

EDUARDO LUCAS KONRAD BURIN

**ESTUDO DA APLICABILIDADE DE
UM SISTEMA ESTEREOSCÓPICO
PARA A MONITORAÇÃO DE
PÊNULOS EM BARRAGENS**

FLORIANÓPOLIS

2010

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
METROLOGIA CIENTÍFICA E INDUSTRIAL**

**ESTUDO DA APLICABILIDADE DE UM SISTEMA
ESTEREOSCÓPICO PARA A MONITORAÇÃO DE
PÊNULOS EM BARRAGENS**

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Metrologia

EDUARDO LUCAS KONRAD BURIN

Florianópolis, Outubro de 2010

ESTUDO DA APLICABILIDADE DE UM SISTEMA ESTEREOSCÓPICO PARA A MONITORAÇÃO DE PÊNULOS EM BARRAGENS

EDUARDO LUCAS KONRAD BURIN

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Metrologia e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial da Universidade Federal de Santa Catarina.

Armando Albertazzi Gonçalves Jr.,
Dr. Eng.,
Orientador

Armando Albertazzi Gonçalves Jr.,
Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Analucia Vieira Fantin, Dra. Eng.
Presidente

Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto,
Dr. Eng.

Christian Kohler, Dr. Ing.

Eduardo Cesar Dechechi, Dr. Eng.

“As dificuldades moldam a personalidade das pessoas e tornam as vitórias mais saborosas.”

N. F. B.

Aos meus avós, Narciso e Amélia Burin, Ivo e Iloina Konrad.

Aos meus pais, Neivaldo e Mirian.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Armando Albertazzi Gonçalves Jr., meu orientador, pela amizade, educação, incentivo, respeito e ensinamentos que levarei em cada passo da minha vida. Agradeço também pela dedicação, orientação e confiança depositada em mim durante a realização deste trabalho, especialmente no período em que estive em Foz do Iguaçu.

Aos professores Wu Feng Chung e Huei Diana Lee, pela constante luta a favor da educação, da honestidade e da integridade. Sempre serei muito grato por todos os ensinamentos e pela amizade. Muito obrigado por tudo.

À minha mãe, Mirian, ao meu pai, Neivaldo e à minha irmã, Raquel, pelo carinho, dedicação, educação e apoio incondicional em cada passo da minha vida.

A toda minha família, pelo apoio ao meu projeto de vida.

À Glaucia Regina Medeiros, pelo carinho, atenção, amizade e constante incentivo.

Ao Laboratório de Metrologia e Automatização (LABMETRO) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e à Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras (CERTI) por toda contribuição em relação ao desenvolvimento desse trabalho e à minha formação.

Ao Laboratório de Bioinformática (LABI) da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) e à todos os Labianos, Richardson Floriani Voltonili, Daniel de Faveri Honorato, André Gustavo Maletzke, Carlos Andres Ferrero, Willian Zalewski, Joylan Nunes Maciel, Luiz Henrique Dutra da Costa, Newton Spolaôr, Neimar Neitzel, Rafaella Aline Lopes da Silva, Bianca Espindola, Adrieli Cristina da Silva, Dabna Hellen Tomim, Jefferson Tales de Oliva, Ricardo Gil Belther Nabo, Antônio Rafael Sabino Parmezan e Simone Pinto Romero pela convivência, amizade e ensinamentos.

Aos professores do curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial (PósMCI), Analucia Vieira Fantin Pezzotta, Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Carlos Alberto Flesch, Carlos Alberto Schneider e Gustavo Daniel Donatelli, pela dedicação e incentivo.

Aos professores do curso de Ciência da Computação da UNIOESTE e amigos André Gustavo Maletzke, Carlos Andrés Ferrero e Renato Bobsin Machado, pela amizade e valiosa convivência. Agradeço também pelo auxílio relacionado à área computacional durante o desenvolvimento desse trabalho.

Aos amigos da turma 2008 do PósMCI, Arthur Nunes Silveira, Edinei Ballmann, Francisco Augusto Arenhart, Humberto Leitão Riella, Iara Simoni Pereira, João Gabriel Fadel da Costa, Lunia Coelho de Almeida de Lima,

Maksoel Agustin Krauspenhar Niz, Vladimir Rodrigues de Lima e Willian Zalewski, pela amizade, união e momentos compartilhados.

Aos amigos das demais turmas do PósMCI, Kamila Lins, Alexandre Marcondes, Benjamim M. de Souza Neto, Francisco Augusto Arenhart, Juliana Marques Schöntag, Alexandre Victor Casella, Pedro Moritz Penteadó, Igor Gavilon, Mauro Eduardo Benedet, Maria Regina Kunzler, Maryah Elisa Morastoni Haertell, Miguel Burg Demay, Leonardo Soliz Encinas, Tobias Andreas Weege, Rafael Moreira Miggiorin, Jeferson Toyama, Sidnei Rodrigo Basei, Kleber Steinbach, Sérgio A. Bitencourt Petrovcic, Vitor Camargo Nardelli, Cesar Alberto Penz, Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto.

Ao Maksoel Agustin Krauspenhar Niz, Ricardo Luiz Schaefer e Willian Zalewski, grandes amigos com os quais pude compartilhar muitos momentos desde o início da graduação.

A todos os meus amigos.

À Rosana Vieira, pela amizade, auxílio e constante dedicação para o desenvolvimento do curso de metrologia.

À Engenheira Silvia Frazão Matos pelo importante auxílio ao longo do desenvolvimento desse trabalho.

Aos técnicos leituristas da Usina de Itaipu pela participação nesse trabalho.

Ao PTI Ciência & Tecnologia (PTI C&T) da Fundação Parque Tecnológico de Itaipu (FPTI/BR), bem como ao Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens (CEASB), pelo auxílio por meio da linha de financiamento de bolsas e equipamentos.

A todas as pessoas que contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Metrologia.

ESTUDO DA APLICABILIDADE DE UM SISTEMA ESTEREOSCÓPICO PARA A MONITORAÇÃO DE PÊNDULOS EM BARRAGENS

Eduardo Lucas Konrad Burin

Outubro / 2010

Orientador: Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng..

Área de Concentração: Metrologia & Instrumentação.

Palavras-chave: Pêndulo, Coordenômetro e Estereoscopia.

Número de Páginas: 171

Existe uma demanda relacionada ao desenvolvimento de um novo instrumento de medição destinado à monitoração da posição de pêndulos instalados em barragens. Desse modo, a partir de uma série de requisitos metrológicos e operacionais, propôs-se, nesse trabalho, a construção e a avaliação das características de um protótipo como forma de estudar a aplicabilidade da técnica estereoscopia para a concepção de uma alternativa portátil e automatizada aos coordenômetros atualmente disponíveis no mercado. Em relação ao protótipo desenvolvido, caracterizou-se uma configuração econômica em que bases de referência são posicionadas em estações de medição, sendo as mesmas monitoradas utilizando-se um módulo móvel. Além desses aspectos, uma série de componentes foram concebidos visando-se expressar os resultados das medições de acordo com as características definidas para o mensurando. Considerando-se a calibração realizada para a avaliação do sistema, observou-se que o nível de incerteza associado às medições enquadrou-se em relação ao limiar de aceitação de $0,05 \text{ mm}$ para toda a faixa de medição, com exceção de um único ponto de controle localizado na extremidade $(-15,000, -15,000)^T \text{ mm}$. Paralelamente, foi observado que a variação do iluminamento do ambiente não apresentou-se como um fator crítico frente ao desempenho do protótipo, já que não foi identificado o surgimento de parcelas significativas de erro para as distintas configurações avaliadas. Quanto à influência da temperatura do ambiente, por sua vez, notou-se que um incremento de aproximadamente 7°C no valor nesse parâmetro determinou o aparecimento de componentes sistemáticas de aproximadamente $0,015 \text{ mm}$ na direção dos eixos d_X e d_Z em relação

às estimativas da posição do fio do pêndulo. Tal discrepância, no entanto, possivelmente pode ser minimizada por meio da aplicação de uma função de correção considerando-se o coeficiente de expansão térmica do material utilizado para a fabricação das bases de referencia. Por fim, foi identificado um ganho substancial proporcionado pela automatização do processo em relação à variabilidade dos resultados visto que a identificação da posição do mensurando é agora delineada sistematicamente sem o auxílio dos operadores. Conclui-se, desse modo, que a técnica de medição baseada em estereoscopia apresenta-se promissora para a concepção de um módulo de monitoração de pêndulos portátil e automatizado orientado aos requisitos de projeto, caracterizando, assim, uma contribuição fundamental para a área de instrumentação em segurança de barragens.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Metrology.

STUDY OF THE APPLICABILITY OF A STEREOSCOPIC SYSTEM FOR PENDULUM MONITORING IN DAMS

Eduardo Lucas Konrad Burin

Out / 2010

Advisor: Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng..

Area of Concentration: Metrology & Instrumentation.

Keywords: Pendulum, Coordinometer e Stereoscopy.

Number of pages: 171

There is a demand related to the development of a new measurement tool for monitoring the position of pendulum installed in dams. Thus, from a series of operational and metrological requirements, it was proposed, in this work, the construction and the evaluation of the characteristics of a prototype in order to study the applicability of stereoscopy technique to design an automated and portable alternative to the currently available coordinometers. Considering the developed prototype, it was characterized an economic configuration in which reference bases are positioned at the measuring stations, which are then monitored using a mobile module. Furthermore, a series of components were designed in order to express the results of measurements according to the characteristics defined for the measurand. Carrying out the calibration for the system evaluation, it was observed that the level of uncertainty associated with measurements fitted to the to the acceptance threshold of 0.05 mm for all over the measuring range, except for a single control point located at the edge $(-15.000, -15.000)^T \text{ mm}$. Additionally, it was observed that the variation of the environment illumination is probably not critical considering the performance of the prototype, since it was not identified the occurrence of significant errors for the different configurations studied. Regarding the influence of temperature, on the other hand, it was noticed that an increase of approximately 7°C in the value of this parameter determined the appearance of systematic components of approximately 0.015 mm in the direction of d_x and d_z axes considering the position estimates of the pendulum wire. This discrepancy, however, can possibly be minimized by applying a correction function considering the thermal expansion coefficient of the ma-

terial used for fabricating the reference bases. Finally, it was identified a substantial gain provided by the automation of the process when considered the variability minimization of the results related to the measurand position identification, which process is now systematically done without the aid of the operators. Thus, it can be concluded that the evaluated measurement technique displays to be promising for the design of a novel automated and portable module for pendulum monitoring, which gives it a fundamental contribution to the field of instrumentation in dam safety.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	35
1.1	Contextualização e motivação	35
1.2	Objetivos	37
1.2.1	Objetivo geral	37
1.2.2	Objetivos específicos	37
1.3	Estrutura do trabalho	38
2	PÊNDULOS DIRETOS E INVERTIDOS	39
2.1	Considerações iniciais	39
2.2	Características construtivas	42
2.3	Análise do significado físico das medições	43
2.4	Coordinômetros	49
2.4.1	Coordinômetros portáteis	49
2.4.2	Coordinômetros automatizados	52
2.5	Considerações finais	54
3	REQUISITOS DO SISTEMA	55
4	ESTEREOSCOPIA	57
4.1	Considerações iniciais	57
4.2	Modelagem do processo de formação de imagens	59
4.2.1	O modelo <i>pinhole</i>	59
4.2.2	Métodos aplicados à modelagem do processo de formação de imagens	61
4.3	Aquisição de imagens	72
4.3.1	Campo de visão	72
4.3.2	Resolução lateral	73
4.3.3	Profundidade de foco	76
4.4	Determinação de pontos homólogos	76
4.5	Triangulação	79
4.6	Considerações finais	83
5	MATERIAIS E MÉTODOS	85
5.1	Considerações iniciais	85
5.2	Desenvolvimento do protótipo	85
5.2.1	Leiaute e materiais	85
5.2.2	Modelagem do processo de formação de imagens ..	91

5.2.2.1	Geração do coleção tridimensional de pontos	92
5.2.2.2	Identificação de pontos homólogos	95
5.2.2.3	Processo de otimização	99
5.2.2.4	Análise da qualidade dos resultados	101
5.2.3	Procedimentos de medição	101
5.2.3.1	Posicionamento do sistema em uma estação de medição	102
5.2.3.2	Captura de imagens	103
5.2.3.3	Correção das distorções de lente	104
5.2.3.4	Determinação de pontos e linhas homólogas	104
5.2.3.5	Determinação da posição do fio do pêndulo	107
5.3	Avaliação das características metrológicas do protótipo . . .	109
5.3.1	Levantamento das fontes de incerteza	110
5.3.2	Calibração do protótipo em ambiente laboratorial . .	111
5.3.3	Realização de avaliações preliminares do protótipo em uma estação de medição desenvolvida para testes	114
5.3.3.1	Avaliação da influência do iluminamento do ambiente	116
5.3.3.2	Avaliação da influência da temperatura do ambiente	117
5.3.3.3	Comparação com o coordenômetro portátil utilizado em Itaipu	118
5.4	Considerações finais	119
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	121
6.1	Considerações iniciais	121
6.2	Desenvolvimento do protótipo	121
6.2.1	Leiaute e materiais	121
6.2.2	Modelagem do processo de formação de imagens . .	124
6.2.3	Procedimentos de medição	129
6.3	Avaliação das características metrológicas do protótipo . . .	132
6.3.1	Levantamento das fontes de incerteza	132
6.3.2	Calibração do protótipo em ambiente laboratorial . .	134
6.3.3	Realização de avaliações preliminares do protótipo em uma estação de medição desenvolvida para testes	139
6.3.3.1	Avaliação da influência do iluminamento do ambiente	141
6.3.3.2	Avaliação da influência da temperatura do ambiente	142

6.3.3.3	Comparação com o coordenômetro portátil utilizado em Itaipu	143
6.4	Análise comparativa	145
6.5	Considerações finais	147
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	149
	Apêndice A – Projeto da plataforma de montagem	155
	Apêndice B – Projeto da base do sistema de fixação isostático	157
	Apêndice C – Projeto do acoplamento do sistema de fixação isostático . .	159
	Apêndice D – Ajuste dos valores dos parâmetros do conjunto camera- lente	161
	Anexo A – Síntese do certificado de calibração da MMC	163

LISTA DE FIGURAS

1	Instrumentação de um bloco-chave da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional (OSAKO, 2008).	41
2	Representação esquemática de pêndulo direto e pêndulo invertido.	42
3	Caracterização da posição de um fio de pêndulo direto ou invertido em relação à uma base de referência.	44
4	Perfil de deslocamentos de um bloco-chave da usina hidrelétrica de Itaipu Binacional em relação à interface fundação-estrutura (RIBEIRO et al., 2008).	46
5	Deslocamento absoluto da crista de um bloco-chave da usina hidrelétrica de Itaipu Binacional em relação à um ponto fixo da fundação.	47
6	Exemplo de coordenômetro portátil: a) base de referência para fixação de coordenômetro e b) lente objetiva e c) escala digital (GLÖTZL, 2004).	50
7	Exemplo de coordenômetro portátil: a) base de referência para fixação de coordenômetro, b) fio de pêndulo, c) referência cônica, d) escala maior, e) escala menor, f) lente objetiva e g) espelho retrátil.	50
8	Exemplo de coordenômetro automatizado: a) coordenômetro disposto juntamente à base de referência e b) módulo de alimentação e transmissão com dispositivo mostrador (GLÖTZL, 2005).	53
9	Principais técnicas de medição de grandezas geométricas baseadas em princípios ópticos (ALBERTAZZI, 2010).	58
10	Representação esquemática do modelo <i>pinhole</i> (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003).	60
11	Representação esquemática do processo de triangulação ideal (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003).	61
12	Relação existente entre um ponto 3D e sua projeção 2D no plano imagem (ARMANGUÉ; SALVI; BATLLE, 2000).	63
13	Efeito das distorções de lente do tipo: a) radial e b) tangencial (HEIKKILÄ, 1997).	67
14	a) padrão tridimensional de pontos e b) padrão bidimensional de pontos (REMONDINO; FRASER, 2006).	69
15	Representação esquemática dos fatores que definem o campo de visão de uma câmera (GEODETIC SERVICES INC., 2010). . .	72

16	Representação de imagens com resolução de: a) 72 <i>pixels</i> por polegada e b) 300 <i>pixels</i> por polegada (KOREN, 2008).	73
17	Imagem de referência do tipo USAF 1951 (KOREN, 2008).	74
18	Imagem de referência do tipo <i>Koren</i> (KOREN, 2008).	74
19	Exemplo de análise realizada em sistema óptico por meio da utilização de imagem de referência do tipo <i>Koren</i> (KOREN, 2008).	75
20	Representação esquemática do efeito ocasionado pela profundidade de foco: a) sistema sem diafragma e b) sistema com diafragma (ICKE, 2010).	77
21	Representação esquemática de um diafragma para distintos valores de <i>f-number</i>	77
22	Representação esquemática do processo de correção das distorções impostas pelas lentes.	80
23	Representação esquemática do processo de triangulação real (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003).	81
24	Representação esquemática do processo de triangulação real com restrição epipolar imposta (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003).	81
25	Representação esquemática do processo de reconstrução de linhas (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003).	83
26	Leiaute do protótipo desenvolvido: a) câmera digital, b) lente objetiva, c) SFI, d) plataforma de montagem, e) abertura de passagem, fio de pêndulo e esfera de referência, f) <i>back-light</i> , g) cabo de comunicação e h) computador.	86
27	Plataforma de montagem: a) chapa metálica com espessura de cinco milímetros, b) abertura de passagem do fio do pêndulo e c) furos para fixação dos sistemas SFI-A e SFI-B.	87
28	Sistema de fixação SFI: a) acoplamento para encaixe câmera-base, b) base e c) sistema câmera-base acoplado.	88
29	Construção das unidades que compõem o sistema <i>back-light</i> : a) posicionamento dos LEDs no interior de caixa de acrílico e b) sistema <i>back-light</i> montado.	89
30	Características da montagem estereoscópica: a) área de 50 <i>mm</i> × 50 <i>mm</i> que define o campo de visão e b) delimitações para posicionamento da esfera de referência e do fio do pêndulo.	90
31	Sistema de referência pintado na cor preta fosca e caracterizado por: a) esfera metálica e b) haste vertical de suporte.	91

32	Componentes pertencentes ao protótipo desenvolvido: a) visão geral da disposição dos componentes do protótipo posicionado sobre máquina de medir por coordenadas, b) dispositivo desenvolvido para simular um fio de pêndulo nos testes de bancada e c) esfera de referência a ser utilizada nesse trabalho.	92
33	Dispositivo destinado à geração de pontos homólogos. a) acoplamento para fixação do dispositivo ao braço de medição da máquina de medir por coordenadas, b) haste metálica e c) esfera de calibração.	93
34	Montagem dos componentes para a geração da coleção tridimensional de pontos: a) visão geral do protótipo posicionado sobre a mesa da máquina de medir por coordenadas e b) câmera orientada à esfera do dispositivo destinado à geração de pontos homólogos.	94
35	Geração da coleção de pontos no espaço tridimensional: a) eixos X_W e Z_W que constituem o sistema de coordenadas $\{W\}$ e b) pontos gerados por meio do posicionamento da esfera de calibração no interior do campo de visão da montagem estereoscópica.	96
36	Definição do sistema de coordenadas $\{I\}$ que caracteriza o plano imagem da câmera.	97
37	Processo de identificação de pontos homólogos: a) região de imagem real em que pode ser observada a projeção da esfera de calibração, b) detecção de bordas, c) identificação de padrão circular e segmentação da região de interesse e d) identificação de ponto homólogo.	99
38	Segmento do arquivo de configuração utilizado para alimentar o algoritmo de otimização com valores de catálogo da câmera e da lente utilizada.	100
39	Posicionamento do sistema na estação de medição: a) posicionamento inicial do fio de pêndulo, b) alinhamento dos eixos do sistema com a estrutura e c) posicionamento da esfera de referência.	103
40	a) Imagem capturada pela câmera posicionada por meio do sistema SFI-A e b) imagem capturada pela câmera posicionada por meio de SFI-B.	103

41	a) Imagem corrigida capturada pela câmera posicionada por meio do sistema SFI-A e b) imagem corrigida capturada pela câmera posicionada por meio de SFI-B.	104
42	Processo de identificação de ponto homólogo para procedimento de medição: a) região de imagem real em que pode ser observada a projeção da esfera de referência, b) detecção de bordas, c) identificação de padrão circular e segmentação da região de interesse e d) identificação das coordenadas ideais do ponto homólogo.	105
43	Representação esquemática do processo de identificação de linhas homólogas: a) bordas da projeção e identificação de padrão retilíneo, b) segmentação da região de interesse e realização de ajuste de curva e c) identificação de linha homóloga.	107
44	Representação esquemática do processo de referenciamento realizado $\{W\} \rightarrow \{A\}$	108
45	a) transformação $\{A\} \rightarrow \{B\}$ e b) representação dos deslocamentos d_x e d_z em relação ao início das operações.	110
46	Pontos de calibração considerados para a avaliação das características metrológicas do sistema em ambiente laboratorial.	112
47	a) disposição geral dos componentes utilizados para o delineamento dos testes em pêndulo e b) montagem estereoscópica juntamente com coordenômetro portátil utilizado em Itaipu.	115
48	a) termômetro digital AKSO [®] , modelo AK05 e b) luxímetro digital Homis [®] , modelo 1335 posicionados sobre a plataforma de montagem do protótipo.	116
49	Procedimento de medição com coordenômetro portátil efetuado por operador treinado na Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional.	119
50	Representação esquemática da exatidão do processo de triangulação em função do ângulo de orientação entre os pontos de vista adotados para a captura de imagens e da exatidão inerente ao processo de reconhecimento de pontos homólogos: a) ângulo agudo e b) ângulo reto.	123
51	Diagramas representativos dos resíduos em <i>pixels</i> na direção dos eixos X_I e Y_I do plano imagem inerentes ao processo de otimização: a) histogramas de frequência e b) gráficos de escore normal.	127

52	Representação esquemática das fases do método de modelagem sugerido para implementação: a) fase que antecede a instalação em campo e b) fase de operação em que são delineadas operações de manutenção.	129
53	Diagrama representativo das principais fontes de incerteza intrínsecas (cor azul) e extrínsecas (cor vermelha) ao sistema que contribuem com o aumento da incerteza das medições. .	133
54	Representação gráfica dos resultados referentes à calibração do protótipo em ambiente laboratorial.	136
55	Representação gráfica dos resultados referentes às avaliações preliminares do protótipo (Configurações 01, 02 e 03) e do coordenômetro utilizado em Itaipu (Configuração 04) em uma estação de testes.	141

LISTA DE TABELAS

1	Frequências de medição tipicamente empregadas para a monitoração de pêndulos diretos e invertidos em função das distintas fases do ciclo de vida de uma barragem (FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION - FERC, 2008).	48
2	Estrutura de dados gerada após o delineamento dos procedimentos referentes à geração da coleção tridimensional de pontos e posterior captura de imagens.	96
3	Parâmetros transformada de Hough para círculos (GONZALEZ; WOODS, 2008).	98
4	Estrutura de dados gerada após os procedimentos referentes à determinação de pontos homólogos.	99
5	Parâmetros da transformada de Hough para linhas (GONZALEZ; WOODS, 2008).	106
6	Estrutura de dados gerada após o delineamento dos procedimentos referentes à determinação de pontos e linhas homólogos.	107
7	Estimativas dos valores dos termos de k_1 , k_2 , p_1 e p_2	126
8	Resultados referentes à calibração do protótipo em ambiente laboratorial (Dimensões em milímetros).	135
9	Resultados das avaliações preliminares do protótipo em uma estação de medição desenvolvida para testes.	140
10	Comparações das médias e das variâncias dos resultados gerados pelas Configurações 01 e 02 para os eixos d_X e d_Z	142
11	Comparações das médias e das variâncias dos resultados gerados pelas Configurações 01 e 03 para os eixos d_X e d_Z	144
12	Comparação das variâncias dos resultados gerados pelas Configurações 01 e 04 para os eixos d_X e d_Z	144
13	Diagrama comparativo com relação aos parâmetros exatidão, tempo de medição e custo para os distintos tipos de coordenômetros considerados (Análise qualitativa).	145
14	Estimativa de custos baseada na aquisição de módulos portáteis.	146
15	Estimativa de custos baseada na aquisição de módulos automatizados.	146

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ICOLD	<i>International Commission on Large Dams</i>
FM	Faixa de Medição
DLT	<i>Direct Linear Transformation</i>
LABMETRO	Laboratório de Metrologia e Automação
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
CERTI	Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras
SFI	Sistema de Fixação Isostático
LED	Diodo Emissor de Luz
CV	Campo de Visão
SMC	Sistema de Medição a Calibrar
SMP	Sistema de Medição Padrão
GUM	Guia para Expressão da Incerteza de Medição

LISTA DE SÍMBOLOS

P	Posição de um fio de pêndulo em relação aos eixos X e Z
D	Deslocamento de um fio de pêndulo em relação aos eixos d_x e d_z
i	Índice de contagem
j	Índice de contagem
D_r	Deslocamento relativo de um fio de pêndulo
D_a	Deslocamento absoluto de um fio de pêndulo
\mathfrak{R}^3	Espaço Euclidiano tridimensional
\mathfrak{R}^2	Espaço Euclidiano bidimensional
O_C	Centro de projeção da câmera
$\{C\}$	Sistema de coordenadas da câmera definido por X_C , Y_C e Z_C
$\{R\}$	Plano imagem da câmera em milímetros definido por X_R e Y_R
f	Distância focal da câmera
P_w	Ponto pertencente a um objeto
P_u	Projeção ideal de P_w no plano imagem da câmera
P_d	Projeção real de P_w no plano imagem da câmera
O_R	Ponto principal da câmera definido por u_0 e v_0
$\{W\}$	Sistema de coordenadas do objeto definido por X_W , Y_W e Z_W
${}^C T_W$	Matriz de translação definida por t_x , t_y e t_z
${}^C R_W$	Matriz de rotação definida pelos ângulos de Euler ω , φ e κ
${}^C M_W$	Matriz de transformação $\{W\} \rightarrow \{C\}$
${}^R M_C$	Matriz de transformação $\{C\} \rightarrow \{R\}$
k_u	Fator de escala
k_v	Fator de escala
u_0	Origem do sistema $\{R\}$ na direção horizontal
v_0	Origem do sistema $\{R\}$ na direção vertical
$\{I\}$	Plano imagem da câmera em <i>pixels</i> definido por X_I e Y_I
s	<i>Aspect ratio</i>
${}^I M_C$	Matriz de transformação $\{C\} \rightarrow \{I\}$
${}^I M_W$	Matriz de projeção da câmera $\{W\} \rightarrow \{I\}$
δ_{xr}	Distorção radial de lente na direção do eixo X_I
δ_{yr}	Distorção radial de lente na direção do eixo Y_I
k_1	Coefficiente de distorção radial
k_2	Coefficiente de distorção radial
k_3	Coefficiente de distorção radial
δ_{xt}	Distorção tangencial de lente na direção do eixo X_I
δ_{yt}	Distorção tangencial de lente na direção do eixo Y_I
p_1	Coefficiente de distorção tangencial

p_2	Coefficiente de distorção tangencial
Θ_{ext}	Parâmetros extrínsecos da câmera
Θ_{int}	Parâmetros intrínsecos da câmera
K	Número de pontos de vista adotados para a câmera
δ'_{xr}	Inversa de δ_{xr}
δ'_{xt}	Inversa de δ_{xt}
δ'_{yr}	Inversa de δ_{yr}
δ'_{yt}	Inversa de δ_{yt}
k'_1	Coefficiente de distorção radial do termo δ'_r
k'_2	Coefficiente de distorção radial do termo δ'_r
p'_1	Coefficiente de distorção radial do termo δ'_t
p'_2	Coefficiente de distorção radial do termo δ'_t
s_0	Estimativa inicial de s
f_0	Estimativa inicial de f
N_u	Número de pixels da câmera na direção horizontal do plano imagem
N_v	Número de pixels da câmera na direção vertical do plano imagem
Θ_{ext0}^T	Estimativa inicial de Θ_{ext}^T
f_c	Frequência de corte
${}^I P_W^+$	Pseudo-inversa de ${}^I P_W$
λ	Fator de escala
d	Distância
θ	Ângulo
l_u	Projeção ideal de uma linha em um plano imagem
l_d	Projeção real de uma linha em um plano imagem
π	Representação de um plano
L_w	Linha pertencente a um objeto
ϕ	Diâmetro
P_h	Estimativa inicial da projeção real de P_w em $\{I\}$ (transf. de Hough)
R	Raio
l'_h	Estimativa inicial da projeção da borda em $\{I\}$ (transf. de Hough)
l''_h	Estimativa inicial da projeção da borda em $\{I\}$ (transf. de Hough)
l'_a	Projeção aprimorada da borda em $\{I\}$
l''_a	Projeção aprimorada da borda em $\{I\}$
$\{A\}$	Sistema de coordenadas do objeto definido por X_A, Y_A e Z_A
$\{B\}$	Sistema de coordenadas do objeto definido por X_B, Y_B e Z_B
U_{SMC}	Incerteza do Sistema de Medição a Calibrar
U_{SMP}	Incerteza do Sistema de Medição Padrão
Td	Tendência

RR	Repetitividade
U_{Td}	Incerteza da tendência
$dp(X)$	Desvio padrão da variável X
\bar{X}	Média da variável X
k	Fator de abrangência
p	Nível de significância
v_{ef}	Graus de liberdade efetivos
rr	Repetitividade padrão
u	Incerteza de medição padrão

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e motivação

De acordo com a *International Commission on Large Dams* (ICOLD)¹, atualmente existem mais de 45000 grandes barragens registradas em todo o mundo. Esses empreendimentos desempenham importante papel para o desenvolvimento da sociedade, sendo destinados principalmente ao abastecimento de água para fins residenciais e industriais, à produção de alimentos, ao saneamento e à geração de energia (MEDEIROS, 2003). Assim, em virtude do imenso potencial de perdas decorrentes a possíveis rupturas acidentais, tem havido uma preocupação crescente com relação à segurança dessas estruturas (ROCHA et al., 2003).

A monitoração e a garantia da integridade de barragens é atualmente realizada por meio de inspeções visuais e pela análise de dados gerados por instrumentos de auscultação. Os principais parâmetros medidos incluem a pressão exercida pela água nas rochas da fundação, os deslocamentos e as deformações da estrutura e da fundação, a temperatura do concreto e do ambiente, as vazões de drenagem e os materiais sólidos carregados pela água (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1994; BROWNJOHN, 2007). A avaliação da inter-relação existente entre esses parâmetros pode auxiliar na determinação de ações preventivas que possam ser tomadas para remediar efeitos indesejados por meio da atenuação de suas causas (SILVEIRA, 2006; ARDITO; MAIER; MASSALONGO, 2008).

Para a monitoração de deslocamentos em barragens de concreto, uma configuração amplamente empregada caracteriza-se pela utilização conjunta de pêndulos diretos e invertidos (BROWNJOHN, 2007). Nesse sentido, para a obtenção das coordenadas ortogonais da posição de um fio de pêndulo utiliza-se um equipamento denominado coordenômetro, o qual pode ser do tipo portátil ou automatizado. Com relação ao coordenômetro portátil, esse deve ser fixado no local de medição por um operador, sendo a leitura executada por meio do ajuste manual da posição de duas escalas graduadas e ortogonais entre si que permitem determinar os deslocamentos do fio do pêndulo nos sentidos montante-jusante² e lateral da estrutura (ITAIPU BINACIONAL, 1992a; GLÖTZL, 2004). A utilização desse sistema destaca-se pelo baixo custo de implantação³, pela grande estabilidade ao longo do tempo,

¹<http://www.icold-cigb.net/>

²Montante (antes) e jusante (após) à barragem no sentido de escoamento do rio.

³Um coordenômetro portátil atende um conjunto de pêndulos dispostos em uma barragem.

pela simplicidade dos componentes empregados no processo e pelo fato de que as leituras efetuadas em campo podem ser associadas às operações de inspeção visual de rotina. Por outro lado, um problema relatado por empresas proprietárias de barragens reside no fato de que a participação efetiva dos operadores nos procedimentos de medição contribui para a diminuição da confiabilidade metrológica das operações de auscultação como um todo, que vão desde a aquisição de dados em campo, até sua inserção e gerenciamento no local de armazenamento (SILVEIRA, 2003). Aspectos relacionados à insalubridade das operações também são críticos uma vez que esses instrumentos são relativamente pesados para serem carregados durante as campanhas de medição (BALBI; CARIM; MAGALHÃES, 2003).

Nesse contexto, vêm sendo desenvolvidos e implantados nas barragens os coordenômetros automatizados. Essa classe de instrumentos caracteriza-se pela disposição de um módulo fixo de monitoração em cada uma das estações de medição, sendo o processo de transmissão de dados realizado via rede de comunicação (GLÖTZL, 2005; SISGEO, 2007). Como consequência, eleva-se a confiabilidade metrológica do processo uma vez que toda a operação é realizada de modo automatizado por meio de técnicas de medição mais modernas e que não sofrem a interferência dos usuários (BALBI; CARIM; MAGALHÃES, 2003). No entanto, como características negativas dos coordenômetros automatizados, destacam-se os elevados custo de implantação para a monitoração de uma barragem como um todo e o maior nível de complexidade dos componentes envolvidos (SILVEIRA, 2003). Adicionalmente, a frequência tipicamente empregada para a realização de medições em pêndulos pode ser considerada baixa, não tornando imprescindível a aplicação de sistemas dedicados que permitam a aquisição de dados em tempo real (FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION - FERC, 2008).

Tomando-se como base as informações apresentadas, pode ser observado que existe uma demanda em relação ao desenvolvimento de um novo módulo de monitoração portátil e automatizado que permita agregar as características positivas inerentes às duas classes de coordenômetros atualmente disponíveis no mercado. Assim, o processo de auscultação poderia ser realizado em campo paralelamente às operações de inspeção visual mantendo-se a confiabilidade e a exatidão das medições no mesmo patamar obtido por meio dos coordenômetros automatizados. Além desses aspectos, uma vez que um instrumento automatizado, porém portátil, pode ser transportado de modo a atender a um conjunto de pêndulos distribuídos ao longo da estrutura, os custos de implantação e manutenção poderiam ser minimizados, tornando-se essa solução viável sob os pontos de vista metrológico, operacional e

econômico.

Para tanto, um importante passo a ser dado em relação ao desenvolvimento de um novo sistema de medição consiste na identificação de um princípio que possibilite atender aos requisitos inicialmente impostos na fase de projeto. Nesse sentido, acredita-se que o desenvolvimento de um módulo de monitoração automatizado, portátil e que não origine condições desfavoráveis ao trabalho dos operadores possivelmente seja viabilizado por meio da utilização da técnica estereoscopia, uma vez que essa permite a utilização de dispositivos compactos e apresenta-se flexível para aplicações móveis, sem contato e que exigem baixos níveis de incerteza (FRASER, 1999; ARMANGUÉ; SALVI; BATTLE, 2000; TOMMAZELLI, 2009). Com relação à técnica de medição baseada em estereoscopia, essa caracteriza-se pela obtenção de informações relativas à geometria de um objeto sob análise por meio do processamento digital de imagens obtidas por câmeras posicionadas em diferentes ângulos de observação (LI; FENG; FENG, 2004). Esse princípio está fundamentado nas características da visão binocular apresentada pelos seres humanos e por alguns animais, a qual possibilita a percepção tridimensional do mundo por meio da interpretação das imagens bidimensionais que cada olho capta a partir de seu ponto de vista (EVANS et al., 1995; TOMMAZELLI, 2009).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho consiste em avaliar sob o ponto de vista metrológico a utilização da técnica estereoscopia para o desenvolvimento de um novo instrumento de medição portátil e automatizado destinado à monitoração da posição de pêndulos instalados em barragens.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desse trabalho encontram-se dispostos abaixo:

- Construir um protótipo de um instrumento de medição portátil e automatizado destinado à monitoração da posição de pêndulos instalados em barragens;
- Avaliar as características metrológicas, bem como determinar os principais fatores que interferem na exatidão do protótipo do instrumento

de medição portátil e automatizado destinado à monitoração da posição de pêndulos instalados em barragens.

1.3 Estrutura do trabalho

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão com relação aos pêndulos diretos e invertidos utilizados para a monitoração de deslocamentos em barragens, bem como sobre os tipos de coordenômetros utilizados para a determinação das coordenadas ortogonais da posição dos fios de pêndulos.

No Capítulo 3, por sua vez, são apresentados os requisitos necessários para o desenvolvimento de um novo coordenômetro portátil e automatizado, de modo que as informações apresentadas foram organizadas juntamente com usuários de coordenômetros, além de especialistas das áreas de metrologia e de segurança de barragens.

Uma revisão com relação à técnica de medição estereoscopia é apresentada no Capítulo 4. Nesse sentido, aspectos relacionados à modelagem do processo de formação de imagens de câmeras e posterior reconstrução de cenários são apresentados e discutidos.

No Capítulo 5 são descritos os materiais e métodos relacionados à construção do protótipo de medição. Após, são apresentados os procedimentos delineados para a avaliação da aplicabilidade do sistema para a concepção de um novo instrumento de medição portátil e automatizado destinado à monitoração da posição de pêndulos instalados em barragens.

No Capítulo 6 são apresentados os resultados referentes às avaliações realizadas, sendo discutidos os aspectos importantes observados.

Por fim, no Capítulo 7, são apresentadas as conclusões obtidas com base na discussão dos resultados, sendo também apresentadas recomendações para trabalhos futuros.

2 PÊNULOS DIRETOS E INVERTIDOS

2.1 Considerações iniciais

A monitoração da integridade de barragens é de suma importância, sendo normalmente realizada por meio do delineamento de inspeções visuais e por meio da instalação de instrumentos de auscultação em locais determinados na fase de projeto. Nesse sentido, dentre os parâmetros monitorados, os principais são (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1994; BROWNJOHN, 2007):

- Pressão exercida pela água nas rochas da fundação;
- Vazões de drenagem e os materiais sólidos carreados pela água;
- Temperatura do concreto e do ambiente;
- Tensões e deformações na fundação e na construção;
- Deslocamentos da estrutura.

Na Figura 1 pode ser observada uma representação esquemática da distribuição dos instrumentos de auscultação em um bloco-chave da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional, o qual caracteriza-se pela densa malha de instrumentos que agrega em função do importante papel que desempenha para a integridade da estrutura. No exemplo apresentado, o bloco situa-se na região central da barragem principal da Usina de Itaipu, possuindo cerca de 185 metros de altura.

Todas as barragens movem-se devido à aplicação de carregamentos externos, sejam elas de enrocamento, de terra ou de concreto. Nesse contexto, a instrumentação empregada para a monitoração desse parâmetro depende das características construtivas da estrutura, do tipo de deslocamento que pretende-se monitorar e da exatidão requerida (GOLZE, 1977). Em barragens de concreto, a monitoração de deslocamentos é tida como uma tarefa que exige elevada sensibilidade e exatidão, sendo normalmente realizada por meio da análise dos dados gerados pelos instrumentos listados abaixo (BROWNJOHN, 2007):

- **Inclinômetros:** instrumento que encapsula sensores que permitem quantificar a inclinação de um bloco de concreto em relação ao eixo vertical da barragem. Assim, normalmente considera-se o bloco monitorado como um corpo rígido, correlacionando-se a inclinação observada com o carregamento ocasionado pelo nível do reservatório;

- **Extensômetros:** instrumento composto por uma haste longa e retilínea, cujas extremidades da mesma são utilizadas para a determinação do deslocamento relativo existente entre dois pontos de interesse. Normalmente esse instrumento é empregado para a monitoração do deslocamento de um ponto da barragem em relação à um ponto fixo da fundação. As medições são realizadas por meio de relógio comparador;
- **Medidores de juntas ou fissuras:** instrumento caracterizado pela disposição de três pontos de referência em torno de uma junta ou fissura. Desse modo, os deslocamentos existentes entre os mesmos são combinados, permitindo a monitoração dos movimentos de abertura e desliscamento existentes entre as partes móveis. As medições são realizadas por meio de relógio comparador;
- **Estações geodésicas:** caracterizam-se pela disposição de marcos geodésicos em locais distantes da barragem, os quais são tomados como base para a monitoração do deslocamento absoluto de pontos da estrutura definidos por alvos de referência. Para a determinação das coordenadas dos pontos monitorados são utilizadas relações trigonométricas;
- **Pêndulos diretos e invertidos:** os pêndulos diretos são instalados com o propósito de se observar os deslocamentos de uma cota superior da barragem com relação à interface fundação-estrutura. Os pêndulos invertidos, por sua vez, possibilitam avaliar os deslocamentos da base da barragem com relação a pontos fixos da fundação. Além desses aspectos, a combinação das medições realizadas por meio de ambos os instrumentos normalmente é realizada, de modo que torna-se possível avaliar o deslocamento absoluto de pontos da estrutura em relação à fundação.

Com relação à disposição e à quantidade a ser utilizada de cada um dos instrumentos acima apresentados, esse caracteriza-se como um fator que depende fundamentalmente das dimensões e da complexidade da estrutura a ser avaliada. No entanto, observa-se que na grande maioria das configurações projetadas, a aplicação de pêndulos diretos e invertidos é realizada uma vez que esses permitem avaliar conjuntamente deslocamentos relativos e absolutos inerentes à barragem e pelo fato de serem simples, precisos e confiáveis (FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION - FERC, 2008).

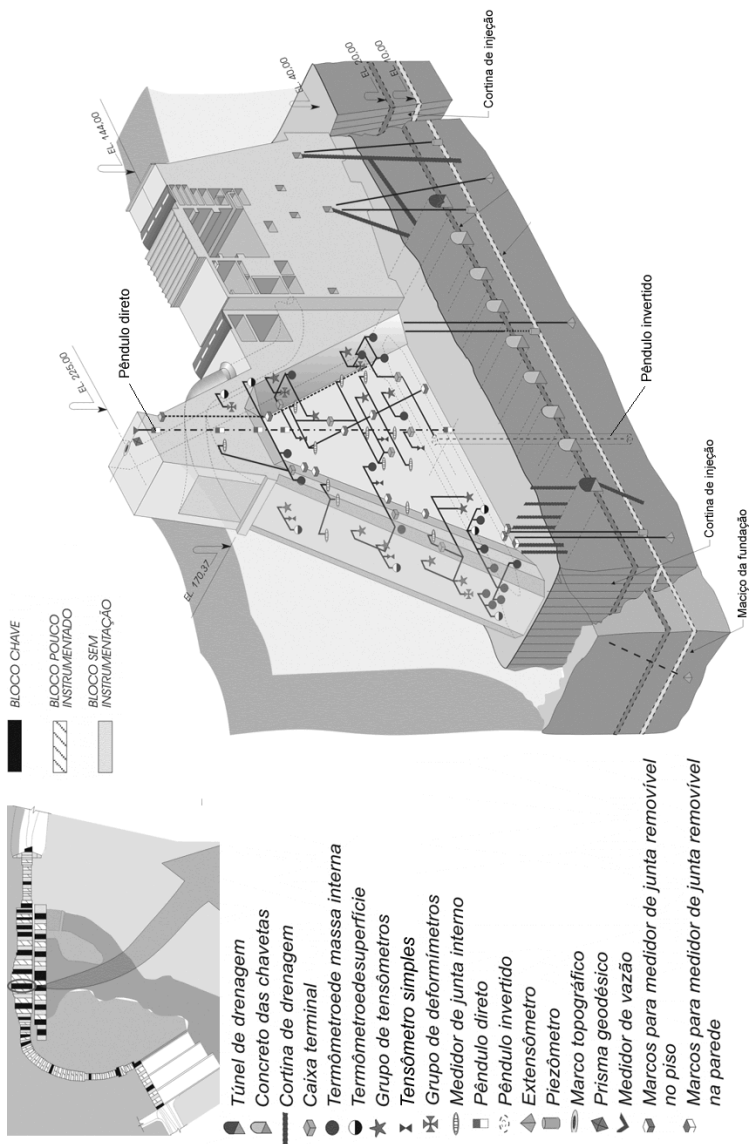


Figura 1: Instrumentação de um bloco-chave da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional (OSAKO, 2008).

2.2 Características construtivas

Os pêndulos diretos são caracterizados pela fixação de um fio de aço na crista da barragem, o qual sustenta um peso de chumbo imerso em um banho de óleo posicionado na interface fundação-estrutura. Desse modo, é realizada a monitoração do deslocamento do fio de aço em relação a uma série de bases de referência instaladas em distintas elevações da estrutura (ITAIPU BINACIONAL, 1992b). Na Figura 2-a pode ser observada a representação esquemática dos elementos constituintes de um pêndulo direto.

Nos pêndulos invertidos, por sua vez, a fixação do fio de aço é realizada na fundação geralmente aproveitando-se a disposição de furos de sondagem realizados na fase de projeto, sendo a outra extremidade atada a um elemento flutuador posicionado na barragem. Nesse caso, a monitoração do deslocamento do fio de aço é realizada em relação à uma base de referência instalada na interface fundação-estrutura da barragem (ITAIPU BINACIONAL, 1992b). Na Figura 2-b pode ser observada a representação esquemática e os elementos constituintes de um pêndulo invertido.

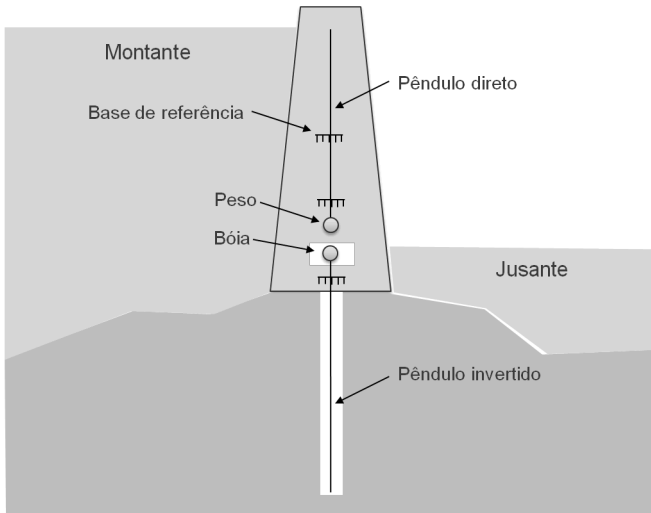


Figura 2: Representação esquemática de pêndulo direto e pêndulo invertido.

Em relação às características de um fio de pêndulo direto ou invertido, esse apresenta-se com aspecto liso de modo a facilitar a identificação de sua posição e com diâmetro que normalmente varia de um à dois milímetros. O

fato de serem metálicos, no entanto, os torna susceptíveis à corrosão. Nesse contexto, como alternativa aos fios de aço atualmente utilizados, já é realizada a aplicação de sistemas que utilizam feixes de *laser* alinhados ao eixo vertical da barragem, sendo identificada a posição em que ocorre a interceptação de um plano definido por um sensor foto-sensível (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1994).

2.3 Análise do significado físico das medições

Para dar-se início à análise do significado físico das medições realizadas utilizando-se os pêndulos diretos e invertidos, considera-se uma situação em que o comprimento do fio pode ser considerado muito maior do que a magnitude dos deslocamentos observados. Nesse sentido, para cada base de referência deve ser criado um sistema de coordenadas por meio do qual a posição do fio do pêndulo possa ser representada pelo ponto $P = (X, Z)^T$. Como fatores a serem observados durante o delineamento desse processo, destacam-se os listados abaixo (Figura 3):

- O eixo Y do sistema de coordenadas deve estar alinhado ao eixo vertical definido pela orientação do fio do pêndulo para que a magnitude do deslocamento observado seja compatível com o valor do deslocamento real;
- Os eixos X e Z do sistema de coordenadas devem estar preferencialmente alinhados aos eixos da barragem, de modo que as futuras indicações da posição do fio do pêndulo em relação à referência adotada estejam relacionadas diretamente aos deslocamentos montante-jusante e lateral da estrutura;
- Como fator de maior importância destaca-se o fato de que uma vez definido o sistema de coordenadas de monitoração, esse deve apresentar-se estático ao longo do tempo para que seja mantida condição de referência estabelecida.

Tomando-se como base a caracterização realizada, define-se o mensurando como sendo o deslocamento do fio de um pêndulo ao longo do tempo (Equação 2.1):

$$D = \begin{pmatrix} d_X \\ d_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_j - X_i \\ Z_j - Z_i \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

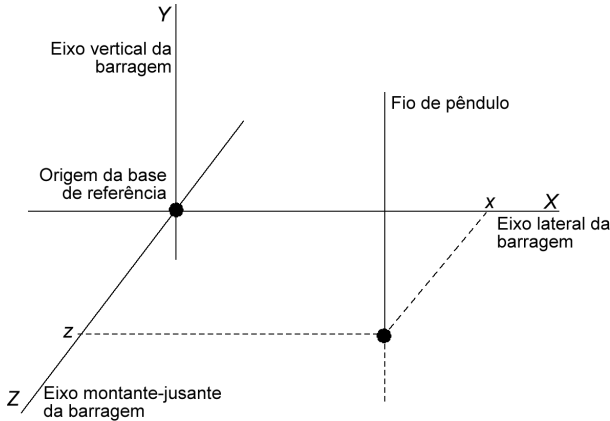


Figura 3: Caracterização da posição de um fio de pêndulo direto ou invertido em relação à uma base de referência.

onde os índices i e j inseridos na notação representam, respectivamente, a primeira e a última medição realizada.

Assim, tratando-se de um pêndulo direto, o deslocamento da crista da barragem em relação à interface fundação-estrutura pode ser estimado por meio da Equação 2.2:

$$D_r(A) = \begin{pmatrix} X_j(A) - X_i(A) \\ Z_j(A) - Z_i(A) \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

onde o termo A identifica uma base de referência instalada na interface fundação-estrutura da barragem e o índice r indica que o deslocamento medido é do tipo relativo.

O deslocamento de uma cota intermediária da barragem em relação à interface fundação-estrutura, por sua vez, pode ser estimado por meio da Equação 2.3:

$$D_r(B) = D_r(A) - \begin{pmatrix} X_j(B) - X_i(B) \\ Z_j(B) - Z_i(B) \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

onde o termo B identifica a base de referência instalada na cota intermediária a ser avaliada.

Por outro lado, considerando-se um pêndulo invertido, torna-se possível estimar o deslocamento da base da barragem em relação à um ponto

fixo da fundação por meio da utilização da Equação 2.4:

$$D_r(I) = \begin{pmatrix} X_j(I) - X_i(I) \\ Z_j(I) - Z_i(I) \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

onde o termo I identifica a base de referência instalada juntamente ao pêndulo invertido na interface fundação-estrutura.

Finalmente, tomando-se como base as medições de deslocamento relativo efetuadas por meio dos pêndulos diretos e invertidos posicionados em um mesmo bloco, torna-se possível estimar o deslocamento absoluto da crista da barragem em relação a um ponto fixo da fundação (Equação 2.5)¹:

$$D_a(A) = D_r(A) + D_r(I) \quad (2.5)$$

Da mesma forma, o deslocamento absoluto de uma elevação intermediária da barragem pode ser estimada por meio da Equação 2.6:

$$D_a(B) = D_r(B) + D_r(I) \quad (2.6)$$

Alguns aspectos gerais são normalmente observados quando analisadas as características dos deslocamentos relativos e absolutos inerentes ao comportamento de uma barragem, sendo eles (GOLZE, 1977; FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION - FERC, 2008):

- Estruturas mais altas estão mais susceptíveis à deslocamentos em relação às de menor porte, sendo esse fator caracterizado pela maior solicitação ocasionada pelo nível do reservatório;
- Os deslocamentos mais significativos em uma barragem são observados durante a fase de enchimento, devendo ocorrer posteriormente um comportamento assintótico de estabilização;
- São observados deslocamentos com comportamento do tipo sazonal durante todas as fases do ciclo de vida de uma barragem. Essa característica decorre da variação do nível do reservatório e da temperatura do ambiente que causa dilatação na estrutura;

¹Para que as medições de um pêndulo direto e invertido possam ser combinadas, estes necessariamente precisam estar instalados juntamente ao mesmo bloco estrutural da barragem e as leituras realizadas em um curto intervalo de tempo (FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION - FERC, 2008). No exemplo apresentado na Figura 1 pode ser observada a disposição de um pêndulo direto e de um pêndulo invertido em um mesmo bloco-chave da Usina de Itaipu, tornando-se possível a determinação dos deslocamentos relativos e absolutos dessa região da estrutura.

- A amplitude dos deslocamentos relativos e absolutos depende das características de cada barragem em particular. Desse modo, problemas com relação à integridade de uma estrutura podem ser observados por meio do surgimento de tendências anômalas nas curvas de controle.

Para ilustrar as características acima citadas, na Figura 4 são apresentados de modo qualitativo os deslocamentos no sentido montante-jusante das diferentes elevações do bloco-chave da Usina de Itaipu apresentado como exemplo na Figura 1 em relação à interface fundação estrutura e ao longo dos primeiros 16 anos de operação da barragem. Como pode ser observado, a inclinação relativa mais significativa se deu nos primeiros dois anos de operação da barragem, período que compreende a etapa de enchimento. Outro fator importante provém da não linearidade dos perfis de deslocamento, fato que demonstra o surgimento de deformações ao longo do eixo vertical do bloco.

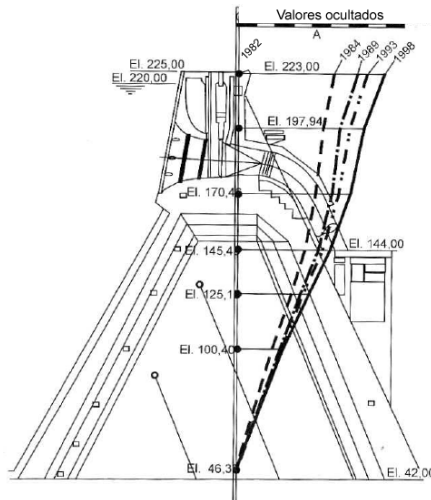


Figura 4: Perfil de deslocamentos de um bloco-chave da usina hidrelétrica de Itaipu Binacional em relação à interface fundação-estrutura (RIBEIRO et al., 2008).

Na Figura 5, por sua vez, é apresentado de modo qualitativo o deslocamento no sentido montante-jusante da crista do mesmo bloco-chave da Usina de Itaipu apresentado como exemplo na Figura 1 em relação a um ponto fixo da fundação e durante os primeiros 26 anos de operação da barragem.

Nesse caso podem ser observados os aspectos relacionados aos deslocamentos causados pelo enchimento, aos deslocamentos sazonais e à tendência de estabilização do bloco ao longo do tempo. Todos os valores encontram-se dentro da normalidade e de acordo com as condições de projeto (ITAIPU BINACIONAL, 2008).

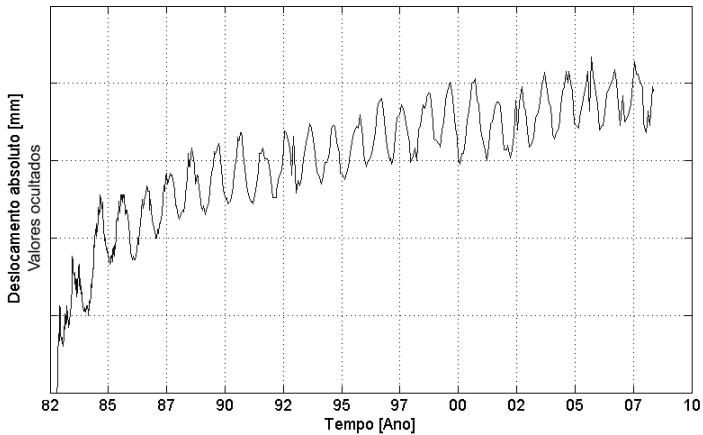


Figura 5: Deslocamento absoluto da crista de um bloco-chave da usina hidrelétrica de Itaipu Binacional em relação a um ponto fixo da fundação.

Deve ser observado, no entanto, que a disposição de instrumentos de auscultação em uma estrutura não é garantia de que as informações geradas sejam significativas. Assim, para a monitoração de deslocamentos em barragens por meio da utilização de pêndulos diretos e invertidos, alguns fatores são considerados importantes, sendo eles:

- A disposição dos pêndulos diretos e invertidos ao longo da estrutura deve ser realizada de modo a serem monitorados os pontos considerados mais vulneráveis. Nesse contexto, como regra geral, devem ser contemplados os blocos de maior altura em que a solicitação exercida pelo nível do reservatório apresenta-se mais significativa (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1994);
- A frequência da realização de leituras nos pêndulos diretos e invertidos instalados em uma barragem deve permitir a identificação das compo-

nentes mais significativas inerentes às características dos deslocamentos relativos e absolutos presentes em uma barragem (FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION - FERC, 2008). Nesse sentido, na Tabela 1 são apresentadas as faixas tipicamente empregadas para a frequência de monitoração considerando-se as distintas fases do ciclo de vida de uma barragem. Como pode ser observado, mais atenção é dada para o período inicial de estabilização;

- A maneira pela qual é realizada a determinação da posição do fio de um pêndulo deve respeitar as características relacionadas à definição do mensurando apresentada anteriormente. Além desses aspectos, para a realização desse procedimento deve ser utilizado um instrumento de medição que apresente um nível exatidão que permita representar as características mais significativas inerentes aos deslocamentos que podem estar presentes em uma barragem (FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION - FERC, 2008);
- Os dados gerados por meio do sistema de auscultação devem ser corretamente gerenciados e analisados de modo que possam contribuir para a geração de conhecimento sobre características da estrutura (GOLZE, 1977; U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1994).

Tabela 1: Frequências de medição tipicamente empregadas para a monitoração de pêndulos diretos e invertidos em função das distintas fases do ciclo de vida de uma barragem (FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION - FERC, 2008).

Período	Frequência
Enchimento	Semanal à mensal
Primeiro ano após o enchimento	Mensal à trimestral
Segundo ano após o enchimento	Mensal à semestral
Operação normal	Semestral à anual

Em relação aos tópicos apresentados, um aspecto importante diz respeito ao fato de que todos devem ser abordados conjuntamente. Desse modo, a configuração do processo de auscultação inicia-se já na etapa de projeto. Posteriormente, torna-se imprescindível a implementação de rotinas de manutenção e modernização de equipamentos e de análise dos dados

gerados para que os mesmos sejam efetivamente traduzidos em informações e possam auxiliar na minização da ocorrência de acidentes.

2.4 Coordenômetros

A determinação das coordenadas ortogonais da posição de um fio de pêndulo de acordo com as definições realizadas para o mensurando é delimitada por meio da utilização de um instrumento de medição denominado coordenômetro, de modo que atualmente estão disponíveis no mercado dois segmentos distintos: os portáteis e os automatizados.

2.4.1 *Coordenômetros portáteis*

A utilização de um coordenômetro portátil permite o atendimento de múltiplas bases de referência ao longo de uma barragem. Nesse sentido, seu acoplamento em cada um dos locais de medição é realizado por meio de um sistema de fixação isostático, o qual trava os seis graus de liberdade que definem a posição e a orientação do instrumento em relação a um sistema de coordenadas previamente definido. Uma vez feita a fixação, o procedimento de leitura se dá a critério do operador enquadrando-se visualmente o fio do pêndulo por meio de um sistema ótico.

Existem variações construtivas em relação aos coordenômetros portáteis. No entanto, o princípio geral de funcionamento é o mesmo para todos os casos. Como exemplo, é apresentado na Figura 6 um sistema acoplado a uma base de referência, de modo que a determinação da posição do fio do pêndulo é realizada alinhando-se as lentes objetivas posicionadas sobre as escalas digitais tomando-se como base marcações de referência dispostas nas imagens geradas (GLÖTZL, 2004).

Na Figura 7, por sua vez, é apresentado um segundo exemplo de coordenômetro portátil empregado para a monitoração de pêndulos². Nesse caso, dispõem-se de uma única lente objetiva posicionada sobre um par escalas ortogonais e deslisantes entre si, sendo o redirecionamento do campo de visão realizado por meio de um espelho retrátil orientado a 45 graus sobre a escala menor. Assim, a determinação da posição do mensurando é realizada alinhando-se ambos os eixos do sistema primeiramente em relação a uma referência cônica conjugada à base de fixação do coordenômetro e, após, em relação ao fio do pêndulo. O cone caracteriza a origem estática do sistema

²O modelo apresentado na Figura 7 é utilizado na Usina de Itaipu desde o período que precedeu o enchimento da barragem.

de coordenadas de monitoração e indica se os procedimentos de fixação e de leitura foram efetuados corretamente pelo operador (ITAIPU BINACIONAL, 1992a).

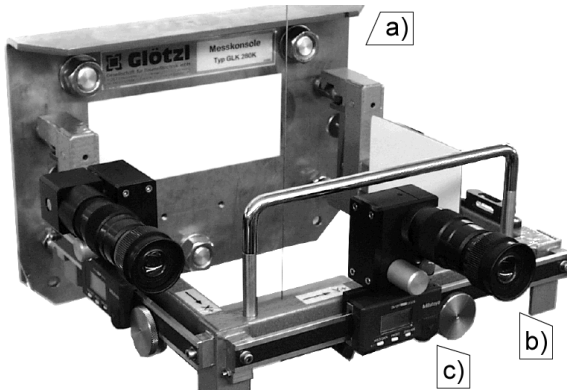


Figura 6: Exemplo de coordenômetro portátil: a) base de referência para fixação de coordenômetro e b) lente objetiva e c) escala digital (GLÖTZL, 2004).

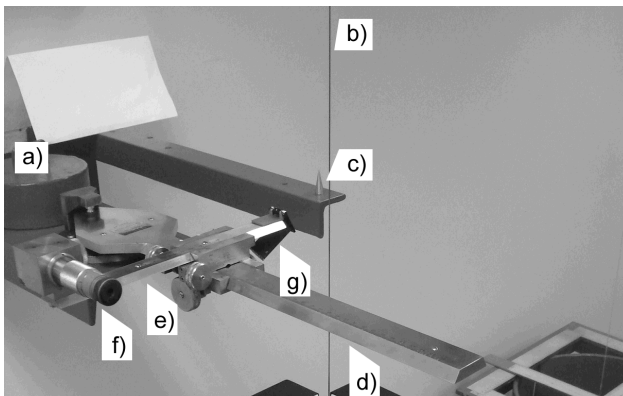


Figura 7: Exemplo de coordenômetro portátil: a) base de referência para fixação de coordenômetro, b) fio de pêndulo, c) referência cônica, d) escala maior, e) escala menor, f) lente objetiva e g) espelho retrátil.

Nesse contexto, as principais características positivas decorrentes da

utilização dos coordenômetros portáteis estão dispostas abaixo:

- Os custos de implantação podem ser considerados baixos em comparação com as demais tecnologias disponíveis (SILVEIRA, 2003). Como exemplo, em Itaipu dispõe-se de 15 pêndulos diretos e de 13 pêndulos invertidos, os quais juntos totalizam 89 bases de referência (ITAIPU BINACIONAL, 2008). No entanto, em função da frequência de monitoração empregada, a demanda da usina é suprida por meio da utilização apenas de quatro dispositivos portáteis;
- O processo monitoração de pêndulos baseado na utilização de coordenômetros portáteis emprega componentes considerados de baixa complexidade, o que contribui para a minimização dos custos de manutenção (SILVEIRA, 2003);
- As campanhas de medição realizadas em campo podem ser associadas às operações de inspeção visual de rotina, visto que esses procedimentos devem contemplar todos os pontos da barragem. Assim, minimiza-se a demanda por contratação de nova equipe para o delineamento das leituras (ITAIPU BINACIONAL, 2008).

Por outro lado, uma série de características negativas inerentes aos coordenômetros portáteis podem ser observadas, dentre elas:

- O nível de incerteza típico declarado pelos fabricantes de coordenômetros portáteis para a identificação de deslocamentos em fios de pêndulo ao longo do tempo (Equação 2.1) é da ordem de $\pm 0,2 \text{ mm}$. No entanto, de acordo com Silveira (2003), a variabilidade inerente aos critérios adotados pelos distintos operadores que desempenham o processo de auscultação pode elevar a incerteza para o nível de até $\pm 0,5 \text{ mm}$. Deve ser observado ainda que para cada combinação realizada por meio das Equações 2.3, 2.5 e 2.6, ocorre o processo de propagação de incertezas. Assim, pode ser inviabilizada a identificação de padrões importantes em relação ao comportamento de uma estrutura;
- A confiabilidade metrológica do processo de monitoração de pêndulos é minimizada uma vez que existe a possibilidade de ocorrerem erros durante a transcrição dos valores lidos em campo para as planilhas impressas de controle e, posteriormente, para os *softwares* de análise de dados (BALBI; CARIM; MAGALHÃES, 2003);

- Os fatos de os coordenômetros portáteis serem carregados durante as campanhas de medição pode contribuir para a geração de condições insalubres para os operadores (BALBI; CARIM; MAGALHÃES, 2003).

Em função das características apresentadas, é crescente o interesse por parte das empresas proprietárias de barragens que empregam os coordenômetros portáteis de efetuar o processo de modernização de seus equipamentos. Nesse sentido, a alternativa atualmente disponível no mercado diz respeito à implantação dos coordenômetros automatizados.

2.4.2 *Coordenômetros automatizados*

Um sistema de monitoração de pêndulos baseado na utilização de coordenômetros automatizados caracteriza-se pela disposição de um módulo fixo de monitoração em cada uma das bases de referência posicionadas ao longo da barragem. Nesse contexto, as leituras podem ser realizadas automaticamente de acordo com um cronograma pré-agendado e os dados enviados para uma central de análise via rede de comunicação. Caso necessário, o procedimento de medição também pode ser efetuado em campo por meio do acionamento do equipamento e posterior armazenamento do valor disponibilizado pelo dispositivo mostrador em planilha de controle impressa ou dispositivo eletrônico móvel.

Assim como para os coordenômetros portáteis, existem variações construtivas em relação aos coordenômetros automatizados. No entanto, pode-se dizer que o princípio geral de funcionamento é o mesmo para todos os casos. Desse modo, normalmente dispõe-se de uma configuração baseada na utilização de sensores foto-sensíveis, sendo a determinação das coordenadas ortogonais da posição do fio do pêndulo realizada de modo sistêmico por meio do processamento digital das imagens capturadas. Como casos específicos, existem modelos em que os sensores foto-sensíveis (câmeras) encontram-se orientados ortogonalmente entre si e são movimentados ao longo dos eixos de medição por meio de motores de passo buscando-se o alinhamento em relação ao mensurando (SISGEO, 2007). No modelo apresentado na Figura 8, por sua vez, os sensores foto-sensíveis encontram-se estáticos e a medição se dá por meio do delineamento de triangulação – não são empregados dispositivos móveis para a captura de imagens. O processo é realizado, portanto, por meio do emprego da técnica estereoscopia em uma concepção não portátil fixa no local de monitoração (GLÖTZL, 2005).

A implementação de sistemas de auscultação de pêndulos baseados na utilização de coordenômetros automatizados promove uma série de caracte-



Figura 8: Exemplo de coordenômetro automatizado: a) coordenômetro disposto juntamente à base de referência e b) módulo de alimentação e transmissão com dispositivo mostrador (GLÖTZL, 2005).

terísticas positivas, dentre elas:

- O nível de incerteza típico declarado pelos fabricantes de coordenômetros automatizados para a identificação de deslocamentos em fios de pêndulo ao longo do tempo (Equação 2.1) é da ordem de $\pm 0,05 \text{ mm}$, o qual é dez vezes menor em relação ao valor de $\pm 0,5 \text{ mm}$ inerente aos coordenômetros portáteis. Assim, minimiza-se significativamente a possibilidade de ser inviabilizada a identificação de padrões importantes em relação ao comportamento de uma estrutura;
- A confiabilidade metrológica do processo de monitoração de pêndulos é maximizada uma vez que a aquisição e a transmissão de dados para os *softwares* de análise pode ser realizada de modo automatizado sem a interferência dos operadores (BALBI; CARIM; MAGALHÃES, 2003);
- O fato de os coordenômetros automatizados permanecerem fixos no local de medição não promove a geração de condições impróprias de trabalho para os operadores (BALBI; CARIM; MAGALHÃES, 2003).

Por outro lado, são listados abaixo os pontos negativos referentes à utilização dos coordenômetros automatizados:

- Os custos de implantação podem ser elevados para a monitoração de uma barragem como um todo (SILVEIRA, 2003). Como exemplo, seriam necessários 89 instrumentos para monitorar integralmente a Usina

de Itaipu, bem como a disponibilização de uma rede que possibilite a conexão de todos os pontos à central de análise;

- O processo monitoração de pêndulos baseado na utilização de coordenômetros automatizados emprega dispositivos de maior complexidade quando realizada uma comparação em relação aos coordenômetros portáteis puramente mecânicos. Assim, poderão estar envolvidos custos significativos em relação à realização de manutenções de rotina e à contratação de consultorias especializadas para a resolução de eventuais problemas (SILVEIRA, 2003; FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION - FERC, 2008).

Como pode ser observado, a instalação de um sistema de monitoração de deslocamentos em barragens baseado na utilização de coordenômetros automatizados viabiliza uma série de melhorias metrológicas e operacionais em relação aos sistemas que empregam os coordenômetros portáteis. No entanto, o fator que ainda tem retardado o processo de modernização no âmbito de segurança de barragens são os elevados custos associados.

2.5 Considerações finais

Nesse contexto, de acordo com as informações apresentadas, pode ser observado que existe uma demanda em relação ao desenvolvimento de um novo módulo de monitoração de pêndulos que seja viável sob os pontos de vista metrológico, operacional e econômico. Torna-se necessário, desse modo, o delineamento de um estudo referente à concepção de uma solução híbrida que permita agregar em um mesmo sistema de medição as características positivas inerentes às duas classes de coordenômetros atualmente disponíveis no mercado.

3 REQUISITOS DO SISTEMA

O primeiro passo dado em relação à concepção de uma solução híbrida que vise agregar as características positivas inerentes às duas classes de coordenômetros atualmente disponíveis no mercado esteve relacionado à definição de um conjunto de requisitos metrológicos e operacionais. Tais aspectos foram determinados em um trabalho conjunto com usuários de coordenômetros, além de especialistas das áreas de metrologia e de segurança de barragens e caracterizam as condições de contorno a serem respeitadas em relação ao desenvolvimento de um sistema portátil e automatizado aplicado no contexto de medição de deslocamentos de pêndulos instalados em barragens.

Nesse sentido, os requisitos metrológicos definidos encontram-se dispostos a seguir:

- **Mensurando:** o sistema de medição deve possibilitar a determinação das coordenadas ortogonais da posição do fio de um pêndulo de acordo com as características relacionadas à definição do mensurando apresentada na Seção 2.3;
- **Faixa de Medição (FM):** por meio da realização de um estudo prévio e de acordo com especialistas da área de segurança de barragens, a FM apropriada para a monitoração de deslocamentos de fios de pêndulos foi definida em $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$;
- **Incerteza de medição:** o nível de incerteza definido para a identificação de deslocamentos de fios de pêndulo ao longo do tempo (Equação 2.1) foi de $\pm 0,05\text{ mm}$, o qual condiz com o valor disponibilizado pelos coordenômetros automatizados atualmente disponíveis no mercado;
- **Referência física:** a configuração concebida deve prever uma referência física externa, tal qual a adotada pelo sistema apresentado como exemplo na Figura 7 da Seção 2.4.1, servindo como base para a indicação de que os procedimentos de fixação e leitura foram efetuados corretamente pelo operador.

Nos tópicos abaixo, por sua vez, encontram-se dispostos os requisitos operacionais do sistema de medição:

- **Ergonomia:** o instrumento deve possibilitar a realização de medições “*in situ*”. Assim, aspectos ergonômicos devem ser levados em

consideração de modo a minimizar os efeitos de insalubridade e desconforto aos operadores;

- **Resistência:** o instrumento deve apresentar bom desempenho e máxima durabilidade no ambiente em que for operar. Nesse contexto, aspectos como umidade e temperatura devem ser levados em consideração para a elaboração do projeto do sistema, assegurando uma operação confiável em tais circunstâncias;
- **Grau de automação:** o instrumento deve possibilitar a aquisição, o processamento e o gerenciamento automático dos dados de medição. Com relação a esses aspectos, têm-se como principais objetivos tornar o sistema confiável metrologicamente e robusto frente a possíveis interferências do usuário, bem como isentar o mesmo da necessidade de carregar até o local de medição uma planília impressa de controle para a anotação dos valores medidos;
- **Manutenção:** definiu-se a necessidade de serem estabelecidos procedimentos de rotina que visem verificar e garantir a manutenção das características metrológicas e operacionais do sistema de medição. Além desses aspectos, destaca-se o fato de que o sistema de coordenadas de monitoração deve apresentar-se estático ao longo do tempo para que seja mantida condição de referência estabelecida para cada estação de medição.

Uma vez realizada a definição dos requisitos metrológicos e operacionais referentes à demanda identificada, a problemática passa a estar relacionada à busca por um princípio de medição que viabilize, tecnicamente e economicamente, o processo de monitoração de pêndulos instalados em barragens respeitando-se as condições de contorno estabelecidas.

4 ESTEREOSCOPIA

4.1 Considerações iniciais

A medição de grandezas geométricas caracteriza-se como um processo de fundamental importância para diversas aplicações, tais como o controle da qualidade de processos de fabricação, a otimização de componentes mecânicos e a garantia de segurança de procedimentos que repercutem diretamente na vida de pessoas. Na avaliação da qualidade de processos de fabricação, métodos de medição de formas podem ser aplicados com o objetivo de controlar especificações técnicas previamente estabelecidas, garantindo assim, a qualidade final do produto. Em relação à otimização de componentes mecânicos, por sua vez, pode ser realizada a construção de modelos digitalizados para a realização de simulações computacionais. Por último, para a garantia da segurança de procedimentos, uma das aplicações das técnicas de medição de grandezas geométricas está relacionada a monitoração de deslocamentos e deformações em estruturas de elevado potencial de risco, tais como edificações e barragens. Existe uma série de técnicas relacionadas à metrologia dimensional, as quais podem estar baseadas nos princípios básicos da acústica, da elétrica, da mecânica e da óptica (WILSON, 2005).

Com relação aos instrumentos baseados nos princípios ópticos, esses caracterizam-se pela utilização da luz como meio de medição. Assim, uma série de vantagens podem ser observadas quando uma comparação é delineada em relação às técnicas mecânicas convencionais, sendo elas a não necessidade de contato, a rapidez na medição de uma grande quantidade de pontos e os excelentes níveis de incerteza que podem ser alcançados (FRASER, 1999; ARMANGUÉ; SALVI; BATLLE, 2000; TOMMAZELLI, 2009). Na Figura 9 é apresentado um diagrama contendo os principais métodos de medição baseados em princípios ópticos, os quais são classificados em dois grupos denominados ativos e passivos. Os métodos ativos caracterizam-se pela utilização de uma fonte ativa de energia para a criação de padrões e posterior realização de medições, podendo ser laser ou outro tipo luz estruturada. Com relação aos métodos passivos, por sua vez, esses possibilitam a extração de características inerentes ao objeto sob análise por meio do processamento de imagens extraídas do mesmo quando esse encontra-se exposto à iluminação ambiente. Como pode ser observado, a técnica de medição estereoscópica a ser abordada nesse trabalho enquadra-se no conjunto das técnicas passivas, de modo que características físicas do próprio objeto sob análise serão utilizadas como parâmetros para o treinamento do sistema e o posterior delineamento

de medições (HEIKKILÄ, 1997).

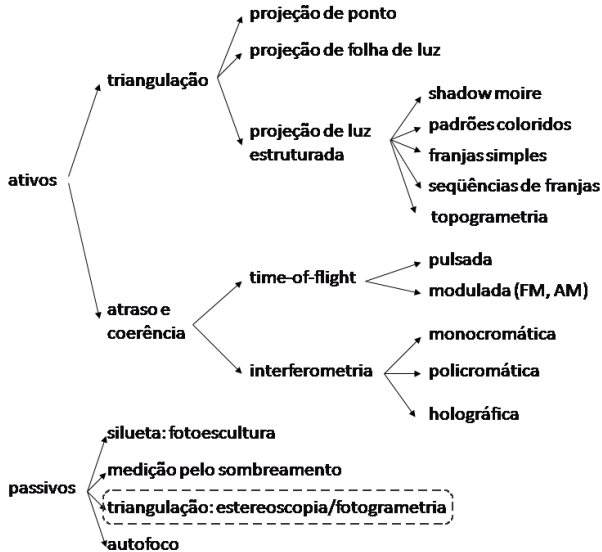


Figura 9: Principais técnicas de medição de grandezas geométricas baseadas em princípios ópticos (ALBERTAZZI, 2010).

A realização de medições por meio da estereoscopia envolve a utilização de no mínimo duas imagens de uma cena obtidas sob pontos de vista distintos por meio de câmeras com localização, orientação e características internas conhecidas. Conhecendo-se as posições nas imagens que correspondem ao mesmo ponto do objeto real retratado, torna-se possível determinar, para cada imagem, uma reta no espaço que contém esse ponto. Através da interseção das retas originadas, pode ser determinada a posição do ponto no espaço tridimensional. De modo geral, os procedimentos necessários para a realização de medições por meio da técnica estereoscopia são as seguintes (FANTIN, 1999):

1. **Modelagem do processo de formação de imagens:** procedimento que envolve a determinação da posição, da orientação e dos parâmetros ópticos dos equipamentos de aquisição de imagem, devendo ser realizado antes do processo de medição propriamente dito (Seção 4.2);
2. **Aquisição de imagens:** cada câmera deverá captar uma imagem a partir da sua posição e orientação em relação ao objeto (Seção 4.3);

3. **Determinação de pontos homólogos:** os pontos das imagens que correspondem ao mesmo ponto do objeto real devem ser determinados para a realização da triangulação (Seção 4.4);
4. **Triangulação:** procedimento em que serão determinadas as coordenadas no espaço que correspondem aos pontos do objeto que está sendo medido (Seção 4.5).

Nas próximas seções será apresentada uma descrição geral dos modelos matemáticos, dos métodos de modelagem e dos conceitos relacionados à técnica de medição em questão. Nessa revisão, a nomenclatura de termos e parâmetros será apresentada de acordo com a padronização proposta por Armanduê, Salvi e Batlle (2000), em que é realizado um estudo comparativo das principais técnicas utilizadas para a modelagem do processo de formação de imagens, sendo a homogeneização do vocabulário uma das propostas desse trabalho.

4.2 Modelagem do processo de formação de imagens

4.2.1 O modelo *pinhole*

As câmeras caracterizam-se como dispositivos que possibilitam o mapeamento de pontos presentes ao espaço Euclidiano \mathfrak{R}^3 para o espaço Euclidiano \mathfrak{R}^2 , estando a análise desse processo embasada nas ferramentas da geometria projetiva (BLOOMENTHAL; ROKNE, 1994). Nesse contexto, um dos modelos de câmera existentes para realizar a captura de imagens é denominado *pinhole*, no qual a projeção de pontos sobre o plano imagem está relacionada a um parâmetro denominado centro de projeção (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003).

Com relação ao modelo *pinhole*, o centro de projeção O_C deve estar posicionado na origem do sistema de coordenadas Euclidiano da câmera $\{C\}$ definido pelos eixos ortogonais X_C , Y_C e Z_C . O plano imagem $\{R\}$, por sua vez, é composto pelos eixos X_R e Y_R , os quais são paralelos aos eixos X_C e Y_C , respectivamente, e estão posicionados de acordo com a distância focal f do conjunto de lentes utilizado, em $Z_C = f$. Essa configuração é apresentada na Figura 11, por meio da qual pode ser observada a projeção do ponto $P_w = ({}^C X_w, {}^C Y_w, {}^C Z_w)^T$ pertencente à $\{C\}$ sobre o plano imagem $\{R\}$ da câmera, originando o ponto $P_u = ({}^R X_u, {}^R Y_u)^T$, o qual difere da projeção real distorcida P_d a ser considerada posteriormente. Essa transformação é realizada por meio de uma análise baseada em semelhança de triângulos que

pode ser resumidamente representada pela Equação 4.1.

$$({}^C X_w, {}^C Y_w, {}^C Z_w)^T \rightarrow (f {}^C X_w / {}^C Z_w, f {}^C Y_w / {}^C Z_w)^T \quad (4.1)$$

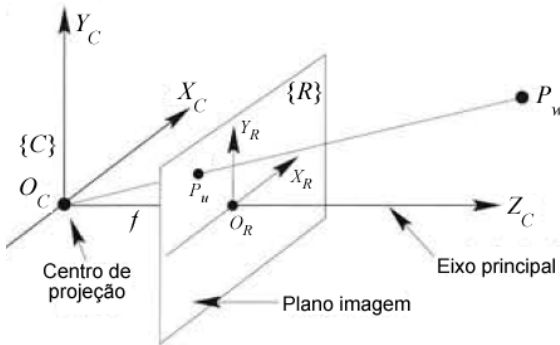


Figura 10: Representação esquemática do modelo *pinhole* (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003).

O centro de projeção O_C e o plano imagem $\{R\}$ também são conhecidos, respectivamente, como centro óptico e plano principal do dispositivo. Por fim, a linha que passa pelo centro óptico e que é perpendicular ao plano principal da câmera é chamada de eixo principal, sendo a posição em que ocorre o cruzamento com $\{R\}$ denominada ponto principal O_R (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003).

Nesse contexto, com base no modelo de câmera apresentado, considera-se uma montagem estereoscópica baseada na utilização de dois dispositivos *pinhole*. Assim, tem-se que para um dado ponto de interesse P_w pertencente ao objeto real retratado pode ser determinada, para cada posição e orientação, uma reta que contenha a projeção P_u deste ponto no plano imagem $\{R\}$ e o respectivo centro de projeção O_C . Idealmente, através da interseção das retas originadas é determinada a posição do ponto P_w no espaço Euclidiano \mathfrak{R}^3 (LI; FENG; FENG, 2004). Uma representação esquemática desse processo pode ser observada na Figura 11.

Deve ser observado, no entanto, que o modelo *pinhole* apresentado na Figura 10 caracteriza-se simplesmente como uma modelagem ideal do funcionamento das câmeras reais, de modo que esse equacionamento não é suficiente para se obter um mapeamento preciso do processo de formação de imagens, e, conseqüentemente, da reconstrução das características tridimen-

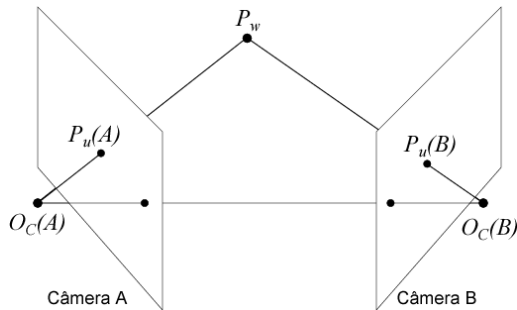


Figura 11: Representação esquemática do processo de triangulação ideal (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003).

sionais de um objeto por meio de uma montagem estereoscópica (TSAI, 1987; HEIKKILÄ, 2000). Idealmente, os raios luminosos provenientes da cena deveriam conter o centro de projeção O_C da câmera, mas fatores como resolução do sensor foto-sensível, sistema de coordenadas do sensor foto-sensível dado em *pixels*, morfologia e distribuição dos *pixels*, ruídos, distorções de lente, dentre outros fatores, inserem erros sistemáticos e aleatórios na imagem originada pelo equipamento (SUN; COOPERSTOCK, 2005). Nesse contexto, na próxima seção é apresentada uma revisão geral sobre os tipos de algoritmos e modelos existentes para a realização da modelagem desse processo visando-se adequações aos efeitos citados. Como poderá ser observado, a evolução dos modelos caracteriza-se como uma extensão dos conceitos relacionados ao modelo *pinhole*, de modo que distintas classes algoritmos tem sido propostas de modo a possibilitar a resolução dos valores dos parâmetros que compõem a modelagem realizada.

4.2.2 Métodos aplicados à modelagem do processo de formação de imagens

Como apresentado anteriormente, o primeiro passo necessário para a realização de medições por meio da utilização da técnica estereoscopia consiste na modelagem matemática do processo de formação de imagens de cada uma das câmeras que compõem a montagem. Assim, a exatidão do sistema de medição a ser desenvolvido está diretamente relacionada com a capacidade do modelo utilizado em representar a realidade, incluindo as distorções existentes nesse processo. Com relação à esses aspectos, existem diversos métodos utilizados para a determinação dos valores dos parâmetros que cons-

tituem o modelo matemático aplicado, os quais podem ser classificados da seguinte maneira (ARMANGUÉ; SALVI; BATLLE, 2000):

- **Métodos lineares:** permitem realizar a regressão dos valores dos parâmetros que compõem um modelo linear, tal qual o *pinhole*, por meio do qual são correlacionadas as posições das projeções de pontos no plano imagem em função de suas respectivas posições no espaço tridimensional. A resolução desse problema é delineada analiticamente utilizando-se o método dos mínimos quadrados em uma solução fechada. Um exemplo tipicamente citado consiste na técnica denominada *Direct Linear Transformation* (DLT), apresentada em trabalho relacionado (ABDEL-AZIZ; KARARA, 1971). No entanto, os resultados alcançados caracterizam-se geralmente pela baixa exatidão na reprodução das projeções de pontos presentes no espaço tridimensional em função dos erros originados principalmente pelas distorções de lente do equipamento (ARMANGUÉ; SALVI; BATLLE, 2000; SUN; COOPERSTOCK, 2005; REMONDINO; FRASER, 2006).
- **Métodos não lineares:** permitem realizar a regressão de modelos não lineares que tem como objetivo expressar com maior exatidão as posições das projeções distorcidas de pontos no plano imagem em função de suas respectivas posições no espaço tridimensional, as quais não necessariamente precisam ser conhecidas antes do processo de ajuste. Em outras palavras, nesse problema de otimização podem ser recuperados tanto os parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera utilizada, quanto as coordenadas dos pontos presentes no espaço tridimensional. O problema em que todos os parâmetros citados são recuperados conjuntamente é conhecido como *bundle adjustment* (BROWN, 1971; TRIGGS; FITZGIBBON, 1999). Sob o ponto de vista metrológico, os resultados alcançados por meio da utilização dos métodos não lineares normalmente são adequados, no entanto, a ocorrência de problemas com a convergência dos resultados é comum, o que torna a técnica instável (TSAI, 1987; HEIKKILÄ, 1997; HEIKKILÄ, 2000).
- **Métodos híbridos:** diferem dos métodos não lineares pelo fato de, inicialmente, permitirem realizar a regressão linear de um sub-conjunto de parâmetros do modelo matemático utilizado, sendo para isso normalmente empregado o método DLT citado anteriormente. Em um segundo passo, após as primeiras aproximações terem sido realizadas, todo o conjunto de parâmetros do modelo não linear é ajustado iterativamente por meio da minimização de uma função de erro. Por

meio desses procedimentos, diminui-se a quantidade de iterações necessárias para a determinação dos valores ótimos dos parâmetros, além de diminuir a ocorrência de problemas relacionados a erros de convergência. No entanto, para a utilização de um método híbrido torna-se necessário dispor de informações com relação à posição de pontos de controle no espaço tridimensional, sendo para isso utilizados padrões de calibração tridimensionais ou planares (TSAI, 1987; ZHANG, 1998; HEIKKILÄ, 2000).

Nesse sentido, os métodos mais empregados atualmente caracterizam-se pelos não lineares e pelos híbridos, uma vez que baseam-se na utilização de modelos não lineares que permitem realizar o equacionamento do processo de formação de imagens de modo mais completo e preciso. Nesses casos, o mapeamento é realizado por meio da inserção de parâmetros adicionais ao modelo *pinhole*, sendo atualmente considerada como ideal a configuração proposta por Brown (1971) em que são equacionadas as distorções de lente do tipo radial e tangencial, além de outros fatores originados pela morfologia e distribuição dos *pixels* que compõem o sensor foto-sensível (REMONDINO; FRASER, 2006). Como pode ser observado na Figura 12, representa-se esse processo por meio de quatro passos sequenciais, os quais são apresentados a seguir:

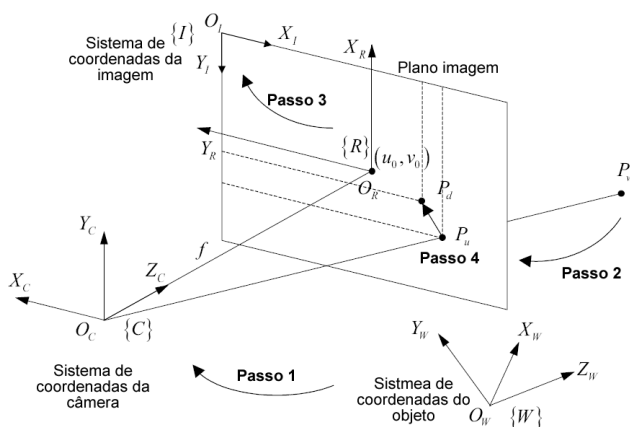


Figura 12: Relação existente entre um ponto 3D e sua projeção 2D no plano imagem (ARMANGUÉ; SALVI; BATLLE, 2000).

- **Passo 1:** determinação da posição e da orientação da câmera:

Consiste em transformar a representação do ponto P_w inicialmente dada em função de um sistema de coordenadas do espaço tridimensional $\{W\}$ para o sistema de coordenadas da câmera $\{C\}$. Essa transformação é realizada por meio da utilização de um vetor de translação e de uma matriz de rotação (Equação 4.2):

$$\begin{pmatrix} {}^C X_w \\ {}^C Y_w \\ {}^C Z_w \end{pmatrix} = {}^C R_W \begin{pmatrix} {}^W X_w \\ {}^W Y_w \\ {}^W Z_w \end{pmatrix} + {}^C T_W \quad (4.2)$$

onde, ${}^C T_W = [t_x, t_y, t_z]^T$ é uma matriz coluna cujos três componentes une as origens dos sistemas de coordenadas e ${}^C R_W$ é uma matriz rotação 3 por 3 ortonormal definida pelos ângulos de Euler ω , φ e κ . Com base nesses ângulos, as rotações são realizadas no sentido anti-horário primeiramente em torno do eixo-x, posteriormente em torno do eixo-y e, por fim, em torno do eixo-z (HEIKKILÄ, 1997).

Em coordenadas homogêneas, a transformação de $\{W\}$ para $\{C\}$ pode ser realizada por meio da aplicação da Equação 4.3:

$$\begin{pmatrix} {}^C X_w \\ {}^C Y_w \\ {}^C Z_w \\ 1 \end{pmatrix} = {}^C M_W \begin{pmatrix} {}^W X_w \\ {}^W Y_w \\ {}^W Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

onde, ${}^C M_W$ é uma matriz 4 por 4 cuja decomposição é apresentada pela Equação 4.4.

$${}^C M_W = \begin{bmatrix} {}^C R_W & {}^C T_W \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

- **Passo 2:** cálculo das projeções ideais:

Consiste em determinar a projeção do ponto P_w referenciado à $\{C\}$ sobre o plano imagem $\{R\}$ da câmera, obtendo-se P_u . Essa transformação é dada por meio da Equação 4.1 apresentada na Seção 4.2.1 considerando-se a câmera como um dispositivo do tipo *pinhole* em que a distância do plano imagem em relação ao plano paralelo definido pelos eixos X_C e Y_C é representada pela distância focal f do conjunto de lentes utilizado. Se o ponto P_w e sua projeção P_u forem representados em coordenadas homogêneas, o mapeamento de $\{C\}$ para $\{R\}$ é dado pela multiplicação matricial apresentada a seguir (Equação 4.5):

$$\begin{pmatrix} {}^R X_u \\ {}^R Y_u \\ 1 \end{pmatrix} \propto \begin{pmatrix} f {}^C X_w \\ f {}^C Y_w \\ {}^C Z_w \end{pmatrix} = {}^R P_C \begin{pmatrix} {}^C X_w \\ {}^C Y_w \\ {}^C Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

onde, ${}^R M_C$ é uma matriz 3 por 4 cujos componentes são apresentados abaixo (Equação 4.6).

$${}^R P_C = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

- **Passo 3:** transformação das unidades de medida:

Consiste em transformar a representação da projeção P_u dada em função do sistema de coordenadas do plano imagem $\{R\}$ para o sistema de coordenadas do plano imagem $\{I\}$ discretizado em *pixels*. Essa transformação é realizada por meio da Equação 4.7, em que k_u e k_v são coeficientes necessários para a mudança das unidades de medida, u_0 e v_0 são as coordenadas do ponto principal O_R no plano imagem $\{I\}$ e s é um fator de escala conhecido como *aspect ratio* considerado nos casos em que os *pixels* são retangulares.

$$({}^R X_u, {}^R Y_u)^T \rightarrow (-k_u s {}^R X_u + u_0, -k_v {}^R Y_u + v_0)^T \quad (4.7)$$

Considerando-se uma representação em coordenadas homogêneas, os Passos 2 e 3 podem ser realizados simultaneamente agregando-se os termos k_u , k_v , u_0 , v_0 e s à Equação 4.6 apresentada anteriormente. Desse modo, obtém-se a matriz ${}^I P_C$, por meio da qual a transformação de $\{C\}$ para $\{I\}$ é realizada (Equação 4.8):

$$\begin{pmatrix} {}^I X_u \\ {}^I Y_u \\ 1 \end{pmatrix} \propto \begin{pmatrix} -f k_u s {}^C X_w + u_0 {}^C Z_w \\ -f k_v {}^C Y_w + v_0 {}^C Z_w \\ {}^C Z_w \end{pmatrix} = {}^I P_C \begin{pmatrix} {}^C X_w \\ {}^C Y_w \\ {}^C Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

sendo ${}^I M_C$ uma matriz 3 por 4 cuja decomposição é apresentada abaixo (Equação 4.9).

$${}^I P_C = \begin{bmatrix} f k_u s & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f k_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Finalmente, uma matriz de transformação geral que contempla os Passos 1, 2 e 3 pode ser construída por meio da multiplicação das matrizes ${}^C M_W$ e ${}^I P_C$ responsáveis pelas transformações de $\{W\}$ para $\{C\}$ e de $\{C\}$ para $\{I\}$, respectivamente. Com base nessas considerações, a transformação direta de $\{W\}$ para $\{I\}$ é apresentada abaixo (Equação 4.10):

$$\begin{pmatrix} {}^I X_u \\ {}^I Y_u \\ 1 \end{pmatrix} \propto {}^I P_W \begin{pmatrix} {}^W X_w \\ {}^W Y_w \\ {}^W Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

onde ${}^I M_W$ é conhecida como matriz de projeção da câmera utilizada, cuja decomposição é dada pela Equação 4.11.

$${}^I P_W = {}^I P_C \times {}^C M_W \quad (4.11)$$

- **Passo 4:** modelagem das distorções de lente:

Esse passo final consiste em modelar as distorções impostas pelo conjunto de lentes utilizado, correlacionando-se as coordenadas da projeção ideal P_u obtidas por meio da matriz de projeção ${}^I P_W$ com as coordenadas da projeção real P_d . Uma vez realizada essa correção, torna-se possível completar o equacionamento do processo de formação de imagens.

Como apresentado anteriormente, é considerada como ideal a configuração proposta por (BROWN, 1971) em que são equacionadas as distorções de lente do tipo radial e tangencial (REMONDINO; FRASER, 2006). Nesse contexto, as distorções do tipo radial causam o deslocamento sistemático dos pontos projetados no sentido radial do plano imagem, sendo a modelagem desse fenômeno comumente expressada por meio da Equação 4.12:

$$\begin{pmatrix} \delta_{xr} \\ \delta_{yr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^I \bar{X}_d (k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + k_3 r_d^6 \dots) \\ {}^I \bar{Y}_d (k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + k_3 r_d^6 \dots) \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

onde, $r_d = \sqrt{{}^I \bar{X}_d^2 + {}^I \bar{Y}_d^2}$, ${}^I \bar{X}_d = {}^I X_d - u_0$, ${}^I \bar{Y}_d = {}^I Y_d - v_0$, δ_{xr} e δ_{yr} representam, respectivamente, as correções no sentido dos eixos X_I e Y_I e, por fim, k_1 , k_2 e k_3 representam os três primeiros coeficientes do polinômio de correção.

O efeito da distorção radial é apresentado Figura 13-a para os coeficientes da Equação 4.12 com valores positivos (pontilhado) e negativos (tracejado).

Por outro lado, com relação às distorções do tipo tangencial, essas estão relacionadas às imperfeições no alinhamento dos centros de curvatura das lentes que compõem o sistema de lentes utilizado. Nesse contexto, originam-se erros sistemáticos, os quais comumente são modelados por meio da Equação 4.13:

$$\begin{pmatrix} \delta_{xt} \\ \delta_{yt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 p_1 {}^I\bar{X}_d {}^I\bar{Y}_d + p_2 (r_d^2 + 2 {}^I\bar{X}_d^2) \\ p_1 (r_d^2 + 2 {}^I\bar{Y}_d^2) + 2 p_2 {}^I\bar{X}_d {}^I\bar{Y}_d \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

onde p_1 e p_2 são os coeficientes da função de correção. O efeito da distorção tangencial para valores positivos de p_1 e p_2 pode ser visualizado na Figura 13-b.

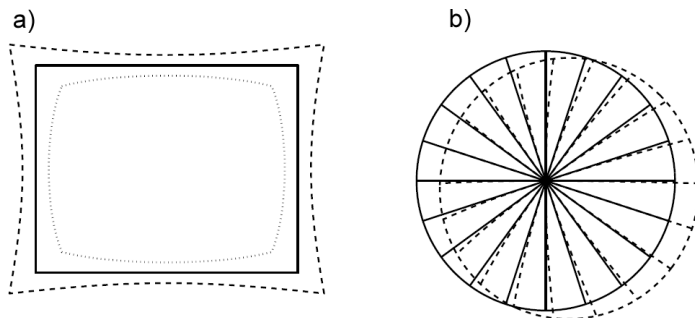


Figura 13: Efeito das distorções de lente do tipo: a) radial e b) tangencial (HEIKKILÄ, 1997).

Com base nas Equações 4.12 e 4.13 podem ser estimadas as coordenadas da projeção ideal P_u somando-se aos termos de P_d as correções referentes às distorções radial e tangencial (Equação 4.14).

$$\begin{pmatrix} {}^I X_u \\ {}^I Y_u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^I X_d + \delta_{xr} + \delta_{xt} \\ {}^I Y_d + \delta_{yr} + \delta_{yt} \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

Uma série de trabalhos têm sido realizados com relação às possíveis adaptações ou simplificações que podem ser feitas no modelo de equacionamento proposto por Brown (1971), bem como sobre às distintas configurações não lineares ou híbridas que podem ser adotadas para o processo de otimização dos valores dos parâmetros destinados à modelagem do

processo de formação de imagens (ABDEL-AZIZ; KARARA, 1971; TSAI, 1987; HEIKKILÄ; SILVÉN, 1997; ZHANG, 1998; TRIGGS; FITZGIBBON, 1999; HEIKKILÄ, 2000; JIAN; MALCOLM; ZHONGPING, 2001). Para todas as aplicações, no entanto, a escolha do método a ser utilizado deve estar baseada fundamentalmente nos requisitos metrológicos e operacionais inicialmente impostos para o sistema de medição a ser desenvolvido.

Como exemplo, no método híbrido proposto por Tsai (1987) o processo de equacionamento é realizado considerando-se apenas o primeiro termo (k_1) da Equação 4.12 para a correção das distorções de lente. De acordo com estudos realizados, justifica-se esse fato uma vez que, geralmente, as distorções radiais de primeira ordem são as que apresentam-se de modo mais significativo nas lentes de comprimento focal longo (TSAI, 1987; REMONDINO; FRASER, 2006). Por fim, para a otimização deve ser empregado um padrão de referência tridimensional (dimensões conhecidas) ou planar (dimensões e deslocamentos em relação à câmera conhecidos) para alimentar o algoritmo de otimização.

No método híbrido proposto por Zhang (1998), por sua vez, o modelo de equacionamento foi aprimorado, de modo que são considerados os termos k_1 e k_2 da Equação 4.12 para a correção das distorções de lente. A principal diferença em relação ao método proposto por Tsai (1987), no entanto, está relacionado à restrição em se utilizar um padrão planar com dimensões conhecidas, mas cujos deslocamentos podem ser efetuados de forma livre (SUN; COOPERSTOCK, 2005).

Em relação ao método híbrido proposto por Heikkilä (2000), esse foi desenvolvido para aplicações que exigem elevada exatidão de medição (REMONDINO; FRASER, 2006), de modo que são considerados os termos (k_1) e (k_2) para a correção das distorções de lente radial (Equação 4.12), bem como os termos (p_1) e (p_2) para a correção das distorções de lente do tipo tangencial (Equação 4.13). Além desses aspectos, o método é flexível com relação à utilização de padrões de referência tridimensionais com dimensões conhecidas ou planares com dimensões conhecidas, mas cujos deslocamentos podem ser efetuados de forma livre.

Por fim, apresenta-se como exemplo o método não linear proposto por Brown (1971), cujo modelo empregado consiste no representado pelos quatro passos sequenciais apresentados anteriormente. Como principal diferença em relação aos métodos propostos por Tsai (1987), Zhang (1998) e Heikkilä (2000), destaca-se a não necessidade de utilização de padrões de referência para a realização da modelagem do processo de formação de imagens. Nesse sentido, podem ser recuperados tanto os parâmetros intrínsecos e extrínsecos

da câmera utilizada, quanto as coordenadas dos pontos presentes no espaço tridimensional que caracterizam a medição realizada. Como apresentado anteriormente, nesse problema conhecido como *bundle adjustment*, os resultados alcançados podem ser adequados sob o ponto de vista metrológico, no entanto, a ocorrência de problemas com a convergência dos resultados é comum, o que torna a técnica instável (TSAI, 1987; HEIKKILÄ, 1997; ZHANG, 1998; HEIKKILÄ, 2000).

Assim, em função da aplicabilidade para casos em que se necessita de elevada exatidão de medição e na disponibilidade de código na internet, optou-se pela utilização do método híbrido proposto por Heikkilä (2000). Nesse contexto, para a determinação dos valores ótimos dos parâmetros extrínsecos $\Theta_{ext} = [t_x, t_y, t_z, \omega, \phi, \kappa]^T$ e intrínsecos $\Theta_{int} = [s, f, u_0, v_0, k_1, k_2, p_1, p_2]^T$, torna-se necessário alimentar o método de otimização com uma coleção de pontos experimentais de regressão representados por um padrão tridimensional (Figura 14-a) ou planar (Figura 14-b) referenciado a um sistema de coordenadas do espaço tridimensional $\{W\}$, juntamente com as coordenadas em *pixels* das respectivas projeções reais dos pontos sob plano imagem $\{I\}$ da câmera. Os parâmetros que expressam a relação *pixell/mm* nas direções horizontal (k_u) e vertical (k_v) do plano imagem da câmera, por sua vez, não são estimados por meio do processo de otimização, mas determinados com base em valores de catálogo da câmera utilizada.

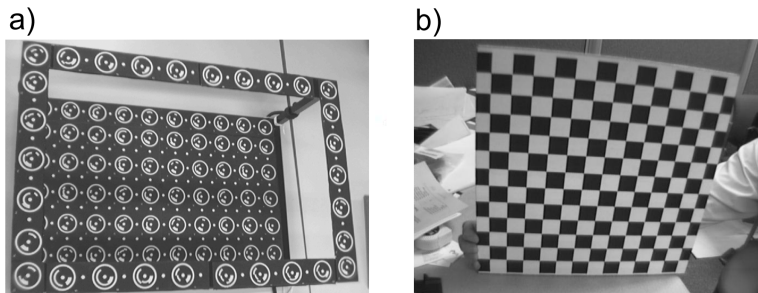


Figura 14: a) padrão tridimensional de pontos e b) padrão bidimensional de pontos (REMONDINO; FRASER, 2006).

Em função do mapeamento não linear realizado pelo modelo de câmera empregado, não existe um estimador direto para todos os parâmetros que possibilite a determinação de uma solução fechada por meio do método dos mínimos quadrados. Desse modo, torna-se necessária a utilização de

um método híbrido de otimização para estimar os componentes do vetor representado pela Equação 4.15:

$$\Theta^T = [\Theta_{int}^T, \Theta_{ext}^T(1), \Theta_{ext}^T(2), \dots, \Theta_{ext}^T(K)] \quad (4.15)$$

onde K representa o número de pontos de vista adotados pela câmera em relação ao padrão tridimensional ou planar de pontos referenciado ao sistema $\{W\}$.

Nesse sentido, o processo otimização é representado por três etapas sequenciais, sendo elas:

- **Passo 1:** preparação:

Primeiramente, a Equação 4.14 utilizada para determinar as coordenadas ideais $({}^I X_u, {}^I Y_u)^T$ das projeções no plano imagem da câmera é invertida por meio de um procedimento baseado na expansão em séries de Taylor descrito em Heikkilä (1997) e Heikkilä (2000). Tal processo torna-se necessário uma vez que para dar-se início ao processo de ajuste, dispõem-se a princípio somente das coordenadas reais distorcidas $({}^I X_d, {}^I Y_d)^T$. Assim, obtém-se a Equação 4.16.

$$\begin{pmatrix} {}^I X_d \\ {}^I Y_d \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} {}^I X_u + \delta'_{xr} + \delta'_{xt} \\ {}^I Y_u + \delta'_{yr} + \delta'_{yt} \end{pmatrix} \quad (4.16)$$

Com base na inversão realizada, modifica-se o vetor de parâmetros representado pela Equação 4.15, para o representado pela Equação 4.17:

$$\Theta^T = \left[[s, f, u_0, v_0, k'_1, k'_2, p'_1, p'_2], \Theta_{ext}^T(1), \Theta_{ext}^T(2), \dots, \Theta_{ext}^T(K) \right] \quad (4.17)$$

onde k'_1, k'_2, p'_1 e p'_2 representam os parâmetros que compõem a Equação 4.16 invertida.

Por fim, são providenciadas estimativas iniciais para os parâmetros contidos na Equação 4.17. Para tanto, são zerados os valores de k'_1, k'_2, p'_1, p'_2 e determinados s, f, u_0, v_0 com base nos valores disponibilizados em catálogo pelo fabricante da câmera utilizada. Os parâmetros $\Theta_{ext}^T(1), \Theta_{ext}^T(2), \dots, \Theta_{ext}^T(K)$, por sua vez, são determinados por meio do método dos mínimos quadrados em uma solução analítica, onde é minimizada a soma dos quadrados dos resíduos em *pixels* das projeções reais dos pontos de regressão em relação às projeções geradas pelo modelo ajustado. Assim, obtém-se um vetor de estimativas iniciais (Equação 4.18):

$$\Theta^T = [s_0, f_0, N_u/2, N_v/2, 0, 0, 0, 0, 0], \Theta_{ext0}^T(1), \Theta_{ext0}^T(2), \dots, \Theta_{ext0}^T(K)] \quad (4.18)$$

onde N_u e N_v representam o número de *pixels* do CCD da câmera utilizada nas direções horizontal e vertical, respectivamente.

- **Passo 2:** ajuste numérico:

Processo feito com base nas estimativas iniciais representadas pela Equação 4.18, onde a soma dos quadrados dos resíduos em *pixels* das projeções reais em relação às projeções geradas pelo modelo não linear é minimizada por meio do método de Levenberg-Marquardt (MADSEN; NIELSEN; TINGLEFF, 2004). Assim, são obtidas as estimativas ótimas dos valores dos parâmetros representados pela Equação 4.17.

$$\Theta^T = \left[[s, f, u_0, v_0, k'_1, k'_2, p'_1, p'_2], \Theta_{ext}^T(1), \Theta_{ext}^T(2), \dots, \Theta_{ext}^T(K) \right]$$

- **Passo 3:** inversão:

Deve ser observado que os parâmetros k'_1, k'_2, p'_1, p'_2 constituem o modelo invertido representado pela Equação 4.16, o qual possibilita, em primeira instância, expressar as coordenadas distorcidas $({}^I X_d, {}^I Y_d)^T$ em função das coordenadas ideais $({}^I X_u, {}^I Y_u)^T$, tendo sido tal procedimento útil para o delineamento do processo de ajuste numérico. Nesse sentido, para as aplicações em que, a partir de $({}^I X_d, {}^I Y_d)^T$ deseja-se obter $({}^I X_u, {}^I Y_u)^T$, torna-se necessário realizar uma nova da inversão da Equação 4.16, de modo a obter-se a Equação 4.14 e o conjunto de parâmetros de interesse k_1, k_2, p_1, p_2 .

Tais procedimentos de preparação, ajuste numérico e inversão encontram-se descritos detalhadamente em Heikkilä (1997) e Heikkilä (2000), de modo que como resultado final desse método híbrido é obtido o vetor inicialmente representado pela Equação 4.15.

$$\Theta^T = [\Theta_{int}^T, \Theta_{ext}^T(1), \Theta_{ext}^T(2), \dots, \Theta_{ext}^T(K)]$$

Assim, podem ser construídas as matrizes de projeção (Equação 4.11) para cada um dos K pontos de vista $({}^I P_W(1), {}^I P_W(2), \dots, {}^I P_W(K))$ adotados pela câmera em relação ao padrão de pontos referenciados ao sistema de coordenadas $\{W\}$ do espaço tridimensional. Além desses aspectos, é também constituído o modelo de correção das distorções do tipo radial e tangencial (Equação 4.14) por meio da consideração dos termos k_1, k_2, p_1 e p_2 ,

completando-se, desse modo, o equacionamento do processo de formação de imagens da câmera utilizada.

4.3 Aquisição de imagens

O processo de aquisição de imagens caracteriza-se como de fundamental importância no delineamento de medições por meio de uma montagem estereoscópica, uma vez que a qualidade dos dados de entrada (imagens capturadas) apresentam correlação direta com as características metrológicas do sistema. Nesse sentido, três aspectos principais devem ser observados em relação aos aspectos metrológicos, sendo eles o campo de visão, a resolução lateral e a profundidade de foco.

4.3.1 Campo de visão

O campo de visão de uma câmera está relacionado às dimensões do objeto retratado em uma imagem. Desse modo, aspectos que atuam diretamente para a variação desse fator são: comprimento focal, distância entre a câmera e o objeto e o tamanho do sensor foto-sensível (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003; GEODETIC SERVICES INC., 2010) (Figura 15).

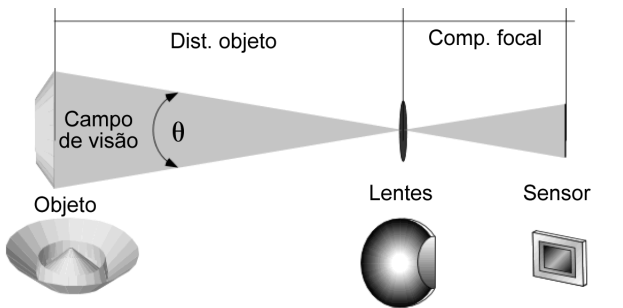


Figura 15: Representação esquemática dos fatores que definem o campo de visão de uma câmera (GEODETIC SERVICES INC., 2010).

Deve ser observado, no entanto, que o campo de visão não deve exceder o tamanho mínimo necessário para desempenhar as operações de medição de determinada aplicação. Esse fato ocorre uma vez que é minimizada a resolução espacial (HEIKKILÄ, 2000; SUN; COOPERSTOCK, 2005; REMONDINO; FRASER, 2006).

4.3.2 Resolução lateral

Esse parâmetro é de suma importância no que diz respeito ao desempenho metrológico de uma montagem estereoscópica, podendo ser caracterizado como a habilidade de um sistema óptico em representar os detalhes de um alvo do qual estão sendo capturadas imagens. Para auxiliar no entendimento desses aspectos, na Figura 16 são apresentadas duas imagens, sendo representados *72 pixels* por polegada na Figura 16-a (*72 ppi*), e *300 pixels* por polegada na Figura 16-b (*300 ppi*). Para cada uma das imagens é apresentado um detalhe em zoom de 200%. Como pode ser observado, a imagem de maior resolução apresenta-se mais adequada para a representação dos detalhes.

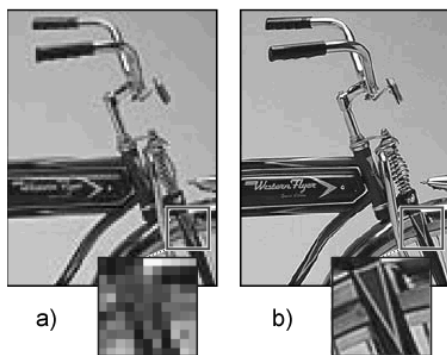


Figura 16: Representação de imagens com resolução de: a) *72 pixels* por polegada e b) *300 pixels* por polegada (KOREN, 2008).

Existe uma grande quantidade de técnicas utilizadas para realizar a quantificação da resolução de um sistema óptico. Normalmente a metodologia empregada consiste na utilização de imagens de referência, nas quais um padrão de barras orientadas em diferentes níveis de frequência espacial deve ser visualizado pelo sistema avaliado. Com relação a estes aspectos, um exemplo clássico de avaliação é caracterizado pela utilização das imagens de referência do tipo USAF 1951, as quais foram desenvolvidas pela Força Aérea Americana. Após a captura das imagens de teste por meio do sistema óptico, deve ser identificado o conjunto de barras de maior frequência que ainda pode ser corretamente visualizado pelo operador (KOREN, 2008). Na Figura 17 é apresentada uma imagem de referência do tipo USAF 1951. A numeração disposta ao lado dos grupos de barras é utilizada para determinar os níveis de frequência espacial observados, sendo este atributo normalmente

dado em pares de linhas por milímetro (lp/mm).

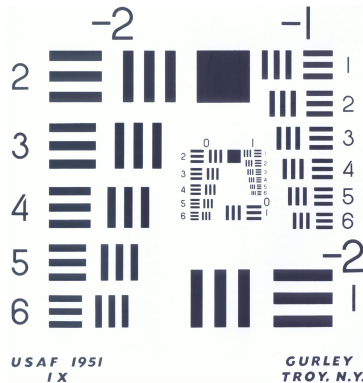


Figura 17: Imagem de referência do tipo USAF 1951 (KOREN, 2008).

Um problema relacionado à utilização de imagens de referência com as mesmas características apresentadas pelos alvos USAF 1951 está relacionado à variabilidade dos resultados gerados quando diferentes operadores realizam os mesmos experimentos. O grupo de barras de maior frequência que pode ser representado na imagem captada pelo sistema óptico deve ser identificado pelo próprio usuário, o que torna esta metodologia pouco repetitiva. Nesse contexto, com o objetivo de se solucionar este problema, atualmente são utilizados alvos que permitam mensurar a resposta em frequência espacial de um sistema óptico de maneira simples, rápida e automatizada. Na Figura 18 é apresentada uma imagem de referência denominada *Koren* (KOREN, 2008).

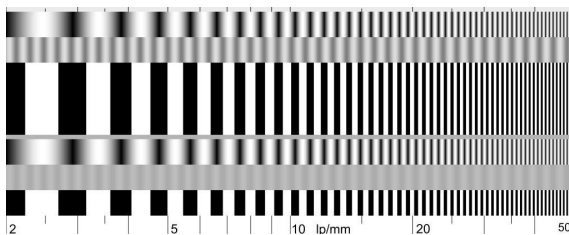


Figura 18: Imagem de referência do tipo *Koren* (KOREN, 2008).

Como pode ser observado, a imagem de referência do tipo *Koren* caracteriza-se por apresentar um padrão senoidal e um padrão de ondas qua-

dradas (barras claras e escuras), onde a frequência de oscilação espacial cresce em escala logarítmica de um valor mínimo de 2 lp/mm (pares de linhas por milímetro), até um máximo de 200 lp/mm. A automatização dos procedimentos de análise de uma imagem de referência com estas características torna-se muito mais simples se comparada a de um alvo do tipo USAF 1951, onde a segmentação dos grupos de barras de diferentes frequências torna-se um aspecto mais trabalhoso se realizado computacionalmente (KOREN, 2008).

Na Figura 19 pode ser observado um exemplo de análise de alvo *Koren*, em que é apresentada a resposta em frequência espacial de um sistema óptico ao padrão de barras (resposta representada pela linha de cor vermelha). Com a elevação da frequência espacial, o sinal de resposta é gradativamente atenuado, caracterizando assim, o comportamento de um filtro do tipo passa-baixas de primeira ordem. Nesse contexto, baseando-se nesses procedimentos, torna-se possível delinear a análise de um sistema óptico de modo sistematizado, quantificando sua capacidade de resolução de detalhes por meio de parâmetros específicos, tais como a frequência de corte f_c (KOREN, 2008).

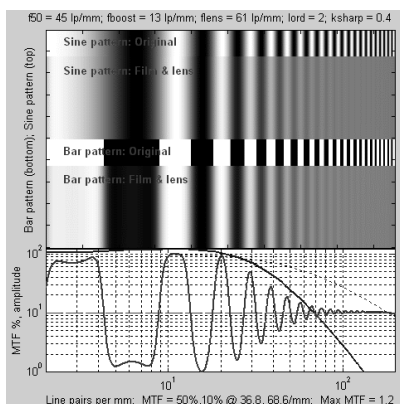


Figura 19: Exemplo de análise realizada em sistema óptico por meio da utilização de imagem de referência do tipo *Koren* (KOREN, 2008).

Diversos são os fatores que interferem na capacidade de resolução de um sistema óptico, tais como a qualidade das lentes, as características do sensor foto-sensível, as configurações da câmera e a abertura da íris da lente objetiva. Nesse contexto, para se aperfeiçoar o desempenho de um equipamento de aquisição de imagens, todos os itens apresentados anteriormente devem ser levados em consideração no momento do projeto.

4.3.3 Profundidade de foco

O parâmetro profundidade de foco, por sua vez, determina uma faixa em torno do plano focal na qual a nitidez dos objetos aí posicionados é aceitável para uma determinada aplicação. Nesse sentido, sob o ponto de vista metrológico, esse fator torna-se de suma importância uma vez que está diretamente relacionado à faixa de medição aceitável de um sistema de medição baseado na utilização de imagens, de modo que fora dos limites impostos pela profundidade de foco, o sistema perde resolução espacial (GEODETIC SERVICES INC., 2010). Na Figura 20-a podem ser observados os objetos posicionados em torno do plano focal e as respectivas imagens formadas no plano imagem da câmera. Fatores relacionados à refração inserida pelas bordas da lente utilizada produzem um efeito em que a imagem tende a se formar fora do plano definido pelo sensor foto-sensível.

Como forma de minimizar esse problema, um artefato amplamente utilizado consiste no posicionamento de um diafragma (ou íris) juntamente à lente. Por meio desse dispositivo, tem-se como objetivo impedir com que os raios luminosos redirecionados por meio da região periférica da lente sejam utilizados para a formação da imagem. Esse fato pode ser observado na Figura 20-b.

Com relação aos diafragmas, esses caracterizam-se construtivamente pela utilização de uma série de lâminas sobrepostas, de modo que por meio da movimentação das mesmas, a área da passagem dos raios luminosos pode ser modificada. Fica evidente, desse modo, que como efeito contrário à maximização da profundidade de foco, tem-se a minimização da intensidade luminosa que é projetada sobre o sensor da câmera. Uma possível solução caracteriza-se pela utilização de fontes auxiliares de luz para que a qualidade final da imagem atinja o nível requerido pela aplicação. Na Figura 21, por sua vez, são apresentadas distintas aberturas de diafragma, as quais são parametrizadas pelo termo denominado *f-number* (GEODETIC SERVICES INC., 2010).

4.4 Determinação de pontos homólogos

Para que possam ser realizadas medições de pontos dentro de um certo volume por meio de uma montagem estereoscópica, torna-se necessário a realização de um processo denominado determinação de pontos homólogos. Nesse sentido, considerando-se uma montagem estereoscópica composta por duas câmeras (Câmera A e Câmera B - Figura 11), esse procedimento consiste em estabelecer quais os pares de pontos $P_u(A) \leftrightarrow P_u(B)$ que correspondem ao

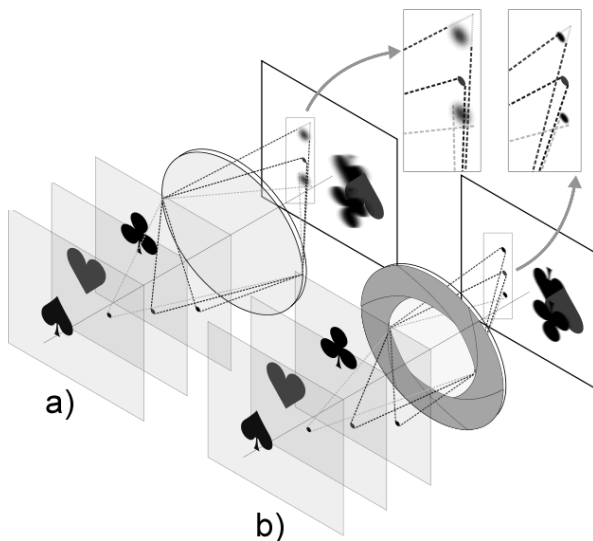


Figura 20: Representação esquemática do efeito ocasionado pela profundidade de foco: a) sistema sem diafragma e b) sistema com diafragma (ICKE, 2010).

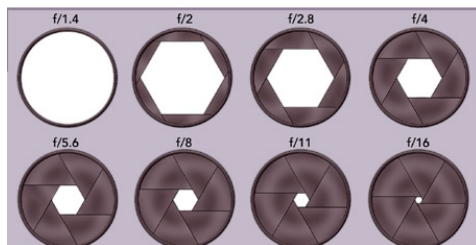


Figura 21: Representação esquemática de um diafragma para distintos valores de *f-number*.

mesmo ponto P_w presente no espaço tridimensional.

A determinação de pontos homólogos é tida como uma tarefa aparentemente simples quando realizada manualmente. No entanto, quando realizada computacionalmente, uma série de problemas dificulta esta análise (HOFMANN, 2006):

- **Não correspondência das intensidades luminosas:** cada imagem é

representada por uma matriz de *pixels*, onde cada termo desta matriz está relacionado à quantidade e às características da luz que chega ao elemento do sensor da câmera. A simples comparação dessas intensidades não é uma forma eficaz de identificar pontos homólogos, pois um ponto do objeto dificilmente possuirá a mesma luminosidade em ambas as imagens. Esse fato pode ser ocasionado pela diferença de emissividade de luz para distintas direções ou até mesmo devido à incerteza do processo de aquisição de imagem;

- **Problema da parede branca:** esse problema ocorre quando as características da vizinhança de um ponto em análise não se alteram bruscamente em consequência de uma textura homogênea, ficando difícil ou impossível distingui-lo de seus vizinhos;
- **Superfícies reflexivas:** superfícies com esta característica dificultam a identificação de pontos homólogos, pois dependendo da direção de observação as características da imagem podem ser alteradas completamente;
- **Transformações geométricas:** como as imagens são obtidas de ângulos diferentes, torna-se necessário realizar transformações geométricas para que as regiões possam ser devidamente comparadas;
- **Oclusões:** alguns pontos da cena, visíveis em uma das imagens, poderão estar escondidos na outra imagem. Desse modo, torna-se impossível a identificação de pontos homólogos;
- **Ruído excessivo:** em condições de baixa iluminação o ganho das câmeras pode ser elevado. No entanto, como consequência desse ajuste, eleva-se o nível de ruído eletrônico nas imagens, o que acrescenta um padrão aleatório às imagens dificultando a identificação de pontos homólogos.

No entanto, procedimentos podem ser realizados com o intuito de se solucionar os problemas relacionados à determinação de pontos homólogos. Em seguida são citadas algumas técnicas relacionadas à projeção de padrões luminosos sobre a cena a ser medida (HOFMANN, 2006):

- **Padrões discretos:** alguns pontos luminosos podem ser projetados sobre a cena a ser medida de modo que possam ser identificados em

ambas as imagens obtidas. No entanto, essa técnica não possibilita a criação de nuvens de pontos muito densas;

- **Padrões aleatórios:** um padrão luminoso aleatório pode ser projetado sobre a cena, possibilitando a solução do problema da parede branca citado anteriormente;
- **Padrões estruturados:** a projeção de padrões estruturados pode promover a identificação de pontos homólogos com elevada densidade. É um método robusto com relação a todos os problemas citados anteriormente, com exceção do problema de superfícies reflexivas e oclusões;
- **Utilização de marcas de referência:** uma alternativa comumente empregada para auxiliar no processo de reconhecimento de pontos homólogos consiste na colagem de adesivos, os quais desempenham a função de marcas de referência sobre a qual o procedimento de triangulação será realizado. Essa técnica facilita significativamente o processo de determinação de correspondências, no entanto, como característica negativa observa-se a impossibilidade de se gerar núvens de pontos densas;
- **Utilização elementos com geometria conhecida:** para se determinar a posição de determinado ponto no espaço, podem ser tomadas como base as próprias características geométricas da cena. Soluções como essa são viáveis para os casos em que deseja-se determinar a posição de objetos bem definidos, ao contrário, por exemplo, da medição de pontos em uma superfície.

Nesse sentido, um exemplo que possivelmente poderá ser utilizado para auxiliar na identificação da posição do fio dos pêndulos consiste em basear-se nos aspectos que definem uma reta presente no espaço. Como elemento de referência, por sua vez, uma alternativa simples pode ser dada por meio da utilização de uma esfera posicionada no espaço por meio de um suporte estático. Nesse caso, o centro geométrico da esfera observada por ambas as câmeras pode caracterizar um ponto homólogo.

4.5 Triangulação

Por fim, para o delineamento do processo de triangulação de pontos, toma-se como base uma montagem estereoscópica composta por, no

mínimo, duas câmeras (Câmera A e Câmera B - Figura 11), cujos processos de formação de imagens encontram-se modelados. Desse modo, o primeiro passo a ser dado consiste na correção das distorções impostas pelas lentes das Câmeras A e B por meio da utilização da Equação 4.14 de cada um dos dispositivos, sendo tal processo ilustrado na Figura 22 onde pode ser observada a transformação dos pontos homólogos de suas posições originais $P_d(A) \leftrightarrow P_d(B)$ para suas novas posições sem a presença das distorções $P_u(A) \leftrightarrow P_u(B)$.

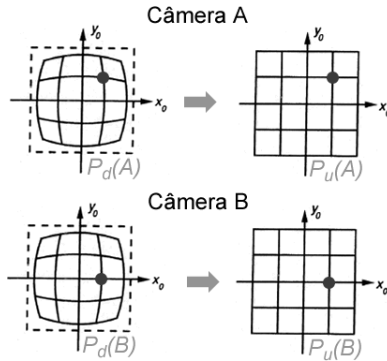


Figura 22: Representação esquemática do processo de correção das distorções impostas pelas lentes.

Após, os pontos homólogos $P_u(A)$ e $P_u(B)$ presentes nas imagens capturadas pelas Câmeras A e B podem ser combinados com as respectivas matrizes de projeção ${}^I P_W(A)$ e ${}^I P_W(B)$ e centros de projeção $O_C(A)$ e $O_C(B)$. Por meio desses procedimentos, baseando-se nas propriedades da geometria projetiva e das coordenadas homogêneas, tem-se que para cada câmera pode ser originada a equação de uma reta no espaço $\{W\}$ composta pela junção dos pontos O_C (onde ${}^I P_W O_C = 0$) e ${}^I P_W^+ P_u$ (onde ${}^I P_W^+$ é a pseudo-inversa de ${}^I P_W$) (Equação 4.19). A pseudo-inversa de ${}^I P_W$ é dada por ${}^I P_W^+ = {}^I P_W^T ({}^I P_W {}^I P_W^T)^{-1}$, de modo que ${}^I P_W^+ {}^I P_W = I$. Assim, o ponto ${}^I P_W^+ P_u$ está contido na reta que representa o raio luminoso que intercepta o plano imagem em P_u , pois ${}^I P_W ({}^I P_W^+ P_u) = I P_u = P_u$ (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003):

$$L_w = {}^I P_W^+ P_u + \lambda O_C \quad (4.19)$$

onde λ representa um fator de escala.

Para uma configuração ideal, a intersecção das retas $L_w(A)$ e $L_w(B)$ caracteriza a posição do ponto de interesse P_w situado no espaço tridimen-

sional $\{W\}$. No entanto, em função da existência de incertezas no processo de determinação dos pontos homólogos e dos parâmetros extrínsecos e intrínsecos que modelam as câmeras utilizadas na montagem estereoscópica esse aspecto pode não ocorrer (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003) (Figura 23).

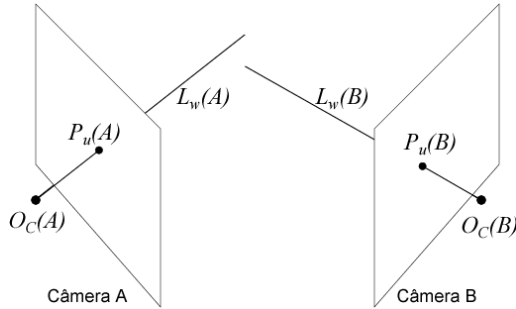


Figura 23: Representação esquemática do processo de triangulação real (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003).

Para a resolução desse problema, uma abordagem comumente utilizada consiste na identificação das correspondências $\hat{P}_u(A) \leftrightarrow \hat{P}_u(B)$, as quais, diferentemente das correspondências reais observadas $P_u(A) \leftrightarrow P_u(B)$, devem respeitar a geometria epipolar do problema. Matematicamente, esse procedimento consiste na minimização de uma função de erro dada pela soma do quadrado das distâncias euclidianas $d(A)$ e $d(B)$ (Figura 24), utilizando-se, para isso, um método numérico de otimização (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003).

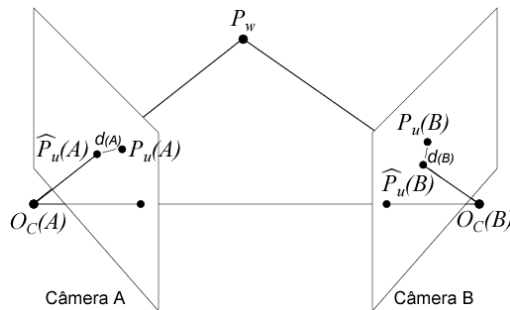


Figura 24: Representação esquemática do processo de triangulação real com restrição epipolar imposta (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003).

Além desses aspectos, torna-se importante ressaltar que os procedi-

mentos de triangulação apresentados podem ser delineados de modo similar em uma abordagem relacionada à reconstrução de retas dispostas no espaço tridimensional. Nesse contexto, o primeiro passo consiste na correção das distorções de lente e posterior identificação das correspondências $l_u(A) \leftrightarrow l_u(B)$ no plano imagem $\{I\}$ de cada uma das câmeras, as quais, de modo genérico e em coordenadas homogêneas podem ser representadas por meio da Equação 4.20 (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003):

$$l_u = \begin{pmatrix} \text{sen}(\theta) \\ -\text{cos}(\theta) \\ d \end{pmatrix} \quad (4.20)$$

onde θ representa o ângulo da reta no plano imagem da câmera e d , por sua vez, a menor distância de l_u (diferentemente da projeção real l_d) em relação à origem O_I do sistema $\{I\}$.

Uma vez identificadas e equacionadas as correspondências $l_u(A) \leftrightarrow l_u(B)$, podem ser originados os planos $\pi(A)$ e $\pi(B)$ no espaço $\{W\}$, sendo tal procedimento representado de modo genérico por meio da Equação 4.21.

$$\pi = {}^I P_W^T l_u \quad (4.21)$$

Desse modo, tomando-se como base $\pi(A)$ e $\pi(B)$, representa-se a linha L_w por meio da notação dada pela Equação 4.22, em que por meio da intersecção de dois planos define-se uma linha no espaço (representação *span*).

$$L_w = \begin{pmatrix} \pi^T(A) \\ \pi^T(B) \end{pmatrix} \quad (4.22)$$

Por outro lado, para a determinação de uma representação alternativa para a reta L_w , define-se o sistema representado pela Equação 4.23, em que podem ser determinados quaisquer pontos $P_w(1)$ e $P_w(2)$ que respeitam a condição imposta abaixo.

$$\begin{cases} P_w^T(1)\pi(A) = 0 \\ P_w^T(1)\pi(B) = 0 \\ P_w^T(2)\pi(A) = 0 \\ P_w^T(2)\pi(B) = 0 \end{cases} \quad (4.23)$$

Do mesmo modo, $P_w(1)$ e $P_w(2)$ podem ser tomados como base para representar a reta L_w , sendo essa uma representação denominada *null-space* (Equação 4.24).

$$L_w = \begin{pmatrix} P_w^T(1) \\ P_w^T(2) \end{pmatrix} \quad (4.24)$$

O processo de reconstrução da reta L_w para uma montagem constituída por duas câmeras com parâmetros extrínsecos e intrínsecos conhecidos pode ser observado na Figura 25.

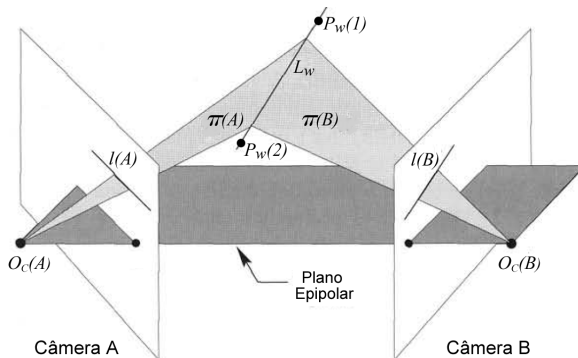


Figura 25: Representação esquemática do processo de reconstrução de linhas (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003).

4.6 Considerações finais

Nesse contexto, em função das características apresentadas, bem como devido ao *know-how* adquirido pelo grupo do Laboratório de Metrologia e Automação (LABMETRO) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em relação ao desenvolvimento de projetos relacionados à metrologia óptica, optou-se por direcionar o escopo desse primeiro trabalho no sentido da avaliação da aplicabilidade da técnica estereoscopia para o desenvolvimento de um novo módulo portátil e automatizado para a monitoração de pêndulos instalados em barragens. Para tanto, na Seção 5 são descritos os procedimentos referentes ao desenvolvimento e a avaliação das características metrológicas de um protótipo de um instrumento de medição que respeite as condições de contorno estabelecidas por meio dos pré-requisitos.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Considerações iniciais

Em relação aos procedimentos traçados no escopo desse trabalho, na Seção 5.2 são apresentados os aspectos relacionados ao desenvolvimento de um protótipo, enquanto que na Seção 5.3, por sua vez, são descritos os procedimentos delineados visando-se avaliar as características metrológicas do mesmo.

5.2 Desenvolvimento do protótipo

Os procedimentos relacionados ao projeto e à fabricação do *hardware*, bem como os procedimentos relacionados ao projeto e ao desenvolvimento do *software* foram realizados no LABMETRO-UFSC. Após, uma vez finalizadas as etapas que envolvem a concepção do protótipo, foram feitos os procedimentos relacionados à modelagem do processo de formação de imagens no Laboratório de Metrologia Dimensional da Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras (CERTI).

5.2.1 Leiaute e materiais

Uma listagem dos principais componentes que constituem o sistema de medição é apresentada abaixo:

- Câmera digital monocromática Prosilica[®], modelo GC1290 (Figura 26-a);
- Lente objetiva Computar[®], modelo M3Z1228C-MP (Figura 26-b);
- Sistema de Fixação Isostático (SFI) (Figura 26-c);
- Plataforma de montagem (Figura 26-d);
- Abertura para a passagem de fio de pêndulo ($100 \times 100 \text{ mm}$) (Figura 26-e);
- Fio de pêndulo ($\phi = 1 \text{ a } 2 \text{ mm}$) (Figura 26-e);
- Sistema de referência representado por esfera metálica ($\phi = 6 \text{ mm}$) (Figura 26-e);

- Sistema de iluminação homogêneo de fundo (*back-light*) (Figura 26-f);
- Cabo para comunicação GigE (Figura 26-g);
- Computador portátil com interface GigE (Figura 26-h).

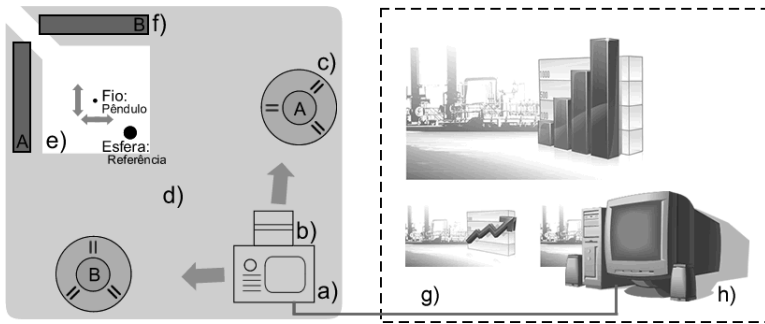


Figura 26: Leiaute do protótipo desenvolvido: a) câmara digital, b) lente objetiva, c) SFI, d) plataforma de montagem, e) abertura de passagem, fio de pêndulo e esfera de referência, f) *back-light*, g) cabo de comunicação e h) computador.

Como pode ser observado na Figura 26, a montagem estereoscópica foi disposta sobre uma chapa metálica denominada plataforma de montagem. Utilizou-se também uma única câmara, de modo que as imagens sob os distintos pontos de vista podem ser capturadas fixando-se o equipamento de modo sequencial nos Sistemas de Fixação Isostáticos A (SFI-A) e B (SFI-B). Com o objetivo de melhorar a exatidão do sistema de medição, um sistema de iluminação homogêneo de fundo (*back-light*) é utilizado, alternando-se o acendimento dos componentes A e B de acordo com o posicionamento da câmara nos sistemas SFI-A e SFI-B, respectivamente. Finalmente, com relação ao fio do pêndulo, esse deverá estar posicionado perpendicularmente ao plano definido pela plataforma de montagem e na região delimitada pela abertura para passagem. Assim, sua posição pode ser determinada em relação à esfera de referência, a qual deve apresentar-se conjugada à plataforma de montagem. Nesse sentido, o fator que caracteriza a portabilidade do sistema é dado pelo fato de que um mesmo conjunto câmara-lente pode atender uma série de bases de referência (plataformas de montagem) dispostas nas estações de medição ao longo de uma barragem.

Para a fabricação da plataforma de montagem do protótipo foi utilizada uma chapa de aço com espessura de cinco milímetros, a qual foi recortada por meio de sistema de corte a *laser*, obtendo-se um quadrado de cantos arredondados e com lados iguais à 425 mm. Também foram realizados os cortes que definiram a abertura para passagem do fio do pêndulo (quadrado com lados iguais à 100 mm) e os furos necessários para a fixação dos sistemas SFI-A e SFI-B. Tais procedimentos foram realizados de modo que as distâncias entre os sistemas SFI-A e SFI-B e o centro da abertura de passagem do fio do pêndulo sejam de 300 mm. Uma representação esquemática desse componente pode ser observada na Figura 27. No Apêndice A, por sua vez, é apresentado o projeto detalhado de fabricação.

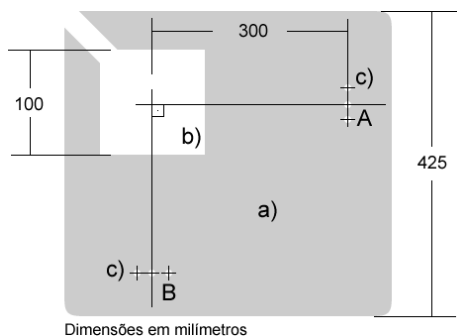


Figura 27: Plataforma de montagem: a) chapa metálica com espessura de cinco milímetros, b) abertura de passagem do fio do pêndulo e c) furos para fixação dos sistemas SFI-A e SFI-B.

Os sistemas de fixação SFI-A e SFI-B foram confeccionados de modo a possibilitar o posicionamento isostático da câmera nos dois pontos de vista indicados anteriormente na Figura 26-c com elevada repetitividade. Nesse sentido, os sistemas são compostos por duas bases, as quais foram fixadas à plataforma de montagem por meio dos conjuntos de furos A e B apresentados na Figura 27. Fixado à câmera, por sua vez, um acoplamento permite o encaixe câmera-base, garantindo assim o travamento dos seis graus de liberdade que definem cada uma das duas posições da câmera em relação à plataforma de montagem. Como pode ser observada na Figura 28, a configuração projetada está baseada na utilização de pares de cilindros e esferas de aço, os quais estão montados sobre os componentes (bases e acoplamento) dos sistemas de fixação.

Os componentes estruturais utilizados para a concepção dos sistemas SFI-A e SFI-B foram fabricados em alumínio. Os pares de cilindros de aço estão dispostos sobre cada uma das bases de modo que formam entre si ângulos de 120° . Assim, o processo de fixação isostático é atendido no momento em que cada uma das esferas fixadas ao acoplamento são posicionadas sobre os respectivos pares de cilindros da base correspondente ao ponto de vista em questão. Por fim, a força que mantêm o contato isostático entre o acoplamento e a base é constante e é gerada por ímãs, sendo cada unidade colada individualmente no centro de cada um dos componentes, de modo que a atração ocorre durante o posicionamento. Com base nessa configuração, a magnitude da força de atração é constante e limitada com o intuito de evitar choques durante a aproximação da câmera em relação à base, além de sua resultante vetorial ser centralizada em relação à face dos componentes. As dimensões e os detalhes de projeto das bases e do acoplamento são apresentados nos Apêndices B e C, respectivamente.

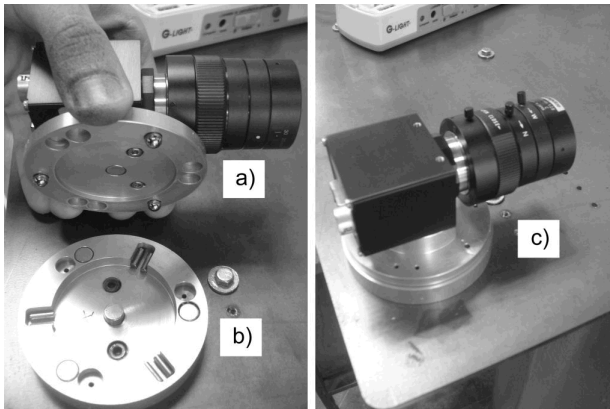


Figura 28: Sistema de fixação SFI: a) acoplamento para encaixe câmera-base, b) base e c) sistema câmera-base acoplado.

Para a concepção da montagem estereoscópica foi projetado também um sistema de iluminação homogêneo de fundo (*back-light*). Como apresentado anteriormente (Figura 26-f), as duas unidades que compõem o sistema encontram-se posicionadas próximas à região que delimita a abertura para passagem do fio do pêndulo e posicionamento da referência, de modo que o fundo das imagens capturadas para cada ponto de vista seja integralmente claro e homogêneo.

Para a fabricação do sistema *back-light* foram utilizadas duas caixas de acrílico de cor preta, sendo no interior de cada uma delas posicionada uma chapa reflexiva sobre a qual estão dispostos 15 Diodos Emissores de Luz (LED) igualmente espaçados entre si (Figura 29-a). Na porção superior de cada uma das caixas de acrílico, foi posicionada uma tampa de acrílico branco, lactescente e translúcido (Figura 29-b). Desse modo, a iluminação gerada pelos LEDs quando projetada na tampa ganha o aspecto claro e homogêneo necessário para o processo de medição. Por fim, o acendimento das unidades que compõem o sistema *back-light* é realizado de modo independente por meio de uma chave seletora, sendo o acionamento realizado em função do SFI no qual a câmera encontra-se posicionada.

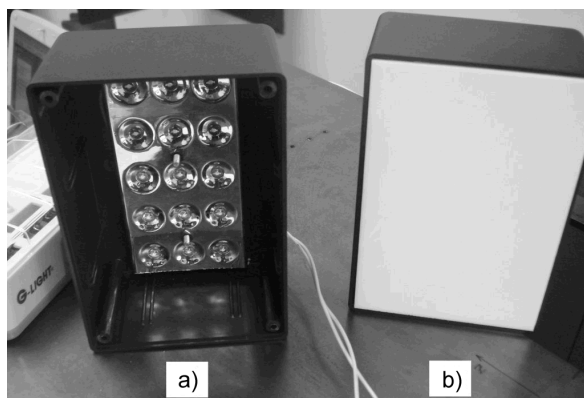


Figura 29: Construção das unidades que compõem o sistema *back-light*: a) posicionamento dos LEDs no interior de caixa de acrílico e b) sistema *back-light* montado.

Desse modo, com base nas características e nos valores dos parâmetros de ajuste da lente objetiva e da câmera utilizada¹, na orientação dos sistemas de posicionamento e nas dimensões da plataforma de montagem, o Campo de Visão (CV) do sistema ficou restrito à uma área de $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ localizado ao centro da abertura para passagem do fio do pêndulo (Figura 30-a). Além desses aspectos, conforme apresentado na Figura 30-b, o CV foi delimitado em duas regiões de interesse, sendo a porção representada pela cor azul ($30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$) destinada ao posicionamento do fio do pêndulo no

¹ Informações referentes ao ajuste dos valores dos parâmetros do conjunto camera-lente são apresentadas no Apêndice D.

qual monitoramento é realizado. Essa área caracteriza a Faixa de Medição (FM) do sistema de medição, a qual foi especificada como um dos requisitos do protótipo. Por outro lado, com relação à região representada pela cor vermelha ($5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$), essa é destinada ao posicionamento da esfera de referência.

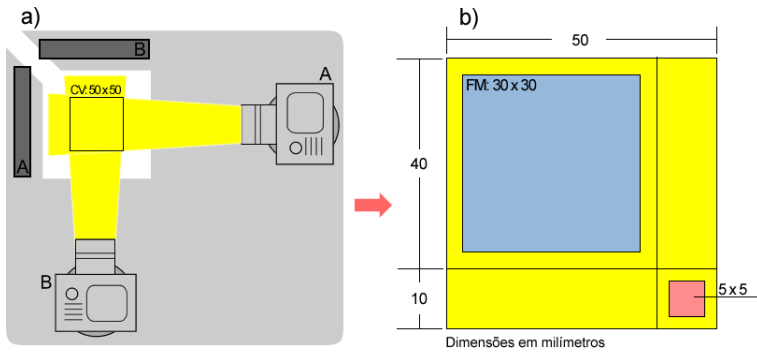


Figura 30: Características da montagem estereoscópica: a) área de $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ que define o campo de visão e b) delimitações para posicionamento da esfera de referência e do fio do pêndulo.

Com relação à esfera de referência a ser utilizada juntamente ao protótipo desenvolvido nesse projeto, essa foi dimensionada de modo a apresentar-se com seis milímetros de diâmetro, sendo fabricada em aço. Com base nesses aspectos, o posicionamento da esfera era realizado por meio de uma haste de suporte vertical sobre a extremidade da qual a mesma foi fixada por meio de resina epoxi. A posição relativa entre a esfera de referência e a plataforma de montagem era mantida constante durante a realização dos experimentos. Além desses aspectos, para as operações de medição, o conjunto caracterizado pela haste de suporte e esfera de referência passou por procedimento de preparação em que o mesmo foi pintado na cor preta fosca (Figura 31). Esse mesmo procedimento também deve ser realizado, para cada caso, na porção do fio do pêndulo exposta ao campo de visão da montagem estereoscópica.

Na Figura 32-a é apresentada uma imagem dos componentes pertencentes ao protótipo do sistema de medição desenvolvido, de modo que, nessa representação, o mesmo encontra-se instalado sobre a mesa de uma máquina de medir por coordenadas Mitutoyo®, modelo Beyond A916, no Laboratório de Metrologia Dimensional da Fundação CERTI para a realização

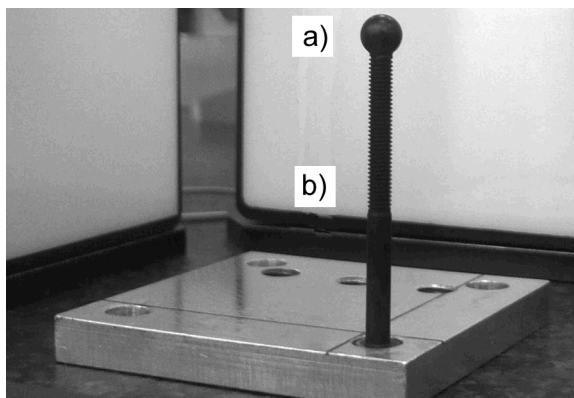


Figura 31: Sistema de referência pintado na cor preta fosca e caracterizado por: a) esfera metálica e b) haste vertical de suporte.

de testes em laboratório². Na Figura 32-b, por sua vez, é apresentada uma haste retilínea utilizada para simular um fio de pêndulo. Esse dispositivo caracterizou-se pela utilização de um apalpador de medição acoplado verticalmente ao braço de medição da máquina de medir por coordenadas, cuja haste do mesmo apresenta-se na cor preta fosca e com dois milímetros de diâmetro³. Por fim, na Figura 32-c é apresentado o dispositivo de referência localizado em local apropriado conjugado ao protótipo nos testes de laboratório realizados nesse trabalho.

5.2.2 Modelagem do processo de formação de imagens

Uma vez finalizada a montagem do protótipo, bem como delimitado o campo de visão do mesmo por meio do ajuste dos parâmetros de configuração da câmera e da lente objetiva, foi realizada a modelagem do processo de formação de imagens da montagem estereoscópica. Nesse sentido, foram delineadas as seguintes etapas:

1. Geração da coleção tridimensional de pontos;
2. Identificação de pontos homólogos;

²Na Seção 5.3.2 são descritos os procedimentos realizados visando-se avaliar as características metrológicas do protótipo em ambiente laboratorial.

³Apenas a parte cilíndrica do apalpador é observada nas imagens geradas por meio do protótipo, simulando, desse modo, um fio de pêndulo.

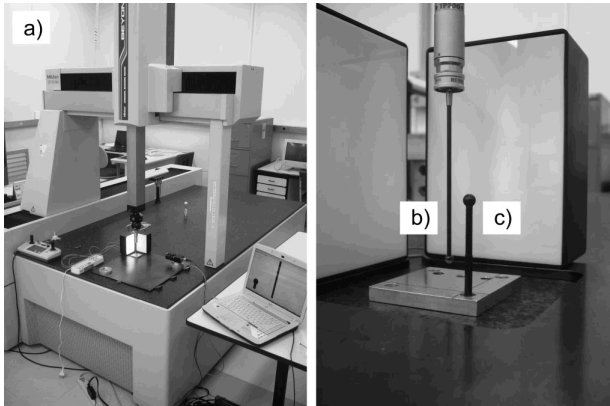


Figura 32: Componentes pertencentes ao protótipo desenvolvido: a) visão geral da disposição dos componentes do protótipo posicionado sobre máquina de medir por coordenadas, b) dispositivo desenvolvido para simular um fio de pêndulo nos testes de bancada e c) esfera de referência a ser utilizada nesse trabalho.

3. Delineamento do processo de otimização;
4. Análise da qualidade dos resultados.

5.2.2.1 Geração do coleção tridimensional de pontos

Os procedimentos relacionados à geração da coleção tridimensional de pontos foram realizados no Laboratório de Metrologia Dimensional da Fundação CERTI. Nesse local, as condições ambientais são controladas e apresentaram-se com os seguintes valores durante a realização dos experimentos delineados:

- **Temperatura:** $20 \pm 0,5^{\circ}C$;
- **Umidade relativa do ar:** $50 \pm 10\%$;
- **Iluminamento:** aproximadamente 1000 lx .

Nesse sentido, foi adotada uma configuração em que o protótipo foi posicionado e fixado sobre a mesa de uma máquina de medir por coordenadas Mitutoyo®, modelo Beyond A916, cujas características metrológicas são

conhecidas e estão dispostas na síntese do certificado de calibração apresentado no Anexo A. Acoplado ao braço de medição da mesma, por sua vez, um dispositivo com características morfológicas conhecidas foi utilizado com o intuito de criar as condições necessárias ao processo de identificação de pontos homólogos. Deve ser observado também que, nessa montagem, a esfera de referência e o fio de pêndulo não estiveram presentes junto ao protótipo, deixando-se, desse modo, o campo de visão do mesmo livre para a criação da coleção tridimensional de pontos.

Para a concepção do dispositivo a ser acoplado ao braço de medição da máquina de medir por coordenadas, foi utilizada uma haste metálica e retilínea, sendo fixada em uma de suas extremidades uma esfera de aço com seis milímetros de diâmetro utilizando-se resina epóxi, a qual denominou-se esfera de calibração. Uma vez realizados esses procedimentos, todo o conjunto foi pintado na cor preta fosca e, posteriormente, fixado verticalmente ao ponto de posicionamento do apalpador da máquina por meio de acoplamento disposto em sua extremidade livre.

Na Figura 33 é apresentado o dispositivo concebido para auxiliar no delineamento do processo de identificação de pontos homólogos. Na Figura 34, por sua vez, é apresentada uma imagem da configuração adotada para a geração da coleção tridimensional de pontos e posterior modelagem do processo de formação de imagens.



Figura 33: Dispositivo destinado à geração de pontos homólogos. a) acoplamento para fixação do dispositivo ao braço de medição da máquina de medir por coordenadas, b) haste metálica e c) esfera de calibração.

Após a disposição dos componentes juntamente à máquina de medir por coordenadas, todo o conjunto passou por um período de ambientação com duração de seis horas. Por meio desse procedimento, visou-se atingir o equilíbrio térmico em relação às características ambientais da sala. Além desses aspectos, a câmera permaneceu em funcionamento durante todo o tempo de ambientação, excluindo-se dos experimentos feitos posteriormente o efeito transitório de aquecimento da mesma (*warm-up*).

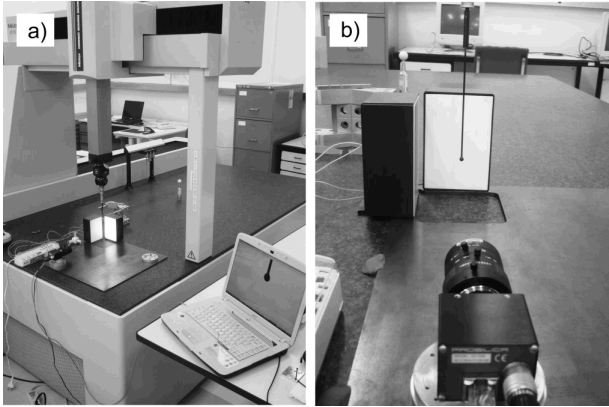


Figura 34: Montagem dos componentes para a geração da coleção tridimensional de pontos: a) visão geral do protótipo posicionado sobre a mesa da máquina de medir por coordenadas e b) câmera orientada à esfera do dispositivo destinado à geração de pontos homólogos.

Para dar-se início aos procedimentos relacionados à geração de uma coleção de pontos 3D de referência, foi criado um sistema de coordenadas de referência no espaço tridimensional $\{W\}$. Nesse sentido, as características de $\{W\}$ foram definidas com base na posição e orientação do protótipo sobre a mesa da máquina de medir por coordenadas, bem como na posição do braço de medição da mesma em relação ao campo de visão da montagem estereoscópica. Deve-se salientar que o campo de visão apresenta-se como um parâmetro que depende exclusivamente das características físicas do protótipo, de modo que uma vez definido $\{W\}$, esse apresentou-se estático durante a realização de todos os demais experimentos.

As principais características relacionadas à definição do sistema de coordenadas $\{W\}$ estão dispostas a seguir:

- **Origem do sistema de coordenadas:** parâmetro definido em relação ao centro geométrico do campo de visão da montagem estereoscópica;
- **Orientação do sistema de coordenadas:** sistema orientado com base no alinhamento manual dos eixos X_W e Z_W em relação ao eixo óptico da câmera quando essa encontra-se posicionada nos pontos de vista A e B, respectivamente. O eixo Y_W , por sua vez, apresenta-se alinhado ao eixo normal do plano que define a plataforma de montagem do protótipo;

- **Sentido dos eixos que definem o sistema de coordenadas:** os eixos X_W e Z_W são positivos na direção dos pontos de vista A e B, respectivamente, definidas pelo sistema SFI. Em relação ao eixo Y_W , este é positivo quando sai do plano da plataforma de montagem (sistema de coordenadas do tipo *right-handed*).

Após a criação do sistema de coordenada $\{W\}$, foram dados os seguintes passos:

1. Posicionou-se a esfera de calibração na origem do sistema $\{W\}$ e posteriormente zerou-se o sistema de posicionamento da máquina de medir por coordenadas em relação a esse ponto inicial;
2. Posicionou-se a esfera de calibração em um ponto aleatório dentro do volume definido por $\{^W X \in \mathfrak{R} : -22,5 \leq ^W X \leq 22,5\}$, $\{^W Y \in \mathfrak{R} : -14 \leq ^W Y \leq 14\}$ e $\{^W Z \in \mathfrak{R} : -22,5 \leq ^W Z \leq 22,5\}$:
 - (a) Capturou-se uma imagem da esfera de calibração com a câmera posicionada no sistema SFI-A;
 - (b) Capturou-se uma imagem da esfera de calibração com a câmera posicionada no sistema SFI-B;
 - (c) Realizaram-se três repetições dos itens (a) e (b).
3. Realizaram-se 30 repetições do item 2.

Na Figura 35-a são apresentados os eixos X_W e Z_W que constituem o sistema de coordenadas $\{W\}$ do espaço tridimensional. Na Figura 35-b, por sua vez, são apresentados os 30 pontos gerados por meio do posicionamento da esfera de calibração no interior do volume que define o campo de visão da montagem estereoscópica, os quais, conjuntamente, constituem a coleção de pontos utilizados para a modelagem do processo de formação de imagens.

Na Tabela 2 pode ser observada a estrutura de dados gerada após o delineamento dos procedimentos referentes à tridimensional de pontos e posterior captura de imagens por meio da câmera situada nos pontos de vista definidos pelos sistemas SFI-A e SFI-B. O termo $i [1 : 30]$ representa cada um dos pontos referenciados ao sistema $\{W\}$.

5.2.2.2 Identificação de pontos homólogos

O primeiro passo dado em relação à etapa identificação de pontos homólogos esteve relacionada à definição do sistema de coordenadas $\{I\}$ que

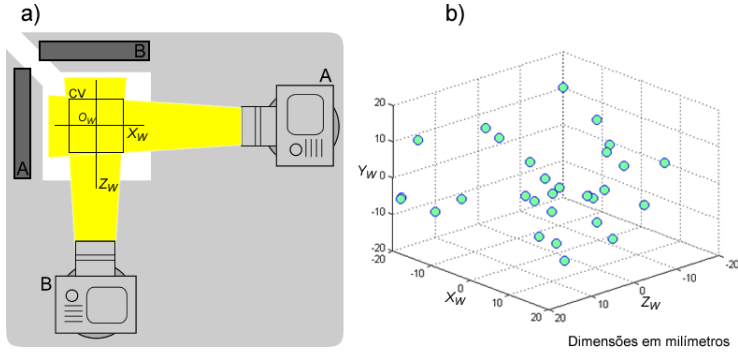


Figura 35: Geração da coleção de pontos no espaço tridimensional: a) eixos X_W e Z_W que constituem o sistema de coordenadas $\{W\}$ e b) pontos gerados por meio do posicionamento da esfera de calibração no interior do campo de visão da montagem estereoscópica.

Tabela 2: Estrutura de dados gerada após o delineamento dos procedimentos referentes à geração da coleção tridimensional de pontos e posterior captura de imagens.

Sistema $\{W\}$	SFI-A	SFI-B
$({}^W X(i), {}^W Y(i), {}^W Z(i))^T$	Imagem(A, i , 1)	Imagem(B, i , 1)
	Imagem(A, i , 2)	Imagem(B, i , 2)
	Imagem(A, i , 3)	Imagem(B, i , 3)

representa o plano imagem da câmera. Nesse sentido, as principais características de $\{I\}$ encontram-se dispostas a seguir (Figura 36):

- **Origem do sistema de coordenadas:** parâmetro definido em relação lado superior esquerdo da matriz de *pixels*;
- **Orientação do sistema de coordenadas:** sistema orientado com base no alinhamento dos eixos X_I e Y_I em relação à disposição horizontal e vertical dos *pixels* que caracterizam o plano imagem;
- **Sentido dos eixos que definem o sistema de coordenadas:** os eixos X_I e Y_I são positivos nas direções esquerda-direita e superior-inferior da matriz de *pixels*, respectivamente.

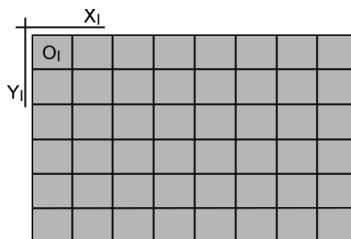


Figura 36: Definição do sistema de coordenadas $\{I\}$ que caracteriza o plano imagem da câmera.

Após a realização desses procedimentos, foi desenvolvido um conjunto de rotinas utilizando-se o Matlab[®] 7.0, de modo que para cada imagem da esfera de calibração capturada durante os procedimentos relacionados à geração da coleção tridimensional de pontos, foram delineados os seguintes passos:

1. Detecção de bordas;
2. Identificação de padrão circular;
3. Segmentação da região de interesse;
4. Identificação de ponto homólogo.

Na Figura 37-a é apresentada a região de uma imagem real em tons de cinza capturada por meio do protótipo em que pode ser observada a projeção da esfera de calibração utilizada para a geração da coleção tridimensional de pontos. Na Figura 37-b, por sua vez, é apresentada imagem binária após a aplicação de técnica de detecção de bordas. Para o delineamento desses procedimentos foi implementado o filtro passa-altas do tipo Sobel, de modo que o valor de *threshold* para a estimativa da derivada da transição foi setado e manteve-se igual a 0,1 para todas as imagens analisadas, não sendo indicada direção preferencial de detecção (GONZALEZ; WOODS, 2008). Como pode ser observado, os *pixels* de cor branca (valor um) indicam transição brusca de tons de cinza na imagem original.

Tomando-se como base os *pixels* de valor um dispostos nas coordenadas $({}^I X, {}^I Y)^T$ das imagens binárias geradas por meio da aplicação da técnica de detecção de bordas, foram delineados posteriormente os procedimentos de busca por padrão circular, tendo-se como objetivo providenciar

uma primeira aproximação para a posição do centro geométrico da projeção da esfera de calibração $P_h = ({}^I X_h, {}^I Y_h)^T$ no plano imagem $\{I\}$ da câmera, bem como do raio (R_h) da projeção. Nesse sentido, a técnica empregada caracterizou-se pela utilização da transformada de Hough, cujos parâmetros de ajuste apresentam-se dispostos na Tabela 3 (GONZALEZ; WOODS, 2008).

Tabela 3: Parâmetros transformada de Hough para círculos (GONZALEZ; WOODS, 2008).

Equação de circunferência	$({}^I X - {}^I X_h)^2 + ({}^I Y - {}^I Y_h)^2 = R_h^2$
Resolução adotada (<i>pixels</i>)	1
Faixa de variação de R_h (<i>pixels</i>)	[45:65]

Dada uma primeira aproximação para a posição do centro da projeção da esfera de calibração no plano imagem $\{I\}$ da câmera, essa foi tomada como base para a segmentação de uma região de interesse. Desse modo, a partir das coordenadas $({}^I X_h, {}^I Y_h)^T$ e do valor do raio R_h , foi delimitado um retângulo por meio do qual selecionou-se somente a porção que pertence à projeção da esfera de calibração, descartando-se assim, a região inerente à junção com a haste de fixação. Uma representação esquemática desse procedimento pode ser observada na Figura 37-c. As posições em *pixels* dos pontos que definiram o retângulo de segmentação, por sua vez, são apresentadas abaixo:

- **Ponto 1:** $({}^I X(1), {}^I Y(1))^T = ({}^I X_h - 20, {}^I Y_h - R_h + 20)^T$;
- **Ponto 2:** $({}^I X(2), {}^I Y(2))^T = ({}^I X_h + 20, {}^I Y_h - R_h + 20)^T$;
- **Ponto 3:** $({}^I X(3), {}^I Y(3))^T = ({}^I X_h - 20, {}^I Y_h + R_h)^T$;
- **Ponto 4:** $({}^I X(4), {}^I Y(4))^T = ({}^I X_h + 20, {}^I Y_h + R_h)^T$.

Finalmente, com base na posição $({}^I X, {}^I Y)^T$ dos *pixels* de valor um situados internamente ao retângulo de segmentação, foi feito o ajuste da Equação $({}^I X - {}^I X_d)^2 + ({}^I Y - {}^I Y_d)^2 = R_d^2$ por meio do método dos mínimos quadrados, sendo realizada a transformação $({}^I X_h, {}^I Y_h)^T \rightarrow ({}^I X_d, {}^I Y_d)^T$, determinando-se assim, a posição do centro da projeção da esfera de calibração no plano imagem $\{I\}$ da câmera com um valor de incerteza *sub-pixel* (Figura 37-d).

Na Tabela 4 é apresentada a estrutura de dados gerada após o delineamento dos procedimentos referentes à determinação de pontos homólogos

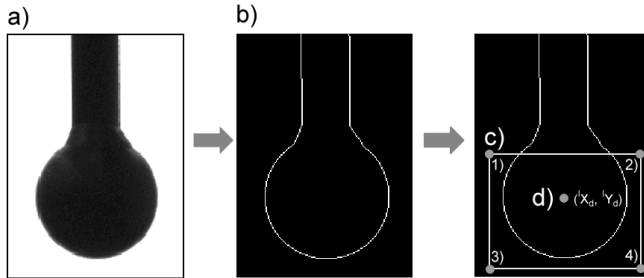


Figura 37: Processo de identificação de pontos homólogos: a) região de imagem real em que pode ser observada a projeção da esfera de calibração, b) detecção de bordas, c) identificação de padrão circular e segmentação da região de interesse e d) identificação de ponto homólogo.

para cada uma das imagens capturadas. O índice $i [1 : 30]$ inserido na notação representa cada um dos pontos referenciados ao sistema $\{W\}$.

Tabela 4: Estrutura de dados gerada após os procedimentos referentes à determinação de pontos homólogos.

Sistema $\{W\}$	SFI-A $\{I\}$	SFI-B $\{I\}$
$({}^W X(i), {}^W Y(i), {}^W Z(i))^T$	$P_d(A, i, 1)$	$P_d(B, i, 1)$
	$P_d(A, i, 2)$	$P_d(B, i, 2)$
	$P_d(A, i, 3)$	$P_d(B, i, 3)$

5.2.2.3 Processo de otimização

Para a constituição de um conjunto de dados de regressão, inicialmente foi calculada a média dos três pontos referenciados ao sistema $\{I\}$ apresentados na Tabela 4, de modo que foram originados os pares $({}^W X(i), {}^W Y(i), {}^W Z(i))^T \leftrightarrow ({}^I \bar{X}_d(A, i), {}^I \bar{Y}_d(A, i))^T$ referentes ao sistema SFI-A, bem como os pares $({}^W X(i), {}^W Y(i), {}^W Z(i))^T \leftrightarrow ({}^I \bar{X}_d(B, i), {}^I \bar{Y}_d(B, i))^T$ referentes ao sistema SFI-B, onde $i [1 : 30]$ representa cada um dos 30 pontos que constituem a coleção tridimensional.

Após, os dados de regressão foram tomados como base para o delineamento do processo de otimização, determinando-se assim os valores ótimos de um conjunto de parâmetros que modelam o processo de formação

de imagens da montagem estereoscópica. Para tanto, foi utilizado o método de otimização híbrido proposto por Heikkilä (2000) (Seção 4.2.2) para dois pontos de vista ($K = 2$), cuja implementação em Matlab[®] apresenta-se disponível na internet em sua terceira versão (HEIKKILÄ, 2009). Na Figura 38 é apresentado um segmento do arquivo de configuração com os valores de catálogo referentes à câmera e a lente utilizada, o qual tornou-se necessário para alimentar o método de otimização.

```

if strcmp(name, 'prosilica')
    sys = [
        1280,      %número de pixels na direção horizontal
        960,       %número de pixels na direção vertical
        4.8,      %tamanho efetivo do CCD na direção horizontal [mm]
        3.6,      %tamanho efetivo do CCD na direção vertical [mm]
        22,       %comprimento focal nominal
        0,        %raio dos pontos de controle, caso necessário
        0,
        0,
        0,
        0,
        abs(name) '
    ];
    return;
end

```

Figura 38: Segmento do arquivo de configuração utilizado para alimentar o algoritmo de otimização com valores de catálogo da câmera e da lente utilizada.

Com base na configuração adotada, foram estimados seis parâmetros extrínsecos para a câmera posicionada por meio do sistema SFI-A $\Theta_{ext}(A) = [t_x(A), t_y(A), t_z(A), \omega(A), \varphi(A), \kappa(A)]^T$, seis parâmetros extrínsecos para a câmera posicionada por meio do sistema SFI-B $\Theta_{ext}(B) = [t_x(B), t_y(B), t_z(B), \omega(B), \varphi(B), \kappa(B)]^T$ e oito parâmetros intrínsecos comuns aos sistemas SFI-A e SFI-B $\Theta_{int} = [s, f, u_0, v_0, k_1, k_2, p_1, p_2]^T$, constituindo-se assim, a Equação 4.15.

$$\Theta^T = [\Theta_{int}^T, \Theta_{ext}^T(A), \Theta_{ext}^T(B)]$$

Após a realização desses procedimentos, foi constituída uma matriz de projeção (Equação 4.11) para a câmera posicionada por meio do sistema de fixação SFI-A (${}^I P_W(A)$) e outra para a câmera posicionada por meio do sistema de fixação SFI-B (${}^I P_W(B)$). Foi também constituído o modelo de correção das distorções do tipo radial e tangencial (Equação 4.14) por meio da consideração dos termos k_1, k_2, p_1 e p_2 , completando-se assim, o equacionamento do processo de formação de imagens da montagem estereoscópica.

5.2.2.4 Análise da qualidade dos resultados

Tomando-se como base os dados de regressão, foram consideradas as discrepâncias existentes entre as projeções reais e as projeções reproduzidas matematicamente (resíduos em *pixels*) na direção dos eixos X_I e Y_I do plano imagem do dispositivo óptico e delineados os procedimentos listados abaixo:

- **Análise das tendências:** as tendências observadas em relação resíduos na direção dos eixos X_I e Y_I do plano imagem do dispositivo óptico foram comparadas com uma situação ideal (ausência de tendência) por meio do delineamento do teste t não pareado para um nível de significância de 5% (FREEDMAN; PISANI; PURVES, 1998);
- **Análise das dispersões:** as dispersões observadas em relação aos resíduos na direção dos eixos X_I e Y_I do plano imagem do dispositivo óptico foram avaliadas graficamente e por meio do delineamento do teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov para um nível de significância de 5% (FREEDMAN; PISANI; PURVES, 1998).

Após, os resultados obtidos por meio da análise estatística foram utilizados para avaliar a qualidade da modelagem do processo de formação de imagens.

5.2.3 Procedimentos de medição

Uma vez finalizada a fabricação e a montagem dos componentes do protótipo, bem como realizados os procedimentos relacionados à modelagem do processo de formação de imagens da configuração estereoscópica, podem ser realizadas as operações de medição. Nesse contexto, esse processo é composto pelas seguintes etapas:

1. Posicionamento do sistema em uma estação de medição;
2. Captura de imagens;
3. Correção das distorções de lente;
4. Determinação de pontos e linhas homólogas;
5. Determinação da posição do fio do pêndulo.

Para a apresentação dos procedimentos acima expostos, inicia-se com uma abordagem genérica considerando-se a instalação do protótipo em uma estação de medição de uma barragem. Após, para demonstrar o funcionamento dos algoritmos de processamento de imagens desenvolvidos, considera-se como exemplo um par de imagens capturadas por meio de uma montagem realizada em laboratório, a qual foi apresentada anteriormente na Figura 32 da Seção 5.2.1.

A implementação das rotinas computacionais necessárias para o delineamento das operações de medição foi realizada utilizando-se o Matlab® 7.0.

5.2.3.1 Posicionamento do sistema em uma estação de medição

Como apresentado na Seção 2.2, em uma barragem cujos deslocamentos são monitorados por meio de um sistema de pêndulos, bases de referência encontram-se distribuídas estrategicamente ao longo da estrutura. Nesse sentido, para cada um desses locais de monitoração, deve ser delimitada a instalação do coordenômetro a ser utilizado para determinar as coordenadas ortogonais da posição do fio do pêndulo ao longo do tempo.

Os principais aspectos a serem observados com relação aos procedimentos de montagem são os seguintes:

- **Fixação da plataforma de montagem:** esse procedimento deve ser realizado de modo que, em um primeiro momento, o fio do pêndulo esteja posicionado próximo ao centro da região que define a Faixa de Medição (Figura 39-a);
- **Alinhamento dos eixos do sistema de medição:** recomenda-se que seja realizado o alinhamento dos eixos X_w e Z_w do sistema de medição em relação aos eixos montante-jusante e lateral da barragem, facilitando-se assim a visualização do comportamento da estrutura (Figura 39-b);
- **Posicionamento da esfera de referência:** a esfera de referência deve ser posicionada em local apropriado (Figura 39-c) por meio de estrutura de suporte conjugada à plataforma de montagem;
- **Preparação do fio do pêndulo e da esfera de referência:** o conjunto esfera de referência e porção do fio do pêndulo exposta ao campo de visão do sistema deve ser pintado na cor preta fosca.

Uma vez realizada a montagem, a plataforma e a esfera de referência devem manter-se estáticos no local de instalação.

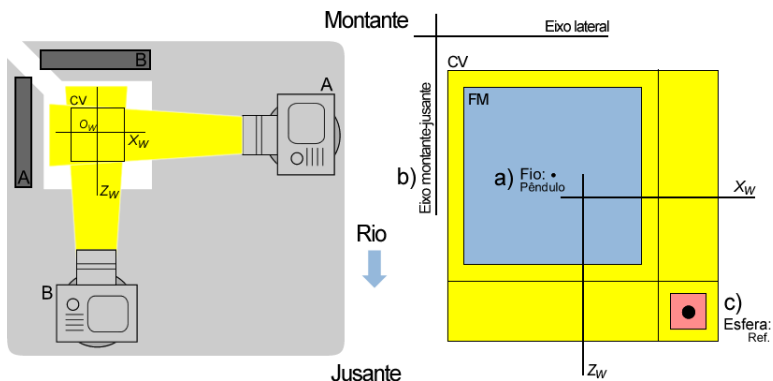


Figura 39: Posicionamento do sistema na estação de medição: a) posicionamento inicial do fio de pêndulo, b) alinhamento dos eixos do sistema com a estrutura e c) posicionamento da esfera de referência.

5.2.3.2 Captura de imagens

O processo de medição inicia-se por meio da captura de um par imagens referenciadas aos sistemas de fixação SFI-A e SFI-B em que encontram-se retratados o fio do pêndulo e a esfera de referência. Um exemplo de imagens capturadas por meio do protótipo desenvolvido pode ser observado na Figura 40.

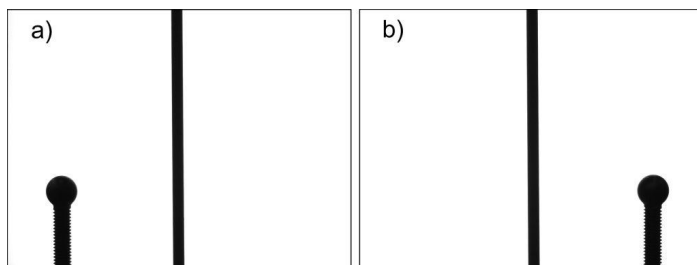


Figura 40: a) Imagem capturada pela câmera posicionada por meio do sistema SFI-A e b) imagem capturada pela câmera posicionada por meio de SFI-B.

5.2.3.3 Correção das distorções de lente

Para a correção das distorções de lente presentes no par de imagens capturadas pela montagem (Figura 40), o primeiro passo a ser delineado consiste na aplicação de filtro passa-altas do tipo Sobel, sem a consideração de direção preferencial. Para as operações de medição realizadas nesse trabalho, as configurações do algoritmo de detecção de bordas implementado mantiveram-se as mesmas em relação ao delineamento apresentado na Seção 5.2.2.2.

Após, toma-se como base a função de correção representada pela Equação 4.14 cujos parâmetros foram determinados por meio da modelagem do processo de formação de imagens da câmera e da lente utilizada – correção se dá para erros maiores que meio *pixel* (erro originado em função da resolução da imagem). Nesse sentido, as posições dos *pixels* de valor um das imagens binárias geradas por meio da aplicação da técnica de detecção de bordas são corrigidas, originando-se assim, um novo par de imagens (Figura 41).

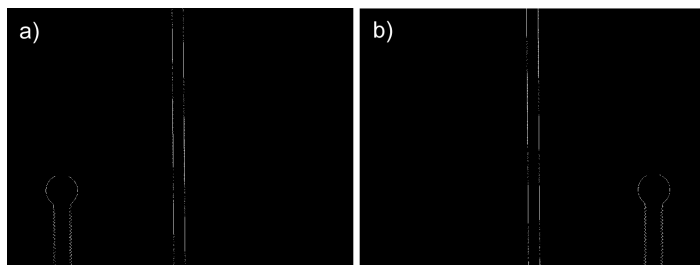


Figura 41: a) Imagem corrigida capturada pela câmera posicionada por meio do sistema SFI-A e b) imagem corrigida capturada pela câmera posicionada por meio de SFI-B.

5.2.3.4 Determinação de pontos e linhas homólogos

A identificação dos pontos homólogos representativos do centro geométrico da projeção da esfera de referência nas imagens capturadas nos pontos de vista A e B é delineada tomando-se como base a mesma configuração apresentada na Seção 5.2.2.2. A única particularidade, no entanto, está relacionada à segmentação da região de interesse, de modo que em uma operação de medição, as posições em *pixels* dos pontos que definem o retângulo de segmentação são as seguintes (Figura 42):

- **Ponto 1:** $({}^I X(1), {}^I Y(1))^T = ({}^I X_h - 20, {}^I Y_h - R_h - 20)^T$;
- **Ponto 2:** $({}^I X(2), {}^I Y(2))^T = ({}^I X_h + 20, {}^I Y_h - R_h - 20)^T$;
- **Ponto 3:** $({}^I X(3), {}^I Y(3))^T = ({}^I X_h - 20, {}^I Y_h + R_h - 20)^T$;
- **Ponto 4:** $({}^I X(4), {}^I Y(4))^T = ({}^I X_h + 20, {}^I Y_h + R_h - 20)^T$.

Desse modo, por meio da sequência de passos delineados para a identificação de pontos homólogos, são identificados os pares $P_u(A) \leftrightarrow P_u(B)$, os quais correspondem às projeções ideais do centro geométrico da esfera de referência uma vez que a imagem processada foi corrigida previamente.

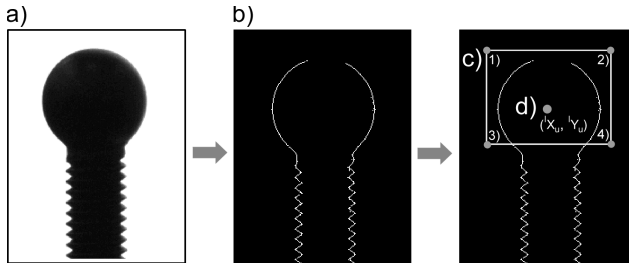


Figura 42: Processo de identificação de ponto homólogo para procedimento de medição: a) região de imagem real em que pode ser observada a projeção da esfera de referência, b) detecção de bordas, c) identificação de padrão circular e segmentação da região de interesse e d) identificação das coordenadas ideais do ponto homólogo.

O processo de identificação de linhas homólogas também segue a mesma configuração apresentada na Seção 5.2.2.2, de modo que nesse caso, os algoritmos referentes à transformada de Hough, à segmentação da região de interesse e ao ajuste numérico são adaptados considerando-se a reta como fator de parametrização (Equação 4.20). Assim, para uma dada imagem binarizada por meio do filtro Sobel, são tomados como base os *pixels* de valor um dispostos nas coordenadas $({}^I X, {}^I Y)^T$ e delineados os procedimentos de busca por padrão retilíneo, tendo-se como objetivo providenciar uma primeira aproximação para os valores dos parâmetros das Equações de reta que definem cada uma das bordas (l'_h e l''_h) da projeção do fio do pêndulo no plano imagem $\{I\}$ da câmera (Figura 43-a). Os parâmetros de ajuste da transformada de Hough utilizada para a realização desses procedimentos apresentam-se dispostos na Tabela 5 (GONZALEZ; WOODS, 2008).

Tabela 5: Parâmetros da transformada de Hough para linhas (GONZALEZ; WOODS, 2008).

Equação de reta	$l_h = (\text{sen}(\theta_h), -\text{cos}(\theta_h), d_h)^T$
Resolução adotada (<i>pixels</i>)	1
Faixa de variação de θ_h (graus)	[-5:5]

Dada uma primeira aproximação para os valores dos parâmetros das equações l'_h e l''_h , esses são tomados como base para a segmentação de duas regiões de interesse. Desse modo, a partir d'_h e d''_h , são delimitados dois retângulos por meio dos quais são selecionadas cada uma das bordas da projeção do fio do pêndulo, descartando-se assim, a região inerente à projeção da esfera de referência. As posições em *pixels* dos pontos que definem cada um dos retângulos de segmentação, por sua vez, são aprendidas abaixo considerando-se a resolução total da câmera utilizada (Figura 43-b):

- **Ponto 1:** $({}^IX(1), {}^IY(1))^T = (d_h - 10, 1)^T$;
- **Ponto 2:** $({}^IX(2), {}^IY(2))^T = (d_h + 10, 1)^T$;
- **Ponto 3:** $({}^IX(3), {}^IY(3))^T = (d_h - 10, 960)^T$;
- **Ponto 4:** $({}^IX(4), {}^IY(4))^T = (d_h + 10, 960)^T$.

Com base na posição $({}^IX, {}^IY)^T$ dos *pixels* de valor um situados internamente de cada retângulo de segmentação, é delineado o ajuste da Equação $l_a = (\text{sen}(\theta_a), -\text{cos}(\theta_a), d_a)^T$ por meio do método dos mínimos quadrados, sendo realizada a transformação $(\text{sen}(\theta_h), -\text{cos}(\theta_h), d_h)^T \rightarrow (\text{sen}(\theta_a), -\text{cos}(\theta_a), d_a)^T$. Desse modo, são determinadas as Equações l'_a e l''_a , as quais representam cada uma das bordas da projeção (Figura 43-b).

Por fim, a Equação $l_u = (\text{sen}(\theta), -\text{cos}(\theta), d)^T$ representativa da projeção do fio do pêndulo sobre o plano imagem $\{I\}$ é obtida considerando-se sua posição média em relação às Equações l'_a e l''_a (Figura 43-c), onde:

$$l_u = \left(\text{sen}\left(\frac{\theta'_a + \theta''_a}{2}\right), -\text{cos}\left(\frac{\theta'_a + \theta''_a}{2}\right), \left(\frac{d'_a + d''_a}{2}\right) \right)^T$$

Na Tabela 6 é apresentada a estrutura de dados gerada por meio dos procedimentos de detecção de pontos e linhas homólogas considerando-se o

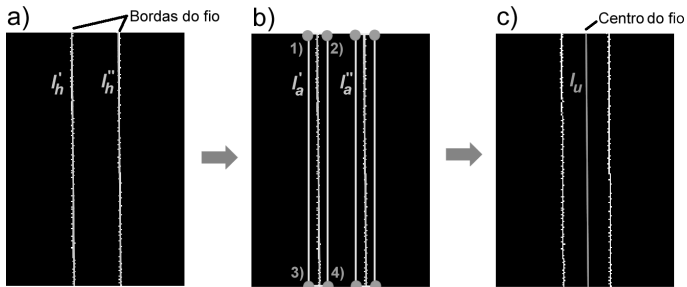


Figura 43: Representação esquemática do processo de identificação de linhas homólogas: a) bordas da projeção e identificação de padrão retilíneo, b) segmentação da região de interesse e realização de ajuste de curva e c) identificação de linha homóloga.

processamento de um par de imagens capturadas para o delineamento de uma medição.

Tabela 6: Estrutura de dados gerada após o delineamento dos procedimentos referentes à determinação de pontos e linhas homólogas.

	SFI-A $\{I\}$	SFI-B $\{I\}$
Pontos homólogos	$P_u(A)$	$P_u(B)$
Linhas homólogas	$l_u(A)$	$l_u(B)$

5.2.3.5 Determinação da posição do fio do pêndulo

Uma vez identificados os pontos e linhas homólogas do par de imagens capturado para a realização de uma medição (Tabela 6), pode-se dar início à monitoração da posição do fio do pêndulo no espaço tridimensional. Para tanto, esse processo é realizado por meio de um conjunto de rotinas organizadas em quatro passos sequenciais, sendo eles:

1. Triangulação;
2. Referenciamento;
3. Determinação da posição do fio do pêndulo;

4. Definição do tempo zero.

Por meio dos procedimentos de triangulação apresentados na Seção 4.5, é determinada a posição do ponto de referência $P_w(0)$ e a Equação de reta L_w representada pelos pontos $P_w(1)$ e $P_w(2)$ (representação *null-space*). No entanto, os pontos $P_w(0)$, $P_w(1)$ e $P_w(2)$ encontram-se inicialmente referenciados ao sistema de coordenadas $\{W\}$ definido durante a modelagem do processo de formação de imagens da montagem estereoscópica. Assim, por meio dos procedimentos de referenciamento, é realizada a transformação $\{W\} \rightarrow \{A\}$ em que os pontos $P_w(1)$ e $P_w(2)$ que definem L_w são subtraídos das coordenadas de referência de $P_w(0)$ (Equação 5.1):

$$\begin{pmatrix} {}^A X_w(i) \\ {}^A Y_w(i) \\ {}^A Z_w(i) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^W X_w(i) - {}^W X_w(0) \\ {}^W Y_w(i) - {}^W Y_w(0) \\ {}^W Z_w(i) - {}^W Z_w(0) \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

onde $i = 1$ para $P_w(1)$ e $i = 2$ para $P_w(2)$.

Na Figura 44 uma representação esquemática do processo de transformação $\{W\} \rightarrow \{A\}$ pode ser observada.

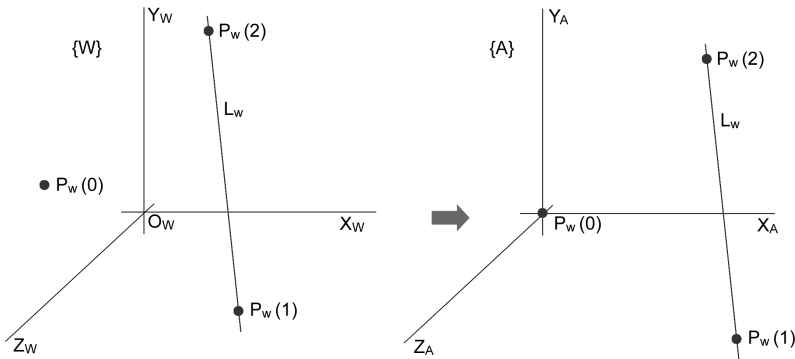


Figura 44: Representação esquemática do processo de referenciamento realizado $\{W\} \rightarrow \{A\}$.

A Equação do fio do pêndulo definida pelos pontos $P_w(1)$ e $P_w(2)$, por sua vez, não se apresenta perfeitamente alinhada em relação ao eixo Y_A do sistema de coordenadas. Assim, torna-se necessário realizar a transformação $\{A\} \rightarrow \{B\}$ representada graficamente por meio da Figura 45-a para o eixo X_A . Como pode ser observado, primeiramente é determinada a posição do ponto $P_w(3) = ({}^A X_w(3), {}^A Y_w(3), {}^A Z_w(3))^T$, o qual representa a menor

distância do fio em relação à esfera de referência. Após, as coordenadas de $P_w(3)$ são transformadas por meio da Equação 5.2:

$$\begin{pmatrix} {}^B X_w(3) \\ 0 \\ {}^B Z_w(3) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\cos(\alpha_Z)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\cos(\alpha_X)} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} {}^A X_w(3) \\ {}^A Y_w(3) \\ {}^A Z_w(3) \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

onde α_X e α_Z representam a inclinação do fio em torno dos eixos X_A e Z_A , respectivamente. Desse modo, por meio do sistema de coordenadas $\{B\}$ é monitorado o deslocamento do fio excluindo-se o erro de cosseno originado pela inclinação do mesmo em relação ao sistema de medição. Em outras palavras, origina-se um plano definido pelos eixos X_B e Z_B , em relação a qual o fio do pêndulo é sempre perpendicular (vetor normal de $\{B\}$).

Por fim, para a monitoração de cada estrutura em particular, uma condição adicional de referência imposta normalmente caracteriza-se como sendo o início das operações. Nesse sentido, as coordenadas da posição relativa de um fio de pêndulo $D = (d_X, d_Z)^T$ monitorado são expressadas por meio da Equação 5.3:

$$D = \begin{pmatrix} d_X \\ d_Z \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} {}^B X_{wj}(3) - {}^B X_{wi}(3) \\ 0 \\ {}^B Z_{wj}(3) - {}^B Z_{wi}(3) \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

onde os índices i e j inseridos na notação representam, respectivamente, a primeira e a última medição. Os termos d_X e d_Z , por sua vez, correspondem às coordenadas do deslocamento observado em relação ao início das operações em (Figura 45-b).

A notação da Equação 5.3 pode ser modificada de modo a tornar-se equivalente à utilizada na Seção 2.3:

$$D = \begin{pmatrix} d_X \\ d_Z \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} X_j - X_i \\ 0 \\ Z_j - Z_i \end{pmatrix}$$

5.3 Avaliação das características metrológicas do protótipo

A avaliação das características metrológicas do protótipo desenvolvido foi constituída por três etapas, sendo elas:

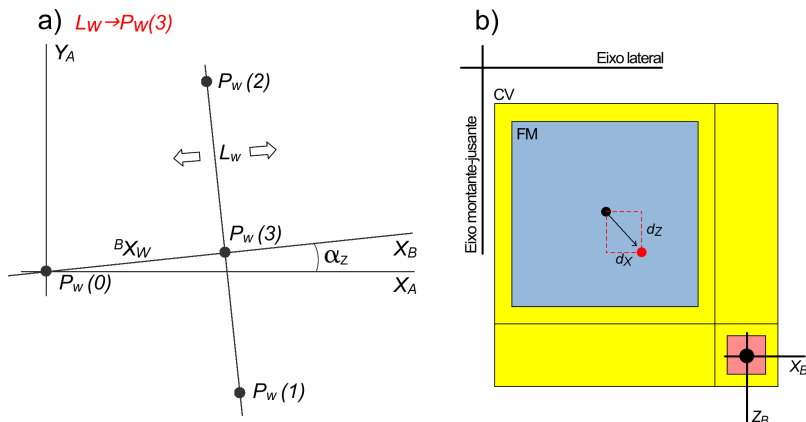


Figura 45: a) transformação $\{A\} \rightarrow \{B\}$ e b) representação dos deslocamentos d_x e d_z em relação ao início das operações.

1. Levantamento das fontes de incerteza;
2. Calibração do protótipo em ambiente laboratorial;
3. Realização de avaliações preliminares do protótipo em uma estação de medição desenvolvida para testes.

Os procedimentos relacionados ao levantamento das fontes de incerteza e à avaliação das características metrológicas do protótipo em ambiente laboratorial foram delineados, respectivamente, no LABMETRO da UFSC e no Laboratório de Metrologia Dimensional da Fundação CERTI. Após, um conjunto de ensaios comparativos e de avaliação foram delineados no Laboratório de Tecnologia do Concreto da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional, no qual encontra-se instalado um protótipo de pêndulo invertido juntamente com uma base de coordenômetro portátil semelhante às utilizadas atualmente na barragem, caracterizando assim, uma estação de medição desenvolvida para a realização de testes e demonstrações.

5.3.1 Levantamento das fontes de incerteza

A primeira etapa em relação ao estudo das características metrológicas do protótipo caracterizou-se pela construção de um diagrama representativo das fontes de incerteza que contribuem para a degeneração da qualidade das

medições de um sistema baseado na utilização de uma montagem estereoscópica, sendo esse procedimento realizado paralelamente à revisão bibliográfica dos temas relacionados e tomando-se como base informações disponibilizadas por especialistas da área de metrologia e de segurança de barragens.

Além desses aspectos, as fontes identificadas foram classificadas em intrínsecas (fontes de incerteza inerentes ao protótipo) e extrínsecas (fontes de incerteza provenientes do ambiente), contribuindo assim, para o projeto das posteriores operações de avaliação das características metrológicas realizadas.

5.3.2 Calibração do protótipo em ambiente laboratorial

A calibração do protótipo foi realizada logo após a modelagem do processo de formação de imagens da montagem estereoscópica. Assim, uma vez gerada a coleção tridimensional de pontos (Seção 5.2.2.1), o protótipo – Sistema de Medição a Calibrar (SMC), permaneceu posicionado sobre a mesa da máquina de medir por coordenadas – Sistema de Medição Padrão (SMP), mantendo-se fixas as condições ambientais da sala, o regime de funcionamento da câmera e o alinhamento e posicionamento dos sistemas de coordenadas da máquina e do protótipo (ausência de deslocamento relativo entre os sistemas de coordenadas).

Para tanto, como pode ser observado na Figura 32 e de acordo com a descrição apresentada na Seção 5.2.1, foi fixado verticalmente ao braço de medição do SMP um apalpador, cuja haste do mesmo apresenta-se na cor preta fosca, com dois milímetros de diâmetro e retilínea. Além desses aspectos, também foi inserido no cenário o dispositivo de referência, o qual caracterizou-se pela utilização de uma esfera de seis milímetros de diâmetro pintada na cor preta fosca e posicionada em local apropriado do campo de visão da montagem por meio de uma haste vertical estática em relação aos demais componentes. Nesse sentido, foi simulada uma situação em que a esfera encontra-se fixada à plataforma de montagem.

Uma vez delineados os procedimentos de montagem, deu-se início ao processo de calibração do protótipo em ambiente laboratorial (Figura 46):

1. Posicionou-se a haste na região central da Faixa de Medição do SMC e posteriormente foi realizada a zeragem do sistema de posicionamento do SMP:
 - (a) Determinou-se a posição do fio do pêndulo no tempo inicial

por meio de procedimento de medição delineado utilizando-se o SMC, obtendo-se $(X_i, Z_i)^T$;

- (b) Realizaram-se três repetições do ítem (a);
 - (c) Zerou-se o sistema de indicação do SMC em relação ao valor médio $(\bar{X}_i, \bar{Z}_i)^T$ observado para as três repetições do ítem (a).
2. Após, para cada ponto de calibração, foram realizados os seguintes procedimentos:
- (a) Determinou-se a posição relativa do fio do pêndulo por meio de procedimento de medição utilizando-se o SMC, obtendo-se $D = (d_X, d_Z)^T = (X_j - \bar{X}_i, Z_j - \bar{Z}_i)^T$;
 - (b) Realizaram-se três repetições do ítem (a).
3. Realizou-se avaliação metrológica.

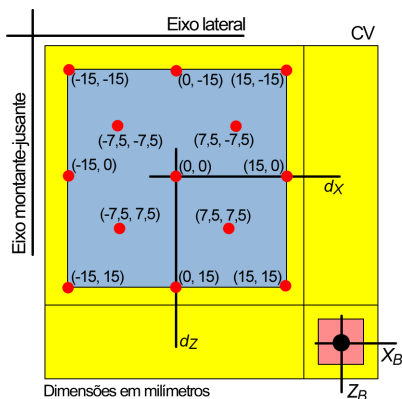


Figura 46: Pontos de calibração considerados para a avaliação das características metrológicas do sistema em ambiente laboratorial.

A incerteza de medição na direção dos eixos d_X ($U_{SMC}(d_X)$) e d_Z ($U_{SMC}(d_Z)$) foi determinada para cada um dos pontos de calibração adotando-se os procedimentos recomendados pelo Guia para Expressão da Incerteza de Medição (GUM) (BIPM; IEC; IFCC; ISO; IUPAC; IUPAP; OIML, 2003). Para tando, foram considerados os seguintes dados:

- Incerteza de medição do SMP (Anexo A - U_{SMP});

- Diferenças observadas entre os termos $(d_X(SMC), d_Z(SMC))^T$ indicados pelo SMC e os termos $(d_X(SMP), d_Z(SMP))^T$ definidos pelo SMP para cada uma das três repetições de cada ponto de calibração.

Após, tomando-se como base os dados considerados, foram determinados os valores dos parâmetros listados abaixo:

- Tendência média na direção dos eixos d_X ($Td(d_X)$) e d_Z ($Td(d_Z)$);
- Repetitividade na direção dos eixos d_X ($RR(d_X)$) e d_Z ($RR(d_Z)$);
- Incerteza da tendência na direção dos eixos d_X ($U_{Td}(d_X)$) e d_Z ($U_{Td}(d_Z)$).

Em relação ao cálculo das tendências médias $Td(d_X)$ e $Td(d_Z)$, essas foram determinadas por meio da Equação 5.4:

$$\begin{pmatrix} Td(d_X) \\ Td(d_Z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{d_X}(SMC) - d_X(SMP) \\ \overline{d_Z}(SMC) - d_Z(SMP) \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

onde $\overline{d_X}(SMC)$ e $\overline{d_Z}(SMC)$ representam os valores médios resultantes das três repetições realizadas utilizando-se o SMC.

O cálculo dos termos $RR(d_X)$ e $RR(d_Z)$, por sua vez, foi realizado por meio da aplicação da Equação 5.5:

$$\begin{pmatrix} RR(d_X) \\ RR(d_Z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k(p, v_{ef}) \sqrt{dp(\overline{X}_i)^2 + dp(X_j)^2} \\ k(p, v_{ef}) \sqrt{dp(\overline{Z}_i)^2 + dp(Z_j)^2} \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

onde $dp(X)$ e \overline{X} representam, respectivamente, o desvio padrão e a média da variável X . O fator $k(p, v_{ef})$, por sua vez, representa o fator de abrangência calculado para nível de significância de 5% ($p = 0,05$) e v_{ef} graus de liberdade efetivos determinados por meio da Equação de Welch-Satterthwaite (VUOLO, 1999).

Por fim, para cálculo dos componentes $U_{Td}(d_X)$ e $U_{Td}(d_Z)$, a Equação 5.5 foi reescrita da seguinte maneira:

$$\begin{pmatrix} RR(d_X) \\ RR(d_Z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k(p, v_{ef}) rr(d_X) \\ k(p, v_{ef}) rr(d_Z) \end{pmatrix}$$

onde $rr(d_X)$ e $rr(d_Z)$ representa a repetitividade padrão na direção dos eixos d_X e d_Z , respectivamente, gerada pela combinação da variabilidade das

medições inicial e final.

Assim, os termos $U_{Td}(d_X)$ e $U_{Td}(d_Z)$ puderam ser determinados por meio da Equação 5.6:

$$\begin{pmatrix} U_{Td}(d_X) \\ U_{Td}(d_Z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k(p, v_{ef}) \sqrt{rr(d_X)^2 + u(SMP)^2} \\ k(p, v_{ef}) \sqrt{rr(d_Z)^2 + u(SMP)^2} \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

onde u_{SMP} representa a incerteza padrão do SMP, a qual foi obtida por $u_{SMP} = U_{SMP}/\sqrt{3}$ considerando-se uma distribuição retangular com infinitos graus de liberdade. Com relação ao fator de abrangência $k(p, v_{ef})$, esse foi obtido considerando-se $p = 0,05$ e v_{ef} calculado por meio da Equação de Welch-Satterthwaite (VUOLO, 1999).

Desse modo, $U_{SMC}(d_X)$ e $U_{SMC}(d_Z)$ foram determinados por meio da Equação 5.7 considerando-se a realização de três repetições para a determinação da posição do fio do pêndulo no tempo inicial, a ausência da aplicação de correções para os erros sistemáticos e a realização de uma única medição futura:

$$\begin{pmatrix} U_{SMC}(d_X) \\ U_{SMC}(d_Z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |Td(d_X)| + RR(d_X) + U_{Td}(d_X) \\ |Td(d_Z)| + RR(d_Z) + U_{Td}(d_Z) \end{pmatrix} \quad (5.7)$$

5.3.3 Realização de avaliações preliminares do protótipo em uma estação de medição desenvolvida para testes

Após a calibração do protótipo em ambiente laboratorial, foram delineados testes de avaliação visando-se verificar a influência do iluminamento e da temperatura do ambiente no resultado das medições, bem como comparar o desempenho do sistema desenvolvido em relação ao coordenômetro portátil utilizado atualmente na Usina de Itaipu. Para a realização desses procedimentos, a montagem estereoscópica foi instalada no local de experimentação juntamente a um protótipo de pêndulo invertido considerando-se as etapas descritas na Seção 5.2.3.1. Houve uma adaptação, no entanto, quanto ao alinhamento dos eixos X_W e Z_W do sistema de medição, sendo o procedimento realizado tomando-se como base um sistema de coordenadas já definido no local e dado em função da disposição de uma base de fixação de coordenômetro portátil. O posicionamento da referência, por sua vez, seguiu o procedimento normal de modo que a haste de suporte e a esfera foram fixadas juntamente à plataforma de montagem.

Na Figura 47-a pode ser observada a disposição geral dos componentes no local de experimentação, enquanto que na Figura 47-b, por sua vez, é apresentada a montagem estereoscópica e a base de coordenômetro portátil, estando o mesmo acoplado no local de fixação. Deve ser observado que nesse protótipo de pêndulo utilizado para o delineamento dos experimentos, a posição do fio pode ser considerada estática em relação ao tempo e um possível deslocamento, caso necessário, deve ser realizado propositalmente movendo-se o mesmo de forma artificial.

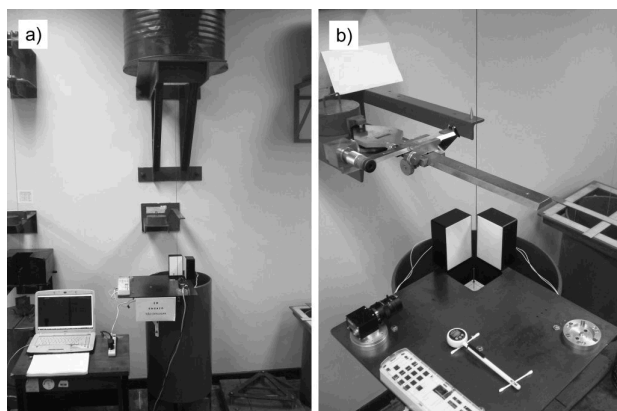


Figura 47: a) disposição geral dos componentes utilizados para o delineamento dos testes em pêndulo e b) montagem estereoscópica juntamente com coordenômetro portátil utilizado em Itaipu.

Com relação ao controle e à monitoração das características do ambiente no qual foram delineados os experimentos preliminares de avaliação, foram considerados os seguintes aspectos:

- **Temperatura do ambiente:** variável controlada por meio de um condicionador de ar Springer[®], modelo Mundial (21000 BTU/h) e monitorada por meio de um termômetro digital AKSO[®], modelo AK05 (Erro combinado disponibilizado em catálogo de $\pm 1^{\circ}C$), posicionado sobre a plataforma de montagem do protótipo (Figura 48-a);
- **Iluminamento do ambiente:** variável controlada por meio de um conjunto de 24 lâmpadas fluorescentes dispostas juntamente ao forro do laboratório e monitorada por meio de um luxímetro digital Homis[®], modelo 1335 (Erro combinado disponibilizado em catálogo de $\pm 3\%$);

da leitura mais $\pm 0,5\%$ do fundo de escala), posicionado sobre a plataforma de montagem do protótipo (Figura 48-b).

O comportamento da umidade relativa do ar no local de experimentação não foi considerado durante o delineamento dos testes preliminares de avaliação.

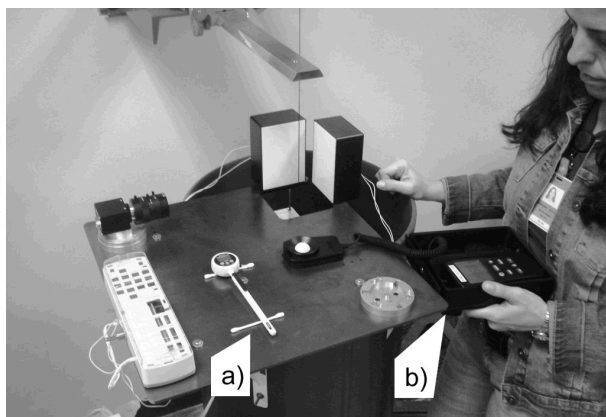


Figura 48: a) termômetro digital AKSO[®], modelo AK05 e b) luxímetro digital Homis[®], modelo 1335 posicionados sobre a plataforma de montagem do protótipo.

5.3.3.1 Avaliação da influência do iluminamento do ambiente

Para a avaliação preliminar da influência do iluminamento do ambiente no resultado das medições geradas por meio do protótipo desenvolvido, foram delineados os seguintes procedimentos:

1. Efetuou-se a regulagem do termostato do condicionador de ar para a posição de mínima temperatura;
2. Ligaram-se os componentes eletrônicos;
3. Estabeleceu-se período de ambientação com duração de seis horas;
4. Configuração 01:
 - (a) Ligaram-se todas as lâmpadas do laboratório;

- (b) Mediu-se o iluminamento do ambiente;
- (c) Mediu-se a temperatura do ambiente;
- (d) Determinou-se a posição do fio do pêndulo por meio de procedimento de medição utilizando-se o protótipo desenvolvido;
- (e) Realizaram-se dez repetições dos ítems (c) e (d);
- (f) Zerou-se o sistema de indicação do protótipo em relação ao valor médio observado para as dez repetições do ítem (d).

5. Configuração 02:

- (a) Desligaram-se todas as lâmpadas do laboratório;
- (b) Mediu-se o iluminamento do ambiente;
- (c) Mediu-se a temperatura do ambiente;
- (d) Determinou-se a posição relativa do fio do pêndulo por meio de procedimento de medição utilizando-se o protótipo desenvolvido;
- (e) Realizaram-se dez repetições dos ítems (c) e (d).

6. Realizou-se análise estatística.

A análise estatística foi feita separadamente para os eixos d_X e d_Z e visou comparar os resultados das medições realizadas por meio dos Configurações 01 e 02. Para tanto, foi aplicado o teste t não pareado para um nível de significância de 5% (comparação entre médias) e o teste F para um nível de significância de 5% (comparação entre variâncias) (FREEDMAN; PISANI; PURVES, 1998).

5.3.3.2 Avaliação da influência da temperatura do ambiente

Para a avaliação preliminar da influência da temperatura do ambiente no resultado das medições, os dados gerados por meio da Configuração 01 apresentada na Seção 5.3.3.1 foram confrontados com os dados gerados por meio dos procedimentos listados abaixo:

1. Configuração 03:

- (a) Zerou-se o sistema de indicação do protótipo em relação ao valor médio observado para as dez repetições do ítem (d) da Configuração 01;

- (b) Efetuou-se a regulagem do termostato do condicionador de ar para a posição de máxima temperatura;
- (c) Ligaram-se os componentes eletrônicos;
- (d) Estabeleceu-se período de ambientação com duração de seis horas;
- (e) Ligaram-se todas as lâmpadas do laboratório⁴;
- (f) Mediu-se a temperatura do ambiente;
- (g) Determinou-se a posição relativa do fio do pêndulo por meio de procedimento de medição utilizando-se o protótipo desenvolvido;
- (h) Realizaram-se dez repetições ds itens (f) e (g).

2. Realizou-se análise estatística.

Assim como apresentado anteriormente, a análise estatística foi feita separadamente para os eixos d_x e d_z e visou comparar os resultados das medições realizadas por meio das Configurações 01 e 03. Para tanto, foi aplicado o teste t não pareado para um nível de significância de 5% (comparação entre médias) e o teste F para um nível de significância de 5% (comparação entre variâncias).

5.3.3.3 Comparação com o coordenômetro portátil utilizado em Itaipu

Por fim, para a avaliação preliminar das características metrológicas do coordenômetro portátil utilizado atualmente em Itaipu em relação às do protótipo desenvolvido nesse projeto, os dados gerados por meio da Configuração 01 descrita na Seção 5.3.3.1 foram confrontados com os dados gerados por meio dos procedimentos listados abaixo:

1. Configuração 04:

- (a) Efetuou-se a regulagem do termostato do condicionador de ar para a posição de mínima temperatura;
- (b) Estabeleceu-se período de ambientação com duração de seis horas;
- (c) Ligaram-se todas as lâmpadas do laboratório;
- (d) Mediu-se a temperatura do ambiente;

⁴Determinação do valor do iluminamento do ambiente para lâmpadas ligadas foi realizado uma única vez durante a Configuração 01 descrita na Seção 5.3.3.1.

- (e) Determinou-se a posição do fio do pêndulo em relação à referência cônica por meio de procedimento de medição utilizando-se o coordenômetro portátil manipulado por operador treinado pertencente ao quadro de funcionários da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional (Figura 49);
- (f) Realizaram-se dez repetições dos ítems (d) e (e), sendo cada procedimento desempenhado por um operador diferente;
- (g) Realizou-se a padronização dos resultados em relação ao valor médio observado para as dez repetições do ítem (e).

2. Realizou-se análise estatística.



Figura 49: Procedimento de medição com coordenômetro portátil efetuado por operador treinado na Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional.

Nesse caso, a análise estatística também foi feita separadamente para os eixos d_X e d_Z . No entanto, a comparação dos resultados das medições realizadas por meio das Configurações 01 e 04 foi realizada unicamente por meio da aplicação do teste F para um nível de significância de 5% (comparação entre variâncias).

5.4 Considerações finais

Como pôde ser observado, as ferramentas básicas referentes à estereoscopia apresentadas na Seção 4 foram consideradas e adaptadas para compor

um protótipo de uma montagem destinada à monitoração do comportamento de pêndulos instalados em barragens. Nesse sentido, na Seção 6 são apresentados os resultados e discussões referentes ao estudo de viabilidade delineado no escopo desse trabalho.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Considerações iniciais

Para dar-se início ao estudo em relação à aplicabilidade metrológica da técnica de medição estereoscopia para o desenvolvimento de um módulo portátil e automatizado destinado à monitoração de pêndulos instalados em barragens, tornou-se necessária a concepção de um protótipo. Deve ser observado, no entanto, que visando-se atender ao propósito desse trabalho preliminar, foram efetivamente implementados os aspectos técnicos necessários para o delineamento da avaliação de viabilidade, não sendo dada grande ênfase, por outro lado, às características operacionais que certamente devem ser contempladas por um produto destinado ao consumidor final. Nesses casos, sugestões referentes às adaptações necessárias para a operacionalização dos procedimentos de modelagem e medição são apresentadas.

6.2 Desenvolvimento do protótipo

Os procedimentos referentes ao desenvolvimento do protótipo do sistema de medição foram organizados em três etapas, sendo elas: projeto do leiaute e especificação/fabricação dos materiais, modelagem do processo de formação de imagens e implementação dos algoritmos referentes ao processo de medição. Características importantes a serem observadas em relação as mesmas são apresentadas nas Seções 6.2.1, 6.2.2 e 6.2.3, respectivamente.

6.2.1 *Leiaute e materiais*

Em relação ao protótipo desenvolvido no escopo desse trabalho, esse foi concebido tomando-se como base uma configuração em que bases de referência devem permanecer fixas nos locais de medição, sendo as mesmas atendidas por meio de um módulo móvel compacto utilizado para o delineamento das leituras. Teve-se como objetivo, desse modo, prover uma solução em que os custos de implantação sejam reduzidos, visto que os equipamentos de maior valor agregado contemplam o dispositivo móvel que permite atender múltiplas estações ao longo de uma barragem. Assim, visando-se garantir a manutenção das características metrológicas do sistema para os distintos locais de operação, necessitou-se realizar os procedimentos listados abaixo:

- **Desenvolvimento do sistema de fixação SFI:** dispositivo projetado com o intuito de possibilitar o reposicionamento do módulo móvel de

medição em relação aos pontos de vista definidos sobre cada uma das bases de referência. Em relação a esse componente, deve ser utilizada uma proteção contra o acúmulo de sujeira e delineadas verificações de rotina. Contribuiu-se, desse modo, para a manutenção do desempenho metrológico do sistema de medição;

- **Desenvolvimento do sistema de iluminação *back-light*:** dispositivo projetado com o intuito de proporcionar a maximização do contraste das imagens capturadas, facilitar o processamento das mesmas, bem como tornar o resultado das medições menos vulnerável em relação a variações nas condições de iluminamento considerando-se os distintos locais de medição a serem contemplados ao longo de uma barragem.

Em relação à montagem estereoscópica, por sua vez, foram inicialmente considerados os aspectos referentes ao leiaute da mesma. Nesse sentido, foram avaliadas as seguintes características:

- **Orientação entre os pontos de vista:** adotou-se a orientação de 90° entre os pontos de vista da montagem estereoscópica, uma vez que esse arranjo contribui para a maximização da exatidão inerente ao processo triangulação (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003). Tal fato é representado por meio da Figura 50, podendo ser observado que para ângulos agudos ocorre o prolongamento da área de intersecção entre as faixas provenientes da incerteza atrelada ao processo de reconhecimento de pontos homólogos;
- **Posição dos pontos de vista:** para ambos os pontos de vista buscou-se ajustar a distância da câmera em relação ao centro da abertura para passagem do fio do pêndulo da plataforma de montagem, de modo que foi realizada a especificação de uma lente objetiva que possa operar considerando-se uma distância de trabalho compatível com o espaço disponível nos locais de monitoração.

Após, uma vez delineados os procedimentos referentes à concepção de um leiaute para a montagem estereoscópica, foram considerados os aspectos relacionados ao processo de aquisição de imagens propriamente dito. Como descrito na Seção 4.3, otimizações realizadas nesse sentido tornam-se de suma importância visto que a exatidão de um sistema de medição baseado na técnica estereoscópica está diretamente relacionada com a qualidade dos dados de entrada (imagens capturadas). Para tanto, foram avaliadas as características listadas abaixo:

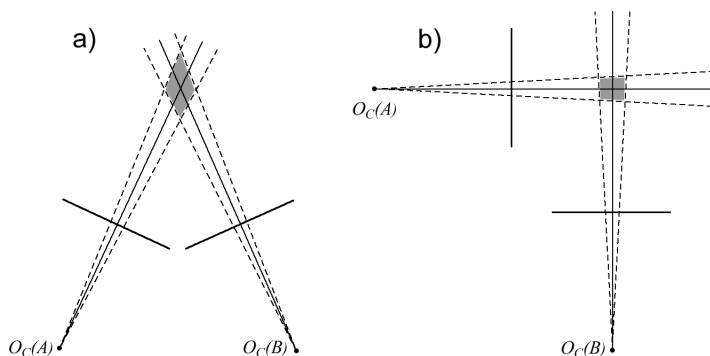


Figura 50: Representação esquemática da exatidão do processo de triangulação em função do ângulo de orientação entre os pontos de vista adotados para a captura de imagens e da exatidão inerente ao processo de reconhecimento de pontos homólogos: a) ângulo agudo e b) ângulo reto.

- **Campo de visão:** buscou-se ajustar o valor desse parâmetro com o objetivo atender ao requisito de projeto relacionado à Faixa de Medição (FM) apropriada para a monitoração de deslocamentos em fios de pêndulos;
- **Resolução lateral:** buscou-se maximizar o valor desse parâmetro por meio da especificação de uma câmera de alta resolução e por meio da implementação de técnicas de detecção de pontos e linhas homólogas com incerteza *sub-pixel*;
- **Profundidade de foco:** buscou-se maximizar o valor desse parâmetro por meio da diminuição do valor do f – *number* da lente objetiva utilizada.

Com relação aos procedimentos descritos sobre a concepção do protótipo, deve-se observar que esses foram delineados objetivando-se, fundamentalmente, agregar em um mesmo sistema de medição a exatidão requerida para o processo de monitoração de deslocamentos de fios de pêndulos com a versatilidade inerente de um instrumento portátil. Paralelamente, no entanto, em se tratando de uma solução móvel, características referentes à ergonomia, à resistência contra choques, à incorporação de um módulo para processamento embarcado e à alimentação sem cabo do sistema devem ser avaliadas e implementadas para que o dispositivo possa ser operado

em campo de acordo com os requisitos operacionais definidos. Tecnologia disponível para tais adaptações encontra-se atualmente disponível, podendo ser tomado como exemplo a miniaturização das câmeras digitais, bem como a evolução dos microcontroladores utilizados para operacionalização de processos dedicados.

6.2.2 Modelagem do processo de formação de imagens

Como descrito na Seção 5.2.2, a modelagem do processo de formação de imagens da montagem estereoscópica concebida no escopo desse trabalho foi realizada considerando-se quatro passos sequenciais, de modo que aspectos importantes a serem observados em relação aos mesmos encontram-se expostos abaixo:

1. **Geração da coleção tridimensional de pontos:** a utilização da máquina de medir por coordenadas Mitutoyo[®], modelo Beyond A916, cujas características metrológicas são conhecidas e estão dispostas na síntese do certificado de calibração apresentada no Anexo A, possibilitou o estabelecimento de um conjunto de pontos de referência no espaço tridimensional com baixo nível de incerteza associado. As posições adotadas para a esfera de calibração, por sua vez, foram consideradas visando-se promover a distribuição homogênea dos pontos de controle dentro do volume que define o campo de visão da montagem estereoscópica. Por fim, em relação às repetições realizadas para a captura de imagens de cada um dos pontos do padrão, essas foram delineadas visando-se minimizar a variabilidade inerente ao processo¹. Tais características visaram atender a um importante requisito referente ao delineamento de um processo de modelagem, o qual se refere à representatividade dos pontos utilizados na etapa de treinamento (TRIGGS; FITZGIBBON, 1999; HEIKKILÄ, 2000);
2. **Identificação de pontos homólogos:** a esfera de calibração foi utilizada uma vez que essa, quando projetada no plano imagem, apresenta-se com morfologia circular conhecida e invariável em função da posição e da orientação da câmera utilizada (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003). Desse modo, facilitou-se o processo de identificação de pontos homólogos, tornando-se possível a aplicação de métodos paramétricos

¹Como exemplo: a) processo de fixação por meio do sistema SFI, b) ruído eletrônico gerado pela câmera, dentre outros aspectos.

para auxiliar nos procedimentos de busca e posterior otimização para obtenção de incerteza *sub-pixel* (GONZALEZ; WOODS, 2008);

3. **Processo de otimização:** como descrito na Seção 4.2.2, para a modelagem do processo de formação de imagens do sistema optou-se pela utilização do método híbrido proposto por Heikkilä (2000), uma vez que esse foi desenvolvido para aplicações que exigem elevada exatidão de medição (REMONDINO; FRASER, 2006);
4. **Análise da qualidade dos resultados:** processo realizado de modo sistemático (análise quantitativa) buscando-se a constatação de que os resíduos em *pixels* remanescentes do processo de otimização assumem uma distribuição gaussiana em torno das projeções geradas por meio do modelo não linear empregado. Tal procedimento torna-se de suma importância, uma vez que esse constitui-se como um requisito para a aplicação do método dos mínimos quadrados, sendo também adotado como critério de aceitação em relação à aplicabilidade de modelos para a representação de fenômenos (MOTULSKY; RANSNAS, 1987; MADSEN; NIELSEN; TINGLEFF, 2004).

Nesse sentido, abaixo é apresentada a matriz de projeção (Equação 4.11) obtida para a câmera posicionada por meio do sistema de fixação SFI-A (${}^I P_W(A)$), bem como para a câmera posicionada por meio do sistema de fixação SFI-B (${}^I P_W(B)$). Na Tabela 7, por sua vez, são apresentadas as estimativas dos valores dos termos de k_1 , k_2 , p_1 e p_2 que constituem o modelo de correção das distorções do tipo radial e tangencial (Equação 4.14).

$${}^I P_W(A) = \begin{bmatrix} -0,0067 & -0,0003 & -0,0614 & 1,8181 \\ -0,0049 & -0,0614 & 0,0003 & 1,3535 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0028 \end{bmatrix} 10^5$$

$${}^I P_W(B) = \begin{bmatrix} 0,0613 & -0,0005 & -0,0067 & 1,9008 \\ -0,0004 & -0,0613 & -0,0049 & 1,3476 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0028 \end{bmatrix} 10^5$$

Em relação à análise da qualidade dos resultados, encontram-se dispostos na Figura 51 histogramas de frequência e gráficos de escore normal representativos do comportamento dos resíduos em *pixels* na direção dos eixos X_I e Y_I do plano imagem remanescentes do processo de otimização. Nesse contexto, tomando-se como base os diagramas apresentados, bem como os

Tabela 7: Estimativas dos valores dos termos de k_1 , k_2 , p_1 e p_2 .

k_1 [mm^{-2}]	$0,000489 \pm 0,000075$
k_2 [mm^{-4}]	$0,000030 \pm 0,000016$
p_1 [mm^{-1}]	$0,000002 \pm 0,000011$
p_2 [mm^{-1}]	$-0,0000399 \pm 0,0000087$

procedimentos descritos na Seção 5.2.2.4, a aceitação do modelo empregado se deu por meio das verificações listadas abaixo:

- **Análise das tendências:** as tendências observadas em relação resíduos em *pixels* na direção dos eixos X_I e Y_I do plano imagem do dispositivo óptico podem ser consideradas não significativas (p-valor > 0, 1);
- **Análise das dispersões:** as dispersões observadas em relação aos resíduos em *pixels* na direção dos eixos X_I e Y_I do plano imagem do dispositivo óptico podem ser modeladas por meio de uma distribuição normal (p-valor > 0, 1).

Deve-se observar, no entanto, que embora a modelagem delineada no escopo desse trabalho tenha sido considerada adequada, estudos que visem aprimoramento ainda podem ser realizados. Como exemplo, um primeiro passo a ser dado consiste na avaliação da aplicabilidade dos termos k_2 , p_1 e p_2 , uma vez que esses apresentaram-se com valores próximos de zero e com elevada incerteza relativa associada. Tal análise torna-se importante visto que a presença de parâmetros desnecessários pode contribuir para a desestabilização da estimativa dos demais (REMONDINO; FRASER, 2006; BOUGUET, 2010).

Por fim, um aspecto importante a ser observado diz respeito à operacionalização dos procedimentos referentes à modelagem do processo de formação de imagens considerando-se o escopo de uma aplicação real em uma barragem. Para tanto, uma série de características devem ser levadas em consideração, dentre elas:

- **Bases de referência:** uma grande quantidade de bases de referência podem estar dispostas ao longo de uma barragem nas respectivas estações de medição;
- **Módulos de medição:** idealmente, poucos módulos de medição devem

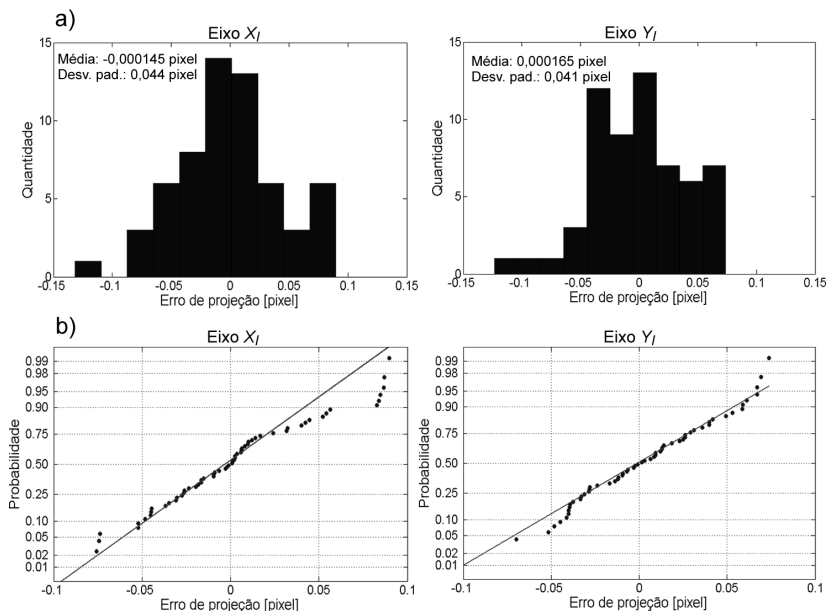


Figura 51: Diagramas representativos dos resíduos em *pixels* na direção dos eixos X_I e Y_I do plano imagem inerentes ao processo de otimização: a) histogramas de frequência e b) gráficos de escore normal.

atender a todo um conjunto de bases de referência dispostas ao longo de uma barragem;

- **Associações:** o sistema de monitoração deve ser versátil em relação à distintas associações entre bases de referência e módulos de medição, tornando-se necessária apenas a identificação da associação realizada para o delineamento de uma medição;
- **Operações de manutenção:** torna-se necessário criar um procedimento de modelagem específico para os sistemas de medição que já se encontram instalados nas barragens, de modo que seja viabilizada a manutenção das características metrológicas dos mesmos, bem como a manutenção dos sistemas de coordenadas adotados para a monitoração do mensurando em cada estação de medição.

Nesse sentido, considerando-se as condições descritas previamente, apresenta-se nesse trabalho uma primeira sugestão de um método de modelagem abrangente que contempla a fase que antecede a instalação em campo (fase pré-instalação), bem como a fase de operação (fase pós-instalação) em que são delineadas operações de manutenção:

1. Fase pré-instalação (Figura 52-a):

- (a) Realiza-se a modelagem e a calibração de cada uma das possíveis combinações existentes entre os componentes agrupados pela linha tracejada de cor vermelha utilizando-se um padrão físico de pontos tridimensional;
- (b) Realiza-se a modelagem e a calibração de cada uma das possíveis combinações existentes entre os componentes agrupados pela linha tracejada de cor preta utilizando-se um padrão físico de pontos tridimensional.

2. Fase pós-instalação (Figura 52-b):

- (a) Realiza-se periodicamente a calibração de cada um dos módulos móveis agrupados pela linha tracejada de cor azul. Tal procedimento pode ser realizado por meio da utilização de um padrão planar, o que repercute na minização de custos e no aumento da praticidade em relação à utilização de uma máquina de medir por coordenadas;
- (b) Realiza-se periodicamente inspeções de limpeza e verificação em cada uma das bases de referência agrupadas pela linha tracejada de cor verde e dispostas ao longo da barragem.

Para a implementação do método de modelagem abrangente, torna-se necessário delinear um trabalho referente à concepção de um módulo destinado a realização das distintas associações entre as bases de referência e instrumentos portáteis utilizados. Tomando-se como base a Figura 52, primeiramente consideram-se as diferenças observadas para os valores dos parâmetros extrínsecos encontrados para as câmeras posicionadas na mesma base de referência (linha tracejada de cor vermelha). Após, estas diferenças devem ser utilizadas para replicar os resultados encontrados durante as modelagens representadas pela linha tracejada de cor azul para todos os demais módulos a serem empregados utilizados para a monitoração da barragem. Em outras palavras, as diferenças no posicionamento de cada módulo passam a ser compensadas durante a associação de bases e sistemas portáteis.

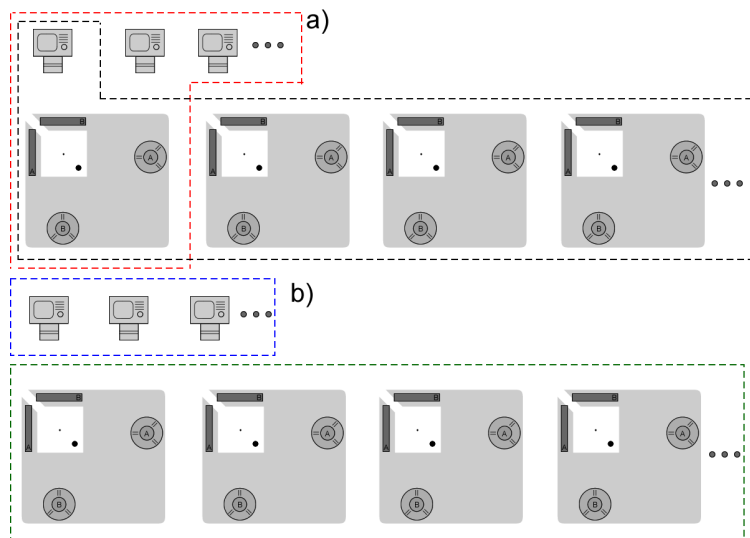


Figura 52: Representação esquemática das fases do método de modelagem sugerido para implementação: a) fase que antecede a instalação em campo e b) fase de operação em que são delineadas operações de manutenção.

Adicionalmente, a concepção de um sistema baseado na utilização de duas câmeras com estrutura que permite a manutenção da posição relativa entre as mesmas ao longo do tempo deve ser avaliada. Nesse sentido, o processo de modelagem pode ser simplificado uma vez que o resultado passa a não depender da base de fixação, mas da posição relativa entre as câmeras com compõem o módulo. Tal aprimoramento é proporcionado ao custo de aquisição de uma segunda câmera para cada sistema portátil. Acredita-se, no entanto, que tal incremento de preço não seja significativo considerando-se a monitoração de uma barragem como um todo.

6.2.3 Procedimentos de medição

Como descrito na Seção 5.2.3, o primeiro procedimento a ser delineado em relação à monitoração do comportamento de pêndulos por meio da configuração proposta no escopo desse trabalho diz respeito à correta instalação de cada uma das bases de referência nas estações de medição definidas ao longo da barragem. Nesse contexto, os principais aspectos a serem observados quanto aos procedimentos de montagem encontram-se listados

abaixo:

- **Fixação da plataforma de montagem:** esse dispositivo deve ser fixado juntamente à estrutura da barragem no local definido para a estação de medição de modo que, nesse ambiente, esteja protegido das condições do ambiente. Torna-se importante ressaltar também que o processo de fixação deve ser realizado de modo que a plataforma de montagem permaneça estática ao longo do tempo em relação ao ponto de ancoragem para que, desse modo, a referência de monitoração adotada não seja perdida. Por fim, o correto posicionamento da base de referência em relação ao fio do pêndulo no instante inicial de operação contribui para o melhor aproveitamento da FM definida para o instrumento, principalmente quando considerada a magnitude dos deslocamentos que podem ser observados no período de enchimento de uma barragem;
- **Alinhamento dos eixos do sistema de medição:** como descrito previamente, o alinhamento dos eixos do sistema de medição em relação aos eixos da barragem facilita a visualização do comportamento da estrutura. Deve ser observado, no entanto, que tal procedimento torna-se de suma importância para a realização de combinações visando a determinação de deslocamentos relativos e absolutos²;
- **Posicionamento da esfera de referência:** esse dispositivo deve ser acoplado à plataforma de montagem, de modo que ambos os componentes permaneçam conjugados. Nesse sentido a esfera de referência desempenha o mesmo papel do cone adotado pelo coordenômetro portátil apresentado como exemplo na Figura 7 da Seção 2.4.1, caracterizando uma origem materializada para o sistema de coordenadas de monitoração e indicando se os procedimentos de fixação e de leitura foram efetuados corretamente pelo operador³. Além desses aspectos, acredita-se que a determinação da posição do fio do pêndulo em relação à esfera possibilite a minimização da variabilidade inerente ao

²Como exemplo, para a determinação de um perfil de deslocamento semelhante ao apresentado na Figura 4 de acordo com os procedimentos descritos na Seção 2.3, os sistemas de coordenadas de todas as bases devem se encontrar alinhados na mesma direção. Caso contrário, torna-se necessário um trabalho mais elaborado baseado na busca por correlações.

³Torna-se possível a implementação de um sistema que gere um alerta ao operador caso a esfera tenha se movimentado fortemente em relação às leituras anteriores e que, desse modo, o procedimento precisa ser repetido ou que o sistema precisa de manutenção.

processo de posicionamento por meio do sistema SFI em função da presença de componentes positivamente correlacionadas;

- **Preparação do fio do pêndulo e da esfera de referência:** a preparação do fio do pêndulo e da esfera de referência deve ser realizada para cada estação de monitoração com o intuito de proporcionar a padronização das características superficiais desses componentes e, conseqüentemente, minimizar a variabilidade dos resultados. Adicionalmente, um aspecto a ser observado que repercute diretamente na qualidade de uma medição diz respeito à característica espelhada da superfície da esfera de referência utilizada, o que pode dificultar o processo de detecção de bordas e, conseqüentemente, a determinação de pontos homólogos. A pintura na cor preta fosca minimiza fortemente a ocorrência desse problema.

Uma vez delineada a montagem de cada uma das bases de referência de acordo com as recomendações apresentadas previamente, o processo de monitoração inicia-se efetivamente por meio da captura de, no mínimo, um par de imagens relacionadas aos pontos de vista definidos por meio dos sistemas de fixação SFI. Para tanto, torna-se necessário observar se existe a presença de algum foco de luz de alta intensidade incidindo diretamente sobre os objetos retratados, visto que, desse modo, pode haver a degeneração da qualidade da medição. Recomenda-se para esses casos que o sistema seja protegido ou que as luzes da sala sejam apagadas. Nesse sentido, considerando-se uma situação em que a intensidade da luz do ambiente seja minimizada e que, como consequência, o fundo das imagens capturadas deixe de ser integralmente claro e homogêneo, o ajuste deve, preferencialmente, ser realizado via *software* por meio do aumento do ganho ou do tempo de exposição. Ajustes realizados por meio da variação do *f – number* podem modificar, acidentalmente, o comprimento focal da lente objetiva utilizada, sendo minimizada assim, a confiabilidade dos resultados.

Em relação à correção das distorções de lente, a importância desse procedimento já fora discutida previamente na Seção 4.5, sendo uma representação esquemática delineada por meio da Figura 22. Um aspecto a ser observado, no entanto, caracteriza-se pelo fato de que essa é uma etapa de alto custo computacional quando considerada a elevada resolução das imagens capturadas, bem como o poder de processamento reduzido inerente à concepção de uma solução embarcada. Nesse contexto, a alternativa implementada no escopo desse trabalho consistiu na aplicação do algoritmo de correção somente após o delineamento da detecção de bordas por meio do

filtro Sobel, sendo a busca restringida, assim, aos *pixels* de interesse.

A determinação de pontos e linhas homólogas, por sua vez, foi tratada como sendo um dos processos de maior importância em relação ao delineamento de medições por meio do sistema desenvolvido. Para tanto, assim como descrito anteriormente para a etapa referente à modelagem do processo de formação de imagens, as características invariáveis inerentes à projeção dos objetos retratados (esfera e fio de pêndulo) viabilizaram a aplicação de métodos paramétricos para auxiliar nos procedimentos de busca e posterior otimização para obtenção de incerteza *sub-pixel* (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003; GONZALEZ; WOODS, 2008). Finalmente, o algoritmo implementado mostrou-se estável durante todos os testes realizados, permitindo o desempenho da função requerida de modo automático e sem a necessidade de reajustes em função das condições de iluminação do ambiente – características necessárias para a exclusão do critério de julgamento de cada usuário.

Por fim, uma série de fatores são levados em consideração além dos procedimentos de triangulação, visando-se, fundamentalmente, expressar as coordenadas ortogonais que definem a posição do fio do pêndulo de acordo com os requisitos impostos para o mensurando. Torna-se importante ressaltar nesse sentido a correção da inclinação do sistema de coordenadas de monitoração, de modo que tal aspecto torna-se de suma importância uma vez que o alinhamento do eixo normal da plataforma de montagem em relação ao fio do pêndulo durante o procedimento de instalação deixa de ser um fator crítico. Esse pode ser considerado um diferencial em relação aos coordenômetros atualmente disponíveis no mercado uma vez que não foi identificado nenhum modelo que implemente essa correção.

6.3 Avaliação das características metrológicas do protótipo

A avaliação das características metrológicas do protótipo desenvolvido no escopo desse projeto foi constituída por três etapas, sendo elas: levantamento das fontes de incerteza, calibração do protótipo em ambiente laboratorial e realização de avaliações preliminares do protótipo em uma estação de medição desenvolvida para testes. Nesse sentido, aspectos importantes a serem observados em relação às mesmas encontram-se expostos nas Seções 6.3.1, 6.3.2 e 6.3.3, respectivamente.

6.3.1 Levantamento das fontes de incerteza

Na Figura 53 é apresentado o diagrama representativo das principais fontes de incerteza inerentes ao processo de monitoração da posição de fios

de pêndulos instalados em barragens por meio da utilização do protótipo desenvolvido, de modo que encontram-se identificados pela cor azul os fatores intrínsecos ao sistema de medição, enquanto que pela cor vermelha, os fatores extrínsecos relacionados ao ambiente no qual o mesmo encontra-se posicionado. Quanto aos fatores intrínsecos, esses foram caracterizados como sendo as fontes de incerteza presentes mesmo em uma situação em que as condições do ambiente encontram-se controladas e de acordo o patamar definido como referência na etapa de modelagem. Quanto aos fatores extrínsecos, por outro lado, esses normalmente não são quantificados nas operações de calibração e foram caracterizados como sendo as fontes de incerteza provenientes das condições específicas de operação em campo em que não existe o controle apurado das variáveis ambientais.

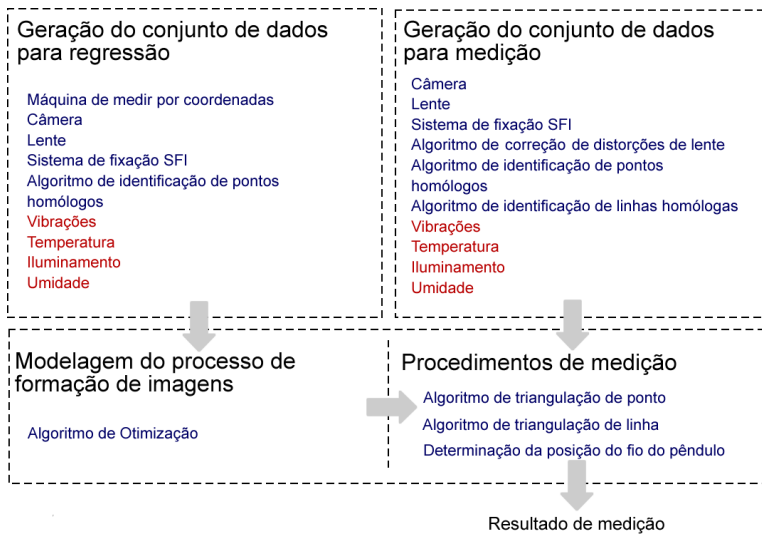


Figura 53: Diagrama representativo das principais fontes de incerteza intrínsecas (cor azul) e extrínsecas (cor vermelha) ao sistema que contribuem com o aumento da incerteza das medições.

Em relação ao diagrama apresentado, existe a presença de fatores intrínsecos e extrínsecos que contribuem para a degeneração do desempenho metrológico do sistema nos procedimentos que envolvem a modelagem do processo de formação de imagens, bem como nos procedimentos referentes ao delineamento das medições. Para cada etapa pode ser realizada a

diferenciação entre os fatores inerentes ao processo de aquisição e preparação de dados e o posterior processamento dos mesmos por meio dos algoritmos de modelagem e medição implementados.

Nesse contexto, para o estudo do processo de propagação das fontes de incerteza, optou-se, no escopo desse trabalho, pela realização de avaliações empíricas em que, controlando-se um sub-grupo de variáveis, buscou-se quantificar o efeito resultante das demais no resultado das medições. Tais procedimentos foram delineados uma vez que a determinação de uma equação de medição para um sistema como o protótipo desenvolvido e a posterior avaliação por meio da aplicação do método clássico pode ser considerado um processo não trivial.

6.3.2 *Calibração do protótipo em ambiente laboratorial*

De acordo com Albertazzi e Souza (2008), uma calibração caracteriza-se como sendo um procedimento por meio do qual são estabelecidas, sob condições específicas, as relações existentes entre os valores indicados por um sistema de medição e os valores de um mensurando caracterizados pela utilização de um padrão de referência. Considerando-se a calibração prevista no escopo desse trabalho, essa foi realizada logo após a modelagem do processo de formação de imagens da montagem estereoscópica, mantendo-se fixas as condições ambientais do laboratório, o regime de funcionamento dos dispositivos, bem como o alinhamento dos sistemas de coordenadas do sistema de medição e da máquina de medir por coordenadas. Teve-se como objetivo, desse modo, inferir com relação ao máximo desempenho metrológico do protótipo por meio do controle das variáveis extrínsecas do processo.

Nesse sentido, na Tabela 8 são apresentadas as estimativas para os valores da tendência $(Td(d_X), Td(d_Z))^T$, da incerteza da tendência $(U_{Td}(d_X), U_{Td}(d_Z))^T$, da repetitividade $(RR(d_X), RR(d_Z))^T$ e da incerteza de medição do SMC para cada ponto de calibração, sendo esses atributos determinados tomando-se como base a incerteza de medição do SMP (Anexo A - U_{SMP}) e as diferenças observadas entre os termos $(d_X(SMC), d_Z(SMC))^T$ indicados pelo SMC e os termos $(d_X(SMP), d_Z(SMP))^T$ definidos pelo SMP para cada uma das três repetições realizadas. Paralelamente, encontra-se exposto também o número de graus de liberdade efetivos (v_{ef}) para cada termo expandido por meio do fator de abrangência definido para um intervalo de confiança de 95%, onde inf é dado para $v_{ef} > 100$.

Na Figura 54, por sua vez, as estimativas dos valores da tendência $(Td(d_X), Td(d_Z))^T$, da incerteza da tendência $(U_{Td}(d_X), U_{Td}(d_Z))^T$ e da repetitividade $(RR(d_X), RR(d_Z))^T$ encontram-se representadas graficamente para cada ponto de calibração. Nesse diagrama, os atributos estão dispostos em escala ampliada de acordo com a indicação da legenda para viabilizar a visualização da magnitude relativa entre os mesmos.

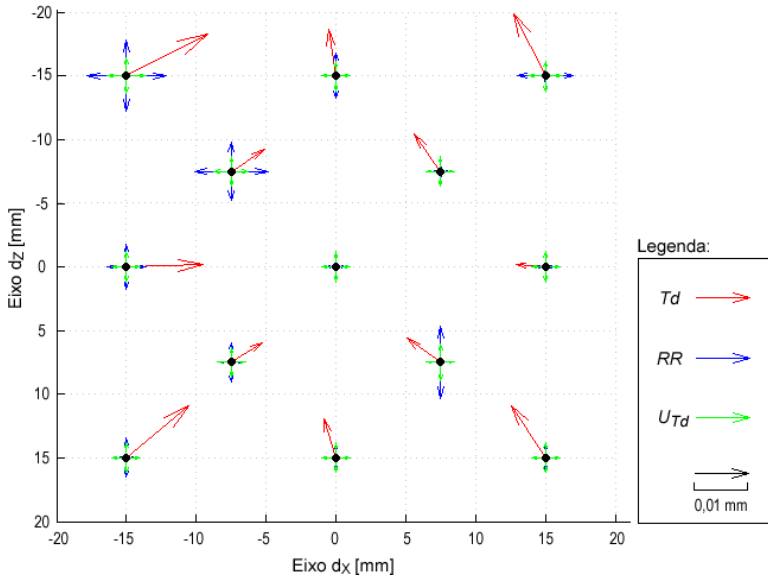


Figura 54: Representação gráfica dos resultados referentes à calibração do protótipo em ambiente laboratorial.

Em relação aos resultados referentes ao procedimento de calibração delineado nesse trabalho, um primeiro aspecto a ser observado diz respeito às características inerentes aos erros de tendência:

- **Magnitude dos erros de tendência:** verifica-se que a magnitude dos erros de tendência gerados pelo protótipo aumenta com o distanciamento em relação ao centro da FM, de modo que nas porções mais externas atinge-se o nível de aproximadamente $0,04 \text{ mm}$. Tal fato é caracterizado essencialmente por um erro de ganho no processo de identificação de deslocamentos relativos;
- **Padrão associado aos erros de tendência:** observa-se que na direção

do eixo d_x o padrão de crescimento associado assemelha-se ao comportamento de uma função par em que os valores indicados pelo sistema são menores que os deslocamentos reais. Por outro lado, quanto ao padrão de crescimento dos erros sistemáticos na direção do eixo d_z , esse assemelha-se ao comportamento de uma função ímpar, sendo os valores indicados pelo sistema ora maiores, ora menores que os deslocamentos reais. Analisando-se o problema, pode-se dizer que ainda não se sabe qual o real motivo que ocasiona essa discrepância, uma vez que um comportamento equivalente para as direções d_x e d_z era inicialmente esperado;

- **Incerteza associada à determinação dos erros de tendência:** verifica-se que tal aspecto, quantificado pela incerteza da tendência, não inviabilizou a identificação das características inerentes aos erros sistemáticos. Esse fato se deve ao elevado nível de exatidão associado aos deslocamentos realizados por meio do padrão representado pela máquina de medir por coordenadas, à baixa variabilidade dos resultados disponibilizados pelo sistema de medição projetado frente às componentes sistemáticas, bem como em função do controle das variáveis extrínsecas;
- **Aplicação de correções:** como regra geral, a correção dos erros de tendência pode ser realizada quando as condições do ambiente de operação forem semelhantes às do ambiente em que a calibração fora delineada, ou ainda, quando as características do ambiente não exercem influência significativa nos resultados das medições (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008). No entanto, em relação ao protótipo desenvolvido, se comprovado que o padrão inerente aos erros de tendência expostos previamente depende exclusivamente das características intrínsecas do sistema, a correção dessa parcela permanente possivelmente pode ser realizada. Adicionalmente, um estudo referente à ação das fontes de incerteza extrínsecas deve ser feito visando-se implementar estratégias de correção mais abrangentes considerando-se o comportamento do sistema no local real de operação.

No que se refere à repetitividade das medições delineadas durante a calibração, um conjunto de características importantes podem ser identificadas, dentre elas:

- **Magnitude da repetitividade:** observa-se que a magnitude da repetitividade é, de modo geral, inferior quando comparada à dos erros

de tendência, apresentando-se com valor máximo de aproximadamente $0,015\text{ mm}$;

- **Padrão associado à repetitividade:** não é gerado um padrão regular em relação à magnitude desse parâmetro para os distintos pontos de calibração avaliados, indo de encontro à suposição inicial de que poderia ser encontrado um aspecto homogêneo. Tal característica se deve à mudanças abruptas nos valores dos fatores de abrangência utilizados para a expansão dos termos $rr(d_X)$ e $rr(d_Z)$, em função da variação do número de graus de liberdade efetivos. Como exemplo, o valor do fator de abrangência baseado na utilização de uma distribuição t para quatro graus de liberdade e intervalo de confiança de 95% é de $k(p = 0,05, v_{ef} = 4) = 2,77$. Por outro lado, o valor do fator de abrangência baseado na utilização de uma distribuição t de dois graus de liberdade e intervalo de confiança de 95% sobe para $k(p = 0,05, v_{ef} = 3) = 4,30$. Para atenuar essas diferenças, uma nova calibração deve ser realizada aumentando-se o número de repetições para cada ponto de controle;
- **Minimização da variabilidade das medições:** em função das características do procedimento de calibração delineado nesse trabalho, acredita-se que a variabilidade do resultado das medições se deve principalmente ao método de acoplamento do módulo móvel baseado na utilização do sistema SFI, ao ruído eletrônico da câmera e aos demais fatores provenientes do processamento digital dos dados adquiridos. Uma sugestão de procedimento para a minimização dessa componente de erro que possivelmente não implicaria em tempo adicional significativo caracteriza-se pela captura e análise de uma sequência de imagens para cada ponto de vista adotado durante a medição. Deve-se observar, no entanto, que a parcela inerente ao sistema SFI não seria considerada nesse caso, o que pode ser resolvido somente por meio da alternância entre os pontos de fixação para cada repetição.

Por fim, tomando-se como base os procedimentos descritos na Seção 5.3.2 em que foi considerado o delineamento de três repetições para a medição de referenciamento no tempo inicial (ponto central da FM), a ausência da aplicação de correções para os erros sistemáticos e a realização de uma única medição futura⁴, foi caracterizada para

⁴Buscou-se prover uma estimativa conservadora para a incerteza do sistema de medição, visto que procedimentos que objetivam a minimização desse parâmetro ainda podem ser realizados.

as condições específicas de calibração a incerteza inerente ao processo de monitoração de deslocamentos em fios de pêndulo por meio da utilização do protótipo desenvolvido (Equação 5.7). Nesse contexto, torna-se importante verificar que, especialmente para a região central da FM definida por $\{d_X \in \mathfrak{R} : -7,5 \text{ mm} \leq d_X \leq 7,5 \text{ mm}\}$ e $\{d_Z \in \mathfrak{R} : -7,5 \text{ mm} \leq d_Z \leq 7,5 \text{ mm}\}$, o sistema possibilita a identificação de deslocamentos para um grau de incerteza que gira em torno de pouco mais da metade do valor estabelecido como requisito metrológico de projeto. Quando considerada uma porção mais abrangente da FM, por sua vez, o nível de incerteza basicamente acompanha o padrão de crescimento dos erros de tendência, encontrando-se acima do limite máximo de $0,05 \text{ mm}$ apenas para o ponto de calibração localizado na extremidade $(-15,000, -15,000)^T \text{ mm}$.

6.3.3 Realização de avaliações preliminares do protótipo em uma estação de medição desenvolvida para testes

De acordo com as características do diagrama apresentado na Figura 53, as estimativas dos valores de incerteza obtidas por meio do procedimento de calibração podem não representar o comportamento do protótipo quando impostas as reais condições de uso para o mesmo. Tal fato ocorre uma vez que uma série de fatores não previstos por meio da configuração experimental adotada passam a atuar quando modificado o cenário de operação, contaminando, desse modo, o resultado das medições. Para tanto, após a calibração do sistema em ambiente laboratorial, todo o conjunto foi posicionado juntamente a um protótipo de pêndulo para a realização de testes adicionais visando-se verificar se a influência do iluminamento e da temperatura do ambiente no resultado das medições realizadas por meio da utilização da montagem esteoscópica é significativa⁵. Paralelamente, foi delineado também um estudo comparativo entre o sistema desenvolvido e o coordenômetro portátil empregado atualmente na Usina de Itaipu.

Como descrito na Seção 5.3.3, as avaliações foram realizadas por meio da concepção de distintas configurações experimentais, por meio das quais foram criadas diferentes condições para a determinação das coordenadas ortogonais de um mensurando estático. Nesse contexto, na Tabela 9 são apresentados os valores do iluminamento, da temperatura e das estimativas das coordenadas $(d_X, d_Z)^T$ do fio do pêndulo para cada uma das quatro configurações experimentais adotadas.

⁵A influência do iluminamento e da temperatura do ambiente foi avaliada em função da disponibilidade de materiais para o controle e monitoração dessas grandezas.

Tabela 9: Resultados das avaliações preliminares do protótipo em uma estação de medição desenvolvida para testes.

	Configuração 01		Configuração 02		Configuração 03		Configuração 04	
	21 ± 2		21 ± 2		28 ± 2		23 ± 3	
Temperatura [°C]								
Iluminamento [lx]	Aprox. 460		Aprox. 0, 5		Aprox. 460		Aprox. 460	
Repetição	d_x [mm]	d_z [mm]	d_x [mm]	d_z [mm]	d_x [mm]	d_z [mm]	d_x [mm]	d_z [mm]
1	-0,009	-0,001	-0,006	-0,005	0,023	0,007	0,020	0,050
2	-0,002	0,007	-0,003	-0,007	0,013	0,020	-0,080	0,050
3	-0,002	-0,006	0,006	0,024	0,016	0,020	0,020	-0,150
4	0,014	0,007	-0,001	0,012	0,019	0,013	0,120	0,050
5	0,012	-0,014	0,003	-0,013	0,002	0,024	-0,080	0,150
6	-0,021	0,018	-0,006	-0,029	0,001	0,025	0,020	-0,050
7	-0,003	0,016	0,018	-0,016	0,006	0,008	-0,080	-0,050
8	0,016	-0,012	0,004	-0,022	0,020	0,003	0,120	-0,050
9	-0,012	-0,013	-0,009	0,013	0,029	0,025	0,020	-0,050
10	0,007	-0,002	-0,004	0,009	0,010	0,021	-0,080	0,050
Média	0,000	0,000	0,000	-0,003	0,014	0,017	0,000	0,000
Desvio Pad.	0,012	0,012	0,008	0,017	0,009	0,008	0,079	0,085

Na Figura 55, por sua vez, as estimativas das coordenadas $(d_x, d_z)^T$ do fio do pêndulo para cada uma das configurações experimentais encontram-se representadas graficamente por meio da utilização de diagramas de caixa.

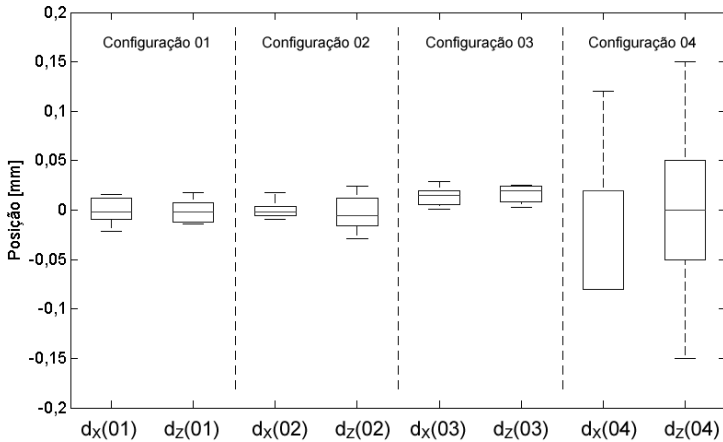


Figura 55: Representação gráfica dos resultados referentes às avaliações preliminares do protótipo (Configurações 01, 02 e 03) e do coordenômetro utilizado em Itaipu (Configuração 04) em uma estação de testes.

6.3.3.1 Avaliação da influência do iluminamento do ambiente

O estudo da influência das condições de iluminamento do ambiente sobre o resultado das medições delineadas por meio da utilização da montagem estereoscópica projetada torna-se de suma importância uma vez que o valor desse parâmetro extrínseco pode variar significativamente de uma estação de medição para outra. Em função dessa característica, o protótipo foi avaliado tomando-se como base duas configurações experimentais, de modo que primeiramente foram realizadas dez repetições referentes à determinação das coordenadas ortogonais da posição de um mensurando estático para uma condição de iluminamento de aproximadamente 460 lx (Configuração 01) e, após, outras dez repetições referentes à determinação das coordenadas ortogonais da posição do mesmo mensurando para uma condição de iluminamento de aproximadamente $0,5 \text{ lx}$ (Configuração 02). Buscou-se reproduzir, assim, os extremos referentes às circunstâncias típicas de iluminamento que podem ser encontradas em campo – desde a penumbra até o ambiente homogeneamente iluminado.

Tomando-se como base os dados gerados por meio dos experimentos delineados, puderam ser observados os fatores listados abaixo (Tabela 10):

- **Comparação entre médias:** não foi identificada a presença de componentes sistemáticas estatisticamente significativas em relação às estimativas da posição do fio do pêndulo para as distintas configurações avaliadas;
- **Comparação entre variâncias:** não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas em relação às variâncias das estimativas da posição do fio do pêndulo para as distintas configurações avaliadas.

Nesse contexto, há um possível indício de que a influência das condições de iluminação do ambiente no resultado das medições delineadas por meio da utilização do protótipo desenvolvido não apresenta-se como sendo um aspecto crítico frente ao nível de incerteza definido como limite para o cumprimento da função requerida. Tal característica é proporcionada fundamentalmente pela preparação do fio do pêndulo e esfera de referência em conjunto com a utilização do sistema de iluminação auxiliar *back-light*, o qual garante a incidência de luz em direção à abertura da lente com uma intensidade superior quando comparada à da luz do ambiente. Adicionalmente, no entanto, recomenda-se a realização de estudos referentes à avaliação da influência dos distintos tipos de lâmpada existentes, bem como em relação à incidência direta de luz sobre os objetos retratados por meio de fontes não pertencentes ao sistema.

Tabela 10: Comparações das médias e das variâncias dos resultados gerados pelas Configurações 01 e 02 para os eixos d_X e d_Z .

	Eixo d_X	Eixo d_Z
p-valor (teste-t)	0,974	0,608
p-valor (teste-F)	0,234	0,250

6.3.3.2 Avaliação da influência da temperatura do ambiente

A variação da temperatura do ambiente de operação em relação ao patamar definido como referência na etapa de modelagem ocasiona a modificação das dimensões da plataforma de montagem. Tal aspecto, conseqüentemente, repercute na alteração dos valores dos parâmetros que modelam esse dispositivo. Assim, foi delineado um estudo baseado na

análise dos dados gerados pelas seguintes configurações experimentais: primeiramente foram realizadas dez repetições referentes à determinação das coordenadas ortogonais da posição de um mensurando estático para uma condição de temperatura reduzida de $21 \pm 2^{\circ}\text{C}$ (Configuração 01) e, após, outras dez repetições referentes à determinação das coordenadas ortogonais da posição do mesmo mensurando para uma condição de temperatura elevada de $28 \pm 2^{\circ}\text{C}$ (Configuração 03). Teve-se como objetivo, desse modo, quantificar o efeito da variação das dimensões da base de referência em função da oscilação da temperatura do ambiente nos resultados das medições delineadas utilizando-se o protótipo.

Em relação à avaliação estatística, verificaram-se os fatores listados abaixo (Tabela 11):

- **Comparação entre médias:** foi identificada a presença de componentes sistemáticas estatisticamente significativas em relação às estimativas da posição do fio do pêndulo para as distintas configurações avaliadas;
- **Comparação entre variâncias:** não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas em relação às variâncias das estimativas da posição do fio do pêndulo para as distintas configurações avaliadas.

Deve ser observado, no entanto, que embora a oscilação da temperatura do ambiente tenha exercido influência significativa no desempenho metrológico da montagem estereoscópica, a variação desse parâmetro extrínseco ao longo do tempo no interior das galerias de uma barragem normalmente se dá na ordem de poucos graus visto que o isolamento proporcionado pela grande massa de concreto origina uma condição de elevada inércia térmica. Desse modo, o delineamento da modelagem das plataformas de montagem em condições de temperatura próximas das de operação pode contribuir para a minimização desses efeitos indesejáveis nos resultados das medições. Paralelamente, conhecendo-se o coeficiente de expansão térmica do material empregado na fabricação desses componentes, acredita-se que funções de correção também podem ser identificadas e implementadas.

6.3.3.3 Comparação com o coordenômetro portátil utilizado em Itaipu

Finalmente, caracterizou-se um experimento baseado na confrontação de duas configurações experimentais, de modo que primeiramente foram delineadas dez repetições referentes à determinação das coordenadas ortogonais da posição de um mensurando estático por meio da utilização

Tabela 11: Comparações das médias e das variâncias dos resultados gerados pelas Configurações 01 e 03 para os eixos d_X e d_Z .

	Eixo d_X	Eixo d_Z
p-valor (teste- t)	0,010	0,002
p-valor (teste-F)	0,429	0,303

do protótipo desenvolvido (Configuração 01) e, após, para as mesmas condições de temperatura e iluminação, outras dez repetições referentes à determinação das coordenadas ortogonais da posição do mesmo mensurando por meio da utilização do coordenômetro portátil adotado atualmente em Itaipu (Configuração 04). Analisando-se os dados gerados, foi identificada a presença de diferenças estatisticamente significativas em relação às variâncias das estimativas da posição do fio do pêndulo quando considerados os distintos sistemas de medição avaliados (Tabela 12). Nesse sentido, tornou-se possível demonstrar a presença de um ganho substancial proporcionado pela automatização do processo em relação à variabilidade dos resultados – leitura antes realizada por meio do julgamento do usuário é agora delinada sistematicamente por meio do processamento digital de imagens.

Tabela 12: Comparação das variâncias dos resultados gerados pelos Configurações 01 e 04 para os eixos d_X e d_Z .

	Eixo d_X	Eixo d_Z
p-valor (teste-F)	0,000	0,000

Adicionalmente, um aspecto importante a ser abordado diz respeito ao fato de que em todas as configurações experimentais em que foi avaliada a montagem estereoscópica, a variabilidade dos resultados (quantificada pelo desvio padrão) apresentou-se maior quando comparada aos níveis de repetitividade obtidos por meio da calibração delineada em laboratório. No entanto, acredita-se que essa característica possivelmente se não deva a uma queda de desempenho do sistema, mas sim, à presença de vibrações ocasionadas pelo condicionador de ar localizado ao lado do ponto de fixação do protótipo de pêndulo. Em campo, de acordo com relatos de técnicos leituristas, esse problema se repete devido a presença de correntes de ar impulsionadas pelos sistemas de ventilação instalados no interior da estrutura. Assim como descrito na Seção 6.3.2, um procedimento para a minimização dessa componente de erro que possivelmente não implicaria em tempo adicional significativo é

dados pela captura e análise de uma sequência de imagens para cada ponto de vista adotado durante a medição. É determinado, desse modo, uma tendência central em relação à posição do mensurando.

6.4 Análise comparativa

Na Tabela 13 é traçado, sob o ponto de vista qualitativo, um diagrama comparativo com relação aos parâmetros exatidão, tempo necessário para o delineamento de uma medição e custo, considerando-se o emprego dos coordenômetros portáteis, dos automatizados e da nova concepção baseada na utilização do sistema proposto. Como pode ser observado, o sistema estereoscópico projetado caracteriza-se como um aprimoramento em relação ao modelo portátil atualmente empregado, preservando-se, por outro lado, o custo associado.

Tabela 13: Diagrama comparativo com relação aos parâmetros exatidão, tempo de medição e custo para os distintos tipos de coordenômetros considerados (Análise qualitativa).

	Portátil	Automatizado	Sistema proposto
Exatidão	Baixa	Alta	Alta
Tempo de medição	Alto	Baixo	Médio
Custo	Baixo	Alto	Baixo

De modo geral, a exatidão do sistema projetado foi considerada “Alta” visto que a incerteza de medição observada durante os experimentos de avaliação realizados em laboratório é comparável à dos sistemas automatizados – foi atingido o requisito metrológico para grande parte da faixa de medição estabelecida previamente. Deve-se observar que testes adicionais de avaliação ainda devem ser realizados.

Além desses aspectos, pode-se considerar que foi obtida uma melhora significativa para o tempo de medição em relação aos sistemas portáteis, uma vez que, após a fixação da câmera, o processo é delineado automaticamente sem a participação efetiva do operador no processo de alinhamento ao foi do pêndulo. A classificação “Médio” foi dada, no entanto, visto que torna-se necessário o encaminhamento de um operador até o local no interior da barragem, o que não necessariamente ocorre utilizando-se o sistema automatizado.

Por fim, o custo associado ao sistema proposto foi considerado “Baixo” já que um único sistema portátil pode atender a uma série de bases

de referência, diferentemente do sistema automatizado que requer um conjunto de módulos e a disposição de redes de comunicação. Para se inferir com relação ao ganho gerado em relação à tecnologia automatizada, foi delineada uma análise preliminar de custos considerando-se o cenário da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional em que encontram-se dispostas ao longo da estrutura um total de 89 estações de medição de pêndulos. Para tanto, foram considerados duas alternativas para monitoração, sendo elas:

- **Utilização de módulos portáteis:** para a estimativa dos custos relacionados à implantação de um sistema de monitoração baseado na utilização de módulos portáteis foram considerados, nesse primeiro momento, os valores referentes aos componentes adquiridos durante esse trabalho para a montagem do protótipo. Previu-se a utilização de quatro módulos móveis e a disposição de uma base de referência em cada estação de medição (Tabela 14);
- **Utilização de módulos fixos:** para a concepção de uma estimativa preliminar para o custo de implantação de um sistema de monitoração baseado na utilização de módulos fixos, por sua vez, considerou-se a replicação do valor inerente a um módulo portátil para cada uma das bases de referência contidas na barragem (Tabela 15).

Tabela 14: Estimativa de custos baseada na aquisição de módulos portáteis.

	Custo unitário	Quantidade	Total (R\$: 2009)
Base de ref.	R\$ 660,00	89	R\$ 58.740,00
Módulo	R\$ 6.500,00	4	R\$ 26.000,00
Total	–	–	R\$ 84.740,00

Tabela 15: Estimativa de custos baseada na aquisição de módulos automatizados.

	Custo unitário	Quantidade	Total (R\$: 2009)
Base de ref.	R\$ 660,00	89	R\$ 58.740,00
Módulo	R\$ 6.500,00	89	R\$ 578.500,00
Total	–	–	R\$ 637.240,00

Tomando-se como base a análise realizada, pode-se observar que uma redução fortemente significativa de custos de aquisição (86%) é proporcionada por meio da implementação de um sistema baseado na utilização de módulos portáteis – elemento de maior custo associado. É evidente que um estudo financeiro mais abrangente que leve em consideração demais parâmetros (manutenção, operação, aquisição de equipamentos auxiliares e número de bases dispostas na barragem) ainda deve ser feito para se avaliar o real custo-benefício de cada sistema.

6.5 Considerações finais

Tomando-se como base o protótipo desenvolvido, tornou-se possível delinear um conjunto de avaliações teóricas e experimentais, de modo que foi constituída uma base de inferências com relação às características metrológicas e operacionais que possivelmente serão expressadas por um sistema móvel e automatizado destinado à monitoração de pêndulos instalados em barragens. Na Seção 7 são apresentadas as conclusões obtidas por meio desse estudo preliminar referentes à aplicabilidade da técnica abordada. De imediato, mais testes de verificação podem ser realizados utilizando-se as ferramentas geradas visando-se entender por completo todos os fenômenos envolvidos para que, posteriormente, o processo possa ser operacionalizado e implementado em campo para o usuário final.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O sistema de instrumentação de uma barragem tem como função fornecer informações confiáveis relacionadas ao comportamento da estrutura nas diversas fases de sua vida, sendo elas a construção, o primeiro enchimento e a sua operação ao longo do tempo (BROWNJOHN, 2007). No entanto, o fato de existirem instrumentos de auscultação instalados na barragem não garante a detecção precoce de problemas, tornando-se necessária a constante avaliação de quais são os equipamentos ainda confiáveis, quais podem ser desativados em definitivo e quais devem ser substituídos por outros novos (SILVEIRA, 2006).

Nesse contexto, como pôde ser observado nesse trabalho, existe uma demanda relacionada ao desenvolvimento de um novo instrumento de medição destinado à monitoração das coordenadas ortogonais da posição de fios de pêndulos diretos e invertidos instalados em barragens. Para tanto, a partir de uma série de requisitos metroológicos e operacionais definidos em conjunto com especialistas nas áreas de metrologia e de segurança de barragens, propôs-se a construção e a avaliação das características metroológicas de um protótipo como forma de viabilizar o estudo da aplicabilidade da técnica estereoscópica para a concepção de uma alternativa portátil e automatizada aos modelos de coordenômetros atualmente disponíveis no mercado.

Em relação ao protótipo desenvolvido, foi caracterizada uma configuração econômica em que bases de referência deverão ser posicionadas ao longo da estrutura nas estações de medição, sendo as mesmas monitoradas por meio da utilização de um módulo móvel a ser acoplado em cada um desses locais. Paralelamente, uma série de dispositivos e adaptações foram concebidos para que seja agregado em um mesmo sistema de medição a exatidão requerida para o processo de monitoração de deslocamentos de fios de pêndulos com a versatilidade inerente de um instrumento portátil que não cause condições de desconforto aos operadores. Tomando-se como base a análise preliminar de custos realizada considerando-se o cenário de Usina de Itaipu, observou-se que a implementação de um sistema de monitoração de pêndulos baseada na utilização de dispositivos móveis promove uma minimização significativa de custos (86%) em relação à disposição de coordenômetros automatizados em cada uma das estações de medição.

A modelagem do processo de formação de imagens da montagem estereoscópica foi feita em escala piloto tendo-se o objetivo de prover as

condições necessárias para a determinação dos valores de um conjunto de parâmetros que modelam o protótipo desenvolvido. Nesse sentido, os procedimentos relacionados à geração da coleção tridimensional de pontos, à detecção de pontos homólogos e à otimização foram considerados adequados para esse trabalho de acordo com o critério de aceitação empregado: dados reais de regressão permaneceram posicionados em torno das previsões geradas matematicamente pela equação de ajuste de acordo com uma distribuição normal sem a presença de distorções estatisticamente significativas. Por fim, foi apresentada uma sugestão preliminar de um método de modelagem abrangente que contempla a fase que antecede a instalação em campo (fase pré-instalação), bem como a fase de operação (fase pós-instalação) em que são delineadas operações de manutenção do sistema de medição. Tais adaptações tornam-se necessárias para a operacionalização dos procedimentos referentes à modelagem do processo de formação de imagens considerando-se o escopo de uma aplicação real em uma barragem. O processo poderia ser simplificado por meio do projeto de um sistema portátil baseado na utilização de uma segunda câmera, o qual torna a montagem estereoscópica independente das características particulares de cada base de referência.

Os procedimentos de medição a serem efetuados por meio da configuração projetada foram caracterizados pela concepção de uma sequência de passos que vão desde a correta instalação em campo, até a aquisição de dados e a posterior análise dos mesmos. Buscou-se, por meio dessas ações, expressar as coordenadas ortogonais que definem a posição de um fio de pêndulo monitorado de acordo com as características definidas para o mensurando e por meio de um método robusto e sistemático baseado no processamento digital das imagens adquiridas. Em todos os experimentos de avaliação realizados, o método proposto apresentou-se estável e não tornou-se necessário o delineamento de reajustes quando modificadas as condições do ambiente.

Uma vez finalizado o projeto e a construção do protótipo, o mesmo foi submetido a um procedimento de calibração em que objetivou-se inferir com relação ao seu máximo desempenho metrológico por meio do controle das variáveis extrínsecas associadas ao processo de monitoração. Nesse contexto, foram identificadas características referentes à magnitude e ao padrão inerente aos erros de tendência e aos erros de dispersão dos resultados, bem como discutida a possibilidade da aplicação de possíveis correções. De modo geral, considerando-se uma estimativa conservadora baseada no delineamento de três repetições para a medição de referenciamento no tempo inicial (ponto central da FM), a ausência da aplicação de correções para os

erros sistemáticos e a realização de uma única medição futura, a incerteza de medição gerada pelo processo de monitoração de deslocamentos em fios de pêndulo por meio da utilização do sistema desenvolvido (Equação 5.7) enquadrou-se em relação ao valor de $0,05 \text{ mm}$ estabelecido como requisito metrológico de projeto para toda a FM avaliada, com exceção do ponto de calibração localizado na extremidade $(-15,000, -15,000)^T \text{ mm}$, em que atingiu-se o nível de $0,055 \text{ mm}$. Adicionalmente, quando considerada a região central da FM definida por $\{d_X \in \mathfrak{R} : -7,5 \text{ mm} \leq d_X \leq 7,5 \text{ mm}\}$ e $\{d_Z \in \mathfrak{R} : -7,5 \text{ mm} \leq d_Z \leq 7,5 \text{ mm}\}$, o sistema possibilitou a identificação de deslocamentos para um grau de incerteza que girou em torno de $0,03 \text{ mm}$. Acredita-se, no entanto, que um processo de adequação pode ser realizado por meio da implementação de uma rotina de correção dos erros sistemáticos intrínsecos ao sistema, ou ainda por meio do delineamento de um procedimento de medição mais robusto baseado na minimização dos erros de dispersão.

Posteriormente, visto que os resultados originados pela calibração podem não representar o comportamento do sistema em um ambiente real de medição, o mesmo foi submetido a um ensaio baseado na caracterização de distintos cenários de operação visando-se avaliar, nesse primeiro momento, a influência do iluminamento e da temperatura do ambiente no resultado das medições. Em relação ao iluminamento, foi observado um possível indício de que essa variável extrínseca não apresenta-se como um fator crítico frente ao nível de incerteza estabelecido como requisito, já que não foi identificado o surgimento de componentes de erro estatisticamente significativas quando modificadas as condições de operação de um patamar inicial de $0,5 \text{ lx}$ até o nível de 460 lx para lâmpadas do tipo fluorescente. Por outro lado, notou-se que a modificação das dimensões da base de referência em função da oscilação da temperatura do ambiente determinou o aparecimento de componentes sistemáticas significativas de aproximadamente $0,015 \text{ mm}$ na direção dos eixos d_X e d_Z em relação às estimativas da posição do fio do pêndulo para as distintas configurações avaliadas: incremento de $21 \pm 2^\circ\text{C}$ para $28 \pm 2^\circ\text{C}$. Tal discrepância, por sua vez, possivelmente pode ser minimizada por meio da modelagem do processo de formação de imagens da montagem estereoscópica em condições de temperatura próxima da de operação, ou ainda, por meio da aplicação de uma função de correção baseada na utilização do coeficiente de expansão térmica do material utilizado para a fabricação da plataforma de montagem. Além desses aspectos, foi delineado também um estudo comparativo entre o sistema desenvolvido e o coordenômetro portátil empregado atualmente na Usina de Itaipu. Foi demonstrado, desse modo, a

presença de um ganho substancial proporcionado pela automatização do processo em relação à variabilidade dos resultados visto que o critério adotado para a identificação do mensurando, antes realizado pelo usuário em campo, é agora delineado sistematicamente por meio do processamento digital do par de imagens adquiridas.

É evidente que torna-se necessário a realização de testes adicionais de avaliação para que a configuração proposta nesse trabalho possa finalmente ser adaptada para utilização por meio dos usuários finais. Como exemplo, de acordo com Silveira (2006), uma nova classe de instrumento de medição destinada à monitoração do comportamento de barragens pode ser efetivamente empregada em campo somente após uma série de ensaios em escala laboratorial, bem como após o delineamento de campanhas de medição “*in loco*” considerando-se as características específicas de cada porção da estrutura para a identificação de possíveis falhas de funcionamento e para o acompanhamento do desempenho ao longo do tempo. Nesse contexto, são apresentados a seguir algumas sugestões de trabalhos futuros que não foram contemplados no escopo dessa dissertação:

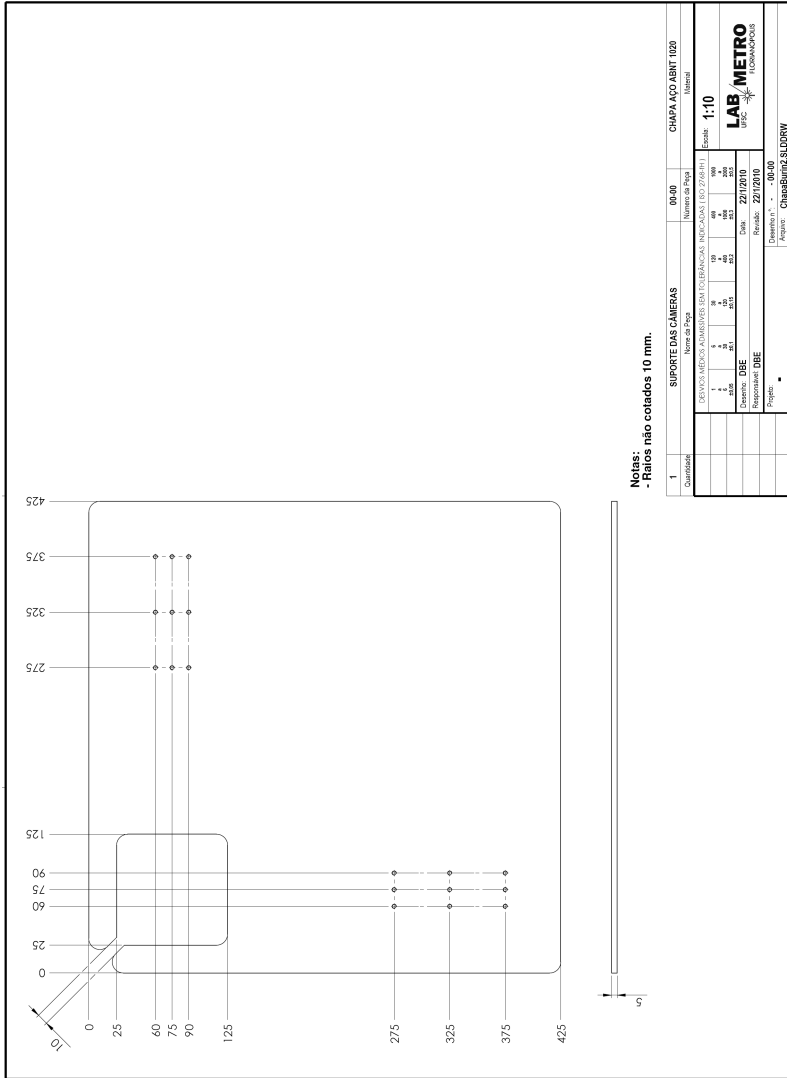
- Implementar e avaliar método de modelagem abrangente considerando-se um escopo real de operação baseado na utilização de múltiplas bases de referência e módulos portáteis de medição;
- Avaliar a viabilidade metrológica e econômica da concepção de um módulo móvel baseado na utilização de uma estrutura rígida e duas câmeras visando-se maximizar a versatilidade do processo de modelagem das montagens estereoscópicas;
- Avaliar o desempenho do sistema quando este encontra submetido aos distintos tipos de lâmpada existentes, bem como quando há a incidência direta de luz sobre os objetos retratados por meio de fontes não pertencentes ao sistema;
- Avaliar de modo abrangente a influência da temperatura no resultado das medições e identificar/avaliar uma função de correção para a minimização dos efeitos indesejáveis;
- Avaliar a influência da umidade do ambiente no desempenho do sistema de medição desenvolvido e pesquisar, se necessário, alternativas para a minimização dos efeitos indesejáveis;
- Projetar, especificar componentes e construir um modelo móvel que permita agregar as características referentes à ergonomia, à resistência

contra choques, à incorporação de um módulo para processamento embarcado e à alimentação sem cabo para que o dispositivo possa ser operado em campo de acordo com os requisitos definidos;

- Delinear testes não supervisionados em campo com o auxílio de técnicos leituristas paralelamente aos coordenômetros do tipo portátil e do tipo automatizado para a realização de comparações entre os resultados ao longo do tempo;
- Desenvolver um *software* de medição amigável ao leiturista e à forma de medição em prática na Usina de Itaipu;
- Realizar análise financeira abrangente comparando-se as diferentes alternativas a serem implementadas na monitoração de pêndulos em barragens.

Por fim, de acordo com o estudo realizado até o momento, pôde-se concluir que a técnica de medição baseada em estereoscopia apresenta-se promissora para a concepção de um módulo de monitoração de pêndulos portátil e automatizado orientado aos requisitos de projeto definidos por especialistas e usuários, visto que a avaliação metrológica demonstrou um avanço significativo em relação aos demais sistemas portáteis disponíveis no mercado e que, possivelmente, a operacionalização dos procedimentos envolvidos é possível considerando-se o atual patamar tecnológico. Promoveu-se, desse modo, uma contribuição fundamental para a área de segurança de barragens, em que acidentes podem ocasionar consequências devastadoras.

APÊNDICE A – PROJETO DA PLATAFORMA DE MONTAGEM

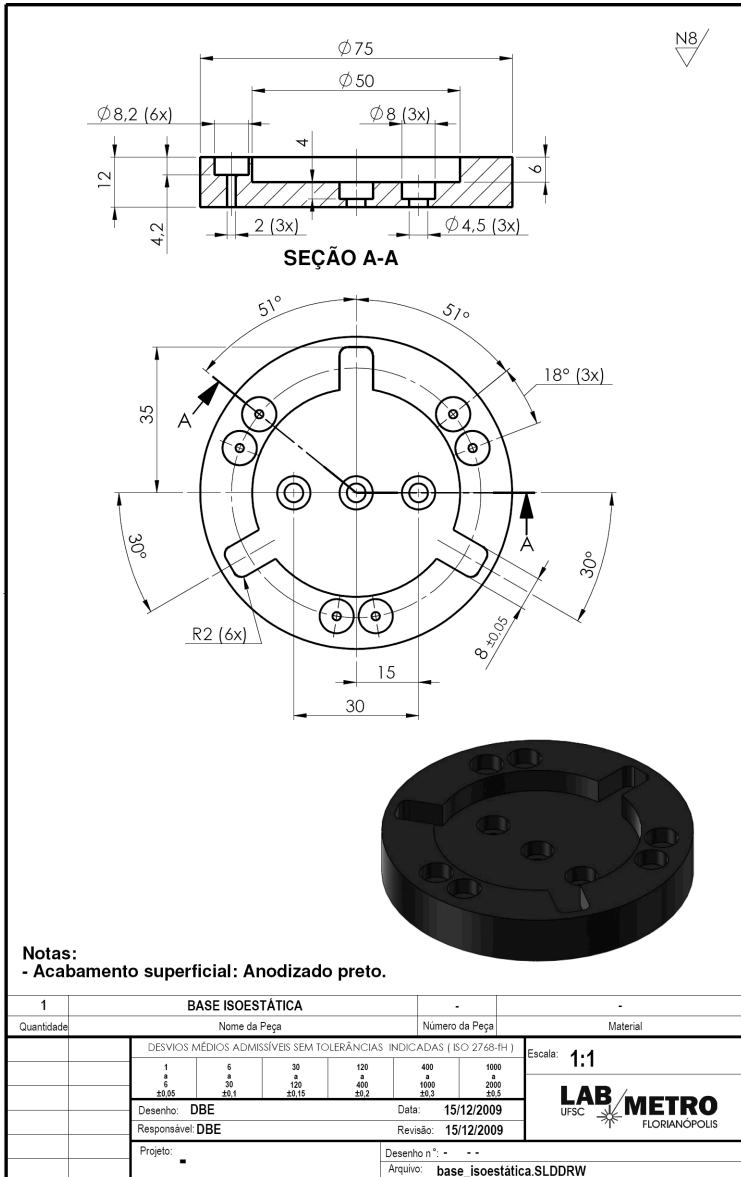


Notas:
- Raios não cotados 10 mm.

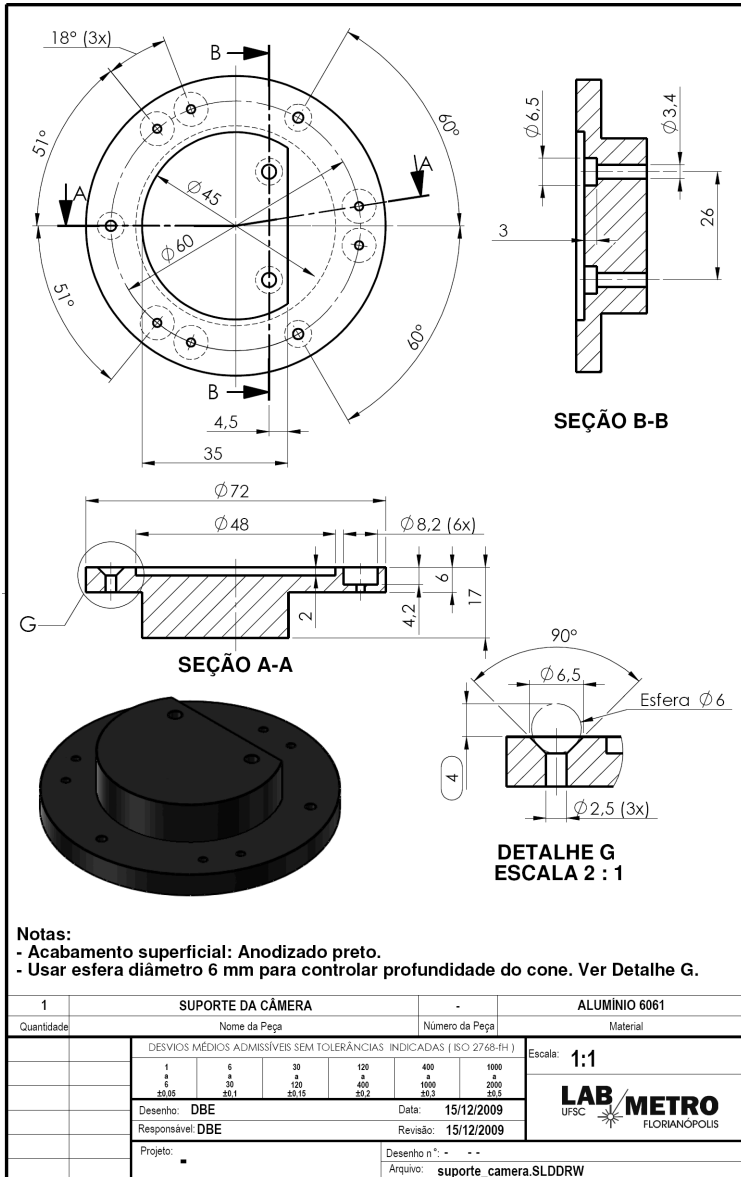
1	SUPOORTE DAS CÂMERAS	Nome do Peça	00-00	CHAPA AÇO ABNT 1020
Quantidade		Nome do Peça	00-00	Material
		Projeto	PROJ. 001 (13/07/17)	Escala: 1:10
		Desenho	DBE	Data: 22/02/10
		Responsável	DBE	Revisão: 22/02/10
		Projeto		Desenho nº: 00-00
				Assinatura: ChagasBarbuz.SUDRW

LAB METRO
LTD. E
SUA
FILIAIS

**APÊNDICE B – PROJETO DA BASE DO SISTEMA DE FIXAÇÃO
ISOSTÁTICO**



**APÊNDICE C – PROJETO DO ACOPLAMENTO DO SISTEMA DE
FIXAÇÃO ISOSTÁTICO**



**APÊNDICE D – AJUSTE DOS VALORES DOS PARÂMETROS DO
CONJUNTO CAMERA-LENTE**

As especificações da câmera digital monocromática Prosilica[®], modelo GC1290, utilizada para a concepção do protótipo são apresentadas no site do fabricante (PROSILICA, 2010). No entanto, para dar-se início às operações, foram realizados ajustes nos valores de alguns parâmetros. Nesse sentido, os seguintes aspectos foram considerados:

- **Ganho:** parâmetro ajustado para o valor de 12 *dB*;
- **Resolução:** parâmetro ajustado para o valor máximo permissível, sendo igual à 1280×960 *pixels*;
- **Outros:** todos os demais parâmetros de ajuste permaneceram no modo *default* para operação realizada por meio do *software* de aquisição *GigE viewer*, versão 1.2, disponibilizado pelo fabricante.

As especificações da lente objetiva Computar[®], modelo M3Z1228C-MP, utilizada para a concepção do protótipo estão disponíveis no site do fabricante (COMPUTAR, 2010). Assim como para o caso da câmera, foram realizados ajustes para dar-se início às operações. Nesse caso, foram considerados os seguintes aspectos:

- **Comprimento focal (f):** primeiramente o conjunto câmera-lente foi posicionado sobre a plataforma de montagem por meio do sistema SFI. Após, tomando-se como base a distância entre a porção frontal da lente e o centro da abertura para passagem do fio do pêndulo da plataforma de montagem, o comprimento focal foi ajustado de modo a ser disponibilizado um campo de visão horizontal de 50 *mm*. Após, foi realizado o ajuste fino desse mesmo parâmetro por meio da focalização de um alvo de referência posicionado no mesmo local;
- **Abertura do diafragma ($f - number$):** para o ajuste desse parâmetro manteve-se o conjunto câmera-lente posicionado sobre a plataforma de montagem por meio do sistema SFI. Em seguida, a abertura do diafragma foi modificada para o seu valor mínimo e o sistema de iluminação *back-light* foi ligado. Nesse sentido, foram realizados incrementos no valor do parâmetro $f - number$ até o momento em que as imagens geradas estivessem aspecto totalmente claro e homogêneo (ausência de sombras nas bordas).

São apresentadas e discutidas na Seção 6.2.1 características importantes referentes ao leiaute da montagem estereoscópica, bem como em relação aos ajustes realizados nos valores dos parâmetros do conjunto camera-lente.

**ANEXO A – SÍNTESE DO CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DA
MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS**



**Laboratório de
METROLOGIA DIMENSIONAL
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO**

Calibração
NBR ISO/IEC
17025



CAL 0034

Certificado de Calibração

Data da Calibração: 18/11/09

Data da Emissão: 19/11/09

n. 5046/09

Página: 1 de 8

1. CONTRATANTE: FUNDAÇÃO CERTI
Campus da UFSC, s/n - Setor C - Florianópolis -SC

2. SOLICITANTE: O mesmo

3. MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS CALIBRADA:

3.1 Máquina de medir

Fabricante: Mitutoyo Modelo: Beyond A916

Tipo: Portal Acionamento: CNC

Nº Série (fabricante): 1328203

Nº Identificação (solicitante): RC3145

Curso dos eixos: X 900 Y 1600 Z 600 mm

Coeff. expansão térmica das escalas: $7,8 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$

Incremento digital das escalas: 0,1 µm

Software: MCOISMOS

Local: Laboratório de Medição por Coordenadas

Nº série do comando numérico: Não Consta

Incertezas 1D e 3D (especificação interna):

* 1D: $\pm (2,9 + 4,0 \cdot L / 1000) \mu\text{m}$, L em mm

* 3D: $\pm (3,9 + 4,0 \cdot L / 1000) \mu\text{m}$, L em mm

3.2 Cabeçote apalpador

Fabricante: Renishaw Modelo: PH10M

Número de série: 2W3533

Modelo do sensor: SP25M

Nº série do sensor: 2L8682

3.3 Apalpadores utilizados na calibração

Comprimentos em mm

	Comprimentos em mm	
	Haste	Extensão
Apalp. Horizontal	50	0
Apalp. Vertical	50	0
Demais posições:	50	50

Diâmetros dos sensores [mm]: 5 mm

3.4 Esfera padrão

Material: Cerâmica

Diâmetro: 30 mm

4. SÍNTESE DESTA CALIBRAÇÃO:

Conforme procedimentos internos, a incerteza de medição global encontrada para medição de comprimentos no espaço até 1020 mm é $(3,7 + 9,9 \cdot L / 1000) \leq 8,4 \mu\text{m}$, L em mm.

A incerteza global abrange as incertezas de todas as posições ensaiadas nesta calibração.

Valores de incerteza para condições específicas podem ser encontrados no item 9.

Este certificado genérico baseia-se nos resultados de acreditação pelo Copacertimetro, que avalia a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida. A Copacertimetro é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo do ILAC - International Laboratory Accreditation Cooperation, e do Acordo Bilateral de Reconhecimento Mútuo com a EA - European Cooperation for Accreditation. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições específicas, não sendo extensível a qualquer outro. Esta calibração não tem o caráter de instrumento de controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica. A CERTI autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral. O ajuste de instrumentos, quando realizado, não faz parte do escopo de acreditação do laboratório.

Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras - CERTI

RBC 01

Campus da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Setor C
CEP: 88040-970
Florianópolis - SC
Caixa Postal 5053

Tel.: +48 3239 2121
Fax: +48 3239 2119
metrologia@certi.org.br
www.certi.org.br

Fundação CERTI
CNPJ 76.626.363/0001-24
Insc. Est. 251.378.241
Insc. Mun. 50.111-5

De acordo com a síntese do certificado de calibração da máquina de medir por coordenadas, a incerteza de medição global da mesma para cada um dos eixos de medição pode ser representada por meio da Equação A.1:

$$U_{SMP} = 3,7 + \frac{L 9,9}{1000} \quad (\text{A.1})$$

onde L representa o comprimento em milímetros do deslocamento realizado.

Assim, tomando-se como base $L = 45 \text{ mm}$, o qual representa o maior deslocamento realizado no escopo desse trabalho, a incerteza associada ao posicionamento do braço de medição da máquina de medir por coordenadas foi representada pelo valor de $U_{SMP} = \pm 4 \mu\text{m}$, o qual é aproximadamente dez vezes menor em relação à incerteza definida como requisito na Seção 3.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-AZIZ, Y. I.; KARARA, H. M. Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry. In: *Symposium on Close-Range Photogrammetry*. [S.l.: s.n.], 1971. p. 1–18.
- ALBERTAZZI, A. *A Metrologia Óptica e a Medição de Formas 3D*. Abril 2010. Disponível em: <<http://www.photonita.com.br/>>.
- ALBERTAZZI, A.; SOUZA, A. de. *Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial*. [S.l.: s.n.], 2008.
- ARDITO, R.; MAIER, G.; MASSALONGO, G. Diagnostic analysis of concrete dams based on seasonal hydrostatic loading. *Engineering Structures*, v. 30, p. 3176–85, 2008.
- ARMANGUÉ, X.; SALVI, J.; BATLLE, J. A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation. *Pattern Recognition*, v. 35, p. 1616 – 35, 2000.
- BALBI, D. A. F.; CARIM, A. L. C.; MAGALHÃES, R. A. Inspetor sistema inteligente de controle e segurança de barragens. In: *II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica*. [S.l.: s.n.], 2003.
- BIPM; IEC; IFCC; ISO; IUPAC; IUPAP; OIML. *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição*. 3. ed. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, INMETRO, 2003. 120 p. Terceira edição brasileira em língua portuguesa.
- BLOOMENTHAL, J.; ROKNE, J. Homogeneous coordinates. *The Visual Computer: International Journal of Computer Graphics*, v. 11, p. 15–26, 1994.
- BOUGUET, J.-Y. *Camera Calibration Toolbox for Matlab*. September 2010. Disponível em: <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/>.
- BROWN, D. C. Close-range camera calibration. *PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING*, v. 37, n. 8, p. 855–866, 1971.
- BROWNJOHN, J. M. W. Structural health monitoring of civil infrastructure. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, v. 365, p. 589–622, 2007.

- COMPUTAR. *2/3" 12-36mm Varifocal, Manual Iris Megapixel (C Mount)*. Agosto 2010. Disponível em: <<http://computarganz.com/>>.
- EVANS, J. P. O. et al. The development of 3-d (stereoscopic) imaging systems for security applications. In: *Security Technology*. [S.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 1995.
- FANTIN, A. V. *Medição de formas livres tridimensionais por topogrametria*. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.
- FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION - FERC. *Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects*. [S.l.], 2008.
- FRASER, C. Automated vision metrology: a mature technology for industrial inspection and engineering surveys. In: *6th South East Asian Surveyors Congress*. [S.l.: s.n.], 1999.
- FREEDMAN, D.; PISANI, R.; PURVES, R. *Statistics*. 3. ed. New York — NY, USA: Norton, 1998.
- GEODETTIC SERVICES INC. *The Basics of Photogrammetry*. Janeiro 2010. Disponível em: <<http://www.geodetic.com/whatis.htm>>.
- GLÖTZL. *Plumb wire position measuring device*. [S.l.], 2004.
- GLÖTZL. *Vector plumb system*. [S.l.], 2005.
- GOLZE, A. R. *Handbook of Dam Engineering*. [S.l.: s.n.], 1977.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. *Digital Image Processing*. [S.l.]: Pearson Education, 2008.
- HARTLEY, R.; ZISSERMAN, A. *Multiple view geometry in computer vision*. 2nd. ed. [S.l.]: Press Syndicate of the University of Cambridge, 2003.
- HEIKKILÄ, J. *Accurate camera calibration and feature based 3-D reconstruction from monocular image sequences*. Tese (Doutorado) — Machine Vision and Department of Electrical Engineering of the Oulu University, 1997.
- HEIKKILÄ, J. Geometric camera calibration using circular control points. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 22, p. 1066–77, 2000.

- HEIKKILÄ, J. Oulu, Finland, Junho 2009. Disponível em: <<http://www.ee.oulu.fi/~jth>>.
- HEIKKILÄ, J.; SILVÉN, O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. In: *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. [S.l.: s.n.], 1997.
- HOFMANN, A. C. H. *Sistema endoscópico estereoscópico para medição geométrica de uniões soldadas de dutos*. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.
- ICKE, I. *Profundidade de campo*. Junho 2010. Disponível em: <<http://commons.wikimedia.org/wiki/User:Chabacano>>.
- ITAIPU BINACIONAL. *Descrição de funcionamento - Coordenômetro portátil*. [S.l.], 1992.
- ITAIPU BINACIONAL. *Descrição de Funcionamento Pêndulo direto/invertido*. [S.l.], 1992.
- ITAIPU BINACIONAL. *Usina Hidrelétrica de Itaipu: aspectos técnicos das estruturas civis*. [S.l.], 2008.
- JIAN, X.; MALCOLM, A. A.; ZHONGPING, F. *Camera Calibration with Micron Level Accuracy*. [S.l.], 2001.
- KOREN, N. *Norman Koren Photography*. Setembro 2008. Disponível em: <<http://www.normankoren.com/index.html>>.
- LI, L.; FENG, Z.; FENG, Y. Accurate calibration of stereo cameras for machine vision. *Journal of Computer Science & Technology*, v. 4, n. 3, p. 147 – 51, 2004.
- MADSEN, K.; NIELSEN, H. B.; TINGLEFF, O. *Methods for non-linear least squares problems*. 2. ed. [S.l.: s.n.], 2004. 58 p.
- MEDEIROS, C. H. Segurança e auscultação de barragens. In: *XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens*. [S.l.: s.n.], 2003. p. 13–50.
- MOTULSKY, H. J.; RANSNAS, L. A. Fitting curves to data using nonlinear regression: a practical and nonmathematical review. *FASEB J.*, v. 1, p. 365–74, 1987.

- OSAKO, C. I. Segurança de barragens na itaipu binacional. 2008.
- PROSILICA. *GC1290 - Small Megapixel GigE Vision camera with ExView sensor*. Agosto 2010. Disponível em: <<http://www.prosilica.com>>.
- REMONDINO, F.; FRASER, C. Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. In: *ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology'*. [S.l.: s.n.], 2006.
- RIBEIRO, F. C. D. et al. Comparison between geodetic technology and plum lines in monitoring of displacements on itaipu dam. In: *13th Symposium on Deformation Measurement and Analysis*. [S.l.: s.n.], 2008.
- ROCHA, R. et al. Sistema de gestão de segurança de barragens. In: *XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens*. [S.l.: s.n.], 2003. p. 104–115.
- SILVEIRA, J. F. A. *Instrumentação e Comportamento de Fundações de Barragens de Concreto*. [S.l.: s.n.], 2003.
- SILVEIRA, J. F. A. *Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento*. [S.l.: s.n.], 2006.
- SISGEO. *Pendulums system*. [S.l.], 2007.
- SUN, W.; COOPERSTOCK, J. Requirements for camera calibration: Must accuracy come with a high price? In: *Application of Computer Vision, 2005. WACV/MOTIONS '05 Volume 1. Seventh IEEE Workshops on*. [S.l.: s.n.], 2005. v. 1, p. 356–361.
- TOMMAZELLI, A. M. G. *Fotogrametria básica*. 2009.
- TRIGGS, B.; FITZGIBBON, P. M. and Richard Hartley and A. Bundle adjustment - a modern synthesis. In: *Vision algorithms: theory and practice : International Workshop on Vision Algorithms*. [S.l.: s.n.], 1999.
- TSAI, R. Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses. *IEEE Journal of Robotics and automation*, RA-3, n. 4, p. 323–43, August 1987.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Engineering and Design - Arch Dam Design*. Washington, DC 20314-1000, May 1994.

VUOLO, J. H. Avaliação e expressão de incerteza em medição. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 21, p. 350–58, 1999.

WILSON, J. S. *Sensor Technology Handbook*. [S.l.]: Elsevier, 2005.

ZHANG, Z. *A Flexible New Technique for Camera Calibration*. [S.l.], 1998.