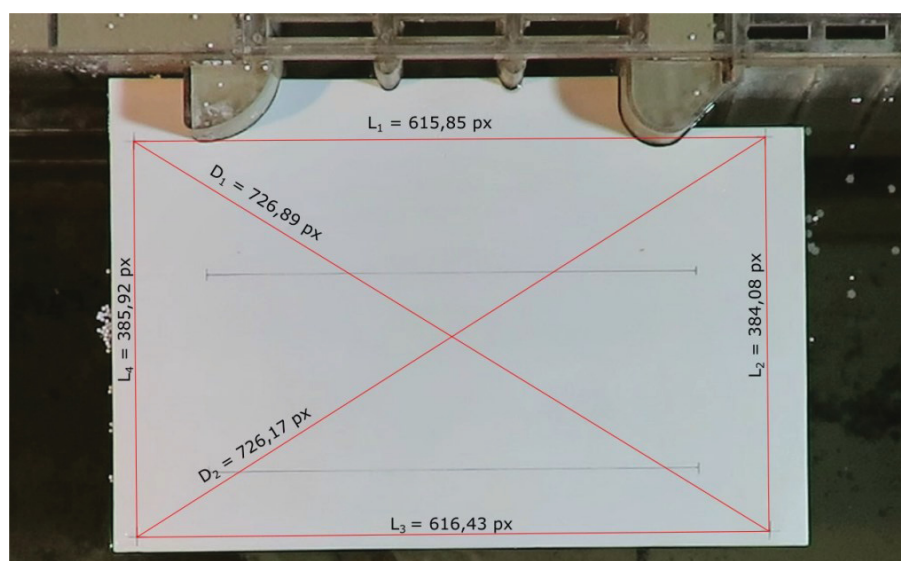
Após encerrado os procedimentos da técnica de LS-PIV realizados diretamente no modelo reduzido, iniciou-se a etapa de processamento dos vídeos e implementação

do *software* PIVlab para extração campos de velocidades e demais resultados da área do escoamento estudado.

No APÊNDICE C encontram-se os procedimentos adotados e programas utilizados para converter as filmagens realizadas de formato de vídeo para sequência de fotos. Desta forma, os arquivos de vídeo de formato MPEG-4 AVC/H.264 HD 1.920 x 1.080: 29,97 fps foram transformados em sequência de aproximadamente 30 fotos para cada segundo de vídeo, com resolução das fotos de 1.920 X 1.080 pixels e padrão de cores convertidos para tonalidade de cinza.

O procedimento subsequente adotado neste método de aplicação da técnica de LS-PIV foi a verificação, para cada teste do ensaio, da ortogonalidade da imagem capturada. Este procedimento foi realizado com o auxílio do programas *Inkscape* 0.92 (gratuito e de código aberto), específico para a edição de imagens. O procedimento consistiu em utilizar a imagem capturada do gabarito de calibração de velocidade — que havia sido posicionado na área de estudo ao final de cada teste — e verificar, diretamente na foto, as distâncias relativas entre as marcações do gabarito. Desta forma, as filmagens completas dos testes que não apresentassem boa ortogonalidade da imagem do gabarito poderiam ser descartadas. Este procedimento foi adotado para que não fosse necessária a utilização de programas para retificação de imagens, o que poderia aumentar as incertezas do método aplicado na obtenção dos campos de velocidade. A FIGURA 29 mostra a verificação da ortogonalidade realizada a partir da imagem do gabarito diretamente no *software Inkscape*.

FIGURA 29 – Verificação de ortogonalidade de imagem



NOTA: Verificação de ortogonalidade realizada diretamente no programa *Inkscape* para um teste do ENSAIO 01.

Após a verificação da ortogonalidade das filmagens dos testes (ver APÊNDICE H) procedeu-se a separação de trechos de imagens sequenciais que pudessem ser

utilizados na etapa de implementação do *software* PIVlab (THIELICKE; E. STAMHUIS, 2014). Para cada teste foram separadas diversas sequências de imagens de 5 a 10 s de duração. O critério de escolha do trecho foi relacionado às características de espalhamento das partículas traçadoras (confetes de papel), que deveriam abranger de forma distribuída a área do escoamento estudada. Desta modo, foram descartados trechos das sequências de imagens do início e do final das filmagens, além de trechos onde o espalhamento dos confetes de papel não estivessem representativos para a utilização da técnica de LS-PIV.

A partir desta etapa do método foi utilizado o *software* PIVlab (THIELICKE; E. STAMHUIS, 2014) para o processamento das sequências de imagens de cada trecho selecionado e, com isso, após uma rotina de procedimentos do programa, obter os campos de velocidades e demais resultados auxiliares para a área de estudo. As rotinas realizadas diretamente no *software* PIVlab abrangem:

- a utilização de ferramentas de pré processamento de imagens para ajustes de cor e aplicação de filtros de ruídos de imagens para garantir nitidez e contraste das partículas, com objetivo de garantir uma menor influência de imagens de plano de fundo;
- a utilização de ferramentas de eliminação de áreas sem interesse (ou sem escoamento) para dinamizar o processamento computacional;
- o ajuste de parâmetros relativos a implementação da correlação estatística aos pares sequenciais de imagens (tamanho da janela de interrogação/ passo de busca, método de resolução, quantidades de “passadas” de correlação, método de interpolação das janelas, etc.);
- a utilização de ferramenta para verificação, substituição e eliminação de vetores espúrios;
- a calibração da velocidade a partir da imagem do gabarito utilizado no teste e da atribuição da taxa de fps (*frames*/quadros por segundo);
- a extração dos resultados por meio de representação gráfica quantitativa, vídeo sequencial e arquivo de dados (.txt).

Encontra-se no APÊNDICE D um exemplo detalhado das rotinas realizadas diretamente no *softwares* PIVlab para um trecho de imagens sequenciais. Os parâmetros básicos de configuração para a implementação da técnica de PIV adotados nos testes realizados neste ensaio foram os mesmos apresentados no apêndice. As únicas variações de parâmetros utilizadas foram relacionados ao tamanho da janela

de interrogação/passos e a quantidade de passadas utilizadas na resolução da Transformada Rápida de Fourier (FFT). A TABELA 11 apresenta as três configurações diferentes adotadas nos testes do Ensaio 01. De modo geral, o tamanho da janela de interrogação/passos está relacionada à resolução espacial, sendo que, quando menor a dimensão da janela, maior é a resolução obtida. Cabe ressaltar que cada janela de interrogação/passos resulta num vetor de velocidade. Uma discussão detalhada sobre estes parâmetros será abordada no CAPÍTULO 04.

TABELA 11 – Resolução da janela de interrogação – Algoritmo PIV

Configuração	"Passada 1"		"Passada 2"	
	Janela de interrogação	Passo de busca	Janela de interrogação	Passo de busca
Config. 01	128 px	64 px	64 px	32 px
Config. 02	128 px	64 px	—	—
Config. 03	128 px	96 px	96 px	48 px

NOTA: Variações da configuração do tamanho da janela de interrogação/passos para implementação do algoritmo PIV. Medida das janelas em unidades de pixels. A resolução final corresponde à dimensão da janela de passo, sendo fixadas nos seguintes valores: 32 px para Config. 01; 64 px para Config. 02; 48 px para Config. 03

Para o ENSAIO 01 foram realizados quatro testes (dois para cada tipo de confete) de onde foram escolhidos três trechos de sequências de imagens de partículas para cada teste (doze trechos no total). Três configurações do tamanho da janela de interrogação/passos foram implementadas para cada um desses doze trechos de sequências de imagens. Desta forma, ao final desta etapa computacional, obtiveram-se 36 leituras de velocidades pelo método de LS-PIV. A TABELA 12 apresenta a nomenclatura adotada para diferenciação dos testes, onde as duas primeiras letras fazem referência ao tamanho do confete utilizado (CG e CP para confetes grandes e confetes pequenos, respectivamente), o algarismo numérico representa o teste realizado (de 1 a 4) e a letra final representa um dos três trechos do teste (A, B ou C). Cabe ressaltar que a resolução adotada e a seção de medição foram especificadas por extenso.

Após este processo, foi elaborado um comparativo entre estas distribuições de velocidades obtidas com o algoritmo do PIVlab e as velocidades medidas diretamente a partir do micromolinetete. Este comparativo foi realizado para as duas seções de monitoramento de velocidades, destacando, ainda, o tipo de traçador utilizado no testes.

De forma geral, a validação do método de LS-PIV consistiu em assumir as leituras realizadas pelo micromolinetete como referência para o cálculo das faixas de erros entre estes dois métodos de velocimetria. Utilizou-se, para tanto, o erro absoluto

TABELA 12 – Nomenclatura dos testes do Ensaio 01

Traçador	Teste	Trecho	Seção	Resolução
CG	1	A	Seção 01	Config. 01
	2			Config. 02
CP	3	B	Seção 02	Config. 03
	4	C		

NOTA: Nomenclatura adotada para simplificar a identificação dos testes realizados na etapa de validação do técnica de LS-PIV. Exemplo: Terceiro trecho do teste 02 para seção 01 e resolução da janela de interrogação/passo de busca em 128/64 px — CG-2C Seção01/Congif.02.

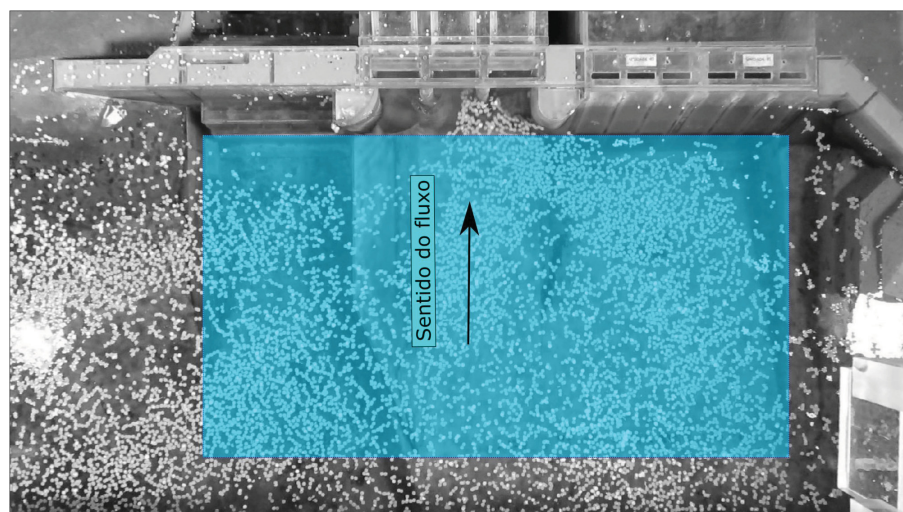
( $E_a$ ), o erro relativo percentual ( $E_r$ ) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE) no processo de análise dos testes realizados.

### 3.5.1.1 LS-PIV aplicado à área de aproximação do vertedouro

Como objetivo secundário do ENSAIO 01, após o processo de validação do método, foram determinados os campos de velocidades das regiões do reservatório próximas às estruturas hidráulicas com a utilização da técnica de LS-PIV.

Para este levantamento de velocidades foram utilizados os dados completos de um dos testes implementados na validação, não sendo necessário proceder novas filmagens da área do escoamento. Cabe ressaltar que o processo de validação utilizou-se de um conjunto de dados de apenas 18 pontos específicos de monitoramento (em duas seções) e que a caracterização completa da área de aproximação do reservatório utiliza todos os dados da região. Portanto, a utilização das mesmas filmagens da etapa de validação não compromete a caracterização da região. A FIGURA 30 mostra o local de aplicação do método de LS-PIV para obtenção dos campos de velocidade.

FIGURA 30 – Local de extração de resultados – ENSAIO 01



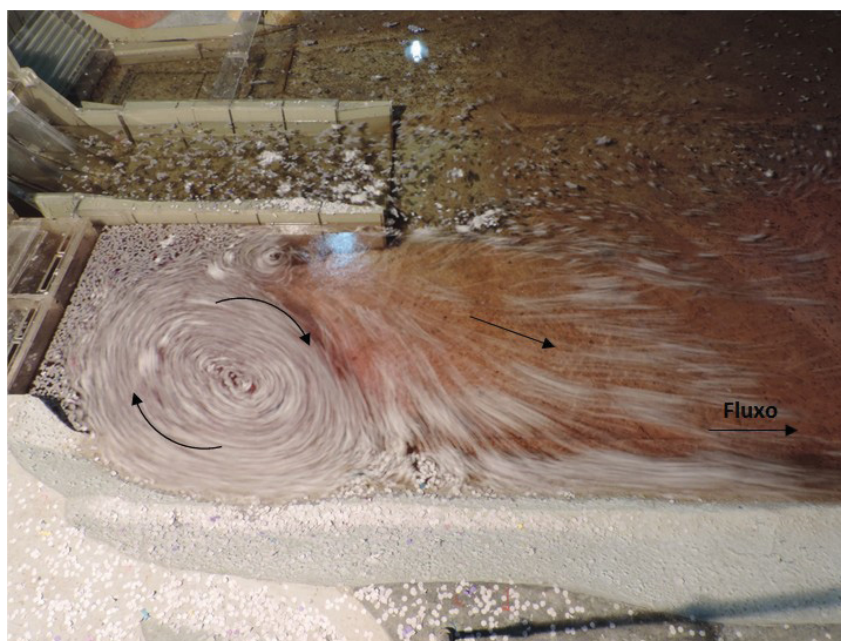
NOTA: Delimitação da área em frente ao vertedouro.

Os resultados obtidos do ENSAIO 01 foram: a magnitude da velocidade; as componentes  $u$  e  $v$  da velocidade; a representação campo vetorial; a representação da vorticidade; divergência; representação das linhas de corrente.

### 3.5.2 ENSAIO 02 – LS-PIV aplicado ao canal de fuga do circuito de geração

De acordo com CEHPAR (2016a) algumas configurações de nível de reservatório e vazões de operação das turbinas da casa de força criam recirculações intensas no escoamento do canal de fuga do circuito de geração. A FIGURA 31 mostra um ensaio realizado pelos pesquisadores do CEHPAR (durante a realização dos estudos contratados pela construtora Triunfo S.A.) que mostra a operação isolada da casa de força esquerda. O registro fotográfico temporizado demonstra qualitativamente o campo de velocidades da região. Além de processos de recirculação, esta configuração de operação hidráulica da usina apresentou intensa turbulência nesta região.

FIGURA 31 – Características do escoamento no canal de fuga do circuito de geração



FONTE: CEHPAR (2016a)

LEGENDA: Representação qualitativa de recirculação intensa no canal de fuga do circuito hidráulico de geração durante teste realizado pelos pesquisadores do CEHPAR em 2016.

Portanto, o objetivo do ENSAIO 02 foi reproduzir as condições observadas no teste apresentado no relatório técnico do CEHPAR para a região do canal de fuga do circuito de geração do modelo reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop (CEHPAR (2016a)) e verificar padrões de escoamento relativos aos fenômenos turbulentos, além da obtenção quantitativa do campo de velocidades para esta região.

No ENSAIO 02, foram utilizados para obtenção dos campos de velocidades apenas a técnica de LS-PIV validada no ENSAIO 01. Para este ensaio não foram realizados levantamentos de velocidade com medidores convencionais devido às características turbulentas do escoamento presente na região de estudo, que, de maneira geral, interferiram no funcionamento do equipamento, influenciando a rotação da hélice do micromolinete.

A configuração hidráulica da UHE Sinop para este ensaio foi baseada na operação isolada da casa de força com a utilização de apenas um grupo gerador, no caso, do grupo gerador intitulado UNIDADE 2, localizado exatamente a direita do vertedouro. A TABELA 13 apresenta o resumo da configuração hidráulica de operação que foi utilizada neste ensaio.

TABELA 13 – Configuração hidráulica de operação para o ENSAIO 02 (valores de protótipo)

Vazão de Engolimento ( $m^3/s$ )	Nível do Reservatório (m)	Nível de Jusante (m)	Unidade em Operação
810,0	302,00	272,68	UNIDADE 2

FONTE: (CEHPAR, 2016a)

NOTA: O nível de água do reservatório e o nível do rio a jusante foram referenciados ao nível do mar.

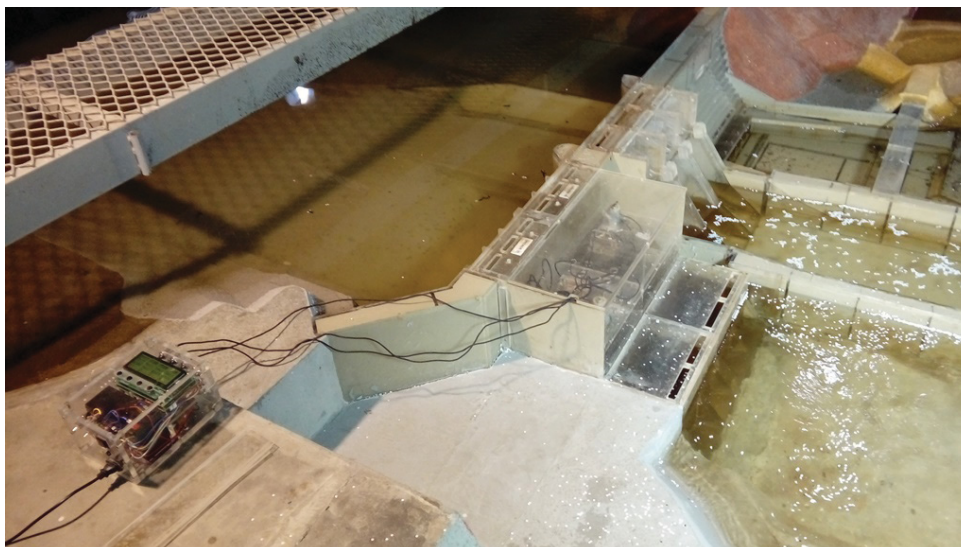
Os ajustes de parâmetros de operação hidráulica do modelo para o ENSAIO 2 exigiram procedimentos mais sensíveis em virtude da relação direta entre o nível do reservatório e a vazão turbinada do circuito de geração, que dificulta o processo de estabilização das condições hidráulicas do modelo.

Por este motivo, o controle do nível do reservatório em função da vazão turbinada foi realizado com a utilização de equipamentos eletrônicos auxiliares acoplados diretamente à casa de força do modelo. Trata-se de um dispositivo dotado de um motor elétrico para controle de rotação das hélices existentes na casa de força. Desta forma, é possível modificar o nível do reservatório e, conseqüentemente, a vazão turbinada, mediante o aumento ou diminuição da resistência ao escoamento proporcionado pela variação da velocidade de rotação das hélices. Foram utilizados os parâmetros de rotação das hélices retirados de CEHPAR (2016a). FIGURA 32 mostra este equipamento auxiliar instalado na casa de força do modelo.

Devido a baixa vazão de trabalho exigida para o ENSAIO 2, ajustada em 8,1 L/s em valores de modelo, foi utilizado o controle da vazão de entrada com o emprego do medidor tipo triangular, mais sensível para a faixa de operação em questão.

De forma semelhante como descrito no ENSAIO 1, foram realizadas as montagens e posicionamentos dos equipamentos de filmagem e iluminação para a aplicação da técnica de LS-PIV na região do canal de fuga do circuito de geração da UHE Sinop.

FIGURA 32 – Sistema de controle de nível/vazão



NOTA: Sistema eletrônico de controle de rotação das hélices da casa de força para controle de nível de reservatório e vazão turbinada do modelo.

Foram respeitadas as exigências de posicionamento da câmera digital quanto a ortogonalidade do plano de filmagem em relação ao escoamento e foram controladas as posições dos holofotes de iluminação para que não incidissem reflexos na área de estudos. A FIGURA 33 mostra os preparativos para o ENSAIO 2 com destaque para o processo de posicionamento da câmera digital sobre a região de interesse. Também foi utilizada a câmera digital CANON, modelo *PowerShot SX60 HS* de 16,1 megapixels pré-configurada para resolução Full HD 1.920 x 1.080: 29,97 fps e seleção AUTOMÁTICA para os ajustes óticos.

FIGURA 33 – Preparação do ENSAIO 02



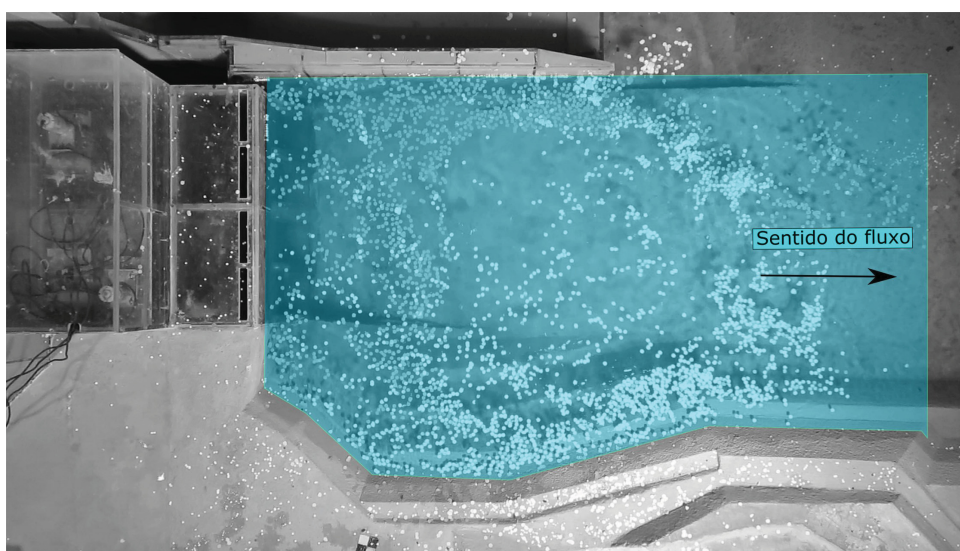
NOTA: Posicionamento do trilho e suporte da câmera digital sobre a área central da região de interesse com a utilização de prumo de centro e gabarito — o mesmo utilizado no ENSAIO 01.

Após a montagem dos equipamentos auxiliares e garantida da estabilidade dos níveis e vazões foram realizados seis testes em modelo reduzido para obtenção de velocidades com o emprego da técnica de LS-PIV, sendo três deles com a utilização dos confetes grandes e três com utilização dos confetes pequenos. Foram realizadas uma filmagem por teste para melhor organização dos processos subsequentes de tratamento das imagens.

Os procedimentos dos testes deste ensaio foram muito semelhante aos realizados no ENSAIO 01 e podem ser descritos de forma resumida pelas seguintes etapas: acionamento prévio da filmagem do teste; lançamento manual dos traçadores de confete de papel na área de interesse; posicionamento do gabarito de calibração de velocidades na área de estudos; finalização da filmagem do teste.

Após o término dos procedimentos da técnica de LS-PIV realizados no modelo reduzido, iniciou-se a etapa de processamento dos vídeos e implementação do *software* PIVlab para as sequências de imagens selecionadas e, com isso, após a utilização de ferramentas e rotinas específicas do programa, obter os campos de velocidades e demais resultados auxiliares para a área de estudo. Para isso foram utilizados os parâmetros de programa validados no ENSAIO 01. A FIGURA 34 mostra a delimitação da área de aplicação da técnica de LS-PIV para o canal de fuga do circuito de geração do modelo reduzido.

FIGURA 34 – Local de extração de resultados – ENSAIO 02



NOTA: Delimitação da área de aplicação da técnica de LS-PIV.

### 3.5.3 ENSAIO 03 – LS-PIV aplicado à estrutura de desvio de segunda fase do rio

O ENSAIO 3 teve como base os estudos realizados por CEHPAR (2016b) para definição das geometrias das estruturas de jusante das adufas de desvio de segunda fase do rio. A referência do ensaio foi baseado na geometria e configurações hidráulicas

adotadas na ALTERNATIVA 7 do referido estudo, que consistia principalmente do monitoramento das pressões, erosões e velocidades de escoamento relacionadas às estruturas a jusante das adufas. Para este ensaio, a vazão de operação foi ajustada para o evento hidrológico de TR 50 anos (tempo de recorrência) correspondente a  $3.200 \text{ m}^3/\text{s}$  (valores de protótipo).

A FIGURA 35 apresenta a vista geral da região de jusante da barragem da UHE Sinop (foto de 2016) onde aparecem, de forma qualitativa, a partir do controle do tempo de exposição da câmera fotográfica, as regiões de recirculação nas proximidades das ensecadeiras de desvio do rio. A FIGURA 36 apresenta de forma mais específica os fenômenos turbulentos do escoamento no entorno da ensecadeira de jusante da margem direita do rio.

FIGURA 35 – Vista geral da região de jusante das estrutura de desvio de segunda fase do rio



FONTE: CEHPAR (2016a)

NOTA: Teste realizado no CEHPAR para monitoramento de pressões, velocidades e erosões das estruturas a jusante da barragem.

Portanto, o objetivo do ENSAIO 03 foi reproduzir as condições observadas no teste apresentado no relatório técnico do CEHPAR para as estruturas de jusante das adufas de desvio de segunda fase do rio do modelo reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop (CEHPAR (2016b)) e verificar, além da abordagem quantitativa dos campos de velocidades para esta região, aspectos relativos aos fenômenos turbulentos do escoamento.

Para o ENSAIO 03, de forma análoga ao ensaio anterior, foi utilizada apenas a técnica de LS-PIV validada no ENSAIO 01 para obtenção dos campos de velocidade e demais resultados auxiliares, sem que outros tipos de medidores fossem utilizados, devido à característica turbulenta do escoamento da região de interesse.

FIGURA 36 – Ensecadeira de jusante de desvio do rio



FONTE: CEHPAR (2016a)

NOTA: Representação qualitativa das velocidades do escoamento no entorno do paramento de jusante da ensecadeira de segunda fase de desvio de rio.

O resumo da configuração hidráulica de operação da usina para o ENSAIO 03 está apresentado na TABELA 14, tendo como diferença marcante, em relação aos estudos anteriores, o fato de não possuir reservatório formado a montante da barragem, sendo considerado o escoamento contido na calha do rio para estudos de desvio.

TABELA 14 – Configuração hidráulica de operação para o ENSAIO 03 (valores de protótipo)

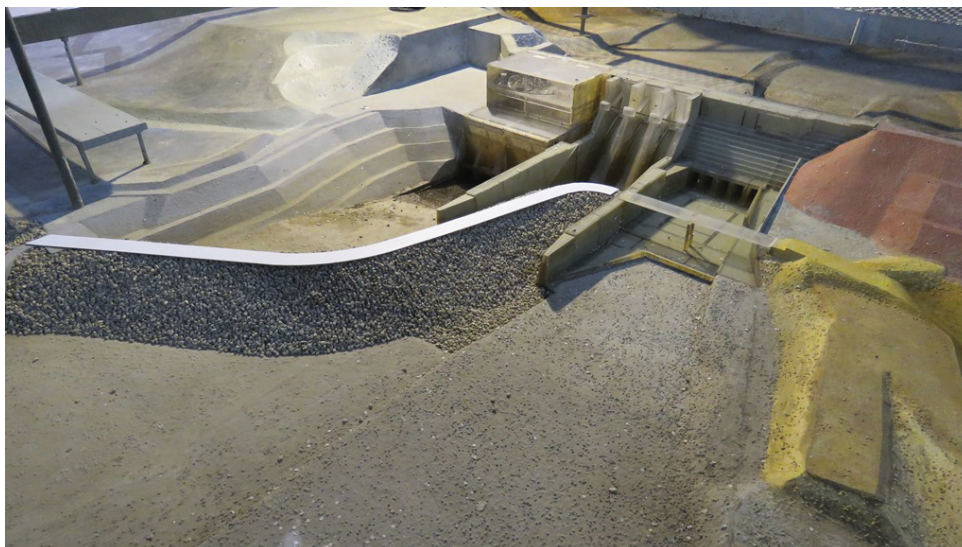
Vazão de Protótipo ( $m^3/s$ )	Nível de Montante (m)	Nível de Jusante (m)	Nível da Ensecadeira (m)
3.200	-	275,16	276,60

FONTE: (CEHPAR, 2016b)

NOTA: O nível do rio a jusante e nível da ensecadeira fazem referência ao nível do mar.

Diferente dos outros ensaios, para a configuração proposta foi necessário proceder a reconfiguração geométrica das estruturas de desvio de rio a jusante das adufas. Este trabalho consistiu da reconstrução da ensecadeira da margem direita do rio e do alteamento da ensecadeira da margem esquerda (da região de jusante da barragem). Este trabalho foi realizado mediante a elaboração de um gabarito de referência para a correta locação da ensecadeira da direita, seguida da construção propriamente dita com a utilização de material de granulometria NÚMERO V (diâmetro médio de 15,9 mm). A FIGURA 37 apresenta a configuração final desta ensecadeira.

FIGURA 37 – Configuração final da ensecadeira de jusante da margem direita



NOTA: Ensecadeira de jusante construída com material de granulometria número 5. Gabarito da crista da ensecadeira posicionado para verificação da construção do modelo.

Após o término da reconstrução do modelo foram realizadas as montagens e posicionamentos dos equipamentos de filmagem e iluminação para a aplicação da técnica de LS-PIV na região de interesse. A FIGURA 38 mostra os preparativos para o ENSAIO 3.

FIGURA 38 – Ensecadeiras de jusante para desvio de segunda fase



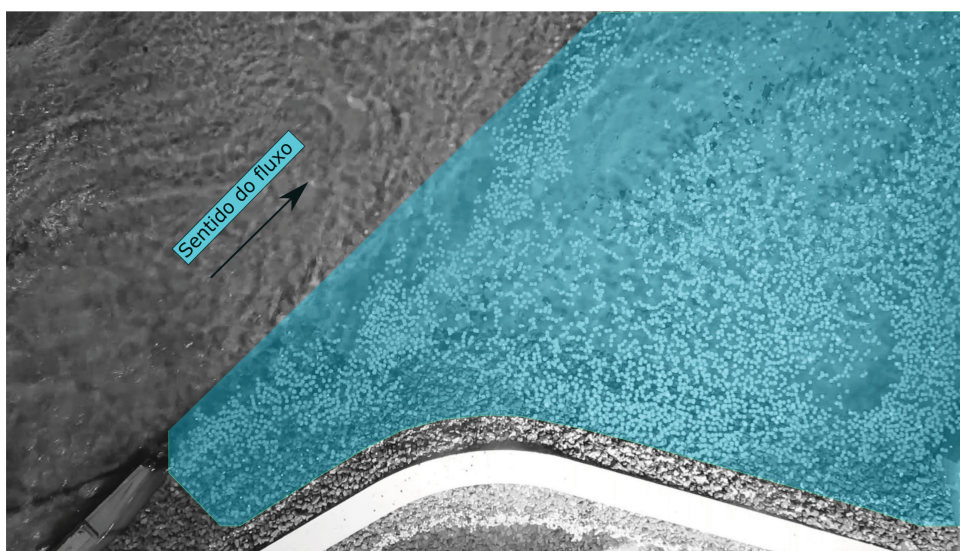
NOTA: Região de jusante da barragem configurada para o desvio de segunda fase do rio. A figura mostra o alteamento da ensecadeira esquerda e a configuração final da ensecadeira direita durante preparativos para o teste.

Tendo procedido as montagem dos equipamentos auxiliares e garantido a estabilidade dos níveis e vazões foram realizados dois testes em modelo reduzido para

obtenção de campos de velocidades com o emprego da técnica de LS-PIV, sendo um teste para cada tipo de confete.

As etapas seguintes da aplicação da técnica de LS-PIV, que compreendem o processamento de imagens, implementação do programa PIVlab e extração dos resultados para a região de entorno da ensecadeira de jusante, foram realizadas de forma análoga ao ensaios anterior, com a utilização dos procedimentos e parâmetros de programa validados no ENSAIO 01. A FIGURA 39 mostra o local de extração dos resultados para o presente estudo, que abrange a área do entorno da ensecadeira e a região de recirculação do escoamento.

FIGURA 39 – Locais de extração de resultados – ENSAIO 03



NOTA: Delimitação da área de aplicação da técnica de LS-PIV para o escoamento da região de jusante da Usina Hidrelétrica de Sinop.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O objetivo do capítulo é apresentar de forma separada os resultados dos quatro tópicos principais da aplicação direta do LS-PIV ao escoamento do modelo reduzido da UHE Sinop, que são: o resultado da validação do método a partir da escolha de traçadores, parâmetros e procedimentos de ensaio; o resultado da aplicação da técnica de LS-PIV para a região de aproximação do vertedouro; o resultado dos testes de caracterização do escoamento da região do canal de fuga do circuito de geração da usina; os resultados da aplicação da técnica de LS-PIV para o entorno da ensecadeira de jusante.

As principais discussões sobre a técnica de velocimetria por imagem de partícula estão presentes na seção de validação do método, onde são apresentadas as velocidades medidas por equipamento convencional e as velocidades obtidas por LS-PIV para algumas configurações específicas, bem como são discutidos os resultados destas comparações. Adicionalmente, consta nesta seção a discussão de efeitos indesejados observados em testes que não obtiveram bons desempenhos. Este conjunto de análises e discussões dentro do tópico de validação da técnica de LS-PIV solidificaram o entendimento do método para posterior aplicação direta nas outras regiões da UHE Sinop.

Finalmente, após a seção de validação, encontram-se dispostos os resultados da aplicação direta da técnica de LS-PIV para as três áreas da usina escolhidas para o estudo. Os testes para cada uma destas regiões apresentam características e objetivos distintos, que variam em função do comportamento do escoamento no entorno das estruturas hidráulicas presentes. Sendo assim, os três tópicos apresentam discussões distintas apesar da utilização dos mesmos parâmetros e procedimentos de teste validados anteriormente.

### 4.1 VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE LS-PIV

Os resultados dos testes de validação da técnica LS-PIV (ENSAIO 01) foram compostos pela análise comparativa entre as velocidades medidas pelo micromolinete e as velocidades processadas pelo algoritmo de PIV com a utilização dos dois tipos de traçadores.

Esta análise comparativa das velocidades foi realizada de forma separada para as seções de controle devido ao distinto comportamento hidráulico observado entre estas. Como consequência, cada seção forneceu, para cada tipo de traçador, parâmetros de validação que melhor se ajustaram às velocidades de referência. O

resultado final do processo de validação da técnica de LS-PIV foi obtido pela verificação dos melhores resultados entre as duas seções e, conseqüentemente, na constatação do conjunto de parâmetros utilizados para estes casos.

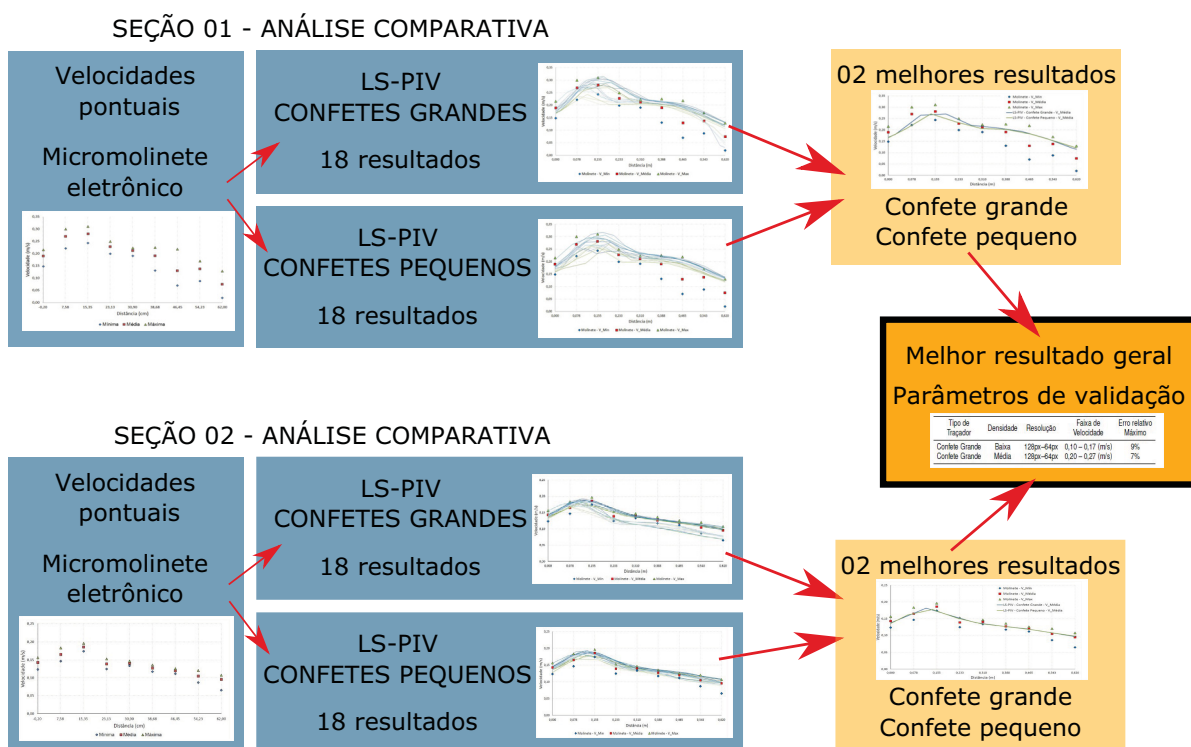
A análise comparativa dos resultados foi realizada pela verificação da raiz do erro quadrático médio (RMSE), pelo cálculo dos erros relativos percentuais ( $E_r$ ) e pela obtenção do maior erro absoluto ( $E_a$ ) de cada teste. Cabe ressaltar que as velocidades de referência para quantificação dos erros dos testes foram definidas pelas velocidades obtidas — pelo micromolinete — nos nove pontos de medição presentes em cada uma das seções de controle. Adicionalmente, foi adotada a velocidade medida pelo micromolinete (na profundidade de 1,5 cm) como sendo a mesma velocidade da superfície do escoamento, para comparação direta com os resultados do LS-PIV. Esta medida foi adotada em virtude da verificação do perfil vertical do escoamento, que se apresentou uniforme próximo à superfície. O resultado deste levantamento convencional de velocidades, incluindo o perfil de velocidades verticais medidos em um dos pontos (P16) foi detalhado no APÊNDICE E.

A partir das faixas de erro calculadas para cada levantamento de velocidades por processamento de imagem de partículas, foi possível traçar um comparativo entre os parâmetros de programa e as características de operação do teste no que se refere principalmente a:

- Faixa de velocidades:
  - Seção 01 — mais próxima ao vertedouro — velocidades maiores;
  - Seção 02 — mais afastada do vertedouro — velocidades menores.
- Tipo de confete utilizado:
  - Confete grande (papel comum);
  - Confete pequeno (papel sulfite).
- Resolução adotada na implementação do algoritmo de PIV:
  - 128/64 px em uma passada;
  - 128/64 px – 64/32 px em duas passadas;
  - 128/96 px – 96/48 px em duas passadas.
- Densidade superficial de partículas no escoamento (densidade baixa / média / alta – definida no APÊNDICE F).

A FIGURA 40 apresenta um fluxograma para melhor visualização das etapas de obtenção de resultados e análises realizadas para a determinação dos parâmetros de validação do LS-PIV.

FIGURA 40 – Fluxograma de resultados – Validação do método de LS-PIV



NOTA: Os parâmetros de validação do método de LS-PIV foram definido a partir de 36 análises comparativas para cada seções de monitoramento de velocidades.

Na sequência deste capítulo são abordados os resultados e discussões dos processos envolvidos na validação método LS-PIV. Na próxima seção, a partir da validação do método, serão apresentados os valores do campos de velocidades obtidos para a região de montante da barragem do modelo reduzido da UHE Sinop.

#### 4.1.1 Resultados dos testes de LS-PIV – Seção 01

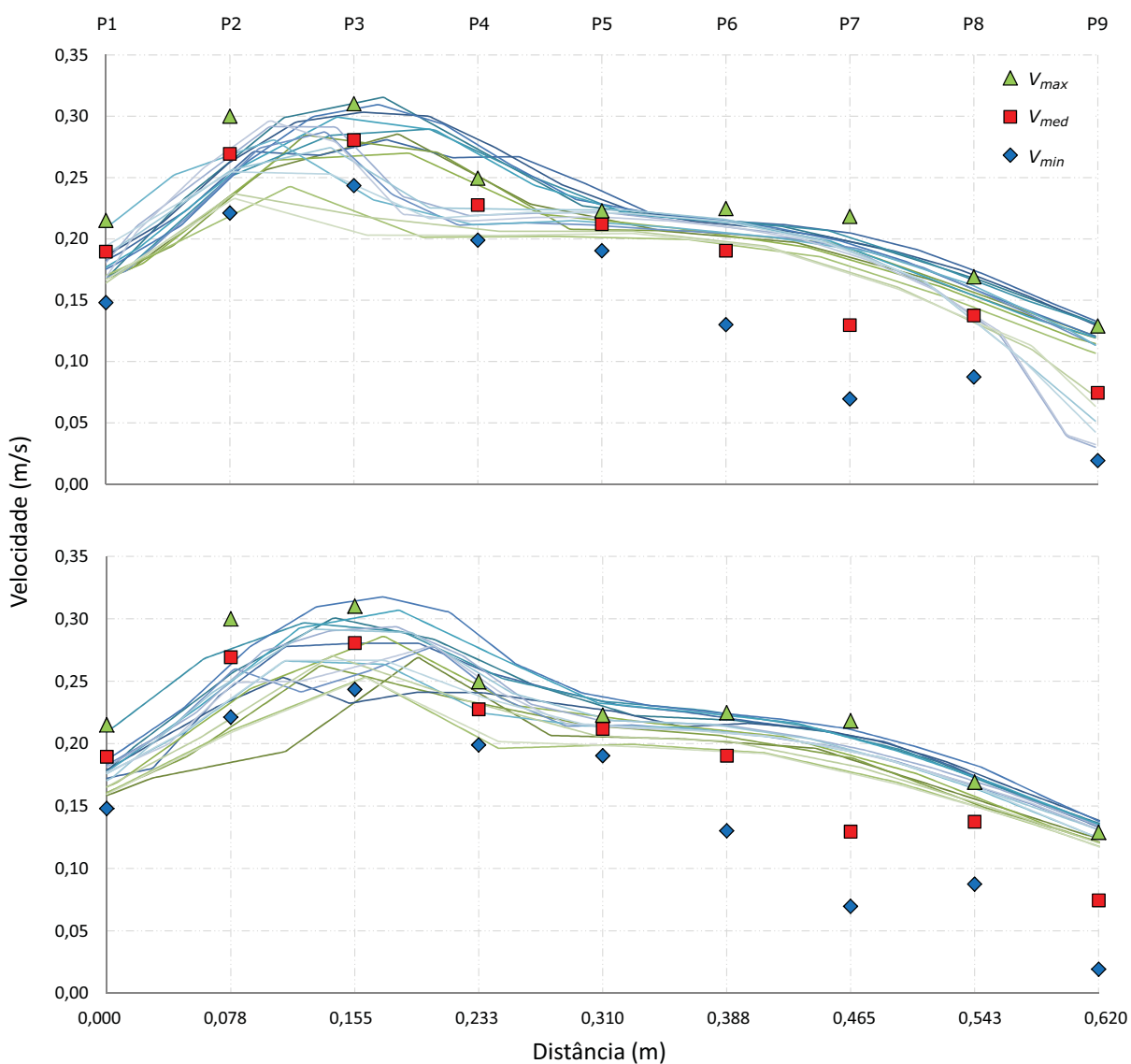
Conforme visto no CAPÍTULO 3, foram realizados dois testes com a utilização de confetes grandes e dois testes com o emprego de confetes pequenos como traçadores para técnica de LS-PIV. Cada um destes testes gerou três trechos de filmagens que puderam ser utilizados para aplicação do algoritmo de PIV. Para verificação do melhor desempenho do método, foram variados os parâmetros de resolução da correlação estatística em três valores distintos. Desta forma, cada um dos 12 trechos escolhidos (seis para cada tipo de confete) foram submetidos à três processamentos estatísticos com o emprego do programa PIVLab, perfazendo, assim, um total de 36 levantamentos distintos (18 para cada tipo de confete).

O programa PIVLab foi ajustado para fornecer 300 pontos de velocidades distribuídos uniformemente em toda a extensão da Seção 01 (que mede 62 centímetros de comprimento). Apesar da elevada resolução espacial apresentada pelo LS-PIV, a determinação das faixas de erro entre os dois métodos de medição foram realizados

apenas para os nove pontos lidos pelo micromolinetete na seção.

A FIGURA 41 apresenta os gráficos das velocidades médias obtidas pela técnica de LS-PIV distribuídas ao longo da Seção 01 para os 18 testes realizados com partículas traçadoras constituídas por confetes grandes (gráfico superior) e pequenos (gráfico inferior). Também foram inseridas as representações das velocidades pontuais mínimas, médias e máximas levantadas com o micromolinetete eletrônico (apresentadas no APÊNDICE E) para comparação dos dois métodos de velocimetria.

FIGURA 41 – Velocidades médias por LS-PIV – Seção 01



NOTA: Representação gráfica dos 18 levantamentos de velocidades médias ao longo da Seção 01 para CONFETES GRANDES (gráfico superior) e para CONFETES PEQUENOS (gráfico inferior) para aplicação da técnica de LS-PIV.

LEGENDA: Linhas contínuas representam as leituras de velocidades médias por LS-PIV. Marcações geométricas  $V_{max}$ ,  $V_{med}$  e  $V_{min}$  representam as medições de velocidade máximas, médias e mínimas (respectivamente) com a utilização do micromolinetete Delft. Indicações P1 a P9 na parte superior do gráfico mostram as posição dos pontos da Seção 01.

As diversas distribuições de velocidades apresentadas para ambos os traçadores dependeu basicamente da combinação dos seguintes fatores: resolução empregada para as dimensões da janela de interrogação/passos de busca; densidade de partículas traçadoras na superfície do escoamento; qualidade na execução do lançamento dos traçadores. A relação completa das configurações dos parâmetros de resolução e cálculo de erros dos tipos RMSE (raiz do erro quadrático médio) e  $E_a$  (erro absoluto) para cada uma das 36 medições foram disponibilizadas em formato tabular no APÊNDICE G. Além da identificação do teste com sua nomenclatura específica, outros aspectos secundários tais como tempo de duração do trecho utilizado no teste, características gráficas dos resultados, observações gerais quanto à densidade e espalhamento das partículas e a indicação quanto a existência de falhas de preenchimento durante a execução do teste, também estão representados neste apêndice.

A TABELA 15 apresenta de forma resumida apenas os intervalos de erros dos tipos RMSE (raiz do erro quadrático médio) e  $E_a$  (erro absoluto) observados para os dois tipos de traçadores de LS-PIV (dados retirados do APÊNDICE G).

TABELA 15 – Intervalos de erro – Medições LS-PIV – Seção 01

Tipo de Traçador	Quantidade de Medições	RMSE (m/s)	$E_a$ (m/s)
Confetes Grandes	18	0,025 – 0,039	0,053–0,075
Confetes Pequenos	18	0,031 – 0,046	0,052–0,085

NOTA: Faixas de erro do tipo RMSE e  $E_a$  extraídos das 36 medições de velocidades médias realizadas por LS-PIV para a Seção 01.

Os valores apresentados na TABELA 15 demonstraram que, de maneira geral, os RMSE e  $E_a$  calculados para os traçadores constituídos de confetes grandes foram mais baixos que valores observados para os confetes pequenos, indicando, com esta análise, que os confetes grandes tiveram um desempenho melhor nos testes de LS-PIV desta seção.

No entanto, a análise mais detalhada dos valores dos erros tabulados e das características dos teste apresentados no APÊNDICE G demonstram que, tanto o melhor teste com a utilização de confetes grandes, como o melhor teste com uso de confetes pequenos, apresentaram características e parâmetros semelhantes.

Os melhores ajustes para os testes de LS-PIV–CONFETES GRANDES foram observados no teste CG-1C de resolução de janela de interrogação/passos de 128/64 px. Como características principais de operação, este teste apresentou média densidade de partículas uniformemente distribuídas na superfície do escoamento, praticamente sem falhas ou discontinuidades na área da seção, o que lhe conferiu RMSE de 0,028 m/s e maior  $E_a$  de 0,053 m/s observados no ponto P7. Da mesma forma, os melhores ajustes

para os testes de LS-PIV–CONFETES PEQUENOS foram observados no testes CP-4B, também com resolução de janela de interrogação/passo de 128/64 px. Apresentou RMSE de 0,031 m/s e maior  $E_a$  de 0,052 m/s (ponto P7), se assemelhando aos valores observados para o teste CG-1C. A grande diferença observada entre os testes foi em relação ao comportamento das partículas traçadoras que, mesmo tendo apresentado, para ambos os testes, média densidade superficial, no teste com confetes pequenos ocorreram falhas (poucas) na distribuição das partículas devido a uma tendência de aglomeração observada especificamente na área da Seção 01.

A análise da TABELA 16, que apresenta os valores das velocidades e o resultado do cálculo de erro relativo e absoluto para estas duas melhores medições, demonstra que, para os pontos P1 e P2 — região de aproximação esquerda com interferência do muro submerso — foram observados valores subestimados na ordem de 10 a 20 % em relação a referência pontual. Os pontos P3 a P6 — porção intermediária da Seção 01 com interferências do vertedouro — tiveram valores de velocidades que orbitaram entre mais ou menos 7 % do valor de referência, apresentando assim, a região de melhor ajuste de velocidades para esta seção. Os pontos P7 a P9 — região da aproximação direita do vertedouro — apresentaram as maiores superestimções (de até 61 %), se aproximando dos valores máximos lidos pelo micromolinete.

Apesar dos valores dos erros relativos em torno da velocidade média apresentarem estas divergências, a distribuição de velocidades obtidas por LS-PIV ao longo da Seção 01, para os dois melhores ajustes, ficaram entre os valores de mínimos e máximos levantados pelo método pontual (micromolinete eletrônico).

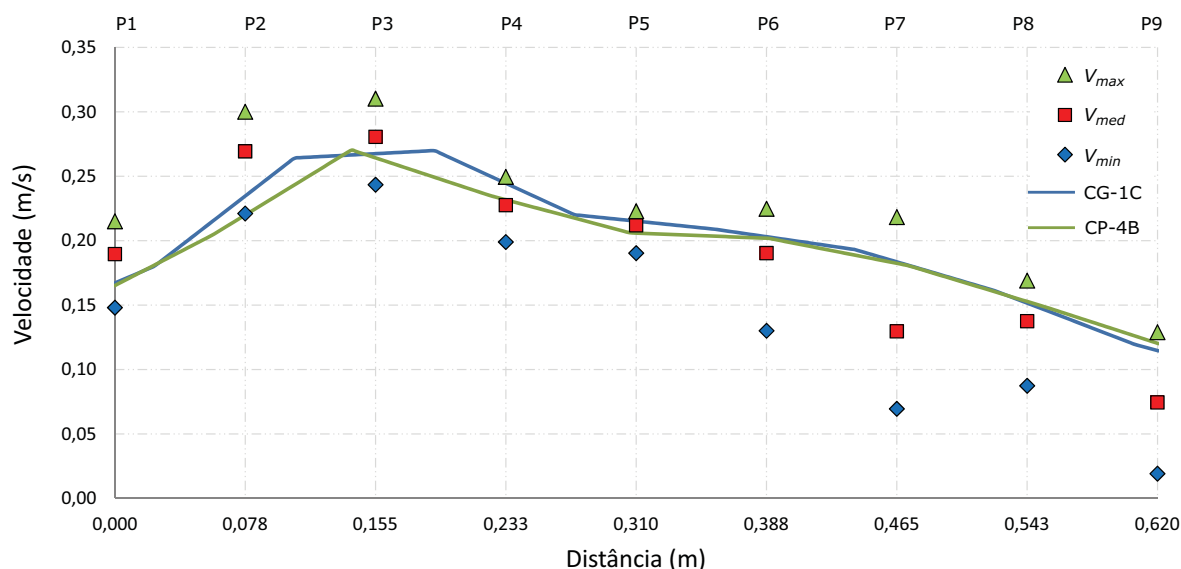
TABELA 16 – Comparativo de valores de velocidades – Seção 01

Micromolinete	LS-PIV Confete Grande				LS-PIV Confete Pequeno			
	Ponto	$V_{med}$ (m/s)	$V_{med}$ (m/s)	$E_a$ (m/s)	$E_r$ (%)	$V_{med}$ (m/s)	$E_a$ (m/s)	$E_r$ (%)
	P1	0,190	0,167	0,022	-12	0,165	0,024	-13
	P2	0,269	0,234	0,035	-13	0,219	0,050	-19
	P3	0,281	0,268	0,013	-5	0,264	0,017	-6
	P4	0,228	0,245	0,017	7	0,232	0,004	2
	P5	0,212	0,215	0,003	1	0,206	0,006	-3
	P6	0,190	0,203	0,013	7	0,202	0,012	6
	P7	0,130	0,183	0,053	41	0,182	0,052	40
	P8	0,138	0,151	0,013	10	0,152	0,015	11
	P9	0,074	0,115	0,040	54	0,120	0,046	61

NOTA: Valores dos erros absolutos e relativos pra os dois tipos de traçadores utilizados. Os valores de velocidade medidos pelo micromolinete serviram de referência para o cálculo do erro relativo.

A representação gráfica correspondente encontra-se na FIGURA 42, onde é possível verificar as características apontadas para as duas melhores medições realizadas para a Seção 01.

FIGURA 42 – Melhores leituras de velocidades médias por LS-PIV – Seção 01



NOTA: Representação gráfica do melhor levantamento de velocidades médias para cada tipo de traçador utilizado na técnica de LS-PIV para os testes da Seção 01.

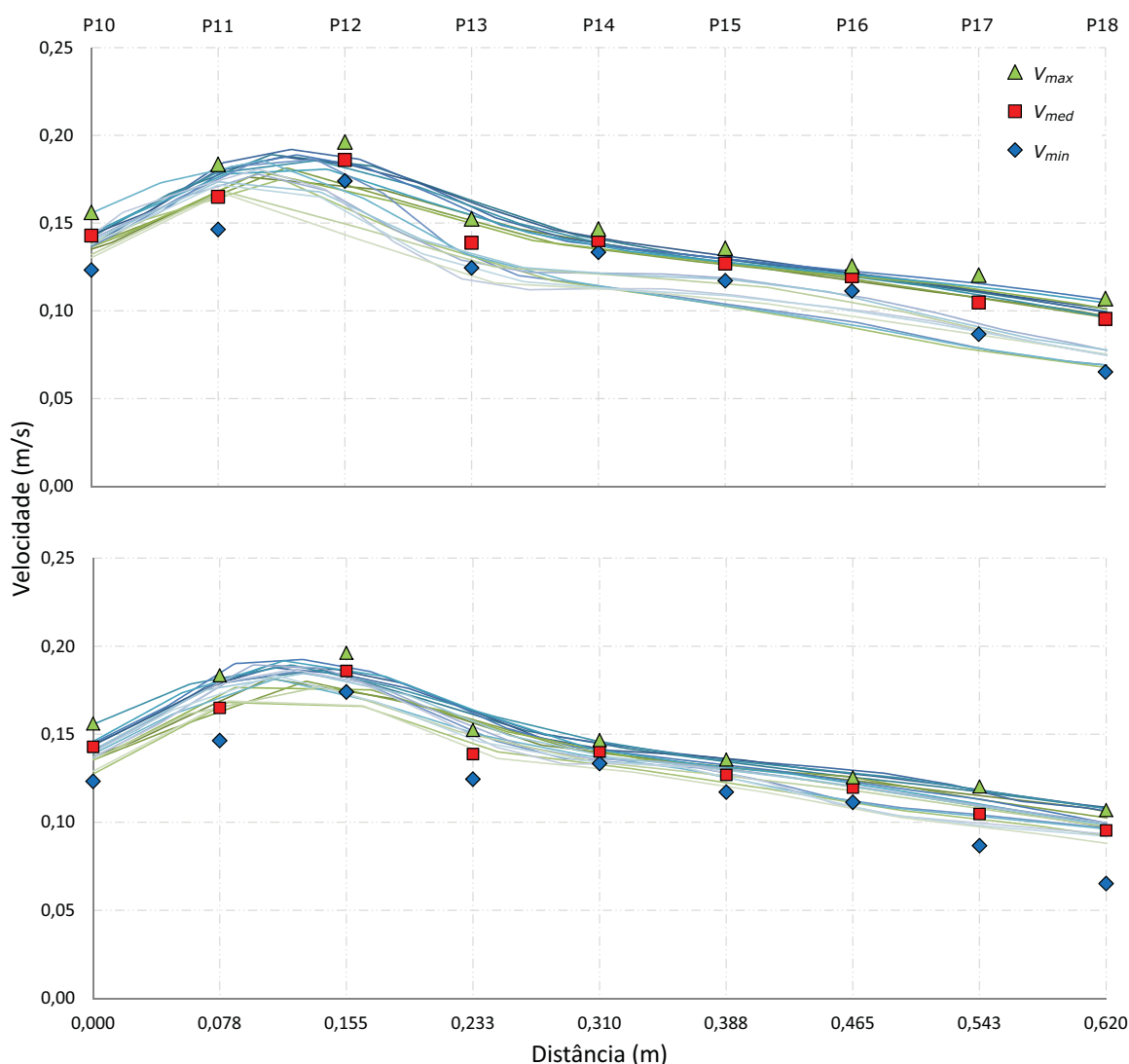
LEGENDA:  $V_{max}$ ,  $V_{med}$  e  $V_{min}$ : velocidade máximas, médias e mínimas (pontuais). Linhas contínuas (azul e verde): velocidades médias por LS-PIV com confetes grandes (CG-1C) e confetes pequenos (CP-4B). Indicações P1 a P9: posição dos pontos da Seção 01.

A amplitude de valores obtidos nesta seção demonstra, de forma geral, as interferências sofridas no escoamento por influência das estruturas hidráulicas presentes no entorno da região de aproximação do vertedouro, conforme detalhado no APÊNDICE E.

#### 4.1.2 Resultados dos testes de LS-PIV – Seção 02

A FIGURA 43 apresenta os gráficos das velocidades médias obtidas pela técnica de LS-PIV distribuídas ao longo da Seção 02 para os 18 testes realizados com confetes grandes (gráfico superior) e pequenos (gráfico inferior). Também foram inseridas as representações das velocidades pontuais mínimas, médias e máximas levantadas com o micromolinete eletrônico (apresentadas no APÊNDICE E) para comparação dos dois métodos de velocimetria.

FIGURA 43 – Velocidades médias por LS-PIV – Seção 02



NOTA: Representação gráfica dos 18 levantamentos de velocidades médias ao longo da Seção 02 para CONFETES GRANDES (gráfico superior) e para CONFETES PEQUENOS (gráfico inferior) para aplicação da técnica de LS-PIV.

LEGENDA: Linhas contínuas representam as leituras de velocidades médias por LS-PIV. Marcações geométricas  $V_{max}$ ,  $V_{med}$  e  $V_{min}$  representam as medições de velocidade máximas, médias e mínimas (respectivamente) com a utilização do micromolinete Delft. Indicações P10 a P18 na parte superior do gráfico mostram as posição dos pontos da Seção 02.

De forma análoga aos estudos realizados na seção anterior, foram disponibilizados os resumos dos resultados de cada uma das 36 medições em formato tabular no APÊNDICE G, onde é possível observar a identificação dos testes com suas nomenclaturas específicas, o tempo de duração dos trechos utilizados nos testes, a relação completa das configurações dos parâmetros de resolução, os cálculos de erros dos tipos RMSE (raiz do erro quadrático médio) e  $E_a$  (erro absoluto), as características gráficas dos resultados, observações gerais quanto à densidade e espalhamento das partículas e a indicação quanto a existência de falhas de preenchimento superficial.

A TABELA 17 apresenta de forma resumida apenas as faixas de erro dos tipos RMSE (raiz do erro quadrático médio) e  $E_a$  (erro absoluto) observadas para os dois tipos de traçadores de LS-PIV (dados retirados do APÊNDICE G).

TABELA 17 – Faixa de Erro – Medições LS-PIV – Seção 02

Tipo de Traçador	Quantidade de Medições	RMSE (m/s)	$E_a$ (m/s)
Confetes Grandes	18	0,007 – 0,023	0,014 – 0,043
Confetes Pequenos	18	0,007 – 0,013	0,012 – 0,025

NOTA: Faixas de erros do tipo RMSE e  $E_a$  das 36 medições de velocidades realizadas por LS-PIV para a Seção 02.

Os valores apresentados na TABELA 17 demonstraram que, de maneira geral, as medições por LS-PIV com utilização de confetes pequenos se mostraram mais ajustadas aos valores de referência, apresentando amplitudes menores de RMSE e  $E_a$  que os mesmos calculados para as medições feitas com confetes grandes. Os maiores erros apresentados por este tipo de traçador (confetes grandes) foram decorrentes da pouca uniformidade na forma do lançamento das partículas em um dos testes realizados, que acarretou no encavalamento dos traçadores e, por consequência, influenciou na leitura de velocidades pela técnica de LS-PIV. Este fato pode ser observado no gráfico (superior) da FIGURA 43 pelo feixes de linhas de distribuição de velocidades abaixo dos valores mínimos de referência e no APÊNDICE G pelos maiores valores de erros apresentados nos testes CG-2A, CG-2B e CG-2C. Na próxima seção discuti-se os erros provenientes de lançamento de partículas.

Apesar da constatação de problemas em um dos testes, ambos traçadores apresentaram baixos valores de erros para esta seção. A análise do melhor resultado para cada tipo de traçador demonstrou que as diferenças entre as características de operação e cálculo de erros entre os dois testes foram mínimas. Para o melhor testes de LS-PIV–CONFETE GRANDE (CG-1B) foram obtidos os valores do RMSE e do maior  $E_a$  correspondentes a 0,007 m/s e 0,014 m/s (no ponto P12). Para o melhor testes de LS-PIV–CONFETE PEQUENO (CP-4B) foram obtidos os valores do RMSE e do maior  $E_a$  correspondentes a 0,007 m/s e 0,013 m/s (também no ponto P12). As resoluções de dimensão de janela de interrogação/passos foram de 128/64 px para ambos os testes. Quanto as características de operação, os dois testes se apresentaram com baixa densidade de partículas distribuídas na superfície do escoamento e não possuíam falhas ou descontinuidades de traçadores na seção de monitoramento. A única diferença visualizada foi a tendência à aglomeração nos testes com confetes pequenos que, no caso, não ocorreram dentro da seção de monitoramento, não comprometendo os resultados.

A TABELA 18 apresenta os valores das velocidades e o resultado do cálculo de erro relativo e absoluto para estas duas melhores medições, para cada ponto de tomada de velocidade de referência para a Seção 02.

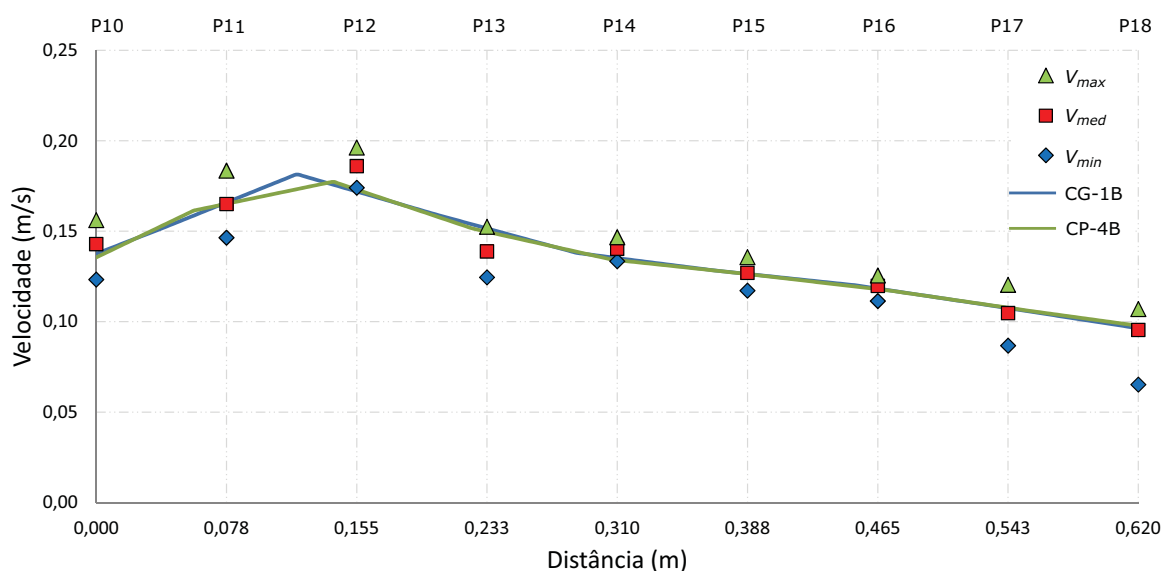
TABELA 18 – Comparativo de valores de velocidades – Seção 02

Micromolinete	LS-PIV Confete Grande				LS-PIV Confete Pequeno			
	Ponto	$V_{med}$ (m/s)	$V_{med}$ (m/s)	$E_a$ (m/s)	$E_r$ (%)	$V_{med}$ (m/s)	$E_a$ (m/s)	$E_r$ (%)
	P10	0,143	0,138	0,005	-4	0,135	0,007	-5
	P11	0,165	0,166	0,001	0	0,165	0,000	0
	P12	0,186	0,172	0,014	-8	0,173	0,013	-7
	P13	0,139	0,151	0,013	9	0,150	0,011	8
	P14	0,140	0,135	0,005	-4	0,134	0,006	-5
	P15	0,127	0,126	0,001	-1	0,126	0,001	-1
	P16	0,120	0,118	0,002	-2	0,118	0,002	-2
	P17	0,105	0,107	0,002	2	0,107	0,003	3
	P18	0,095	0,096	0,001	1	0,098	0,002	2

NOTA: A tabela apresenta os valores dos erros absolutos e relativos para os dois tipos de traçadores utilizados. Os valores de velocidade medidos pelo micromolinete serviram de referência para o cálculo do erro relativo.

A representação gráfica correspondente encontra-se na FIGURA 44, onde é possível verificar as características apontadas para as duas melhores medições realizadas para a Seção 02.

FIGURA 44 – Melhores leituras de velocidades médias por LS-PIV – Seção 02



LEGENDA:  $V_{max}$ ,  $V_{med}$  e  $V_{min}$ : velocidade máximas, médias e mínimas (pontuais). Linhas contínuas (azul e verde): velocidades médias por LS-PIV com confetes grandes (CG-1B) e confetes pequenos (CP-4B). Indicações P10 a P18: posição dos pontos da Seção 01.

As análises das tabelas e gráficos de resultados para a Seção 02 mostram que ambas as medições de velocidade por LS-PIV escolhidas acima se ajustam muito bem aos valores pontuais de referência. Este fato pode ser comprovado observando-se os erros relativos apresentados na TABELA 18 que, diferente dos resultados mostrados para a Seção 01, apresentaram o maior erro relativo em torno de 9 %. De maneira geral, a maioria dos valores referente ao cálculo do erro relativo foi inferior (em módulo) a 5 % para ambos os testes. No entanto, pode-se atribuir uma pequena superioridade na utilização de traçadores constituídos de confetes grandes se considerado aspectos de lançamento e homogeneidade de distribuição das partículas na superfície do escoamento.

#### 4.1.3 Resultado da validação do LS-PIV

A partir da análise dos resultados obtidos para as duas seções de monitoramento de velocidades foram tiradas conclusões a respeito das melhores configurações para a aplicação da técnica de LS-PIV para o modelo reduzido em questão.

Os resultados extraídos da Seção 01 demonstraram elevados erros relativos percentuais decorrentes das características do escoamento desta região. Com velocidades mais elevadas (atingindo 0,28 m/s de média) ocasionadas pelas interferências impostas pelas estruturas hidráulicas do entorno, esta seção apresentou resultados adequados (abaixo de 7 % de erro relativo) apenas para os pontos centrais da seção (P3 a P6), em condições de densidades médias de espalhamento de partículas e baixa resolução espacial da janela de interrogação (128/64 px).

A Seção 02 (mais afastada do vertedouro) apresentou os melhores resultados com relação às velocidades de referência medidas com o micromolinete. Com faixa de velocidades média abaixo de 0,20 m/s, esta seção do escoamento aceitou de forma adequada os dois tipos de traçadores para aplicação do LS-PIV. No entanto, tendo como base as características de lançamento dos traçadores, foi possível observar um melhor desempenho na utilização dos confetes grandes por apresentarem distribuições mais homogêneas sobre a superfície do escoamento. Os melhores resultados foram em condições de baixas densidades de partículas sobre a superfície do escoamento e baixa resolução espacial (128/64 px).

As análises realizadas para as duas seções resultaram no conjunto de parâmetros e características para as faixas de velocidades ensaiadas. A TABELA 19 apresenta as configurações de validação para utilização da técnica de LS-PIV para o levantamento dos campos de velocidades relacionados às obras hidráulicas da Usina Hidrelétrica de Sinop.

TABELA 19 – Configurações validadas para aplicação do LS-PIV

Tipo de Traçador	Densidade	Resolução	Faixa de Velocidade	Erro relativo Máximo
Confete Grande	Baixa	128/64 px	0,10 – 0,17 m/s	9 %
Confete Grande	Média	128/64 px	0,20 – 0,27 m/s	7 %

NOTA: A utilização de traçadores constituídos de CONFETES GRANDES DE PAPEL COMUM apresentou o melhor desempenho em ambas as seções de monitoramento de velocidades. Deve-se, porém, compatibilizar a densidade de partículas sobre o escoamento (MÉDIA OU BAIXA) com a resolução da janela de interrogação (64 px final) para as faixas de velocidade correspondentes.

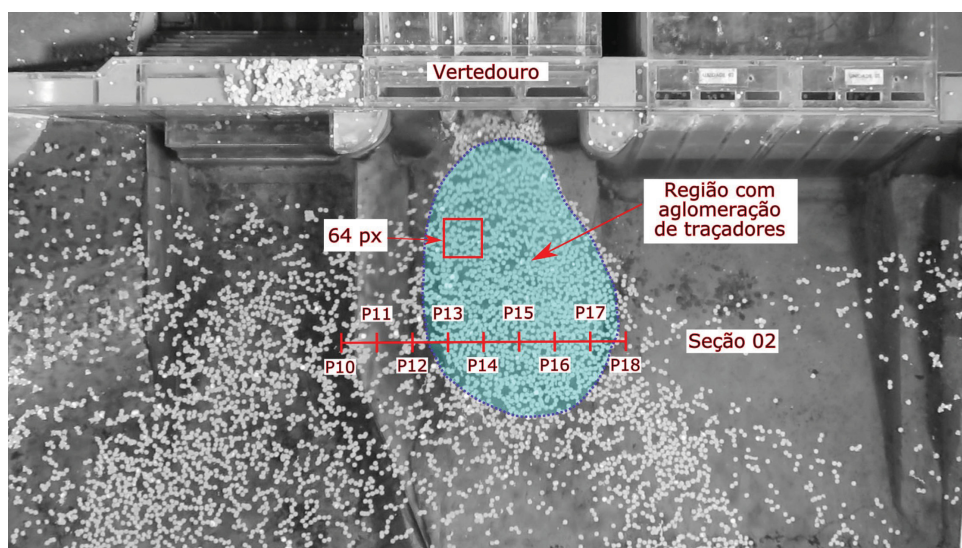
#### 4.1.4 Efeitos indesejados

A análise dos resultados para as seções de controle de velocidades mostraram que fatores tais como configurações de parâmetros do programa PIVLab, tipo de partícula traçadora, características do lançamento e comportamento do escoamento, comprometem os resultados de algumas medições de velocidades por LS-PIV. Isto pôde ser verificado principalmente na Seção 01, que apresentou erros relativos acima de 50 % em alguns casos. Portanto, discutiremos nesta seção as causas de leituras errôneas com a utilização da técnica de LS-PIV procurando identificar as consequências verificadas nos resultados destes testes.

Um dos principais fatores de erros de processamento de imagens na aplicação desta técnica de velocimetria está relacionada à não uniformidade no lançamento dos traçadores. De forma geral, este problema causa uma distribuição não homogênea de partículas sobre a superfície do escoamento, variando, assim, a densidade superficial no experimento. Os problemas no lançamento das partículas acarretam: regiões com ausência de partículas; densidades superficiais incompatíveis com a resolução da janela de interrogação; aglomeração e atraso das partículas por excesso de quantidade.

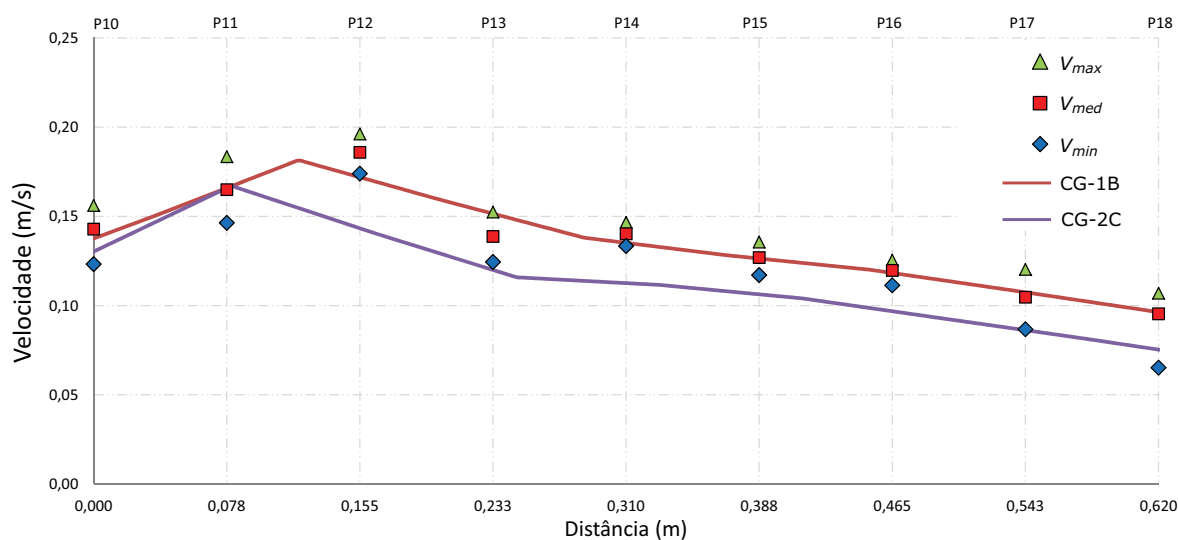
A FIGURA 45 apresenta a imagem da configuração geral de um teste onde ocorreram não uniformidades de lançamento por excesso de quantidade de partículas, causando aglomeração dos traçadores presentes na superfície do escoamento. Por consequência, estas partículas foram impedidas de seguir fielmente o fluxo, causando uma diminuição da velocidade registrada na seção monitorada. O reflexo deste comportamento anômalo pode ser observado na distribuição das velocidades ao longo da seção apresentadas no gráfico de resultados da FIGURA 46.

FIGURA 45 – Aglomeração de partículas traçadoras



NOTA: A figura destaca a região em frente ao vertedouro onde foi possível observar a aglomeração de partículas ocorrido por excesso de quantidade. O exemplo selecionado refere-se ao teste CG-2C (confetes grandes), onde foram analisados os resultados das distribuições de velocidade para a Seção 02, fazendo uso da configuração de 128/64 px para a janela de interrogação/passo de busca.

FIGURA 46 – Aglomeração dos traçadores – Seção 02

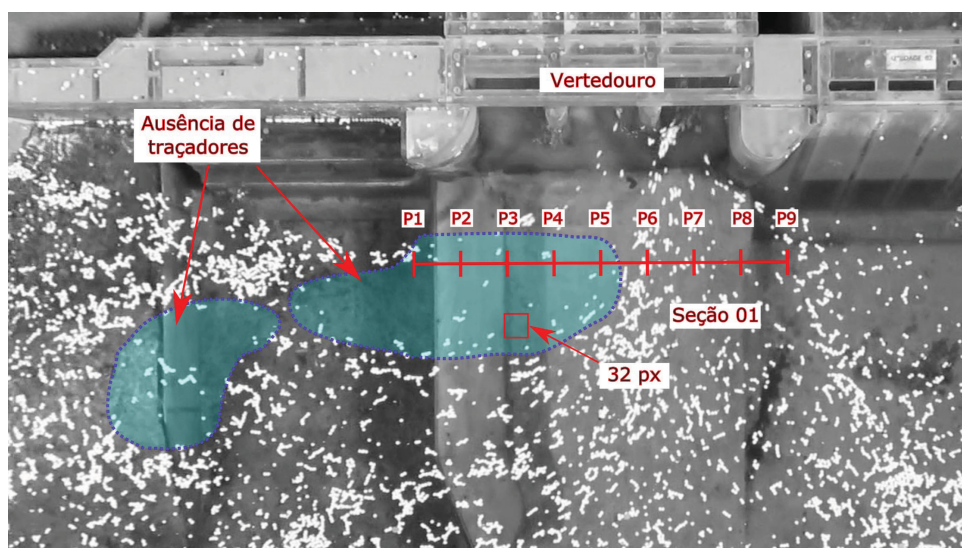


NOTA: Gráfico dos resultados de distribuição de velocidades do teste CG-2C em que foi verificada a aglomeração das partículas junto a Seção 02. Adicionalmente, o gráfico apresenta as leituras de velocidade obtidas com micromolinetes e a distribuição de velocidades do teste de validação da técnica de LS-PIV para a mesma seção (melhor resultado – teste CG-1B). É possível observar, no comparativo traçado, a diminuição da velocidade do traçador registrado pelo algoritmo do PIV a partir do ponto P12.

A FIGURA 47 apresenta a imagem da configuração geral de um teste onde ocorreram não uniformidades de lançamento por falta de partículas, causando a perda

da informação da velocidade do escoamento nas áreas falhadas. A falta de traçadores na superfície do escoamento é interpretada pelo algoritmo de PIV como ausência de velocidade. Outro inconveniente das regiões sem partículas traçadoras são os reflexos captados pela câmera que acarretam na geração de vetores espúrios durante o processamento das imagens.

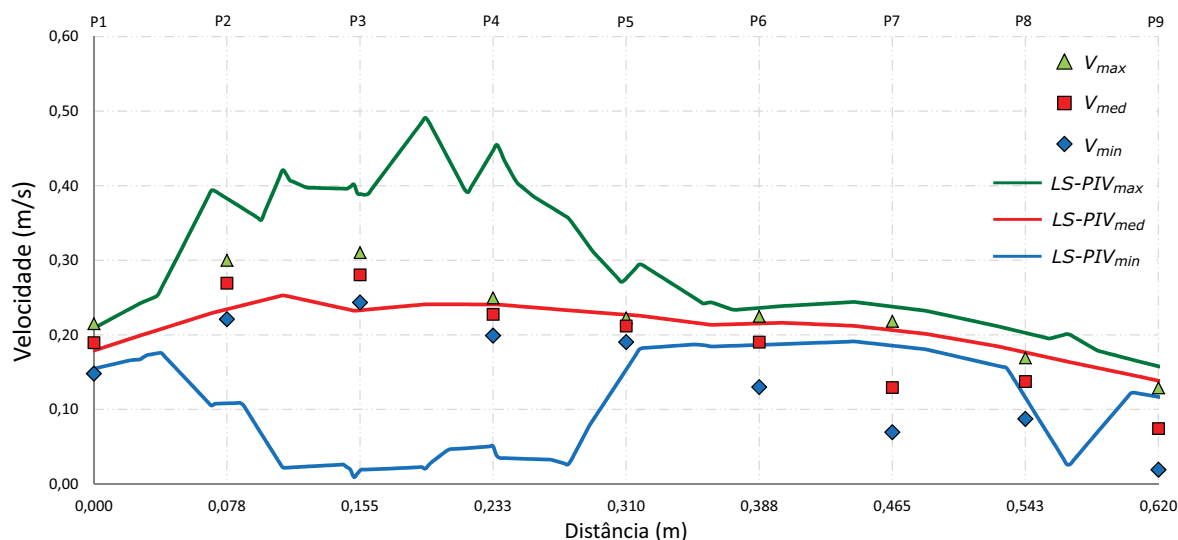
FIGURA 47 – Ausência de partículas traçadoras



NOTA: Regiões em frente ao vertedouro onde foi observado ausência de partículas traçadoras ocorrido por falha operacional de lançamento. O exemplo selecionado refere-se ao teste CP-3A (confetes pequenos), onde foram analisados os resultados das distribuições de velocidade para a Seção 01 fazendo uso do algoritmo de resolução final de 32 px para a janela de interrogação/ passo.

A FIGURA 48 apresenta os valores mínimos, médios e máximos da distribuição de velocidades do teste CP-3A em que foram verificadas falhas de lançamento por ausência de partículas junto a Seção 01. É possível observar, a partir da imagem capturada apresentada na figura anterior, que as áreas falhadas junto à seção de monitoramento acarretaram inconsistências numéricas que influenciaram no comportamento anômalo das distribuições de velocidades apresentadas no gráfico. Devido à essas falhas de lançamento, ficaram bem destacadas as inconsistências dos resultados apresentados entre os pontos P2 a P5, com valores máximos de velocidades acima das medições pontuais, chegando próximos a 0,50 m/s, e valores mínimos incoerentes para a região de aproximação do vertedouro que, no caso, ficaram próximos a 0 m/s.

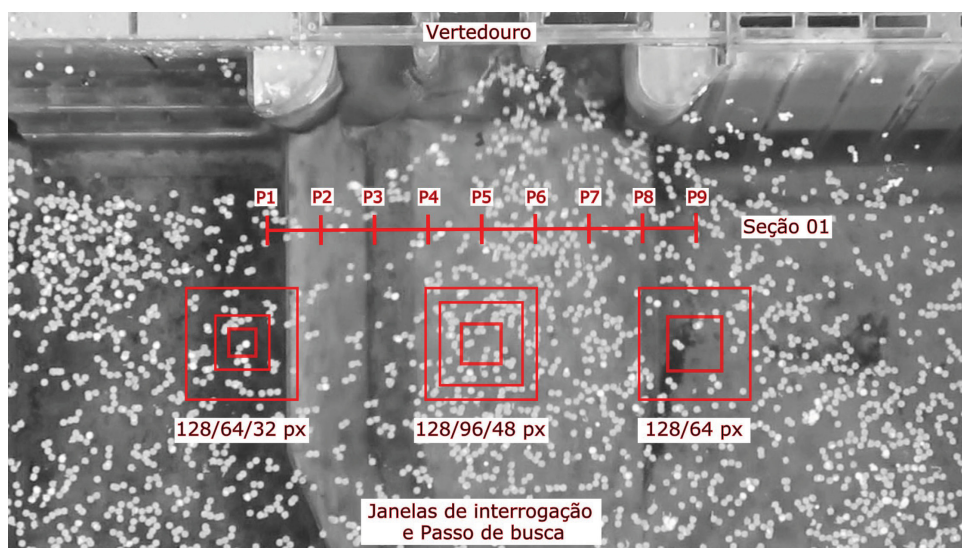
FIGURA 48 – Ausência de traçadores – Teste CP-3A / Seção 01 / Config. 01



**LEGENDA:** Marcações geométricas  $V_{max}$ ,  $V_{med}$  e  $V_{min}$  correspondem às medições de velocidade máximas, médias e mínimas (respectivamente) com a utilização do micromolinete Delft. Linhas contínuas (verde, vermelha e azul) representam os levantamentos de velocidades máximas, médias e mínimas por LS-PIV para o teste CP-3A da Seção 01 de 32 px de resolução final.

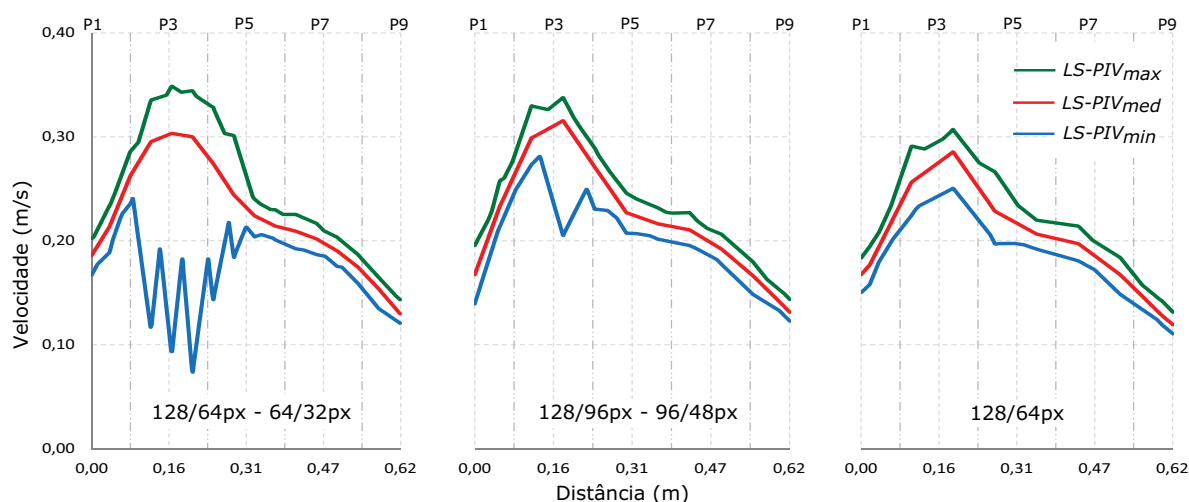
Outro aspecto observado durante o processamento dos testes que comprometeu alguns resultados foi a sensibilidade na escolha dos parâmetros da janela de interrogação/passo de busca que ocorre na fase computacional ligada à resolução da Transformada Rápida de Fourier (FFT). De certa forma, a dimensão da janela de interrogação/passo de busca está diretamente atrelada às características do escoamento que se deseja determinar os campos de velocidades por LS-PIV. Com relação a este fato, foram verificados nos testes realizados, que as áreas do escoamento que apresentavam velocidades maiores exigiram uma melhor interação entre a densidade de partículas em suspensão e os ajustes de parâmetros do tamanho da janela de interrogação/passo. No geral, os levantamentos de velocidades realizados para a Seção 01 — mais próxima ao vertedouro — demonstraram que os testes com menores janelas de interrogação/passo (maiores resoluções espaciais) não apresentaram resultados adequados para as regiões de escoamento mais velozes. Isto ocorreu devido à brusca redução da densidade de partículas imposta pelo aumento acentuado da velocidade do escoamento para as proximidades do vertedouro, causando áreas com ausência de traçadores em relação a resolução escolhida para o teste. Janelas de interrogação/passo maiores (menores resoluções espaciais) favoreceram a obtenção de velocidades para estas regiões. A FIGURA 49 e a FIGURA 50 apresentam, respectivamente, a representação gráfica da resolução da janela de interrogação/passo diretamente na imagem capturada para implementação do *software* PIVLab e o resultado gráfico da distribuição das velocidades ao longo da seção, para as mesmas imagens, porém, com diferentes parâmetros de resolução de janela de interrogação/passo de busca.

FIGURA 49 – Resolução da janela de interrogação



NOTA: A figura mostra as três configurações de janela de interrogação diretamente na imagem capturada para análise de LS-PIV. O ajuste de resoluções espaciais altas (janela de interrogação final de 32 px) se mostrou ineficiente para as características de escoamento e partículas utilizadas. Isto se deve pelo fato de que os espaços existentes entre partículas, em algumas áreas do escoamento, apresentaram distâncias maiores que as dimensões da janela de interrogação (32 px). Este problema de resolução foi minimizado para janelas de interrogação maiores — principalmente para 64 px — devido ao melhor ajuste desta ao espalhamento dos traçadores da técnica de LS-PIV.

FIGURA 50 – Resultados para diferentes resoluções – CG-1A / Seção 01

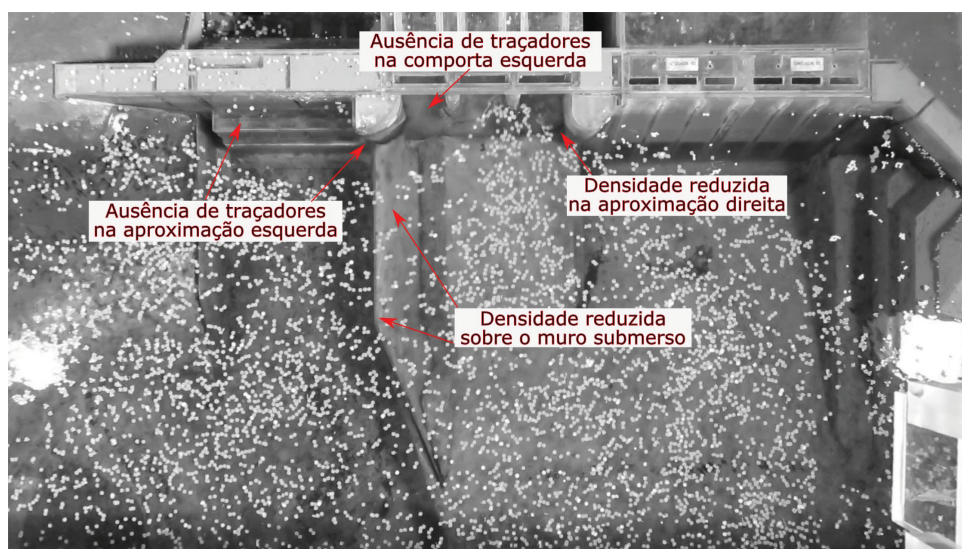


NOTA: O resultado gráfico do processamento das sequências de imagens para o exemplo da figura anterior demonstram as inconsistências numérica para ajustes incorretos da resolução da janela de interrogação.

LEGENDA: Linhas contínuas (verde, vermelha e azul) – levantamento de velocidades máximas, médias e mínimas, respectivamente, por LS-PIV para o teste CG-1A Seção 01 para as três resoluções de janela de interrogação/passos.

Algumas características físicas das estruturas hidráulicas em contato com o fluido causam perturbações complexas no escoamento que muitas vezes não podem ser analisadas a partir do comportamento da superfície do fluido. Com relação a este fato, foram verificados nos testes realizados no modelo reduzido da UHE Sinop que as regiões de aproximação do vertedouro apresentaram densidades muito baixas de partículas, muito provavelmente, devido às elevadas velocidades de aproximação e a existência de ondas de choque do escoamento sobre as estruturas submersas. Este efeito foi intensificado na região de aproximação do lado esquerdo do vertedouro devido, também, à interferência causada pelo muro submerso, que ocasionou um aumento das velocidades do escoamento nesta região, direcionando o escoamento preferencialmente para a comporta central do vertedouro. Como consequência direta deste fato, apareceram falhas de preenchimento de partículas na superfície do escoamento, o que acarreta em valores errôneos de velocidades, como exemplificado anteriormente. A FIGURA 51 apresenta uma imagem capturada para aplicação do LS-PIV que mostra diversas áreas do escoamento sem partículas traçadores devido às interferências causadas pelas estruturas hidráulicas do entorno.

FIGURA 51 – Interferências causadas por estruturas hidráulicas

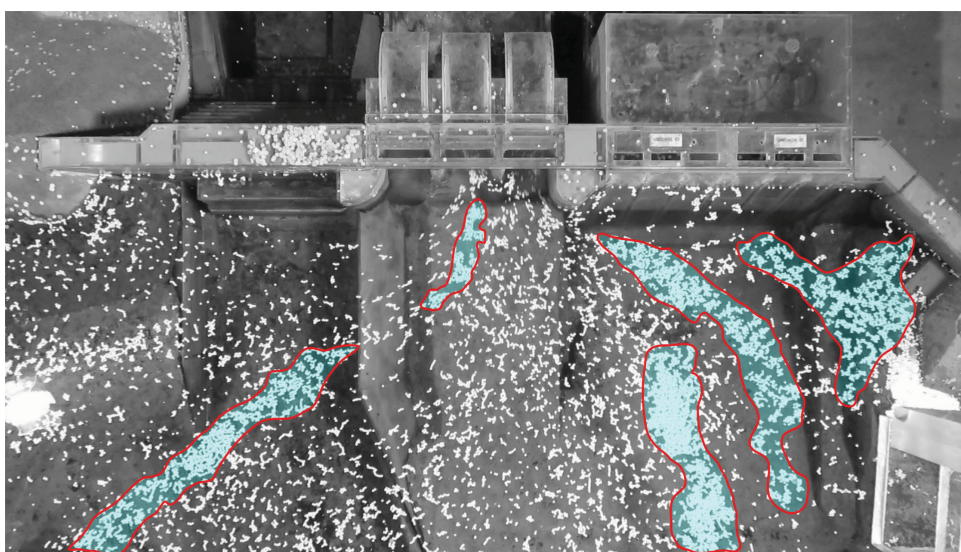


NOTA: Ausência de traçadores em regiões com velocidades de escoamento mais elevadas devido às interferências causadas pelas estruturas hidráulicas de aproximação do vertedouro.

Além das falhas de lançamento de partículas, podem ocorrer distribuições irregulares de traçadores a partir de efeitos de aglomeração existentes em alguns materiais utilizados. No presente estudo, os materiais constituintes dos dois tipos de confetes utilizados como traçadores para a técnica de LS-PIV diferem com relação a sua composição, o que acarreta em características físicas distintas para ambos. Deste modo, foram verificados que os confetes grandes apresentaram maior aderência ao escoamento por serem constituídos de papel com maior absorção. Por outro lado,

os confetes pequenos, confeccionados com papel sulfite, se apresentaram menos absorventes, aderindo menos ao escoamento, tornando-os mais sujeitos aos efeitos de aglomeração quando muito próximos à outras partículas traçadoras do mesmo material (FIGURA 52). Adicionalmente, foi verificado que o lançamento das partículas em regiões do escoamento muito distantes da área de levantamento de velocidades intensificou o processo de aglomeração, principalmente dos traçadores constituídos de confetes pequenos.

FIGURA 52 – Aglomeração de partículas traçadoras



NOTA: As áreas destacadas demonstram as aglomerações de traçadores constituídos por confetes de papel sulfite (confetes pequenos) interferindo na homogeneidade da distribuição destas partículas sobre o escoamento.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE APROXIMAÇÃO DO VERTEDOIRO

### 4.2.1 Considerações iniciais – ENSAIO 01

Após o processo de validação do método de LS-PIV diretamente no modelo reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop, foi realizada uma aplicação desta técnica de velocimetria com a utilização das configurações e parâmetros definidos na validação, para a região de aproximação do vertedouro.

Para tanto, foram utilizadas as filmagens dos testes realizados durante a etapa de validação, de onde foi selecionada uma única sequência de imagens que estivesse de acordo com as características definidas na validação do método. Portanto, foi necessário escolher testes que fizessem o uso de traçadores constituídos de CONFETES GRANDES, que estivessem com a intensidade da densidade superficial de partículas entre BAIXA e MÉDIA (para atender as duas faixas de velocidade validadas), e que não apresentassem grandes falhas na homogeneidade da distribuição dos traçadores sobre

o escoamento. Procedendo-se desta forma, foram escolhidas as imagens sequenciais do teste CG-1C para implementação da etapa computacional da técnica de LS-PIV.

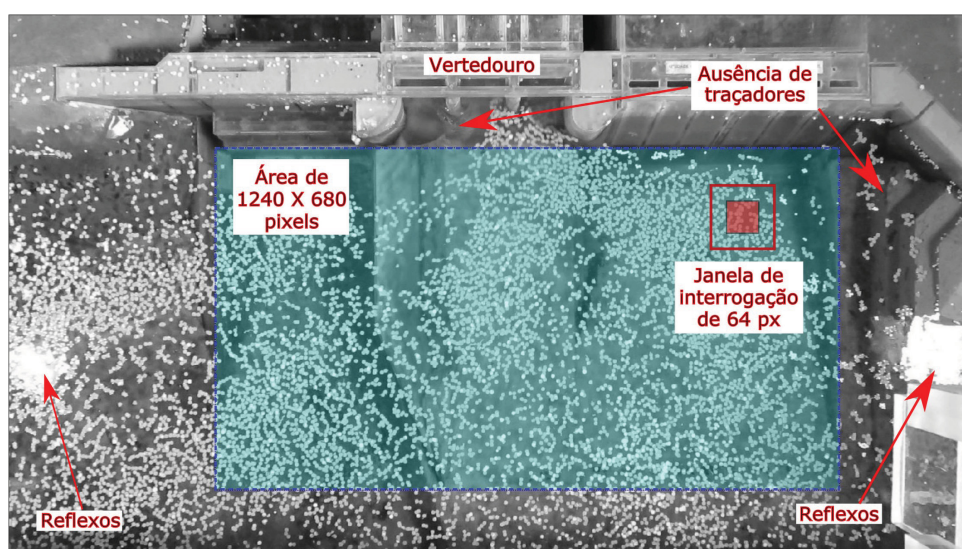
Desta forma, o programa PIVLab foi alimentado com as 301 imagens sequenciais deste teste, perfazendo o total de 10 segundos de filmagem do escoamento. A TABELA 20 apresenta o resumo dos principais parâmetros do teste. A FIGURA 53 mostra a delimitação da área de medição do campo de velocidades em frente ao vertedouro do modelo e demais detalhes pertinentes ao teste.

TABELA 20 – Configurações do teste – Ensaio 01

Configurações gerais	Unidade	Parâmetro
Tipo de traçador	-	Confete Grande
Densidade de partículas	-	Baixa/Média
Janela de interrogação	px	128
Passo de busca	px	64
Diâmetro do confete (10 mm)	px	7,71
Interrogação/Passo (em modelo)	cm	16,60 / 8,30
Área do levantamento	m <sup>2</sup>	1,124
Número de pares sequenciais	unidade	300
Tempo entre quadros	ms	33,367
Tempo total	s	10

NOTA: Lista das principais configurações utilizadas no teste para caracterização da região de aproximação do vertedouro do modelo reduzido da usina hidrelétrica de Sinop com a utilização da técnica de LS-PIV.

FIGURA 53 – Área de caracterização hidráulica – LS-PIV

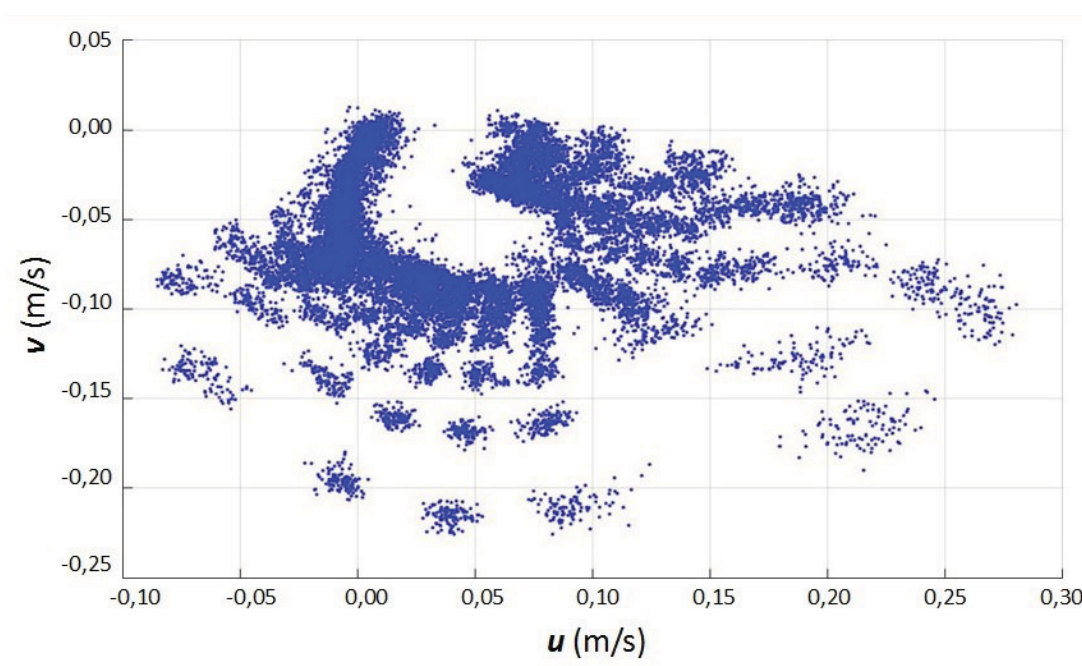


NOTA: Área retangular de dimensões 1.240 X 680 pixels definida em função do correto espalhamento das partículas em frente aos vertedouros. Procurou-se eliminar regiões sem traçadores e regiões com reflexos de iluminação incidindo na superfície do escoamento. A figura apresenta também a proporção da janela de interrogação de 128/64 px em relação a área selecionada.

#### 4.2.2 Extração dos resultados – PIVLab – ENSAIO 01

Tendo finalizado o processamento estatístico dos pares de imagens sequenciais dentro do programa PIVLab, iniciou-se a verificação da qualidade dos resultados, que foi baseada na interpretação do gráfico de dispersão disponibilizado pelo programa após o término dos cálculos. A FIGURA 54 apresenta os valores das componentes das velocidades  $u$  e  $v$  para cada vetor resultante do processamento das imagens.

FIGURA 54 – Gráfico de dispersão – componentes  $u$  e  $v$  da velocidade

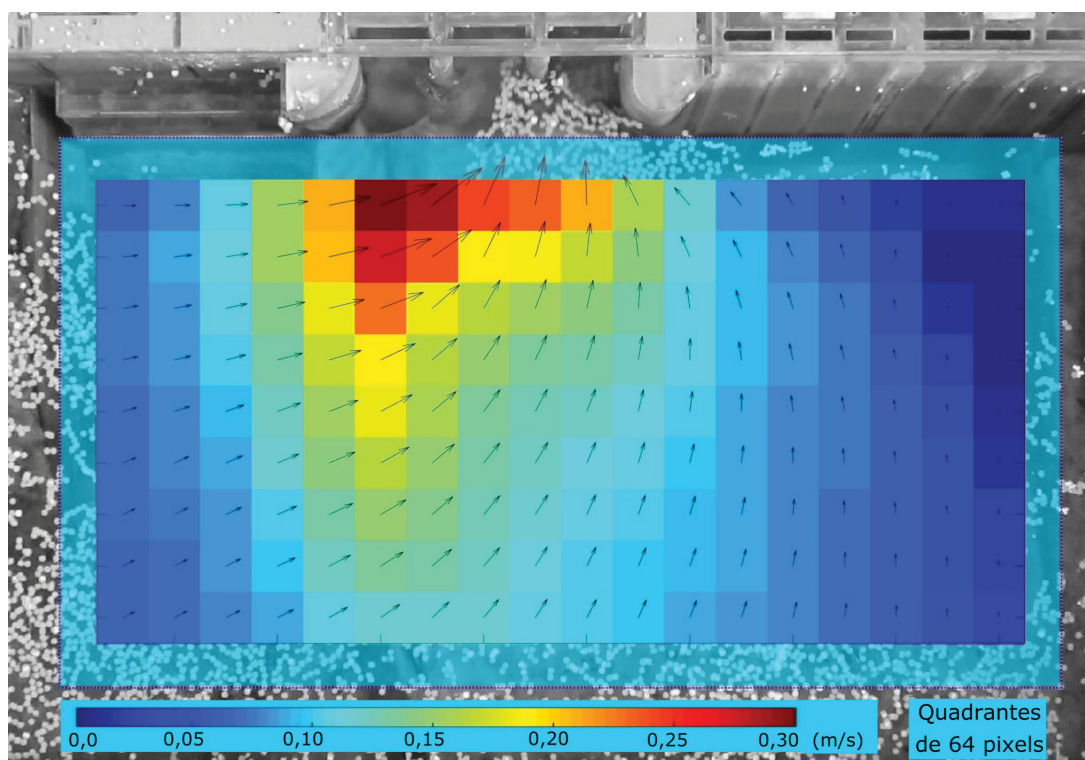


NOTA: O gráfico de dispersão para o teste aponta os limites máximos e mínimos das componentes de velocidade  $u$  e  $v$  dos vetores resultantes. As velocidades  $u$  variaram entre  $-0,10$  e  $0,30$  m/s, e as velocidades  $v$  variaram entre  $-0,25$  e  $0,05$  m/s, sem representação de *outliers*.

LEGENDA: Por convenção, valores positivos da componente  $u$  — para direita; valores positivos da componente  $v$  — para baixo.

Desta forma, sem haver a necessidade de tratamento de vetores espúrios, foram extraídos diretamente no PIVLab os valores médios dos campos de velocidade e demais resultados auxiliares (representação das linhas de corrente, vorticidade e divergência) para a área em estudo. Cabe ressaltar que o valor médio apresentado é formado pelos resultados dos 300 pares de quadros sequenciais correspondentes a 10 segundos da filmagem do escoamento selecionado e que a resolução espacial do resultado está vinculada ao tamanho final da janela de interrogação/ passo de busca, selecionada para 128/64 px neste teste. Isto significa que cada quadrante de 64 px receberá um único vetor resultante. A FIGURA 55 apresenta a média da magnitude do campo de velocidades para a região de aproximação do vertedouro subdividido pelos quadrantes de cálculo.

FIGURA 55 – Campo vetorial e magnitude do campo de velocidades

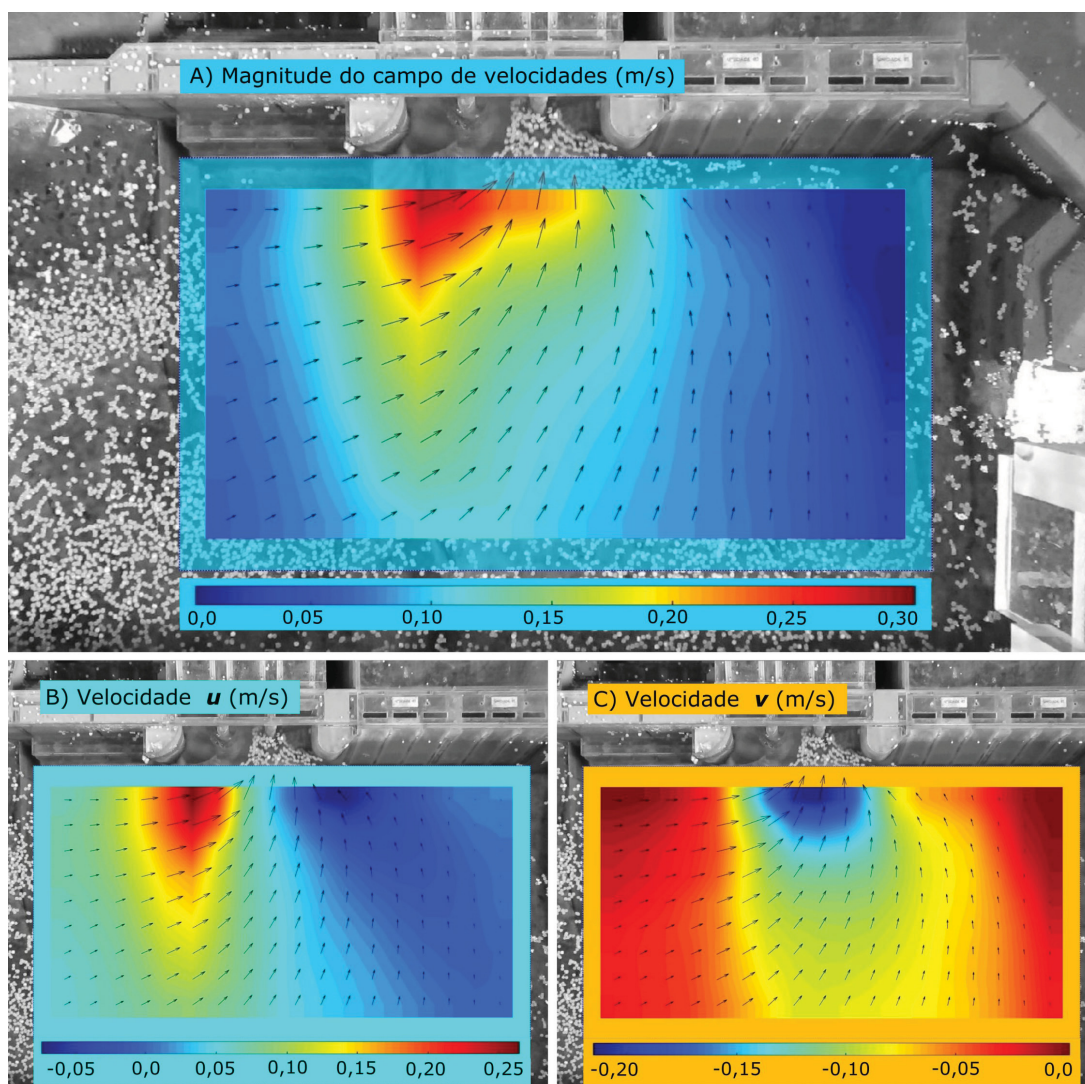


NOTA: A figura apresenta a escala cromática de velocidades que varia de zero a 0,30 m/s com resolução espacial de 64 px, resultantes da média de 300 pares de imagens. Cada quadrante possui um único valor de magnitude de velocidade e um vetor resultante, locado no centro do quadrante correspondente.

De forma geral, os resultados gráficos obtidos pelo PIVLab passam por processos de suavização e interpolação dos resultados dos quadrantes, permitindo, com isso, que valores intermediários possam ser extraídos para todo o campo de velocidades (ou outras variáveis em questão). A FIGURA 56 apresenta o campo vetorial e o campo de velocidades médio para a região de aproximação, além da representação gráfica do campo de velocidades componentes  $u$  e  $v$  para o mesmo teste. Nestes casos, os resultados gráficos já se encontram suavizados.

A análise dos resultados gráficos para o campo de velocidades demonstrou quantitativamente os fenômenos observados durante os testes realizados no modelo reduzido da UHE Sinop. Com isso, foi possível observar, além dos módulos de velocidade, a extensão da área de influência causada pelo muro submerso na distribuição do campo de velocidades superficiais desta região. A área de aproximação do vertedouro também teve sua velocidade determinada, mesmo que não representada em sua totalidade devido a borda de interpolação relativamente grande (região limítrofe sem informação vetorial), resultante da resolução adotada para a janela de interrogação/passo. A utilização dos gráficos dos campos das componentes vetoriais da velocidade destaca, de forma mais nítida, a aceleração do escoamento causada pelo muro submerso (para

FIGURA 56 – Campos de velocidades – PIVLab



NOTA: Resultados de velocidade extraídos pelo programa PIVLab para o teste CG-1C do Ensaio 01 para a região de aproximação do vertedouro da Usina Hidrelétrica de Sinop.

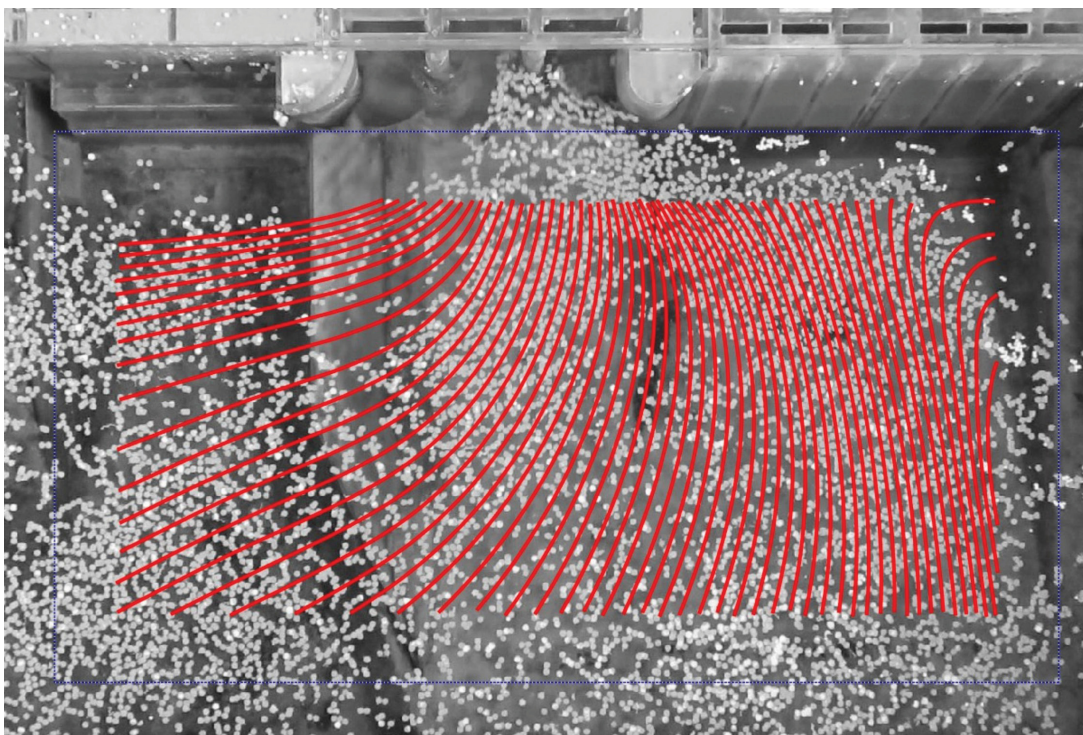
LEGENDA: Flechas: Vetor velocidade resultante. A) Representação gráfica da magnitude do campo de velocidades médio do teste. B) Representação dos resultados da componente  $u$  do campo de velocidades, onde adotou-se por convenção valores positivos para a direita. C) Resultados da componente  $v$  do campo de velocidades, onde adotou-se por convenção valores positivos para a baixo.

a componente  $u$ ) e a região do fluxo principal do vertedouro (para a componente  $v$ ). Adicionalmente, foi possível verificar a região com velocidades baixas em frente a tomada d'água da casa de força (lado direito).

Entre os resultados gráficos disponíveis, encontra-se na FIGURA 57 a representação das linhas de corrente do escoamento em frente às estruturas hidráulicas da usina. Com este recurso do programa PIVLab foram representadas as principais direções assumidas pelo escoamento. Como destaque, pode-se verificar, na porção esquerda da área de estudo, a direção quase paralela do escoamento — em relação ao

eixo da barragem — devido às interferências e acelerações causadas pelo muro submerso em frente a aproximação esquerda do vertedouro. Adicionalmente, constatou-se uma pequena tendência à recirculação localizada na extrema direita da área analisada.

FIGURA 57 – Linhas de corrente – PIVLab

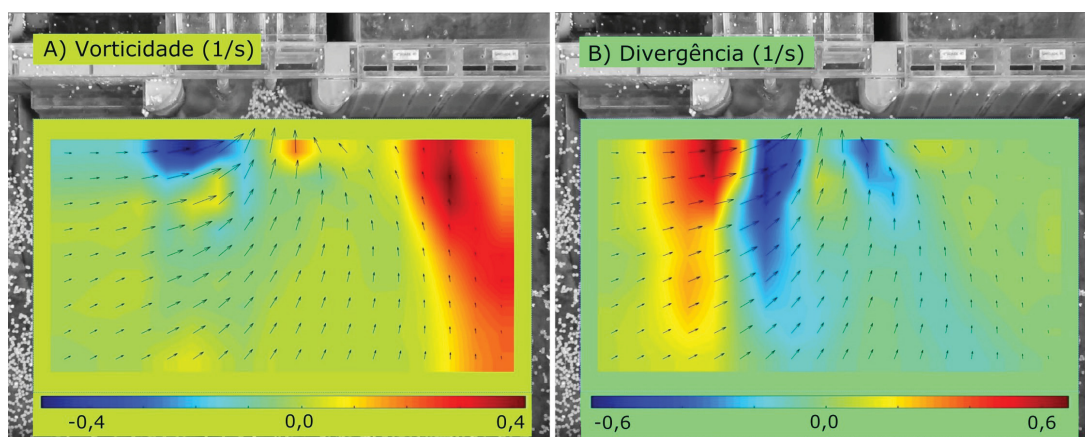


NOTA: Representação gráfica das linhas de corrente do escoamento na região próxima às estruturas hidráulicas da usina hidrelétrica de Sinop.

A vorticidade e a divergência também foram extraídos de forma gráfica com a utilização do programa PIVLab (FIGURA 58). De forma geral, esses resultados reforçam as conclusões apresentadas para identificação das regiões de recirculação e mudanças bruscas de direção do escoamento (vorticidade) e as regiões onde foram verificadas as maiores interferências ao escoamento, relacionadas ao muro submerso e ao vertedouro (divergência).

Além dos resultados gráficos, foram extraídas as informações relacionadas aos valores mínimos, médios e máximos gerais verificados na área de aplicação da técnica de LS-PIV. A TABELA 21 apresenta o resumo desse resultados em função da área, para cada campo de variáveis, para a média dos 300 pares de imagens analisadas neste teste.

FIGURA 58 – Outros resultados – PIVLab



NOTA: As duas representações gráficas fazem referência aos campos médios de cada variável para o mesmo teste.

LEGENDA: Flechas: Vetor velocidade resultante. A) Campo de vorticidade. B) Campo de divergência.

TABELA 21 – Resultados numéricos

Variável	Unidade	Valor Mínimo	Valor Médio	Valor Máximo
Módulo da velocidade	m/s	0,005	0,100	0,283
Velocidade $u$	m/s	-0,073	0,051	0,264
Velocidade $v$	m/s	-0,215	-0,067	0,002
Vorticidade	$s^{-1}$	-0,492	0,020	0,423
Divergência	$s^{-1}$	-0,653	-0,016	0,674

NOTA: Valores mínimos, médio e máximos extraídos da região de aproximação dos vertedouros para as variáveis relacionadas.

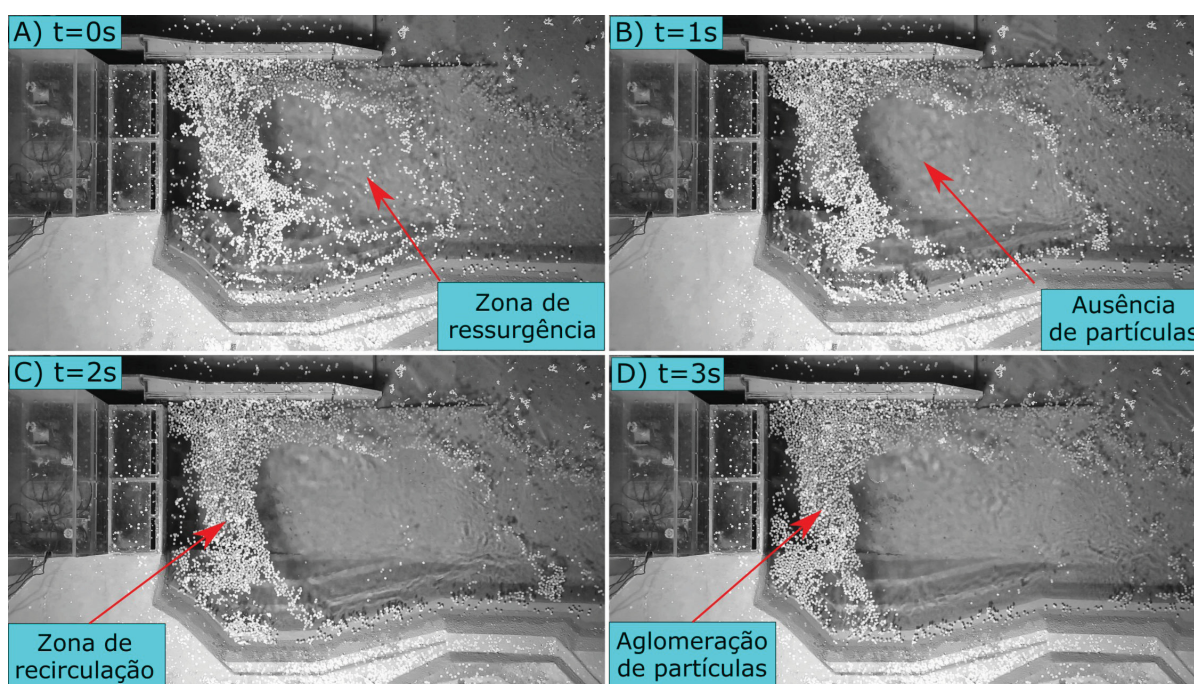
### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DO CANAL DE FUGA DO CIRCUITO DE GERAÇÃO

#### 4.3.1 Considerações iniciais – ENSAIO 02

A grande diferença dos testes realizados no ENSAIO 02 em relação ao ensaio anterior foi a característica turbulenta do escoamento causado pela restituição da vazão turbinada que acontece nesta região. Isto se deve à ressurgência da massa fluida que sai das turbinas e emerge praticamente no meio do canal, criando, além da constante ondulação vertical do escoamento, uma intensa recirculação junto à estrutura da casa de força. Adicionalmente, foi verificado um trajeto predominante da vazão emergente que, de maneira geral, vai de encontro aos taludes da margem direita do canal de fuga do circuito de geração. Portanto, os testes realizados neste ensaio tiveram o propósito de analisar o escoamento desta região, procurando detalhar as características globais do campo de velocidades do canal, a região de recirculação e a zona de ressurgência do escoamento com seu trajeto de propagação predominante.

Tendo em vista a intensa turbulência da região de aplicação do método, foram verificados dois comportamentos distintos das partículas traçadoras, que variaram de acordo com a área do canal em que foram realizados os lançamentos para o registro das imagens sequenciais. Como consequência, foram exigidos procedimentos mais cuidadosos para o lançamento dos traçadores para a aplicação da técnica de LS-PIV pois, de forma geral, partículas lançadas próximas às estruturas da casa de força assumiam movimentos circulatorios do escoamento desta região, com tempo de permanência de vários minutos e tendência ao encavalamento por excesso de partículas. Em contrapartida, as partículas que caiam junto à zona de ressurgência do escoamento eram rapidamente encaminhadas para fora do canal de fuga em poucos segundos, criando regiões de falhas de homogeneidade e ausência de flutuantes. A FIGURA 59 mostra as características principais desta área de estudos para o intervalo de três segundos de filmagem.

FIGURA 59 – Características gerais da região do canal de fuga



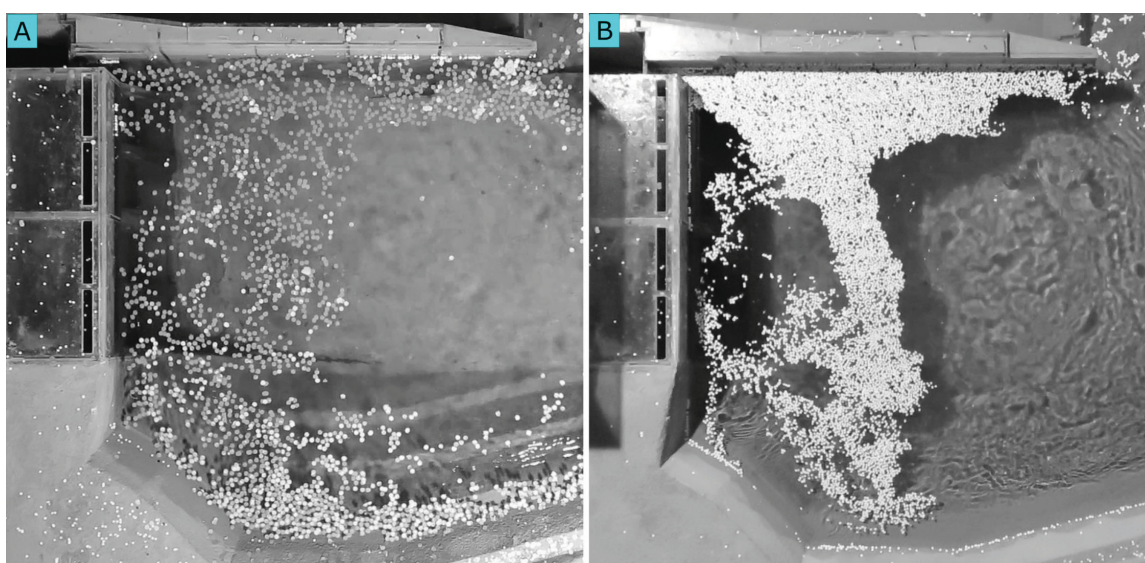
NOTA: Representação de quatro quadros com intervalos de um segundo cada para teste de levantamento de velocidades com a utilização da técnica de LS-PIV. Verifica-se, no curto intervalo de tempo (3 segundos), a deficiência na distribuição das partículas na região de emergência do fluxo turbinado. O escoamento mostrado nas figuras se desenvolve da esquerda para a direita.

LEGENDA: A) Zona de ressurgência do escoamento proveniente da operação das turbinas. B) Ausência de partículas causadas pela intensa turbulências e altas velocidades aparentes da zona de ressurgência. C) Posição da zona de recirculação em frente a casa de força. D) Local de intenso congestionamento de partículas, o que acarreta leituras subestimadas de velocidades pela técnica de LS-PIV.

Outra consideração pertinente às características turbulentas do canal de fuga é com relação ao tipo de traçador utilizado nos testes deste ensaio. Apesar de terem

sido realizados testes com os dois tipos de confetes (grandes e pequenos), a validação do método mostrou a maior eficiência dos traçadores constituídos de confetes grandes. Mesmo assim, foi realizada uma análise prévia das imagens de partículas de confetes pequenos onde foi constatado que o comportamento do escoamento desta região potencializou a ação aglomerante para este tipo de traçador, conforme pode ser visto na FIGURA 60. Por esta razão, os testes com a utilização de confetes pequenos não foram processados.

FIGURA 60 – Aglomeração no canal de fuga – Confetes pequenos



LEGENDA: A) CONFETES GRANDES bem distribuídos em frente à casa de força do circuito de geração. B) CONFETES PEQUENOS demasiadamente aglomerados devido ao comportamento do escoamento e às características intrínsecas do material do traçador (papel sulfite).

De maneira geral, a obtenção dos resultados das medições realizadas para a região do canal de fuga do circuito de geração com o emprego da técnica de LS-PIV exigiu maiores recursos e ferramentas do *software* PIVLab devido às características desta área de intensa turbulência do modelo reduzido da usina.

#### 4.3.2 Configuração do resultado – ENSAIO 02

Em virtude das características apresentadas para a área de aplicação da técnica de LS-PIV para o modelo reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop, foram extraídos resultados praticamente instantâneos dos campos de velocidade e parâmetros auxiliares relacionadas ao estudo proposto. Para isso, foi escolhido um teste que apresentasse suficiente densidade superficial de partículas na área de aplicação da técnica, mesmo que em um curto intervalo de tempo. No caso, foram utilizados para caracterizar a região a média do resultado do processamento de 11 imagens (10 pares sequenciais), o que corresponde a um intervalo de tempo de 333,667 milissegundos de duração. Os demais parâmetros utilizados para configurar o *software* PIVLab permaneceram os

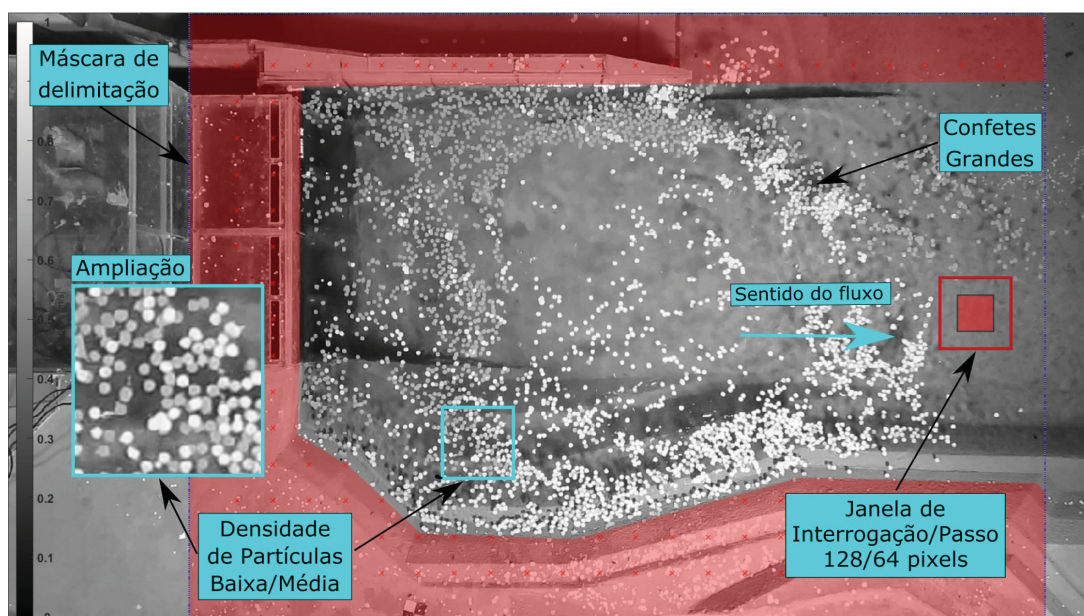
mesmos definidos nos testes de validação do método. A TABELA 22 apresenta o resumo dos principais parâmetros do teste. A FIGURA 61 mostra o primeiro quadro da sequência e outras características relacionadas aos parâmetros do teste. Também demonstra a aplicação da máscara de delimitação da área de cálculo utilizada no PIVLab.

TABELA 22 – Configurações do teste – Ensaio 02

Configurações gerais	Unidade	Parâmetro
Tipo de traçador	-	Confete Grande
Densidade de partículas	-	Baixa/Média
Janela de interrogação	px	128
Passo de busca	px	64
Diâmetro do confete (10 mm)	px	7,52
Interrogação/Passo (em modelo)	cm	17,02 / 8,51
Área do levantamento	m <sup>2</sup>	1,644
Número de pares sequenciais	unidade	10
Tempo entre quadros	ms	33,367
Tempo total	ms	333,667

NOTA: Lista das principais configurações utilizadas no teste para caracterização do canal de fuga do circuito de geração do modelo reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop com a utilização da técnica de LS-PIV.

FIGURA 61 – Exemplo de quadro – LS-PIV



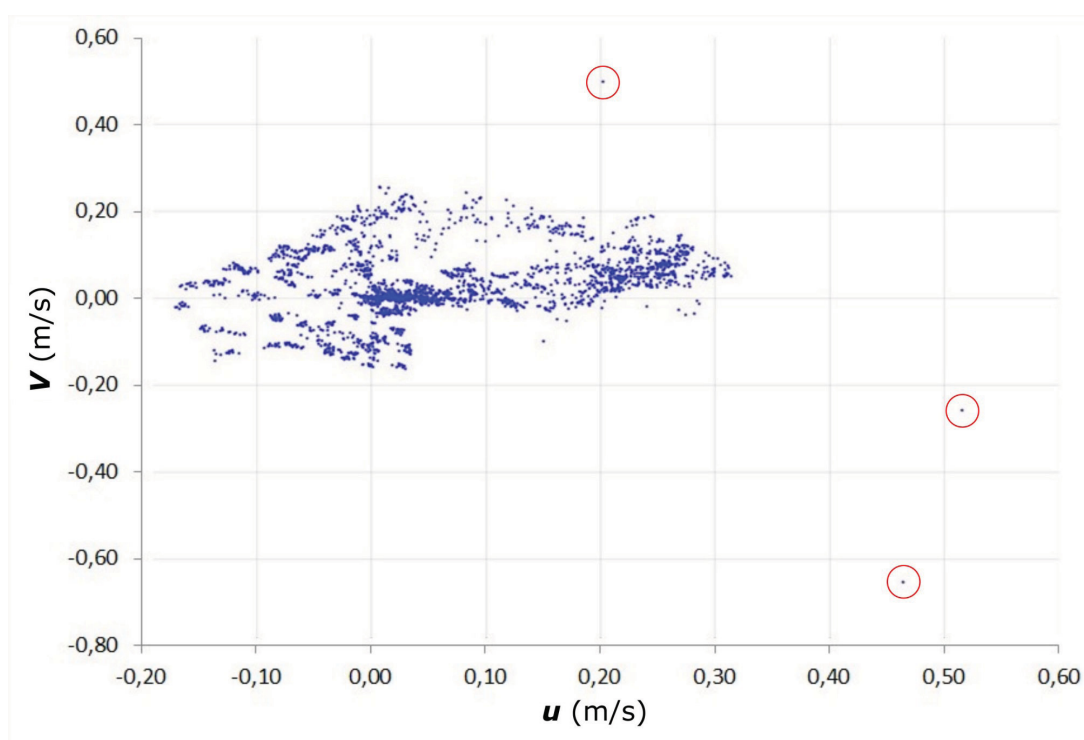
NOTA: Representação gráfica dos principais parâmetros de teste para aplicação do LS-PIV, incluindo a proporção da janela de interrogação/busca e a visualização ampliada da intensidade da densidade de partículas. Partículas traçadoras minimamente distribuídas por toda a região de interesse.

LEGENDA: A área sombreada em vermelho representa a máscara de delimitação para zonas sem interesse de cálculo de velocidades.

### 4.3.3 Extração dos Resultados – PIVLab – ENSAIO 02

Após o processamento das imagens sequenciais foram constatadas a existência de vetores espúrios causados por falha na interpretação de alguns pontos das imagens utilizada. A eliminação destes *outliers* foi realizada de forma automática com a utilização de uma ferramenta para demarcação da nuvem de pontos predominante apresentadas no gráfico de dispersão (FIGURA 62).

FIGURA 62 – Gráfico de dispersão – Ensaio 02



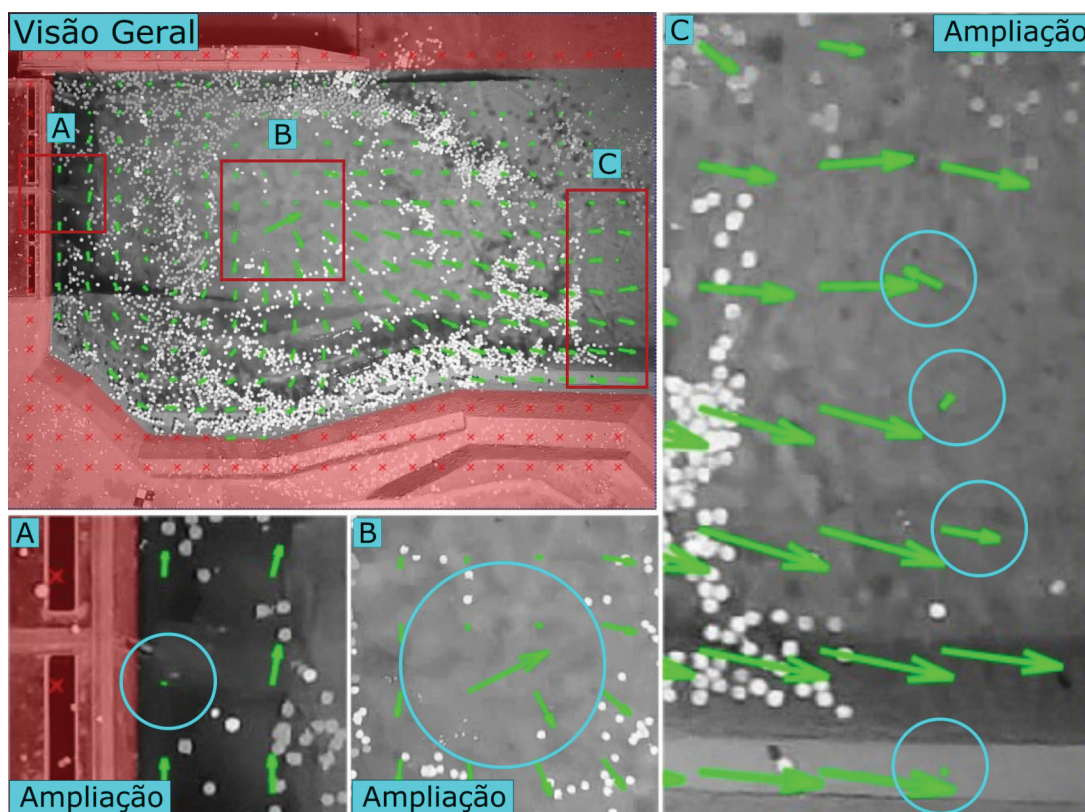
NOTA: O gráfico de dispersão para o resultado do processamento das imagens do teste aponta poucos vetores espúrios, ressaltando a existência de uma região de predominância para os vetores resultantes.

LEGENDA: Círculos vermelhos marcam a localização de vetores espúrios.

Devido às características do teste — poucas sequências de imagens; traçadores mal distribuídos em algumas regiões — foi necessário verificar o processamento de cada um dos dez pares de imagens e localizar vetores incoerentes com a vizinhança. A partir deste procedimento, foram encontrados seis pontos específicos em que os vetores resultantes tiveram seus módulos e direções substituídos pela média dos vetores circundantes. Este cálculo dos novos vetores resultantes foi realizado de forma automática pelo programa. Entretanto, a seleção dos vetores errôneos foi realizada manualmente. A FIGURA 63 apresenta a localização dos vetores incoerentes com a região do escoamento.

O processo de verificação dos resultados de cada par de imagens foi essencial para garantir que o cálculo da média da sequência de dez pares de imagens (com dura-

FIGURA 63 – Ajuste de vetores espúrios



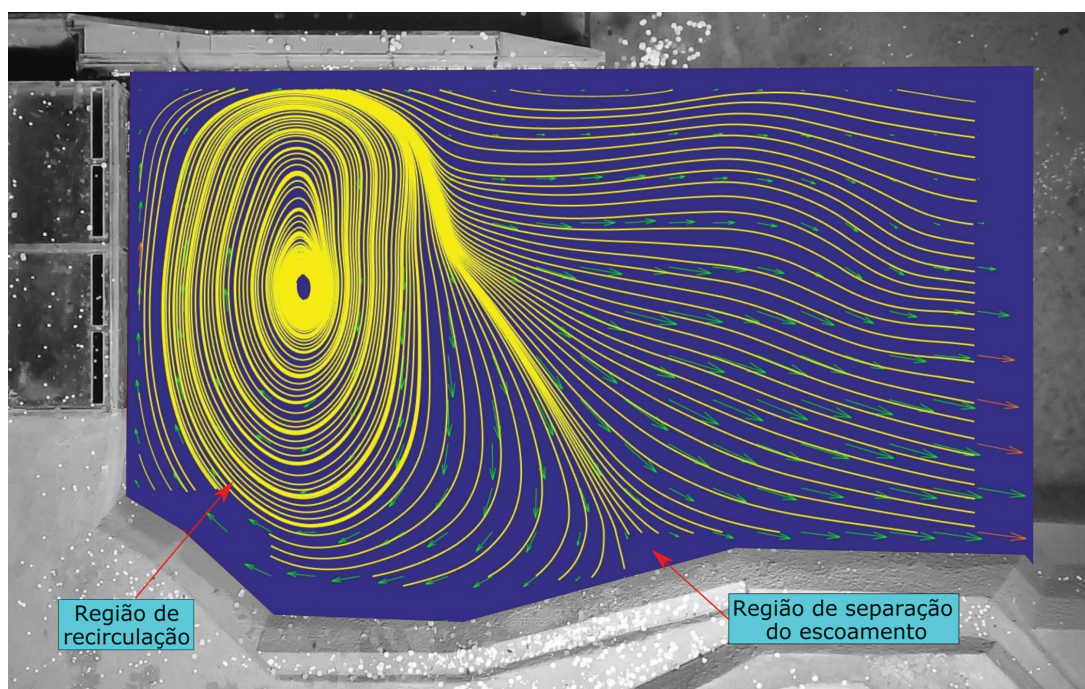
NOTA: Visão geral da região de levantamento das velocidades onde são destacadas áreas que apresentaram vetores incoerentes com o escoamento observado.

LEGENDA: A) Localização do vetor que apresentou módulo demasiadamente pequeno devido a um ponto fixo na imagem. B) Vetor demasiadamente grande causado por reflexos das imagens devido à elevada turbulência desta área. C) Vetores incoerentes causados pela falta de partículas das primeiras imagens processadas.

ção total de 1/3 de segundo) refletisse as características instantâneas do escoamento da região do canal de fuga do circuito de geração da usina.

Dentre os primeiros resultados extraídos, e que revelam o comportamento predominante da região do canal de fuga do circuito de geração, pode-se destacar a geração das linhas de corrente. A FIGURA 64 apresenta os traçados predominantes do escoamento obtidos com base na distribuição do campo vetorial resultante do processamento das imagens sequenciais. Com a representação destas linhas de corrente, foram materializadas as região de recirculação em frente à estrutura da casa de força e a região onde ocorre a separação do escoamento de recirculação e o escoamento de propagação do fluxo para fora do canal.

FIGURA 64 – Linhas de corrente e campo vetorial

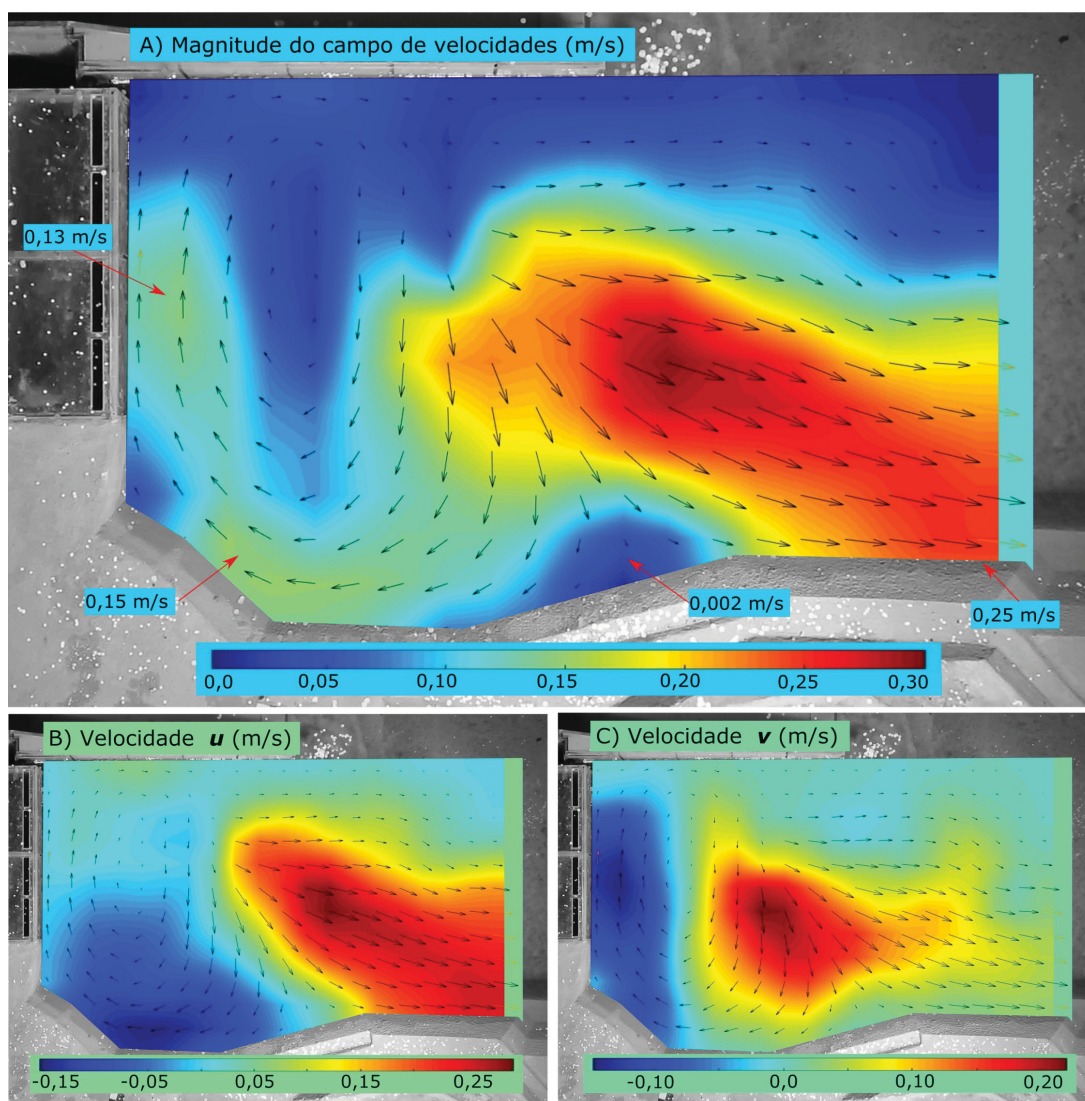


**NOTA:** Representação das linhas de corrente e do campo vetorial. Além dos resultados gráficos, indicando o fenômeno de recirculação e separação do escoamento, podem ser extraídas as coordenadas e distâncias do modelo para delimitação da área de recirculação e identificação da região de separação do escoamento.

**LEGENDA:** Linhas amarelas — Linhas de corrente. Flechas verdes — Vetores resultantes.

A partir do levantamento instantâneo dos campos de velocidades apresentados na FIGURA 65, puderam ser identificadas as seguintes características do escoamento da região de aplicação da técnica LS-PIV: definição dos trajetos principais do escoamento proveniente das turbinas e suas respectivas distribuições de velocidades, incluindo a delimitação das áreas em que este escoamento atinge os taludes da margem direita do canal; identificação das trajetórias de recirculação em frente à estrutura da casa de força e suas distribuições de velocidades da superfície do escoamento; visualização de pontos de estagnação do escoamento, demonstrando as separações constatadas também através das representações das linhas de corrente.

FIGURA 65 – Campos de velocidade instantâneos – Ensaio 02

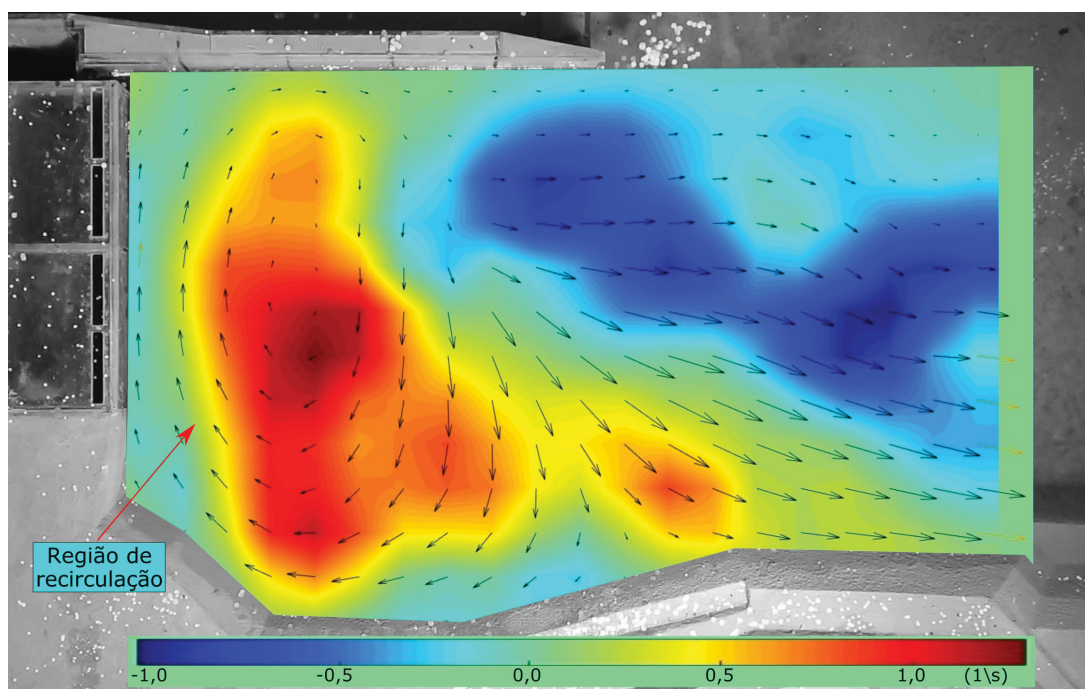


NOTA: Representação gráfica quantitativa do campo de velocidades instantâneo da região do canal de fuga do circuito de geração.

LEGENDA: Flechas: Vetor velocidade resultante. A) Magnitude do campo de velocidades instantâneo e representação vetorial. Indicação da velocidade em alguns pontos relevantes. B) Campo de velocidades da componente  $u$  (velocidade positiva para a direita). C) Campo de velocidades da componente  $v$  (velocidade positiva para baixo).

Com relação aos movimentos circulatorios superficiais observados durante os testes, encontram-se na FIGURA 66 o campo de vorticidade para a região. A partir da interpretação dos resultados, podem ser verificadas duas grandes áreas de recirculação: a região em frente à estrutura da casa de forças e a região acima do canal principal de propagação. A região menos sujeita a este fenômeno turbulento é coincidente com canal principal de propagação do escoamento restituído. O fluxo junto às paredes da casa de força e junto ao muro de proteção possuem direções mais retilíneas de propagação, apresentando menores valores de vorticidade.

FIGURA 66 – Vorticidade

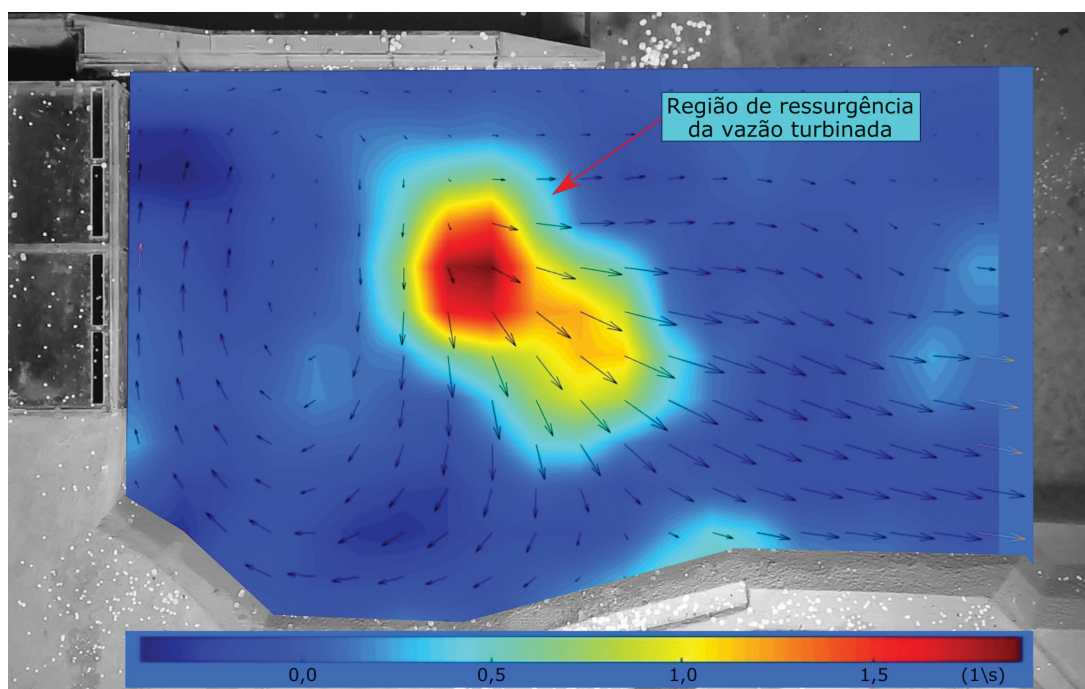


NOTA: Representação da vorticidade destacando a região de recirculação e o trajeto principal de propagação do escoamento, observados também a partir das linhas de corrente.

LEGENDA: Valores positivos — sentido horário. Valores negativos — sentido anti-horário. Flechas: Vetor velocidade resultante.

A divergência, apresentada na FIGURA 67, demonstra de forma direta, no caso específico desta configuração hidráulica de operação da casa de força, a região de ressurgência do escoamento turbinado. A figura mostra que as maiores divergências acontecem exatamente na região onde o escoamento proveniente do circuito de geração aflora, acentuando a turbulência desta área, influenciando na direção de propagação e de recirculação de todo o canal de fuga do circuito de geração.

FIGURA 67 – Divergência



NOTA: Representação gráfica da variável divergência. Maiores divergências positivas apontam o local de ressurgência do escoamento turbinado.

LEGENDA: Flechas: Vetor velocidade resultante.

Estes resultados auxiliam numa rápida interpretação dos fenômenos atuantes no escoamento. A TABELA 23 apresenta um resumo dos valores mínimos, médios e máximos extraídos de toda a extensão da área levantada com a utilização da técnica de LS-PIV.

TABELA 23 – Resultados numéricos – Ensaio 02

Variável	Unidade	Valor Mínimo	Valor Médio	Valor Máximo
Módulo da velocidade	m/s	0,002	0,129	0,307
Velocidade <b>u</b>	m/s	-0,151	0,065	0,293
Velocidade <b>v</b>	m/s	-0,148	0,033	0,220
Vorticidade	s <sup>-1</sup>	-1,024	0,067	1,295
Divergência	s <sup>-1</sup>	-0,422	0,096	1,890

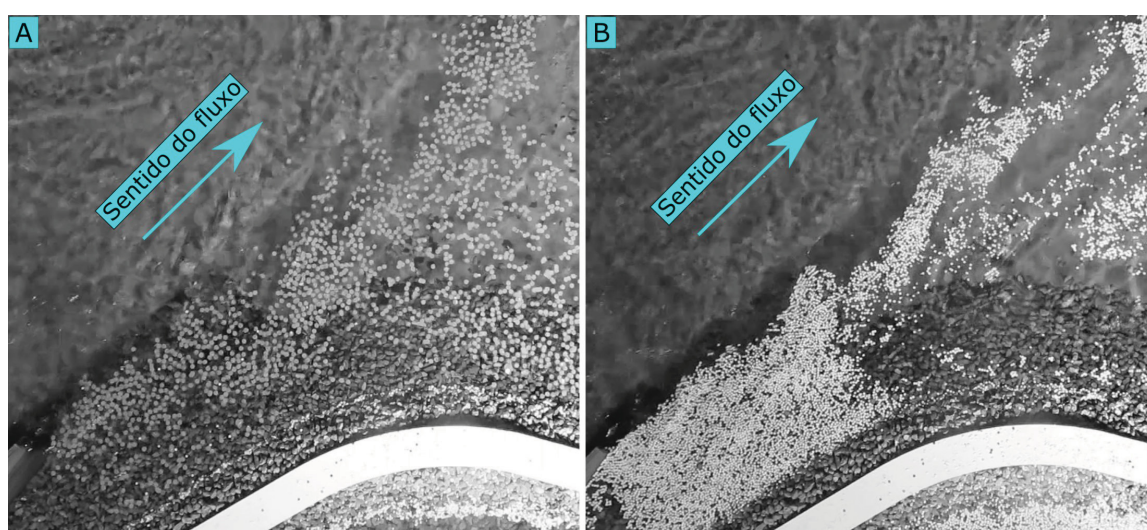
NOTA: Valores mínimos, médio e máximos extraídos da região do canal de fuga do circuito de geração da Usina Hidrelétrica de Sinop.

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE ENTORNO DA ENSECADDEIRA DE PROTEÇÃO POR JUSANTE

##### 4.4.1 Considerações iniciais – ENSAIO 03

Os testes do presente ensaio contaram com a utilização dos dois tipos de confetes de papel como traçador da técnica de LS-PIV. No entanto, pelos mesmos motivos apontados no ensaio anterior — validação e tendência à aglomeração em virtude da turbulência (FIGURA 68) — foram utilizados apenas testes com o emprego de confetes grandes para o processamento dos resultados.

FIGURA 68 – Aglomeração em áreas de estagnação – Confete pequeno



LEGENDA: A) CONFETES GRANDES bem distribuídos. B) CONFETES PEQUENOS aglomerados devido aos feitos da turbulência e às características intrínsecas do material que deu origem ao traçador (papel sulfite).

Com relação a configuração hidráulica do ensaio, foi verificado que a utilização das adufas e ensecadeiras de jusante de segunda fase de desvio do rio causaram perturbações no escoamento das áreas circundantes do traçado principal do fluxo desviado. Em específico, para a ensecadeira de jusante da margem direita do rio, foi verificado, durante os testes preparatórios, a existência de uma intensa recirculação no entorno desta estrutura, criando áreas de estagnação e confluência de fluxo.

##### 4.4.2 Configuração do resultado – ENSAIO 03

Para este ensaio, com escoamento visivelmente mais lento na região dos levantamentos e confetes bem distribuídos na superfície do escoamento, foi possível utilizar trechos de filmagens com maiores tempos de duração. Estas características favoreceram os procedimentos de ajustes vetoriais pois a obtenção de resultados médios de maiores quantidades de pares de imagens elimina a necessidade de corrigir manualmente uma eventual falha de distribuição de partículas que possam ocorrer em

alguns pontos das imagens analisadas, prevalecendo, desta forma, o valor médio dos resultados.

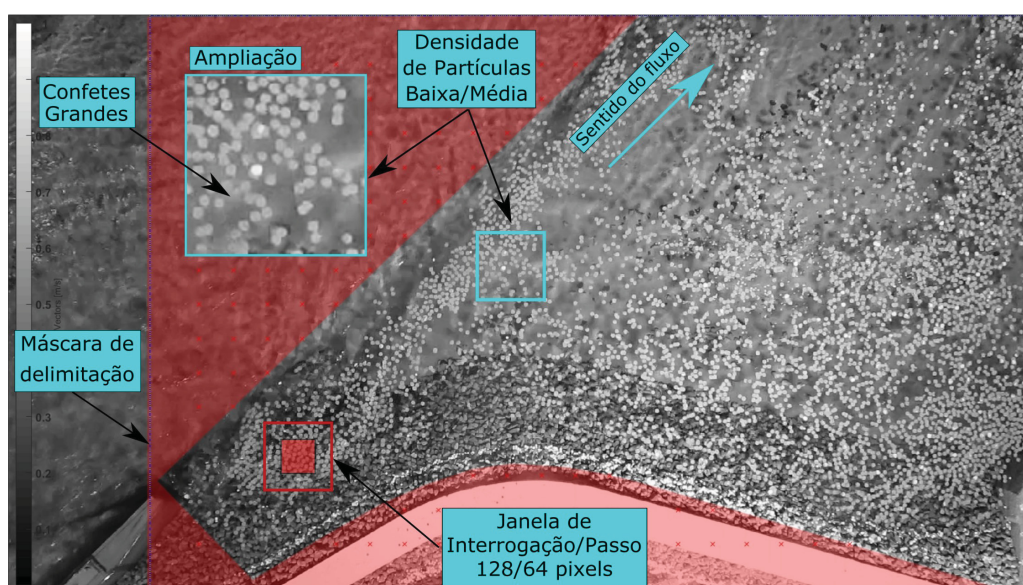
A TABELA 24 e a FIGURA 69 apresentam as principais características e informações sobre os parâmetros do teste realizado para o levantamento de dados hidráulicos do escoamento no entorno da ensecadeira de jusante.

TABELA 24 – Configurações do teste – Ensaio 03

Configurações gerais	Unidade	Parâmetro
Tipo de traçador	-	Confete Grande
Densidade de partículas	-	Baixa/Média
Janela de interrogação	px	128
Passo de busca	px	64
Diâmetro do confete (10 mm)	px	7,73
Interrogação/Passo (em modelo)	cm	16,56 / 8,28
Área do levantamento	m <sup>2</sup>	1,742
Número de pares sequenciais	unidade	300
Tempo entre quadros	ms	33,367
Tempo total	s	10

NOTA: Lista das principais configurações utilizadas no teste para caracterização do escoamento no entorno da ensecadeira de jusante do modelo reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop com a utilização da técnica de LS-PIV.

FIGURA 69 – Configurações do teste – Parâmetros do PIVLab



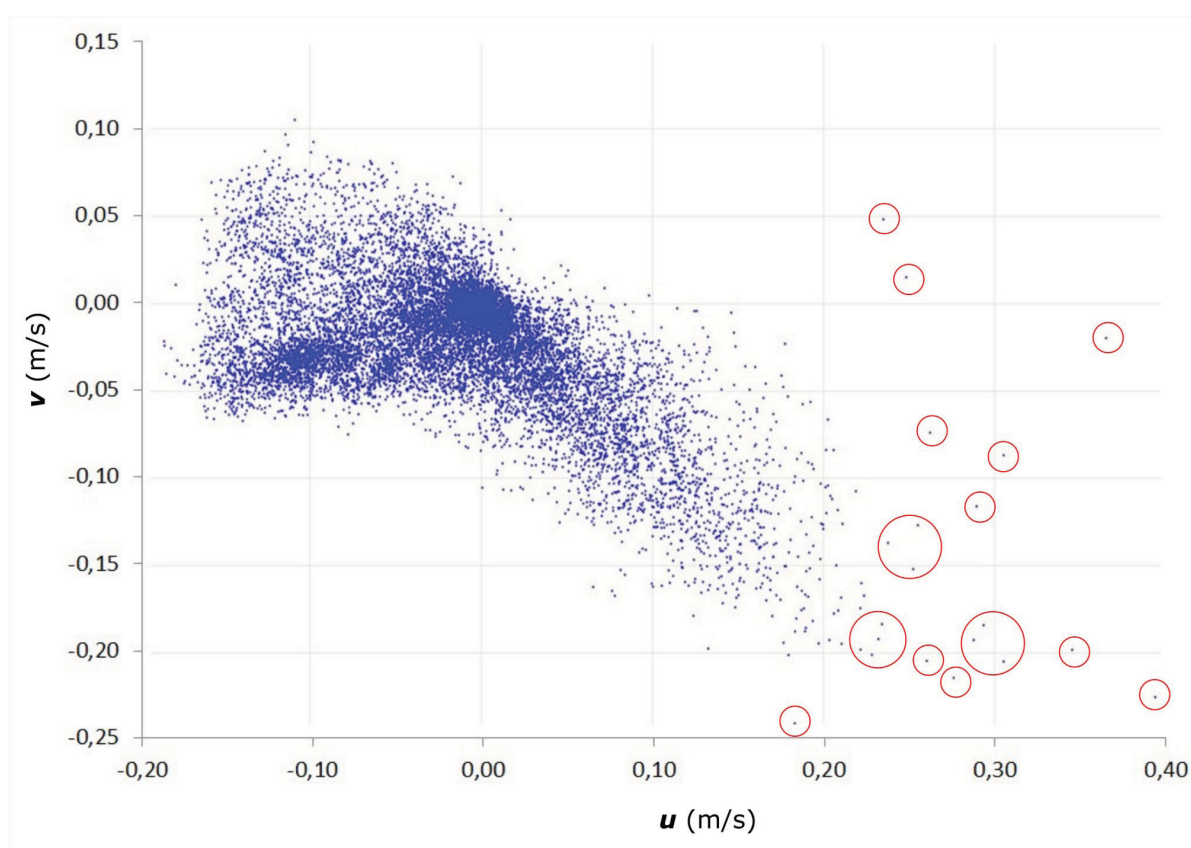
NOTA: A figura apresenta a imagem das partículas traçadoras bem distribuídas por toda a região do teste e também a representação gráfica dos principais parâmetros para aplicação do PIVLab, incluindo a proporção da janela de interrogação/passos de busca e a visualização ampliada da intensidade da densidade de partículas.

LEGENDA: A área sombreada em vermelho representa a máscara de delimitação para zonas sem interesse de cálculo de velocidades.

#### 4.4.3 Extração dos resultados – PIVLab – ENSAIO 03

A FIGURA 70 apresenta a dispersão das componentes  $u$  e  $v$  dos vetores velocidades resultantes dos 300 pares de imagens analisados para auxiliar na verificação dos resultados. Foi possível observar a existência de algumas dezenas de vetores espúrios, com velocidades da componente  $u$  atingindo valores acima dos esperados para a região (cerca de 0,40 m/s) e, da mesma forma, valores não condizentes para a componente  $v$  do vetor. A eliminação dos *outliers* encontrados foi realizada de forma automática com a utilização de uma ferramenta para demarcação da nuvem de pontos predominante. Após este processo foram gerados os resultados de forma análoga ao ensaio anterior.

FIGURA 70 – Gráfico de dispersão – Ensaio 03



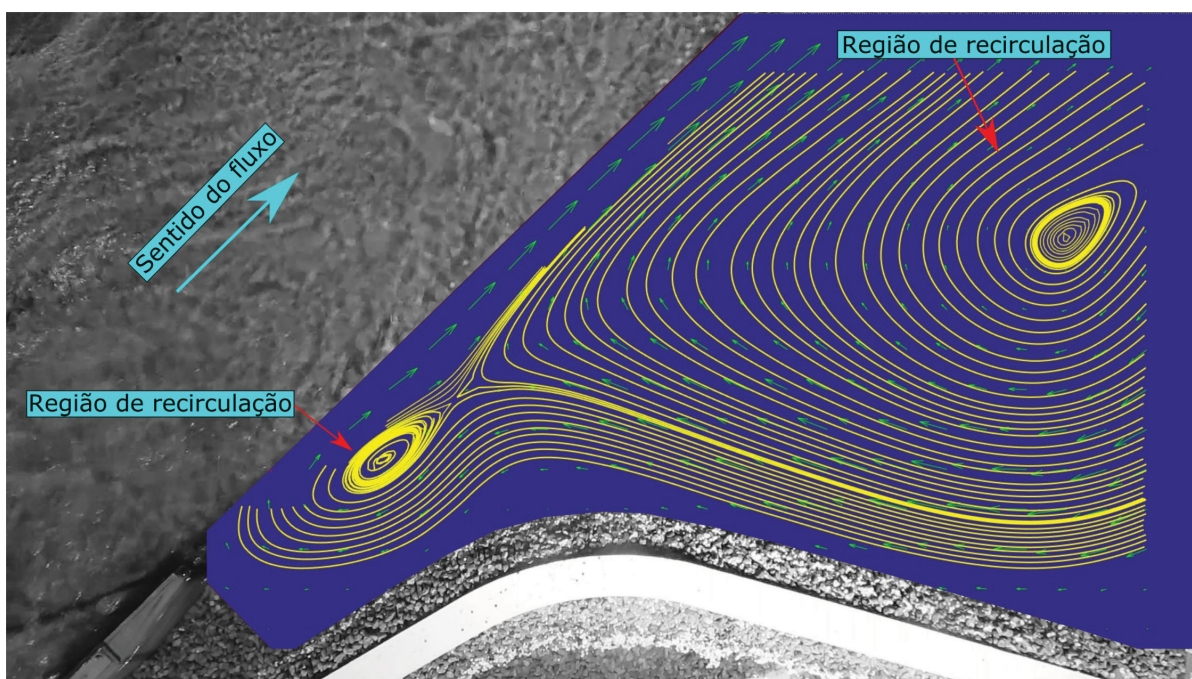
NOTA: O gráfico de dispersão para o resultado do processamento das imagens do teste aponta poucas dezenas de vetores espúrios, ressaltando a existência de uma região de predominância para os vetores resultantes.

LEGENDA: Círculos vermelhos marcam a localização de vetores espúrios.

Entre estes resultados, para uma caracterização geral e direta da área de estudos, utilizou-se a representação das linhas de corrente e do campo vetorial (FIGURA 71). Foi possível identificar a existência de duas regiões de recirculação predominantes. Uma delas, girando em sentido horário, abrange a maior parte da área levantada, sendo ocasionada pela ação tangencial do fluxo principal do escoamento. A outra recirculação

(menor e também em sentido horário) aparece a jusante do muro de proteção lateral, sendo causada por perturbações e turbulências provenientes da confluência do fluxo principal das adufas com o fluxo da recirculação maior. Também foi possível observar o fluxo de retorno em toda a extensão da ensecadeira, resultado da união das duas recirculações que margeiam esta região.

FIGURA 71 – Linhas de corrente e campo vetorial



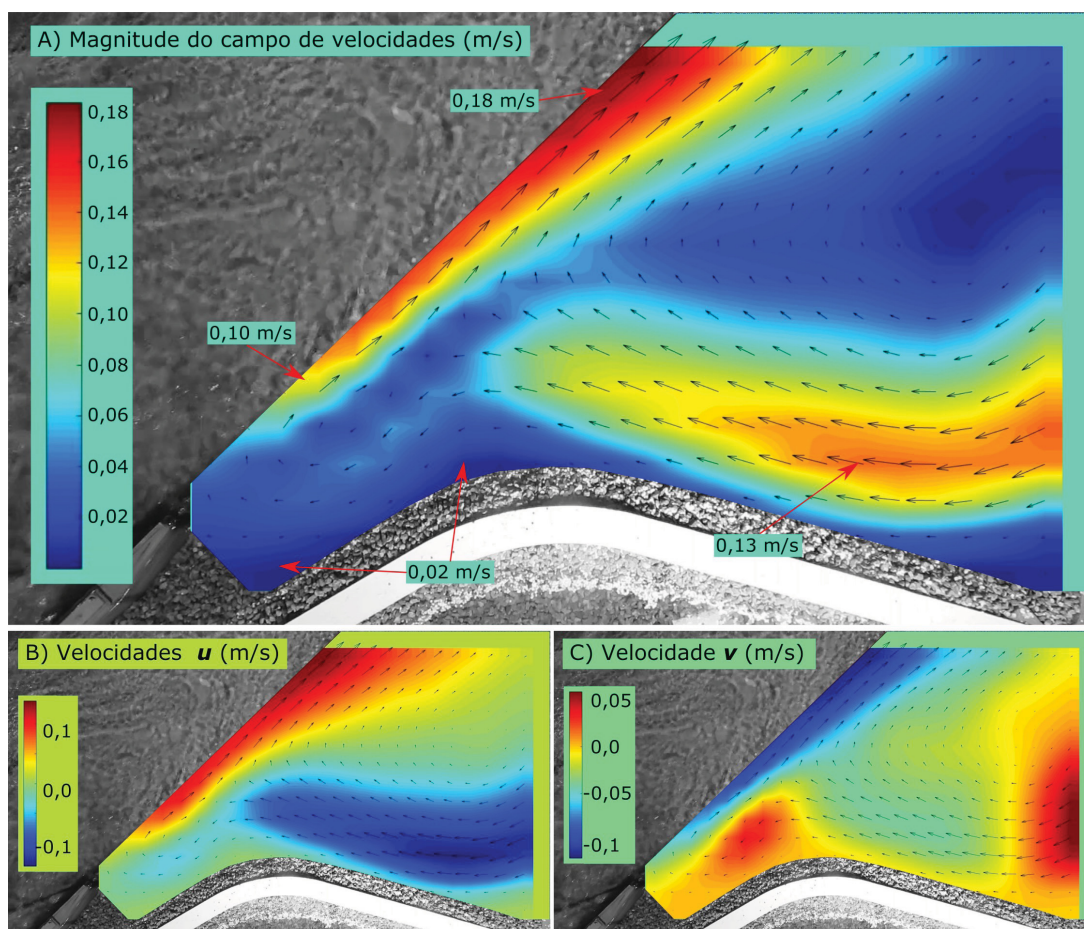
NOTA: Representação das linhas de corrente e do campo vetorial. Além dos resultados gráficos, podem ser extraídas as coordenadas e distâncias do modelo para delimitação das áreas de recirculação.

LEGENDA: As linhas contínuas amarelas representam as linhas de corrente. As flechas verdes representam os vetores de velocidade.

O próximo conjunto de resultados obtidos é composto pela magnitude do campo de velocidades resultantes e pelos campos das componentes vetoriais  $u$  e  $v$  da velocidade (FIGURA 72). Podem ser observadas as seguintes características globais do escoamento da área de interesse: visualização do traçado principal da recirculação e suas velocidades superficiais de escoamento; distribuição de velocidades no entorno da ensecadeira; existência de pontos de estagnação do escoamento próximos ao muro de proteção; campo de velocidades do fluxo proveniente das adufas; região de choque do fluxo circundante com o fluxo principal do canal (confluência); velocidades baixas das zonas de centrais das regiões de circulação.

Estas características globais do escoamento também podem ser melhor detalhadas com a utilização dos campos resultantes da vorticidade e divergência (FIGURA 73). A análise da vorticidade demonstra a recirculação presente na maior área desta região de estudos, com valores menos expressivos. Com relação a intensidade, a

FIGURA 72 – Campos de velocidade médio – Ensaio 03



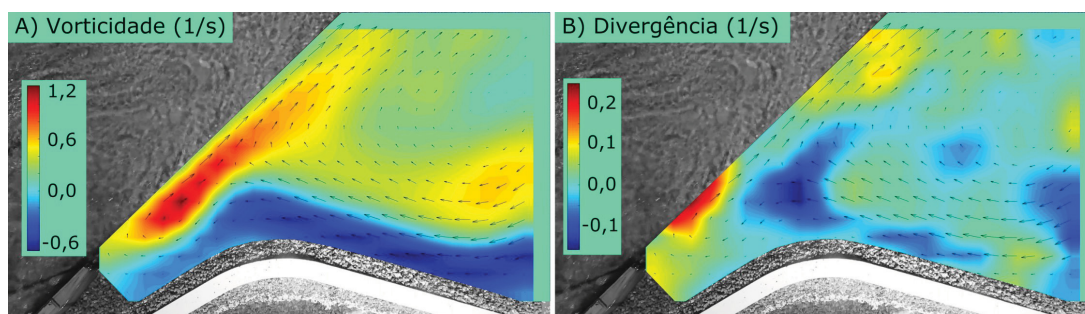
NOTA: Representação gráfica quantitativa do campo de velocidades médio da região de entorno da ensecadeira de jusante.

LEGENDA: Flechas: Vetor velocidade resultante. A) Magnitude do campo de velocidades médio e representação vetorial. Indicação da velocidade em alguns pontos relevantes. B) Campo de velocidades da componente  $u$  (velocidade positiva para a direita). C) Campo de velocidades da componente  $v$  (velocidade positiva para baixo).

maior vorticidade foi verificada na região da recirculação próxima ao muro de proteção, resultante do choque do escoamento principal com a corrente de recirculação que margeia toda a ensecadeira. Este ponto de colisão também aparece representado nos resultados da divergência, com os maiores valores desta variável para este ensaio. A análise da divergência também identificou a região de encontro entre as duas recirculações observadas. Por ser uma região de convergência de vetores, este local apresentou os menores valores de divergência (valores negativos).

A TABELA 25 apresenta um resumo dos valores mínimos, médios e máximos extraídos em função da área de levantamento utilizada para a aplicação da técnica de LS-PIV.

FIGURA 73 – Resultados auxiliares



NOTA: Representação gráfica quantitativa das variáveis auxiliares disponibilizadas pelo PIVLab.

LEGENDA: Flechas: Vetor velocidade resultante. A) VORTICIDADE – Demonstra o escoamento de retorno em toda a extensão da ensecadeira. Maior valor positivo encontrado na região de retorno menor, junto ao muro de proteção. Valores positivos – sentido horário. Valores negativos – sentido anti-horário. B) DIVERGÊNCIA – Maiores valores positivos e negativos observados nas região de choque e confluência entre o escoamento principal e o circulante.

TABELA 25 – Resultados numéricos – Ensaio 03

Variável	Unidade	Valor Mínimo	Valor Médio	Valor Máximo
Módulo da velocidade	m/s	0,000	0,063	0,183
Velocidade $u$	m/s	-0,139	-0,016	0,139
Velocidade $v$	m/s	-0,119	-0,022	0,059
Vorticidade	$s^{-1}$	-0,692	0,180	1,216
Divergência	$s^{-1}$	-0,158	0,004	0,249

NOTA: Valores mínimos, médio e máximos extraídos da região de entorno da ensecadeira de jusante da segunda fase de desfilio do rio da usina hidrelétrica de Sinop.

#### 4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As três áreas de levantamentos de velocidade com o emprego da técnica de LS-PIV utilizadas no modelo reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop foram escolhidas em função de experimentos preliminares e, principalmente, a partir das informações levantadas dos relatórios técnicos de estudos realizadas pelo CEHPAR para atender as demandas solicitadas durante as diversas fases da execução da obra da usina.

De forma geral, a reprodução das características globais de configuração e operação dos ensaios extraídos dos relatórios técnicos do CEHPAR apenas serviram de referência para os estudos da técnica de velocimetria por imagem de partículas, sem ter como objetivo a análise comparativa de resultados, visto que nos três tipos de ensaios realizados o foco de leitura de velocidades foi distinto dos relatórios.

Com isso, ficam enfatizadas as contribuições adicionais que a técnica de

LS-PIV forneceu para as áreas de estudo, principalmente com relação a obtenção dos campos extensos das velocidades da superfície do escoamento, das representações das linhas de corrente, de variáveis auxiliares, tais como a vorticidade e a divergência, que mostraram abordagens diferenciadas para identificação de áreas de ressurgência de escoamento, recirculações, áreas de elevada turbulência entre outras conclusões e análises pertinentes.

Outro fator de grande importância está relacionado aos medidores convencionais. Estes foram indispensáveis para a realização da validação da técnica de LS-PIV aqui desenvolvida. Portanto, de forma global, os resultados obtidos pelo método proposto foram complementares aos levantamentos realizados pelos equipamentos tradicionais (pontuais e intrusivos) de medição de velocidades.

Sendo assim, inúmeros recursos foram empregados para a transformação de uma aplicação direta do método de LS-PIV em um trabalho científico de pesquisa no campo da hidráulica. Entre estes recursos, destaca-se a possibilidade da aplicação da técnica de velocimetria diretamente em um modelo físico reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop, construído nas dependências do CEHPAR, contando com toda a infraestrutura, informações técnicas e equipamentos calibrados de medição de velocidades e vazões. A aplicação da técnica em um ambiente controlado favoreceu o estudo dos fundamentos desse método de velocimetria e proporcionou agilidade na aplicação de melhorias e otimizações nos processos realizados.

Quanto a limitação do LS-PIV inerente à obtenção de apenas velocidades superficiais do escoamento, esta não comprometeu os estudos, visto que as velocidades de interesse para o dimensionamento de diversas estruturas relacionadas às obras de aproveitamentos hidrelétricos são justamente as velocidades da superfície do escoamento por, normalmente, apresentarem maiores magnitudes.

Portanto, a partir do uso de equipamentos simples e de custo acessível (câmera digital, iluminadores e microcomputador), fundamentada em princípios da física clássica ( $v = x/t$ ) e apoiada em ferramentas estatísticas, esta técnica de velocimetria por imagem de partículas aplicadas a grandes proporções se mostrou eficiente (com maiores erros percentuais abaixo de 10 %) para o levantamento quantitativo de campos de velocidade para o escoamento relacionado ao modelo reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop.

## 5 CONCLUSÕES

O método de LS-PIV aplicado ao escoamento observado à modelagem física de obras hidráulicas se mostrou adequado para as diversas situações ensaiadas no modelo reduzido da UHE Sinop. Este fato foi evidenciado pelos desvios inferiores a 10 % em todo campo de velocidade considerando as medições de referência com micromolinete.

Grande parte dos resultados apresentados não poderiam ser facilmente obtidos com medidores pontuais de velocidade, reforçando assim a vantagem da utilização da técnica de LS-PIV diretamente em modelos físicos. Os aspectos da superfície do escoamento ligados à recirculações, trajetos predominantes, velocidades junto aos taludes, separações do escoamento, entre outras, foram caracterizadas em toda a extensão da região de aplicação da técnica de forma simultânea, chegando a abranger áreas de 1,74 ha em medida de protótipo (ENSAIO 03). Como destaque, tem-se a possibilidade de se registrar em frações de segundos comportamentos hidráulicos de elevada complexidade e turbulência, como no caso da determinação da região de ressurgência do escoamento turbinado (ENSAIO 02), em que foi empregado 1/3 de segundo para caracterizar a região.

Dentre as limitações observadas, além das inerentes ao método — específica para a superfície do escoamento — foi constatado que aspectos tridimensionais da dinâmica dos fluidos não são caracterizados, muitas vezes, nem na superfície. Este fato foi verificado nas áreas de contato do escoamento com as estruturas hidráulicas da região de aproximação do vertedouro que, devido as interferências entre estes elementos, apresentavam ondas de choque que expulsavam as partículas traçadoras que eram lançadas sobre essas regiões, impedindo a extração de resultados por LS-PIV.

Dentre as inovações desenvolvidas para a aplicação da técnica de LS-PIV em modelo reduzido destaca-se a utilização da placa de calibração de velocidades, que além de materializar marcações de referência ao nível d'água do escoamento, serviu de suporte para a etapa computacional de verificação da qualidade da imagem e de extração de resultados de seções superficiais do escoamento. A utilização desta placa reduziu as incertezas quanto ao posicionamento da imagem e, conseqüentemente, aumentou a precisão na medição das velocidades.

Outro aspecto explorado foi a relação existente entre: as imagens das partículas traçadoras (tamanho/espalhamento), as dimensões da janela de interrogação/passo de busca (resolução espacial) e a faixa de velocidade do escoamento (Seção 01 e

Seção 02). Foi verificado que a dimensão (em pixels) da imagem formada das partículas traçadoras necessitava de janelas de interrogação/passos maiores, principalmente nos levantamentos realizados em áreas de maiores velocidades de escoamento. De forma geral, a relação mínima aceitável foi aquela em que a resolução final da janela de interrogação/passos não se equiparasse ao espaçamento máximo das partículas (que acontecem em áreas de maiores velocidades). Com isso, foi definido no processo de validação da técnica que a utilização de 128/64 px de dimensões das janelas atendem de forma adequada esta relação de proporções, visto que a imagem da partícula foi fixada em função do enquadramento da área de estudos (altura da câmera), não podendo ser facilmente alterada.

O aspecto mais importante na aplicação da técnica de LS-PIV não se relaciona apenas aos parâmetros de programa, mas também à escolha e ao manuseio das partículas traçadoras. Com relação aos confetes de papel comum utilizados no estudo, intitulados de CONFETES GRANDES, foi verificada a melhor aderência e espalhamento à superfície do fluido, garantindo o fiel acompanhamento do escoamento e a distribuição homogênea dos traçadores, sem tendências à aglomeração. No entanto, estes atributos sozinhos não garantem a correta caracterização dos campos estudados. Para tanto, foi necessário realizar o cuidadoso lançamento das partículas sobre o escoamento, garantindo que a superfície do fluido estivesse preenchida de forma uniforme, sem aglomerações (que gerariam leituras inferiores de velocidades) e sem descontinuidades (que gerariam áreas sem velocidades e/ou velocidades incoerentes).

Outra definição apresentada, que corrobora com a relação entre a dimensão da janela de interrogação e as características de espalhamento dos traçadores, foi a quantificação das intensidades da densidade superficial das partículas que, com isso, deixaram de ter caráter unicamente qualitativo (baixa, média e alta densidades). A partir da medição da intensidade cromática de janelas de interrogação padrão (128 px) foram definidos intervalos percentuais de preenchimento relacionados aos parâmetros de validação. Desta forma, a atribuição de densidades de espalhamento para CONFETES GRANDES passou a representar faixas de 12 – 24 % de preenchimento para densidades baixas e faixas de 31 – 39 % de preenchimento para densidades médias. Este recurso cria a possibilidade da verificação automática das condições de aplicação da técnica de LS-PIV validada.

Para continuidade de pesquisa e aprimoramento da técnica de LS-PIV sugere-se um estudo complementar que envolvam novos itens de trabalho tais como: redução das dimensões das partículas traçadoras (do mesmo material utilizado nesta pesquisa) para aplicação em escoamentos de maiores velocidades; ajustes de parâmetros da câmera digital com relação a nitidez da imagem e controles de iluminação; ajuste de parâmetros auxiliares do PIVlab; realização de filmagem com ângulos variados e

retificação posterior das imagens; automatização da escolha de trechos a partir da intensidade da densidade superficial das partículas; aplicação da técnica em escala real.

## REFERÊNCIAS

- ADRIAN, R. J. **Bibliography of particle velocimetry using imaging methods: 1917–1995**. TSI Inc., St. Paul, Minnesota. [S.l.], 1996.
- \_\_\_\_\_. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. **Annu. Rev. Fluid Mech.**, v. 261, p. 304, 1991.
- \_\_\_\_\_. Twenty years of particle image velocimetry. **Experiments in fluids**, Springer, v. 39, n. 2, p. 159–169, 2005.
- ADRIAN, R. J.; WESTERWEEL, J. **Particle image velocimetry**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2011.
- AZEVEDO, L. F. A.; ALMEIDA, J. A. Velocimetria por imagem de partículas. **III Escola de Primavera em Transição e Turbulência EPTT-3**, p. 191–214, 2002.
- CANON INC. **Canon PowerShot SX60 HS – Manual do Usuário da Câmera**. [S.l.], 2014.
- CEHPAR, LACTEC. Projeto HL-185. **Estudos Hidráulicos em Modelo Reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop. Relatório: Construção e Calibração do Modelo**, n. 01, 2014.
- \_\_\_\_\_. **Estudos Hidráulicos em Modelo Reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop. Relatório: Estudos do Vertedouro: Caracterização fundos fixo e móvel**, n. 5, 2015.
- \_\_\_\_\_. **Estudos Hidráulicos em Modelo Reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop. Relatório: Operação Isolada do Circuito de Geração**, n. 10, 2016.
- \_\_\_\_\_. **Estudos Hidráulicos em Modelo Reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop. Relatório: Estudos de Alternativas das Estruturas de Jusante das Adufas de Desvio**, n. 7, 2016.
- CREUTIN, J. D. et al. River gauging using PIV techniques: a proof of concept experiment on the Iowa River. **Journal of Hydrology**, Elsevier, v. 277, n. 3-4, p. 182–194, 2003.
- D'ALMEIDA JUNIOR, A. J. C. et al. medição de velocidade e vazão em cursos d'água: molinete hidrométrico versus método do flutuador, 2010.
- ELSINGA, G. E. et al. Tomographic particle image velocimetry. **Experiments in fluids**, Springer, v. 41, n. 6, p. 933–947, 2006.
- FERREIRA, R. M. L. Gerhard Jirka Summer School in Environmental Fluid Mechanics. In: \_\_\_\_\_. **Introduction to PIV. Key principles and hardware**. Campo Grande, Brazil: [s.n.], jan. 2018. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

GAMARO, P. E. M. **Curso de Medidores de Vazão Acústico Doppler. Apostila módulo básico. Revisão.** [S.l.], 2008.

GUTKOSKI, L. L. **Ferramenta computacional para a medição de campos de velocidade utilizando processamento digital de imagens.** 2001. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

HAUET, A. et al. Experimental system for real-time discharge estimation using an image-based method. **Journal of Hydrologic Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 13, n. 2, p. 105–110, 2008.

HINSCH, K. D. Holographic particle image velocimetry. **Measurement Science and Technology**, IOP Publishing, v. 13, n. 7, r61, 2002.

JAHANMIRI, M. **Particle image velocimetry: Fundamentals and its applications.** Göteborg, Sweden, 2011.

JODEAU, M. et al. Application and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions. **Flow Measurement and Instrumentation**, Elsevier, v. 19, n. 2, p. 117–127, 2008.

KEANE, R. D.; ADRIAN, R. J. Optimization of particle image velocimeters. I. Double pulsed systems. **Measurement science and technology**, IOP Publishing, v. 1, n. 11, p. 1202, 1990.

KIM, Y. et al. Stream discharge using mobile large-scale particle image velocimetry: A proof of concept. **Water Resources Research**, Wiley Online Library, v. 44, n. 9, 2008.

MALDONADO, L. H.; WENDLAND, E. C.; PORTO, R. M. Avaliação de métodos de baixo custo para medição de vazão em córregos. pt. **Revista Ambiente & Água**, scielo, v. 10, p. 402–412, jun. 2015. ISSN 1980-993X. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1980-993X2015000200402&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1980-993X2015000200402&nrm=iso)>.

MELLING, A. Tracer particles and seeding for particle image velocimetry. **Measurement Science and Technology**, IOP Publishing, v. 8, n. 12, p. 1406, 1997.

MIRANDA, A. C. M. **Utilização de velocimetria por imagem de partícula na visualização e caracterização de escoamento bifásico.** Mar. 2004. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina – Engenharia Mecânica – Engenharia e Ciências Térmicas.

MUSTE, M.; FUJITA, I.; HAUET, A. Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. **Water Resources Research**, Wiley Online Library, v. 44, n. 4, 2008.

PATALANO, A et al. Recent advances in Eulerian and Lagrangian large-scale particle image velocimetry. In: PROCEEDINGS of the 36th IAHR World Congress, The Hague, The Netherlands. [S.l.: s.n.], 2015. v. 26, p. 1–6.

PEREIRA, R. A. **Velocimetria por imagens de partículas aplicada ao estudo de deformações em madeira serrada e painéis de madeira**. 2017. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Construções Rurais e Ambientação, Universidade Federal de Lavras.

PRASAD, A. K. Particle image velocimetry. **Current Science-Bangalore**, Current Science Association / Indian Academy of Sciences, v. 79, n. 1, p. 51–60, 2000.

\_\_\_\_\_. Stereoscopic particle image velocimetry. **Experiments in fluids**, Springer, v. 29, n. 2, p. 103–116, 2000.

RAFFEL, M.; WILLERT, C. E.; KOMPENHANS, J. **Particle image velocimetry: a practical guide**. [S.l.]: Springer Verlag, 1998.

SANTIAGO, J. G. et al. A particle image velocimetry system for microfluidics. **Experiments in fluids**, Springer, v. 25, n. 4, p. 316–319, 1998.

SANTOS, I. et al. **Hidrometria Aplicada**. Curitiba-PR, Brasil: LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2001. Medição de vazão líquida, p. 119–198.

SONTEK/YSI, INC. **Acoustic Doppler Profiler (ADP®) Principles of Operation**. [S.l.], nov. 2000. Disponível em: <<http://www.sontek.com>>.

STAMHUIS, E. J. Basics and principles of particle image velocimetry (PIV) for mapping biogenic and biologically relevant flows. **Aquatic Ecology**, Springer, v. 40, n. 4, p. 463–479, 2006.

SUTARTO, T. E. Application of Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) to Identify Flow Pattern in a Channel. **Procedia Engineering**, Elsevier, v. 125, p. 213–219, 2015.

THIELICKE, W.; STAMHUIS, E. PIVlab—towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB. **Journal of Open Research Software**, Ubiquity Press, v. 2, n. 1, 2014.

TURNIPSEED, D. P.; SAUER, V. B. **Discharge measurements at gaging stations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods book 3, chap. A8, 87 p.** [S.l.], 2010. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/tm/tm3-a8/>>.

WEITBRECHT, V.; JIRKA, G. H. Flow patterns and exchange processes in dead zones of rivers. In: PROCEEDINGS of the Congress-International Association for Hydraulic Research. [S.l.: s.n.], 2001. p. 439–445.

WEITBRECHT, V.; KÜHN, G.; JIRKA, G.H. Large scale PIV-measurements at the surface of shallow water flows. **Flow Measurement and Instrumentation**, Elsevier, v. 13, n. 5-6, p. 237–245, 2002.

WERELEY, S. T.; MEINHART, C. D. Recent advances in micro-particle image velocimetry. **Annual Review of Fluid Mechanics**, Annual Reviews, v. 42, p. 557–576, 2010.

WILLERT, C. E.; GHARIB, M. Digital particle image velocimetry. **Experiments in fluids**, Springer, v. 10, n. 4, p. 181–193, 1991.

## APÊNDICES

## APÊNDICE A – PREPARAÇÃO DO MODELO

Encontra-se neste apêndice a descrição dos serviços realizados para reativação do funcionamento do modelo reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop, incluindo preparativos destinados a dinamizar a implementação da técnica de velocimetria por imagem de partículas em estudo.

### A.1 REATIVAÇÃO DO MODELO

Os trabalhos para reativação do modelo reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop, construído nas dependências do CEHPAR, iniciaram na última semana de janeiro de 2018 com a realização de serviços de limpeza das estruturas hidráulicas (construídas em acrílico) e lavagem dos canais e topografias do modelo (executados em cimento alisado). Foi utilizada uma lavadora de alta pressão para limpeza da área do reservatório e da região de jusante. As peças de acrílico foram limpas manualmente para garantir a integridade das estruturas hidráulicas modeladas (FIGURA A.1).

FIGURA A.1 – Limpeza do modelo reduzido



NOTA: Limpeza da topografia do modelo reduzido com lavadora de alta pressão.

Na sequência, foram realizadas verificações de estanqueidade nas peças de acrílico da entrada da casa de força da usina e das adufas, procedendo-se a aplicação de silicone para as devidas correções. Também foram executadas pinturas corretivas no canal de cimento alisado nas regiões de jusante e montante da barragem do modelo reduzido (FIGURA A.2).

Os demais equipamentos de operação do modelo reduzido, tal como painéis de leitura de pressão, medidor de vazão tipo Venturi, medidor triangular, medidor diferencial

FIGURA A.2 – Vedação e pintura do modelo reduzido



NOTA: Estruturas em acrílico revisadas e pintura da topografia da região de montante e jusante da barragem.

de pressão, registros de operação e comportas do canal de restituição encontravam-se em perfeitas condições de uso.

## A.2 SISTEMA DE FIXAÇÃO DA CÂMERA DIGITAL

Foi adaptado um sistema de trilho para movimentação e fixação da câmera digital de modo que as filmagem pudessem ser realizadas perpendicularmente a área de interesse. O trilho favoreceu também o correto posicionamento da câmera sobre a área de montante e jusante da barragem, garantindo assim que todos os testes tivessem as mesmas características quanto ao enquadramento da imagem.

Para posicionamento do trilho sobre as áreas de interesse foi necessário montar quatro torres de andaimes tubulares metálicos, sendo duas a montante e duas a jusante. Buscou-se apoiar a base das torres de andaime em locais que não viessem a interferir no escoamento durante os testes. Os pares de torres foram utilizados para apoiar os pranchões de madeira que serviram de base para o trilho metálico (FIGURA A.3).

Outro dispositivo adaptado para ser utilizado no posicionamento da câmera digital foi um tripé articulado que, após modificação da peça original, foi acoplado a carretilha do trilho. Este dispositivo permite o correto nivelamento da câmera por permitir o ajuste de sua posição nas três direções (FIGURA A.4).

FIGURA A.3 – Estruturas de apoio



NOTA: A foto apresenta as estruturas de apoio composta pelo trilho de movimentação, pelo suporte articulado da câmera, andaimes e passarela.

FIGURA A.4 – Suporte articulado da câmera digital



NOTA: O suporte articulado do trilho de movimentação garante um perfeito nivelamento da câmera digital.

## APÊNDICE B – ESTUDOS PRELIMINARES

Encontra-se neste apêndice a descrição da etapa de estudos preliminares. Esta etapa compreende o levantamento de informações de operação hidráulica do modelo reduzido, a execução de testes exploratório para auxiliar na definição do método de aplicação da técnica de LS-PIV e a utilização prévia de programas de processamento de imagens e extração de resultados.

### B.1 TESTES EXPLORATÓRIOS NO MODELO REDUZIDO

A configuração hidráulica de operação dos testes exploratórios no modelo reduzido está relacionada com a definição dos níveis do reservatório, dos níveis do rio a jusante da barragem e das vazões de operação da usina. Estas configurações foram baseadas em ensaios anteriores realizados pelos técnicos do CEHPAR durante as pesquisas realizadas para a construtora Triunfo S.A. Desta forma, optou-se por trabalhar com três vazões distintas já previamente ensaiadas a fim de antever e repetir as condições hidráulicas relacionadas às velocidades de propagação do fluido e circulações observadas. A configuração dos testes escolhidos foi baseada na operação isolada do vertedouro em condições de vertimento com as comportas totalmente abertas. A TABELA B.1 apresenta as configurações hidráulicas de operação utilizadas nos ensaios realizados pelo CEHPAR que serviram de base para os testes exploratórios do presente estudo.

TABELA B.1 – Configuração hidráulica de operação da usina (valores de protótipo)

Vazão de Protótipo (m <sup>3</sup> /s)	Nível do Reservatório (m)	Nível de Jusante (m)	Carga Hidráulica (m)
1.000,0	289,53	272,82	6,03
3.008,0	295,45	275,06	11,95
4.000,0	297,73	275,87	14,23

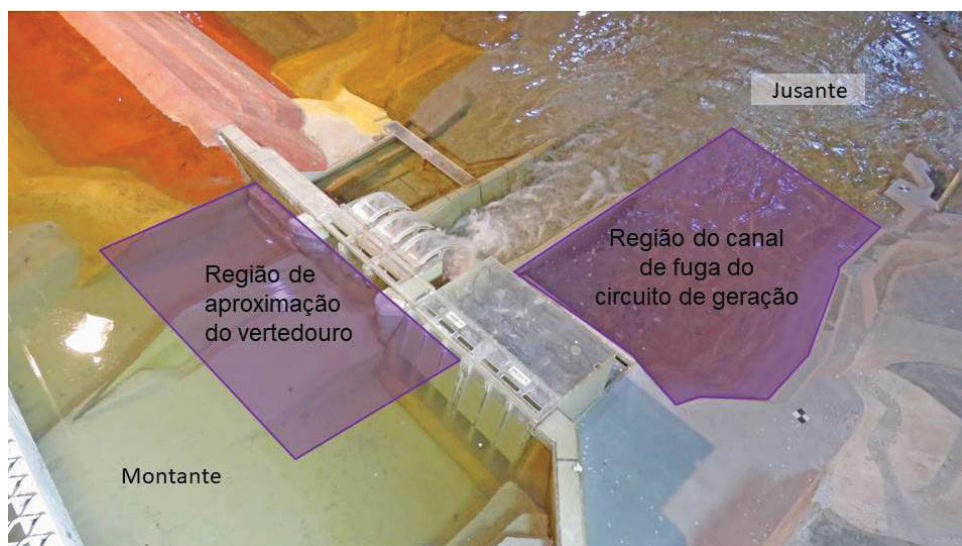
FONTE: (CEHPAR, 2015)

NOTA: Os níveis de água do reservatório e níveis do rio a jusante fazem referência ao nível do mar. A carga hidráulica refere-se a altura de água sobre a crista do vertedouro com comportas totalmente abertas.

Tendo como base os relatórios e filmagens realizados pela equipe técnica do CEHPAR para o modelo reduzido da UHE Sinop, optou-se por testar a aplicação da técnica de LS-PIV em duas regiões específicas do modelo, uma a montante, na região de aproximação do vertedouro, e outra a jusante, na região do canal de fuga do circuito

de geração. A FIGURA B.1 apresenta em destaque essas áreas de estudo escolhidas no modelo reduzido.

FIGURA B.1 – Locais para aplicação do LS-PIV



NOTA: Foto esquemática dos locais de interesse para realização de testes exploratórios para determinação do método de aplicação da técnica LS-PIV.

Foram realizadas duas séries de testes exploratórios: uma para verificar o desempenho das partículas traçadoras apresentadas no CAPÍTULO 3 e outra para definir procedimentos de calibração de velocidades e verificar o funcionamento dos equipamentos convencionais (pontuais) de medição.

Em ambas as séries de testes exploratórios, independente do objetivo específico do teste, procurou-se utilizar todo o equipamento necessário para a aplicação da técnica de LS-PIV. Desta forma, também foram ajustados e testados equipamentos de iluminação e foram definidos posicionamentos e configurações da câmera digital utilizada nas filmagens.

A seguir serão descrito os procedimentos realizados nas duas séries de testes exploratórios utilizados para auxiliar na definição geral do método de aplicação da técnica LS-PIV para este estudo.

#### B.1.1 Verificação do desempenho das partículas traçadoras para LS-PIV

Para o teste de desempenho das partículas selecionadas procurou-se observar questões relativas ao acompanhamento do fluido e as características de formação da imagens para aplicação dos algoritmos de PIV.

A partir da preparação do modelo reduzido, com a realização do ajuste da vazão e dos níveis de montante e jusante, e da montagem dos equipamentos de iluminação e filmagem, foram efetuados os lançamentos dessas partículas (sendo um tipo de

cada vez) nas duas áreas escolhidas para execução dos testes exploratórios. Além das observações feitas *in loco*, foram realizadas filmagens das partículas presentes na superfície do escoamento para cada teste.

O processo de verificação do desempenho das partículas necessitou também de uma etapa auxiliar para tratamento das imagens capturadas, com o emprego de programas específicos, e de processamento de imagens para extração de resultados, com o *software* PIVlab (THIELICKE; E. STAMHUIS, 2014). A descrição detalhada do processo de tratamento de imagens bem como a utilização do *softwares* PIVlab encontram-se descritos nos APÊNDICE C e APÊNDICE D, respectivamente.

A TABELA B.2 apresenta algumas características físicas dos materiais que foram submetidos aos testes de desempenho durante os ensaios exploratórios.

TABELA B.2 – Materiais para partículas traçadoras

Material	Composição	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Formato Dimensão
Munição de air soft	Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)	1,05	Esférico 6 mm de diâmetro
Acrílico	Polimetil-Metacrilato (PMMA)	1,18	Irregular Partículas < 2 mm
Confete de papel comum	Fibra celulósica	0,75	Disco 10 mm de diâmetro
Talco Industrial Branco	Silicato de Magnésio Hidratado	2,97	Pó

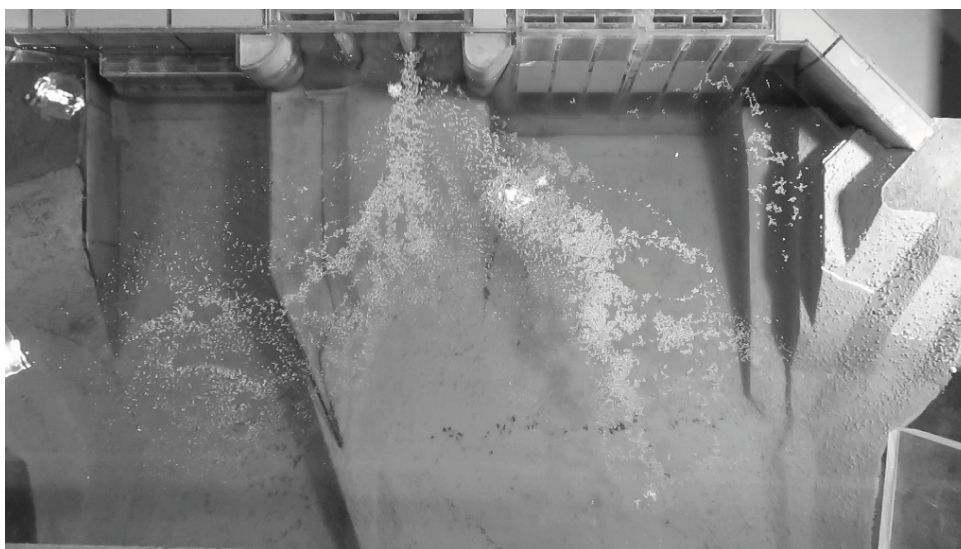
NOTA: As informações da tabela foram retiradas de catálogos de produtos, informações provenientes das embalagens disponíveis no Centro de Hidráulica (CEHPAR) e de *sites* de comercialização.

O teste com a utilização de esferas de ABS (munição de *airsoft*) foi realizado a partir do simples lançamento e observação do comportamento das partículas. Utilizou-se, para tanto, a configuração hidráulica do modelo reduzido para a vazão de 30,08 L/s (correspondente a vazão de 3.008,0 m<sup>3</sup>/s em protótipo). Estas foram lançadas manualmente a montante da barragem, próximo a região do vertedouro. As partículas de ABS foram reprovadas por afundarem praticamente de forma instantânea, não servindo, portanto, para caracterização do escoamento estudado.

Na sequência, a partir da mesma configuração hidráulica do modelo, foram lançadas partículas de acrílico (PMMA) na região de aproximação do vertedouro. Apesar da densidade destas partículas ser maior que a da água, seu reduzido tamanho fez com que a tensão superficial garantisse a flutuação observada. Durante o teste verificou-se que as partículas apresentaram tendência à aglomeração, deixando regiões do escoamento com falhas de distribuição (FIGURA B.2). Outro inconveniente

operacional ocorrido com a utilização destas partículas de formato e tamanho irregular foi a colmatação da peneira de retenção de partículas, o que causou o transbordamento do canal de restituição do modelo. Esta peneira foi inserida na saída do canal de restituição para impedir que este material particulado fosse encaminhado para a cisterna e, conseqüentemente, interferisse no sistema de recirculação de águas do Centro de Hidráulica (CEHPAR). Por estes motivos, as partículas de acrílico proveniente do processo de serragem das peças dos modelos foram consideradas reprovadas para o estudo em questão.

FIGURA B.2 – Ensaio exploratório:  $Q = 3.008,0 \text{ m}^3/\text{s}$  no protótipo



NOTA: Imagem pré processada para aplicação do PIV na região de montante da barragem, com a utilização de serragem de acrílico como traçadores. É possível observar regiões onde a concentração das partículas de acrílico encontram-se aglomeradas e regiões com inexistência das mesmas.

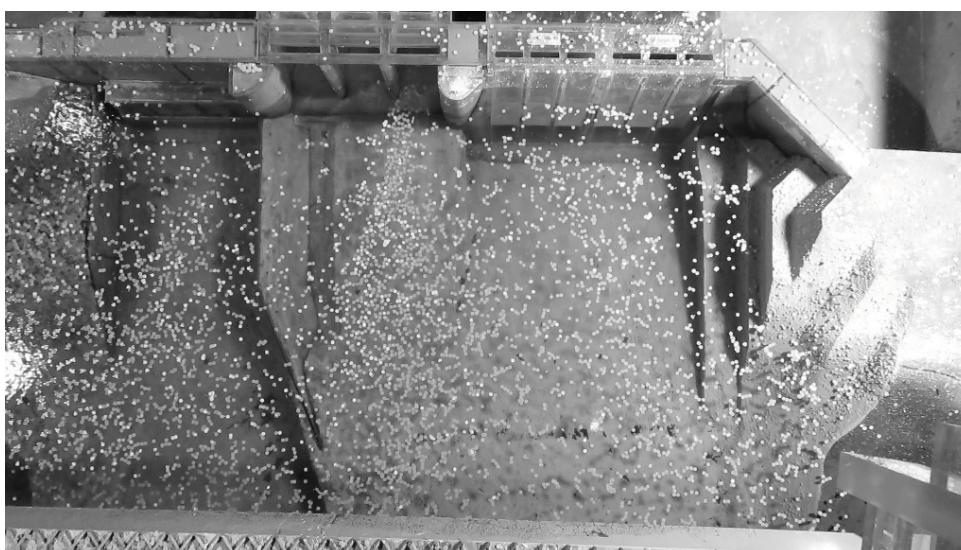
Outro material testado como partícula traçadora que se utilizou da tensão superficial da água para permanecer em suspensão foi o talco industrial. Verificou-se *in loco* que o talco industrial acarreta a formação de uma película muito fina na superfície do escoamento. Este fenômeno ocasionou o congestionamento superficial das partículas de talco em toda a região de lançamento (montante e jusante). Observou-se, com isso, que principalmente na região de maiores velocidades do escoamento (aproximação do vertedouro), ocorreu uma diminuição da velocidade das partículas. Este fato mostrou que este material não caracteriza bem o escoamento observado. Também foi verificado durante o processamento das filmagens, que as imagens em auto contraste resultantes, utilizadas pelo programa de implementação do algoritmo de PIV, não destacaram de forma correta as diminutas partículas de talco, tornando a imagem muito homogênea para a técnica de LS-PIV aplicada (FIGURA B.3).

Para os testes com a utilização de confetes de papel comum foram utilizadas as vazões de  $1.000,0 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $3.008,0 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $4.000,0 \text{ m}^3/\text{s}$  (valores de protótipo) como base

FIGURA B.3 – Ensaio exploratório:  $Q = 1.000,0 \text{ m}^3/\text{s}$  no protótipo

NOTA: Imagem pré processada para aplicação do PIV na região de montante da barragem, com a utilização de talco em pó como traçadores.

da configuração hidráulica de operação do modelo. Durante os testes, foi verificado que o excesso de confetes gera congestionamento de flutuadores e o consequente atraso das partículas. Entretanto, este fato não reprovava a utilização deste material pois o lançamento manual destas partículas pode ser controlado para que não ocorram congestionamentos. As imagens das partículas tratadas para obtenção de informações de velocidades de escoamento se mostraram adequadas para aplicação do método de LS-PIV (FIGURA B.4).

FIGURA B.4 – Ensaio exploratório:  $Q = 1.000,0 \text{ m}^3/\text{s}$  no protótipo

NOTA: Imagem pré processada para aplicação do PIV na região de montante da barragem, com a utilização de confetes de papel como traçadores.

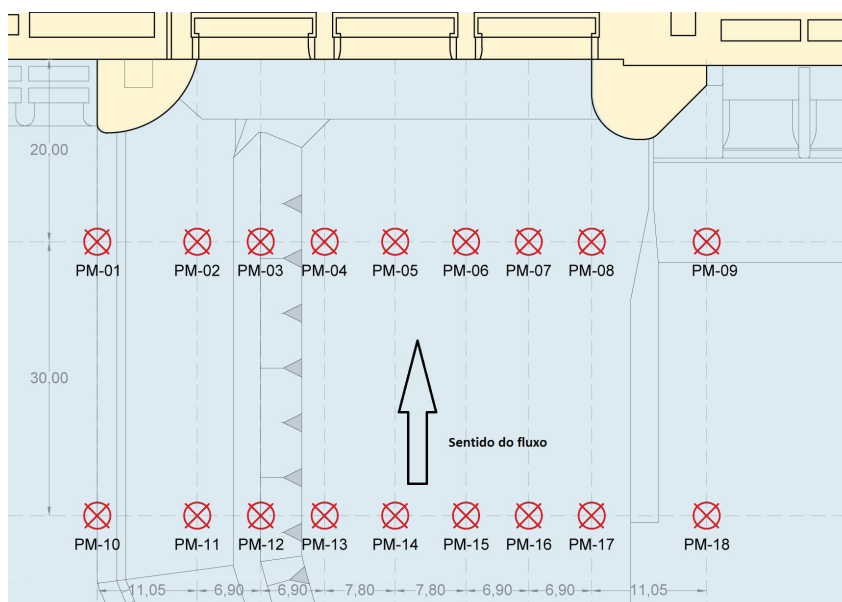
### B.1.2 Testes para medição pontual e calibração das velocidades

A medição pontual da velocidade foi realizada com o objetivo de se testar os equipamentos e fazer as primeiras comparações com os valores das velocidades obtidos pelo método de LS-PIV, verificando assim o procedimento adotado. A princípio, foi selecionado o medidor de velocidades do tipo micromolinete eletrônico da marca NIXON, modelo Streamflo 430, para realizar o levantamento das velocidades pontuais do escoamento. Este medidor possui faixa de operação que compreende valores de 5 cm/s a 100 cm/s.

Já nas primeiras medições das velocidades da região de aproximação do vertedouro, a montante da barragem, foram constatadas a existência de pontos do escoamento com velocidades menores que o mínimo admissível para a utilização deste equipamento. O mesmo ocorreu na região de jusante, que visivelmente possuía velocidades de escoamento ainda menores por se tratar de uma região de recirculação, além da intensa turbulência que interferiu na constância da rotação hélice do medidor.

Como consequência, as leituras de velocidade na região do canal de fuga do circuito de geração (a jusante da barragem) não foram realizadas, sendo procedida apenas as leituras das regiões de fluxo mais comportado, a montante da barragem. Os pontos de levantamento de velocidades encontram-se demonstrados na FIGURA B.5.

FIGURA B.5 – Pontos de medição de velocidade - Montante



NOTA: Representação (sem escala) dos pontos de medição de velocidade da região de aproximação vertedouro.

O processo de calibração é necessário para a conversão das medidas de velocidade obtidas das filmagens (*pixel/frame*) para medidas de velocidade em unidades de modelo ou protótipo (m/s). Para tanto, faz-se necessário obter medidas de distâncias

conhecidas no modelo que possam ser observadas de forma nítida nas filmagens.

Ao final desta primeira série de testes exploratórios foi realizada uma tentativa de calibração das velocidades com a utilização do programa computacional PIVlab (THIELICKE; E. STAMHUIS, 2014). Para tanto, foi necessário determinar medidas de referência tomadas ao nível do escoamento (superfície do fluido), sendo, para isso, utilizada as medidas de distância das próprias estruturas de acrílico do modelo (FIGURA B.6). Verificou-se certa dificuldade na realização destas medições, principalmente na região de montante, devido as incertezas de se definir referências próximas as margens do reservatório (contorno da topografia do modelo).

FIGURA B.6 – Medida de referência linear para o programa PIVlab



NOTA: Dificuldade de levantamento das distâncias entre dois pontos situados ao nível d'água na região do canal de fuga do circuito de geração.

Este procedimento não se mostrou muito preciso, visto que as oscilações do nível d'água dificultaram a locação destes pontos junto as margens e estruturas do modelo. Portanto, para suprir esta deficiência, fez parte de nova série de testes a utilização de um gabarito retangular de medidas conhecidas (40 cm x 70 cm) construído com material flutuante para auxiliar na determinação de medidas levantadas ao nível do escoamento.

O procedimento padrão de utilização do gabarito consistiu em posicionar a placa flutuante junto as estruturas do modelo logo após o lançamento das partículas, antes mesmo de finalizar a filmagem do teste. Este procedimento foi importante para que as referências de medida fossem realizadas nas mesmas condições hidráulicas do escoamento no momento do teste. As FIGURA B.7 e FIGURA B.8 mostram, respectivamente, o posicionamento do gabarito de calibração de velocidades posicionado na região de montante e jusante da barragem do modelo reduzido da UHE Sinop.

FIGURA B.7 – Placa de calibração - Montante



NOTA: Placa de calibração de velocidades posicionada na região de aproximação do vertedouro.

FIGURA B.8 – Placa de calibração - Jusante



NOTA: Placa de calibração de velocidades posicionada na região do canal de fuga do circuito de geração.

## B.2 CONCLUSÕES OBTIDAS DOS TESTES PRELIMINARES

A execução dos testes preliminares serviram de base para o levantamento de informações operacionais para consolidar o método de aplicação da técnica de LS-PIV descrita no CAPÍTULO 3. As principais contribuições e conclusões obtidas destes experimentos exploratórios encontram-se listados na sequência deste tópico.

### B.2.1 Traçador de confete de papel

A primeira série de testes demonstrou a possibilidade da utilização de partículas traçadoras constituídas de confetes de papel comum. Estas partículas apresentam um bom acompanhamento superficial do fluxo desde que não existam regiões com sobrecarga de material (regiões congestionadas), o que acarretaria o atraso das partículas em relação ao escoamento estudado.

O processo de tratamento de imagem e a implementação do programa de aplicação do algoritmos de PIV (ver APÊNDICE C e APÊNDICE D) demonstraram que as imagens das partículas formadas tem as características necessárias para obtenção dos campos de velocidade superficial para as regiões propostas.

### B.2.2 Gabarito de calibração de velocidades

Operacionalmente, estes testes preliminares revelaram a dificuldade de se obter medidas de referência de distâncias precisas ao nível do escoamento para o processo de calibração da velocidade na técnica de LS-PIV. Para tanto, a utilização do gabarito constituído de uma placa flutuante de dimensões conhecidas (40 cm x 70 cm) supriu de forma simples e adequada este problema de referência de distâncias.

Outra modificação realizada para consolidar o método de LS-PIV foi a inclusão da representação gráfica das seções de levantamento de velocidades na placa flutuante. Com isso, foi possível posicionar graficamente, de forma mais precisa, as seções de interesse para extração de velocidades diretamente nos programas de processamento de dados e resultados.

### B.2.3 Ortogonalidade da imagem formada

Outro aprimoramento proporcionado pela utilização da placa de calibração foi a possibilidade de verificar a ortogonalidade da imagem obtida do processo de captura, visto a constatação, durante o processamento das imagens, de imprecisões quanto a ortogonalidade do plano de filmagem em relação à superfície do escoamento.

Além disso, foram incorporados no método procedimentos para auxiliar no correto posicionamento da câmera digital, favorecendo a captura de imagens preferencialmente ortogonais nos testes de LS-PIV. A aquisição de imagens fora do plano ortogonal requer processos computacionais adicionais, tal como a utilização do programa RIVeR (*Rectification of Image Velocimetry Results*), próprio para retificação de imagens e resultados de PIV, o que dificultaria a aplicação do método proposto.

#### B.2.4 Iluminação

A utilização do equipamento completo para execução dos testes exploratórios contribuiu para o ajuste da iluminação, que num primeiro momento, apresentou áreas com demasiada reflexão em virtude do posicionamento das lâmpadas no barracão. Estes reflexos causavam inconsistências numéricas durante a implementação do algoritmo de PIV. O problema foi corrigido com a simples remoção da lâmpada que causava interferência. A FIGURA B.9 mostra a região do modelo onde foi verificada a interferência luminosa.

FIGURA B.9 – Interferência luminosa no modelo



NOTA: Área de montante com demasiada reflexão em virtude do posicionamento das lâmpadas no barracão.

#### B.2.5 Medidor de velocidade pontual

Os testes preliminares demonstraram que o medidor de velocidade do tipo micromolinete eletrônico da marca NIXON, modelo Streamflo 430 não possui faixa de operação adequada para o levantamento das velocidades pontuais nos locais propostos para o estudo. Desta forma, necessitou ser substituído por outro medidor mais adequado para as condições de escoamento observadas.

Operacionalmente, foi verificada a imprecisão na locação da sonda do medidor pontual de velocidades em relação aos pontos dentro das seções de levantamento de velocidades pela técnica de PIV. Para resolver este problema, primando por diminuir as incertezas inerentes à operação dos equipamentos de medição de velocidades convencionais, foi desenvolvido um gabarito auxiliar para apoiar corretamente as sondas/hélices desses equipamentos (gabarito apresentado no CAPÍTULO 3).

### B.2.6 Vazões de operação dos testes no modelo reduzido

Os resultados dos testes preliminares demonstraram que as três vazões ensaiadas ( $1.000,0 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $3.008,0 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $4.000,0 \text{ m}^3/\text{s}$  para valores de protótipo) apresentam características semelhantes entre si quando relacionadas ao comportamento do escoamento presente nas estruturas hidráulicas do modelo. Os locais de maior velocidade de escoamento, recirculação, estagnação são análogos nestas vazões (porém, com intensidades diferentes). Portanto, a partir deste fato, optou-se por trabalhar apenas com a vazão de  $4.000,0 \text{ m}^3/\text{s}$  (em valores de protótipo) por apresentar maiores velocidades, se ajustando melhor as condições de operação dos medidores pontuais de velocidade.

## APÊNDICE C – TRATAMENTO DE IMAGEM

A etapa da técnica de LS-PIV subsequente aos ensaios realizados diretamente no modelo reduzido é composta por uma série de procedimentos para obtenção e tratamento das imagens das partículas a partir das filmagens realizadas. Os procedimentos que compõem esta etapa são:

- Conversão da filmagem contínua do escoamento para sequência de fotos (*frame*);
- Aplicação de filtros de imagem (tons de cinza e brilho/contraste) para destacar as partículas traçadoras.

Desta forma, as imagens obtidas assumem as características necessárias para serem utilizadas na etapa de implementação do *software* PIVLab (THIELICKE; E. STAMHUIS, 2014). Na sequência, serão descritos os programas computacionais utilizados e suas funcionalidades para realizar o pré-processamento de imagens para a aplicação da técnica LS-PIV.

### C.1 PROGRAMAS PARA PRÉ-PROCESSAMENTO DE IMAGENS

A partir dos arquivos de vídeo digital de formato MPEG-4 AVC/H.264 e resolução Full HD 1.920 x 1.080: 29,97 fps são extraídas as sequências de fotos utilizadas para alimentar a etapa seguinte de correlação estatística para obtenção do campo de velocidades do escoamento pela técnica de LS-PIV. Nesta tarefa, podem ser utilizados três programas: o *Adobe Premiere Pro CC 2014*; o arquivo executável *FFmpeg.exe*; *RIVeR, Rectification of Image Velocimetry Results*.

Como resultado final da etapa de pré-processamento de imagens, obtém-se as sequências de fotos das partículas traçadores presentes no escoamento na resolução de 1.920 x 1.080 pixels e tons de cinza.

#### C.1.1 FFmpeg.exe

O *FFmpeg.exe* é um programa em linha de comando que executa uma série de funções aplicadas à áudio e vídeo, incluindo a função de conversão de formatos que podem ser utilizadas para transformar vídeo em sequência de fotos. É de distribuição gratuita e código aberto. Este programa permite verificar as propriedades do vídeo, selecionar o trecho para extração dos frames e aplica automaticamente o filtro de tons de cinza às imagens extraídas. Não possui interface muito amigável por ser executado, em versões para sistema operacional Microsoft Windows, por linha de comando em

janela de *prompt*. Por este motivo é requerido conhecimentos básicos da utilização do sistema operacional DOS para sua utilização.

### C.1.2 RIVeR

O programa RIVeR (*Rectification of Image Velocimetry Results*), desenvolvido na Universidade Nacional da Argentina (CETA) e de livre distribuição, é uma ferramenta criada para auxiliar na aplicação das técnicas de velocimetria por processamento de imagem. Sua principal função é realizar a retificação das distorções causadas por filmagens não ortogonais em relação a superfície do escoamento, sendo aplicado diretamente a resultados obtidos por PIV ou PTV. Este programa possui também uma ferramenta de extração de imagens sequenciais à partir do arquivo de vídeo, com aplicação automática de filtro de cor (tons de cinza).

### C.1.3 Adobe Premiere

O programa *Adobe Premiere Pro CC 2014*, desenvolvido pela *Adobe Systems Incorporated* é o mais versátil de todos os três por se tratar de *software* específico para edição de vídeos de quaisquer formatos. Permite, de forma visual e prática, a escolha do trecho do vídeo a ser extraído. Além de possibilitar alteração das imagens extraídas para tons de cinza, este programa possui uma infinidade de filtros e recursos para destacar as partículas traçadoras e eliminar ruídos de imagens.

## APÊNDICE D – PIVLAB

Encontra-se neste apêndice a descrição dos passos e rotinas para implementação do *software* PIVLab, aplicado diretamente a uma sequência de imagens extraídas de um dos testes realizados no ENSAIO 02 do presente estudo. O teste foi escolhido por apresentar a utilização da maioria das ferramentas e funcionalidades do *software*. Os procedimentos e parâmetros aqui apresentados foram os mesmos utilizados em todos os testes dos três ensaios preparados para o levantamento dos campos de velocidades das áreas de interesse do modelo reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop.

A etapa de implementação do *softwares* PIVlab requer uma sequência de imagens pré-processadas conforme descrição contida no APÊNDICE C. As rotinas realizadas diretamente no *softwares* PIVlab abrangem:

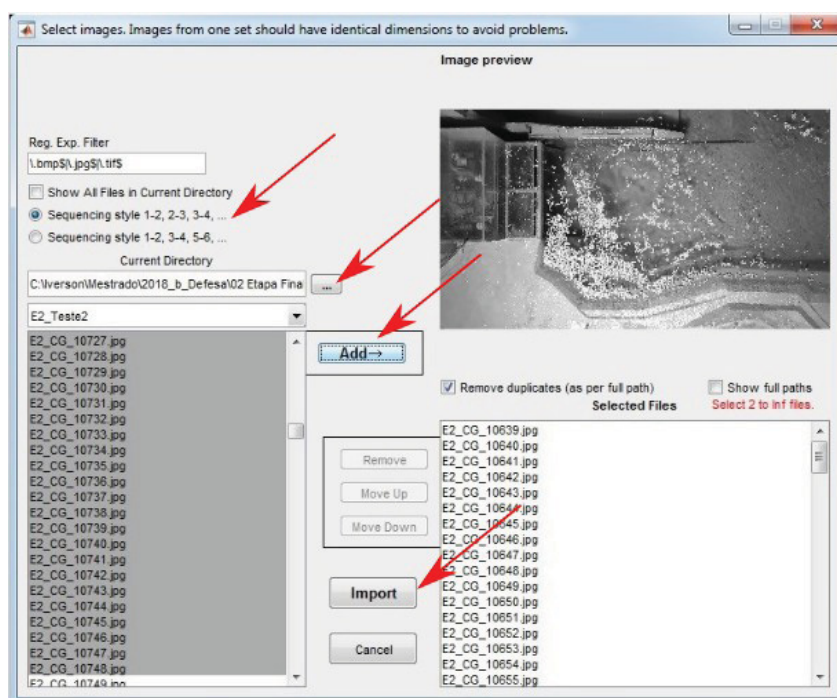
- a utilização de ferramentas de pré-processamento de imagens para ajustes de cor e aplicação de filtros de ruídos de imagens para garantir nitidez e contraste das partículas, com objetivo de garantir uma menor influência de imagens de plano de fundo;
- a utilização de ferramentas de eliminação de áreas sem interesse (ou sem escoamento) para dinamizar o processamento numérico envolvido na implementação da correlação estatística;
- o ajuste de parâmetros relativos a implementação da correlação estatística aos pares sequenciais de imagens (tamanho da janela de interrogação/passo, método de resolução, quantidades de “passadas” da resolução, método de interpolação das janelas, etc.);
- a utilização de ferramenta para verificação, substituição e eliminação de vetores espúrios;
- a calibração da velocidade a partir da imagem do gabarito utilizado no teste e da atribuição da taxa de fps (frames/quadros por segundo);
- a extração dos resultados por meio de representação gráfica quantitativa, vídeo sequencial e arquivo de dados (.txt).

Na sequência serão descritos todas as rotinas e parâmetros utilizados para a implementação da etapa de correlação estatística e obtenção de resultados com a utilização do programa PIVLab (versão 1.41).

## D.1 CARREGAMENTO DE IMAGENS

A partir da tela inicial de programa, clicar em *Load Images*. Na tela da FIGURA D.1 selecionar o item de estilo de sequência de imagens correspondente a 1–2, 2–3, 3–4. Indicar o diretório onde foram armazenadas as imagens sequenciais, adicionar à lista de imagens e importar.

FIGURA D.1 – Seleção de imagens sequenciais



NOTA: Tela do programa PIVLab para inserção de sequência de imagens de partículas a ser analisada.

LEGENDA: As flechas indicam os campos a serem selecionados (de cima para baixo).

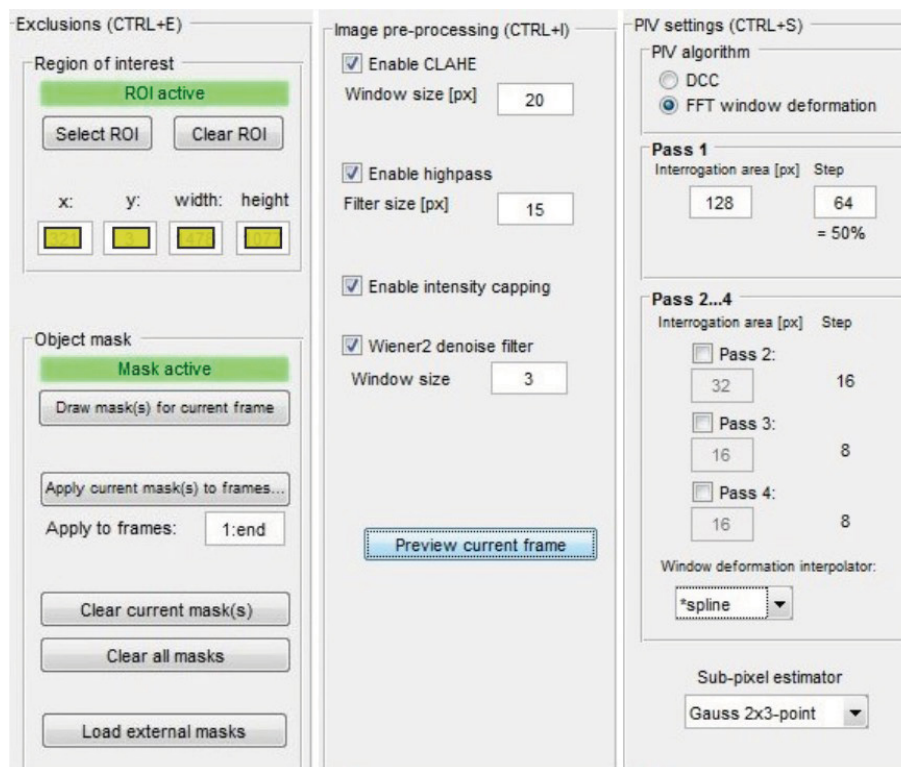
## D.2 PARÂMETROS DE ANÁLISE

Na barra de menu superior do programa, no item *Analyses settings*, ajustar os parâmetros de análise na seguinte ordem: *Exclusions (ROI, Mask)*; *Image pre-processing*; *PIV settings*.

A janela *Exclusions* define as áreas da imagem em que serão realizados os levantamentos de informações do escoamento. Esta delimitação é realizada pela definição das dimensões de um quadrante de interesse e, se necessário, complementada pela inserção de máscaras de exclusão de áreas. A janela *Image pre-processing* ajusta os filtros de contraste e nitidez das sequências de imagens. Para a análise dos pares de imagem foi adotado o algoritmo de PIV com base na Transformada Rápida de Fourier (FFT). O tamanho das janelas de interrogação e de varredura foram ajustados conforme os objetivos dos ensaios (ver CAPÍTULO 3). A interpolação das janelas foi ajustada no modo *spline* para um melhor refinamento dos cálculos. A FIGURA D.2 apresenta as

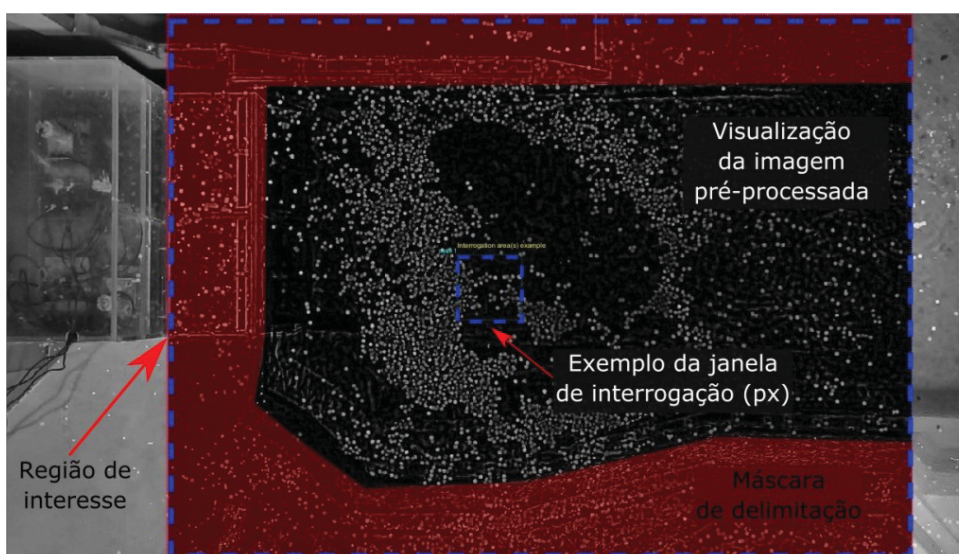
tês janelas de configuração e a FIGURA D.3 mostra em exemplo da saída gráfica do programa para estas configurações.

FIGURA D.2 – Janelas de configuração dos parâmetros de análise



NOTA: Para os ensaios do presente estudo, a janela *Image pre-processing* foi preenchida conforme indicado na figura. Os campos destacados em amarelo e as configurações da janela *PIV settings* variam conforme o ensaio.

FIGURA D.3 – Visualização prévia dos parâmetros de análise



NOTA: Exemplo de saída gráfica para visualização dos parâmetros de análise do programa PIVLab

### D.3 ANÁLISE DE SEQUÊNCIAS DE IMAGENS

Na barra de menu superior do programa, clicar no item *Analyses/Analyze!*. Ao abrir a janela de configuração, clicar em *Analyze all frames*. Este procedimento iniciará a análise das sequências de imagens. Aguardar até o indicativo de progresso completar 100 %.

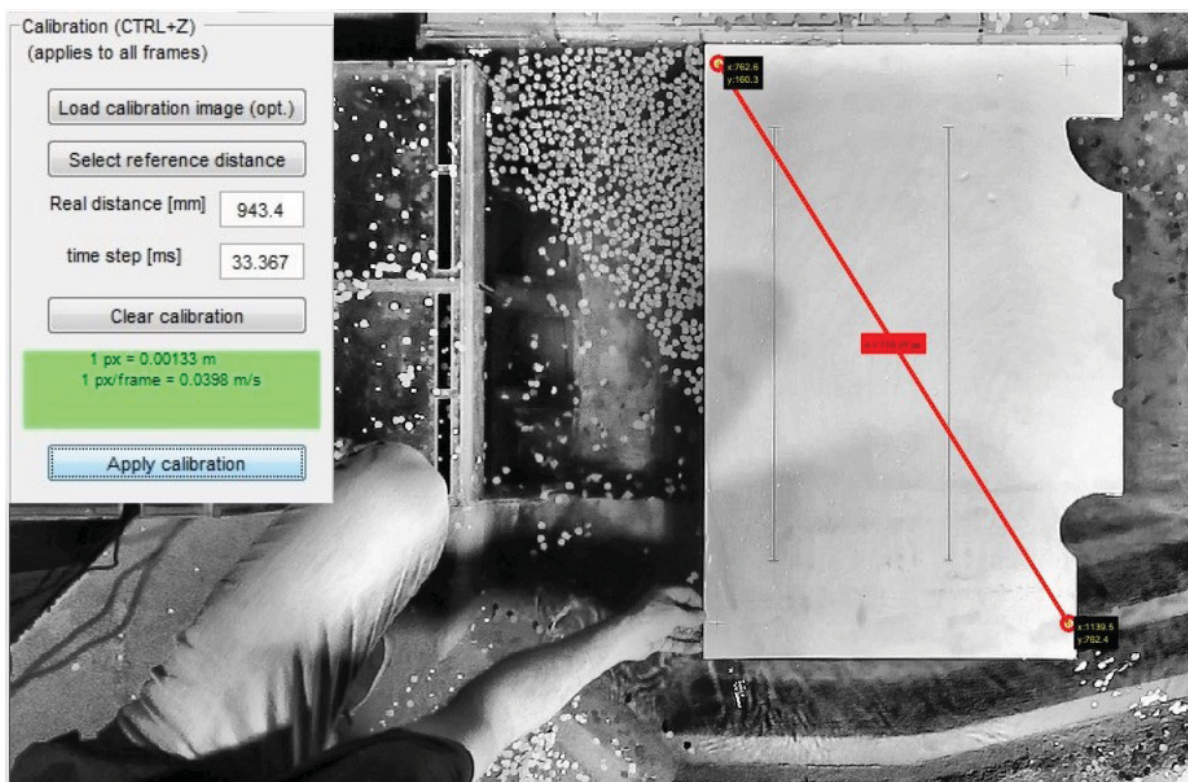
### D.4 CALIBRAÇÃO DA VELOCIDADE

Na etapa de calibração da velocidade são atribuídas referências de distâncias do modelo e tempo de intervalo entre *frames* para a conversão da velocidade de px/frame para m/s.

Para filmagens à taxa de 29,97 fps, o intervalo de tempo entre *frames* foi definido por 33,367 milissegundos. As medidas de referência foram definidas pelas marcações do quadrante do gabarito de calibração, que possui diagonal com 943,40 mm de comprimento.

Na barra de menu superior do programa, clicar no item *Calibration/Calibrate using current or external image*. Clicar e preencher os campos na sequência mostrada na FIGURA D.4.

FIGURA D.4 – Calibração da velocidade



NOTA: Janela de ajustes de parâmetros de calibração de velocidades com utilização de imagem do gabarito de calibração, desenvolvido para esta finalidade.

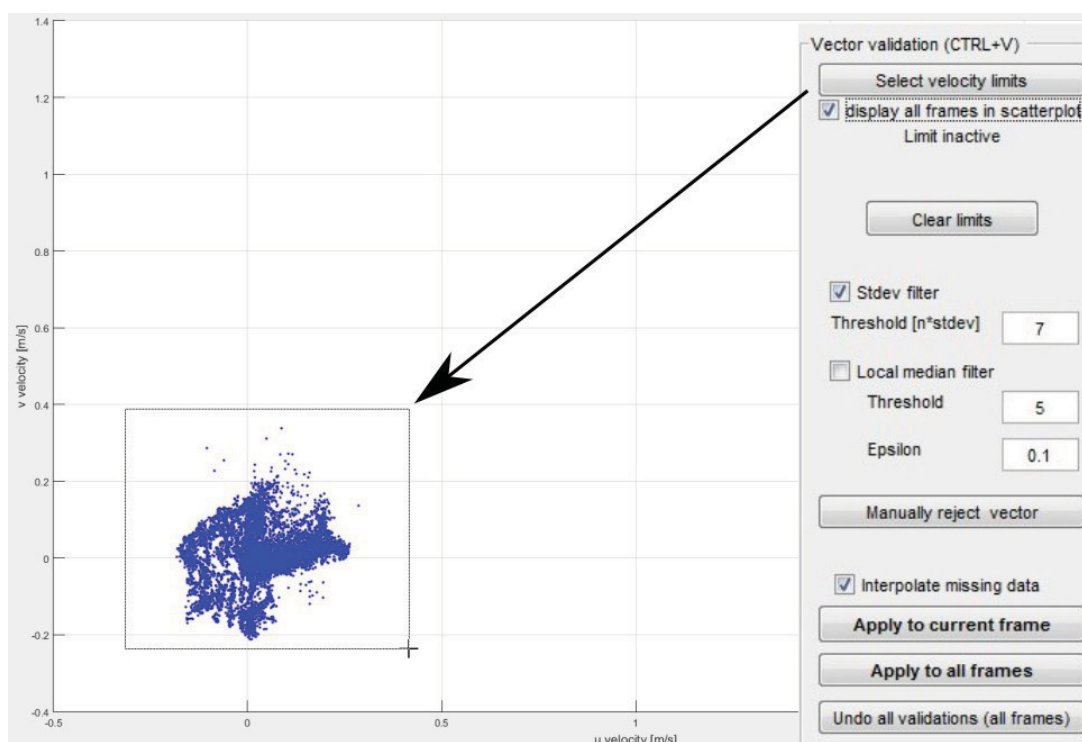
## D.5 VALIDAÇÃO DE VETORES

No final do processo de análise dos pares sequenciais das imagens das partículas do escoamento tem-se a distribuição vetorial de toda a área de levantamento para cada par de imagem analisado.

A partir desta etapa é realizado um processo de validação para descartar vetores espúrios e substituí-los por vetores correspondentes à média dos vetores vizinhos.

Na barra de menu superior do programa, clicar no item *Post processing/Vector validation*. A partir do ajustes de parâmetros da janela conforme a FIGURA D.5, clicar em *Select velocity limits* e delimitar o valor das componentes  $u$  e  $v$  do vetor velocidade diretamente no gráfico de dispersão apresentado.

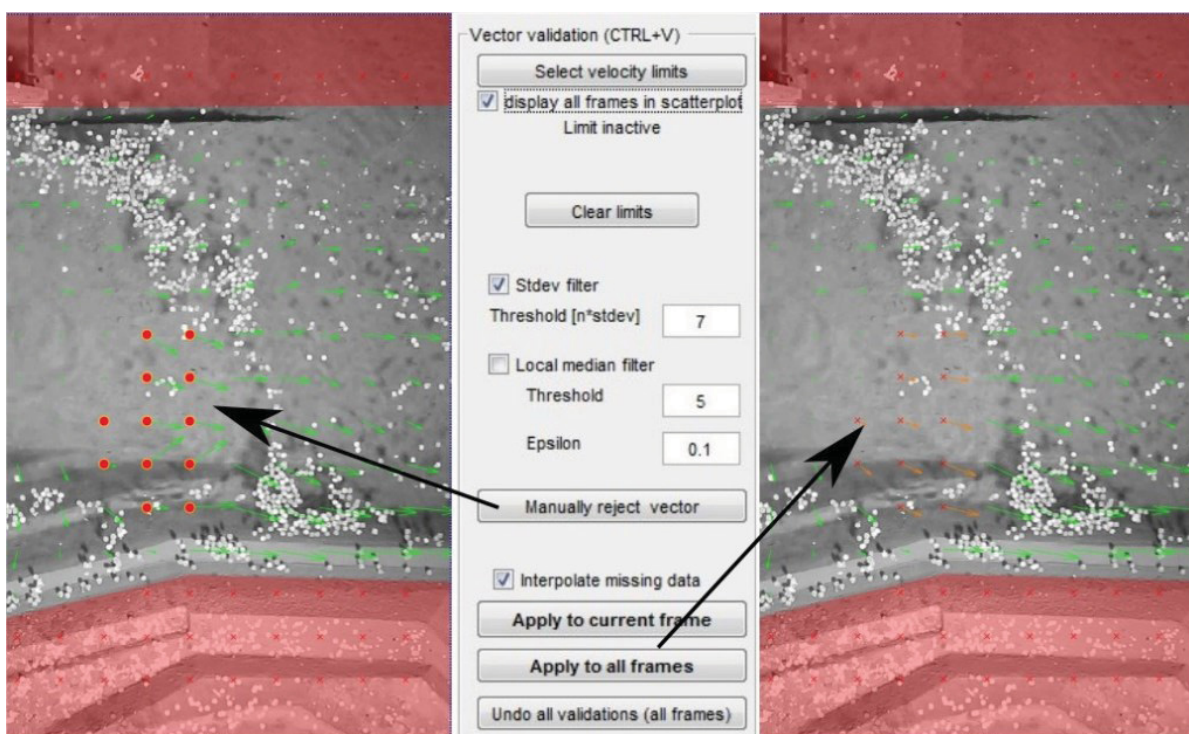
FIGURA D.5 – Validação de vetores – Gráfico de dispersão



NOTA: Representação da janela do programa PIVlab que habilita o gráfico de dispersão das componentes  $u$  e  $v$  da velocidade. Na imagem é mostrada a seleção manual da região de predominância de resultados, descartando assim vetores espúrios (*outliers*).

É possível a partir da mesma janela de configuração analisar o resultado de forma mais refinada, mudando valores de filtros de critérios de limites (desvio padrão e média local) para as componentes da velocidade. Também é possível fazer a análise manual de cada sequência de imagens a partir do botão *Manually reject vector*. Com esta ferramenta, basta selecionar os vetores que se deseja eliminar e, após aplicar a validação, estes vetores serão substituídos por vetores correspondentes à média de seus vizinhos (FIGURA D.6).

FIGURA D.6 – Validação de vetores – Eliminação manual de vetores espúrios



NOTA: Janela do programa PIVLab para refinamento dos resultados e tratamento manual de vetores inconsistentes.

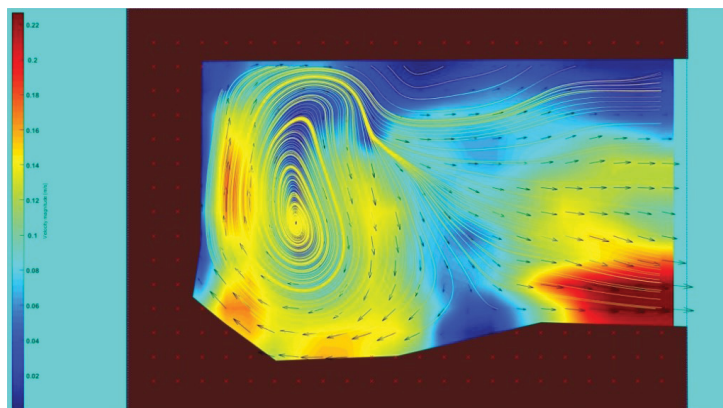
## D.6 VISUALIZAÇÃO DE RESULTADOS

A visualização de resultados gráficos quantitativos é habilitada na barra de menu superior do programa no item *plot*, que conta três janelas principais de seleção de parâmetros.

Na janela *Device parameters* é possível visualizar os resultados gráficos das variáveis disponíveis no programa, atribuir suavizações de resultados, subtrair médias de velocidades, aplicar filtros e calcular médias. Na janela *Modify plot appearance* é possível mudar a escala dos vetores, espessura de linha, mudar o espaçamento da representação gráfica dos vetores, mudar as cores dos tipos de vetores, mudar o esquema cromático da apresentação de resultados e inserir legenda. Na Janela *Streamlines* são habilitadas as visualizações das linhas de corrente do escoamento resultante (incluindo mudanças de cores e espessuras).

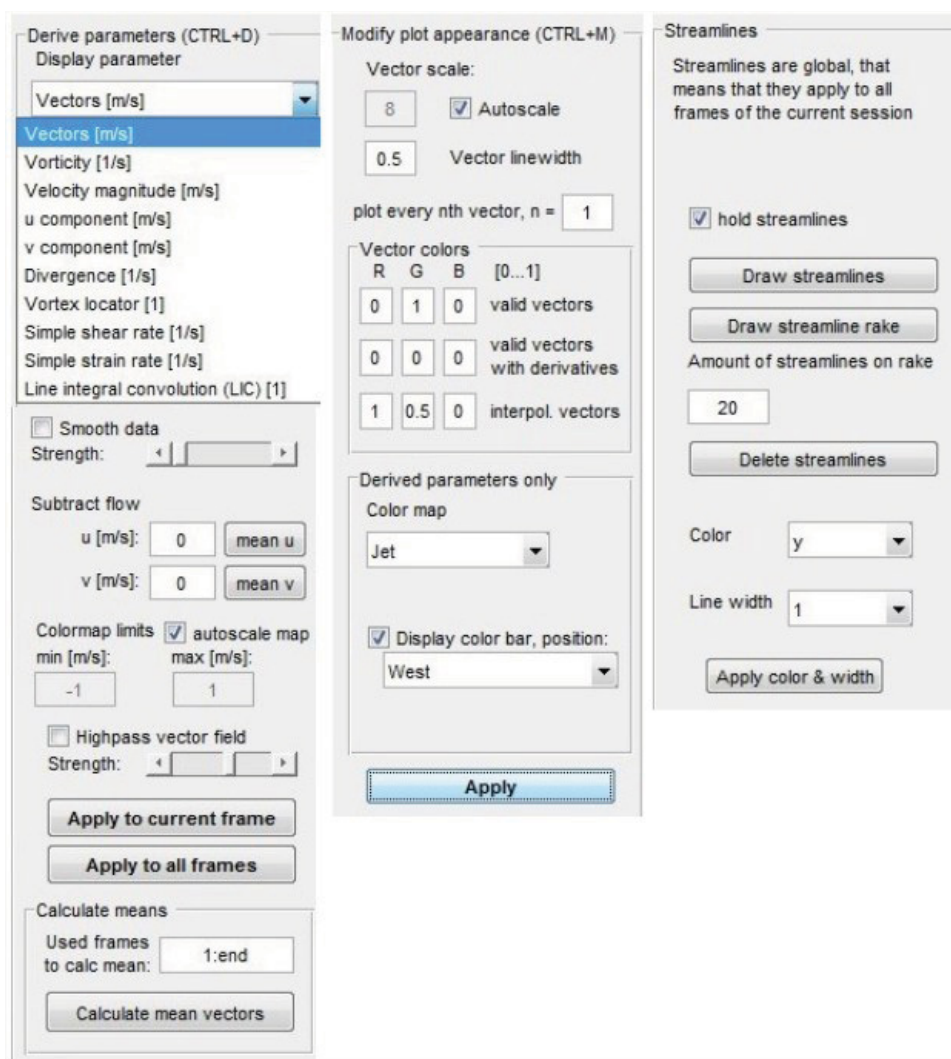
A FIGURA D.7 apresenta um exemplo da representação gráfica contendo uma série de itens de visualização de resultados disponíveis. A FIGURA D.8 apresenta as janelas de parâmetros demonstrando todas as variáveis disponíveis para visualização de resultados.

FIGURA D.7 – Visualização de resultados



NOTA: Exemplo de representação gráfica quantitativa de resultados.

FIGURA D.8 – Janelas de configuração – Visualização de resultados



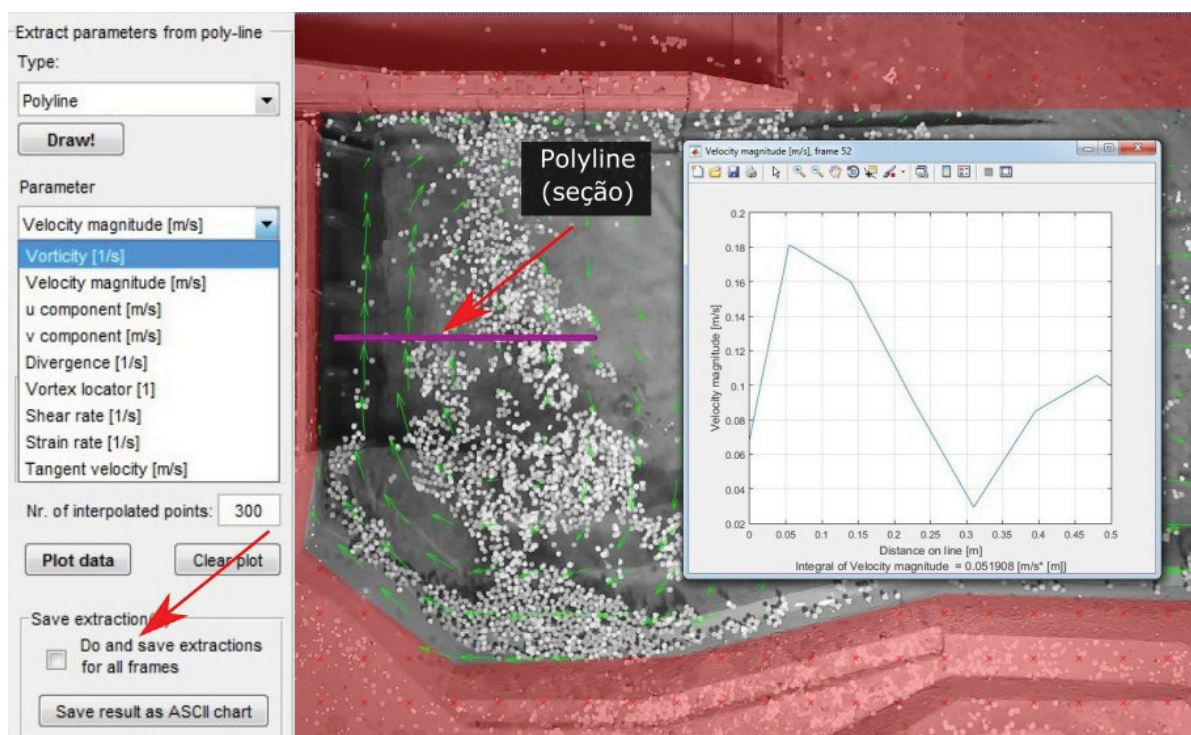
NOTA: A figura apresenta lista de variáveis disponíveis, demais janelas para ajuste da aparência e obtenção de linhas de corrente.

## D.7 EXTRAÇÃO DE RESULTADOS

Na barra de menu superior do programa, clicar no item *Extractions/Calibrate using current or external image*. É possível selecionar dois tipos de extração: *Extract parameters from poly-line*; *Extract parameters from area*.

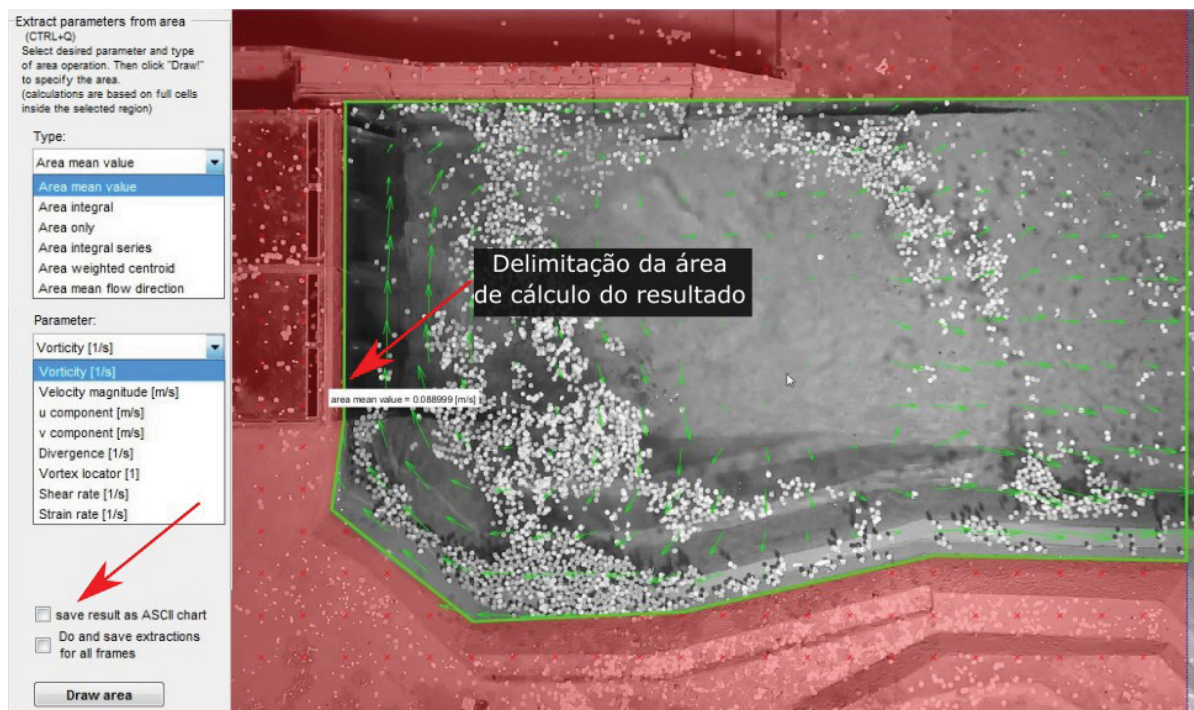
O procedimento básico para ambos os tipos de extração de resultados consiste em selecionar a variável de interesse, marcar na imagem a linha da seção ou área, de acordo com a janela escolhida, e habilitar o campo de salvamento de resultados. A FIGURA D.9 apresenta um exemplo de extração de resultados por *polyline*. A FIGURA D.10 apresenta uma extração de resultados realizada por delimitação de área de interesse.

FIGURA D.9 – Extração de resultados por seção



NOTA: A figura mostra a lista de variáveis disponíveis para extração de resultados por seções. Mostra também um exemplo de definição de seção e gráfico correspondente.

FIGURA D.10 – Extração de resultados por área

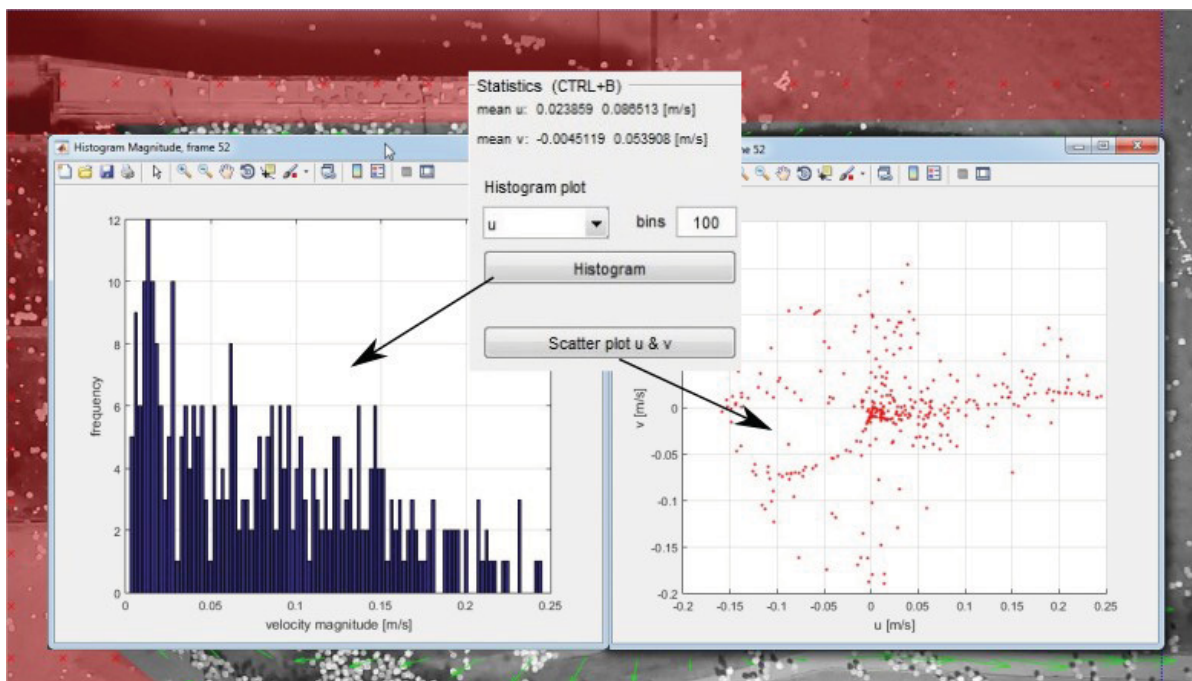


NOTA: Resultados obtidos para a área delimitada. Lista de variáveis disponíveis.

## D.8 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Na barra de menu superior do programa, clicar no item *Statistic/Statistic*. Podem ser extraídos os histogramas da magnitude da velocidade e das componentes  $u$  e  $v$  da velocidade. O gráfico de dispersão das componentes da velocidade para cada sequência de imagens analisada também pode ser obtido por esta janela de programa. A FIGURA D.11 apresenta um exemplo de histograma e gráfico de dispersão vetorial.

FIGURA D.11 – Análises estatísticas



NOTA: Representação gráfica de ferramentas de análises estatísticas disponíveis no programa PIVLab.

## D.9 ARQUIVOS DE SAÍDA DE RESULTADOS

Na barra de menu superior do programa, clicar no item *File/Save*. É apresentado no submenu a seguinte lista adicional de formatos de saída de resultados fornecidos pelo programa PIVLab:

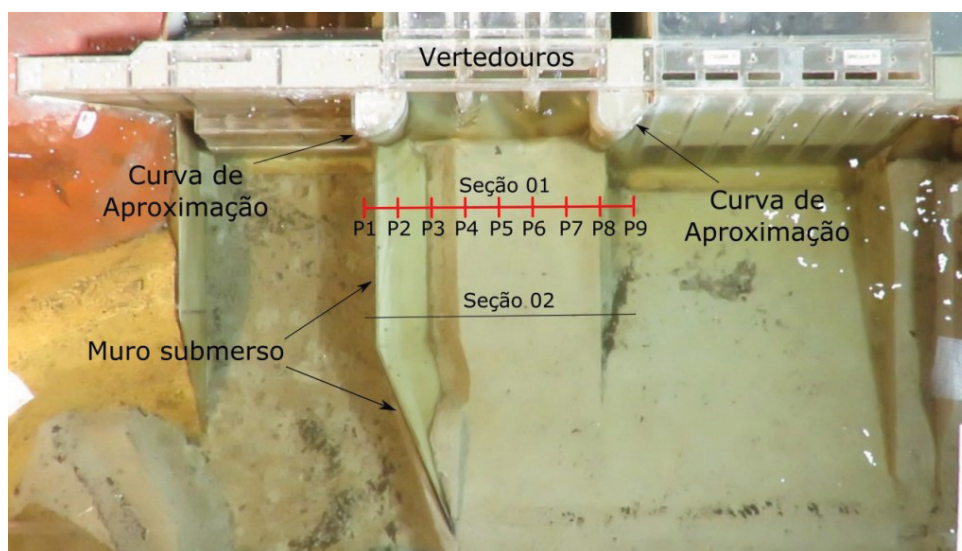
- *PIVlab session*;
- *Single image or image sequence (avi, jpg, bmp, eps)*;
- *ASCII-files (x,y,u,v,vort)*;
- *MAT-files*;
- *Paraview binary VTK*;
- *All results to MATLAB workspace*;
- *Current PIVlab settings*.

## APÊNDICE E – MEDIÇÕES PONTUAIS DE VELOCIDADE

### E.1 SEÇÃO 01

A Seção 01 está situada a 25 cm do alinhamento do vertedouro e estende-se desde o muro submerso do lado esquerdo do vertedouro até o elemento curvo de aproximação do lado direito, como pode ser observado na FIGURA E.1.

FIGURA E.1 – Características do entorno da Seção 01



NOTA: Representação da locação das estruturas hidráulicas que interferem no escoamento observado na Seção 01.

Estas características geométricas do entorno da seção de medição fazem o escoamento desta região apresentar diferentes comportamentos em relação aos valores das velocidades da superfície e direções do fluxo. Os pontos de medição P1, P2 e P3 apresentam uma visível aceleração imposta pelo muro submerso desta região, além de possuírem direções de propagação praticamente paralelas à seção. Os pontos de medição P4 a P7 apresentam velocidades elevadas em virtude da proximidade com o vertedouro e, com relação à direção predominante do escoamento, apresentam-se mais perpendiculares em relação à seção de medição. Por fim, os pontos P8 e P9 tiveram suas velocidades e direções de propagação do escoamento influenciadas pelo muro curvo de aproximação do lado direito do vertedouro.

A turbulência presente na região acarretou incertezas quanto a inalterabilidade do ângulo de posicionamento do molinete em relação à direção de propagação do escoamento que, com este tipo de medidor, costuma ser acertado de forma visual, utilizando-se de corantes ou traçadores para auxiliar nesta tarefa.

Apesar destas incertezas presentes no processo de medição pontual deste

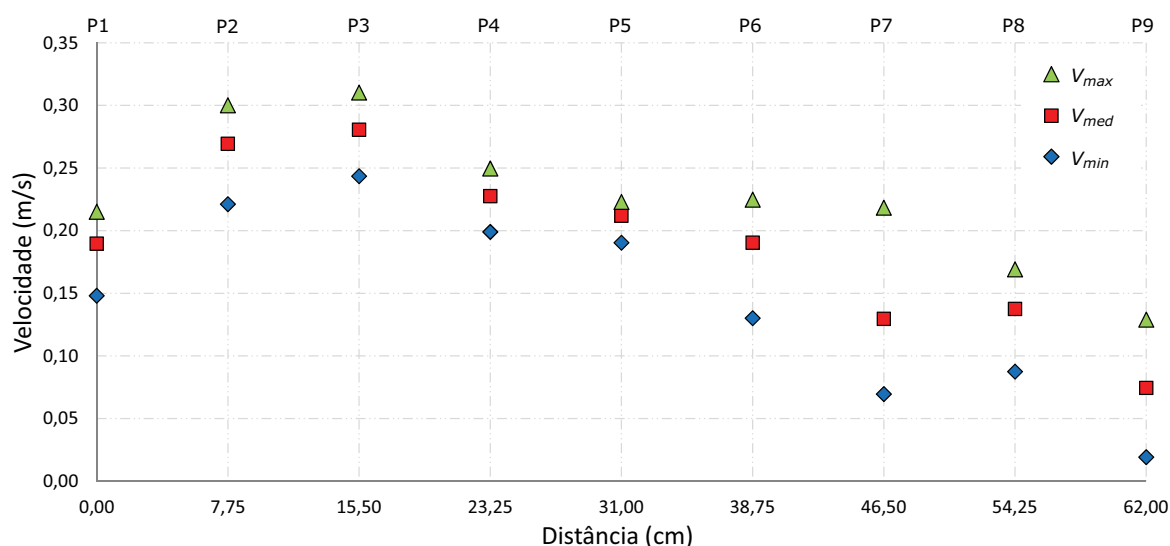
local, as velocidades levantadas com a utilização do micromolinetete Delft para os nove pontos dentro da Seção 01 foram utilizadas como valor de referência para validar os testes de LS-PIV. A TABELA E.1 e o gráfico da FIGURA E.2 apresentam os valores pontuais medidos, destacando valores mínimos, médios e máximos para cada ponto.

TABELA E.1 – Velocidades pontuais da Seção 01

Ponto	Distância (cm)	Velocidades (m/s)		
		Mínima	Média	Máxima
P1	0,00	0,15	0,19	0,22
P2	7,75	0,22	0,27	0,30
P3	15,50	0,24	0,28	0,31
P4	23,25	0,20	0,23	0,25
P5	31,00	0,19	0,21	0,22
P6	38,75	0,13	0,19	0,22
P7	46,50	0,07	0,13	0,22
P8	54,25	0,09	0,14	0,17
P9	62,00	0,02	0,07	0,13

NOTA: As velocidades obtidas para os nove pontos da Seção 01. A distância apresentada define a posição do ponto sobre a seção, referenciados da esquerda para a direita.

FIGURA E.2 – Velocidades pontuais - Seção 01



LEGENDA:  $V_{max}$ ,  $V_{med}$  e  $V_{min}$  representam as medições de velocidade máximas, médias e mínimas (respectivamente) com a utilização do micromolinetete Delft. Indicações P1 a P9 na parte superior do gráfico marcam as posição dos pontos da Seção 01.

As medidas levantadas de forma pontual com o micromolinetete Delft apontaram uma extensa faixa de velocidades que variaram desde 0,02 m/s até picos de 0,31 m/s, se considerada a mínima e a máxima velocidade observada em toda a seção. Para valores médios de velocidade, esta amplitude passa a ser de 0,07 m/s para a mínima e 0,28 m/s para a máxima velocidade dentro da seção.

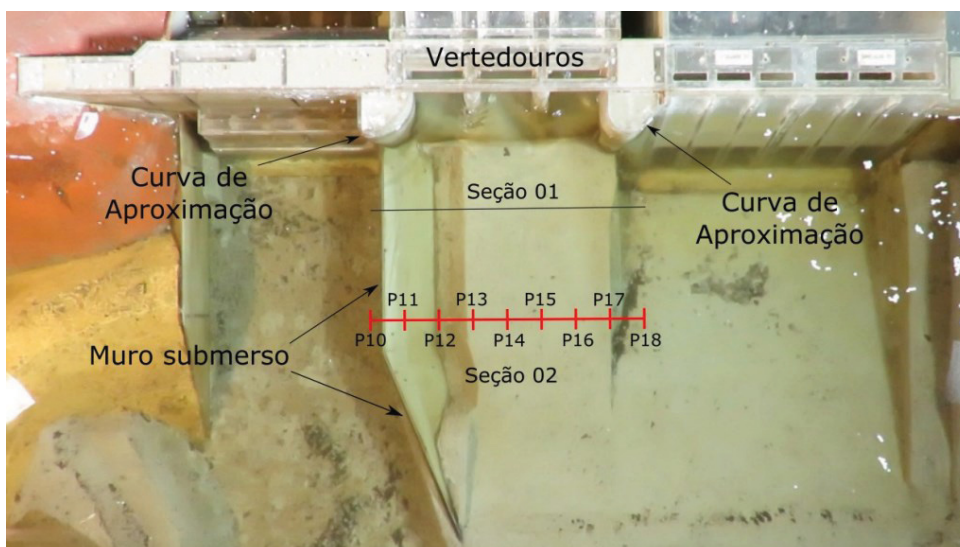
Foi constatado que as maiores velocidades foram decorrentes dos efeitos hidrodinâmicos causados pelo muro submerso, localizado na região de aproximação do lado esquerdo do vertedouro. Por consequência, as maiores velocidades registradas ocorreram nos pontos P2 e P3, pertencentes a esta região de grande interferência hidrodinâmica. Já as menores velocidades foram medidas no ponto P9, na extrema direita da seção, que visivelmente apresenta um escoamento menos sujeito à interferências originadas pelas estruturas hidráulicas desta região.

Com relação às variações das velocidades registradas para um mesmo ponto, foi verificado que o ponto P7 apresentou a maior amplitude, com valores que variaram de 0,07 m/s a 0,22 m/s. Nesta região foi verificado o encontro do escoamento das duas aproximações, causando, desta forma, movimentos intermitentes do fluido que acabaram por ser registrados pelo micromolinete.

## E.2 SEÇÃO 02

A Seção 02, diferente da anterior, por estar mais afastada da região de aproximação do vertedouro (50 centímetros do alinhamento da barragem) possui uma configuração de escoamento que tem como principal estrutura de interferência o mesmo muro submerso do lado esquerdo da aproximação (FIGURA E.3).

FIGURA E.3 – Características do entorno da Seção 02



NOTA: Representação da locação das estruturas hidráulicas que interferem no escoamento observado na Seção 02.

Durante o levantamento das velocidades pontuais de referência com uso de método convencional de medição, foi verificado que o muro submerso influenciou no comportamento do escoamento dos pontos P10 a P12 imprimindo um aumento de velocidades nesta região. As direções do escoamento para esses pontos também se apresentaram mais paralelas à Seção 02 devido à esse aumento de velocidade. O

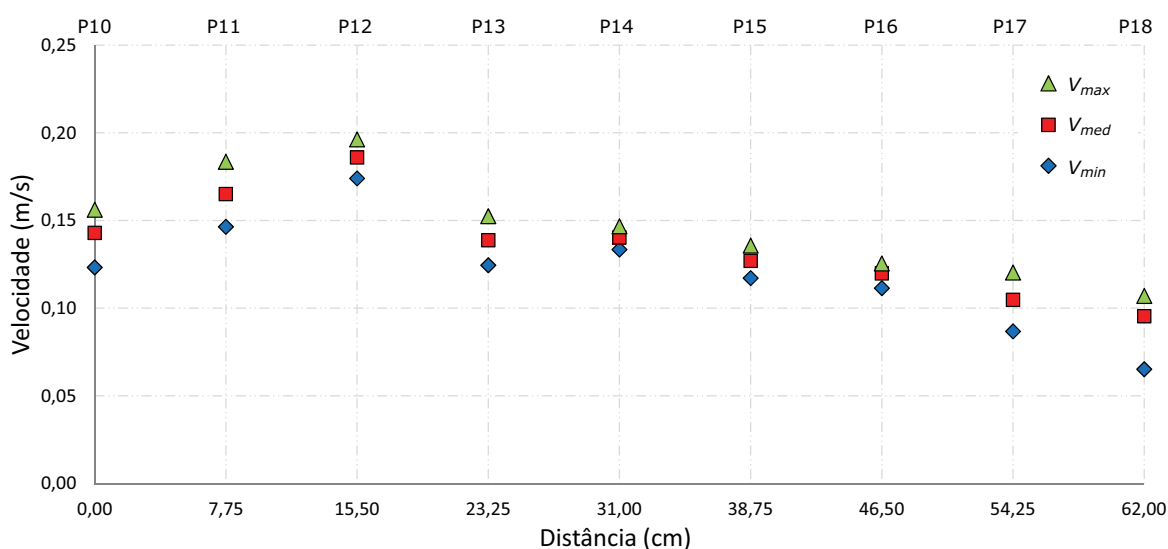
escoamento se tornou mais regular a partir do ponto P13, apresentando velocidades menores e direções de propagação quase perpendiculares à seção de estudo. As características mais regulares do escoamento desta seção contribuíram para uma leitura pontual de velocidades mais precisa. A TABELA E.2 e o gráfico da FIGURA E.4 apresentam os valores pontuais medidos, destacando valores mínimos, médios e máximos para cada ponto.

TABELA E.2 – Velocidades pontuais da Seção 02

Ponto	Distância (cm)	Velocidades (m/s)		
		Mínima	Média	Máxima
P10	0,00	0,12	0,14	0,16
P11	7,75	0,15	0,17	0,18
P12	15,50	0,17	0,19	0,20
P13	23,25	0,12	0,14	0,15
P14	31,00	0,13	0,14	0,15
P15	38,75	0,12	0,13	0,14
P16	46,50	0,11	0,12	0,13
P17	54,25	0,09	0,10	0,12
P18	62,00	0,07	0,10	0,11

NOTA: As velocidades obtidas para os nove pontos da Seção 02 foram medidos com a utilização do micromolinetete Delft. A distância apresentada nesta tabela define a posição do ponto sobre a seção, referenciados da esquerda para a direita.

FIGURA E.4 – Velocidades pontuais - Seção 02



LEGENDA:  $V_{max}$ ,  $V_{med}$  e  $V_{min}$  representam as medições de velocidade máximas, médias e mínimas (respectivamente) com a utilização do micromolinetete Delft. Indicações P10 a P18 na parte superior do gráfico apontam as posições dos pontos da Seção 02.

Para esta seção, a faixa geral de velocidades levantadas com o micromolinetete variou desde 0,07 m/s a 0,20 m/s, se considerada a mínima e a máxima velocidade

observada em toda a seção. Para valores médios de velocidade, as variações foram de 0,10 m/s para a mínima e 0,19 m/s para a máxima velocidade dentro da seção, demonstrando, assim, menores amplitudes em relação a Seção 01.

### E.3 PERFIL DE VELOCIDADES – PONTO P16

A validação do método de LS-PIV consiste da comparação direta entre as velocidades obtidas por esta técnica de processamento de imagens e as velocidades medidas pelo micromolinete Delft. No entanto, como o método LS-PIV mede exclusivamente as velocidades da superfície do escoamento, foi necessário verificar o perfil vertical de velocidades para conhecer a relação direta entre a leitura realizada por um método convencional intrusivo, ligeiramente abaixo do nível do escoamento, e o método superficial.

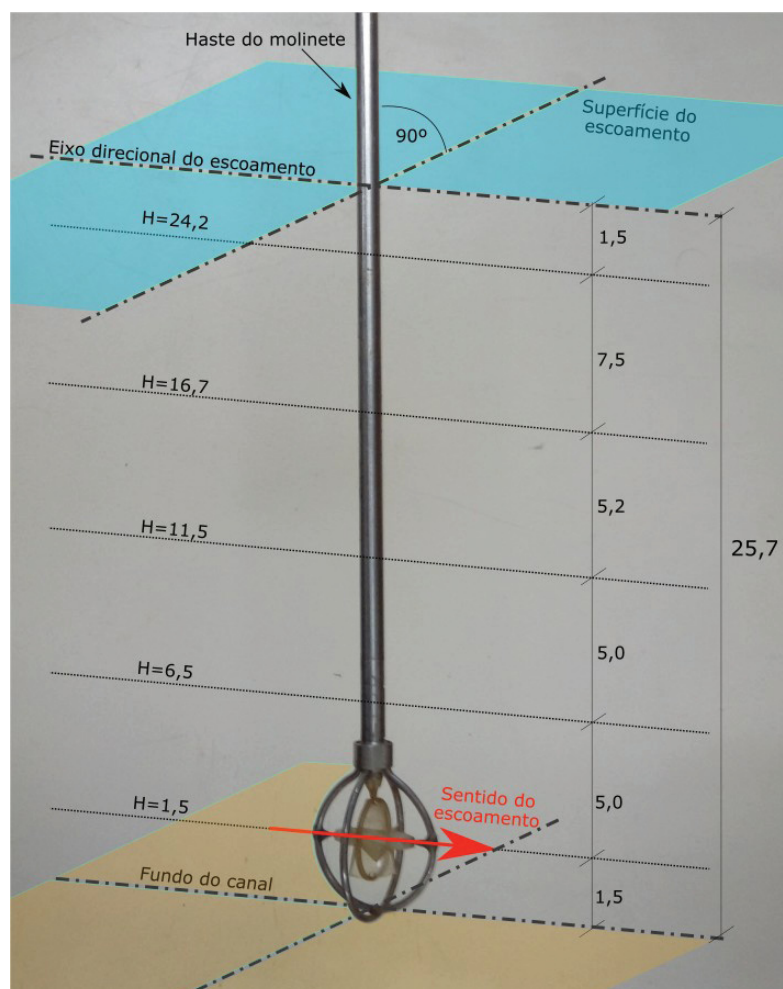
Por simplificação do método proposto, foi escolhido um único ponto (P16) para levantamento do perfil vertical de velocidades com uso de equipamento intrusivo (micromolinete Delft). O local da escolha foi devido às características do escoamento que, de maneira geral, apresentou linhas de trajetória perpendicular ao vertedouro (eixo da seção de referência), com pouca interferência das estruturas hidráulicas do entorno, e velocidades visivelmente menores.

Foram definidas cinco profundidades em relação ao nível do escoamento no ponto escolhido. A medida de velocidade mais superficial respeitou a submersão mínima exigida pela hélice do equipamento. O limite inferior do perfil foi definido ligeiramente acima do fundo do canal. A FIGURA E.5 apresenta, de forma esquemática, as profundidades de levantamento de velocidades para composição do perfil vertical.

Os valores mínimos, médios e máximos levantados pelo equipamento intrusivo para o ponto P16 encontram-se na TABELA E.3. O perfil vertical representado graficamente para este ponto está demonstrado na FIGURA E.6.

A partir da interpretação dos resultados, foi constatada a distribuição uniforme do perfil de velocidades próximas à superfície do escoamento. Desta forma, optou-se por comparar de forma direta as velocidades levantadas pelo micromolinete (à profundidade mínima de 1,5 cm) e as obtidas pelo método LS-PIV para o estudo proposto. Possíveis diferenças no perfil de velocidades para os outros pontos em função de interferências causadas por estruturas hidráulicas do entorno, por simplificação do método, não foram consideradas.

FIGURA E.5 – Profundidades de medição de velocidades



NOTA: Representação esquemática das profundidades de medição intrusiva para determinação do perfil vertical de velocidades do escoamento no ponto P16.

LEGENDA: Desenho sem escala. Medidas em centímetros (modelo).

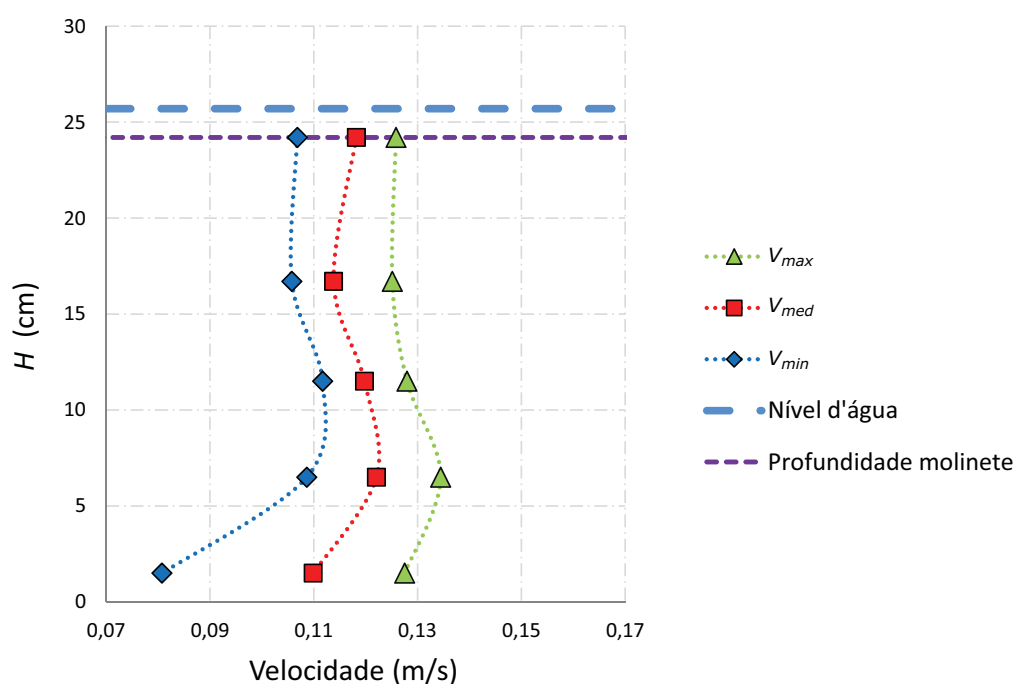
TABELA E.3 – Levantamento de velocidades – perfil vertical

$H$ (cm)	$V_{min}$ (m/s)	$V_{med}$ (m/s)	$V_{max}$ (m/s)
24,2	0,107	0,118	0,126
16,7	0,106	0,114	0,125
11,5	0,112	0,120	0,128
6,5	0,109	0,122	0,134
1,5	0,081	0,110	0,128

NOTA: As variáveis  $V_{min}$ ,  $V_{med}$  e  $V_{max}$  representam as leituras das velocidades mínimas, médias e máximas obtidas para cinco profundidades do escoamento sob o ponto P16.

LEGENDA:  $H$  — Altura do escoamento a partir do fundo do canal.

FIGURA E.6 – Perfil vertical de velocidades – Ponto P16



NOTA: O gráfico demonstra o perfil de velocidades praticamente uniforme para as profundidades mais próximas à superfície do escoamento. Desta forma, adotou-se a leitura das velocidades realizada com o uso do micromolinete Delft para submersão mínima (1,5 cm de profundidade) como sendo as velocidades da superfície do escoamento.

LEGENDA: Marcações geométricas  $V_{max}$ ,  $V_{med}$  e  $V_{min}$  representam as medições de velocidade máximas, médias e mínimas (respectivamente) com a utilização do micromolinete Delft. Linha horizontal de traços longos (na cor azul): indicação do nível d'água. Linha horizontal de traços curtos (na cor roxa): profundidade de submersão mínima da hélice do micromolinete.

## APÊNDICE F – DENSIDADE SUPERFICIAL DE PARTÍCULAS

Para o presente estudo de aplicação da técnica de LS-PIV para o modelo reduzido da Usina Hidrelétrica de Sinop foram utilizadas definições próprias de parâmetros de densidades superficial de partículas a fim de contribuir com as análises das imagens dos testes e resultados obtidos.

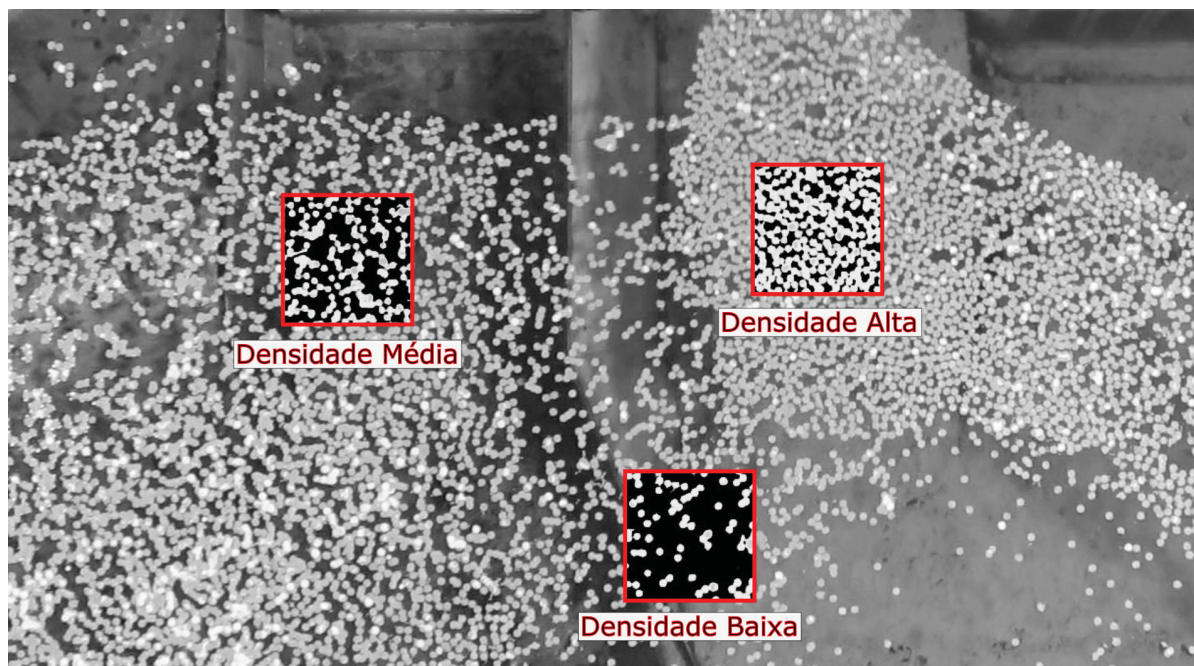
Com este propósito, foram criados padrões de intensidades de densidades das partículas em suspensão no escoamento atrelados ao tamanho principal da janela de interrogação utilizada no *software* PIVLaB, definida por um quadrado de 128 pixels de lado. Por padronização, foram analisadas as imagens de testes realizados com os dois tipos de partículas traçadoras (confetes pequenos e grandes) no que tange o preenchimento de uma janela de interrogação e a quantificação da intensidade média cromática resultante deste preenchimento.

O procedimento adotado consiste na aplicação de filtros de nitidez e contrastes às janelas de interrogação dispostas sobre diferentes padrões de espalhamento de partículas. Com isso, foi obtida uma imagem em preto & branco da janela e realizada a medição da intensidade cromática média resultante. Por definição, a escala cromática varia de zero (para áreas totalmente escuras) à 255 (para áreas totalmente claras). A partir destes valores foram calculados os percentuais de preenchimento para níveis de densidade superficiais de partículas (faixas de valores para baixo, médio e alto). A FIGURA F.1 e a FIGURA F.2 apresentam os padrões selecionados para traçadores superficiais para a técnica de LS-PIV constituídos de confetes grandes e pequenos, respectivamente.

Os padrões de espalhamento foram definidos de forma qualitativa a partir da observação dos casos extremos de preenchimento. Desta forma, foi definido como intensidade alta as regiões do escoamento onde a janela de interrogação estivesse completamente preenchida por partículas traçadoras, restando apenas as frestas das áreas de contato entre estas. Densidades baixas foram definidas para regiões com predominância de espaços vazios e traçadores distanciados dentro da janela de interrogação. Os casos intermediários, com traçadores mais próximos, porém sem predominância de contato entre eles, foram considerados como densidade média.

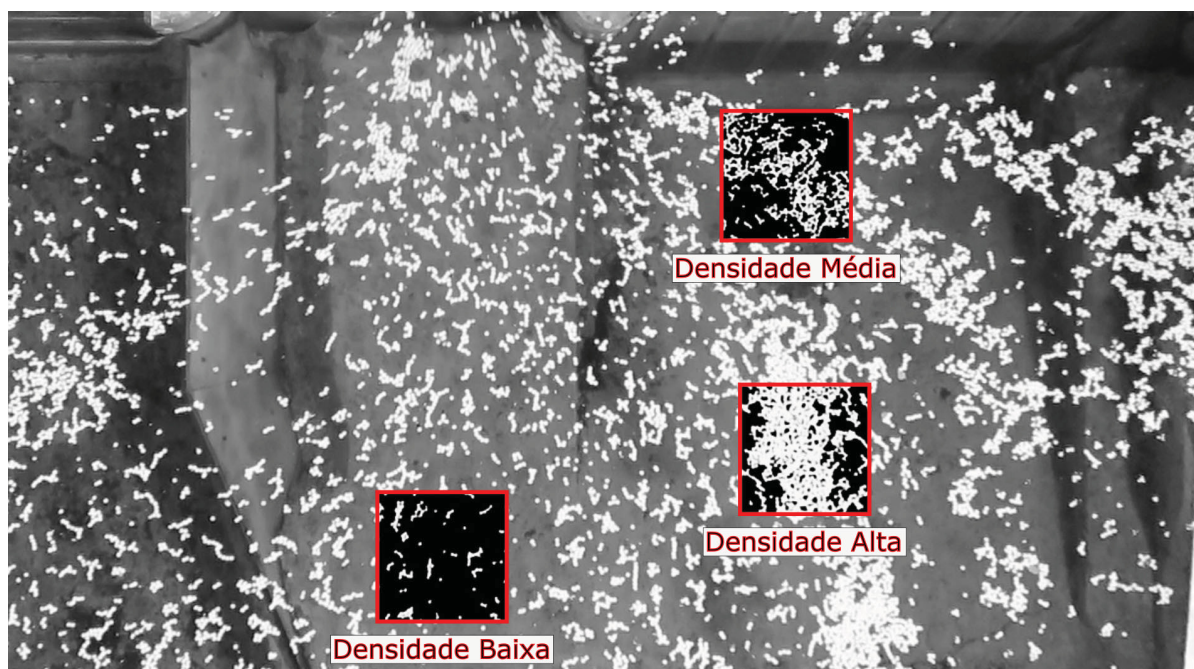
A partir da quantificação da intensidade cromática de diversas janelas de interrogação definiu-se uma faixa percentual para a densidade superficial das partículas registradas nas imagens dos testes, conforme apresentado na TABELA F.1.

FIGURA F.1 – Padrões de intensidade de densidade para confetes grandes



NOTA: Representação dos padrões de densidades superficiais para confetes grandes com aplicação de filtros de nitidez e contraste. Na figura, janelas selecionadas correspondem aos percentuais de preenchimento de 19 %, 35 % e 58 %, para densidades baixas, médias e altas, respectivamente.

FIGURA F.2 – Padrões de intensidade de densidade para confetes pequenos



NOTA: Representação dos padrões de densidades superficiais para confetes pequenos com aplicação de filtros de nitidez e contraste. Na figura, as janelas selecionadas correspondem aos percentuais de preenchimento de 7 %, 29 % e 56 %, para densidades baixas, médias e altas, respectivamente.

TABELA F.1 – Faixa percentual de preenchimento dos padrões de densidade de partículas

Densidade	Descrição	Confetes Grandes	Confetes Pequenos
Baixa	Predominância de espaços vazios dentro da janela de interrogação	12 % – 24 %	4 % – 10 %
Média	Equilíbrio entre espaços vazios e partículas traçadoras dentro da janela de interrogação	31 % – 39 %	20 % – 51 %
Alta	Predominância de partículas dentro da janela de interrogação	55 % – 63 %	55 % – 75 %

NOTA: A faixa percentual apresentada foi calculada pela divisão da intensidade cromática medida na janela de interrogação pelo valor máximo da intensidade (255 para branco), que corresponde ao preenchimento total da janela.

## APÊNDICE G – TABELA GERAL – ENSAIO 01

As tabelas a seguir representam as características gerais e cálculo de erros para 36 levantamentos de velocidades realizados pela implementação do *software* PIVLab. A partir destas informações foram elencados os melhores resultados para definição dos parâmetros de validação do método de LS-PIV proposto.

As tabelas estão separadas por seção de levantamento de velocidades e por tipo de traçador utilizado no teste, perfazendo um total de quatro tabelas, onde podem ser observadas as informações referente aos seguintes itens: teste/trecho/tempo de duração; informações da janela de interrogação/passo; cálculo das faixas de erro e aspecto geral dos gráficos de resultados; observações gerais quanto a densidade, espalhamento e falhas nos procedimentos com partículas traçadoras.

A coluna **aspecto do gráfico** apresenta uma classificação de erros de perda de informação de imagem que ocorre durante a implementação do *software* PIVLab. Este erro reflete na formação do gráfico de velocidades mínimas, médias e máximas e também foi utilizado como critério de comparação de resultados do método de LS-PIV.

TABELA G1 – Seção 01 – Confetes Grandes

Ensaio 01	Interrogação/Passo			Faixa de erros		Observações			
	Tempo (s)	Passada 1 (px)	Passada 2 (px)	RMSE (m/s)	$E_a$ (m/s)	Aspecto do gráfico	Densidade de partículas	Espalhamento	Falhas
CG-1A	10	128/64	64/32	0,0382	0,0681	Min (-)	Baixa	Uniforme	Poucas
		128/64	-	0,0295	0,0553	ok			
		128/96	96/48	0,0381	0,0680	Min (-)			
CG-1B	10	128/64	64/32	0,0390	0,0752	Min (-) Max (-)	Baixa	Uniforme	Algumas
		128/64	-	0,0317	0,0622	Min (-) Max (+/-)			
		128/96	96/48	0,0378	0,0714	Min (-)			
CG-1C	10	128/64	64/32	0,0359	0,0662	Min (+/-)	Média	Uniforme	-
		128/64	-	0,0279	0,0532	ok			
		128/96	96/48	0,0327	0,0625	ok			
CG-2A	5	128/64	64/32	0,0289	0,0634	Min (+/-) Max (+/-)	Alta	aglomerado	-
		128/64	-	0,0343	0,0578	Min (+/-)			
		128/96	96/48	0,0305	0,0621	Min (+/-)			
CG-2B	5	128/64	64/32	0,0263	0,0602	Min (+/-) Max (-)	Alta	aglomerado	Lado direito da seção
		128/64	-	0,0298	0,0610	ok			
		128/96	96/48	0,0248	0,0605	ok			
CG-2C	5	128/64	64/32	0,0267	0,0576	Min (+/-) Max (-)	Alta	aglomerado	Lado direito da seção
		128/64	-	0,0337	0,0746	ok			
		128/96	96/48	0,0277	0,0596	ok			

NOTA: O teste que melhor se ajustou aos valores de referência foi o CG-1C com resolução de 128/64 px.

LEGENDA: Min – gráfico de velocidade mínima; Max – gráfico de velocidade máxima; (-) aspecto ruim do gráfico; (+/-) aspecto regular do gráfico; ok – gráficos sem perda de informação.

TABELA G2 – Seção 01 – Confetes Pequenos

Ensaio 01	Interrogação/Passo		Faixa de erros		Observações				
	Tempo (s)	Passada 1 (px)	Passada 2 (px)	RMSE (m/s)	$E_a$ (m/s)	Aspecto do gráfico	Densidade de partículas	Espalhamento	Falhas
CP-3A	5	128/64	64/32	0,0422	0,0763	Min (-) Max (-)	Baixa	Irregular	Muitas
		128/64	-	0,0431	0,0846	Min (-) Max (-)			
		128/96	96/48	0,0394	0,0749	Min (-) Max (-)			
CP-3B	10	128/64	64/32	0,0392	0,0762	Min (-) Max (-)	Baixa	Irregular	Muitas
		128/64	-	0,0345	0,0584	Min (-) Max (-)			
		128/96	96/48	0,0389	0,0747	Min (-) Max (-)			
CP-3C	5	128/64	64/32	0,0460	0,0811	Min (+/-) Max (+/-)	Média	Irregular	Poucas
		128/64	-	0,0316	0,0602	ok			
		128/96	96/48	0,0411	0,0742	ok			
CP-4A	5	128/64	64/32	0,0330	0,0640	Min (-) Max (-)	Média	Pontos de aglomeração	Poucas
		128/64	-	0,0338	0,0597	ok			
		128/96	96/48	0,0319	0,0636	Min (-)			
CP-4B	10	128/64	64/32	0,0355	0,0670	Min (-) Max (+/-)	Média	Pontos de aglomeração	Poucas
		128/64	-	0,0309	0,0523	ok			
		128/96	96/48	0,0340	0,0646	Min (-)			
CP-4C	5	128/64	64/32	0,0336	0,0636	Min (-) Max (-)	Média	Pontos de aglomeração	Poucas
		128/64	-	0,0337	0,0612	ok			
		128/96	96/48	0,0320	0,0636	Min (-)			

NOTA: O teste que melhor se ajustou aos valores de referência foi o CP-4B com resolução de 128/64 px.

LEGENDA: Min – gráfico de velocidade mínima; Max – gráfico de velocidade máxima; (-) aspecto ruim do gráfico; (+/-) aspecto regular do gráfico; ok – gráficos sem perda de informação.

TABELA G3 – Seção 02 – Confetes Grandes

Ensaio 01	Interrogação/Passo		Faixa de erros			Observações			
	Tempo (s)	Passada 1 (px)	Passada 2 (px)	RMSE (m/s)	$E_a$ (m/s)	Aspecto do gráfico	Densidade de partículas	Espalhamento	Falhas
CG-1A	10	128/64	64/32	0,0097	0,0230	Min (+/-)	Baixa	Uniforme	-
		128/64	-	0,0079	0,0157	ok			
		128/96	96/48	0,0093	0,0240	ok			
CG-1B	10	128/64	64/32	0,0095	0,0205	Min (+/-)	Baixa	Uniforme	-
		128/64	-	0,0069	0,0143	ok			
		128/96	96/48	0,0086	0,0208	ok			
CG-1C	10	128/64	64/32	0,0091	0,0176	Min (+/-)	Média	Uniforme	-
		128/64	-	0,0081	0,0177	ok			
		128/96	96/48	0,0082	0,0158	ok			
CG-2A	5	128/64	64/32	0,0199	0,0263	ok	Alta	aglomerado	-
		128/64	-	0,0225	0,0297	ok			
		128/96	96/48	0,0216	0,0282	ok			
CG-2B	5	128/64	64/32	0,0140	0,0239	Max (+/-)	Alta	aglomerado	-
		128/64	-	0,0182	0,0366	ok			
		128/96	96/48	0,0144	0,0252	ok			
CG-2C	5	128/64	64/32	0,0193	0,0276	Max (+/-)	Alta	aglomerado	-
		128/64	-	0,0232	0,0428	ok			
		128/96	96/48	0,0192	0,0293	ok			

NOTA: O teste que melhor se ajustou aos valores de referência foi o CG-1B com resolução de 128/64 px.

LEGENDA: Min – gráfico de velocidade mínima; Max – gráfico de velocidade máxima; (-) aspecto ruim do gráfico; (+/-) aspecto regular do gráfico; ok – gráficos sem perda de informação.

TABELA G4 – Seção 02 – Confetes Pequenos

Ensaio 01	Interrogação/Passo			Faixa de erros		Observações			
	Tempo (s)	Passada 1 (px)	Passada 2 (px)	RMSE (m/s)	$E_a$ (m/s)	Aspecto do gráfico	Densidade de partículas	Espalhamento	Falhas
CP-3A	5	128/64	64/32	0,0118	0,0242	Max (+/-) ok ok	Baixa	Pontos de aglomeração	-
		128/64	-	0,0090	0,0176				
		128/96	96/48	0,0111	0,0223				
CP-3B	10	128/64	64/32	0,0118	0,0242	Min (+/-) Max (+/-) ok ok	Baixa	Pontos de aglomeração	-
		128/64	-	0,0089	0,0194				
		128/96	96/48	0,0130	0,0247				
CP-3C	5	128/64	64/32	0,0107	0,0231	ok ok ok	Baixa	Pontos de aglomeração	-
		128/64	-	0,0080	0,0185				
		128/96	96/48	0,0101	0,0249				
CP-4A	5	128/64	64/32	0,0072	0,0130	ok ok ok	Baixa	Pontos de aglomeração	-
		128/64	-	0,0097	0,0199				
		128/96	96/48	0,0073	0,0142				
CP-4B	10	128/64	64/32	0,0076	0,0154	ok ok ok	Baixa	Pontos de aglomeração	-
		128/64	-	0,0067	0,0132				
		128/96	96/48	0,0078	0,0185				
CP-4C	5	128/64	64/32	0,0077	0,0121	ok ok ok	Baixa	Pontos de aglomeração	-
		128/64	-	0,0105	0,0195				
		128/96	96/48	0,0078	0,0134				

NOTA: O teste que melhor se ajustou aos valores de referência foi o CP-4B com resolução de 128/64 px.

LEGENDA: Min – gráfico de velocidade mínima; Max – gráfico de velocidade máxima; (-) aspecto ruim do gráfico; (+/-) aspecto regular do gráfico; ok – gráficos sem perda de informação.

## APÊNDICE H – VERIFICAÇÃO DE ORTOGONALIDADE

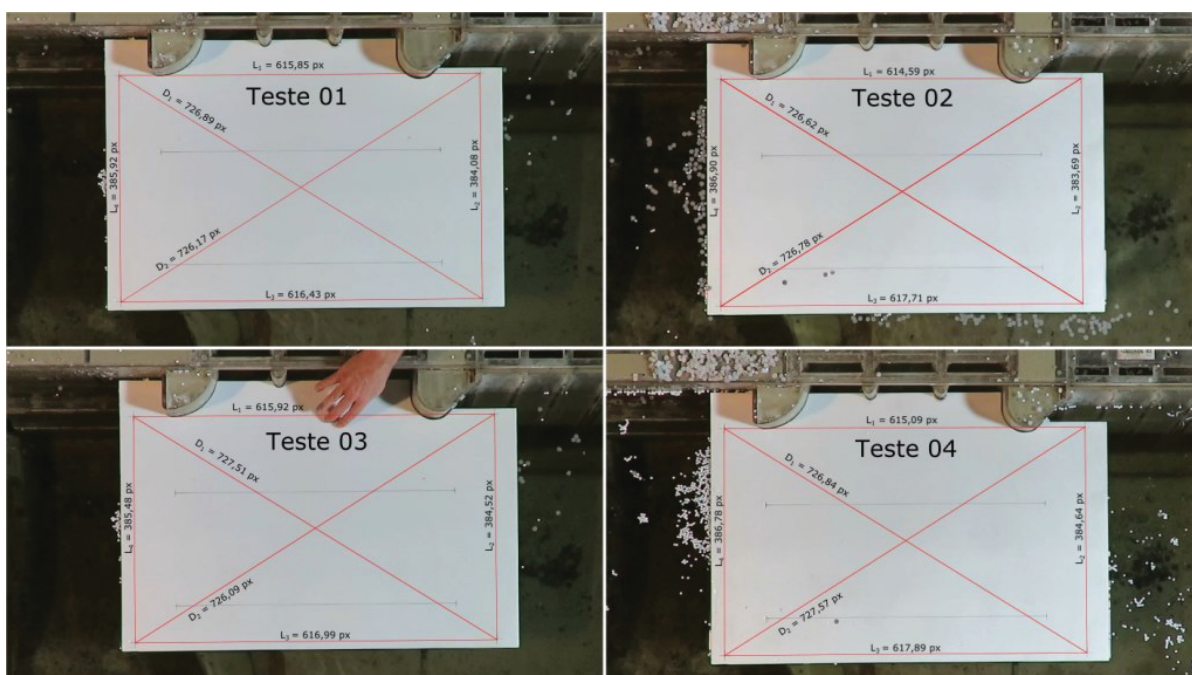
De maneira geral, a verificação da ortogonalidade é um procedimento auxiliar para detecção de erros grosseiros no posicionamento da câmera filmadora junto ao suporte articulado do trilho. Desta forma, filmagens não ortogonais causadas por uma possível movimentação inadequada dos andaimes, trilho ou suporte durante as filmagens podem ser detectadas e descartadas mediante esta verificação. No entanto, dentre os testes selecionados nos três ensaios realizados, não foram verificados erros de ortogonalidades, conforme pode ser verificado na sequência.

A verificação foi feita pela determinação do erro relativo na comparação das medidas, em pixel, para os pares dos lados paralelos e diagonais da imagens do gabarito registrado no final de cada teste. Foi definido o erro relativo máximo de 1,0 % para o teste de ortogonalidade da imagem.

### H.1 VERIFICAÇÃO DA ORTOGONALIDADE DAS IMAGENS – ENSAIO 01

A FIGURA H.1 mostra a imagem capturada do gabarito nos quatro testes e a representação gráfica do quadrante de referência com suas respectivas medidas em unidade de pixel. A TABELA H1 apresenta os resultados da verificação da ortogonalidade para os quatro testes selecionados do ENSAIO 01, onde é possível constatar o erro relativo percentual máximo de 0,84 % observado no teste 02.

FIGURA H.1 – Ortogonalidade das imagens dos testes do Ensaio 01



NOTA: Verificação da ortogonalidade dos quatro testes do Ensaio 01.

TABELA H1 – Erros relativos percentuais – verificação de ortogonalidade

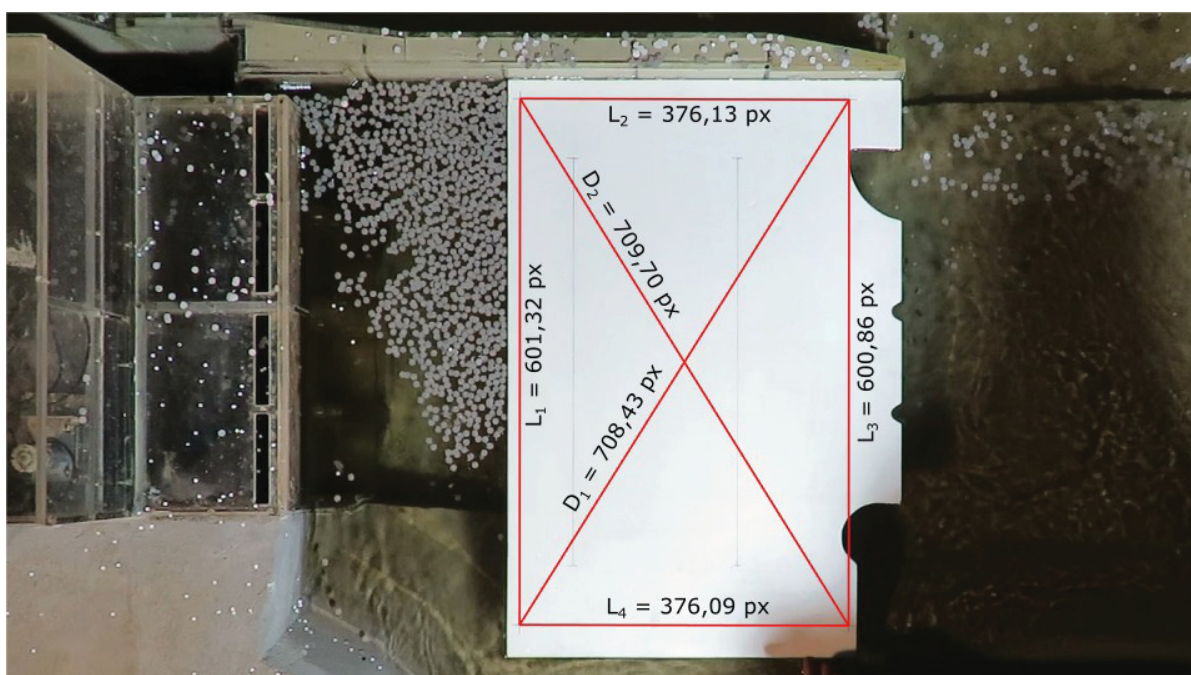
	Erro Relativo (%)		
	Lado Maior	Lado Menor	Diagonal
Teste 01	0,09	0,48	0,10
Teste 02	0,51	0,84	0,02
Teste 03	0,17	0,25	0,20
Teste 04	0,46	0,56	0,10

NOTA: Os valores percentuais dos erros apresentados na tabela foram determinados para os pares de lados maiores, para os pares de lados menores e para as duas diagonais. Adotou-se como medida de referência para a determinação do erro relativo percentual a medida menor entre os dois elementos de cada par.

## H.2 VERIFICAÇÃO DA ORTOGONALIDADE DAS IMAGENS – ENSAIO 02

A FIGURA H.2 apresenta o resultado desta conferência de medidas e informa os erros relativos máximos calculados para cada um dos lados e diagonais do gabarito.

FIGURA H.2 – Verificação da ortogonalidade da imagem – Ensaio 02

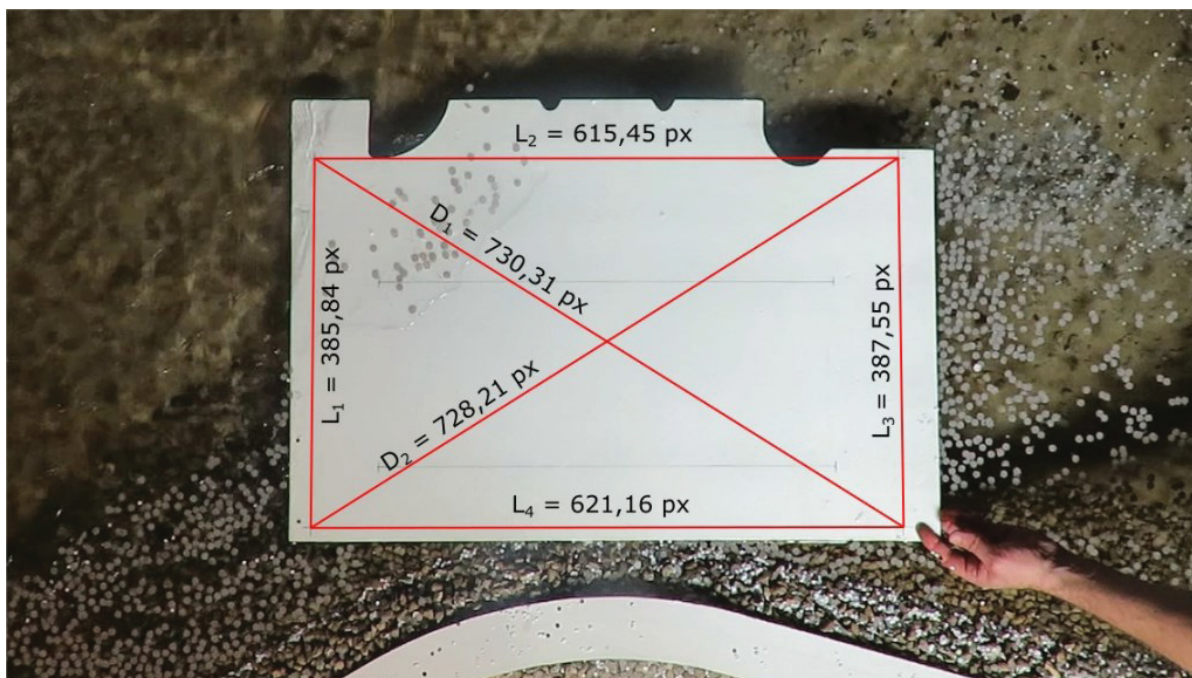


NOTA: Verificação da ortogonalidade da imagem com o auxílio do programa *Inkscape*. Os valores obtidos para o erro relativo entre os lados paralelos e entre as diagonais foram: 0,11 % para os lados maiores; 0,01 % para os lados menores; 0,18 % para as diagonais. Foram considerados aceitáveis erros relativos menores que 1,0 %.

### H.3 VERIFICAÇÃO DA ORTOGONALIDADE DAS IMAGENS – ENSAIO 03

A FIGURA H.3 apresenta o resultado desta conferência de medidas de ortogonalidade e informa os erros relativos máximos calculados para cada um dos lados e diagonais do gabarito.

FIGURA H.3 – Verificação da ortogonalidade da imagem – Ensaio 03



NOTA: Verificação da ortogonalidade da imagem com o auxílio do programa *Inkscape*. Os valores obtidos para o erro relativo entre os lados paralelos e entre as diagonais foram: 0,93 % para os lados maiores; 0,44 % para os lados menores; 0,29 % para as diagonais. Foram considerados aceitáveis erros relativos menores que 1,0 %.