

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

Bruno de Melo Gevaerd

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE
TOPOGRAMETRIA DE BAIXO CUSTO
COM MÚLTIPLAS CÂMERAS**

Florianópolis

2013

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE
TOPOGRAMETRIA DE BAIXO CUSTO
COM MÚLTIPLAS CÂMERAS**

**Dissertação submetida ao
Programa de Pós-Graduação da
Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do
Grau de Mestre em Engenharia
Mecânica**

BRUNO DE MELO GEVAERD

Florianópolis

19 de março de 2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Gevaerd, Bruno de Melo

Desenvolvimento de um Sistema de Topogrametria de Baixo Custo com Múltiplas Câmeras / Bruno de Melo Gevaerd ; orientador, Armando Albertazzi Gonçalves Júnior ; co-orientador, Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto . - Florianópolis, SC, 2013.

105 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Topogrametria. 3. Sistema Óptico de Medição. 4. Múltiplas Câmeras. 5. Superfície Livre. I. , Armando Albertazzi Gonçalves Júnior. II. , Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE
TOPOGRAMETRIA DE BAIXO CUSTO
COM MÚLTIPLAS CÂMERAS

BRUNO DE MELO GEVAERD

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de mestre, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação da Engenharia Mecânica

Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng. – Orientador

Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, Dr. Eng. – Co-orientador

Júlio César Passos, Dr. – Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng. – Presidente

Analucia Vieira Fantin, Dra. Eng.

Celso Luiz Nickel Veiga, Dr. Eng.

Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng.

A meu avô pelos ensinamentos sobre a vida.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Armando Albertazzi Gonçalves Júnior e co-orientador Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, pela orientação, confiança e apoio na realização deste trabalho.

Ao Laboratório e aos professores, Analucia Vieira Fantin Pezzotta, Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Carlos Alberto Flesch e Gustavo Daniel Donatelli, do curso de Metrologia e Automatização (LABMETRO) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pela dedicação e incentivo.

A Rosana Vieira, Fabrício Broering, Miguel Burg Demay, alunos e demais colaboradores que sempre me apoiaram.

Aos meus pais, irmãos, avós e familiares pelo apoio incondicional e em especial a Paulo Ramos por seu incansável auxílio e incentivo.

A todos os amigos e a Clara, por dividirem os momentos de felicidade e de dificuldades, pelo apoio e paciência.

A todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

O objetivo desta dissertação é desenvolver um sistema óptico de medição de baixo custo, para medir superfícies livres. São exemplos de superfícies livres as partes curvilíneas do painel de um carro, o casco de uma lancha ou algo mais simples como embalagens de plástico. A medição dessas superfícies livres, bem como sua comparação é uma tarefa difícil, pois não são facilmente representadas por geometrias regulares, dificultando seu controle geométrico. A medição de superfícies livres, por meio de sistemas ópticos, vem se desenvolvendo continuamente, sendo frequente encontrar equipamentos de medição de alta qualidade; porém, geralmente, com elevados preços. As medições sem contato, que são as medições por meios ópticos, possuem três qualidades importantes que são: incertezas comparáveis a medições por contato, sistemas compactos e a possibilidade de se obter, em pouco tempo, nuvens de pontos contendo milhões de pontos medidos. O presente trabalho utiliza este conhecimento e propõe o desenvolvimento de um sistema de medição óptico de baixo custo com múltiplas câmeras, bem como do algoritmo de funcionamento do sistema elaborado. Os trabalhos experimentais foram desenvolvidos no Laboratório de Metrologia e Automatização (LABMETRO) do Departamento de Pós Graduação da Engenharia Mecânica da UFSC (PósMEC). A aplicação de duas, quatro e seis câmeras foi avaliada neste trabalho; pois, utilizando múltiplas câmeras, tem-se o intuito de obter uma menor incerteza de medição. Esta proposta de montagem com até seis câmeras torna possível extrair mais informações do objeto medido e diminuir a possibilidade de oclusões da cena. A confiabilidade das medições realizadas pelo sistema proposto e a possível melhoria nas incertezas de medição pelo uso de múltiplas câmeras foram testadas pela medição de objetos de dimensões conhecidas, estabelecendo padrões para comparação. A comparação entre medições realizadas pelo sistema óptico de baixo custo e as realizadas com equipamentos de referência possibilitaram avaliar o desempenho do sistema de medição proposto, mostrando a aplicabilidade desta solução e de novas propostas de pesquisas neste campo de estudo.

Palavras-chave: Topogrametria, metrologia óptica, múltiplas câmeras, superfícies livres, sistema óptico de medição de baixo custo.

ABSTRACT

The main objective of this dissertation is to develop a low cost measuring optical system, to measure free form surface. Examples of free form surface are the curved parts of a dashboard from a car, the hull of a boat or something simpler like some types of plastic containers. The measuring and comparison of these free surfaces is a difficult task, because they are not easily represented by simple geometries, hindering their geometric control. The measuring of free form surfaces by means of optical systems has been developing continually, being easy to find high quality measuring devices, however, usually requiring high investments. The non-contact measurements, which are measurements of free form surfaces by optical systems, have three important qualities that are: uncertainties comparable to contact measurements, compact systems, and the possibility of obtaining in short time of period a point clouds containing millions of measured points. This work uses this knowledge and proposes the development of a low cost measuring optical system with multiple cameras, as well as the elaborated algorithm to operate the system. The experiments were developed at the Metrology and Automation Laboratory (Labmetro) of the Mechanical Engineering Pos-Graduation Department of UFSC (PosMEC). The application of two, four or six cameras was assessed in this study, because by using multiple cameras it is attained to obtain a lower measurement uncertainty. This assembly proposal with up to six cameras, gives the possibility to extract more data from the measured object and decrease the possibility of occlusions of the scene. The reliability of the measurements taken by the proposed system and possible improvements to the measuring uncertainties by using multiple cameras was tested by the measuring of objects of known dimensions, setting standards for comparison. The comparison between measurements taken by the low cost optical system and the measurements made with a coordinate measuring machine made possible to evaluate the performance of the proposed measurement system, demonstrating the applicability of this solution and new research proposals in this field.

Keywords: Active photogrammetry, optical metrology, multiple cameras, free form surfaces, low cost measuring optical system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 – Equipamento de medição por contato à esquerda e à direita um braço com sensor a laser para medição sem contato.....	23
Figura 1-2 – Aplicação prática de fotogrametria de curto alcance na área médica.....	24
Figura 1-3 – Câmera comercial (<i>webcam</i>) e câmera científica.....	25
Figura 2-1 – Militar analisando fotos aéreas de um terreno com o auxílio de um estereoscópio em 1944 durante a Segunda Guerra Mundial.....	29
Figura 2-2 – Sistemas de estereoscopia: (a) <i>bumblebee</i> e (b) <i>gopro</i> ..	30
Figura 2-3 – Esquemático da Fotogrametria para medição 3D.....	30
Figura 2-4 – Desenho esquemático de uma câmera <i>pinhole</i>	31
Figura 2-5 – Modelo matemático da câmera <i>pinhole</i>	32
Figura 2-6 – Triangulação.....	33
Figura 2-7 – Linha epipolar.....	34
Figura 2-8 – Captação de pontos e geração de gráfico 3D.....	34
Figura 2-9 – Equipamento de topogrametria desenvolvido no Labmetro.....	35
Figura 2-10 – Sequência de uma projeção senoidal com quatro passos sobre a face de um manequim.....	36
Figura 2-11 – Franja senoidal, gráficos de intensidade para quatro passos e gráfico da fase relativa calculada com módulo 2π	37
Figura 2-12 – Sequência Graycode projetada sobre a face de um manequim.....	38
Figura 2-13 – Decodificação do Graycode.....	39
Figura 2-14 – Decodificação da fase relativa utilizando Graycode...	40
Figura 2-15 – Gráfico da Fase absoluta.....	41
Figura 2-17 – Desalinhamento do sensor de uma câmera com componentes de baixo custo.....	43
Figura 2-18 – Imagem sem distorção, efeito barril e almofada, gerados pela lente esférica.....	44
Figura 2-19 – Intersecção da visão das câmeras.....	46
Figura 2-20 – Configuração ótima para medição fotogramétrica.....	46
Figura 2-21 – Busca da terceira coordenada.....	48
Figura 3-1 – Disposição dos componentes no sistema, vista frontal.	50
Figura 3-2 – Disposição dos componentes no sistema, vista superior.....	51
Figura 3-3 – Imagem da projeção da fase no aparato.....	53

Figura 3-4 – Gráfico da estabilidade do ganho de brilho de uma câmera.....	55
Figura 3-5 – Gráfico do tempo de acionamento da câmera versus nível de cinza adquirido.....	56
Figura 3-6 – Gráfico da curva de resposta da linearidade do sistema de medição para níveis de cinza projetados versus adquiridos.....	58
Figura 3-7 – Projetor multimídia.....	59
Figura 4-1 – Posicionamento dos componentes no sistema.....	61
Figura 4-2 – À esquerda, padrão de calibração adquirido e à esquerda imagem ampliada do alvo central com marcação de centralização.....	62
Figura 4-3 – Parâmetros de ajuste das câmeras disponíveis pelo acesso da plataforma LabVIEW.....	63
Figura 4-4 – Projeção senoidal sobre um plano de vidro branco, e a linha analisada.....	64
Figura 4-5 – Gráfico da saturação da <i>webcam</i> para aquisição de uma projeção senoidal em um plano.....	65
Figura 4-6 – Gráfico da aquisição das câmeras com parâmetros ajustados.....	66
Figura 4-7 – Padrão de calibração construído.....	67
Figura 4-8 – Análises do software de calibração.....	68
Figura 4-9 – Numeração das câmeras para análise de combinações.....	69
Figura 4-10 – Planeza e desvio padrão com confiabilidade de 67%..	70
Figura 4-11 – Comparação RE das medições do plano a 0 grau.....	71
Figura 4-12 – Desvio padrão da medição do plano a 0 grau.....	72
Figura 4-13 – Rotação do plano de vidro em relação ao sistema de medição (vista superior).....	73
Figura 4-14 – Gráfico 3D do resíduo de uma área de 200 mm ² para medição de um plano inclinado a 30 graus.....	76
Figura 4-15 – Fórmula e diagrama para cálculo do ângulo entre duas retas.....	77
Figura 4-16 – Gráfico da média da coluna de pontos da área medida do plano de vidro em 0°, 15° e 30°.....	77
Figura 4-17 – Peça degraus e respectivas áreas de medição.....	79
Figura 4-18 – Gráfico comparativo da tendência da altura para combinações com 2 câmeras.....	80
Figura 4-19 – Gráfico 3D da nuvem de pontos da medição de uma peça com degraus.....	82
Figura 4-20 – Gráfico da linha central da medição da peça com degraus.....	82
Figura 4-21 – Peça recuperada com revestimento de solda.....	83

Figura 4-22 – Representação 3D de uma peça recuperada por soldagem.....	84
Figura 4-23 – Gráfico da linha central da medição da peça recuperada por soldagem.....	84
Figura 4-24 – Face de um manequim.....	85
Figura 4-25 – Linha central da medição da face de um manequim...	85
Figura 4-26 – Medição da face de um manequim.....	86
Figura 4-27 – Peça circular com chanfro em V.....	87
Figura 4-28 – Gráfico da medição de um chanfro em V.....	87
Figura 4-29 – Mão humana.....	88
Figura 4-30 – Gráfico 3D da medição de mão humana.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 – Comparativo das câmeras analisadas.....	59
Tabela 4-1 – Comparação de RE para combinação de múltiplas câmeras.....	70
Tabela 4-2 – Comparação do desvio padrão para medições do plano a 0 grau.....	72
Tabela 4-3 – Comparação do RE para medições do plano a 15 graus.	74
Tabela 4-4 – Comparação do desvio padrão para medições do plano a 15 graus.....	74
Tabela 4-5 – Comparação do RE para medições do plano a 30 graus.	75
Tabela 4-6 – Comparação do desvio padrão para medições do plano a 30 graus.....	75
Tabela 4-7 – Resultado do cálculo dos ângulos das inclinações impostas no plano de vidro.....	78
Tabela 4-8 – Comparativo da tendência da altura para combinações com 2 câmeras.....	79
Tabela 4-9 – Comparativo da tendência da altura para combinações com 4 câmeras.....	81
Tabela 4-10 – Comparativo da tendência da altura para 6 câmeras.....	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

X, Y, Z	Coordenadas de um ponto 3D no espaço cartesiano
M	Um ponto (X, Y, Z) no espaço cartesiano
m	Ponto M projetado no plano imagem (x, y)
P	Matriz de projeção
A	Matriz de parâmetros intrínsecos da câmera
R	Matriz de rotação da câmera
t	Vetor de translação da câmera
ϕ	Fase absoluta [rad]
ζ	Ordem de franja
RE	Erro máximo de medição de planeza
σ	Desvio padrão
DSP	Dispersão em relação a uma superfície plana

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 MOTIVAÇÃO.....	25
1.2 OBJETIVOS.....	26
1.2.1 Objetivo geral.....	26
1.2.2 Objetivos específicos.....	26
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	26
2 REVISÃO DA LITERATURA	29
2.1 FOTOGRAMETRIA.....	29
2.2 TOPOGRAMETRIA.....	35
2.2.1 Calibração.....	42
2.2.2 Medição com múltiplas câmeras.....	45
2.3 ALGORITMO Z-SCAN.....	47
3 SISTEMA DESENVOLVIDO	49
3.1 REQUISITOS DO PROJETO.....	49
3.2 CONFIGURAÇÃO.....	50
3.2.1 Disposição dos componentes.....	50
3.2.2 Volume de medição.....	51
3.2.3 Definição dos ângulos das câmeras.....	51
3.3 SELEÇÃO DAS CÂMERAS.....	52
3.3.1 Qualidade da imagem.....	53
3.3.2 Estabilidade da câmera.....	54
3.3.3 Tempo de acionamento.....	56
3.3.4 Linearidade do sistema.....	57
3.4 SELEÇÃO DO PROJETOR.....	59
4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL	61
4.1 CALIBRAÇÃO.....	61
4.1.1 Alinhamento do sistema.....	61
4.1.2 Ajuste dos parâmetros da câmera e intensidade da projeção.....	62
4.1.3 Câmeras.....	66
4.2 EXPERIMENTOS REALIZADOS.....	68
4.2.1 Geometrias conhecidas.....	68
4.2.1.1 Plano 0 grau.....	69
4.2.1.2 Plano 15 graus.....	73
4.2.1.3 Plano 30 graus.....	74
4.2.1.4 Cálculo da inclinação das medições dos planos.....	76

4.2.1.5 Degraus de 5 mm.....	78
4.2.2 Exemplos livres.....	83
4.2.2.1 Revestimento de solda de uma cavidade recuperada.....	83
4.2.2.2 Rosto de um manequim.....	85
4.2.2.3 Chanfro em formato V.....	87
4.2.2.4 Mão direita humana.....	88
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	89
5.1 PRINCIPAIS RESULTADOS.....	89
5.2 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES.....	89
5.3 PRINCIPAIS LIMITAÇÕES.....	90
5.4 AVALIAÇÃO FINAL.....	91
REFERÊNCIAS.....	95
APENDICE A – Principais componentes do sistema.....	101

1 INTRODUÇÃO

A engenharia mecânica utiliza a medição de superfícies com objetivo de controlar a qualidade de peças manufaturadas. Essa função é a base do controle metrológico. O controle metrológico do produto garante a qualidade de peças e componentes dentro de uma dada tolerância dimensional. As denominadas superfícies livres, aquelas que possuem formas contínuas, sem arestas ou quinas, são um foco de interesse constante para o controle geométrico.

Considerando o controle metrológico, pode-se afirmar que superfícies livres são difíceis de serem avaliadas por não serem, facilmente, representadas por objetos com geometria simples, como trechos planos, de cilindros ou calotas esféricas. Nesse sentido, são usadas diversas técnicas para realizar esse tipo de medição, como por exemplo, a medição por contato, gabarito, laser e por câmeras [1], conforme visualizado na figura 1-1.

Figura 1-1 – Equipamento de medição por contato à esquerda e à direita um braço com sensor a laser para medição sem contato.

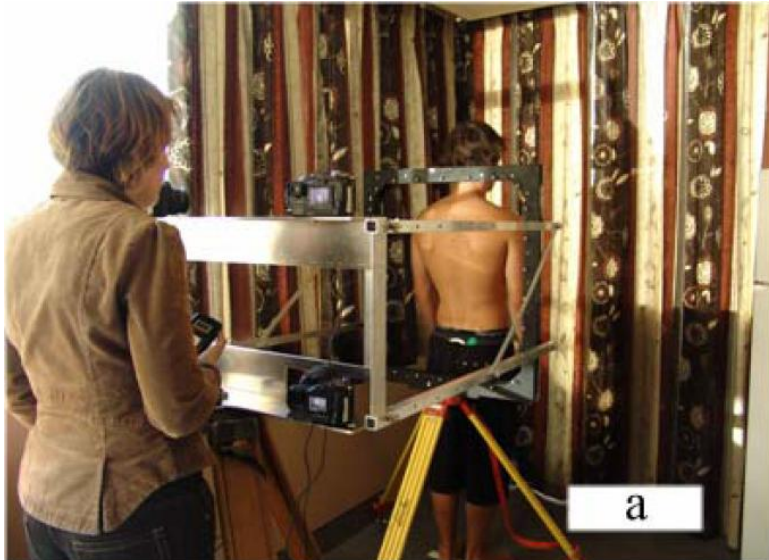


Fonte: [11][12].

Para atingir níveis de incerteza da ordem de poucos centésimos de milímetros, os sistemas de medição assistidos por câmeras envolvem componentes de alta precisão o que resulta em equipamentos com alto custo. Embarcado no sistema de medição, também há uma solução de

software proprietário, o que aumenta, ainda mais, o custo do sistema de medição. O custo elevado do equipamento inibe seu uso por usuários que dispõem de poucos recursos financeiros; por exemplo, o serviço prestado por órgãos públicos ligados à área médica da fisioterapia.

Figura 1-2 – Aplicação prática de fotogrametria de curto alcance na área médica.



Fonte: [13].

Uma das alternativas para diminuir o custo desse tipo de equipamento é o uso de múltiplas câmeras de baixo custo. A perda da qualidade dos componentes é compensada com a redundância de dados de medição, garantindo uma boa qualidade final [2]. Mesmo com câmeras de baixo custo, com baixa resolução e construção não precisa, existe a possibilidade de se obter resultados satisfatórios com o uso adequado de técnicas de processamento de imagem.

Este trabalho busca avaliar o potencial desse caminho que pode gerar informações de medição suficientemente boas para certas classes de aplicação.

1.1 MOTIVAÇÃO

A aplicação de técnicas de medição de formas 3D por imagens, na área médica da fisioterapia, é altamente desejada para auxílio aos profissionais em diagnósticos e tratamentos de pacientes [3]. No entanto, o uso de tais técnicas exige um alto investimento, o que não é financeiramente viável para a maioria das clínicas e são raras as opções de baixo custo com desempenho razoável disponíveis no mercado.

Um mínimo de duas câmeras é necessário para medir formas 3D por fotogrametria ativa. O uso de mais que duas câmeras traz informações redundantes que podem compensar a baixa qualidade de cada informação individualmente. Assim, é necessário testar o conceito de redundância de informações para melhorar a incerteza da medição e avaliá-la, o que pode gerar um equipamento com custo do conjunto mais acessível em relação aos desenvolvimentos oferecidos pelo mercado.

Nesse contexto, este trabalho pode ajudar a abrir um novo leque de possibilidades ao desenvolvimento de equipamentos de medição assistidos por câmeras, uma vez que seu investimento se torna menor e seu uso aceitável (figura 1-3).

Figura 1-3 – Câmera comercial (*webcam*) e câmera científica.



Fonte: [14][15].

O presente trabalho acadêmico, além de possibilitar a redução dos custos do equipamento de medição, desenvolve conhecimentos de programação e de técnicas de medição. Esta linha de pesquisa já vem sendo trabalhada, há algum tempo, pelo Labmetro em diversos projetos, como por exemplo, o projeto DIVITRI (Digitalização e Visualização Tridimensional de Réplicas de Objetos) e projeto PEROLA (Perfilometria Óptica a Laser), que envolve o uso de duas câmeras científicas conectadas à porta *FireWire*.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver uma solução tecnológica de baixo custo combinando múltiplas câmeras e projetor multimídia, e testá-la, para possibilitar a medição de superfícies livres com dimensões adequadas contribuindo para a popularização das técnicas ópticas de medição de formas 3D, com possibilidade futura de aplicação nas áreas médica e fisioterapia.

1.2.2 Objetivos específicos

Para alcançar este objetivo geral, foi traçado o seguinte objetivo específico:

- Desenvolver um sistema de medição de formas 3D, construí-lo e avaliá-lo, usando fotogrametria ativa, envolvendo uma configuração flexível de duas, quatro ou seis câmeras de baixo custo, tipo *webcam* e um projetor multimídia compacto.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Estruturou-se o trabalho em 5 capítulos, conforme descrito a seguir:

Capítulo 1° Introdução – apresentação das motivações da pesquisa e seus objetivos.

Capítulo 2° Revisão da Literatura – compilação das bases teóricas que sustentam a temática deste estudo.

Capítulo 3° Sistema Desenvolvido – abordagem das especificações do sistema desenvolvido, definição dos requisitos do projeto: a configuração, tipo de câmera e projetor.

Capítulo 4° Validação Experimental – descrição da forma de validação experimental por meio da calibração de cada componente e do conjunto utilizado nos experimentos. No capítulo também se faz abordagem dos experimentos de medição que foram realizados e seus respectivos resultados.

Capítulo 5° Considerações Finais – apresentação das conclusões finais do trabalho, a partir dos resultados obtidos, análise dos objetivos propostos, bem como sugestões para futuras pesquisas na mesma linha, com perspectiva de contribuição acadêmica e de aplicação prática.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 FOTOGRAMETRIA

Denomina-se fotogrametria o conjunto de técnicas ópticas que combina informações extraídas de duas ou mais imagens de uma cena para obter informações tridimensionais. Suas primeiras aplicações envolviam o mapeamento de terrenos com base em fotografias aéreas. Um exemplo pode ser visto na figura 2-1. Por muito tempo teve seu desenvolvimento voltado aos fins militares e, inicialmente, com o oficial engenheiro Aimé Laussedat do exército francês, considerado o “Pai da Fotogrametria” [5]. O avanço da fotogrametria aconteceu em conjunto com o desenvolvimento dos equipamentos para voar tanto quanto com a qualidade das câmeras fotográficas. Hoje a fotogrametria é frequentemente aplicada em cenas ou objetos próximos de interesse civil, e não somente para medição de terrenos ou em questões militares.

Figura 2-1 – Militar analisando fotos aéreas de um terreno com o auxílio de um estereoscópio em 1944 durante a Segunda Guerra Mundial.



Fonte: [16].

Em qualquer que seja a aplicação, a base da fotogrametria é sempre a mesma: combinar duas ou mais imagens para se obter informações tridimensionais de cenas ou objetos. Como o próprio nome sugere, é com a análise de fotos que são obtidas as informações do

mensurando. Na figura 2-2 são mostrados exemplos de duas câmeras formando um sistema estereoscópico,

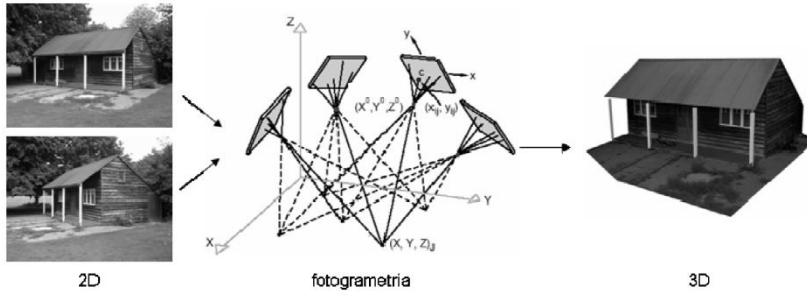
Figura 2-2 – Sistemas de estereoscopia: (a) *bumblebee* e (b) *gopro*.



Fonte: [20][21].

As fotos adquiridas pelas câmeras possuem perspectivas diferentes, o que é necessário para se poder aplicar a teoria da fotogrametria. Com essas imagens e conhecimentos prévios do equipamento utilizado e da cena, como por exemplo, as dimensões da base de uma casa ou tamanho das janelas, é possível calcular os pontos tridimensionais do objeto por meio da técnica de triangulação, (figura 2-3) [6].

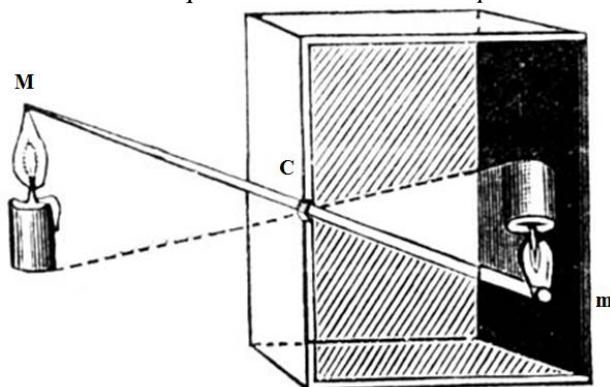
Figura 2-3 – Esquemático da Fotogrametria para medição 3D.



Fonte: [1].

O conceito da câmera *pinhole*, representado na figura 2-4, é conhecido há muito tempo. Por um furo bem pequeno, como o feito por um alfinete, forma-se na superfície oposta de uma câmara escura uma imagem invertida da cena externa. Com um sensor ativado pela luz (chapa fotográfica sensível à luz em câmeras antigas), posicionado nesta superfície oposta da entrada de luz na câmara, é possível registrar o conteúdo da cena.

Figura 2-4 – Desenho esquemático de uma câmera *pinhole*.



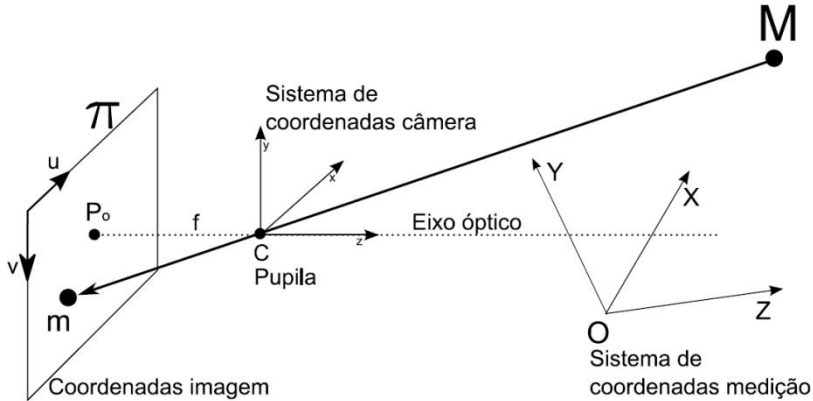
Fonte: [17].

Para desenvolver um modelo matemático da câmera *pinhole* é suficiente considerar que todo raio de luz que emerge de cada ponto da cena é projetado no plano da imagem, sempre passando através do pequeno orifício, como mostra a figura 2-5. Numa câmera real, quando são usadas lentes, os raios passam por um ponto virtual denominado pupila da lente da câmera que, em termos físicos, comporta-se de forma equivalente ao orifício da câmera *pinhole*. As variáveis que representam o ponto da cena no plano da imagem são descritas como $\mathbf{m}=(x,w,y,w,w)^T$ e o ponto tridimensional da cena como $\mathbf{M}=(X,Y,Z,1)^T$ [29].

A fórmula usada para \mathbf{m} é a representação em um plano, em coordenadas homogêneas, de um ponto no espaço 3D. Sendo o valor w chamado de peso, todos os pontos contidos em uma reta podem ser representados pelo sistema \mathbf{m} ; no caso descrito sendo a reta que parte de um ponto no espaço cruzando por C (pupila), encontrando o plano do sensor da câmera. O ponto \mathbf{M} representa, em coordenadas homogêneas,

um ponto no espaço. Logo, é possível combinar as duas equações, e a matriz de projeção, para determinar o valor da coordenada Z, discutido no próximo parágrafo.

Figura 2-5 – Modelo matemático da câmera *pinhole*.



Fonte: [3].

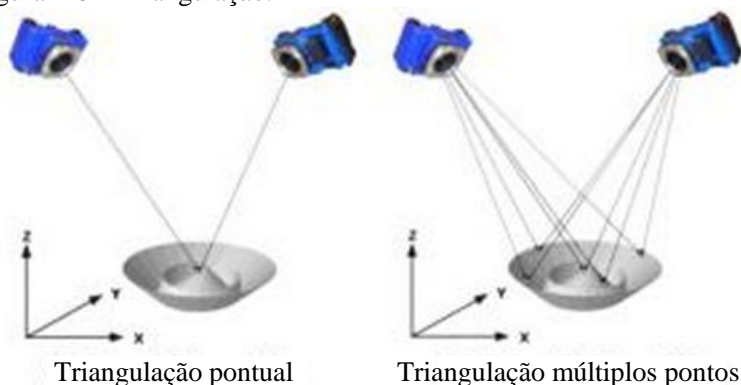
A projeção deste ponto da cena no plano da imagem pode ser calculada usando coordenadas homogêneas, pela equação $\mathbf{m}=\mathbf{P}.\mathbf{M}$. Sendo \mathbf{P} a matriz de projeção da câmera que contém a combinação de parâmetros extrínsecos e intrínsecos [33]. Os parâmetros de calibração extrínsecos incluem informações como rotação e translação da câmera no espaço. Os principais parâmetros intrínsecos são a distância focal da lente e as coordenadas do ponto principal (P_0) em que o eixo óptico cruza com o plano (π) do sensor da câmera. A matriz de projeção pode ser decomposta formando $\mathbf{P}=\mathbf{A}.\mathbf{[Rt]}$, em que os parâmetros intrínsecos são contidos em \mathbf{A} , e a matriz $\mathbf{[Rt]}$ que possui os parâmetros extrínsecos, a câmera sendo \mathbf{R} a matriz rotação e \mathbf{t} o vetor translação [30].

Este modelo matemático para câmera *pinhole* não considera o efeito de distorções provenientes dos defeitos e aberrações da lente da câmera. A não correção desses efeitos oriundos da lente influi negativamente na qualidade da medição [34].

Quando duas câmeras devidamente posicionadas são usadas simultaneamente, um mesmo ponto da cena poderá ser encontrado nas imagens de cada uma das câmeras. Os pontos nas imagens que correspondem ao mesmo ponto físico, na cena são denominados de

pontos homólogos. Para calcular as coordenadas no espaço de um ponto da cena são utilizadas as duas imagens, obtidas de perspectivas diferentes. De cada um dos pontos homólogos, é possível imaginar um raio que passa pela pupila da lente e se propaga no espaço. A intersecção desses dois raios define a posição global daquele ponto da cena [4], conforme demonstra a figura 2-6 em um processo de triangulação.

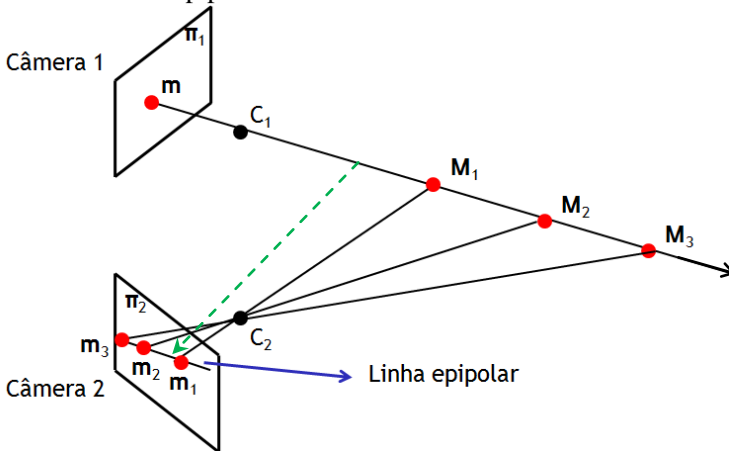
Figura 2-6 – Triangulação.



Fonte: [27].

Para facilitar a determinação dos pontos homólogos de um ponto da cena é utilizada geometria epipolar que depende somente dos parâmetros de calibração das câmeras. A geometria epipolar restringe a região de busca de pontos homólogos, uma vez que o ponto da cena projetado em uma das imagens deve se encontrar sobre a linha epipolar na outra imagem [33], apresentado na figura 2-7. Ao ser dado um ponto em uma das imagens, para encontrar a linha epipolar na outra imagem, determina-se a linha correspondente ao prolongamento do raio que sai do primeiro ponto e passa pela pupila da lente. Assim, restringe-se a busca do ponto homólogo apenas à região sobre uma linha.

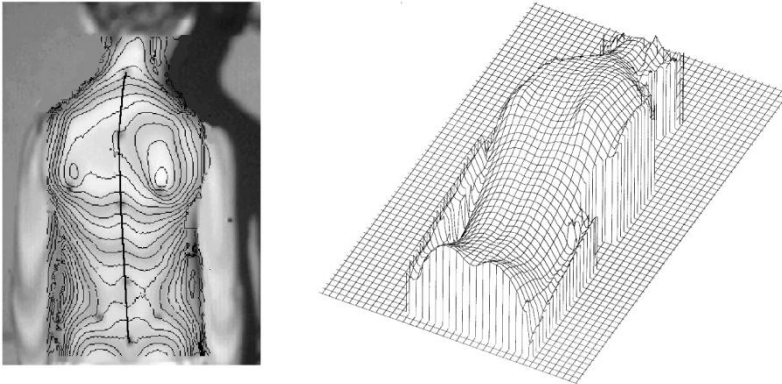
Figura 2-7 – Linha epipolar.



Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

Continuando o processo e executando-se o cálculo da terceira coordenada para todos os pontos da imagem, é obtida uma nuvem de pontos 3D da cena. A partir dessa nuvem de pontos, o próximo passo é apresentar os resultados na forma de gráficos 3D. Para efeito de visualização, podem ser sobrepostas curvas de nível sobre a imagem da cena medida, como mostra a figura 2-8.

Figura 2-8 – Captação de pontos e geração de gráfico 3D.



Fonte: [19].

2.2 TOPOGRAMETRIA

O conceito da topogrametria é uma extensão do conceito da estereoscopia, acrescido a um sistema de projeção de luz estruturada com a principal finalidade de melhorar a incerteza com que são determinados os pontos homólogos e facilitá-la. Topogrametria é, muitas vezes, denominada de fotogrametria ativa [10]. Um exemplo de equipamento de topogrametria desenvolvido no Labmetro é mostrado na figura 2-9.

Figura 2-9 – Equipamento de topogrametria desenvolvido no Labmetro.



Fonte: [3].

A estereoscopia, considerando sua definição teórica, necessita de, no mínimo, duas imagens da mesma cena com perspectivas diferentes, ou seja, imagens com partes que se sobrepõem, observadas de ângulos diferentes. Com essas imagens é possível obter uma nuvem de pontos da cena. Porém, a determinação dos pontos homólogos se torna uma tarefa complicada, quando feita automaticamente, com custo computacional alto, devido à quantidade de pontos analisados. Pode mesmo se tornar imprecisa, ou mesmo inviável, quando envolve cenas com texturas homogêneas.

Uma técnica utilizada para facilitar a busca desses pontos homólogos é o uso da luz estruturada (figura 2-10). O padrão projetado, nesse caso, é uma sequência de imagens com perfil senoidal com níveis de cinza variando de 0 (preto) a 255 (branco) [31].

Figura 2-10 – Sequência de uma projeção senoidal com quatro passos sobre a face de um manequim.



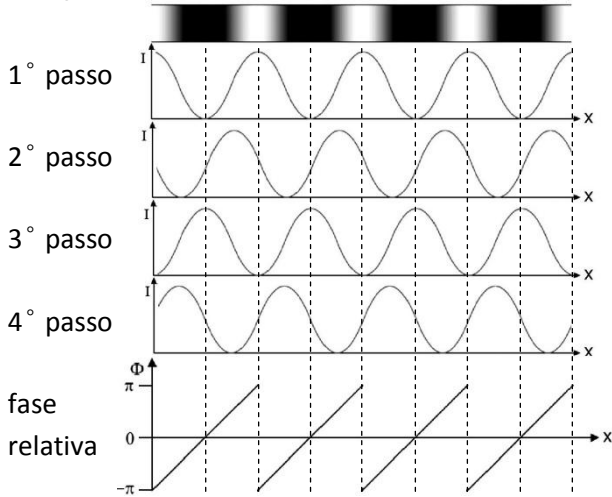
Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

As imagens adquiridas da projeção desses perfis senoidais sobre a cena, são processadas por meio do algoritmo de n passos, apresentado na sequência, para se obter o valor de fase com módulo de 2π . Como o algoritmo de n passos usa a função arco tangente, os valores obtidos se encontram dentro do intervalo de 0 a 2π , gerando “saltos de fase”, apresentados na figura 2-11. Isso ocorre toda a vez que o argumento da função seno ultrapassa o limite 2π , para, em seguida, iniciar-se a próxima volta. Os saltos de fase são ambiguidades que necessitam ser eliminadas matematicamente para se obter um único valor de fase, para cada *pixel* da imagem, em cada câmera. Uma equação genérica para n deslocamentos de fase é apresentada na sequência [31].

$$\Phi(u, v) = \tan^{-1} \left(\frac{-\sum_{i=1}^n I_i(u, v) \sin\left(\frac{2\pi}{n} i\right)}{\sum_{i=1}^n I_i(u, v) \cos\left(\frac{2\pi}{n} i\right)} \right)$$

Cada perfil senoidal (linha da imagem) deve ser processado, com isso é obtido um gráfico semelhante a um dente de serra, chamado de gráfico da fase relativa, conforme a figura 2-11.

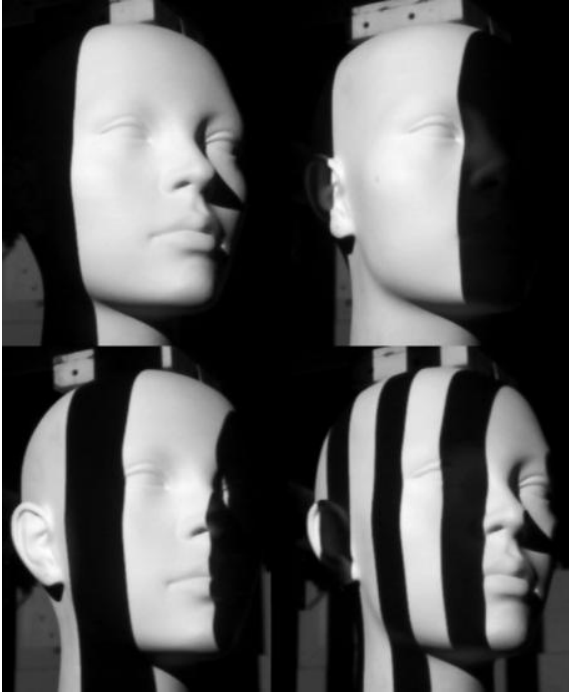
Figura 2-11 – Franja senoidal, gráficos de intensidade para quatro passos e gráfico da fase relativa calculada com módulo 2π .



Fonte: [22, alterado pelo autor (2013)].

A partir da fase relativa, é feita a remoção do salto de fase, pois existem diversos algoritmos para remover este salto. Um dos mais robustos caminhos utiliza uma técnica baseada na projeção de padrões luminosos que consistem em colunas pretas e brancas de diferentes larguras para cada projeção, denominada Graycode [23]. A largura da projeção é definida pela largura do seno projetado para obtenção da fase relativa. Para cada projeção é obtida uma nova imagem, gerando, após a decodificação das imagens, uma sequência de valores binários para cada *pixel* (figura 2-12).

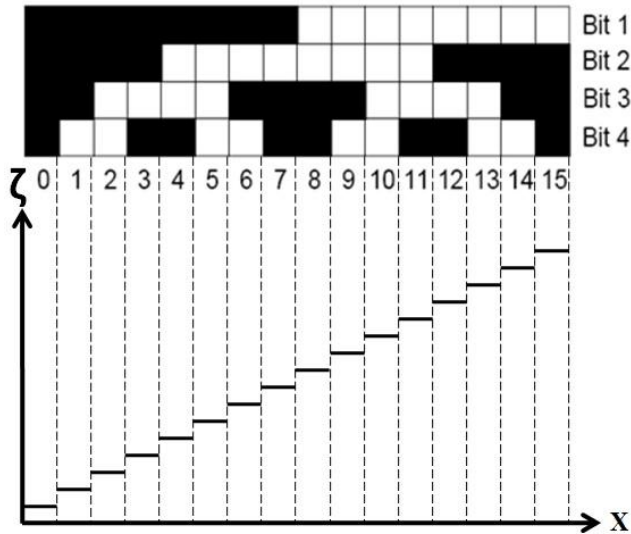
Figura 2-12 – Sequência Graycode projetada sobre a face de um manequim.



Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

Esta técnica discretiza a cena com a combinação dos diferentes padrões de projeção nas imagens. A codificação da cena pelo Graycode possibilita remover os saltos de fase quando alinhados e projetados adequadamente. Esse método de binarização da cena identifica as ordens de franja e elimina a ambiguidade proveniente dos saltos de fase. Para cada *pixel* da imagem é feita a combinação dos bits e, com isto gerada a informação do valor da ordem de franja (ζ) para aquele *pixel*. Observando a ponta do nariz do manequim, na figura anterior, é possível analisar qual seria sua ordem de franja, conforme o gráfico da figura 2-13 onde encontraria $\zeta=14$.

Figura 2-13 – Decodificação do Graycode.



Fonte: [23, alterado pelo autor (2013)].

O uso de mais uma projeção (um bit a mais no Graycode), com largura de franja igual ao da senoide, porém defasado em meio período, auxilia a minimizar os erros de decodificação do salto de fase, separando cada ciclo de fase em duas partes. Esses erros acontecem devido ao alinhamento das bordas da ordem de franja com as bordas do salto de fase, que ficam indefinidas, não se sabendo, exatamente, os seus limites. Com essa técnica de implementação de um bit a mais, é possível remover os saltos de fase considerando os três casos a seguir [23].

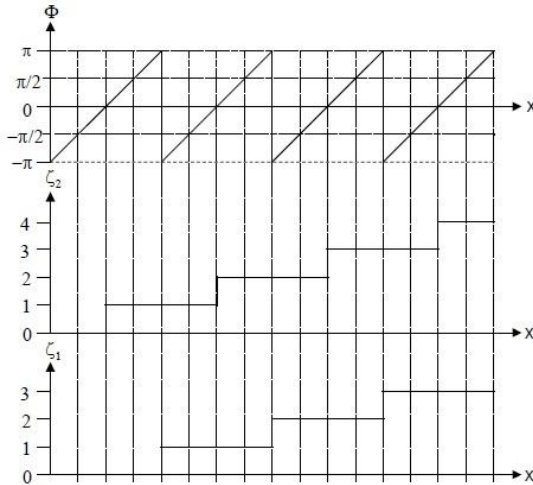
$$\Phi_A = \Phi + 2\pi([\zeta_2 + 1/2]) + \pi \quad \text{se} \quad \Phi \leq -\pi/2$$

$$\Phi_A = \Phi + 2\pi([\zeta_1/2]) + \pi \quad \text{se} \quad -\pi/2 < \Phi < +\pi/2$$

$$\Phi_A = \Phi + 2\pi([\zeta_2 + 1)/2] - 1) + \pi \quad \text{se} \quad \Phi \geq \pi/2$$

A análise das possibilidades citadas gera a fase absoluta (Φ_A) para cada *pixel* da imagem combinando a fase relativa (Φ) e a ordem da franja. Para utilizar o primeiro caso na busca do valor da fase absoluta deve-se considerar as situações em que o valor da fase relativa seja menor ou igual a $-\pi/2$, para o segundo que esteja contida entre $\pm\pi/2$ e para o terceiro caso maior ou igual a $\pi/2$. Essas análises podem ser observadas em forma de gráficos na figura 2-14.

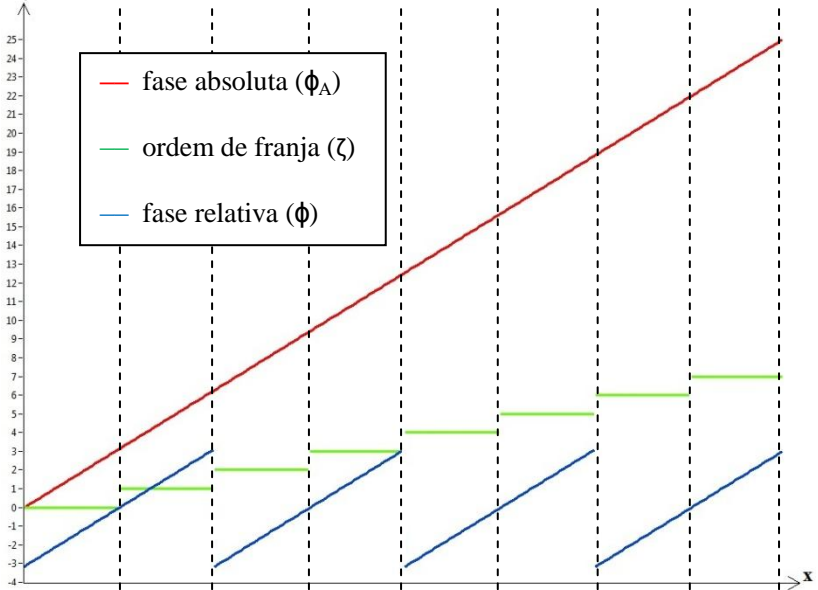
Figura 2-14 – Decodificação da fase relativa utilizando Graycode.



Fonte: [23, alterado pelo autor (2013)].

Com os dados obtidos do Graycode, é possível determinar, matematicamente, as constantes aditivas que eliminam os saltos de fase e transformam o gráfico da fase em uma linha contínua. O resultado da combinação desses dois procedimentos é a fase absoluta, apresentada na figura 2-15.

Figura 2-15 – Gráfico da Fase absoluta.



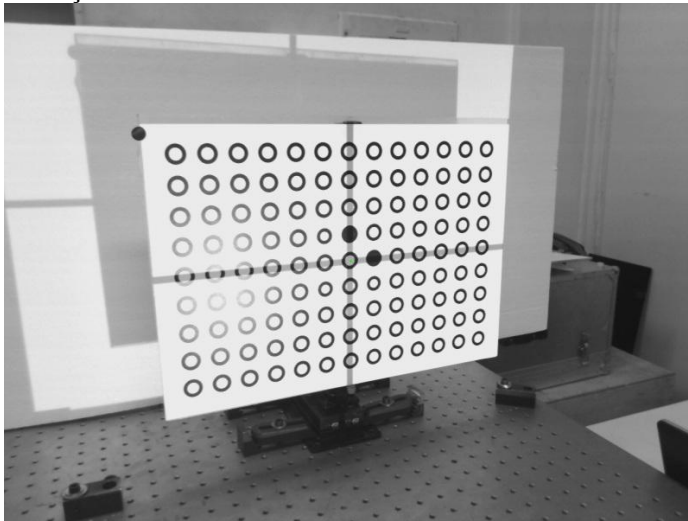
Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

Na prática, e assim foi tratado neste trabalho pelo autor, uma vez obtida a fase absoluta para cada *pixel* de cada imagem, parte-se para a determinação dos pontos homólogos. Como as franjas projetadas são verticais, pontos que estiverem na mesma vertical podem apresentar valores de fase iguais para *pixel* diferentes. Logo, para encontrar o ponto homólogo a um dado em uma das imagens, é necessário procurar, na outra imagem, o ponto com a mesma fase ao longo da correspondente linha epipolar. O valor de fase deveria ser idealmente igual para o mesmo ponto da cena nas duas imagens; porém, nem sempre esses valores são exatamente iguais. Essa discrepância nos valores de fase absoluta para os pontos homólogos gera a necessidade de um processo iterativo de busca à terceira coordenada, em que o valor da diferença de fase desses pontos deve ser o suficientemente próximo de um valor desejado. Quando o valor da diferença for satisfatório, a busca cessa, obtendo-se o valor da intersecção da linha de projeção desses pontos homólogos. Logo, a partir dos pontos homólogos, usando o princípio da triangulação, é calculada a nuvem de pontos tridimensionais para toda a cena em cada *pixel* de forma iterativa.

2.2.1 Calibração

Para determinar a terceira coordenada por triangulação, é necessário conhecer, precisamente, as posições e orientações das câmeras, tanto quanto seus parâmetros intrínsecos, ou seja, a matriz de projeção P . Uma forma tecnicamente adequada de obter a posição global das câmeras é utilizar um gabarito com padrões conhecidos. Com o processamento matemático do padrão de calibração, utilizando bibliotecas de calibração para câmeras, são extraídas informações sobre os parâmetros necessários para a matriz de projeção das câmeras [3]. Neste trabalho foi utilizado padrão com elementos circulares na calibração, como observado na figura 2-16.

Figura 2-16 – Aquisição do padrão de calibração com alvos circulares para calibração da câmera.



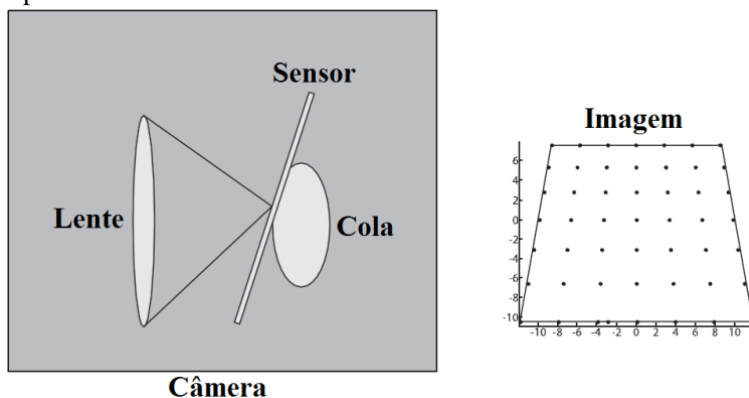
Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

O programa de calibração inicia determinando as posições dos centros dos círculos. Para uma calibração adequada o número típico de posicionamentos do padrão de calibração é três, e assume-se que para cada posição, o padrão bidimensional está em $Z=0$ no sistema de coordenadas globais. É interessante que sejam três posicionamentos do padrão porque, matematicamente, com uma quantidade maior de posições, existe um aumento do resíduo devido a limitações do modelo

matemático utilizado, e, também, sobre imperfeições do padrão desenvolvido [3]. Para as coordenadas tridimensionais do centro de cada círculo do padrão de calibração, é associada a sua projeção na imagem. A partir dessa associação, determina-se a aproximação da matriz de projeção, por meio de um método linear. Tal método combina a equação $\mathbf{m}=\mathbf{P.M}$ para cada uma das duas câmeras, gerando a fórmula $\mathbf{B.M}=0$ [33, *apud* 3]. O resultado dessa calibração é uma matriz de projeção \mathbf{P} , conforme descrição no item 2.1, contendo os parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera.

Atreladas ao custo das câmeras estão a qualidade limitada dos seus componentes e o processo de montagem. Alguns fatores e suas causas podem ser observados na figura 2-17, como a influência do desalinhamento do sensor de captura de imagem em relação à lente da câmera. Esses fatores estabelecem limitações que estão associadas à calibração das câmeras.

Figura 2-17 – Desalinhamento do sensor de uma câmera com componentes de baixo custo.

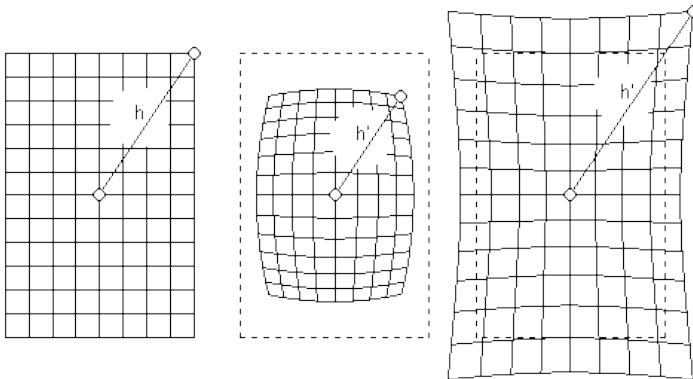


Fonte: [25].

As possíveis distorções radiais, normalmente, se manifestam de duas formas: o efeito barril, mais comum, ou o efeito almofada. As distorções são consideradas parâmetros intrínsecos à câmera [34]. Esses efeitos são provenientes da estrutura esférica da lente e de seu alinhamento com o sensor de captura. É possível construir lentes sem esse tipo de distorção, chamadas de lentes parabólicas, mas se tornam muito caras, pois seu processo de fabricação é muito mais complicado

do que o das lentes esféricas. Como alternativa, existe a possibilidade de se utilizar um sistema de lentes visando otimizar o desempenho do conjunto para se minimizar os efeitos dessas distorções. Para o caso de webcams, que são câmeras simples e baratas, essas distorções são mais acentuadas. A denominada distorção tangencial pode ser comparada ao astigmatismo no olho humano. Ele vem da má formação da córnea ou cristalino, quando estes ficam com um formato semelhante a uma bola de futebol americano. Esse formato faz com que a imagem não se forme em um único plano, resultando numa imagem não nítida, já que o foco da lente se altera em diferentes eixos. Isto faz com que a imagem não se forme corretamente ou apresente distorções. As imperfeições do efeito barril e almofada, advindas da construção da lente, são exemplificadas na figura 2-18.

Figura 2-18 – Imagem sem distorção, efeito barril e almofada, gerados pela lente esférica.



Fonte: [35].

Um método adotado para diminuir os efeitos de distorção é utilizar um dispositivo que limite a entrada de luz à região paraxial da lente, o diafragma. Logo, quanto menor a passagem de luz, menor o efeito das distorções, desde que esse componente esteja estrategicamente posicionado, usualmente próximo à lente ou entre as lentes de um conjunto. A desvantagem dessa solução é o aumento do tempo de exposição para sensibilizar o sensor de captura. Com isso, a aquisição de imagens se torna muito lenta e, com a possível vibração da câmera, a qualidade da imagem resultante pode vir a ser prejudicada.

2.2.2 Medição com múltiplas câmeras

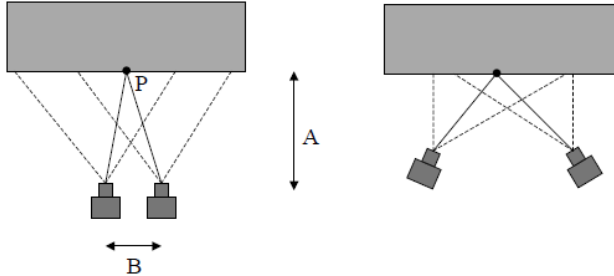
Uma possibilidade para melhorar a qualidade da medição é o uso de múltiplas câmeras. Com um número maior de câmeras são obtidas mais informações sobre a cena. Essa melhoria advém da redundância de informação de um mesmo ponto da cena nas imagens adquiridas. Isso é possível pela minimização dos efeitos aleatórios provenientes das câmeras, como ruído, além de defeitos de construção da lente e sensor de captura.

O procedimento ideal é adquirir as imagens de uma só vez com todas as câmeras. Com câmeras científicas, esse procedimento é possível, porém, no caso da proposta desta dissertação, são utilizadas *webcams*. O acionamento das *webcams* só pode ser feito sequencialmente com uma câmera de cada vez, por limitações de acionamento de seu *driver*. Também para a melhoria da medição nesse processo são dispostas câmeras em diferentes posições, assim diminuindo as áreas com oclusões.

Como alternativa ao uso de múltiplas câmeras é possível utilizar uma mesma câmera independente em diversas perspectivas da cena. Este procedimento agrega quase todos os benefícios descritos no parágrafo anterior, porém prejudica mais uma variante que é o tempo de aquisição, cujo aumento se dá devido à necessidade de mover a câmera e, também, sobre o reposicionamento da câmera que deve ser sempre garantido estar nas mesmas posições em que foi feita a calibração [3].

A incerteza do cálculo da coordenada Z pela intersecção dos raios provenientes da triangulação com as câmeras depende, entre outros fatores, do ângulo entre esses raios. Logo, quanto menor for o ângulo entre as câmeras, pior será a incerteza do sistema. Essas afirmações estão relacionadas, também, à distância entre câmeras; quanto maior essa distância, melhor será a medição, pois considerando um pequeno erro de calibração sobre a translação e rotação da câmera, menor será a influencia da mesma [9]. Levando em consideração que a determinação dos pontos sobre as imagens apresentem pequenos erros, esses serão amplificados, especialmente para encontrar a terceira coordenada, quando o ângulo entre os raios for muito pequeno. Analisando essas considerações, é possível perceber que câmeras com ângulo de abertura grande são preferidas na fotogrametria [4][9], e é possível observar no esquemático da figura 2-19. Deve-se ressaltar que, com ângulos demasiadamente grandes, aumentam as chances de acontecerem oclusões e, também, a ocorrência de distorções mais pronunciadas devido à perspectiva.

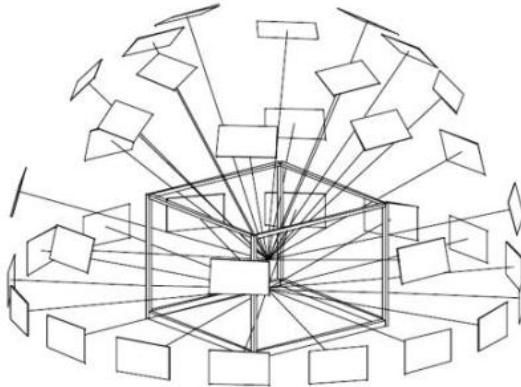
Figura 2-19 – Intersecção da visão das câmeras.



Fonte: [9].

A configuração ideal para medição de um objeto seria aquela em que o sistema obtenha diversas imagens que se sobreponham à área de interesse da cena. Para o caso da calibração das câmeras, podendo ser diversos posicionamentos do padrão de calibração. Por isso é interessante posicionar o sistema de medição em diferentes posições e orientações, e isto com um alto grau de convergência, cobertura e redundância sobre a mesma cena como uma estrutura formando um mosaico de forma esférica ao redor do objeto. Por esses motivos, o uso de múltiplas câmeras se torna favorável, sendo que a redundância de informações parte para essa mesma idéia, porém geralmente descartada por se tornar um processo caro, já que teria que utilizar muitas câmeras, como demonstra a figura 2-20 abaixo.

Figura 2-20 – Configuração ótima para medição fotogramétrica.



Fonte: [36].

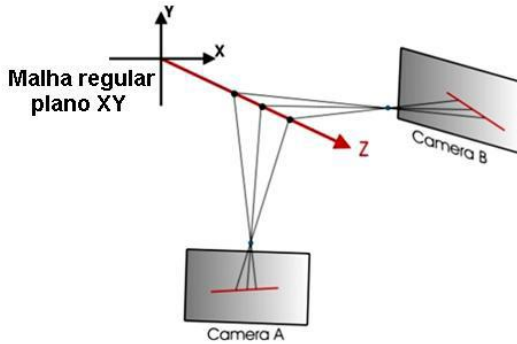
2.3 ALGORITMO Z-SCAN

Para determinar as coordenadas 3D de pontos, empregou-se uma sistemática alternativa já desenvolvida e utilizada em trabalhos anteriores do Labmetro denominada Z-scan [2]. Ela foi reinterpretada na linguagem LabVIEW®, em função da mesma possuir uma biblioteca específica para processamento de imagens e para disponibilizar ao LABMETRO o *software* em mais um tipo de linguagem também praticada no laboratório, podendo auxiliar trabalhos futuros.

O algoritmo Z-scan de busca da terceira coordenada encontra os pontos da cena a partir dos valores de fase absoluta calculados para as imagens em cada uma das câmeras (figura 2-21). A busca desses pontos homólogos acontece dentro de um volume de medição previamente determinado, adotando-se uma sequência pré-estabelecida citada abaixo [2].

1. Definir o nó X,Y da malha a ser testado;
2. Definir os limites das coordenadas Z no volume de medição: Z_{\min} e Z_{\max} ;
3. Definir ΔZ dividindo intervalo entre Z_{\min} e Z_{\max} em n partes;
4. Projetar nos mapas de fase cada ponto **M** formado pelas coordenadas X,Y e $(Z_{\min} + \Delta Z * i)$ com $i = 0,1,\dots,n$, utilizando a equação (1) e (3) para cada câmera ou projetor;
5. Determinar o ponto projetado com menor diferença ou variância entre fases;
6. Definir os novos valores de Z_{\min} e Z_{\max} como um incremento ΔZ imediatamente anterior e um incremento ΔZ imediatamente posterior ao definido como de menor diferença de fase;
7. Retornar para o passo 3, redefinir ΔZ e reiniciar a procura variando o novo valor de ΔZ até que a diferença de fase ou a variância seja suficientemente pequena (e.g. 0,005 mm);
8. Definir a coordenada Z como a média do último Z_{\min} e Z_{\max} atribuídos pelo programa;
9. Retornar para o passo 1 até medir toda a malha com passo pré-definido [3, p.79-80].

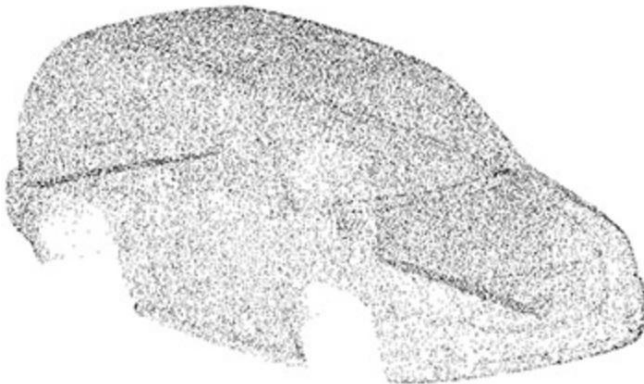
Figura 2-21 – Busca da terceira coordenada.



Fonte: [2].

Concluídos os passos do algoritmo para uma malha estruturada em coordenadas cartesianas, é obtida a nuvem de pontos da cena. Com esses pontos é possível representar graficamente o objeto medido conforme apresentado na figura 2-22 a nuvem de pontos da medição de um carro. Também com essa malha regular de pontos, é possível fazer comparações matemáticas com arquivos de referência e, então, analisar em que ponto ocorrem as maiores diferenças, sinalizá-las, podendo ser feita essas comparações em programas como o MATLAB e o LabVIEW. Sendo assim, pode permitir o uso para aplicações práticas como controle de qualidade de peças e produtos ou comparação de uma superfície livre qualquer desejada.

Figura 2-22 – Nuvem de pontos obtida pela medição de um carro.



Fonte: [28].

3 SISTEMA DESENVOLVIDO

O sistema é composto de até seis câmeras de baixo custo, do tipo *webcam* com conexão USB e um projetor multimídia operado por LED; as especificações técnicas dos componentes utilizados para construir o sistema desenvolvido constam no Apêndice A. As medições são tratadas por um *software* desenvolvido na plataforma LabVIEW.

3.1 REQUISITOS DO PROJETO

Para atingir os objetivos do projeto, estabeleceu-se uma série de requisitos para obter uma medição aceitável dos pontos de vista técnico e econômico.

O volume de medição deve ter dimensões compatíveis para a aplicação na área de fisioterapia. É estipulado um volume de medição em $200 \times 200 \times 50 \text{ mm}^3$. Algumas peças com geometrias conhecidas serão utilizadas na validação do sistema e devem ter dimensões compatíveis com o volume de medição do sistema. A peça a ser medida pode ter forma de superfície livre.

Para ser possível conectar a câmera a computadores comerciais, a conexão do tipo USB se torna desejável, pois está presente em quase todos os modelos de computadores tipo PC e portáteis. Outras características importantes são os controles mínimos sobre funções básicas como ajuste de brilho, tempo de exposição, foco, entre outros.

Com relação ao algoritmo, é necessário que ele seja desenvolvido de forma a permitir um processamento compatível com a capacidade dos computadores comerciais convencionais de baixo custo, para viabilizar o uso do sistema financeiramente.

Os testes serão feitos em ambientes com luminosidade reduzida, temperatura controlada em $23 \pm 1^\circ$ Celsius, utilizando mesa com minimização de vibrações externas. A condição de iluminação deve permitir a observação das projeções com um contraste que permita visualizar nitidamente os padrões projetados na cena.

Com a medição de partes do corpo humano voltada para a fisioterapia existe uma incerteza mínima desejável para o acompanhamento do tratamento do paciente. As incertezas de medição da nuvem de pontos 3D devem ser aproximadamente de 2 mm [3] para se ter uma comparação aceitável no tratamento.

A possibilidade de múltiplas combinações das câmeras na medição da terceira coordenada deve ser implementada com o intuito de preservar a flexibilidade e, quando possível, a simplicidade do sistema.

3.2 CONFIGURAÇÃO

3.2.1 Disposição dos componentes

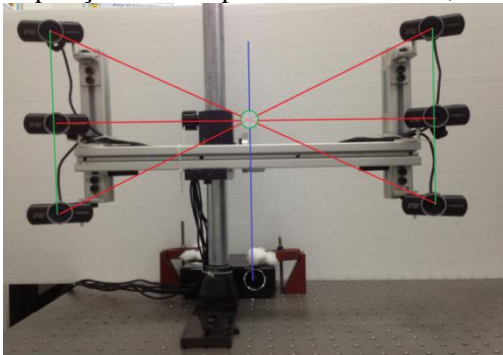
A disposição dos componentes visou objetivar à idéia de um produto, em que o espaçamento entre câmeras não poderia ser muito grande, pois implicaria um equipamento demasiadamente grande, mesmo que isto melhore a qualidade da medição.

Os componentes do equipamento foram dispostos para permitir a mensuração confiável dentro do volume de medição fixado. Esta disposição dos componentes foi feita de acordo com as características óticas das câmeras, ângulo de abertura e profundidade de foco e também a forma como o projetor se comporta, projetando suas imagens acima do nível da superfície em que está apoiado.

As câmeras foram dispostas acima do projetor, estando contidas em um mesmo plano. A linha verde apresentada na figura 3-1 possui um comprimento de aproximadamente 150 mm. As câmeras centrais do sistema estão horizontalmente afastadas aproximadamente 350 mm. O cruzamento das linhas vermelhas representa o ponto central das câmeras. O centro da lente do projetor está alinhado verticalmente com o ponto central das câmeras e, aproximadamente, a uma altura de 300 mm. O objeto a ser medido deve estar na mesma altura do ponto central das câmeras e em torno de 500 mm de distância.

As câmeras foram dispostas em suportes que possibilitam a inclinação no eixo horizontal, rotação no eixo vertical e translação em relação ao ponto central do sistema para que as regiões mais centrais das *webcams* sejam envolvidas na medição da cena.

Figura 3-1 – Disposição dos componentes no sistema, vista frontal.



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

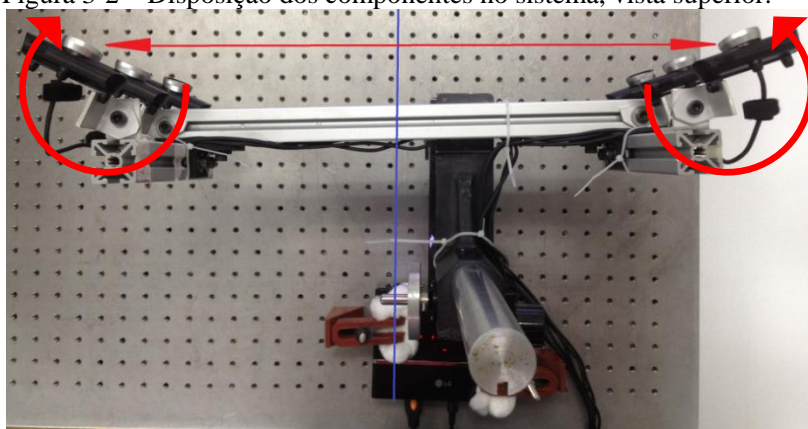
3.2.2 Volume de medição

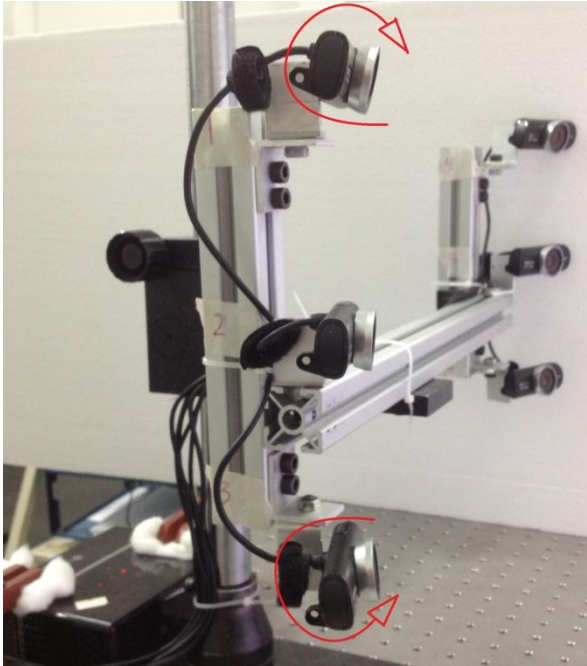
Conforme levantadas as características dimensionais necessárias para o uso do sistema na área da fisioterapia, o volume de medição tem seu ponto inicial Z0 a uma distância de aproximadamente 500 mm do ponto central das câmeras. Assim, o volume de calibração abrange as dimensões de $360 \times 240 \times 60 \text{ mm}^3$, a partir do ponto inicial Z0, pois depende diretamente do padrão de calibração que possui uma área de $360 \times 240 \text{ mm}^2$ com pontos utilizados para os cálculos da matriz de projeção. O uso de uma mesa de deslocamento possibilitou mover o padrão de calibração em sete posições, com incrementos de 10 mm gerando 60 mm de deslocamento no eixo Z.

3.2.3 Definição dos ângulos das câmeras

As câmeras foram rotacionadas em relação ao eixo vertical e horizontal (figura 3-2) de forma que o centro do volume de medição se aproximasse do centro de cada imagem, visando usar a região mais central das lentes, com o intuito de minimizar os efeitos de aberrações e distorção. O projetor foi disposto, ligeiramente, atrás do plano das câmeras, com isso sua projeção abrange uma área maior que o volume de medição.

Figura 3-2 – Disposição dos componentes no sistema, vista superior.





Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

3.3 SELEÇÃO DAS CÂMERAS

Como critério para seleção da câmera foi utilizada uma relação de compromisso entre a qualidade da imagem e baixo custo, considerando também o tipo de conexão a ser utilizado. A opção por câmeras do tipo *webcam* atendem essas necessidades e frequentemente utilizam conexões do tipo USB, presentes na maioria dos computadores comerciais. Como aspectos negativos, possuem limitações quanto aos seus recursos e uso.

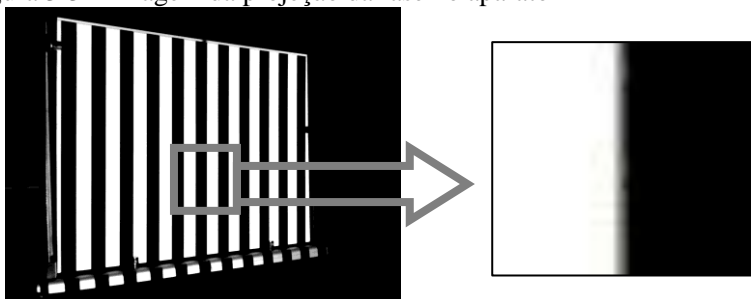
As principais limitações encontradas e testadas foram a falta de controle sobre a compactação das imagens, baixa linearidade de resposta (curva de resposta câmera/projetor), baixa estabilidade e relativamente longo tempo de estabilização após ser acionada a *webcam*. Foram testados três modelos de webcam:

Uma da marca Logitech, outra da Microsoft e por último uma câmera da marca Creative. Na sequência, são descritos os testes efetuados e os pareceres gerados.

3.3.1 Qualidade da imagem

Para verificar a qualidade das imagens adquiridas pela *webcam* foram projetadas franjas binárias em um aparato branco e plano, logo analisando as bordas das imagens adquiridas pelas câmeras ao estímulo de um degrau projetado. O processo de análise consiste na observação da definição de bordas na imagem, após ser dado um *zoom* digital (figura 3-3). Quanto maior a quantidade de *pixel* necessária para acontecer à transição do branco para o preto ou do preto para o branco, pior foi considerada a qualidade da imagem. É importante ressaltar que os parâmetros de ajustes da câmera influenciam nesse aspecto.

Figura 3-3 – Imagem da projeção da fase no aparato



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

O primeiro modelo de câmera a ser testado foi a Logitech QuickCam Pro 9000, pois já estava disponível no laboratório. Foi observado que o modelo Logitech compactava a imagem para o formato “.jpg”, esse formato não é interessante, pois envolve grande perda de qualidade. Diversas tentativas foram realizadas para se tentar reverter esse quadro, sem sucesso.

O fabricante confirmou que a compactação é automática e que não teria como fornecer mais informações sobre o assunto. Por meio de pesquisa pela internet em fóruns de comunicação, foi entendido que a compactação acontece por hardware, dificultando, ainda mais, a possibilidade de se modificar esta *webcam*. Como última alternativa, foi desmontada uma câmera para se obter o número de seu controlador para encontrar seu *datasheet*, porém nenhum dos fornecedores encontrados dispunha do arquivo, eliminando essa possibilidade, inclusive física.

Sem sucesso nas tentativas para alterar esse comportamento, a baixa qualidade foi determinante para a eliminação dessa câmera, pois prejudicaria, consideravelmente, a qualidade da medição. Dessa forma, tornaram-se desnecessários os demais testes com essa *webcam*.

A segunda *webcam* posta a teste foi a Microsoft LifeCam NX-6000, e com as configurações fornecidas pelo fabricante, aparentava suprir as necessidades do projeto. Com um sensor de 2MP a *webcam* da Microsoft atendeu às expectativas, apresentando nas imagens bordas razoavelmente bem definidas.

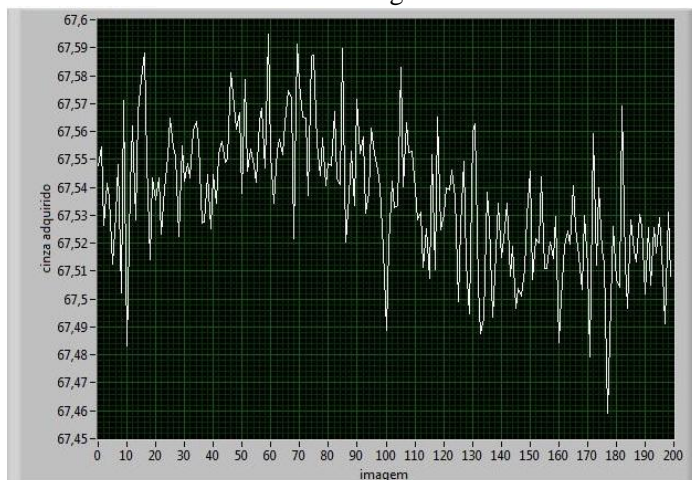
Por fim, a última câmera avaliada foi a Creative Live! Cam Socialize HD AF HD Webcam. Essa câmera possui um sensor com a mesma capacidade que a *webcam* da Microsoft e também apresentou resultados consistentes para a transição de cores, precisando de 2 a 3 *pixel* para transição.

3.3.2 Estabilidade da câmera

Apesar de haver descartado a câmera da Logitech pelo teste de qualidade de imagem, os próximos testes como estabilidade, tempo de acionamento e linearidade do sistema foram realizados para todas as câmeras. O objetivo da realização desses testes com todas as câmeras foi gerar o maior número de informações possível a respeito das mesmas.

A estabilidade foi avaliada projetando de um único nível de cinza em um aparato branco e plano. Foi adquirida uma sequência de 200 imagens e então calculada a média de intensidade de cinza de cada imagem. Analisado o gráfico dessa intensidade de cinza pelo número de imagens, foi possível diagnosticar se as variações do brilho das imagens estavam dentro de limites aceitáveis, menores que um nível de cinza, para não influenciar demasiadamente nas medições, conforme figura 3-4.

Figura 3-4 – Gráfico da estabilidade do ganho de brilho de uma câmera.



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

As três câmeras foram testadas e, a seguir, descrevem-se os resultados obtidos com cada uma delas.

A câmera da Logitech apresentou uma boa estabilidade nesse teste, porém o resultado pode ter sido influenciado pelo fato da qualidade da imagem não ser boa. A compactação da imagem fez com que ocorresse um borrão, podendo espalhar e minimizar o efeito de oscilação de intensidade na imagem.

Com a câmera NX-6000 ocorreu uma grande influência do ganho automático. A opção de desativar não existe por *software*, pois acontece fisicamente em seu hardware. Em uma tentativa semelhante à Logitech, foi aberta uma das câmeras da Microsoft para se obter alguma informação de seu controlador. Também sem sucesso, não foi possível modificar a webcam, fazendo com que esta não fosse selecionada para o trabalho.

Para a Creative existiu a mesma dificuldade da Microsoft. O fabricante também informou que não seria possível desabilitar a função de ganho automático, pois essa opção não existia no software disponibilizado no pacote da câmera. Essa característica da Creative difere da *webcam* da Logitech que apresenta, em seu software proprietário, a escolha de uso dessa função. Acionando o *driver* da câmera Creative por intermédio do programa LabVIEW, foi possível desabilitar a função de ganho automático. Eliminando essa dificuldade,

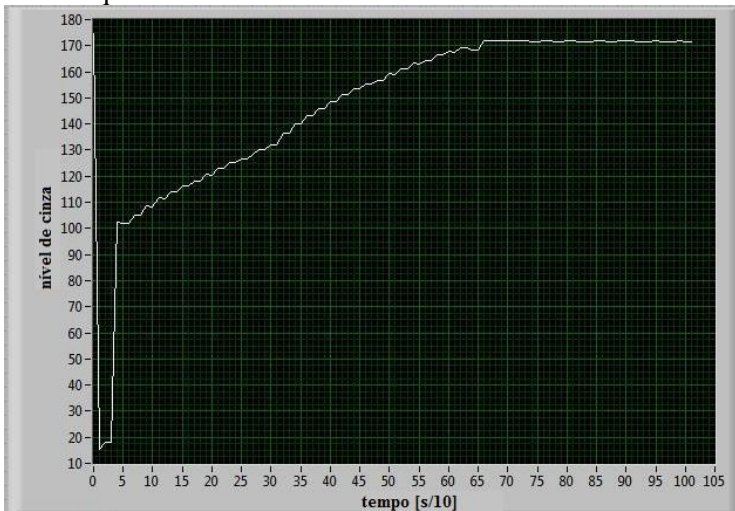
a câmera Creative apresentou resultados satisfatórios, variando em menos de 0,2 níveis de cinza.

3.3.3 Tempo de acionamento

Após acionar a câmera, é necessário um tempo de espera até a mesma estabilizar. Nesse trabalho, esse tempo de espera é importante, pois se trata do uso de seis *webcams*. O tempo de acionamento é extremamente importante para a medição, sendo que com altos tempos de acionamento torna-se inviável a medição de cenas não estáticas. Tempo de acionamento rápido diminui a possibilidade de que a imagem tenha sido gerada, tenha sido influenciada pela movimentação do objeto. Dessa maneira, observa-se uma limitação da conexão USB sobre o tempo de medição por não possibilitar o acionamento simultâneo das câmeras, sendo necessário alternar a aquisição da imagem para cada câmera; consequentemente, demandando mais tempo.

Neste ensaio foi acionada a câmera e imediatamente uma sequência de imagens foi feita. Plotando um gráfico de intensidade de cinza de cada imagem pelo tempo, é possível analisar em que momento a câmera se torna estável dentro dos padrões atingidos no teste de estabilidade, observado na figura 3-5.

Figura 3-5 – Gráfico do tempo de acionamento da câmera versus nível de cinza adquirido.



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

O acionamento da câmera Logitech ocorreu normalmente, sem grandes problemas de formação da imagem e sem demora em seu tempo de estabilização após acionamento.

Para a Microsoft, houveram algumas complicações. Quando se acionava a câmera, a imagem tomava um longo tempo para equilibrar o seu brilho automático, demorando até 7 segundos para se estabilizar, variando esse valor entre câmeras. Além desse longo período de estabilização após seu acionamento, durante a sequência de imagens foi necessário usar um tempo maior entre as aquisições das imagens. O tempo entre imagens foi atrelado ao fato de que a imagem não se formava por completo quando capturada com um intervalo de tempo menor. Essa má formação por tempo de acionamento gerava imagens com falta de *pixel*, ou, em casos extremos, grandes partes em torno de 50% da imagem totalmente pretas.

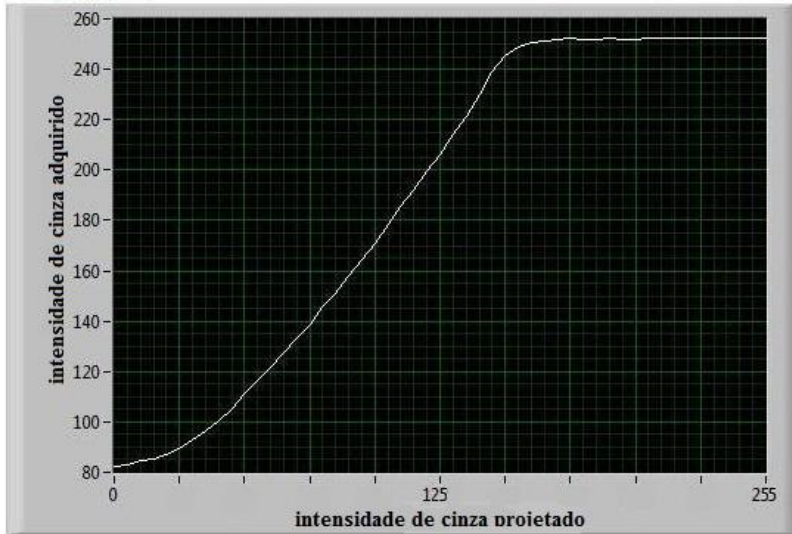
A *webcam* da Creative funcionou adequadamente, apresentando imagens boas em um intervalo de tempo inferior ao da Microsoft. Seu tempo de estabilização, após acionamento, foi de aproximadamente 3 segundos, menos da metade do tempo da Microsoft e não apresentou maiores problemas.

Apesar de ter-se obtido o tempo de acionamento bastante reduzido na câmera da Creative, é necessário reforçar que o fato de ter que acionar uma câmera por vez é um limitador do uso das *webcams* para medição de cenas estáticas, aumentando o tempo de medição.

3.3.4 Linearidade do sistema

Para verificar a linearidade de resposta do sistema foi projetada uma sequência de imagens, cada projeção contendo apenas um nível de cinza variando de 0 a 255, do preto ao branco respectivamente, com incrementos de 5 níveis de cinza (eixo da abscissa na figura a seguir). Para cada incremento, é obtida a média de intensidade do nível de cinza da imagem adquirida (eixo da ordenada na figura abaixo). Gerando, então, um gráfico de intensidade do nível de cinza do adquirido pela *webcam* em função do nível projetado, é possível analisar a linearidade de resposta e, também, a região de saturação do sistema.

Figura 3-6 – Gráfico da curva de resposta da linearidade do sistema de medição para níveis de cinza projetados versus adquiridos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Por ser uma *webcam* razoavelmente estável, a Logitech possui uma curva de resposta com sensibilidade e linearidade boas. Apresentou no gráfico uma curva suave como se espera e níveis de saturação não pronunciados. Esses níveis de saturação são as regiões do gráfico em que a câmera não consegue mais distinguir o branco e preto de um determinado nível de cinza projetado.

A NX-6000 teve, em seu gráfico, alguns distúrbios consideráveis. Mostrou falta de suavidade da curva de resposta provocada pelo fato do ganho automático funcionar de forma diferente para diferentes níveis de cinza e influenciar a linearidade do sistema.

Por fim, a câmera da Creative se mostrou estável, também, nos testes de linearidade do sistema. Com um gráfico de linha suave e regiões de saturação aceitáveis, conforme figura 3-6 anteriormente apresentada.

Considerando todos os testes realizados para a seleção das câmeras, o modelo que apresentou maiores vantagens de utilização para o sistema proposto foi a Creative como pode ser observado na tabela 3-1. Esse modelo de câmera foi superior aos demais no que diz respeito à qualidade da imagem. Com relação aos outros testes, a Creative foi

semelhante ao modelo Logitech. O modelo da Microsoft teve os piores desempenhos para estabilidade e tempo de acionamento.

Tabela 3-1 – Comparativo das câmeras analisadas.*

Câmera \ Propriedades	Qualidade da imagem	Estabilidade	Tempo de acionamento
Logitech	Bordas pouco definida	Boa < 4s	Baixo
Microsoft	Bordas bem definida	Ruim > 6s	Alto
Creative	Bordas bem definida	Boa < 4s	Baixo

Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

*As propriedades analisadas foram discutidas nas secções anteriores (3.3.1; 3.3.2; 3.3.3).

Dessa maneira, o critério permitiu a diferenciação dos modelos e a escolha da câmera para o sistema proposto foi a qualidade da imagem, o que definiu a escolha do modelo Creative.

3.4 SELEÇÃO DO PROJETOR

A escolha de projetor partiu de trabalhos já realizados pelo LabMETRO. O projetor utilizado em trabalhos anteriores é o da marca LG, modelo HS101-JE apresentado na figura 3-7, e possui características satisfatórias para o desenvolvimento desse trabalho, sendo seu desempenho comprovado por trabalhos anteriores.

Figura 3-7 – Projetor multimídia.



Fonte: [38].

Esse projetor tem luminosidade de 100 lumens e dimensões razoavelmente pequenas (50 x 154 x 117 mm³), sendo operado por LED. Essa característica de luminosidade atende os requisitos mínimos para se obter uma boa medição e, sendo compacto, facilita o transporte e utilização do equipamento.

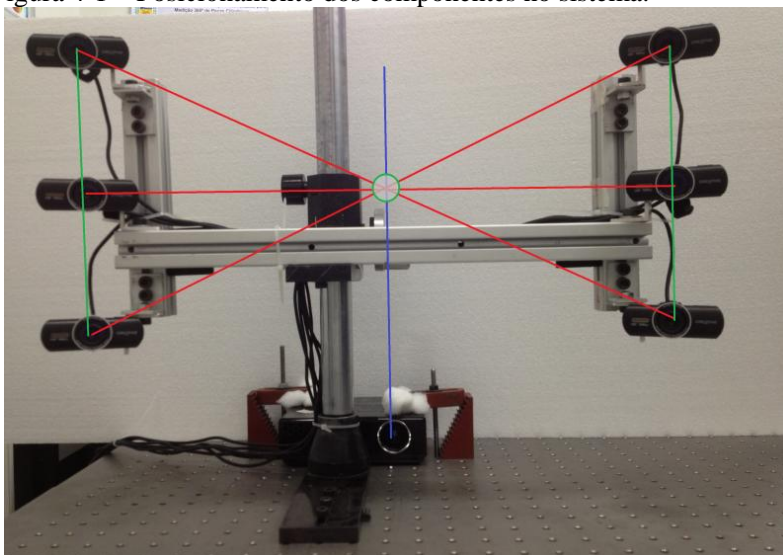
4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

4.1 CALIBRAÇÃO

4.1.1 Alinhamento do sistema

Para alinhar o centro da imagem das câmeras com o centro da projeção, primeiramente foi estabelecida a posição relativa das câmeras (figura 4-1) e o posicionamento em relação à lente do projetor.

Figura 4-1 – Posicionamento dos componentes no sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

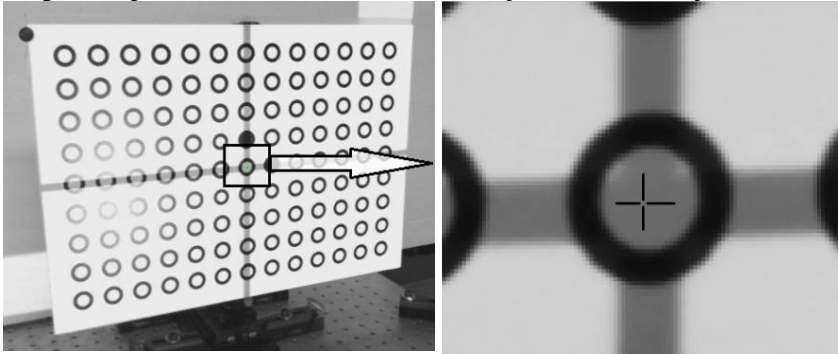
Como segundo passo, foi posicionado, na coordenada zero do sistema, aproximadamente a 500 mm das câmeras, o padrão de calibração.

Para ajustar as câmeras com o centro da projeção, foi projetado neste anteparo uma linha vertical e uma horizontal, perpendiculares, localizadas no centro da projeção (figura 4-2).

Fazendo uma captura de vídeo com uma das câmeras centrais paralelas ao projetor foi inserido um ponto ao centro da imagem (figura 4-2). Em seguida, foi ajustada a altura do sistema, procurando fazer

coincidir a linha horizontal da projeção com o ponto inserido na captura de vídeo da câmera. Posteriormente, foi rotacionada a câmera para centralizar este ponto com o cruzamento das linhas horizontal e vertical da projeção. Finalizado esse alinhamento foi então fixada a posição da câmera.

Figura 4-2 – À esquerda, padrão de calibração adquirido e à esquerda imagem ampliada do alvo central com marcação de centralização.



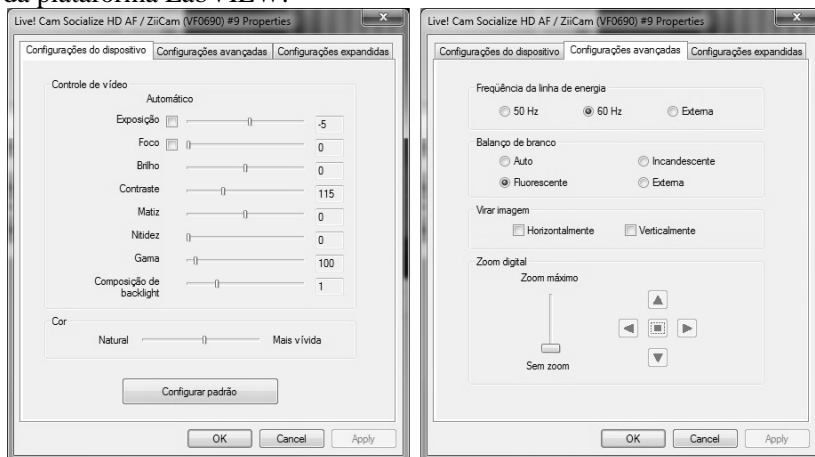
Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

O alinhamento das demais câmeras acontece de forma semelhante às câmeras anteriores. O centro da imagem de cada câmera foi feito coincidir com o ponto de cruzamento entre a linha horizontal e vertical projetada e, em seguida, fixada em sua posição.

4.1.2 Ajuste dos parâmetros da câmera e intensidade da projeção

Alguns parâmetros de regulagem da *webcam* são disponibilizados pelo fabricante, além de outros parâmetros ocultos ao usuário no *software* do fabricante, mas que podem ser acessados pelo LabVIEW como mostra a figura 4-3. Acessando os parâmetros das câmeras, por meio do *software* de aquisição e projeção de imagens, desenvolvido no programa LabVIEW, foi possível fazer alguns ajustes visando melhorar a qualidade na medição.

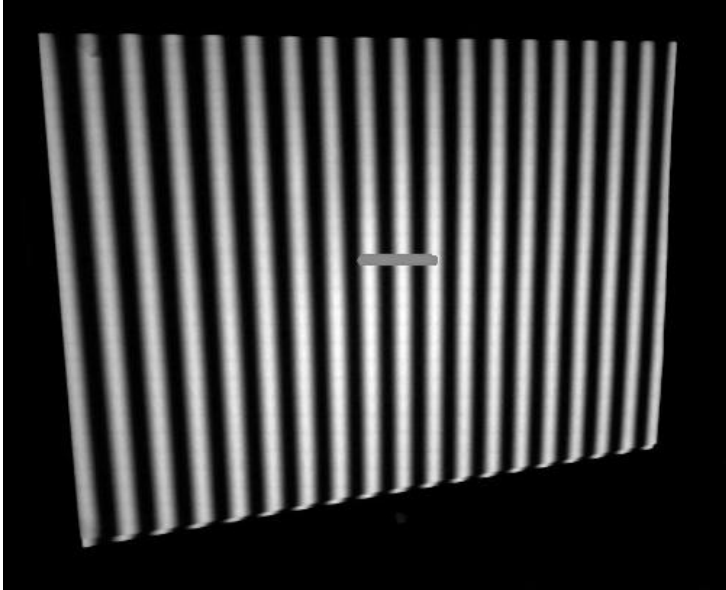
Figura 4-3 – Parâmetros de ajuste das câmeras disponíveis pelo acesso da plataforma LabVIEW.



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Os ajustes feitos para a câmera começam com a projeção de uma única imagem apresentando uma sequência de colunas de padrões senoidais com 32 *pixel* por período sobre a cena, nas condições de iluminação em que posteriormente a medição vai acontecer. O padrão senoidal projetado deve ter amplitude máxima, variando entre 0 e 255 níveis de cinza. Fazendo uma captura de vídeo, é analisada uma linha dessa imagem (figura 4-4), na região em que visualmente existe uma maior intensidade na cor branca e preta, que vai mostrar um perfil em forma seno devido à projeção senoidal.

Figura 4-4 – Projeção senoidal sobre um plano de vidro branco, e a linha analisada.

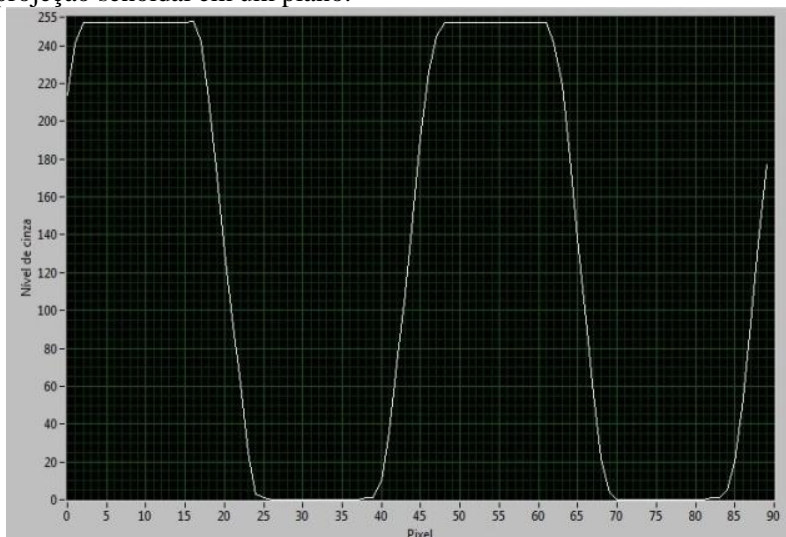


Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Com o gráfico de uma linha obtida a partir da análise da intensidade dos níveis de cinza adquiridos pela câmera, é possível mudar os parâmetros da câmera até que o perfil senoidal analisado no gráfico não tenha regiões de saturação nas cristas e vales do seno. Caso ocorra saturação nos vales ou cristas, como mostra a figura 4-5, deve-se ressaltar que o próximo passo a se seguir restringe a amplitude da intensidade do seno projetado. Limitando a amplitude da senoide é possível minimizar os efeitos de saturação nas imagens adquiridas pelas câmeras.

Após regular as câmeras foi modificada a amplitude da projeção senoidal. É feita essa correção na amplitude do seno projetado, pois não existe uma relação linear em toda a faixa de aquisição entre o branco e preto com os valores projetados. Essa falta de linearidade entre projetado e adquirido vem a deformar o perfil do seno adquirido, na largura da crista e vale, mostrado na figura 4-5.

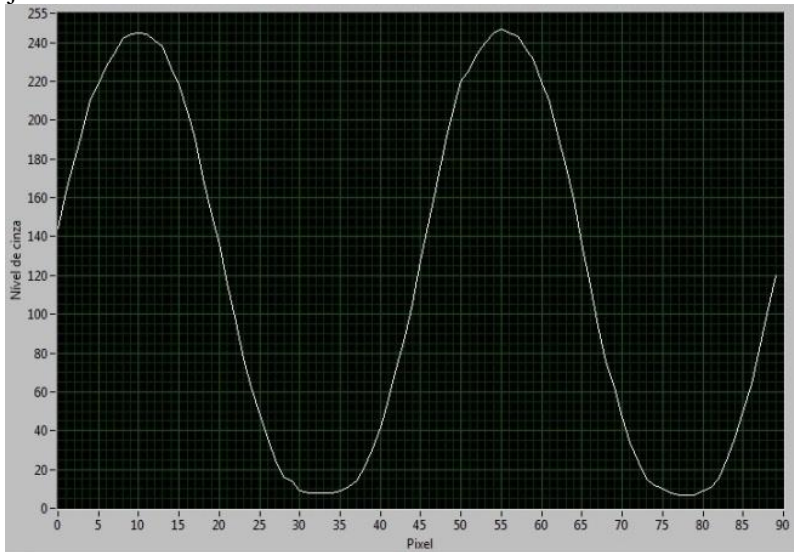
Figura 4-5 – Gráfico da saturação da *webcam* para aquisição de uma projeção senoidal em um plano.



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

A solução adotada para minimizar esse efeito, foi restringir os valores máximo e mínimo do seno projetado. A análise de como a aquisição do seno está se portando acontece semelhante às configurações feitas na câmera. Analisando uma linha da imagem adquirida pela câmera é gerado um gráfico da intensidade dos níveis de cinza por *pixel*. Logo, modificando a amplitude dos vales e das cristas do seno é observada a diminuição do efeito de saturação e, quando esse gráfico se torna o mais semelhante a um seno é cessado o ajuste. A figura 4-6 mostra a correção da saturação por limitação da amplitude do seno projetado da figura 4-5.

Figura 4-6 – Gráfico da aquisição das câmeras com parâmetros ajustados.

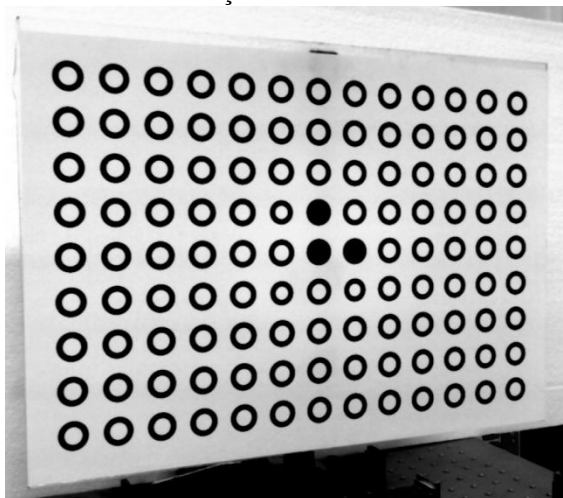


Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

4.1.3 Câmeras

A técnica de calibração adotada para obter a matriz de projeção da câmera começa com a produção de um bom padrão de calibração. Utilizando, como base, uma placa de vidro espesso, que tem sua superfície suficientemente plana, foi colada uma folha de papel impresso com padrão de calibração, apresentando diversos círculos igualmente espaçados de $30 \times 30 \text{ mm}^2$ destacado na figura 4-7. O papel tem gramatura alta para diminuir a possibilidade de se formar ondulações pela umidade da cola. A cola utilizada foi do tipo spray que, aplicada conforme instruções do fabricante, cria uma película homogênea. Foi utilizada uma espátula para expulsar bolhas de ar retidas entre papel e vidro, à medida que se colava a folha de papel. O padrão de calibração foi calibrado obtendo-se a média para o eixo $X=29,97 \text{ mm}$ e em $Y=29,95 \text{ mm}$.

Figura 4-7 – Padrão de calibração construído.

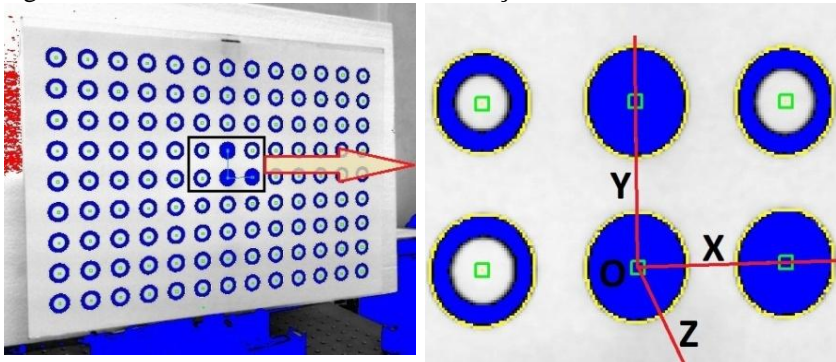


Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Com o uso de um pacote de calibração implementado pelo Labmetro, foram obtidas as matrizes de calibração para cada câmera individualmente. Para gerar a matriz de transformação da câmera, o algoritmo de calibração determina o centro de cada círculo apresentado no padrão de calibração. O centro de cada círculo é encontrado por meio da busca de pontos no perímetro externo de cada círculo, observados na ampliação apresentada na figura 4-8 por pontos amarelos ao redor da circunferência. Com o cruzamento de retas partindo dos pontos encontrados na borda do círculo, é possível definir o centróide de cada círculo [3].

O software de calibração utiliza três círculos totalmente preenchidos em seu centro, dispostos de forma perpendicular, para definir a origem do sistema de coordenadas cartesiano do sistema de coordenadas globais e seus eixos, conforme figura 4-8. O padrão de calibração foi fixado em uma mesa de deslocamento linear que, por sua vez, foi fixada na mesa *breadboard*. Para deslocar, de forma bem conhecida, o padrão de calibração foram utilizados blocos padrão encaixados entre uma placa de apoio e a mesa de deslocamento. A aquisição de imagens das câmeras aconteceu a cada incremento de deslocamento de 10 mm no eixo Z, com um total de sete passos, sendo que o quarto passo foi escolhido como ponto zero.

Figura 4-8 – Análises do software de calibração.



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

4.2 EXPERIMENTOS REALIZADOS

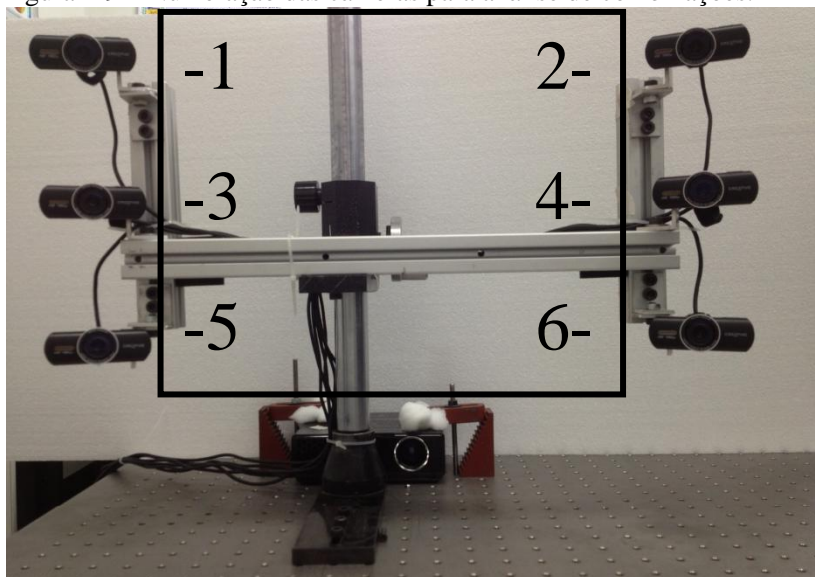
4.2.1 Geometrias conhecidas

A medição de geometrias conhecidas foi realizada com o intuito de validar o sistema de medição proposto, englobando o hardware e o software. A análise das medições foi feita para configurações com 2, 4 ou 6 câmeras, com três tipos de combinações para 2 e 4 câmeras. As diferentes combinações de câmeras, no cálculo da nuvem de pontos 3D, seguem as seguintes combinações:

- 1- 2 câmeras superiores, 1-2;
- 2- 2 câmeras centrais, 3-4;
- 3- 2 câmeras inferiores, 5-6;
- 4- 4 câmeras superiores, 1-2-3-4;
- 5- 4 câmeras pontas, 1-2-5-6;
- 6- 4 câmeras inferiores, 3-4-5-6;
- 7- 6 câmeras, todas.

Por sua vez, a numeração das *webcams* é apresentada na figura 4-9 seguinte.

Figura 4-9 – Numeração das câmeras para análise de combinações.



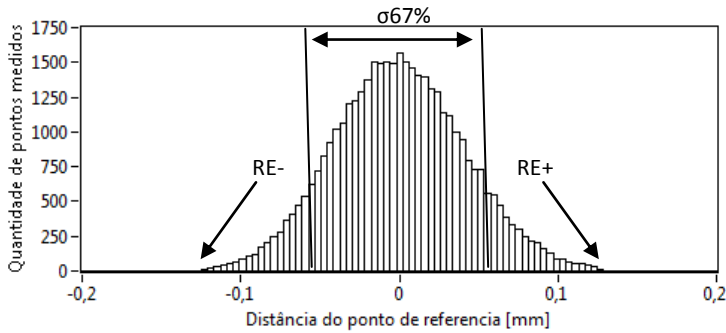
Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

4.2.1.1 Plano 0 grau

Para analisar o desempenho do sistema, foi inicialmente medida uma superfície plana de vidro pintado em uma área de $200 \times 200 \text{ mm}^2$, com uma malha de incrementos de 1 mm em cada eixo, simetricamente à região central do ponto Z0. Após ser ajustada a equação de um plano aos pontos medidos e subtraído, foi possível avaliar a qualidade da medição a partir da planeza obtida para os resíduos. O erro máximo de medição de planeza (RE - *Ebenheitsmessabweichung*) é encontrado no resíduo pela soma absoluta do maior valor positivo e negativo, o conceito de RE é apresentar o pior caso de medição possível do plano [32]. Para efeitos de comparação, é também utilizado o valor do desvio padrão nas análises das combinações de câmeras para medição do plano a 0 grau. Essa mesma placa de vidro foi medida em uma máquina de medir por coordenadas, gerando um valor de RE de 0,023 mm.

No histograma a seguir (figura 4-10), são apontados os valores de RE e desvio padrão com confiabilidade de 67%. O RE é a soma do valor mais afastado à esquerda e à direita do centro do histograma indicados com setas. O centro da distribuição da curva normal tem valor igual a 0, pois, quando é subtraído o plano matemático, a média vai ser igual a 0. Entretanto o valor do desvio padrão é o que representa o limite dentro de uma faixa de 67% cujos valores vão ser encontrados.

Figura 4-10 – Planeza e desvio padrão com confiabilidade de 67%.



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

O RE da medição realizada pelo sistema proposto para um plano de vidro sem inclinação (zero grau) é apresentado na tabela 4-1. Na sequência, é apresentado o gráfico desta tabela na figura 4-11.

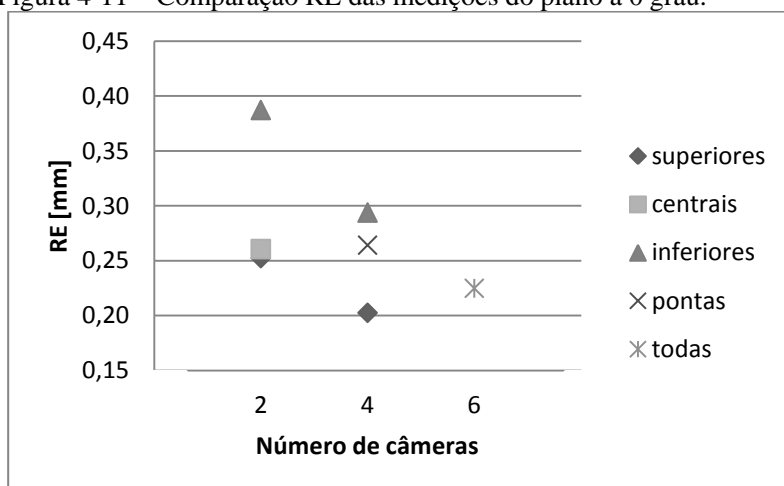
Tabela 4-1 – Comparação de RE para combinação de múltiplas câmeras.

RE[mm]	combinação das câmeras				
	superiores	centrais	inferiores	pontas	todas
2	0,25	0,26	0,39	-	-
4	0,20	-	0,29	0,26	-
6	-	-	-	-	0,22

Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

Fica entendido que, quanto menor o valor de RE, melhor é a medição, porque a soma do pior ponto positivo com o pior ponto negativo resulta em um valor mais próximo da referência. Na tabela anterior, é possível analisar que o pior caso está para duas câmeras inferiores com o valor RE = 0,39 mm e o melhor caso para 4 câmeras superiores. O esperado era que para o uso de 6 câmeras o RE fosse menor. Isso não aconteceu possivelmente porque as duas câmeras inferiores estavam agregando valores mais altos que a média das outras combinações de câmeras.

Figura 4-11 – Comparação RE das medições do plano a 0 grau.



Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

Na figura 4-11, é possível observar a tendência de que com um número maior de câmeras o RE diminui, inferindo que com uma quantidade maior de dados da cena é atingido um valor menor de incertezas de medição. O fato de o melhor caso acontecer para 4 câmeras indica que a rotação e inclinação das *webcams* tem uma grande influência no valor RE.

Outro conceito é utilizado para demonstrar os resultados obtidos pelo sistema de medição desenvolvido é o desvio padrão discutido apresentado na tabela 4-2 a seguir.

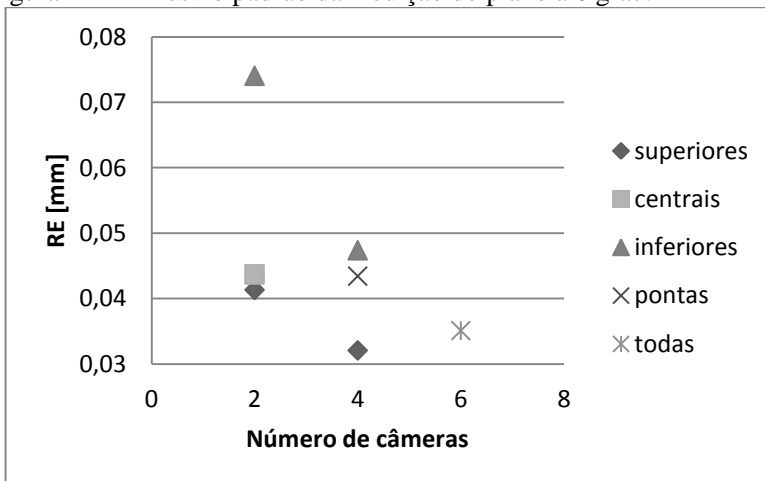
Tabela 4-2 – Comparação do desvio padrão para medições do plano a 0 grau.

desvio padrão [mm]	combinação das câmeras				
número de câmeras	superiores	centrais	inferiores	pontas	todas
2	0,041	0,044	0,074	-	-
4	0,032	-	0,047	0,043	-
6	-	-	-	-	0,035

Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

Neste caso do desvio padrão, os piores e melhores casos continuam sendo os mesmos que o da RE. Os demais valores também se assemelham, em uma escala menor aos valores da tabela do RE. Como existe uma semelhança dos valores de RE e desvio padrão, tem-se que a tendência apresentada na figura 4-12 abaixo implica considerações iguais ao gráfico da RE.

Figura 4-12 – Desvio padrão da medição do plano a 0 grau.



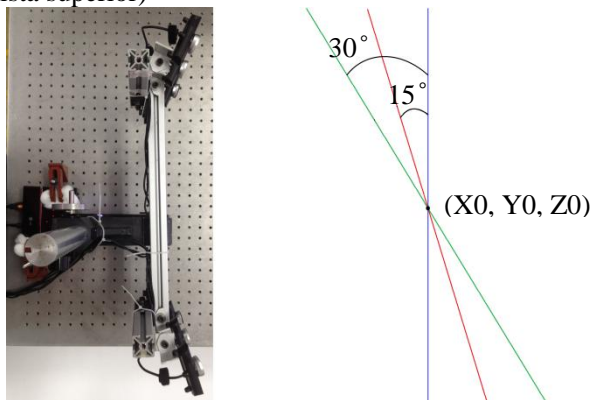
Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

Com relação às combinações de 2 e 4 câmeras, observou-se que para a inclinação de 0 grau, o menor desvio padrão e RE ocorreram quando se utilizou as câmeras superiores. A segunda melhor combinação para 2 câmeras são as centrais e para 4 câmeras as das pontas do sistema. Portanto, admite-se que as câmeras inferiores estão com incertezas maiores na medição e as superiores com menores incertezas, portanto, seguindo a mesma lógica observada na medição com o uso das 6 câmeras simultaneamente.

4.2.1.2 Plano 15 graus

Posteriormente, o plano de vidro foi inclinado em 15 graus e 30 graus na sequência, conforme a figura 4-13, e medido pelo sistema desenvolvido.

Figura 4-13 – Rotação do plano de vidro em relação ao sistema de medição (vista superior)



Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

Foi, novamente, ajustado um plano matemático dos pontos medidos e, também, subtraído. Os valores de RE, tabela 4-3, e desvio padrão, tabela 4-4, são apresentados abaixo.

Tabela 4-3 – Comparação do RE para medições do plano a 15 graus.

RE[mm]	combinação das câmeras				
número de câmeras	superiores	centrais	inferiores	pontas	todas
2	0,26	0,24	0,38	-	-
4	0,19	-	0,24	0,24	-
6	-	-	-	-	0,19

Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

A medição com combinação de 4 câmeras superiores e 6 câmeras se aproximaram, sendo esse o melhor caso de RE para medição do plano a 15 graus. Outra diferença desse caso é que a combinação de 2 câmeras centrais foi melhor do que as superiores. Já para a combinação de 4 câmeras, as inferiores estão com qualidade igual a das pontas. O desvio padrão segue as mesmas tendências da tabela dos valores de RE, em que o melhor caso continua sendo para 4 câmeras superiores.

Tabela 4-4 – Comparação do desvio padrão para medições do plano a 15 graus.

desvio padrão [mm]	combinação das câmeras				
número de câmeras	superiores	centrais	inferiores	pontas	todas
2	0,043	0,040	0,072	-	-
4	0,031	-	0,042	0,043	-
6	-	-	-	-	0,033

Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

4.2.1.3 Plano 30 graus

Com o plano inclinado a 30 graus, o volume abrangido pela peça vai além da calibração em aproximadamente o dobro da distância máxima de deslocamento do padrão de calibração. Mesmo assim, o sistema conseguiu medir corretamente o mensurado fora do volume de calibração do sistema de medição desenvolvido. A análise do RE é demonstrada na sequência pela tabela 4-5.

Tabela 4-5 – Comparação do RE para medições do plano a 30 graus.

RE[mm]	combinação das câmeras				
	superiores	centrais	inferiores	pontas	todas
2	0,23	0,22	0,33	-	-
4	0,17	-	0,23	0,23	-
6	-	-	-	-	0,18

Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

Neste caso, os valores de RE seguem a mesma tendência do plano a 15 graus, porém em menor escala. Vale ressaltar que, para o desvio padrão, o melhor caso foi para 6 câmeras, como pode ser observado na tabela 4-6.

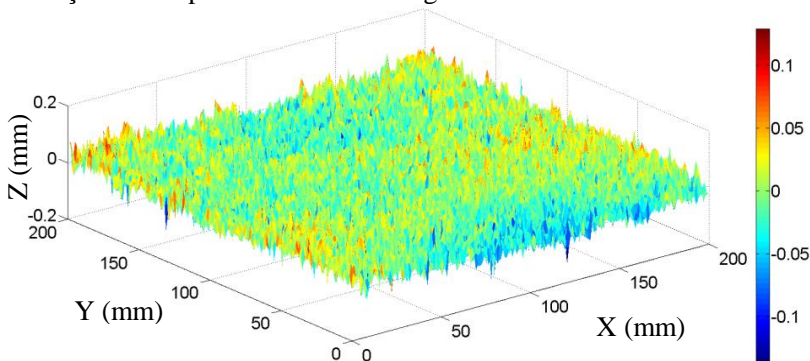
Tabela 4-6 – Comparação do desvio padrão para medições do plano a 30 graus.

desvio padrão [mm]	combinação das câmeras				
	superiores	centrais	inferiores	pontas	Todas
2	0,039	0,036	0,064	-	-
4	0,028	-	0,039	0,040	-
6	-	-	-	-	0,030

Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

O resíduo restante da subtração do plano matemático, ajustado ao plano medido, gera uma nuvem de pontos. Essa nuvem de pontos é apresentada em uma escala de cores na figura 4-14. Em um consenso geral, para o sistema de medição desenvolvido, considerando-se todos os ângulos de medição do plano, o menor RE acontece para a combinação de 4 câmeras superiores, medindo o plano a 30 graus. Por sua vez, o menor valor de desvio padrão aparece para a combinação das 4 câmeras superiores, também medindo o plano a 30 graus.

Figura 4-14 – Gráfico 3D do resíduo de uma área de 200 mm^2 para medição de um plano inclinado a 30 graus.



Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

A incerteza de medição diminuiu, na medida em que a inclinação do plano de vidro aumentou, ocorrendo a menor incerteza de medição para uma inclinação de 30 graus. Esse comportamento e a causa técnica da diminuição da amplitude do resíduo não foi possível determinar neste trabalho pelos testes realizados, necessitando maiores desenvolvimentos e análises em laboratório para avaliação do assunto.

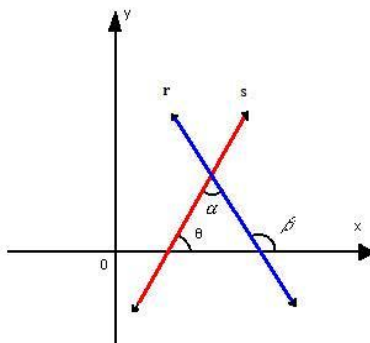
Considerando hipóteses, uma a ser confirmada poderia ser que a ocorrência dessa melhoria que se dá devido à ampliação do objeto medido, quando inclinado em direção às câmeras, seguindo a tendência de que os valores de RE e desvio padrão diminuem, à medida que o plano é inclinado. Essa melhoria, na qualidade da medição, pode estar ocorrendo por outros motivos como o caso das senoides projetadas estando mais focadas em regiões diferentes no eixo Z; outra possibilidade seria devido à dispersão da luz do projetor que, em alguns casos, poderia ficar concentrada em algumas regiões do objeto, influenciando nas medições.

4.2.1.4 Cálculo da inclinação das medições dos planos

Para verificação dos ângulos aplicados ao plano de vidro, foi feito o cálculo entre os posicionamentos do plano. Para esse cálculo foi utilizada a fórmula da tangente e o diagrama no plano cartesiano apresentados na figura 4-15, em que m_s e m_r são os coeficientes angulares das retas s e r respectivamente.

Figura 4-15 – Fórmula e diagrama para cálculo do ângulo entre duas retas.

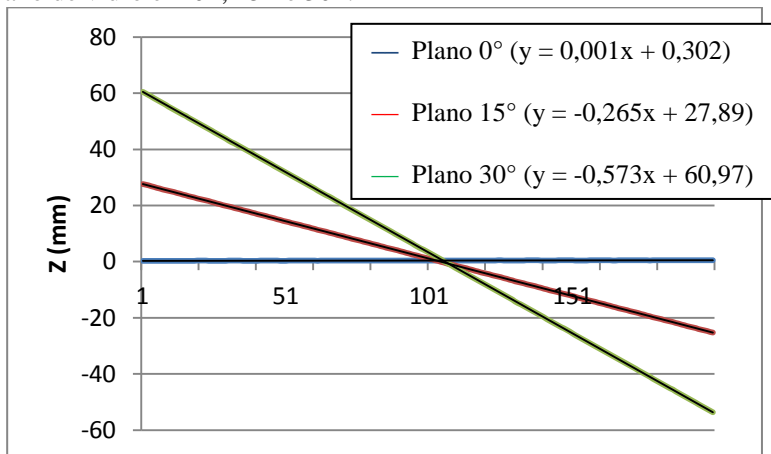
$$\operatorname{tg} \alpha = \left| \frac{m_s - m_r}{1 + m_s \cdot m_r} \right|$$



Fonte: [37].

Considerando a área de 200 mm^2 medida no plano de vidro, foi calculada a média, por colunas, de todos os pontos dessa malha regular, gerando, assim, uma linha média dos pontos para cada inclinação do plano, apresentada na figura 4-16. Comparando-se essas linhas a cada inclinação, foi conferido cada ângulo, para cada posicionamento do vidro.

Figura 4-16 – Gráfico da média da coluna de pontos da área medida do plano de vidro em 0° , 15° e 30° .



Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

A tabela 4-7, a seguir, apresenta os ângulos calculados para as diferentes inclinações impostas ao plano, conforme método descrito no parágrafo anterior. É possível observar que os ângulos gerados são próximos do posicionamento do plano medido, com diferenças de aproximadamente um décimo de grau.

Tabela 4-7 – Resultado do cálculo dos ângulos das inclinações impostas no plano de vidro.

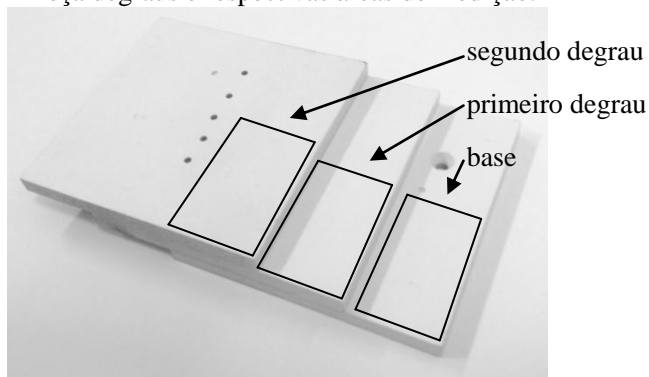
	ângulo
plano 0° - 15°	14,90°
plano 0° - 30°	29,87°
plano 15° - 30°	14,97°

Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

4.2.1.5 Degraus de 5 mm

O objeto mensurado possui três placas de 5 mm de espessura, retificadas, coladas uma sobre a outra, formando dois degraus a serem medidos e sendo pintados com uma camada de spray branco. São avaliadas as alturas de dois degraus em relação ao plano do degrau base. A peça medida é mostrada na figura 4-17 e é demarcada por quadrados de bordas pretas, a região analisada pelo sistema de medição, sendo que cada quadrado marcado possui área de 15 x 40 mm² para os três degraus. A nuvem de pontos é calculada para essas áreas da peça, marcadas na sua imagem, seguindo uma malha com incrementos de 1 mm.

Figura 4-17 – Peça degraus e respectivas áreas de medição.



Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

Para se alcançar dados coerentes para a medição da altura dos degraus em uma área da peça, primeiramente foi ajustado um plano matemático ao degrau base. Com o plano ajustado à base, é possível calcular as subtrações, ponto a ponto, das alturas do primeiro e segundo degraus relativas à base. Com os valores, assim obtidos, das alturas dos degraus, foi possível chegar a ter a média e desvio padrão de cada degrau. Para o cálculo da tendência (Td) foram usados valores de referência para as alturas dos degraus obtidos de uma máquina de medir por coordenadas, conseguindo o valor para o primeiro degrau de 5,18 mm e para o segundo degrau 10,40 mm. O nível de confiança da dispersão em relação a uma superfície plana (DSP) adotado foi de 95%, calculado a partir de dois desvios padrão. A tabela 4-8 apresenta a Td e a DSP95% para o primeiro e segundo degraus.

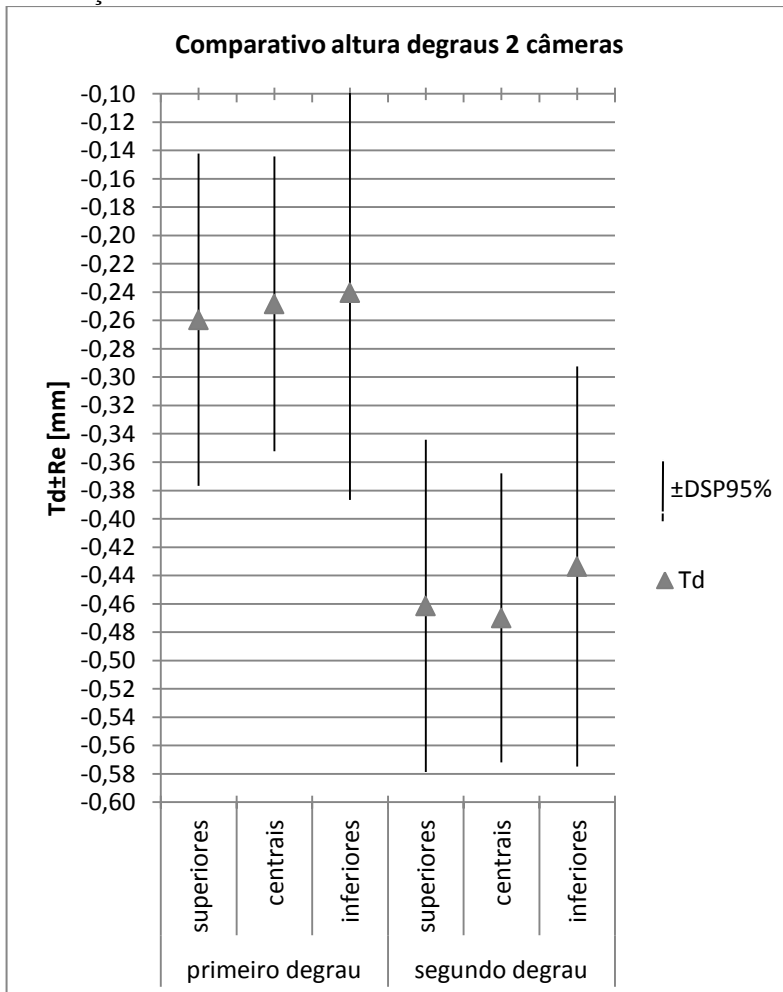
Tabela 4-8 – Comparativo da tendência da altura para combinações com 2 câmeras.

	2 câmeras	Td	DSP95%
primeiro degrau	superiores	-0,26	0,12
	centrais	-0,25	0,10
	inferiores	-0,24	0,15
segundo degrau	superiores	-0,46	0,12
	centrais	-0,47	0,10
	inferiores	-0,43	0,14

Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

Tanto para o primeiro quanto para o segundo degrau obtém-se DSP de 0,10 mm para as câmeras centrais, mostrando que 95% dos valores medidos estão dentro da faixa de $\pm 0,1$ mm a partir da média das alturas dos degraus. Porém, para a tendência, o melhor caso é para as câmeras inferiores. A figura 4-18 apresenta o comparativo da Td para 2 câmeras.

Figura 4-18 – Gráfico comparativo da tendência da altura para combinações com 2 câmeras.



Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

Pelo gráfico da $Td \pm DSP95\%$ para a medição dos degraus pelo sistema desenvolvido é possível observar uma homogeneidade nos valores medidos. Então, quanto mais afastado da base maior vai ser a Td calculada. Apesar de as câmeras inferiores apresentarem valor Td mais próximo de zero, é visível que o DSP é menor para as câmeras centrais. A análise da combinação de 4 câmeras, na medição dos degraus, é avaliada em seguida na tabela 4-9.

Tabela 4-9 – Comparativo da tendência da altura para combinações com 4 câmeras.

	4 câmeras	Td	Re95%
primeiro degrau	superiores	-0,25	0,09
	pontas	-0,25	0,11
	inferiores	-0,25	0,11
segundo degrau	superiores	-0,46	0,09
	pontas	-0,45	0,11
	inferiores	-0,45	0,10

Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

A combinação das 4 câmeras superiores apresenta os melhores resultados de dispersão em relação a uma superfície plana, mas novamente o caso não se repete como na análise de 2 câmeras, sendo que a melhor situação da Td fica para a combinação das inferiores e pontas. Os valores para o primeiro grau permanecem aproximadamente iguais para as diferentes combinações das *webcams*, isto também acontece para o segundo degrau. Com a possibilidade do uso de 6 câmeras foram obtidos valores semelhantes às combinações de 4 *webcams* conforme tabela 4-10 abaixo.

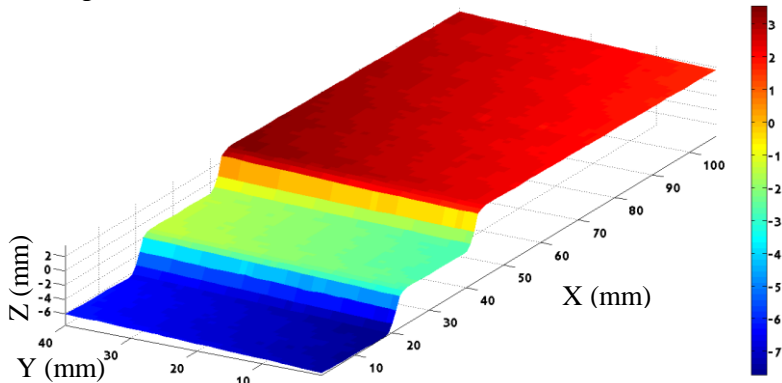
Tabela 4-10 – Comparativo da tendência da altura para 6 câmeras.

	6 câmeras	Td	DSP95%
primeiro degrau	todas	-0,25	0,09
segundo degrau	todas	-0,45	0,09

Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

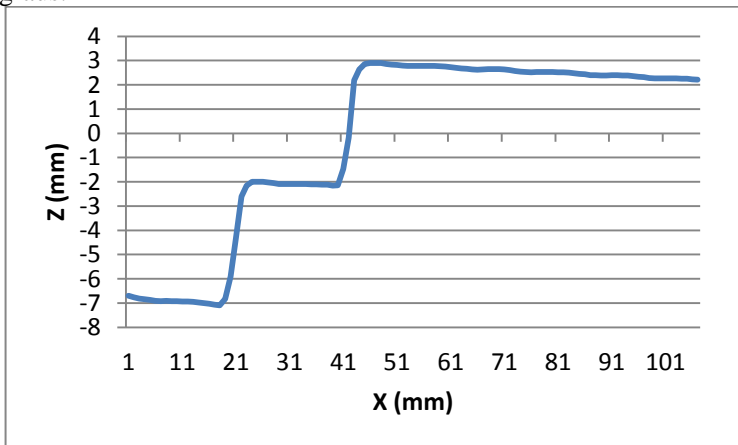
Com a malha de pontos das coordenadas 3D da medição, é possível recriar digitalmente o objeto medido com uma escala de cores e apresentar, em forma de gráfico tridimensional, mostrado na figura 4-19. É notada pelas cores uma leve inclinação da peça, quando foi medida pelo sistema desenvolvido.

Figura 4-19 – Gráfico 3D da nuvem de pontos da medição de uma peça com degraus.



Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

Figura 4-20 – Gráfico da linha central da medição da peça com degraus.



Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

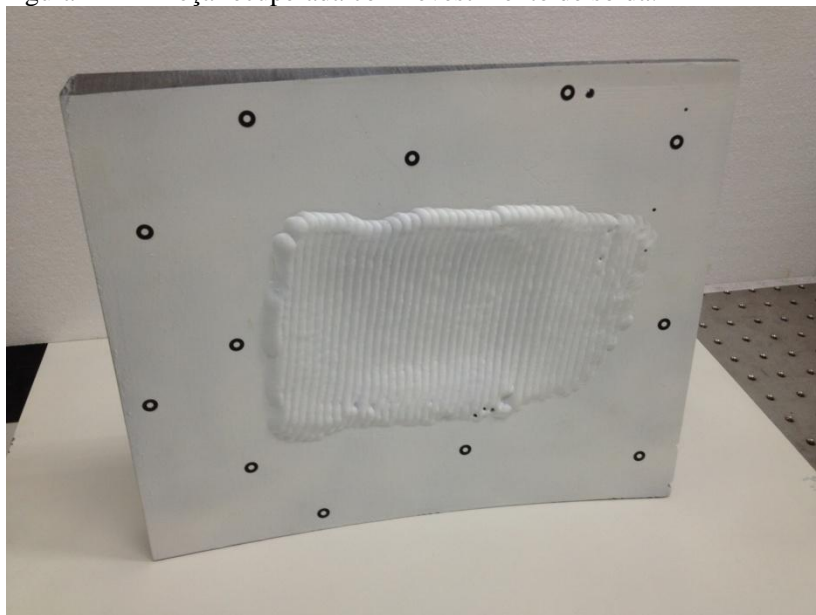
4.2.2 Exemplos livres

Alguns objetos adicionais foram medidos para poder mostrar a capacidade do sistema de medição desenvolvido, logo, obtendo-se a nuvem de pontos para a reconstrução digital do mensurado.

4.2.2.1 Revestimento de solda de uma cavidade recuperada

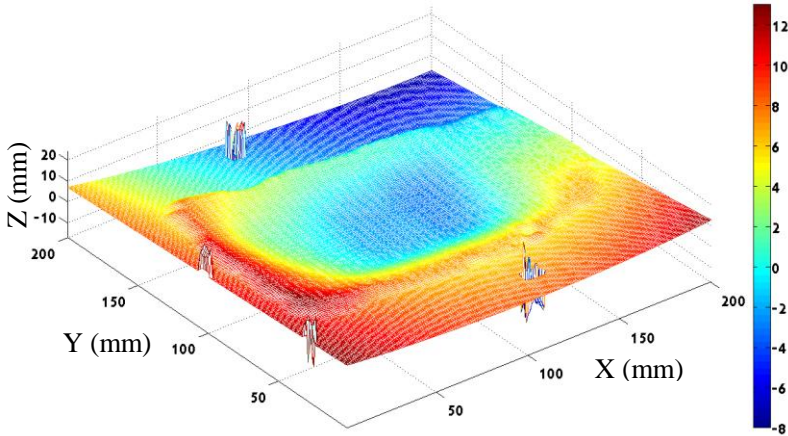
Muitas vezes a recuperação de cavitações em pás de turbinas necessita de um controle metrológico para garantir que o depósito de material esteja adequado às geometrias da turbina. Um exemplo de uma cavidade recuperada por revestimento por soldagem é apresentada na figura 4-21 e, posteriormente, a nuvem de pontos da sua medição.

Figura 4-21 – Peça recuperada com revestimento de solda.



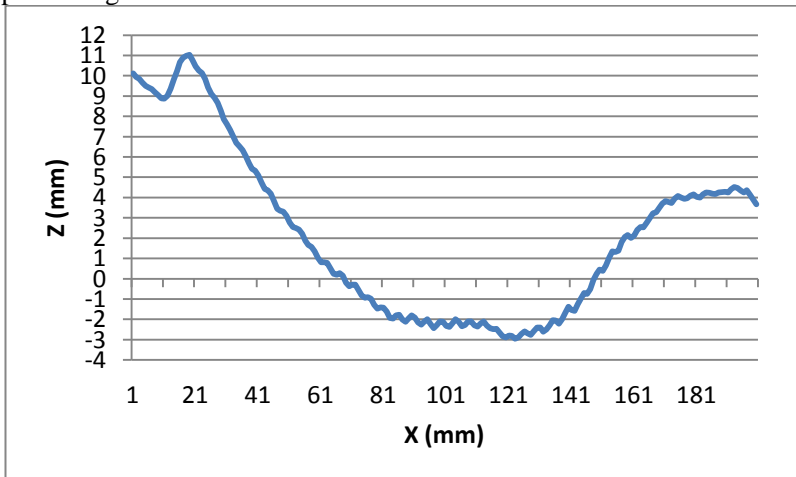
Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Figura 4-22 – Representação 3D de uma peça recuperada por soldagem.



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Figura 4-23 – Gráfico da linha central da medição da peça recuperada por soldagem.



Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

4.2.2.2 Rosto de um manequim

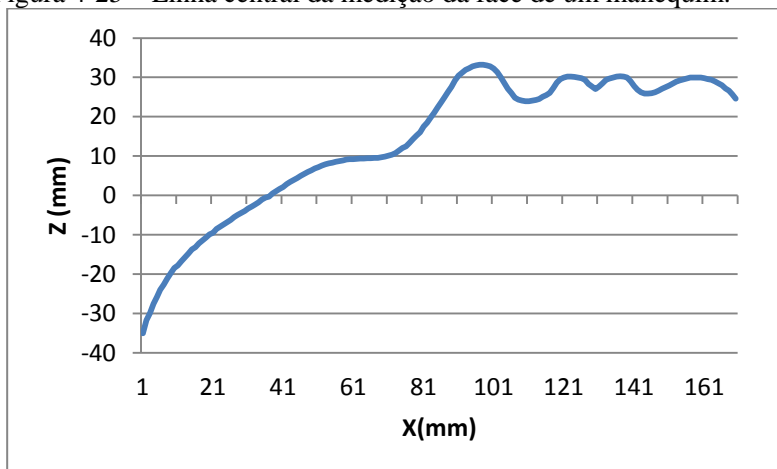
A medição do rosto de um manequim é apresentada abaixo de sua foto real. A nuvem de pontos foi criada a partir da combinação das fases de 6 webcams. Níveis de cinza representando as alturas de Z são utilizados na reprodução do rosto.

Figura 4-24 – Face de um manequim.



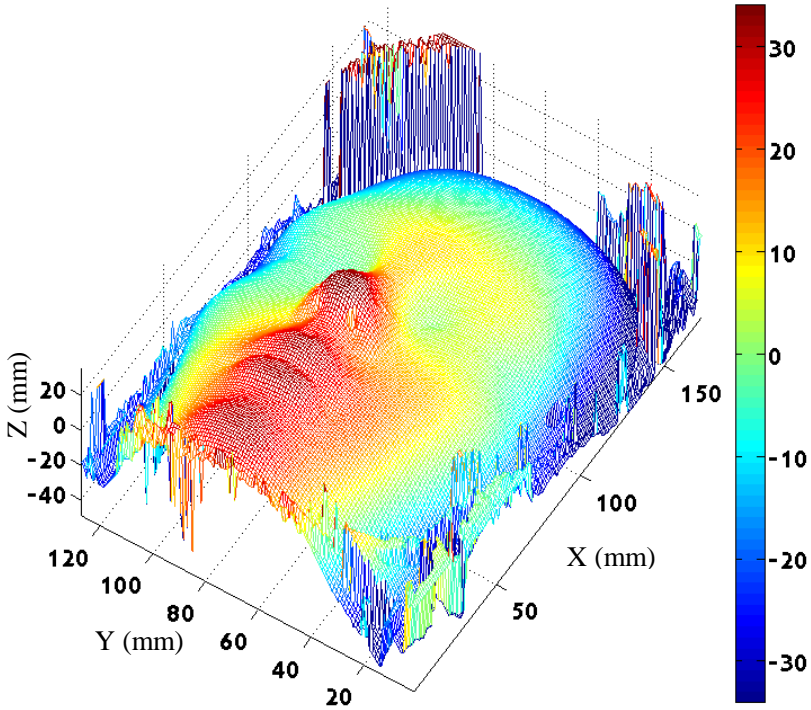
Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Figura 4-25 – Linha central da medição da face de um manequim.



Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

Figura 4-26 – Medição da face de um manequim.

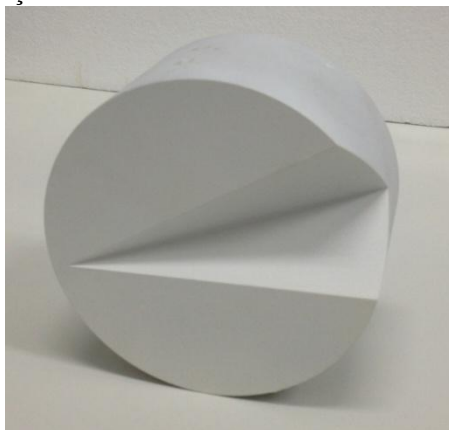


Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

4.2.2.3 Chanfro em formato V

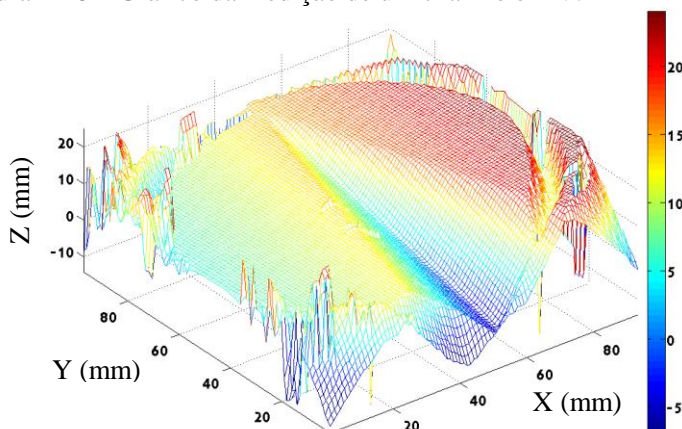
O chanfro de uma peça é apresentado na figura 4-27 e a sua nuvem de pontos possui um incremento de 1 mm entre pontos. Utilizando uma escala de níveis de cores, é facilmente observada uma inclinação no plano superior da peça e o chanfro aprofundado até a cor vermelha.

Figura 4-27 – Peça circular com chanfro em V.



Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

Figura 4-28 – Gráfico da medição de um chanfro em V.



Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

4.2.2.4 Mão direita humana

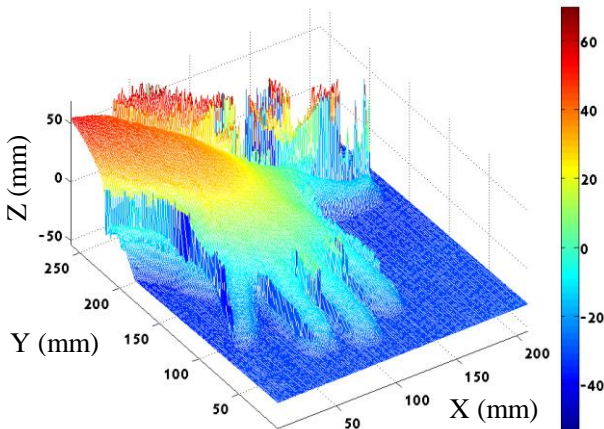
Aplicando o sistema desenvolvido em uma medição voltada à área da fisioterapia, tem-se a nuvem de pontos da medição da mão humana, sendo visualmente perceptível a forma da mão no gráfico, apresentada na figura 4-29. Existem dificuldades nesse tipo de experimento, pois uma pessoa não consegue ficar totalmente imóvel por muito tempo para a aquisição das imagens, o fator da cor da pele e os pelos também podem influenciar na qualidade da medição.

Figura 4-29 – Mão humana.



Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

Figura 4-30 – Gráfico 3D da medição de mão humana.



Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma solução tecnológica e testá-la, combinando o uso de 2, 4 e 6 câmeras de baixo custo e projetor multimídia para medir superfícies livres. Os resultados foram encorajadores e são uma contribuição para a popularização das técnicas ópticas de medição de formas 3D, com possibilidade de aplicação nas áreas médica e fisioterápica.

O sistema de medição desenvolvido nesta dissertação, para obter as formas 3D, usou configurações variadas de fotogrametria ativa. Isso possibilitou explorar variadas combinações de números e disposições das câmeras.

5.1 PRINCIPAIS RESULTADOS

O principal resultado obtido, no trabalho, foi o desenvolvimento e avaliação do próprio sistema de medição combinando até 6 *webcams* e um projetor multimídia compacto. A estrutura desse sistema possibilita o posicionamento das câmeras de forma adequada com as características necessárias para o alinhamento de todos os componentes como rotação, inclinação e translação das câmeras em relação ao projetor.

A calibração das *webcams* foi efetuada com um padrão contendo estruturas de formas circulares regularmente dispostas, construído com dimensões adequadas para produzir uma matriz de projeção adequada ao volume de medição definido para o sistema.

O software foi desenvolvido para realizar a aquisição de imagens pela conexão USB de até seis câmeras para projetar sequência de padrões de luz apropriados, processar as imagens, calcular as coordenadas e representar tridimensionalmente a nuvem de pontos medida.

O tempo de aquisição de todas as imagens necessárias para a medição de um objeto, utilizando as 6 câmeras, foi de 1:50 minutos. Vale ressaltar que, antes da aquisição dessas imagens, é necessário fazer a regulagem da intensidade da senoide projetada sobre o objeto observada pelas câmeras como descrito neste trabalho.

5.2 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

Um das principais contribuições deste estudo foi o desenvolvimento de algoritmos de aquisição, projeção e processamento de imagens na plataforma LabVIEW. Esses algoritmos poderão ser

utilizados em outros desenvolvimentos, pois estão disponíveis no Labmetro. Para o desenvolvimento desse programa em LabVIEW, foi necessário buscar, na literatura, a base matemática e as técnicas para aplicação correta da mesma, sendo que foram utilizados principalmente trabalhos com o mesmo foco desenvolvidos no Labmetro. A plataforma LabVIEW foi analisada para desenvolver os algoritmos e escolhida por apresentar funções que atendem à necessidade desse trabalho, executando o tratamento de imagens, usando uma biblioteca específica para imagens (Vision). Importante ressaltar que esse processo de desenvolvimento foi feito para 6 câmeras, podendo ser manipulado e adaptado em trabalhos futuros, para diferentes números de câmera, combinações de câmeras, frequência da projeção senoidal e número de passos (deslocamento de fase).

Foram desenvolvidos pelo autor algoritmos de testes em LabVIEW, visando obter as características de câmeras, podendo auxiliar na escolha das mesmas, considerando que, para a aplicação de câmeras de baixo custo em laboratório, é necessário que sejam conhecidas suas características técnicas em maior profundidade, o que não é disponibilizado, em geral, pelos fabricantes.

O desempenho do sistema de medição foi avaliado para diferentes números e combinações de câmeras para a sua validação.

Verificação de que câmeras de baixo custo podem ser utilizadas para medições de formas livres, com incerteza de medição menor que 2 mm definido para este trabalho, tendo potencial para aplicações na área médica e da fisioterapia.

5.3 PRINCIPAIS LIMITAÇÕES

Uma limitação crítica do sistema é o tempo para aquisição de imagens, em que para cada acionamento de câmera é necessário uma espera da ordem de 3 segundos para a estabilização total, agravando, nesse caso, o fato de não ser possível acionar simultaneamente as 6 câmeras por limitações do uso da conexão USB.

A estrutura do protótipo desenvolvido no escopo desta dissertação não permite a mobilidade do sistema de medição para fora do ambiente laboratorial. Os elementos do sistema são suficientemente compactos para permitir sua disposição em torno de uma única estrutura que assegure portabilidade ao sistema.

É possível considerar uma limitação à velocidade de processamento do LabVIEW, este quando comparado a C# ou C++ é mais lento, e um grande volume de dados é gerado por ter milhões de

pontos nas imagens das câmeras em combinação com a busca iterativa da terceira coordenada.

5.4 AVALIAÇÃO FINAL

Com câmeras de baixo custo foi possível obter medições confiáveis e com incertezas de medição menores que 2 mm, valor de referência estabelecido para o sistema desenvolvido. Foi verificado que o número e a disposição das câmeras influenciam a qualidade das medições feitas pelo sistema de medição.

A elaboração deste trabalho vai ao encontro de desenvolvimentos prévios do Labmetro da UFSC, utilizando técnicas que vêm sendo trabalhadas e desenvolvidas dentro da área da metrologia óptica, agregando, de forma positiva, mais uma vertente com o uso de câmeras de baixo custo.

5.5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por fim, ao concluir este trabalho, é possível apontar tópicos que, ao serem desenvolvidos, podem contribuir para a melhoria do sistema:

- Avaliar os benefícios do uso de *webcams* com conexão USB do tipo 3.0 sobre a velocidade de medição.
- Avaliar o resultado de diferentes números e combinações de câmeras para regiões diferentes da cena.
- Possibilidade de estudar por meio de testes em campo o uso deste sistema para aplicações médicas de fisioterapia, fazendo, inicialmente, uma abordagem com profissionais da área médica e de fisioterapia para validar o sistema e adequá-lo.
- Testar o sistema em condições diferentes do laboratório e avaliá-lo, como por exemplo, em diferentes temperaturas, condições de iluminação, presença de vibrações etc.
- Testar as influências da inclinação de um plano medido na incerteza de medição e avaliá-lo.

REFERÊNCIAS

- [1] LIMA, C. R. G. **Um estudo comparativo de sistemas de medição aplicáveis ao controle dimensional de superfícies livres de médio e grande porte**. Dissertação, PósMCI, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.
- [2] FANTIN, A.V, ALBERTAZZI, A, PINTO, T.L.F.C. *An Efficient Mesh Oriented Algorithm for 3D Measurement in Multiple Camera Fringe Projection*. SPIE, 2007.
- [3] PINTO, T. L. F. C. **Medição óptica, comparação e sinalização de superfícies com forma livre de grande extensão**. Tese, PósMEC, Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.
- [4] FANTIN, A. V. **Medição de formas livres tridimensionais por topogrametria**. Dissertação, PósMCI, Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.
- [5] LOCH, C., LAPOLLI, É. M. **Elementos Básicos da fotogrametria e sua utilização prática**. 3ª edição, Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, 1994.
- [6] HALLERT, B. **Photogrametry: basic principles and general survey**. Editora McGraw-Hill, 1960.
- [7] TAVARES, P. E. M., FAGUNDES, P. M. **Fotogrametria**. Editora desconhecida, Ano desconhecido.
- [8] MARCHETTI, D. A. B., GARCIA, G. J. **Princípios de fotogrametria e fotointerpretação**. Editora Nobel, 1977.
- [9] LINDER, W. S. **Digital photogrammetry: A practical course**. Segunda edição, Editora Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [10] COELHO, C. P., TAVARES, J. M. R. S. Técnicas base para aquisição de informação tridimensional sem contato: uma descrição. Volume 2, Número 1, pp. 1-11, **Revista Eletrônica de Sistemas de Informação**, Editora Nelkis de La Orden Medina, 2003.

- [11] SEACAM. **Axiom Too CNC**. Disponível em: <[http://www.seacam.com.br/?seametrologia=axiom-too-cnc#!prettyPhoto\[1\]/0/](http://www.seacam.com.br/?seametrologia=axiom-too-cnc#!prettyPhoto[1]/0/)>. Último acesso em fevereiro de 2013.
- [12] UWV. **Escaneamento 3D e digitalização de produtos**. Disponível em: <<http://www.uvw.com.br/scanner3D.html>>. Último acesso em fevereiro de 2013.
- [13] CHONG, A. K., MILBURN, P., WEST, R. N., VOERT, M., CROFT, H. RECENT PRACTICAL APLICATIONS OF CLOSE-RANGE PHOTOGRAMMETRY FOR COMPLEX MOTION STUDY. Volume XXXVII, Parte B5, pp. 921-926. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. Beijing, 2008.
- [14] CREATIVE. **Creative Live! Cam Socialize HD AF HD Webcam**. Disponível em: <http://www.creative.com/mylivecam/images/productpage/1080/EBro-SocializeHD%20AF_R3.pdf>. Último acesso em fevereiro 2013.
- [15] POINTGREY. **Flea@2 CCD Camera**. Disponível em: <http://www.ptgrey.com/products/flea2/flea2_firewire_camera.asp>. Último acesso em fevereiro 2013.
- [16] BBC. **Estereoscópio militar**. Disponível em: <http://www.bbc.co.uk/history/places/raf_medmenham>. Último acesso em fevereiro 2013.
- [17] SHOTADDICT. **Imagem de modelo de câmera pinhole**. Disponível em: <http://www.shotaddict.com/tips/article_Pinhole+Camera..html>. Último acesso em fevereiro 2013.
- [18] STIVANELLO, M. E. **Desenvolvimento de uma biblioteca para sistemas de visão estereoscópica para robótica móvel**. Dissertação, PPGEEEL, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.
- [19] ZAWIESKA, D., **TOPOGRAPHY OF SURFACE AND SPINAL DEFORMITY**. Volume XXXIII, Parte B5, pp. 937-942, The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam, 2000.

[20] POINTGREY. **Câmera Bumblebee2**. Disponível em: <<http://ww2.ptgrey.com/stereo-vision/bumblebee-2>>. Último acesso em fevereiro 2013.

[21] GOPRO. **Câmera GoPro sistema 3D Hero**. Disponível em: <<http://pt.gopro.com/hd-hero-accessories/3d-hero-system/?gclid=CNm6grTEk64CFZBU7AodTD-mtA>>. Último acesso em fevereiro 2013.

[22] HOFFMAN, A.C. **Sistema endoscópio estereoscópio para medição geométrica de uniões soldadas de duto**. Dissertação, PósMCI, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

[23] KLAUS, P.P. **Optische Topometrie MIT räumlichen Licht modulatoren** Tese, Institut für Technische Optik der Universität Stuttgart, 2004.

[24] CHEN, X., XI, J., JIN, Y. Phase error compensation method using smoothing spline approximation for a three-dimensional shape measurement system based on gray-code and phase-shift light projection. Volume 47, **Optical Engineering**, November 2008.

[25] BRADSKI, G. KAEHLER, A. **O'Reilly-Learning Open CV**. Editora: O'Reilly Media, Inc, 2008.

[26] TIAN, J. DING, Y. PENG, X. Self-calibration of a fringe projection system using epipolar constraint. **Optics & Laser Technology** 40, pp. 538-544, 2008.

[27] GEODETIC. **The Basics of Photogrammetry**. Disponível em: <<http://www.geodetic.com/v-stars/what-is-photogrammetry.aspx>>. Último acesso em fevereiro 2013.

[28] SHAPE QUEST. **PolyWorksModeler**. Disponível em: <http://www.shapecapture.com/SC_Poly.htm>. Último acesso em fevereiro 2013.

[29] ZHANG, Z. **A Flexible New Technique for Camera Calibration**. Technical Report MSR-TR-98-71, Microsoft Corporation, 1998.

[30] ZHANG, Z. *Flexible Camera Calibration By Viewing a Plane From Unknown Orientations*. Computer Vision, 1999. The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on, Vol. 1, pp. 666-673, 1999.

[31] REICH, C. RITTER, R. THESING, J. 3-D shape measurement of complex objects by combining photogrammetry and fringe projection. Vol. 39 No. 1, pp. 224-231, **Optical engineering**, 2000.

[32] VDI/VDE 2634 Part 2 *Optical 3D measuring systems – Optical systems based on area scanning*. VDI/VDE Gesell schaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA), Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2002.

[33] Hartley, R.; Zisserman, A. „*Multiple View Geometry*’. Cambridge University Press, 2003.

[34] Weng, J. *et al* “*Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation*” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 14, N. 10, 1992.

[35] TOOTHWALKER. **Distortion**. Disponível em: <<http://toothwalker.org/optics/distortion.html>>. Último acesso em abril 2013.

[36] Rautenberg, U., Wiggenhagen M., “*Abnahme und Überwachung photogrammetrischer Messsysteme nach VDI-2634*” Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, No. 2, pp. 117-124, 2002.

[37] TERRA. **Ângulo formado entre duas retas**. Disponível em: <<http://www.mundoeducacao.com.br/matematica/angulo-formado-entre-duas-retas.htm>>. Último acesso em abril 2013.

[38] LG. **Projektor operado por LED modelo HS101**. Disponível em: <<http://www.lg.com/pt/projectores/lg-HS101>>. Último acesso em abril 2013.

[39] LOGITECH. **Webcam QuickCam Pro 9000**. Disponível em: <<http://www.logitech.com/en-us/support/webcam-pro-9000?crd=405&osid=14&bit=64>> Último acesso em abril 2013.

[40] MICROSOFT. **Webcam LifeCam NX-6000**. Disponível em: <
<http://www.microsoft.com/hardware/en-us/d/lifecam-nx-6000>> Último
acesso em abril 2013.

APENDICE A – Principais componentes do sistema

Neste anexo são listados os principais itens do sistema de medição.

Webcam para aquisição de imagens:

Marca: Logitech (www.logitech.com)

Modelo: Webcam QuickCam Pro 9000

Conexão: USB 2.0

Resolução: (1600x1200) *pixel*

Tipo de imagem: JPG

Sensor: CMOS

Preço: US\$63,99 (abril 2013)

Webcam modelo QuickCam Pro 9000



Fonte: [39].

Webcam para aquisição de imagens:

Marca: Microsoft (www.microsoft.com)

Modelo: LifeCam NX-6000

Conexão: USB 2.0

Resolução: (1600x1190) *pixel*

Tipo de imagem: BMP

Sensor: CMOS

Preço: US\$19,96 (abril 2013)

Webcam modelo LifeCam NX-6000

Fonte: [40].

Webcam para aquisição de imagens:

Marca: Creative (<http://us.creative.com/welcome.asp>)

Modelo: Creative Live! Cam Socialize HD AF Webcam

Conexão: USB 2.0

Resolução: (1600x1200) *pixel*

Tipo de imagem: BMP

Sensor:

Preço: 59,99 (abril 2013)

Webcam modelo Creative Live! Cam Socialize HD AF Webcam



Fonte: [14].

Projektor multimídia

Marca: LG (www.lge.com)

Modelo: HS101

Tecnologia LED / DLP

Luminosidade: 100 ANSI lumens.

Contraste 2000:1

Principais dimensões: (154 x 117 x 50) mm

Padrão de comunicação: Digital HDMI

Resolução: (800 x 600) *pixel*

Frequência de atualização: 60 Hz

Comprimento focal da lente: 15,17 mm

Foco da projeção manual

Preço: US\$699,99 (abril 2013 modelo atual e superior)

Projektor multimídia utilizado pelo sistema.

Fonte: [38].