

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
ESCOLA POLITÉCNICA  
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA E DE COMPUTAÇÃO

ANÁLISE DA RELAÇÃO DA DISTÂNCIA DE CALIBRAÇÃO DE CÂMERAS EM  
ESTEREOFOTOGRAMETRIA

Autor:

---

Rafael dos Santos de Moraes

Orientador:

---

Prof. Julio Cesar Boscher Torres, D.Sc.

Examinador:

---

Prof. José Gabriel Rodriguez Carneiro Gomes, Ph.D.

Examinador:

---

Profa. Mariane Rembold Petraglia, Ph.D.

DEL  
JANEIRO DE 2008

# Dedicatória

*A Deus e meus pais*

# Agradecimentos

À minha família inteira, por todos os ensinamentos, lições e carinho ao longo da minha vida.

A todos os meus amigos de longa data que, ao longo desse período de aprendizado na universidade, puderam me trazer alegria e força para seguir em frente.

Aos amigos conquistados durante o curso, agradeço por todas as vezes em que fui ajudado e tive alguém para compartilhar as minhas dificuldades.

Em especial para minha super amiga Juliana, por todos os momentos felizes e difíceis, nos quais pude contar com sua verdadeira e inigualável amizade.

Ao meu orientador Julio Boscher Torres, por suas pacientes explicações e constantes auxílios e a todos os professores do Departamento de Engenharia Eletrônica e Computação que foram importantes para a minha formação profissional. Ao meu co-orientador José Gabriel Gomes por suas aulas exemplares e atenção durante esse projeto.

## Resumo

Os métodos de dimensionamento de objetos, utilizando conceitos de visão estéreo, estão sendo bastante utilizados nas mais variadas áreas industriais e de pesquisa. Para aplicarmos a estereofotogrametria necessitamos obter pares de imagens (direita e esquerda) para conseguirmos assim, através da disparidade observada entre elas, realizar o dimensionamento.

Para que se possa realizar o dimensionamento a partir de um par de imagens, o sistema deve ser calibrado. Esta calibração depende de parâmetros intrínsecos e extrínsecos, mas neste estudo foram alterados apenas os exteriores, tais como deslocamentos horizontal, vertical e profundidade e rotações horizontal, vertical e profundidade. Os parâmetros intrínsecos, que dizem respeito aos elementos internos da câmera não foram alterados (projeções focais horizontal e vertical e coordenadas horizontais e verticais).

O objetivo do estudo é analisar a relação existente entre a distância na qual as câmeras são calibradas e a precisão (erro) no dimensionamento de determinado objeto. Para isso, foram obtidas fotos (pares estéreo) de quadriculados com dimensões previamente conhecidas e fotos (pares estéreo) com o alvo (grid) de calibração posicionado em várias distâncias.

A fim de realizar a análise das imagens e coordenadas geradas, foi utilizado o algoritmo de dimensionamento de objetos desenvolvido por alunos do Laboratório de Processamento Analógico-Digital de Sinais (PADS/UFRJ) e elaborado um programa em linguagem computacional para realizar comparações dos erros entre a utilização de cada calibração. A partir deste programa podemos visualizar os gráficos contendo os erros absolutos e relativos no processo de dimensionamento e estabelecer qual a relação entre a distância na qual as câmeras foram calibradas e a precisão do dimensionamento do tamanho real de um segmento escolhido.

# Palavras-Chave

- Processamento de Imagens
- Estereofotogrametria
- Calibração de Câmeras
- Visão Computacional
- Visão Estéreo

# Índice

<i>Dedicatória</i> .....	<i>ii</i>
<i>Agradecimentos</i> .....	<i>iii</i>
<i>Resumo</i> .....	<i>iv</i>
<i>Palavras-Chave</i> .....	<i>v</i>
<i>Índice</i> .....	<i>vi</i>
<i>Índice de Figuras</i> .....	<i>viii</i>
<i>Índice de Tabelas</i> .....	<i>x</i>
<i>Glossário e Abreviaturas</i> .....	<i>xi</i>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>13</b>
<b>2. Fundamentos Teóricos</b> .....	<b>16</b>
2.1. <i>Calibração das câmeras</i> .....	<i>16</i>
2.2. <i>Estereofotogrametria</i> .....	<i>18</i>
<b>3. Desenvolvimento</b> .....	<b>21</b>
3.1. <i>Objetivo</i> .....	<i>21</i>
3.2. <i>Metodologia</i> .....	<i>23</i>
3.2.1. <i>Aquisição de Imagens</i> .....	<i>24</i>
3.2.2. <i>Mapeamento de pontos 3D para 2D</i> .....	<i>27</i>
3.2.3. <i>Análise Preliminar do Sistema de Calibração e Dimensionamento</i> .....	<i>29</i>
3.2.4. <i>Rotinas de calibração das câmeras e dimensionamento de segmentos</i> .....	<i>31</i>
3.2.5. <i>Análise dos erros de dimensionamento em diferentes distâncias de calibração</i> .....	<i>33</i>
<b>4. Testes e Resultados</b> .....	<b>36</b>
4.1. <i>Primeiro Teste</i> .....	<i>36</i>
4.1.1. <i>Primeiro Teste – Calibração de 60 centímetros</i> .....	<i>40</i>
4.1.2. <i>Primeiro Teste – Calibração de 100 centímetros</i> .....	<i>43</i>
4.1.3. <i>Primeiro Teste – Calibração de 180 centímetros</i> .....	<i>46</i>

<i>4.2. Teste Final.....</i>	<i>49</i>
<i>4.3. Resultados variando o índice de calibração para uma posição de calibração.....</i>	<i>64</i>
<i>5. Conclusões .....</i>	<i>65</i>
<i>Referências Bibliográficas .....</i>	<i>68</i>
<i>Código-fonte do algoritmo de análise dos dados.....</i>	<i>69</i>

# Índice de Figuras

<i>Figura 1 – Exemplo de grid de calibração</i> .....	xii
<i>Figura 2 – Esquemático com exemplo do processo de estereofotogrametria</i> .....	14
<i>Figura 3 – Exemplo de disparidade</i> .....	15
<i>Figura 4 – Eixos do grid de calibração</i> .....	17
<i>Figura 5 – Eixos de posição e rotação da câmera</i> .....	17
<i>Figura 6 – Reconstrução 3-D a partir de imagens 2-D</i> .....	19
<i>Figura 7 – Parâmetros de posicionamento da grade e quadriculado</i> .....	25
<i>Figura 8 – Parâmetros no posicionamento das câmeras</i> .....	25
<i>Figura 9 – Câmeras utilizadas (Canon PowerShot G7 10Mpixel)</i> .....	26
<i>Figura 10 – Pixels (pontos em vermelho) a serem mapeados no grid de calibração</i> .....	27
<i>Figura 11 – Pixels (pontos em vermelho) a serem mapeados no quadriculado</i> .....	28
<i>Figura 12 – Imagem esquerda para simulação de processo de estereofotogrametria</i> .....	29
<i>Figura 13 – Imagem direita para simulação de processo de estereofotogrametria</i> .....	29
<i>Figura 14 – Fluxograma geral da rotina de análise de “erros de dimensionamento” X “distância do objeto”</i> ..33	
<i>Figura 15 – Esquemático com o modelo do primeiro teste</i> .....	37
<i>Figura 16 – Segmentos ortogonais com calibração de 60 cm</i> .....	40
<i>Figura 17 – Segmentos paralelos com calibração de 60 cm</i> .....	41
<i>Figura 18 – Segmentos oblíquos com calibração de 60 cm</i> .....	41
<i>Figura 19 – Todos os tipos de segmentos com calibração 60 cm</i> .....	42
<i>Figura 20 – Segmentos ortogonais com calibração de 100 cm</i> .....	43
<i>Figura 21 – Segmentos paralelos com calibração de 100 cm</i> .....	44
<i>Figura 22 – Segmentos oblíquos com calibração de 100 cm</i> .....	44
<i>Figura 23 – Todos os tipos de segmentos com calibração de 100 cm</i> .....	45
<i>Figura 24 – Segmentos ortogonais com calibração de 180 cm</i> .....	46
<i>Figura 25 – Segmentos paralelos com calibração de 180 cm</i> .....	47
<i>Figura 26 – Segmentos oblíquos com calibração de 180 cm</i> .....	47
<i>Figura 27 – Todos os tipos de segmentos com calibração de 180 cm</i> .....	48
<i>Figura 28 – Cenário do último teste</i> .....	49

<i>Figura 29 – Último teste – Imagem esquerda com grid em 150 cm</i> .....	50
<i>Figura 30 – Último teste – Imagem direita com grid em 150 cm</i> .....	51
<i>Figura 31 – Último teste – Quadriculado na imagem esquerda</i> .....	51
<i>Figura 32 – Último teste – Quadriculado na imagem direita</i> .....	52
<i>Figura 33 – Erro médio de dimensionamento com distâncias quantizadas e calibração 200cm</i> .....	54
<i>Figura 34 – Erro médio de dimensionamento com distâncias quantizadas e calibração 300cm</i> .....	54
<i>Figura 35 – Último teste – Erro de dimensionamento com calibração 100cm</i> .....	55
<i>Figura 36 – Último teste – Erro de dimensionamento com calibração 150cm</i> .....	56
<i>Figura 37 – Último teste – Erro de dimensionamento com calibração 200cm</i> .....	56
<i>Figura 38 – Último teste – Erro de dimensionamento com calibração 250cm</i> .....	57
<i>Figura 39 – Último teste – Erro de dimensionamento com calibração 300cm</i> .....	58
<i>Figura 40 – Último teste – Erro de dimensionamento com calibração 350cm</i> .....	58
<i>Figura 41 – Último teste – Erro de dimensionamento com calibração 400cm</i> .....	59
<i>Figura 42 – Último teste – Erro de dimensionamento com calibração 450cm</i> .....	59
<i>Figura 43 – Último teste – Erro de dimensionamento com calibração 500cm</i> .....	60
<i>Figura 44 – Erro absoluto para faixas de tamanhos de segmentos com calibração em 250cm</i> .....	61
<i>Figura 45 – Gráfico para calibração de 200 cm separando os segmentos</i> .....	62
<i>Figura 46 – Gráfico para calibração de 300 cm separando os segmentos</i> .....	62
<i>Figura 47 – Erro absoluto para segmentos paralelos com calibração em 200 cm</i> .....	63
<i>Figura 48 – Erro absoluto para segmentos paralelos com calibração em 300 cm</i> .....	63
<i>Figura 49 – Variando os índices de calibração para a calibração em 350 cm</i> .....	64

# Índice de Tabelas

<i>Tabela 1 – Parâmetros de calibração (extrínsecos e intrínsecos).....</i>	<i>18</i>
<i>Tabela 2 – Características das câmeras utilizadas.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabela 3 – Trecho do código Matlab para teste de sensibilidade das rotinas de calibração e dimensionamento</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 4 – Parâmetros de entrada e saída da rotina de calibração .....</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 5 – Parâmetros de entrada e saída da rotina de dimensionamento.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 6 – Parâmetros de entrada e saída da rotina de cálculo e análise do erros de dimensionamento.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 7 – Dados do primeiro teste .....</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 8 – Índices de calibração do primeiro teste.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 9 – Cenário do último teste .....</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 10 – Índices das calibrações utilizadas no último teste.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabela 11 – Erro relativo percentual médio – Último teste.....</i>	<i>53</i>

# Glossário e Abreviaturas

## JPEG

É a sigla de Joint Photographic Experts Group, trata-se de um formato de compressão, com perda de dados, aplicado em imagens fotográficas. A perda de dados é proporcional ao fator de compressão desejado. O arquivo que usa este método de compressão é chamado normalmente por JPEG; as extensões de arquivos para este formato são .jpeg , .jfif, .jpe e .jpg, este último, o mais comum.

O processo de compactação JPEG é composto das seguintes fases:

- \* A imagem é dividida em blocos de 8x8 pixels e em cada um destes blocos é calculada a DCT (discrete cosine transform).

- \* Os coeficientes gerados pela DCT são quantizados e alguns coeficientes até eliminados. O processo de quantização irá definir o grau de compactação da imagem.

- \* Na última etapa, a codificação de Huffman é aplicada aos coeficientes quantizados.

## Pixel

Pixel (aglutinação de *Picture* e *Element*, ou seja, elemento de imagem, sendo *Pix* a abreviatura em inglês para *Picture*) é o menor elemento num dispositivo de exibição (como por exemplo, um monitor), ao qual é possível atribuir-se uma cor. De uma forma mais simples, um pixel é o menor ponto que forma uma imagem digital, sendo que o conjunto de milhares de pixels forma a imagem inteira.

## BMP

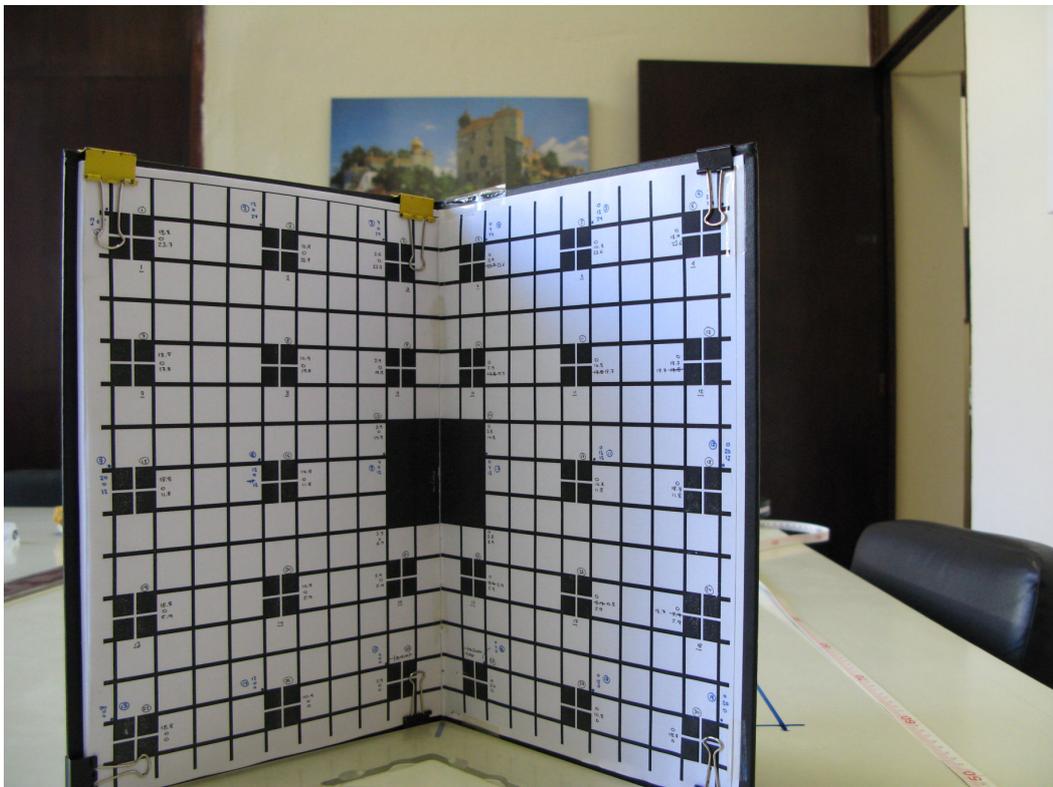
É um formato de gráficos por mapa de bits (composto por pixels) e não utiliza compressão de dados, isto é, é um formato sem perda de dados.

## U e V

U e V são, respectivamente, as coordenadas (dadas em pixels) horizontal e vertical de um ponto do objeto da cena, projetado na imagem.

## Grid

Objeto com um quadriculado impresso utilizado para observar e mapear os pontos de referência para se realizar a calibração das câmeras. A grade forma um sistema de eixos ortogonais, como mostra a Figura 1.



*Figura 1 – Exemplo de grid de calibração*

# Capítulo 1

## Introdução

Nos dias de hoje, é de grande importância o estudo de processamento de imagens em diversas áreas de nosso dia-a-dia. Pode ser utilizado em áreas médicas, tais como em aparelhos para realizar diagnósticos por imagens, na área de inspeção submarina, robótica, sensoriamento remoto, verificação de dutos submarinos, além de muitas outras aplicações.

Na prospecção de petróleo, área bastante importante no mundo atual, a manutenção de estruturas em grandes profundidades é bastante difícil e por isso a visualização e análise prévias dos problemas nestas estruturas são de grande valia para estas aplicações de alto custo.

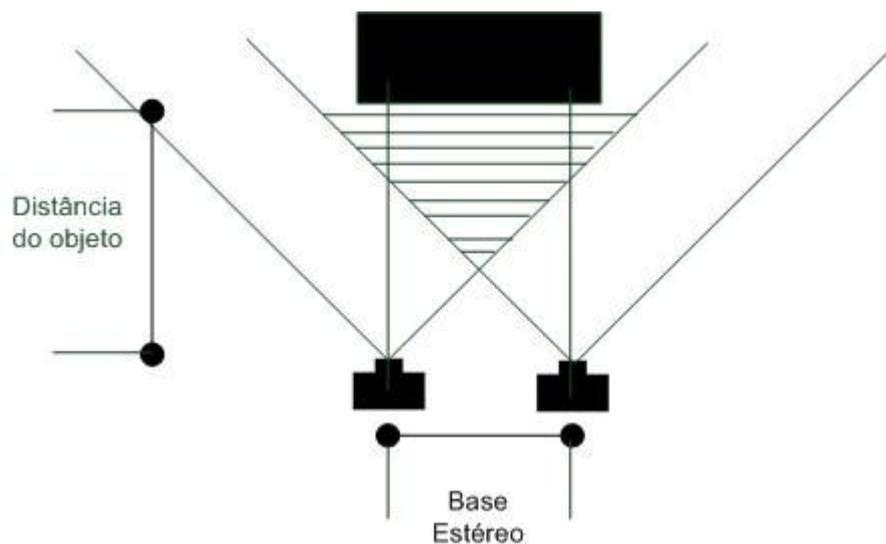
Neste trabalho será utilizada a técnica de visão estéreo, que analisa o problema da reconstrução da informação tridimensional de objetos a partir de pares de imagens capturadas simultaneamente, mas com um pequeno deslocamento horizontal.

Os seres humanos, entre outros animais, possuem um par de olhos localizados na parte frontal da cabeça, o que resulta na aquisição de duas imagens do mundo externo com um pequeno deslocamento horizontal. Tal deslocamento gera pequenas diferenças entre as imagens, quase imperceptíveis quando observadas separadamente. Mas são justamente estas

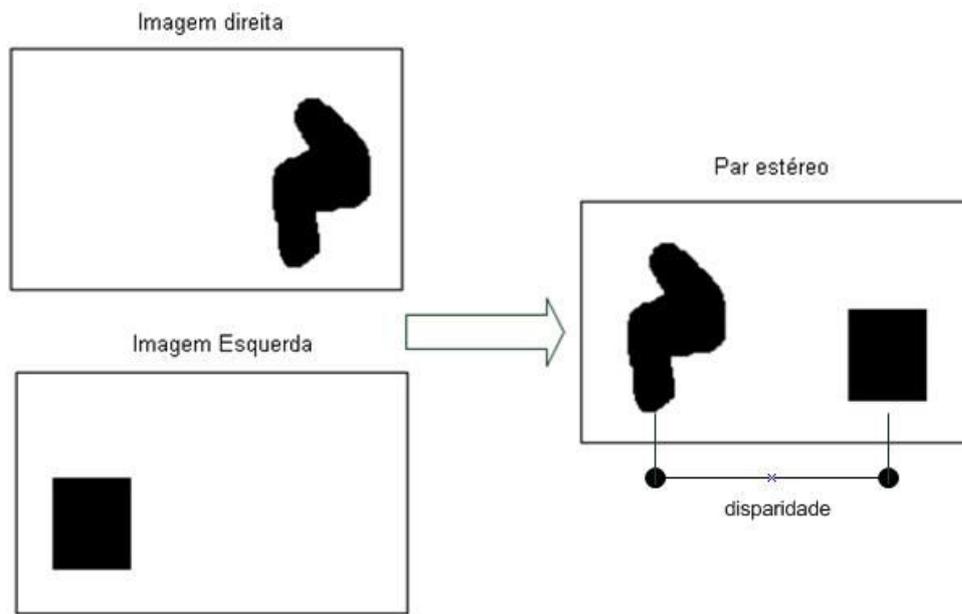
pequenas diferenças que nos permitem ter uma viva percepção tridimensional do mundo externo. Definimos par estéreo como o par de imagens capturadas simultaneamente com um pequeno deslocamento de posição da câmara.

A partir de duas câmeras posicionadas de forma adequada, com suas posições e direcionamentos conhecidos, é possível determinar a posição de qualquer ponto neste espaço, desde que este ponto possa ser localizado dentro de cada uma das imagens capturadas pelas câmeras, como mostrado na Figura 2. Por isso, é necessário que haja uma região comum, de proporção razoável, aparecendo em ambas as imagens. Um conceito importante é o da disparidade, que consiste da diferença do posicionamento de um objeto em uma imagem visto de duas posições (Figura 3).

A partir das posições (coordenadas) do objeto através do par estéreo, pode ser utilizada a técnica de estereofotogrametria. Para que tenhamos um erro mínimo neste processo, as câmeras devem ser calibradas baseando-se nos parâmetros de orientação exterior e interior (extrínsecos e intrínsecos, respectivamente) para cada imagem de um par estéreo.



*Figura 2 – Esquemático com exemplo do processo de estereofotogrametria*



*Figura 3 – Exemplo de disparidade*

# Capítulo 2

## Fundamentos Teóricos

### 2.1. *Calibração das câmeras*

A calibração das câmeras é composta por dois parâmetros: intrínsecos (internos) e extrínsecos (externos). Os intrínsecos dizem respeito aos fatores que influenciam internamente a câmera e não serão abordados nesse estudo. Os parâmetros que serão levados em conta são os extrínsecos, que dizem respeito ao posicionamento da câmera no ambiente. Na Tabela 1 são apresentados todos os parâmetros envolvidos.

Para efetuar a calibração é necessário fazer o posicionamento de um grid a uma determinada distância da câmera e obter uma foto com cada câmera (no caso, duas, direita/esquerda). Na Figura 4 é mostrado um grid de calibração, que possui abertura de 90° (medido com esquadro, como na Figura 4), no qual podemos observar os eixos X, Y e Z que correspondem às bases dos parâmetros  $X_0$ ,  $Y_0$  e  $Z_0$ . Os outros três parâmetros exteriores (de rotação) referem-se à rotação dos três eixos (X, Y e Z) da câmera em relação aos eixos do grid, como ilustrado na Figura 5. No estudo foi usado um modelo quadriculado de grid, por facilidade, e mapeados 24 pontos (alvos no interior dos quadrados pretos exceto a linha horizontal central). Esses pontos são mapeados e inseridos como entrada em uma rotina de calibração, que possui como saída, os parâmetros desejados para a realização desse estudo. Quanto mais pontos em um padrão de calibração forem mapeados, normalmente mais precisos serão os parâmetros e conseqüentemente a calibração.

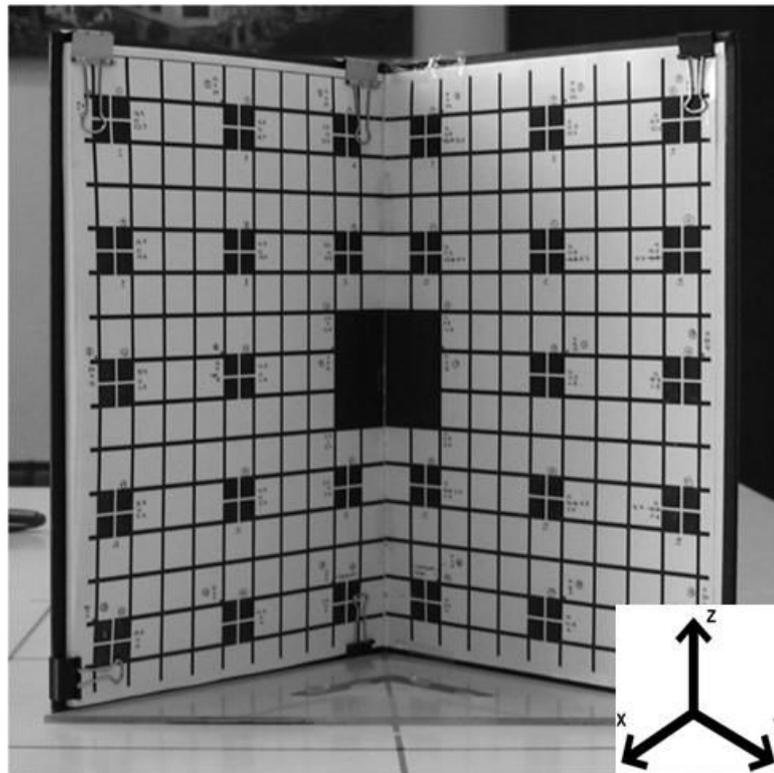


Figura 4 – Eixos do grid de calibração

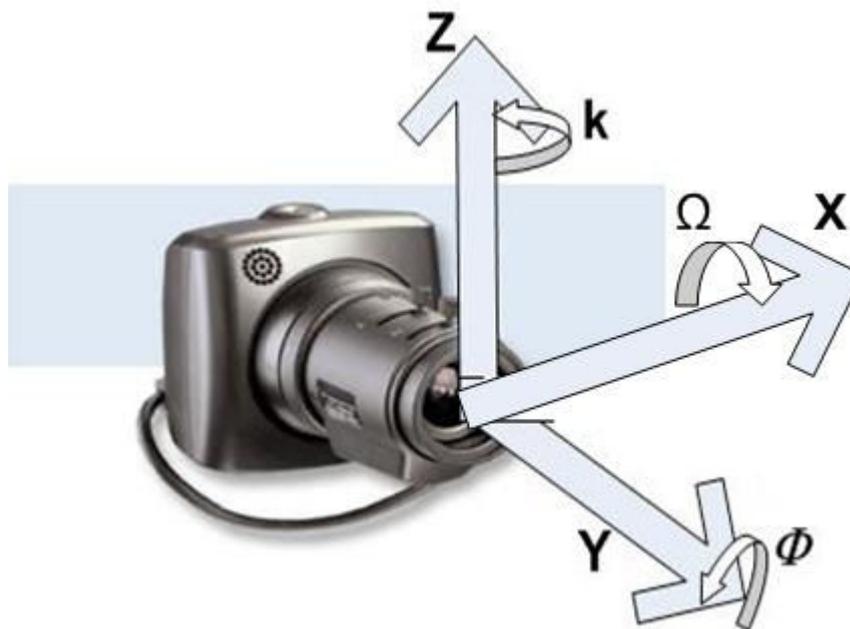


Figura 5 – Eixos de posição e rotação da câmera

*Tabela 1 – Parâmetros de calibração (extrínsecos e intrínsecos)*

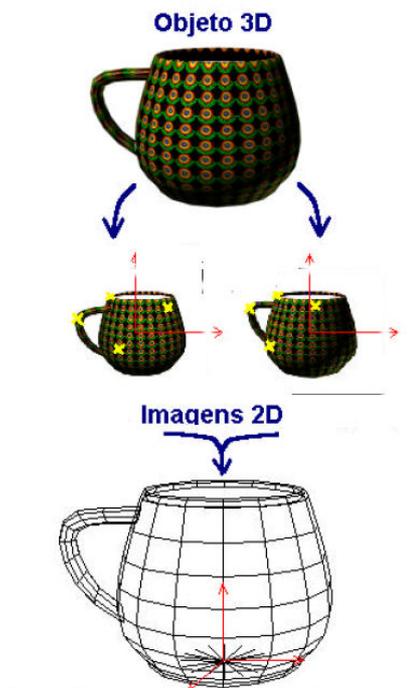
Símbolo	Descrição
$X_0$	Translação do centro óptico da câmera ao longo do eixo $x$ , em relação à origem do sistema de eixos do objeto (origem do grid)
$Y_0$	Translação do centro óptico da câmera ao longo do eixo $y$ , em relação à origem do sistema de eixos do objeto (origem do grid)
$Z_0$	Translação do centro óptico da câmera ao longo do eixo $z$ , em relação à origem do sistema de eixos do objeto (origem do grid)
$\Omega$	rotação do eixo $x$ da câmera em relação ao sistema de eixos do objeto
$\Phi$	rotação do eixo $y$ da câmera em relação ao sistema de eixos do objeto
$K$	rotação do eixo $z$ da câmera em relação ao sistema de eixos do objeto
$U_0$	Coordenada $u$ da origem projetada na câmera
$V_0$	Coordenada $v$ da origem projetada na câmera
$F_u$	Distância focal da câmera na direção $u$ , medida em pixels
$F_v$	Distância focal da câmera na direção $v$ , medida em pixels

## **2.2. Estereofotogrametria**

A fotogrametria é uma técnica para reconstrução de um espaço tridimensional a partir de imagens bidimensionais advindas de gravações sem contato físico com o objeto de interesse (Figura 6). Também podemos, com esta técnica, dimensionar objetos que se encontram em locais de difícil acesso, tornando mais fácil o planejamento de manutenção de equipamentos neste tipo de locais.

Na fotogrametria o número de imagens envolvidas é variável, sendo necessárias pelo menos duas, tomadas de ângulos diferentes, com área de superposição, de modo a viabilizar a visão estereoscópica (tridimensional). No presente estudo serão utilizados os conceitos de estereofotogrametria com duas imagens.

A fotogrametria digital teve o seu surgimento nos anos 80, tendo como grande inovação a utilização de imagens digitais como fonte primária de dados. A imagem digital pode ser adquirida diretamente de uma câmara digital, ou mesmo através da digitalização matricial de uma imagem analógica (submetendo-a a um scanner). Nos anos 90, este ramo da fotogrametria realmente pôde ser usado de maneira extensiva, graças ao desenvolvimento de computadores com capacidade suficiente para o processamento interativo de imagens digitais, gerando elevados volumes de dados. Uma grande vantagem da tecnologia digital em relação à analógica é a possibilidade da aplicação de técnicas de processamento digital, como filtros.



*Figura 6 – Reconstrução 3-D a partir de imagens 2-D*

No processo de estereofotogrametria devemos observar as variações que ocorrem entre as posições dos eixos das câmeras (Figura 5 – Eixos de posição e rotação da câmera) e os eixos situados imaginariamente no ambiente da qual foi capturada a imagem 2-D. Estas variações podem ser modeladas por movimentos de rotação e translação. Foi adotada a convenção de situar o centro ótico no centro da lente da câmera. Como a calibração da

câmera é realizada em relação ao grid, é necessário obtermos os parâmetros de translação e rotação em relação a este grid. A rotação pode ser modelada como sendo a ação de três rotações, uma atuando em cada eixo (x, y e z).

$$\text{translação} = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}$$

no qual podemos dizer que  $X_1$ ,  $Y_1$  e  $Z_1$  são as coordenadas deslocadas de suas posições iniciais  $X_0$ ,  $Y_0$  e  $Z_0$ .

Rotação =  $R(\varphi)$ .  $R(k)$ .  $R(w)$ , onde cada uma dessas rotações é representada por uma matriz [1].

Com os pontos mapeados nas imagens 2-D, os parâmetros necessários (x, y, z, k, w,  $\varphi$ , u, v) neste processo podem ser obtidos através dos métodos dos mínimos quadrados não-linear. Tais parâmetros podem ser divididos em dois grupos: os de orientação exterior e os de orientação interior. Os interiores dizem respeito às características da câmera (como distância focal) e os exteriores dizem respeito à posição da câmera no ambiente (translação, rotação e coordenadas do plano da imagem). Um ponto de referência do objeto pode ser tomado como o resultado de uma transformação envolvendo a translação e a rotação, como é mostrado na equação abaixo:

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \\ S \end{bmatrix} = R(\varphi) \cdot R(k) \cdot R(w) \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}$$

onde P, Q e S são os pontos do objeto tomados com o referencial da câmera.

Para determinar os pontos 3-D a partir das imagens 2-D, após essa série de cálculos de translações e rotações, deve ser aplicada a técnica de triangulação estéreo. Ela consiste na utilização das projeções dos pontos no plano das imagens direita e esquerda ( $U_R/V_R$  e  $U_L/V_L$ , respectivamente) dos parâmetros de translação e rotação e obtêm os exatos pontos nas quais essas projeções se cruzam.

# Capítulo 3

## Desenvolvimento

### 3.1. *Objetivo*

Este estudo tem o objetivo de analisar a relação existente entre o dimensionamento de um objeto a partir de imagens estéreo, obtidas de câmeras posicionadas lado a lado, e a distância de calibração destas câmeras. Esta relação é de extrema importância já que, posteriormente, com várias calibrações obtidas através do posicionamento do grid, podemos utilizar esses parâmetros para conseguir otimizar o dimensionamento de um objeto e minimizar os erros.

O processo de dimensionamento empregado será o de estereofotogrametria, que consiste na medição de objetos através de pares estéreos de imagens. O processo de calibração das câmeras se baseia nos parâmetros de orientação exterior e interior (extrínsecos e intrínsecos, respectivamente) para cada imagem de um par estéreo. As rotinas de dimensionamento e calibração utilizadas foram elaboradas por pesquisadores do Laboratório de Processamento Analógico e Digital de Sinais (PADS/UFRJ) e o presente projeto visa obter uma conclusão sobre em qual posição de calibração o erro de dimensionamento tende a ser o menor possível.

Um fator relevante a ser observado na execução do processo é o cuidado, já nas etapas iniciais, com o posicionamento correto das câmeras. A posição das câmeras deve ser exatamente a mesma, sem movimentação, quando tiramos as fotos ao alterarmos o grid de calibração nas posições desejadas. Mesmo que o erro nesta etapa seja pequeno, nas etapas posteriores de cálculos, este pequeno erro pode crescer, haja vista que os algoritmos empregados utilizam as posições absolutas e relativas dos elementos presentes na imagem. Após essa etapa inicial, a localização dos pixels desejados e seus mapeamentos se tornam fundamentais para um resultado coerente e com erros minimizados, já que os parâmetros de calibração, previamente explicados, decorrem desta etapa.

A perspectiva de resultado é obter uma relação lógica entre a distância do objeto às câmeras e a distância de calibração. Uma hipótese inicial adotada foi a de que quando utilizada uma calibração mais próxima da distância do objeto às câmeras, seu erro de dimensionamento seria mínimo. Sendo assim, o cenário ideal possível seria termos uma distância de calibração para ser utilizada a cada distância de um segmento à câmera (distância de calibração igual à distância do segmento à câmera).

## **3.2. Metodologia**

Como o alvo deste estudo é avaliar a variação do erro no dimensionamento de objetos em relação à distância de calibração, as imagens a serem analisadas foram compostas por um quadriculado horizontal com quadrados de tamanho fixo. Os objetos considerados (a serem dimensionados) são todos os segmentos de reta possíveis nesse quadriculado.

Foram realizados dois testes: um teste inicial para verificar uma possível relação entre o erro de dimensionamento e a distância de calibração, e um segundo com uma quantidade muito superior de segmentos a serem mensurados e maior número de distâncias de calibração, objetivando, com uma grande massa de dados, ratificar os resultados notados inicialmente.

O processo inteiro é dividido nas seguintes etapas:

- Aquisição de imagens
- Mapeamento dos pixels desejados (pontos de calibração e extremidades dos segmentos a serem dimensionados)
- Rotina para calibração das câmeras e dimensionamento dos segmentos
- Rotina para calcular os erros de dimensionamento
- Análise dos gráficos de Erro x Distância do objeto, fixando um tamanho de segmento e uma calibração

### 3.2.1. **Aquisição de Imagens**

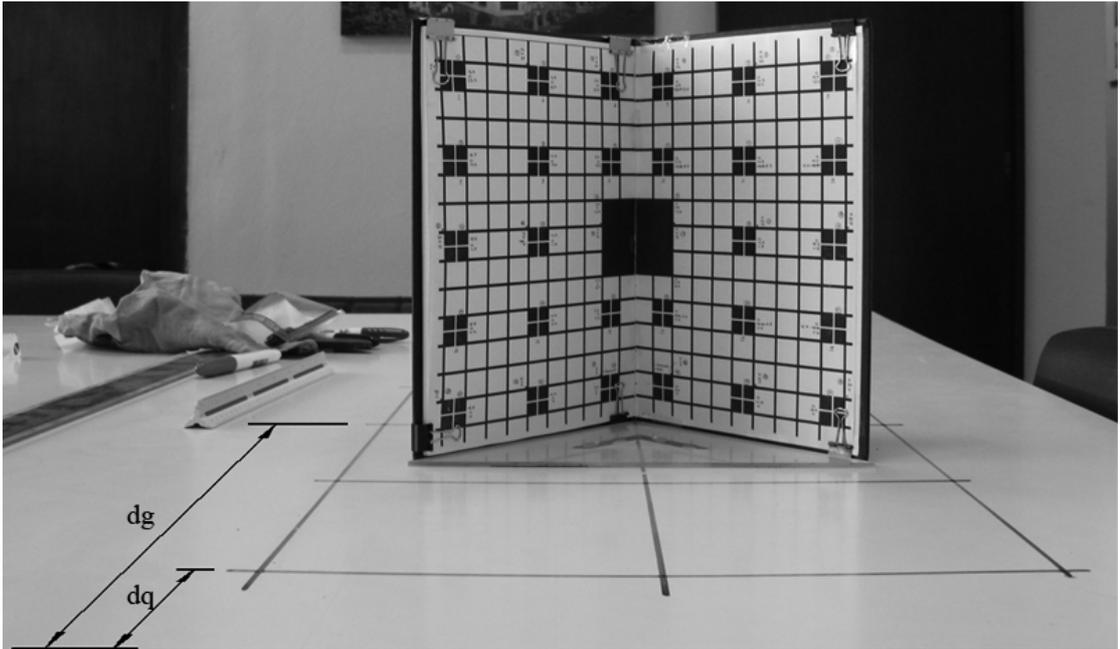
Como mencionado anteriormente, a aquisição das imagens é o primeiro passo para a posterior análise. Foram obtidas fotos do quadriculado como é mostrado, por exemplo, na Figura 7. Os principais parâmetros de posicionamento das câmeras, como distância entre as câmeras, altura e ângulo em relação ao chão, são mostrados na Figura 8. Para não ter influência em eventuais erros de mapeamento dos pixels (etapa a seguir) devido à baixa qualidade da imagem, foram utilizadas duas câmeras Canon modelo PowerShot G7 de 10 megapixels, consideradas, atualmente, de alta resolução. As características das câmeras utilizadas são mostradas na Tabela 2 e Figura 9.

Nesta etapa, a posição relativa entre as câmeras foi mantida fixa, através de um suporte metálico, evitando que a posição entre as câmeras pudesse influenciar nos resultados.

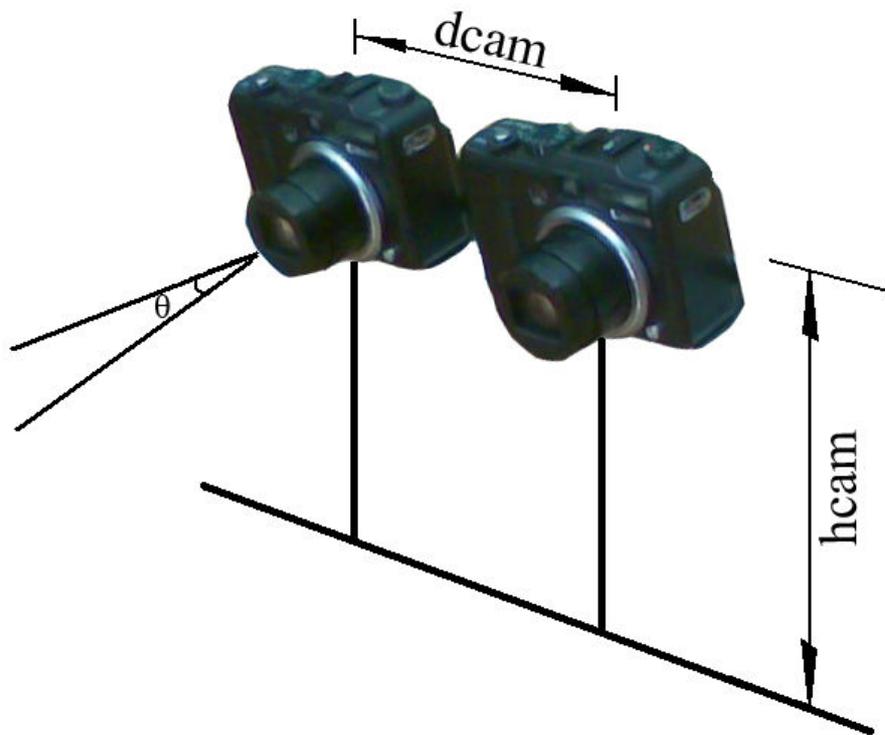
Uma observação importante é a de que mesmo sendo utilizada uma câmera fotográfica digital com alta resolução, há um pré-processamento e compressão com perdas de dados realizados automaticamente por ela. O arquivo gerado por este dispositivo é de formato JPEG (explicado no Glossário), que é um padrão utilizado mundialmente, porém comprime a imagem e há perda de dados. Para não haver mais perdas de dados, os arquivos obtidos em formato JPEG foram convertidas em formato BMP, a fim de que quando as imagens fossem manuseadas em *softwares* de edição de imagens não houvesse diminuição de qualidade com eventuais compressões.

Alguns dados importantes no posicionamento das câmeras nas experiências de campo de aquisição são:

- Distância das câmeras ao início do quadriculado ( $d_q$ ) – Figura 7
- Distância das câmeras à origem da grade ( $d_g$ ) – Figura 7
- Distância entre as câmeras ( $d_{cam}$ ) – Figura 8
- Altura das câmeras ( $h_{cam}$ ) – Figura 8
- Ângulo em relação ao chão no posicionamento das câmeras ( $\theta$ ) – Figura 8



*Figura 7 – Parâmetros de posicionamento da grade e quadriculado*



*Figura 8 – Parâmetros no posicionamento das câmeras*

Tabela 2 – Características das câmeras utilizadas

Canon PowerShot G7	
Sensor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1/1,8" Type CCD</li> <li>• 10,0 million effective pixels</li> </ul>
Tamanhos de imagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3648 x 2736</li> <li>• 3648 x 2048</li> <li>• 2816 x 2112</li> <li>• 2272 x 1704</li> <li>• 1600 x 1200</li> <li>• 640 x 480</li> </ul>
Formatos de saída de arquivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• JPEG Exif 2.2</li> <li>• DCF</li> <li>• DPOF</li> <li>• AVI Motion JPEG with WAVE monaural</li> </ul>
Lentes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 35-210mm (35mm equivalente)</li> <li>• F2,8-4,8</li> <li>• 6x zoom ótico</li> </ul>
Velocidade do obturador	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 15-1/2500 segundos</li> </ul>
Dimensões	107,4 x 73,9 x 42,5 mm



Figura 9 – Câmeras utilizadas (Canon PowerShot G7 10Mpixel)

### 3.2.2. Mapeamento de pontos 3D para 2D

A calibração consiste em mapear os pontos 3D do espaço real nos pixels da imagem. Para isso, são selecionados alguns pontos/pixels cujas coordenadas espaciais tridimensionais são conhecidas: pontos da grade de calibração.

O mapeamento dos pixels consiste em relacionar as coordenadas espaciais dos pontos tridimensionais com as dos pixels, nas imagens das câmeras direita e esquerda. Para os testes realizados foram necessários mapear os pixels da grade de calibração (pontos em vermelho na Figura 10) e identificar as coordenadas UV dos pixels correspondentes aos vértices do padrão quadriculado, utilizado para o teste (ver Figura 11). Este mapeamento foi efetuado de forma manual utilizando um *software* de edição de imagens para a aquisição das coordenadas dos pixels.

Os pontos desejados a serem mapeados estão ilustrados nas imagens a seguir:

- Imagem da câmera direita com grid de calibração (ilustrado na Figura 10)
- Imagem da câmera esquerda com grid de calibração (ilustrado na Figura 10)
- Imagem somente com quadriculado indicando vértices (mostrada imagem da câmera esquerda na Figura 11)

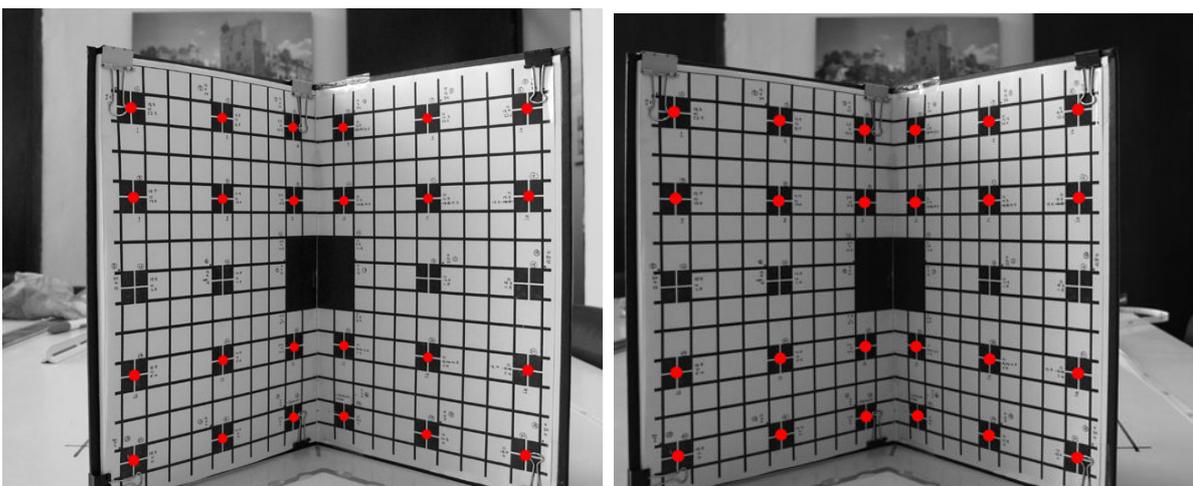
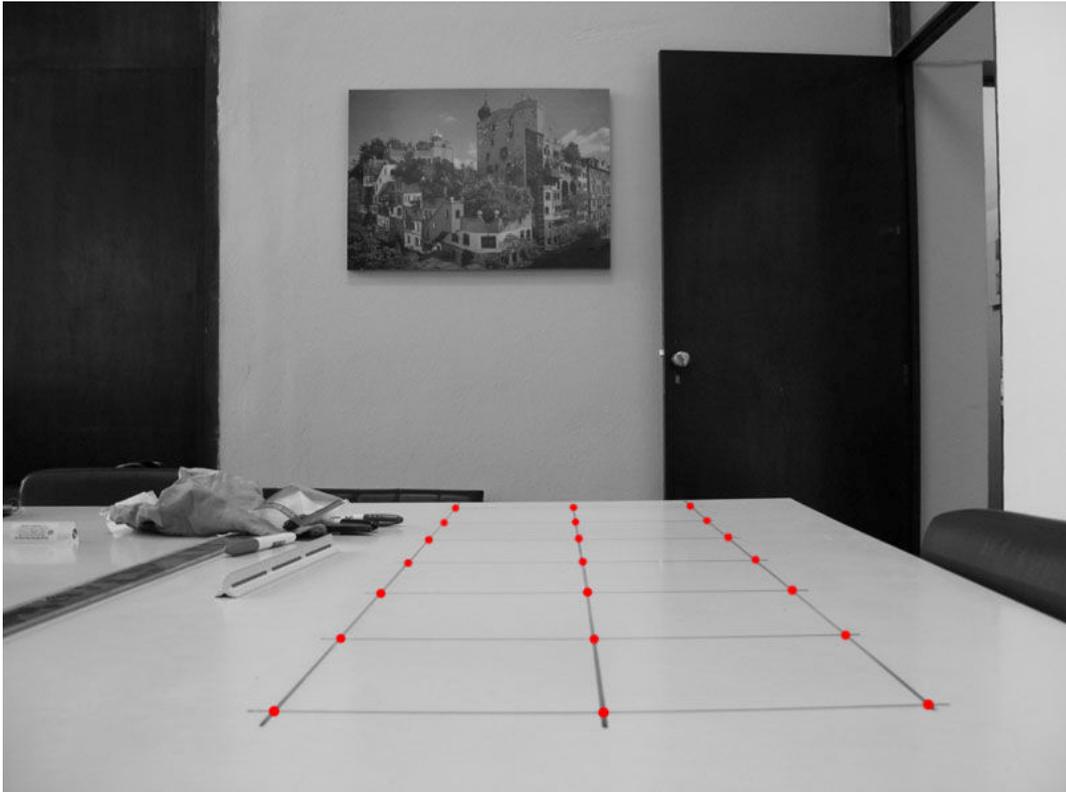


Figura 10 – Pixels (pontos em vermelho) a serem mapeados no grid de calibração (câmeras esquerda e direita)



*Figura 11 – Pixels (pontos em vermelho) a serem mapeados no quadriculado*

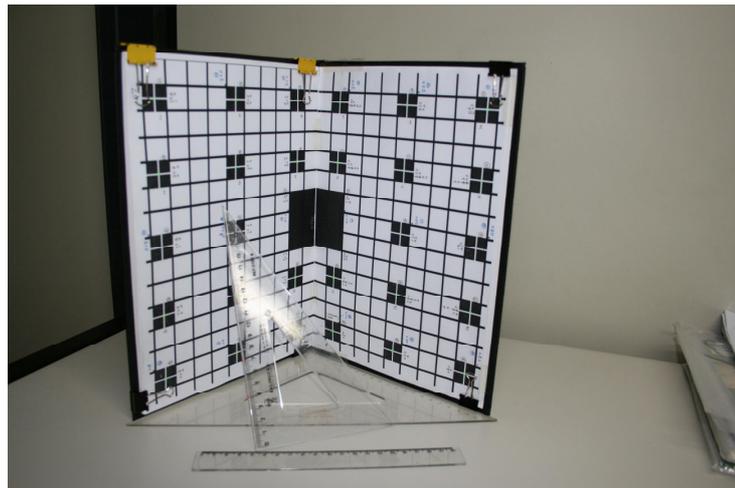
As Figuras 10 e 11 são ilustrações de quais pixels que devem ter extraídas as informações de posição. No caso deste projeto, haverá mais de uma distância de calibração, logo, a cada posição em que o grid for colocado, deve haver um mapeamento distinto, para as câmeras direita e esquerda.

Uma técnica que pode ser aplicada para determinar esses pixels é a utilização do conceito de redes neurais. Com uma rede previamente treinada para estes padrões quadriculados, podemos determinar os pontos que desejamos, utilizando apenas esforço computacional.

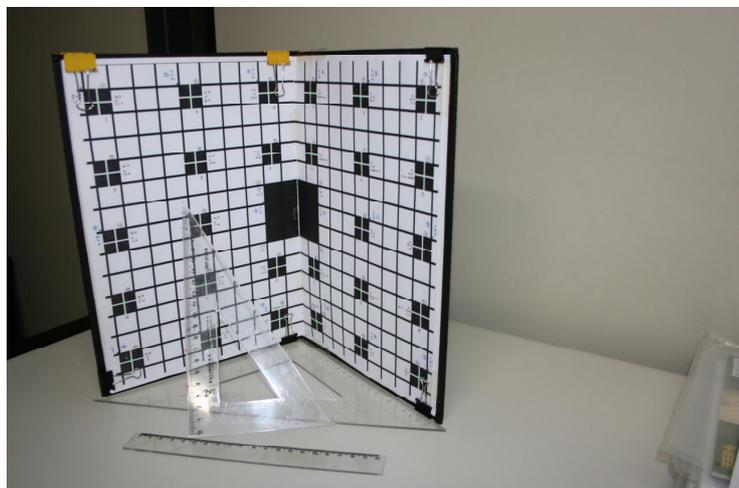
### 3.2.3. **Análise Preliminar do Sistema de Calibração e Dimensionamento**

O objetivo deste estudo é determinar como o erro do mapeamento do pixels interfere no resultado final de dimensionamento. Neste estudo, os pixels foram mapeados de forma manual, devido a algumas imprecisões das coordenadas retornadas pelo algoritmo de automação que tentou-se utilizar.

Para isso, foi usado um exemplo-base no estudo de outros alunos do PADS-UFRJ no qual consiste do dimensionamento de um segmento de 3 centímetros de um esquadro em um ambiente, como mostram as Figuras 12 e 13.



*Figura 12 – Imagem esquerda para simulação de processo de estereofotogrametria*



*Figura 13 – Imagem direita para simulação de processo de estereofotogrametria*

Para o teste de sensibilidade a erros dos algoritmos de calibração e dimensionamento, foi elaborado um algoritmo que possui a intenção de errar (propositadamente) algumas coordenadas dos pixels necessários para o processo de estereofotogrametria (Tabela 3). Foi introduzido um erro aleatório variando de 1 a 5 pixels nas coordenadas e executada a rotina de dimensionamento. Os resultados foram satisfatórios e mostraram que pequenos erros de mapeamento (perturbações da ordem de 3 pixels) não afetam significativamente (erros menores que 3%) os parâmetros de calibração nem o dimensionamento. O dimensionamento foi a parte mais afetada já que acumula os seus erros e os das calibrações das duas câmeras. Na Tabela 3 é mostrado o algoritmo aplicado a inserções de perturbações no resultado da calibração do grid posicionado na imagem esquerda (24 pontos de calibração). Este processo foi repetido para a calibração do lado direito e também para o dimensionamento. É utilizada nesta rotina a função já desenvolvida de calibração (*CalMF*).

*Tabela 3 – Trecho do código Matlab para teste de sensibilidade das rotinas de calibração e dimensionamento*

```
GL = load('GridLeft.txt'); % lê as coordenadas da grade da imagem esquerda
PL = []; % cria uma variável para armazenar os parâmetros de calibração da imagem esquerda

for n=1:50

    G = GL + [ zeros(24,3) round(rand(24,2)*6 -3)]; % armazena um vetor com valores
aleatórios para os pontos da grade
    PL = [ PL ; CalMF(G)']; % calcula os parâmetros de calibração e armazena em PL
end
```

Para a análise da precisão do mapeamento dos pixels, também pode ser realizada uma verificação do dimensionamento dos próprios segmentos existentes no grid de calibração. Verificando cada um dos segmentos lá existente, já que de antemão sabemos as reais dimensões, podemos obter uma relação precisa do erro inerente a esta etapa.

### 3.2.4. Rotinas de calibração das câmeras e dimensionamento de segmentos

As rotinas de calibração das câmeras e dimensionamento que foram utilizadas já haviam sido desenvolvidas por pesquisadores do PADS-UFRJ e serão melhor explicadas a seguir. A função de calibração possui o nome de *CalMF* e a de dimensionamento de *DimMF*.

As rotinas *CalMF* e *DimMF* foram desenvolvidas em um projeto de dimensionamento por estereofotogrametria para a Petrobrás, cujo código não é aberto. Assim, essas rotinas foram implementadas em bibliotecas de “link” dinâmico (DLL) e utilizadas na programação deste trabalho.

Na calibração da câmera é usado um arquivo de entrada de dados contendo o mapeamento dos pixels do grid de calibração na imagem (coordenadas chamadas U e V) e suas posições reais nos eixos X, Y e Z (descritos no grid). Esta função retorna os valores dos parâmetros de calibração já mencionados neste documento e possui as propriedades descritas na Tabela 4:

Tabela 4 – Parâmetros de entrada e saída da rotina de calibração

CalMF	
Entrada de dados	Nome do arquivo contendo as coordenadas reais e as posições (em pixels) dos alvos do grid de calibração. Formato do arquivo: <X Y Z U V>
Saída de dados	Vetor com todos os parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera, na ordem apresentada na Tabela 1.

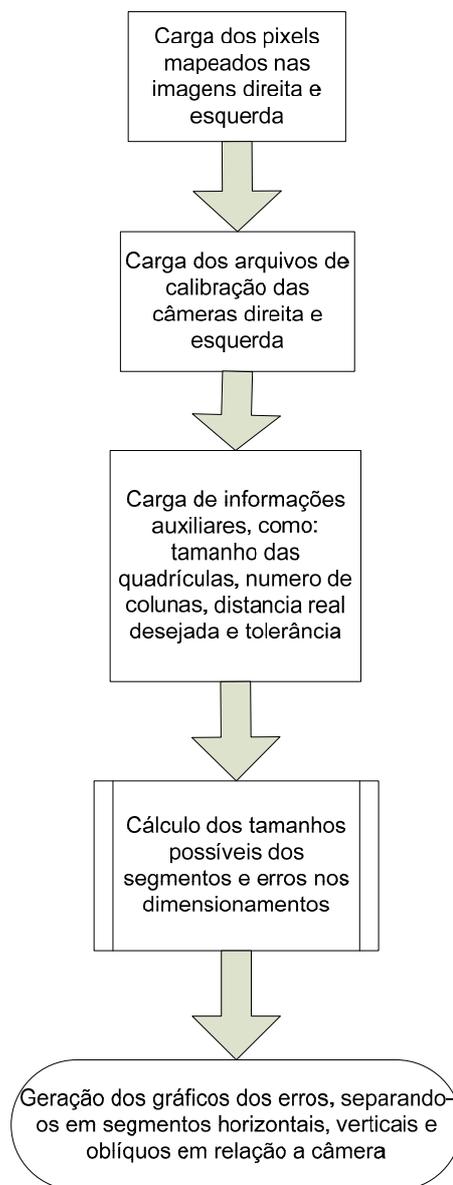
A função de dimensionamento utiliza os parâmetros de calibração calculados anteriormente e as coordenadas U e V das imagens geradas por cada câmera, isto é, de cada extremo (ponto de início e fim) do segmento do qual desejamos obter. Como resposta, é retornado um valor, com precisão de ponto flutuante, com o tamanho do segmento, em centímetros.

*Tabela 5 – Parâmetros de entrada e saída da rotina de dimensionamento*

DimMF	
Entrada de dados	<p>Valores ou variáveis contendo os parâmetros de calibração e coordenadas das imagens direita e esquerda, no seguinte formato:</p> <p>&lt;AUL AVL AUR AVR BUL BVL BUR BVR PL PR&gt;</p> <p>onde:</p> <p>AUL: coordenada U na imagem esquerda do ponto A            AVL: coordenada V na imagem esquerda do ponto A            AUR: coordenada U na imagem direita do ponto A            AVR: coordenada V na imagem direita do ponto A            BUL: coordenada U na imagem esquerda do ponto B            BVL: coordenada V na imagem esquerda do ponto B            BUR: coordenada U na imagem direita do ponto B            BVR: coordenada V na imagem direita do ponto B            PL: vetor com os parâmetros de calibração da câmera direita            PR: vetor com os parâmetros de calibração da câmera esquerda</p>
Saída de dados	Valor, ponto flutuante, com a dimensão calculada.

### 3.2.5. **Análise dos erros de dimensionamento nas diferentes distâncias de calibração**

Esta etapa exige a execução bem-sucedida de todas as outras mencionadas anteriormente. Em linhas gerais, o processo pode ser explicado pelo fluxograma mostrado na Figura 14.



*Figura 14 – Fluxograma geral da rotina de análise de “erros de dimensionamento” X “distância do objeto”*

A etapa inicial corresponde à carga dos dados necessários à execução dos cálculos de dimensionamento. É nesta fase que são utilizados os mapeamentos das coordenadas dos segmentos que desejamos dimensionar e os parâmetros de calibração. É importante ressaltar que nesta rotina é possível passarmos vários pontos e obtermos, como resposta, um vetor. Com isso podemos simular vários tamanhos de segmentos em uma mesma execução.

O algoritmo desenvolvido possui além desses argumentos, alguns auxiliares que são úteis no direcionamento da resposta em relação ao que desejamos saber (por exemplo, número de colunas no padrão quadriculado, qual distância real desejamos simular os erros, etc).

A etapa seguinte é a de maior importância, já que envolve o dimensionamento propriamente dito: calcula todos os tamanhos de segmentos possíveis no padrão quadriculado e determina os erros baseando-se nas distâncias real e dimensionada. Os valores aqui calculados são armazenados em vetores para posterior exposição em gráficos ou até mesmo em forma matricial.

Por fim, a última etapa mostra na tela, com uma distância real fixada, o erro para cada segmento que possui esta determinada distância. Os segmentos são distinguidos em segmentos paralelos, ortogonais e oblíquos em relação à linha que são posicionadas as câmeras (plano das câmeras). Isto é importante para analisarmos o comportamento de cada um desses tipos de segmentos, por exemplo, se um tipo possui maior erro que outro, como veremos nas seções a seguir que mostram os resultados dos experimentos. O erro relativo é calculado através da fórmula a seguir:

$$\text{erro} = |(tam\_calculado - tam\_real)/tam\_real|.100$$

onde: tam\_calculado: tamanho de um segmento calculado pela rotina de dimensionamento  
tam\_real: tamanho real de um determinado segmento

É importante ressaltar que há um erro de precisão na determinação do tamanho do segmento real, pois, para que os pontos ficassem visíveis nas imagens, foi utilizada uma caneta “pilot” grossa, cuja espessura é de aproximadamente 5 milímetros. Assim o erro de dimensionamento real pode variar em torno de  $\pm 5$  milímetros.

Esta função possui o nome de “*erro\_dimensionamento*”, foi implementada em linguagem Matlab (.m), está mostrada na íntegra no Apêndice A e possui os argumentos de entrada e saída mostrados na Tabela 6.

*Tabela 6 – Parâmetros de entrada e saída da rotina de cálculo e análise dos erros de dimensionamento*

erro_dimensionamento	
Parâmetros de entrada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tam_seg: tamanho real do segmento.</li> <li>• tolerância: faixa para mais ou menos em torno da distancia real.</li> <li>• colunas: numero de colunas do quadriculado.</li> <li>• pontos_L: são as matrizes com os pontos UV da imagem esquerda.</li> <li>• pontos_R: são as matrizes com os pontos UV da imagem direita.</li> <li>• grid_L: os pontos da grade de calibração esquerda</li> <li>• grid_R: são os pontos da grade de calibração direita</li> </ul>
Parâmetro de saída	Matriz chamada de “matriz_erro” contém dados de tamanho real do segmento, tamanho dimensionado e erro de dimensionamento.

O parâmetro de entrada “tolerância” é utilizado para seleccionar a faixa de valores (em torno do valor do segmento real) que serão analisados pela rotina. Se desejarmos dimensionar os segmentos cujo tamanho varia de 20 a 40 centímetros, deve-se utilizar *tam\_seg=30* e *tolerancia=10*. Para segmentos com comprimento igual a 20 centímetros, somente, deve-se utilizar *tam\_seg=20* e *tolerancia=0*.

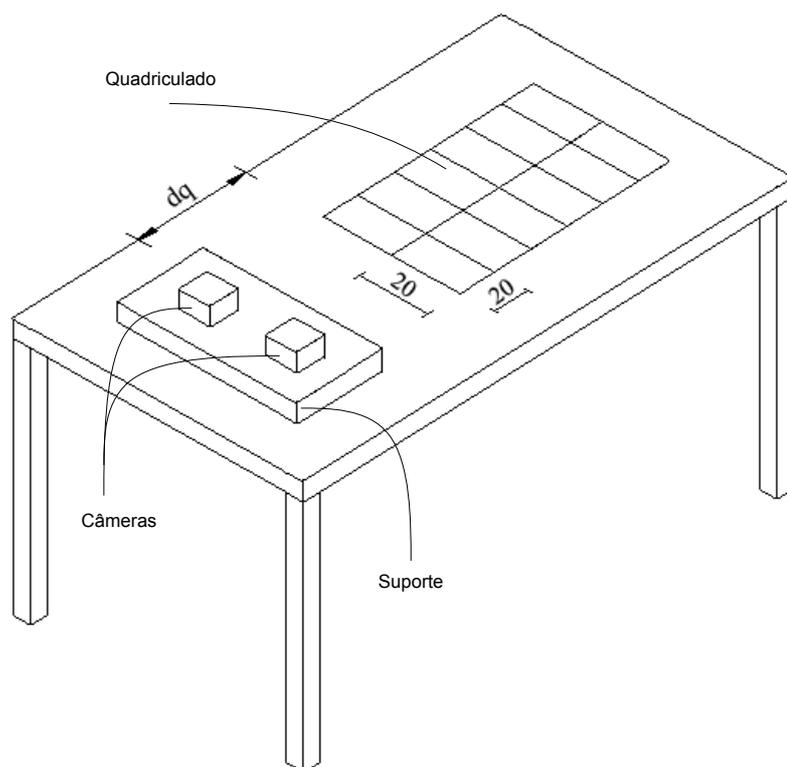
# Capítulo 4

## Testes e Resultados

### 4.1. *Primeiro Teste*

O primeiro teste se destinou à observação da relação entre a posição do grid e a distância do segmento desejado até a câmera. Foi desenhado um quadriculado de 20 centímetros de lado e com três colunas. Com a combinação das três linhas verticais e 7 linhas horizontais pode-se obter vários segmentos. O cálculo da combinação desses segmentos é efetuado no algoritmo. Ao final, são divididos os erros por segmento, isto é, cada tamanho de segmento pode ser encontrado a uma distância distinta das câmeras. O grid foi colocado em três distâncias das câmeras: 60, 100 e 180 centímetros.

O experimento é ilustrado abaixo e os dados importantes de posicionamento são informados na Tabela 7. O ideal é que as câmeras sejam posicionadas na mesma altura que o quadriculado, porém não foi possível a visualização das quadrículas que estavam mais longes. Por causa disso, as câmeras foram posicionadas em uma altura 16 centímetros superior ao quadriculado, como mostrado na Figura 15.



*Figura 15 – Esquemático com o modelo do primeiro teste*

*Tabela 7 – Dados do primeiro teste*

<b>Primeiro Teste</b>	
Tamanho das quadrículas	20,0 centímetros
Distância entre as câmeras	10,7 centímetros (medida entre os eixos focais)
Altura das câmeras	16,0 centímetros
Distância das câmeras à quadrícula mais próxima ( $d_q$ )	60,0 centímetros (medida a partir da lente das câmeras)
Inclinação das câmeras em relação ao quadriculado	0 grau
Quantidade de quadrículas	12 (3 linhas verticais e 7 linhas horizontais)

Foram utilizadas três calibrações e os índices de calibração em cada distância estão informados na Tabela 8. O índice de calibração consiste no cálculo do erro de dimensionamento dos próprios segmentos existentes no grid. As calibrações se mostraram bastante satisfatórias, já que os índices foram menores que 1%.

$$\text{índice de calibração} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{|d_n - \tilde{d}_n|}{d_n} \cdot 100,$$

onde:  $d_n$  é o tamanho real do segmento  $n$ ,

$\tilde{d}_n$  é a estimativa do segmento  $n$ ,

$N$  é o número de segmentos possíveis considerando os pontos da grade.

Tabela 8 – Índices de calibração do primeiro teste

<b>Primeiro Teste - Índices de Calibração</b>	
<b>Distância de calibração</b>	<b>Índice de calibração</b>
60 cm	0,72 %
100 cm	0,64 %
180 cm	0,80 %

Com os parâmetros do quadriculado mencionados na Tabela 7, podemos observar dezessete tamanhos distintos de segmentos possíveis: 20,00, 28,28, 40,00, 44,72, 56,57, 60,00, 63,25, 72,11, 80,00, 82,46, 89,44, 100,00, 101,98, 107,70, 120,00, 121,66 e 126,49 centímetros.

Como a quantidade de pontos por tamanho de segmento foi razoavelmente pequena, os testes foram realizados utilizando-se todos os segmentos (todos os tamanhos em todas as distâncias da câmera). O número total de pontos, independente de tamanho de segmento ou distância da câmera, foi 210. Os gráficos têm o objetivo de mostrar a dinâmica de variação do erro de dimensionamento com a distância até a câmera. Para isso, eles foram simulados para cada distância de calibração e dispostos da seguinte forma:

- Todos os segmentos (paralelos, ortogonais e oblíquos em relação ao plano da câmera);
- Segmentos paralelos em relação ao plano da câmera;
- Segmentos ortogonais em relação ao plano da câmera;
- Segmentos oblíquos em relação ao plano da câmera.

### 4.1.1. Primeiro Teste – Calibração de 60 centímetros

Para a calibração de 60 centímetros, o maior erro de dimensionamento encontrado foi de 19,89% (erro relativo) em um segmento de tamanho 20 centímetros posicionado a 170 centímetros da câmera. Constatou-se que 99 segmentos tiveram erro relativo maior que 10% porém, não houve nenhum que tivesse erro maior que 20%. Dentre as três distâncias de calibração utilizadas, esta foi a que obteve a maior incidência de erro. Observou-se que a maior incidência de erro ocorreu para segmentos posicionados a mais de 100 centímetros das câmeras, independente de seus tamanhos.

Abaixo são mostrados gráficos do erro de dimensionamento X distância do segmento à câmera, de acordo com o tipo de segmento (Figuras 16 até 19).

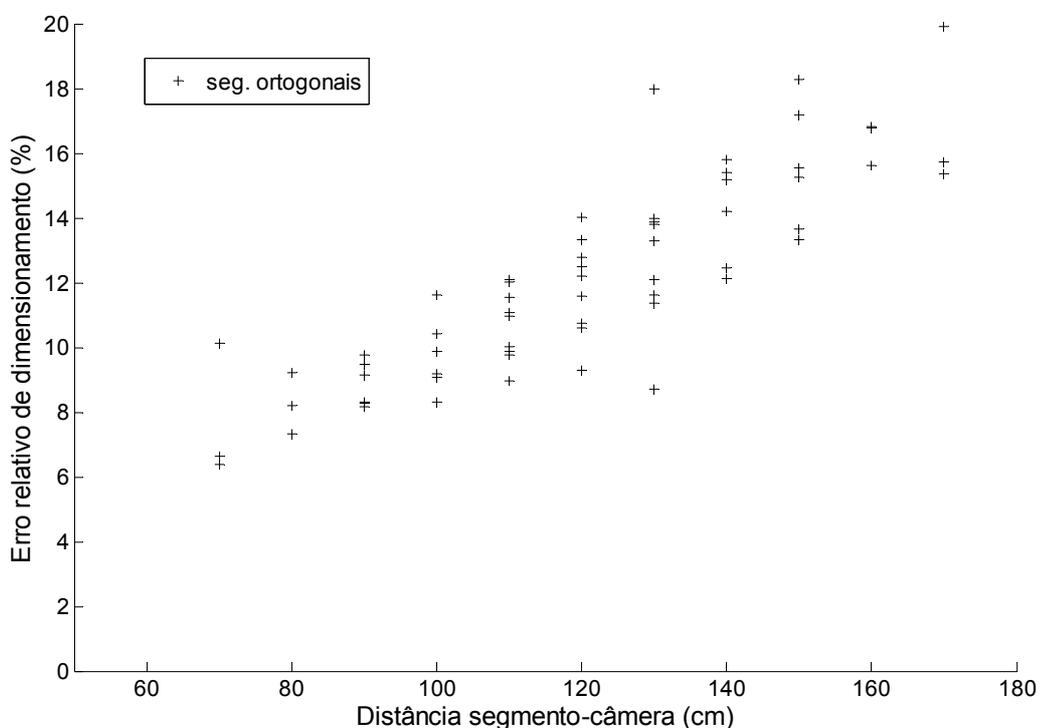


Figura 16 – Segmentos ortogonais com calibração de 60 cm

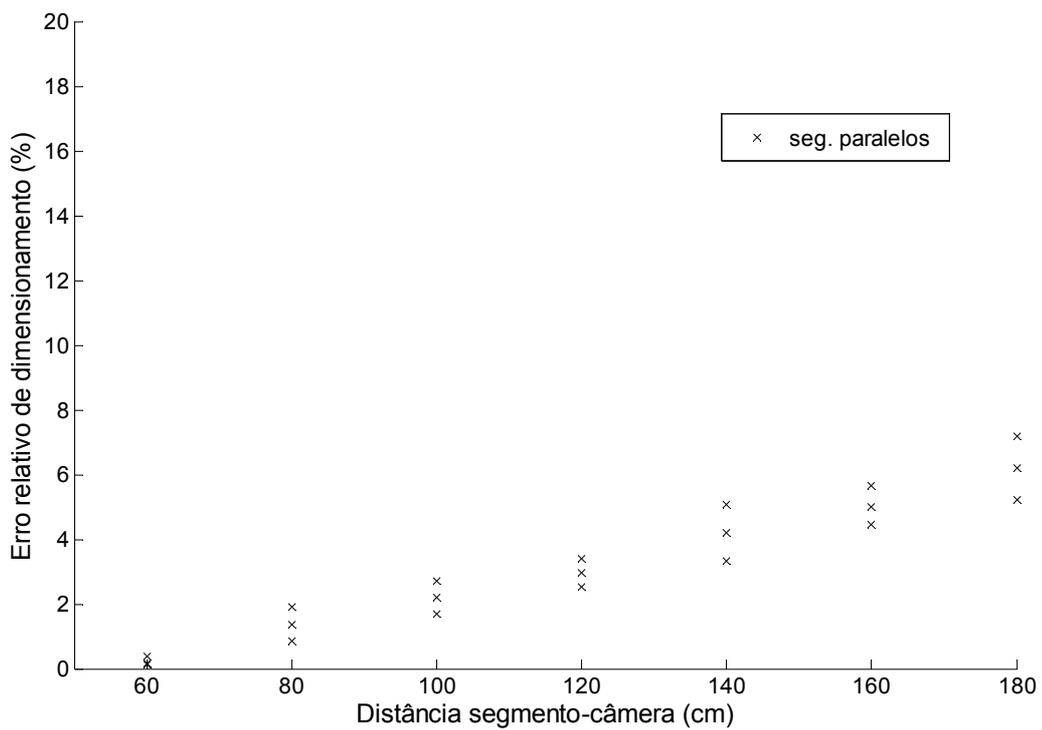


Figura 17 – Segmentos paralelos com calibração de 60 cm

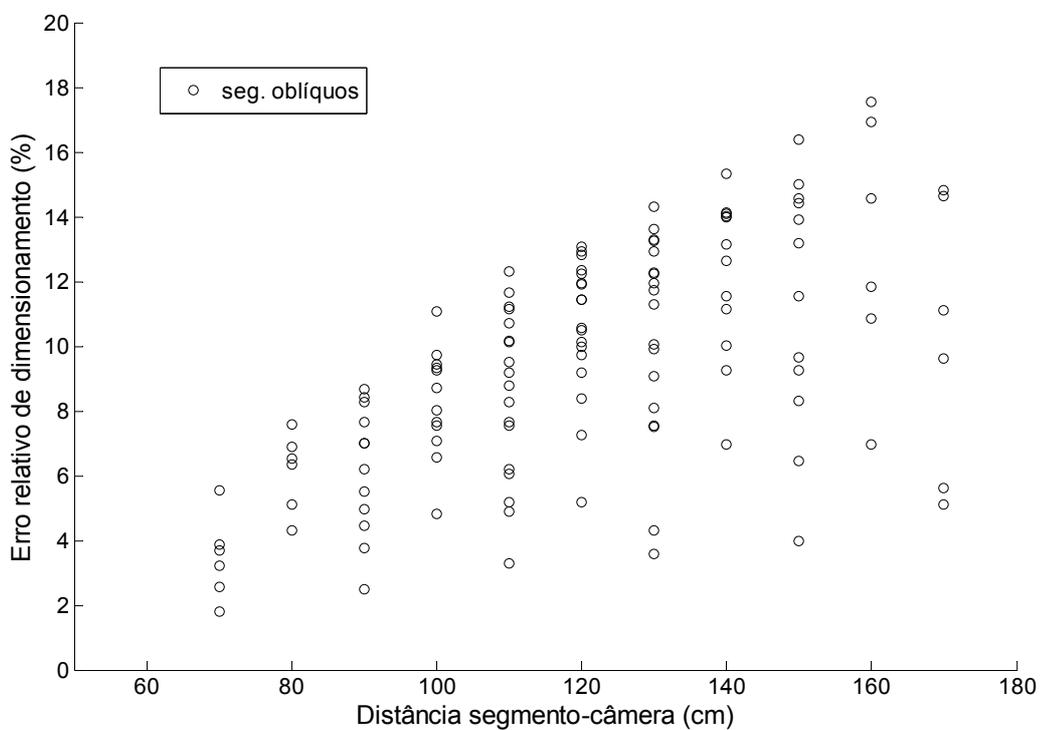


Figura 18 – Segmentos oblíquos com calibração de 60 cm

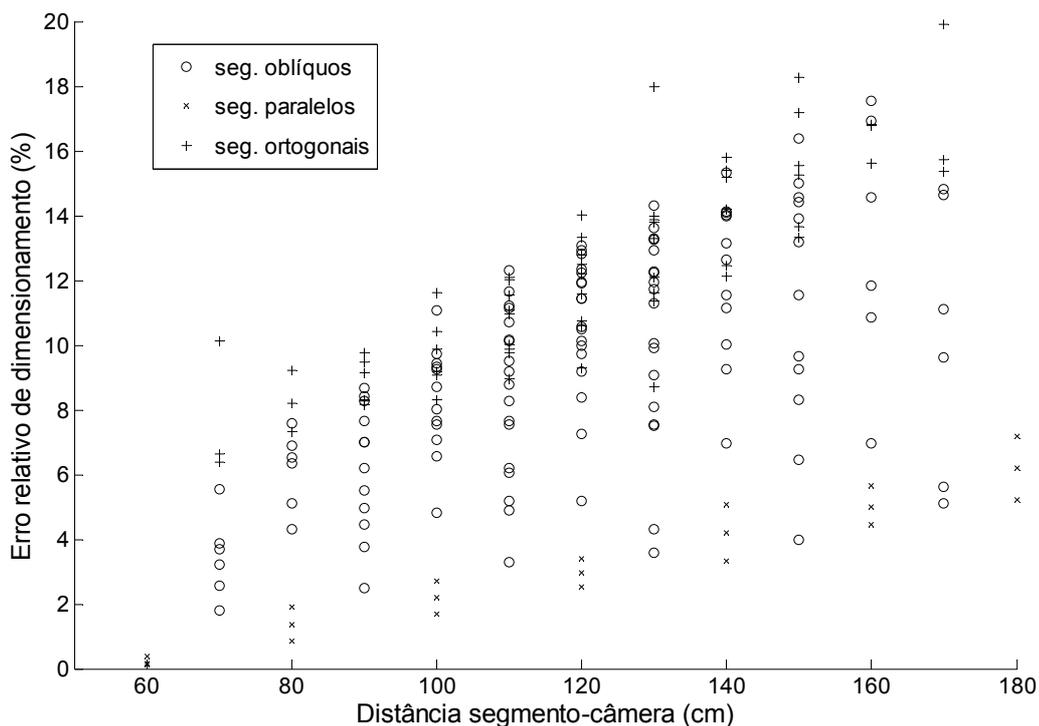


Figura 19 – Todos os tipos de segmentos com calibração 60 cm

Nesta distância de calibração, 60 centímetros, pode-se observar claramente a tendência de diminuição do erro quando a distância do segmento se aproxima da distância da calibração usada. Como não há pontos antes da posição de 60 centímetros, não há como se observar se nesta posição, o erro é mínimo, mas pode-se afirmar, com certeza, que é bastante pequeno, em relação às posições mais distantes, como os segmentos a partir de 100 centímetros.

Nos gráficos acima, observa-se também que os segmentos paralelos, em relação ao plano da câmera, possuem a mesma tendência dos outros segmentos, porém, possui erro relativo bastante menor. Os segmentos ortogonais (em relação à linha de referência das câmeras) se mostraram com os maiores erros, enquanto os oblíquos tiveram erros dispersos para uma mesma distância.

O critério utilizado para definir a distância de um segmento até a câmera foi a distância do ponto médio do segmento até a câmera.

### 4.1.2. Primeiro Teste – Calibração de 100 centímetros

Para a calibração de 100 centímetros, o maior erro de dimensionamento encontrado foi de 12,71% (erro relativo) em um segmento oblíquo de tamanho 44,72 centímetros posicionado a 160 centímetros da câmera. Dentre os 210 segmentos, 11 obtiveram erro relativo de dimensionamento maior que 10%. Nas Figuras 20 até 23, são mostrados os gráficos para a calibração de 100 centímetros.

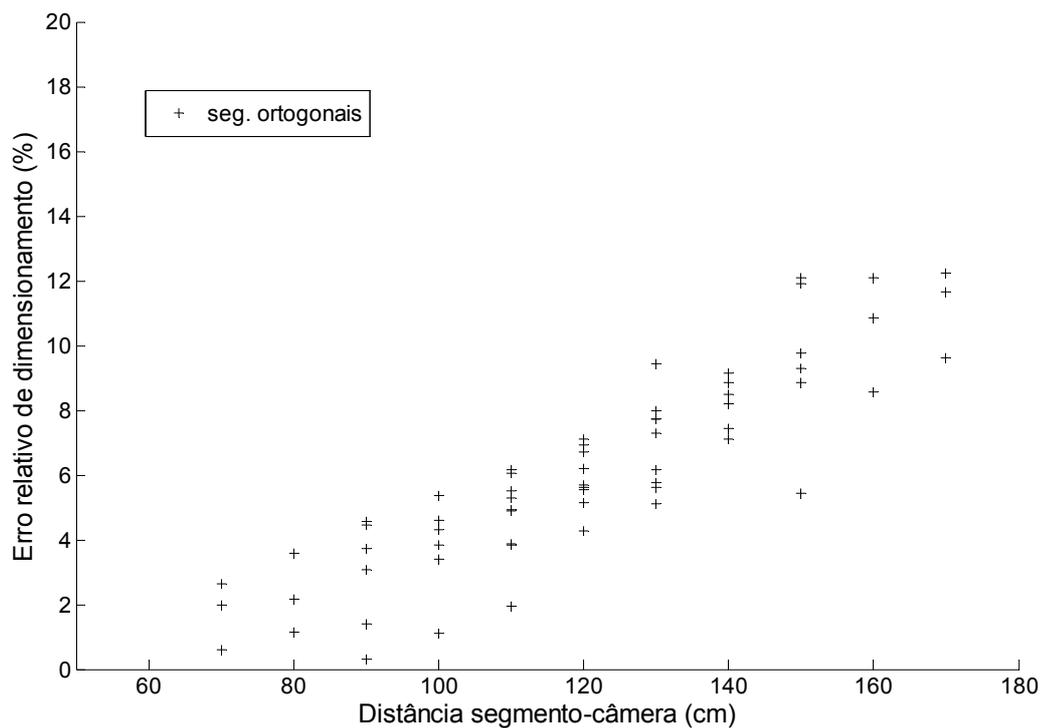


Figura 20 – Segmentos ortogonais com calibração de 100 cm

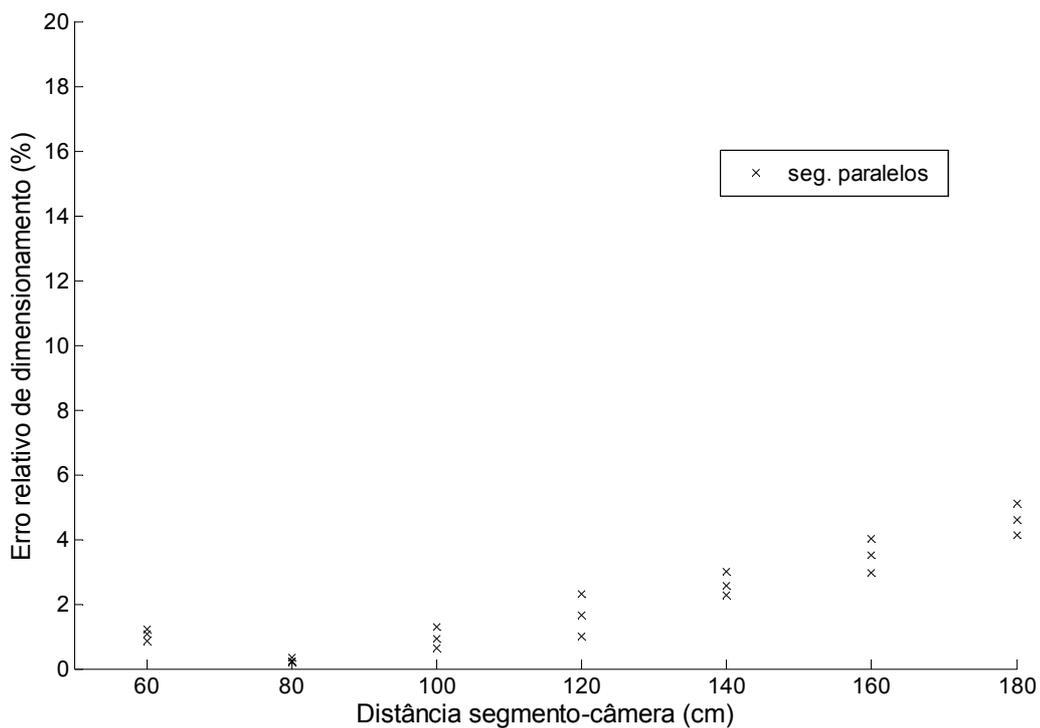


Figura 21 – Segmentos paralelos com calibração de 100 cm

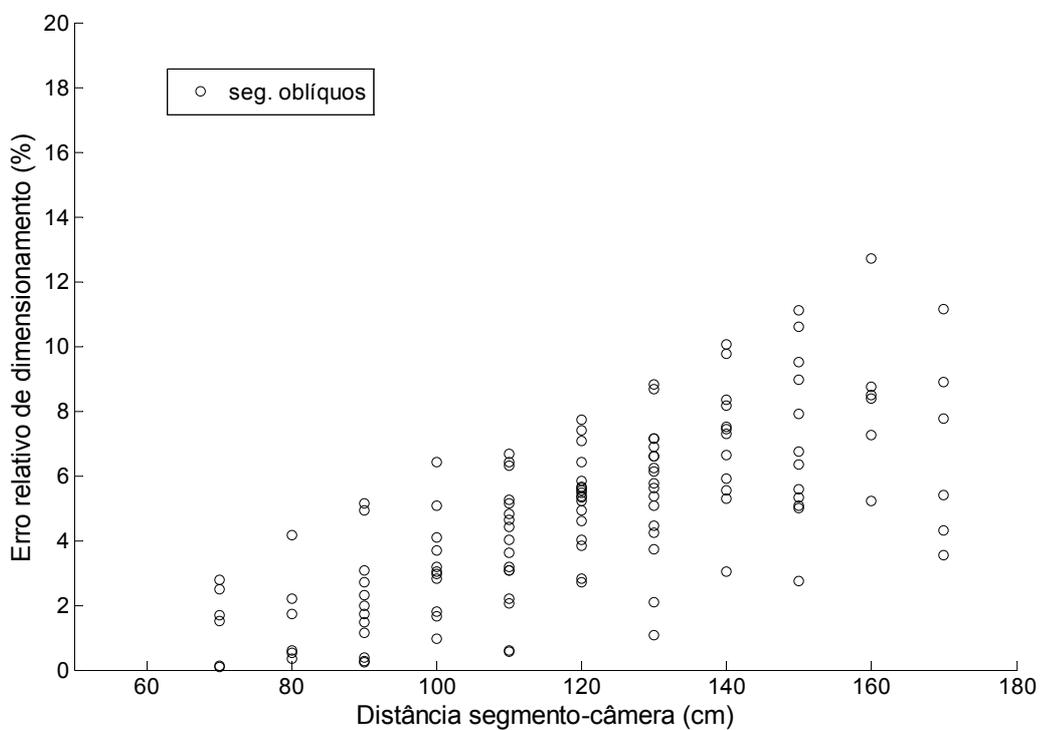


Figura 22 – Segmentos oblíquos com calibração de 100 cm

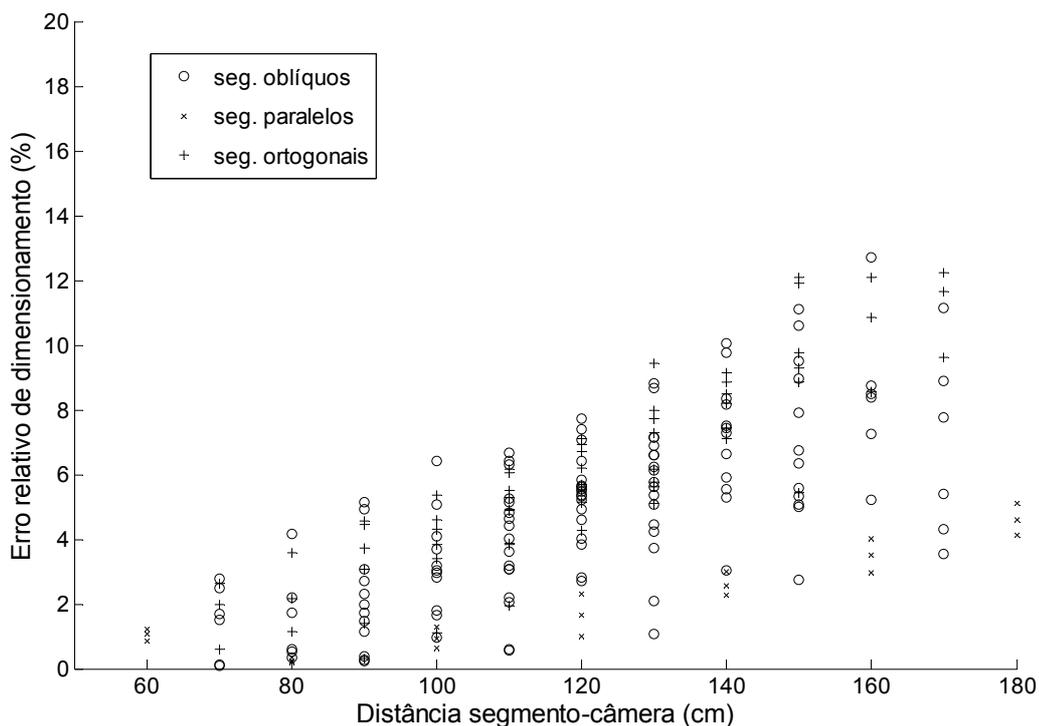


Figura 23 – Todos os tipos de segmentos com calibração de 100 cm

No teste utilizando calibração de 100 centímetros, podemos observar a mesma tendência que o teste com calibração em 60 centímetros, mas também não podemos dizer que o erro é mínimo exatamente na distância de calibração. O que ocorre, e pode ser visto mais claramente no caso de segmentos paralelos, é que o mínimo ocorre com um deslocamento, ocorrendo não em 100 centímetros, mas em 80 centímetros.

Uma hipótese provável é a não consideração da distância focal da câmera e a aproximação da distância real das câmeras em relação aos segmentos, já que são tomados os pontos centrais do segmentos em um eixo situado entre as duas câmeras.

Outra hipótese é que a área ótima de calibração seja à frente da origem da grade, o que deslocaria o erro mínimo para uma posição anterior à distância de calibração. É importante lembrar que apenas a origem da grade é posicionada na distância de calibração, os demais pontos de calibração estão à frente (grid com ângulo de abertura de 90°).

### 4.1.3. Primeiro Teste – Calibração de 180 centímetros

Para a calibração de 180 centímetros, o maior erro de dimensionamento encontrado foi de 12,42% (erro relativo) em um segmento oblíquo de tamanho 44,72 centímetros posicionado a 80 centímetros da câmera. Apenas seis segmentos oblíquos tiveram erros de dimensionamento maiores que 10%. Nas Figuras 24 até 27, são mostrados os gráficos para a calibração em 180 centímetros.

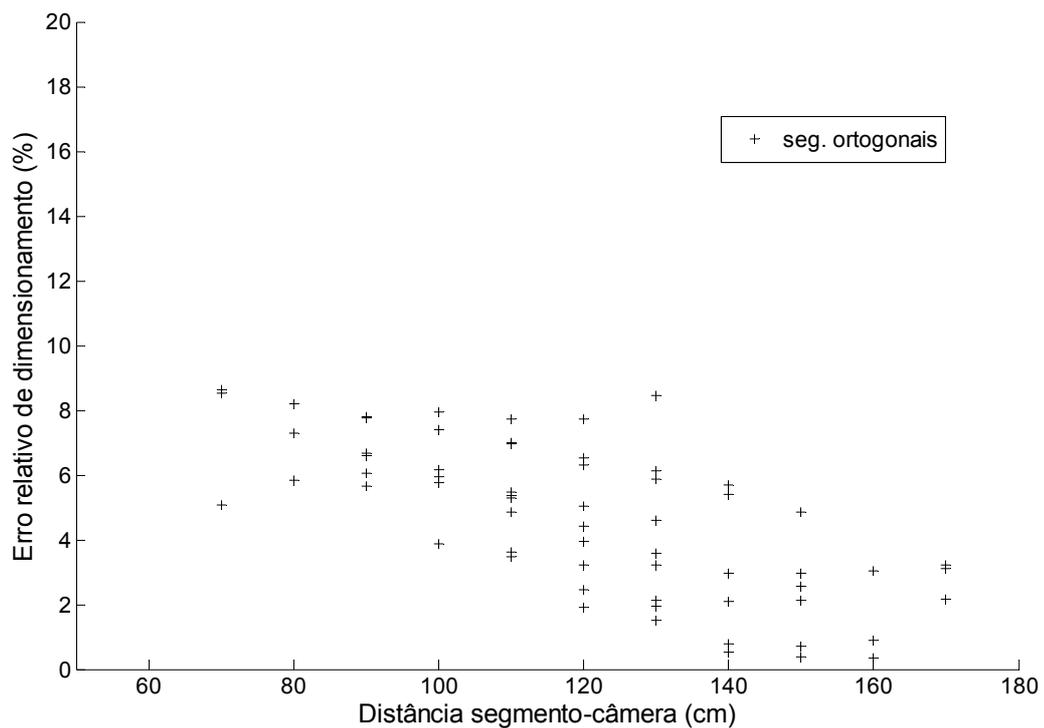


Figura 24 – Segmentos ortogonais com calibração de 180 cm

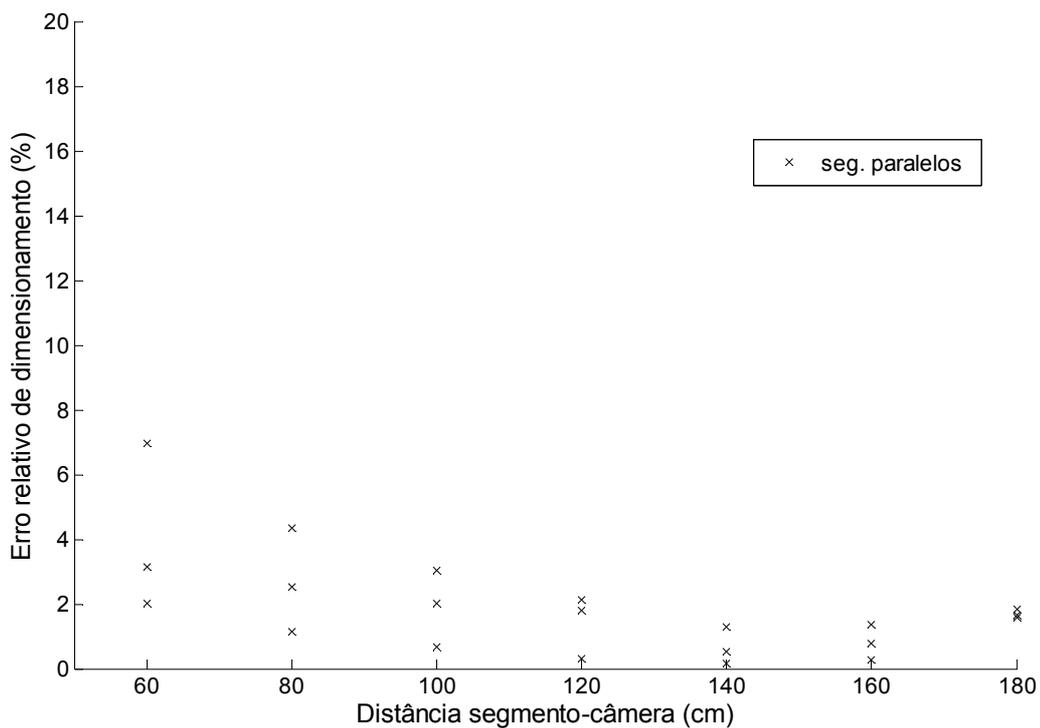


Figura 25 – Segmentos paralelos com calibração de 180 cm

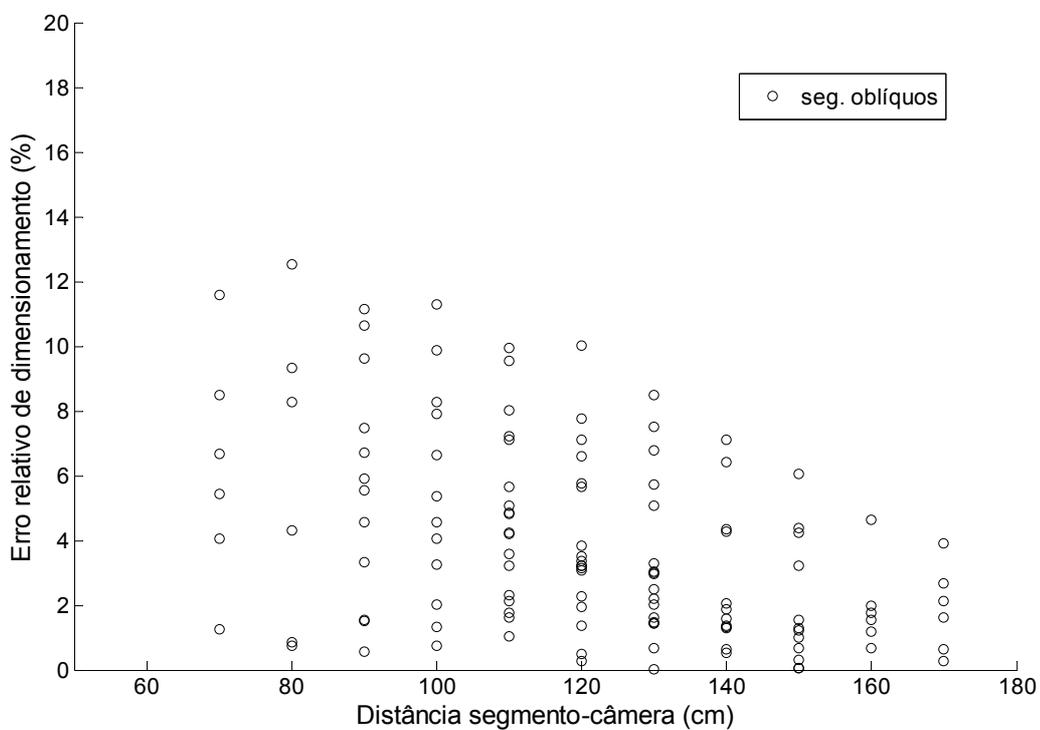


Figura 26 – Segmentos oblíquos com calibração de 180 cm

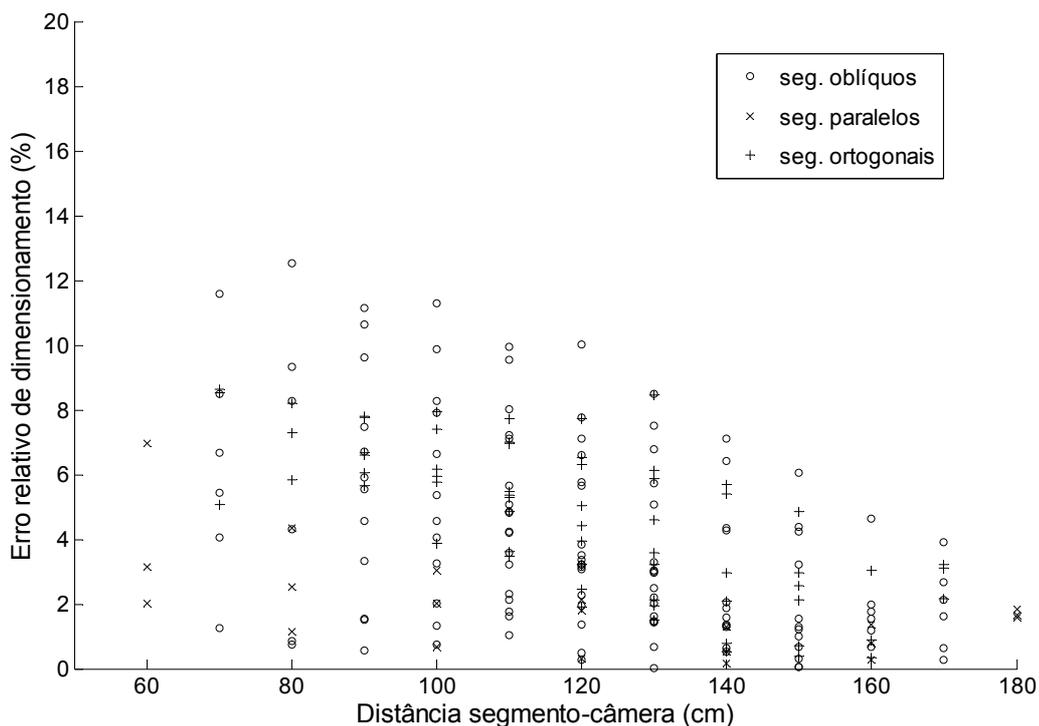


Figura 27 – Todos os tipos de segmentos com calibração de 180 cm

Utilizando a distância de calibração de 180 centímetros, foi observada a tendência de evolução do erro no caso anterior, de 100 centímetros. Para segmentos paralelos, novamente, o erro relativo foi o menor dentre todos os tipos e o mínimo, tanto para segmentos paralelos como para ortogonais e oblíquos, situou-se por volta de 20 a 30 centímetros (metade do tamanho do grid) a menos de 180 centímetros, que foi a distância de calibração e esperada para ocorrer menor erro.

Como neste primeiro teste não foi possível avaliar a real tendência da evolução do erro de dimensionamento com a distância de calibração, foi realizado um segundo teste com maior número de segmentos, maior distância final e maior número de distâncias de calibração. Com esse volume de dados, planejou-se obter informações mais detalhadas, e como o número de pontos é maior, foi realizada uma aproximação polinomial para, por fim, podermos simular uma curva a partir desses pontos espalhados no gráfico. Essa curva se faz importante para uma avaliação correta da variação dos erros de dimensionamento.

## 4.2. *Teste Final*

O objetivo maior deste último teste foi criar uma grande massa de dados, confiável, para conseguir assim obter gráficos expressivos sobre o comportamento do erro em função da distância de calibração.

Para tal, foi elaborado um quadriculado impresso com quadrados de lado 10 centímetros e precisão de 5 milímetros. Este quadriculado, que é mostrado na Figura 28, possui comprimento total de 10 metros e foi posicionado a uma distância de 60 centímetros das câmeras. As câmeras foram colocadas em um suporte e suas posições não variaram durante as tomadas das fotos. O grid de calibração foi colocado inicialmente em 100 centímetros e teve sua posição variada a cada 50 centímetros, resultando em nove posições (100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 e 500 centímetros). Utilizou-se apenas metade do quadriculado (até 500 cm) devido à perda de informação nas imagens após essa posição.



*Figura 28 – Cenário do último teste*

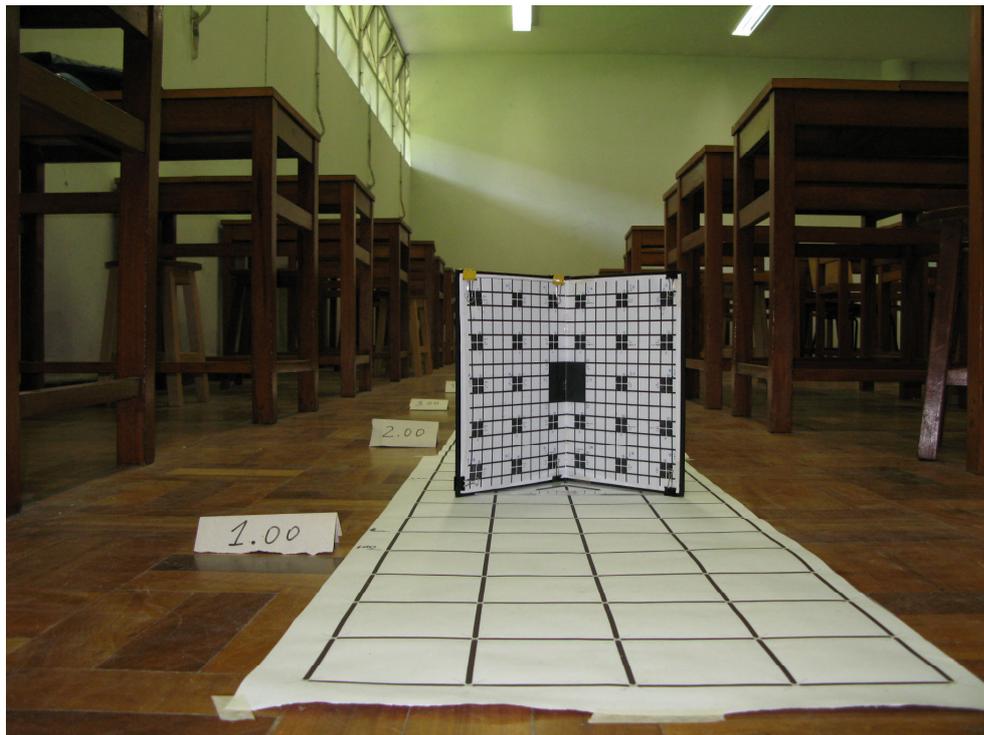
Para obtermos as combinações de todos os segmentos foi executado o script apresentado no Apêndice A. Os segmentos são formados “imaginariamente” ligando cada vértice do quadriculado. Com a distância final de 500 centímetros, foi obtido um total de 25200 segmentos, de tamanhos variados e diferentes distâncias em relação à câmera.

Os dados do cenário de teste estão apresentados na Tabela 9.

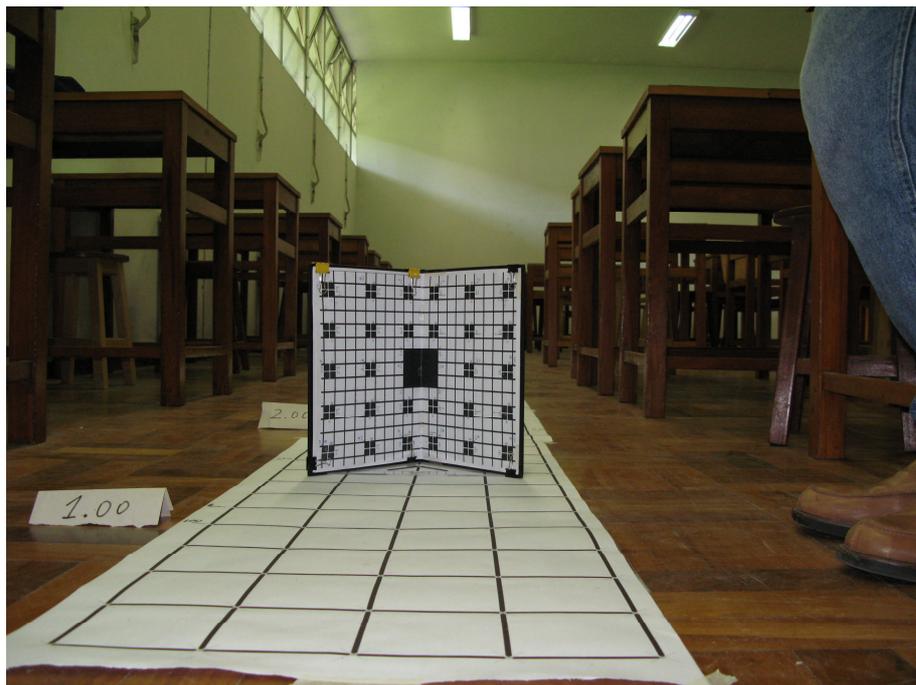
*Tabela 9 – Cenário do último teste*

Altura das câmeras em relação ao quadriculado	14 centímetros
Distância entre as câmeras	14,2 centímetros
Distância das câmeras à primeira linha das quadrículas	60 centímetros
Tamanho do lado de uma quadrícula	10 centímetros

Como podemos ver nas Figuras 29 e 30, o grid foi posicionado em diversas distâncias às câmeras e suas respectivas calibrações realizadas da mesma maneira do primeiro teste. Foram capturadas imagens das câmeras esquerda e direita e posteriormente realizado o procedimento de estereofotogrametria.



*Figura 29 – Último teste – Imagem esquerda com grid em 150 cm*



*Figura 30 – Último teste – Imagem direita com grid em 150 cm*

Além das fotos com o grid, foram capturadas fotos (esquerda e direita) sem o grid, para posterior mapeamento dos vértices das quadrículas e cálculo dos possíveis tamanhos de segmentos formados por eles, como é mostrado nas Figuras 31 e 32.



*Figura 31 – Último teste – Quadriculado na imagem esquerda*



*Figura 32 – Último teste – Quadriculado na imagem direita*

Após a etapa de captura das imagens foi realizado o procedimento de calibração para cada distância na qual o grid fora colocado. Nos próximos resultados, foram utilizadas as calibrações, em cada distância, com menor índice de calibração (Tabela 10). Na próxima seção podemos observar, no entanto, a variação dos erros em função de uma dada distância de calibração, porém com índices diferentes.

*Tabela 10 – Índices das calibrações utilizadas no último teste*

Distância de calibração (cm)	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Índice de calibração	0,60%	0,82%	0,73%	1,03%	1,34%	1,56%	2,23%	2,39%	2,77%

Um resultado que demonstra, de maneira geral, o comportamento do erro de dimensionamento dos segmentos está descrito na Tabela 11. Nesta tabela, podemos observar o erro médio percentual relativo para uma distância de calibração e uma distância quantizada do segmento. Foram consideradas as distâncias dos pontos médios dos segmentos em relação

à câmera. Na Tabela 11, todas as distâncias foram quantizadas em nove níveis, que correspondem aos valores das posições de calibração. A distância de 200, por exemplo, compreende os segmentos cuja distância do ponto médio até a câmera varia de 175 a 225 centímetros ( $200 \pm 25$  cm).

Podemos observar que a diagonal principal, na maioria das vezes, possui o menor erro, o que era o esperado. Além disso, notou-se que a calibração em 100 centímetros se comportou com erro bastante baixo (em torno de 10%) para todas as distâncias dos segmentos.

*Tabela 11 – Erro relativo percentual médio – Último teste*

Erro relativo percentual médio		Distância de calibração (em centímetros)								
Distância quantizada do segmento à câmera (em centímetros)		100	150	200	250	300	350	400	450	500
	100	2,83	4,60	14,46	24,37	33,91	33,59	41,54	62,08	49,83
	150	7,49	2,21	7,73	19,67	29,75	31,64	42,34	61,22	59,04
	200	11,74	8,85	3,94	10,38	21,92	26,95	38,66	56,83	61,08
	250	14,12	17,83	16,08	6,09	11,40	20,82	32,62	50,04	59,09
	300	14,64	26,73	30,17	17,19	3,48	14,55	25,62	41,87	54,63
	350	14,06	35,77	45,33	33,26	13,25	9,01	17,95	32,15	48,07
	400	10,66	42,65	59,79	51,25	26,06	10,64	11,83	21,03	40,53
	450	10,82	50,12	76,30	80,32	41,31	23,91	16,80	10,07	31,61
	500	21,68	52,67	77,88	122,22	49,38	44,54	43,29	19,72	19,32

Para uma melhor análise, podemos observar os gráficos dos erros em função das distâncias de calibração e do segmento. Em um gráfico serão mostrados os erros para uma posição de calibração. Como há grande quantidade de segmentos dimensionados e, por conseguinte, muitos pontos (25200 pontos), podemos realizar uma aproximação para determinarmos a real tendência. Nos gráficos foram utilizadas aproximações polinomiais de 7ª ordem calculadas pelo software de simulação e foram divididos em: gráfico com todos os tipos de segmentos e gráfico com tipos diferenciados de segmentos (paralelos, ortogonais e oblíquos). Abaixo é mostrado o polinômio com os coeficientes  $p_1$  a  $p_8$  a serem ajustados pela aproximação.

$$f(x) = p_1 \cdot x^7 + p_2 \cdot x^6 + p_3 \cdot x^5 + p_4 \cdot x^4 + p_5 \cdot x^3 + p_6 \cdot x^2 + p_7 \cdot x + p_8,$$

onde:  $f(x)$ : função aproximada

$p_1$  a  $p_8$ : coeficientes da aproximação polinomial

$x$ : dados a serem ajustados

Inicialmente são mostrados gráficos, nas Figuras 33 e 34, utilizando valores da Tabela 11, isto é, são gráficos gerados a partir do erro relativo médio percentual para distâncias quantizadas e distâncias de calibração 200 centímetros e 300 centímetros, respectivamente.

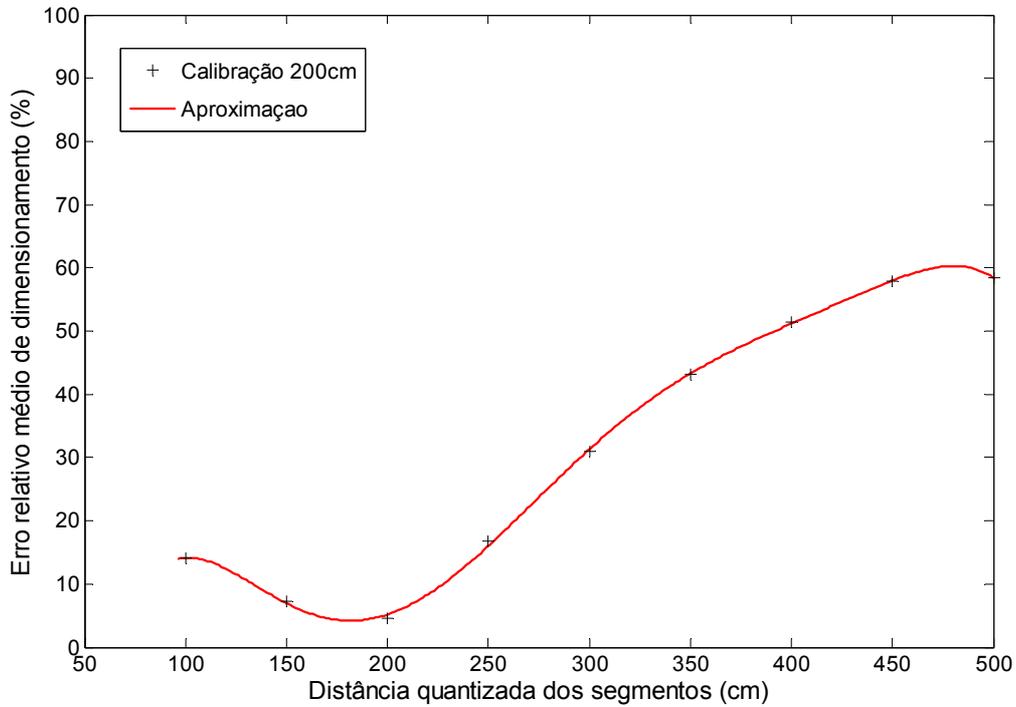


Figura 33 – Erro médio de dimensionamento com distâncias quantizadas e calibração 200cm

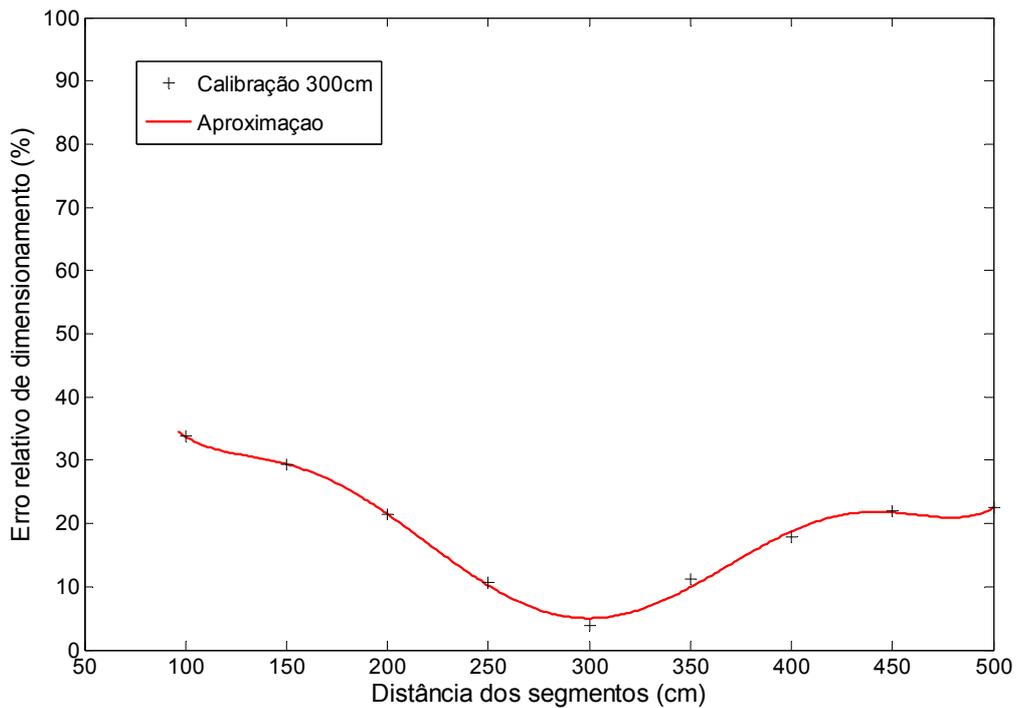


Figura 34 – Erro médio de dimensionamento com distâncias quantizadas e calibração 300cm

São apresentados nas figuras seguintes (Figura 35 à Figura 43) os gráficos de erro de dimensionamento *versus* distância do segmento às câmeras, utilizando aproximação polinomial, incluindo todos os segmentos calculados (paralelos, ortogonais e oblíquos).

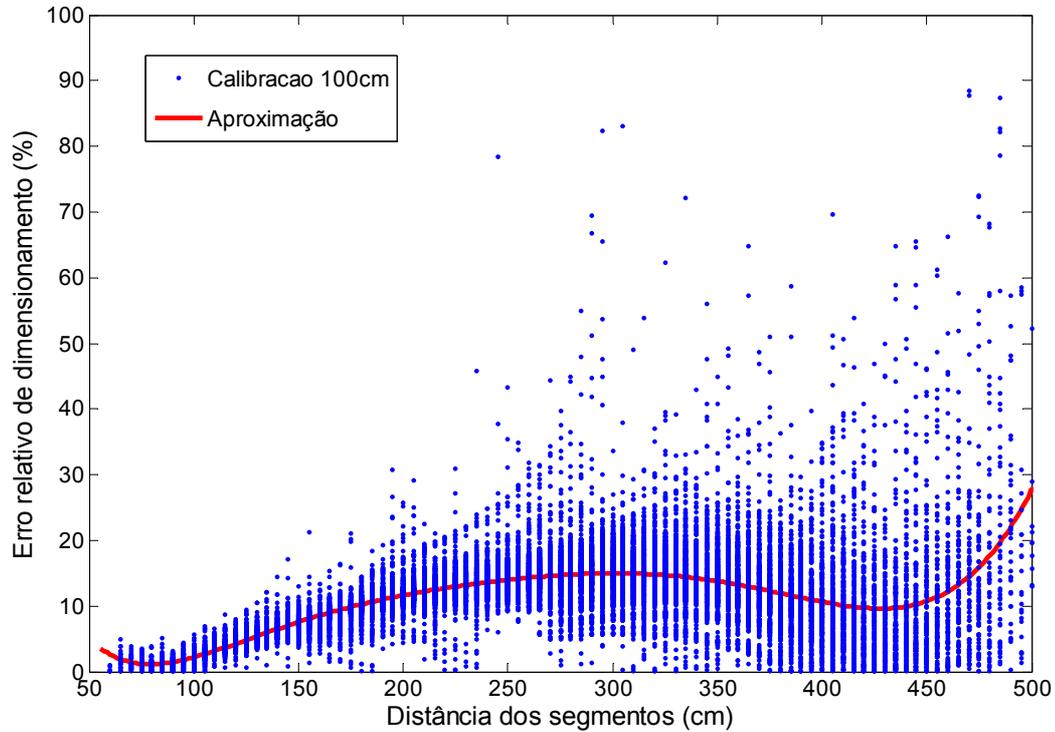


Figura 35 – Último teste – Erro de dimensionamento com calibração 100cm

Na Figura 35, utilizando a calibração de 100 centímetros, podemos observar que o mínimo erro se encontra em torno de 80 centímetros e possui o valor médio de 2%. A partir de 250 centímetros, percebe-se que há grande dispersão do erro em função da distância. Essa dispersão do erro está presente em todas as calibrações utilizadas e se dá em posições distantes daquela onde foi realizada a calibração.

Nas Figuras 36 e 37, calibração de 150 centímetros e 200 centímetros respectivamente, observa-se o mesmo comportamento obtido na Figura 35. O menor erro ocorre em uma distância abaixo da de calibração. Um motivo que pode influenciar neste deslocamento é que o ponto central do grid é posicionado na distância descrita, porém os pontos mapeados estão localizados à frente, pois o grid possui abertura de 90°.

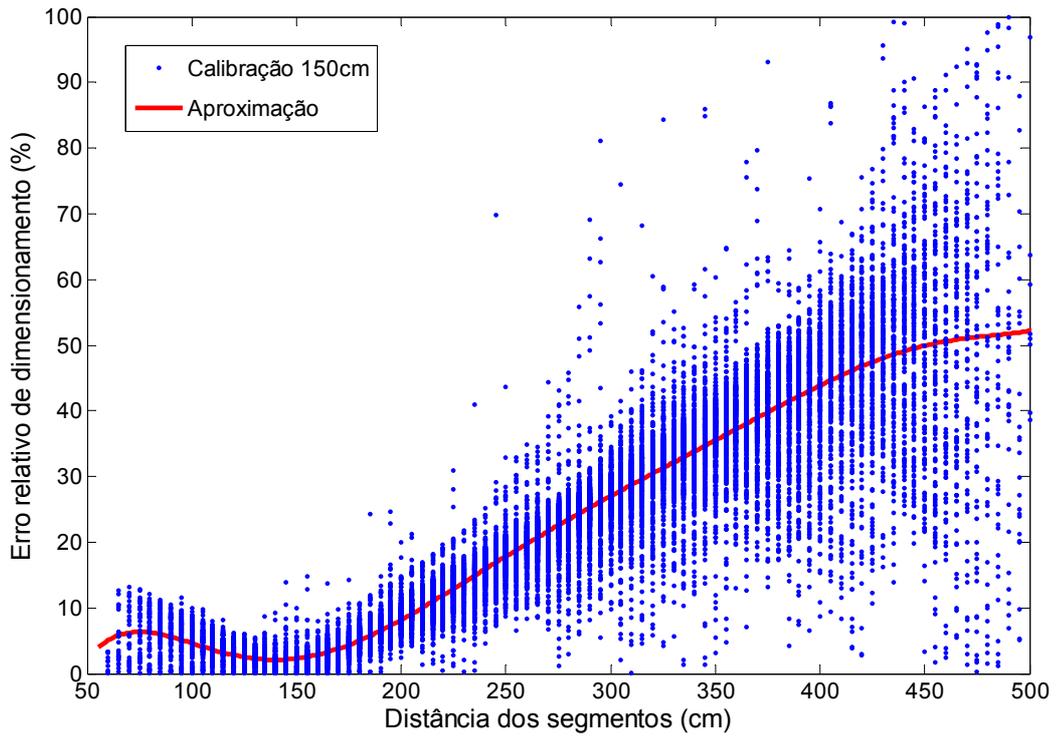


Figura 36 – Último teste – Erro de dimensionamento com calibração 150cm

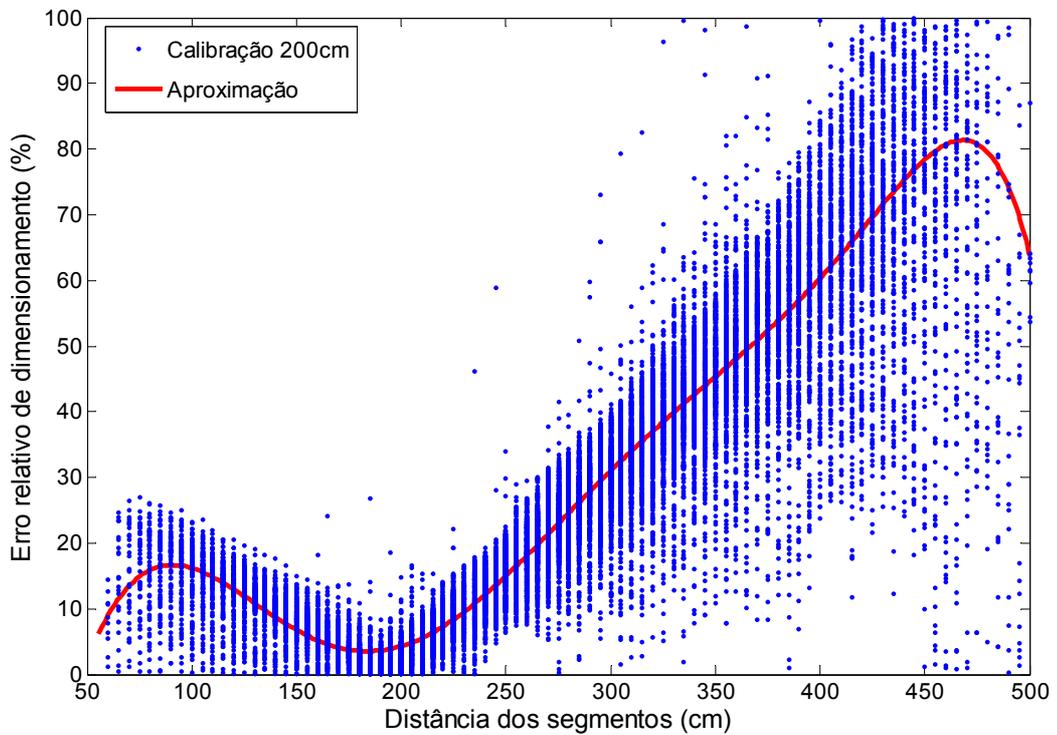


Figura 37 – Último teste – Erro de dimensionamento com calibração 200cm

As calibrações em 250 centímetros e 300 centímetros, Figuras 38 e 39 respectivamente, foram as que se mostraram com resultados mais satisfatórios. O mínimo na aproximação polinomial se deu em 230 centímetros com a calibração de 250 centímetros e exatamente na distância de 300 centímetros utilizando a calibração de 300 centímetros.

Nas Figuras 40 e 41, usadas as calibrações de 350 e 400 centímetros, pode ser detectado que existe uma faixa de 80 centímetros antes da distância na qual a grade está posicionada, em que o erro possui valores em até 30% do tamanho real do segmento. Porém a partir desta faixa, tanto para distâncias de segmento muito maiores ou muito menores que a distância de calibração utilizada, o erro atinge níveis inaceitáveis tendo sua média em torno de 80%, mesmo com visualização satisfatória e sem erro de resolução. Devemos então tomar apenas uma faixa adjacente à distância de calibração como válida.

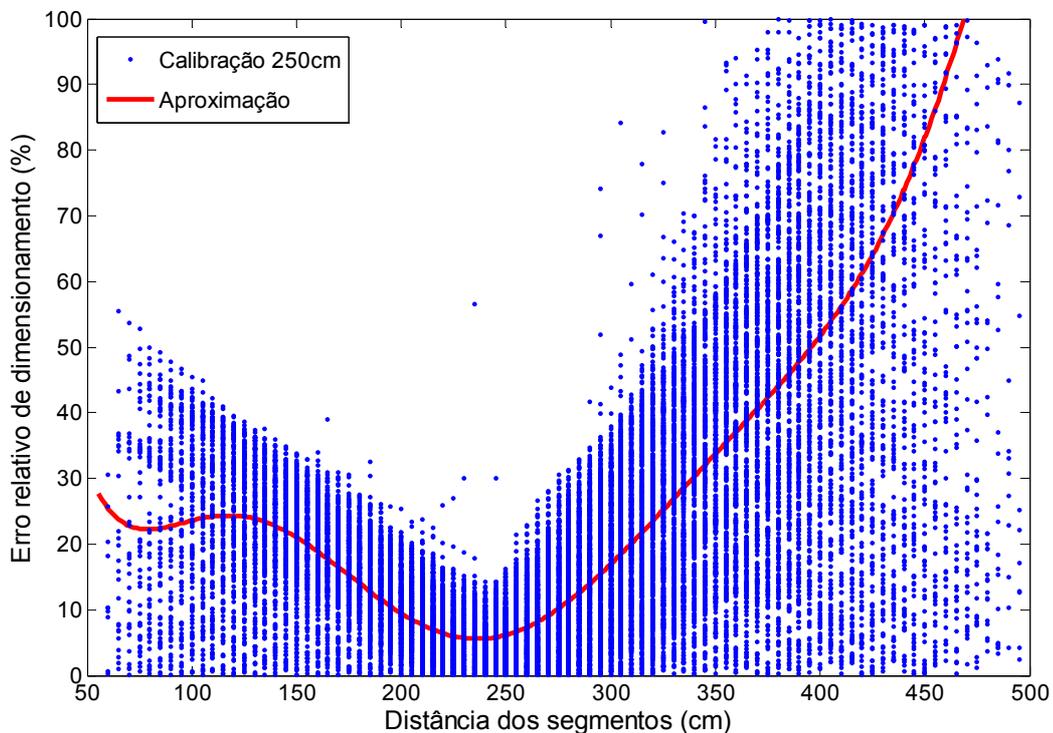


Figura 38 – Último teste – Erro de dimensionamento com calibração 250cm

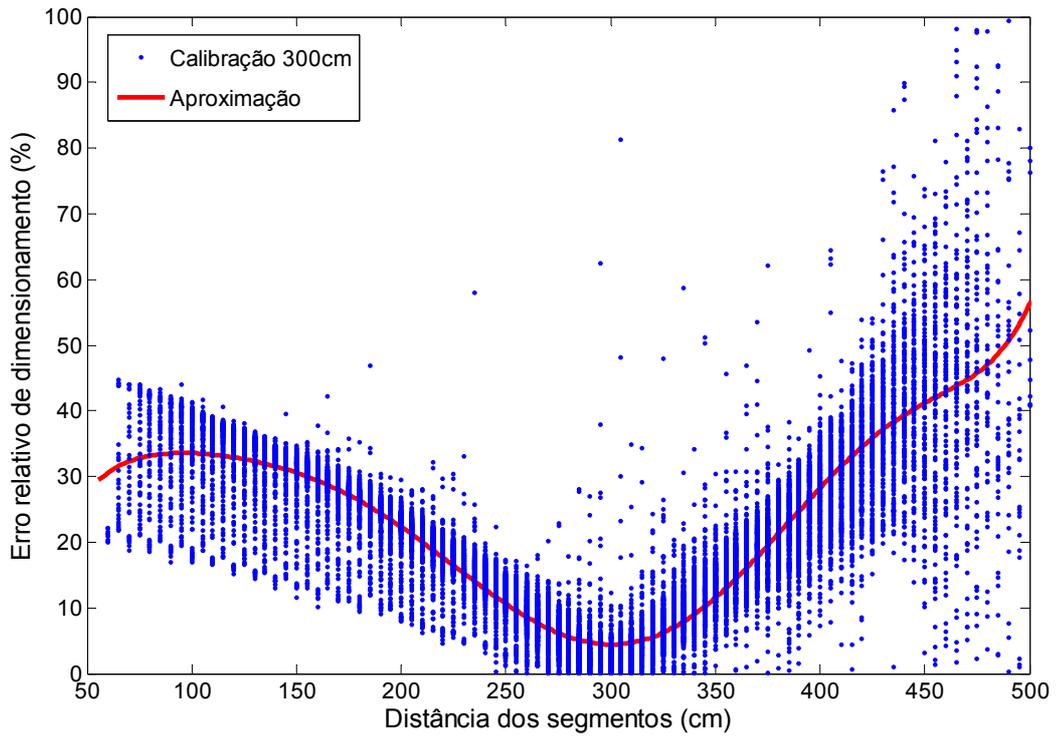


Figura 39 – Último teste – Erro de dimensionamento com calibração 300cm

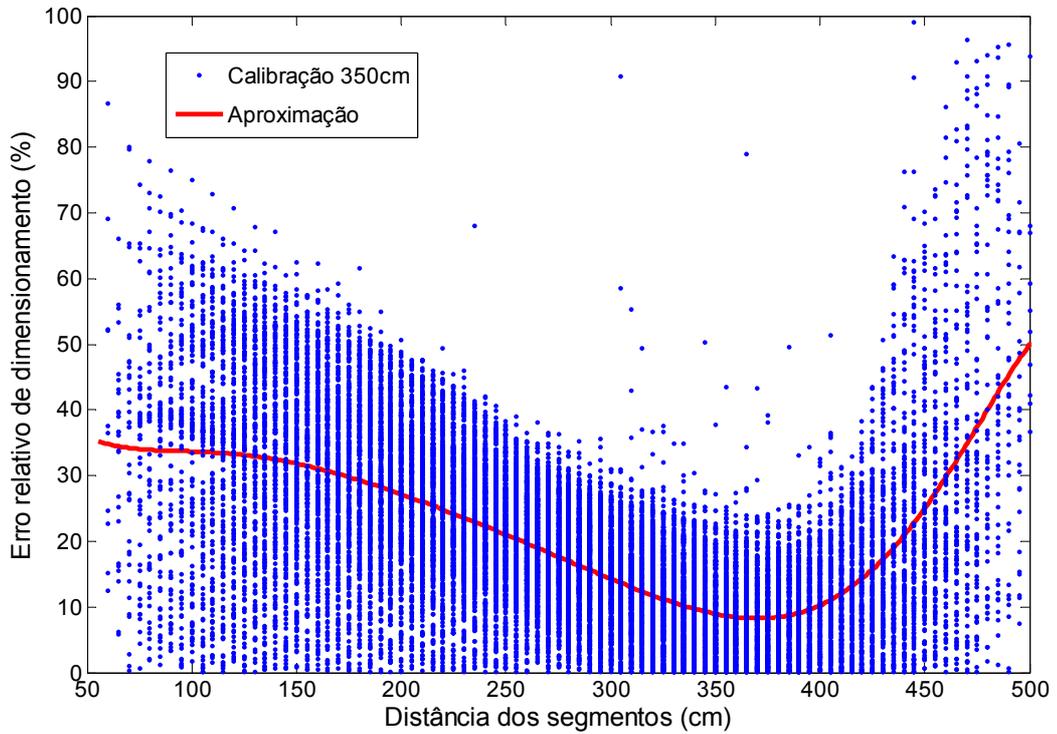


Figura 40 – Último teste – Erro de dimensionamento com calibração 350cm

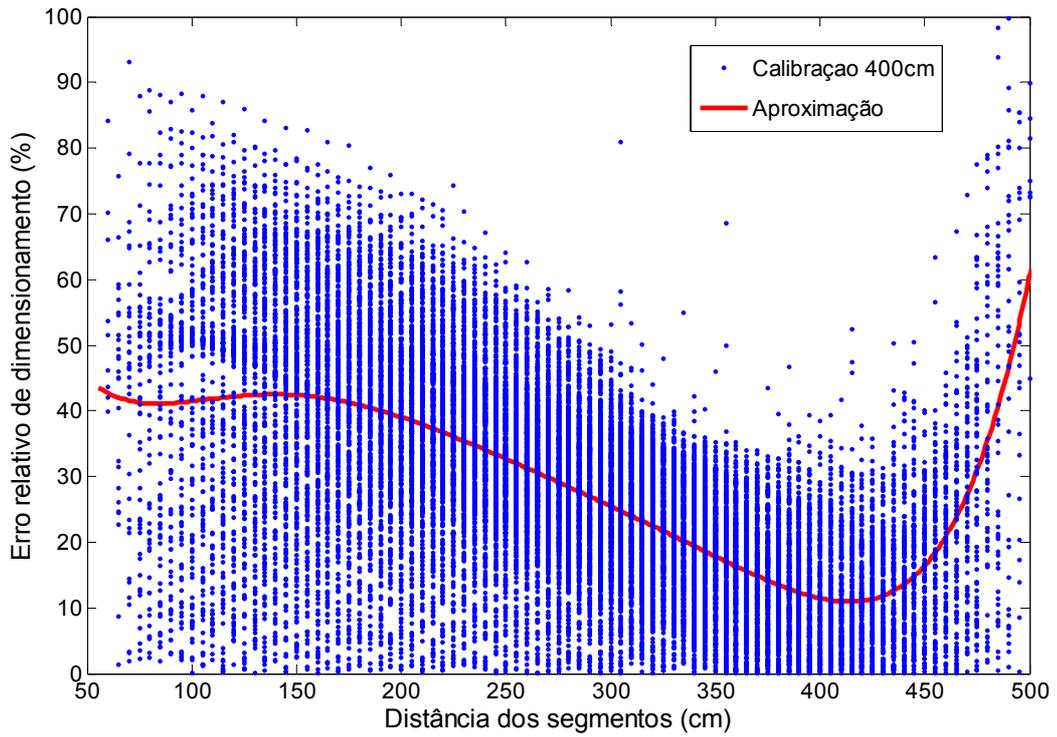


Figura 41 – Último teste – Erro de dimensionamento com calibração 400cm

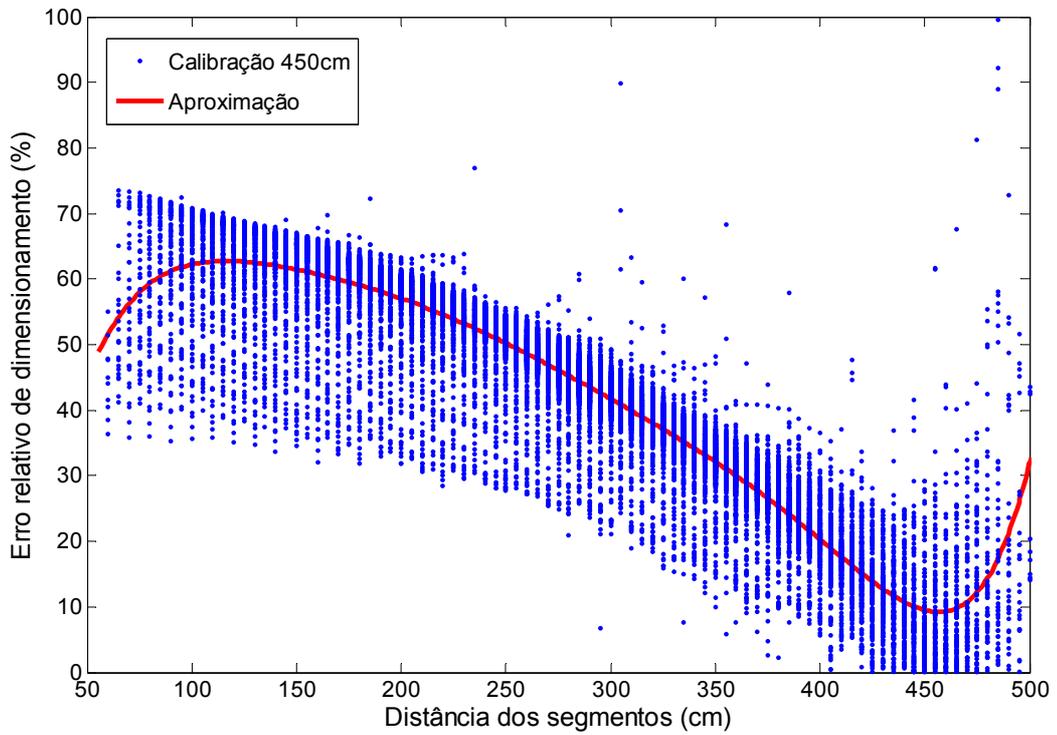


Figura 42 – Último teste – Erro de dimensionamento com calibração 450cm

A última calibração que foi utilizada foi posicionada em 500 centímetros (Figura 43). Houve grande imprecisão na tomada de coordenadas dos pontos devido à compressão JPEG realizada pelas câmeras. Podem ser observados pontos em dispersão em todas as posições desde 60 centímetros até 500 centímetros. Mesmo sabendo que o dimensionamento de pontos distantes às câmeras é mais difícil e apresenta maiores erros, neste caso, isso não pode ser creditado já que utilizando a calibração de 450 centímetros (Figura 42), os erros percentuais relativos foram sensivelmente menores que no caso da calibração em 500 centímetros.

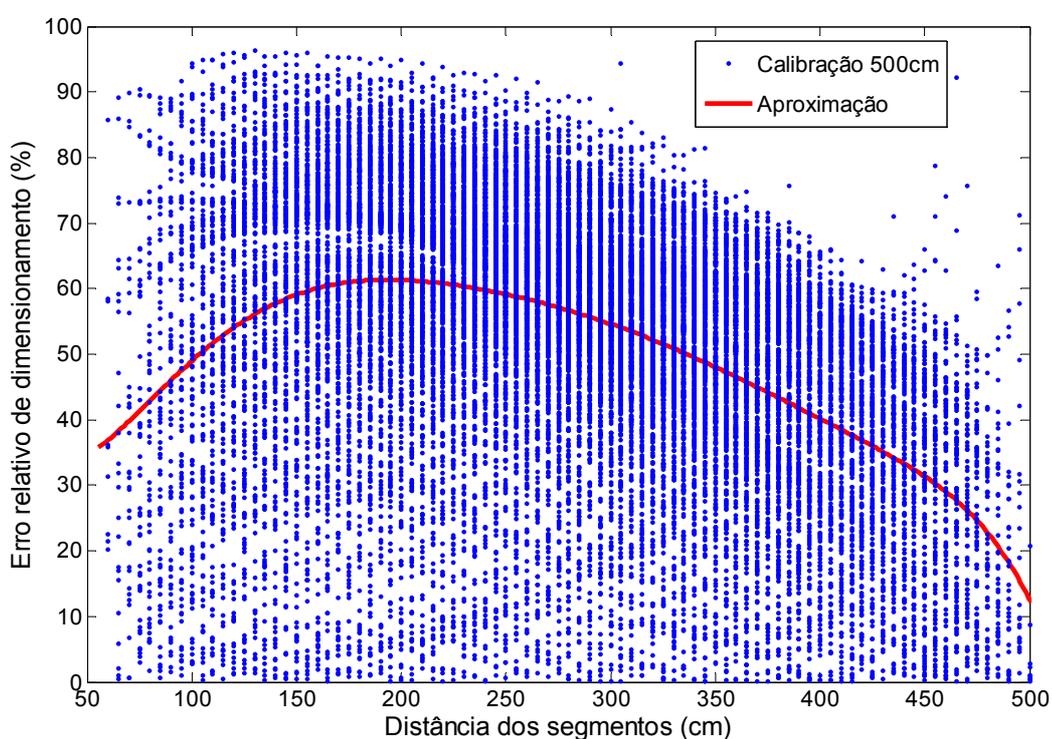
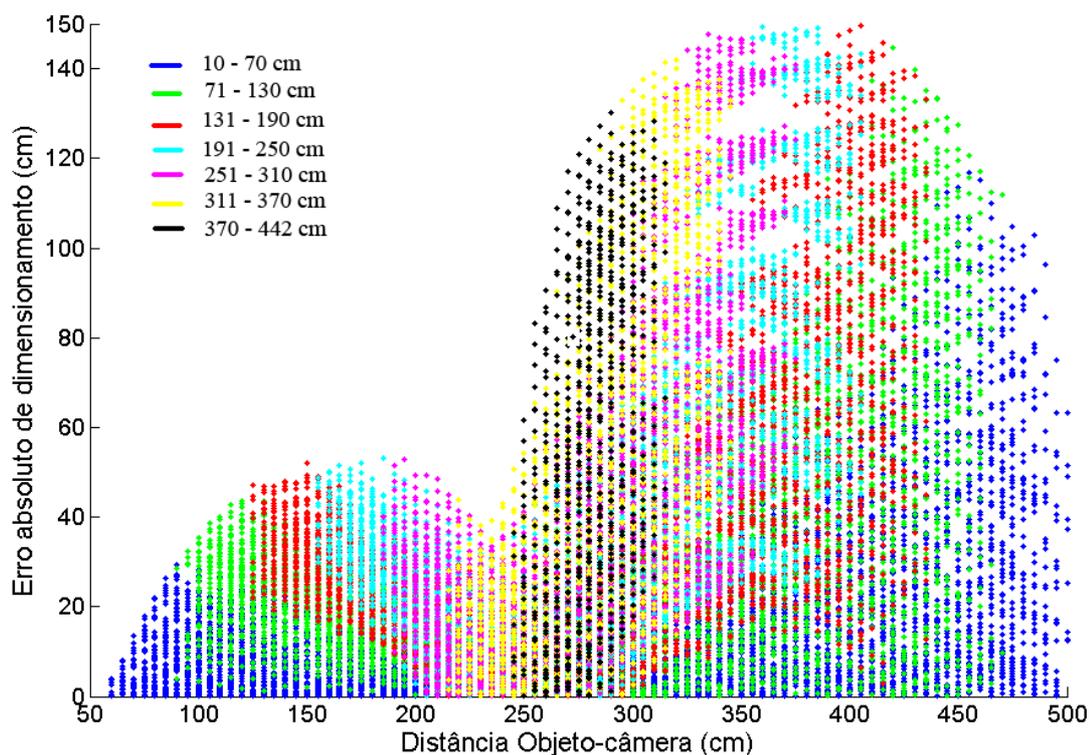


Figura 43 – Último teste – Erro de dimensionamento com calibração 500cm

Como houve grande dispersão de pontos nos gráficos usando erro de dimensionamento relativo, na Figura 44 é mostrado um gráfico do erro absoluto em função da distância dos segmentos em relação à câmera para a distância de calibração de 250 centímetros. O dimensionamento foi dividido pelo tamanho dos segmentos, em sete faixas: 10 – 70 centímetros, 71 – 130 centímetros, 131 – 190 centímetros, 191 – 250 centímetros, 251 – 310 centímetros, 311 – 370 centímetros e 371 – 445 centímetros.



*Figura 44 – Erro absoluto para faixas de tamanhos de segmentos com calibração em 250cm*

A seguir são apresentados gráficos separando os segmentos em paralelos, ortogonais e oblíquos em relação à linha de em que foram posicionadas as câmeras. São mostrados exemplos para as calibrações de 200 e 300 centímetros (Figuras 45 e 46). Nestas figuras, foram dimensionados segmentos de tamanho entre 10 e 30 centímetros. O resultado foi semelhante em todas as calibrações e mostraram que os segmentos ortogonais são os que apresentam maior erro. Isto acontece porque é necessária uma noção de profundidade para seu perfeito dimensionamento. Os segmentos paralelos apresentaram os menores erros e os oblíquos se “espalharam”, tendo sua média entre os ortogonais e paralelos. O comportamento das curvas se mostrou diferente da curva única com todos os pontos, porém deve ser ressaltado que as curvas obtidas são apenas aproximações.

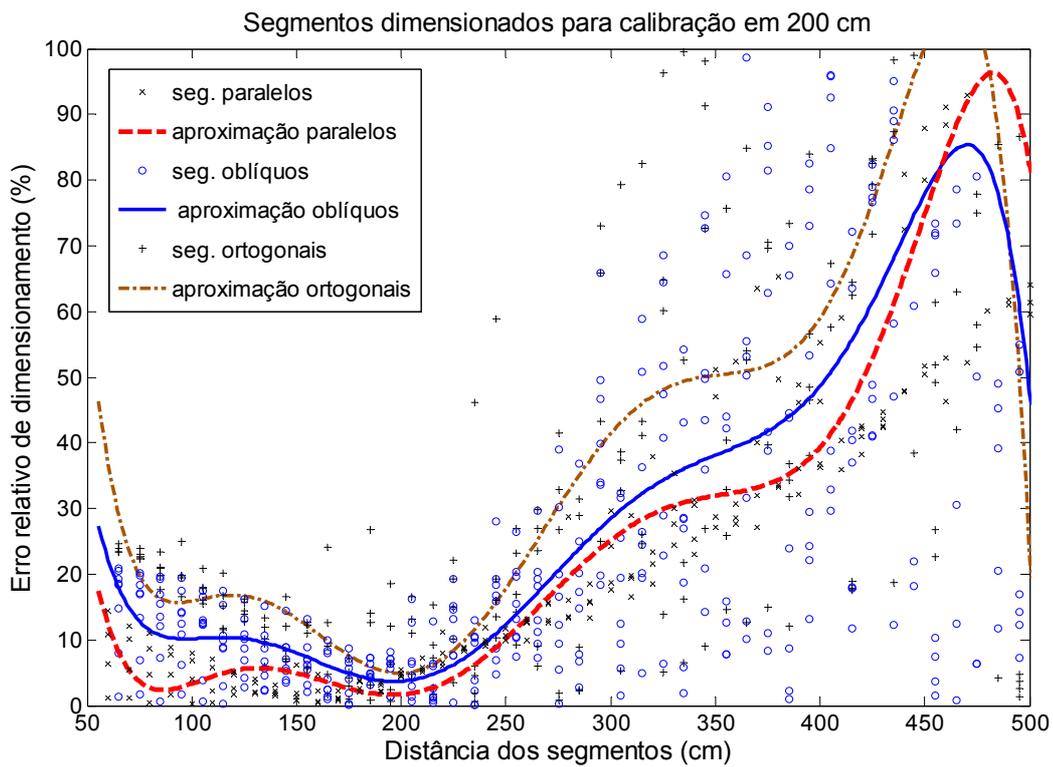


Figura 45 – Gráfico para calibração de 200 cm separando os segmentos

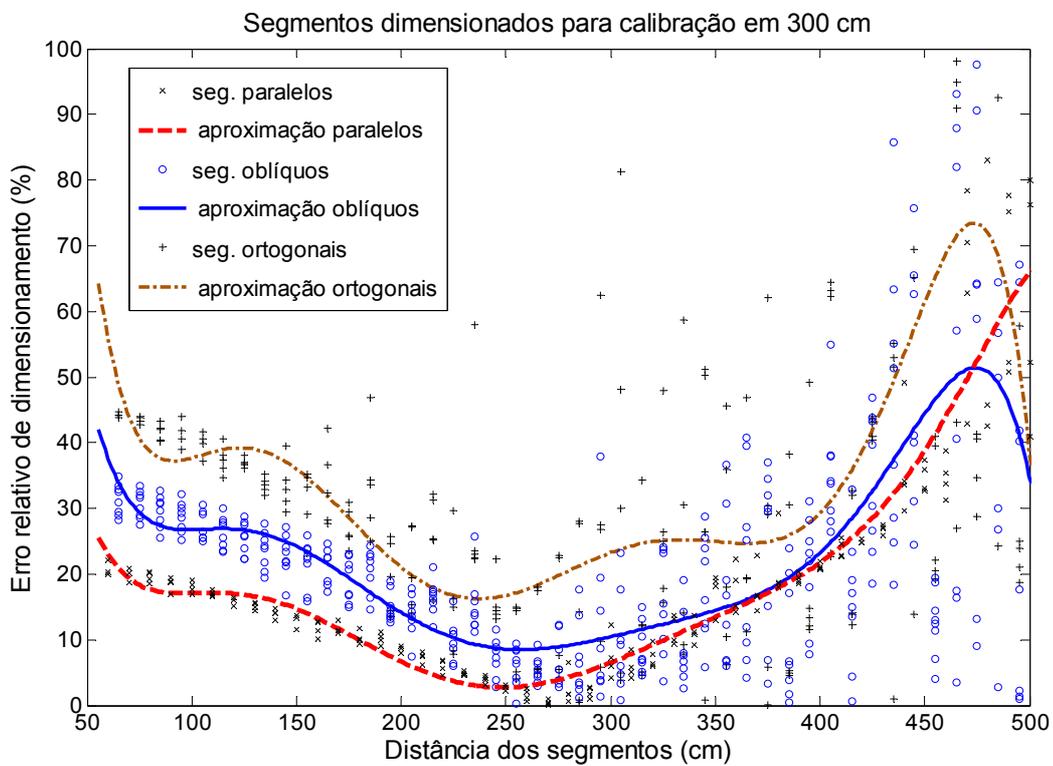


Figura 46 – Gráfico para calibração de 300 cm separando os segmentos

Devido à dispersão do erro de dimensionamento relativo nas Figuras 45 e 46, com os segmentos separados por tipo, foi também analisado o erro absoluto para calibrações em 200 e 300 centímetros (Figuras 47 e 48, respectivamente) para todos os tamanhos de segmento e apenas para os segmentos paralelos, com o objetivo de observar mais claramente a tendência que existe.

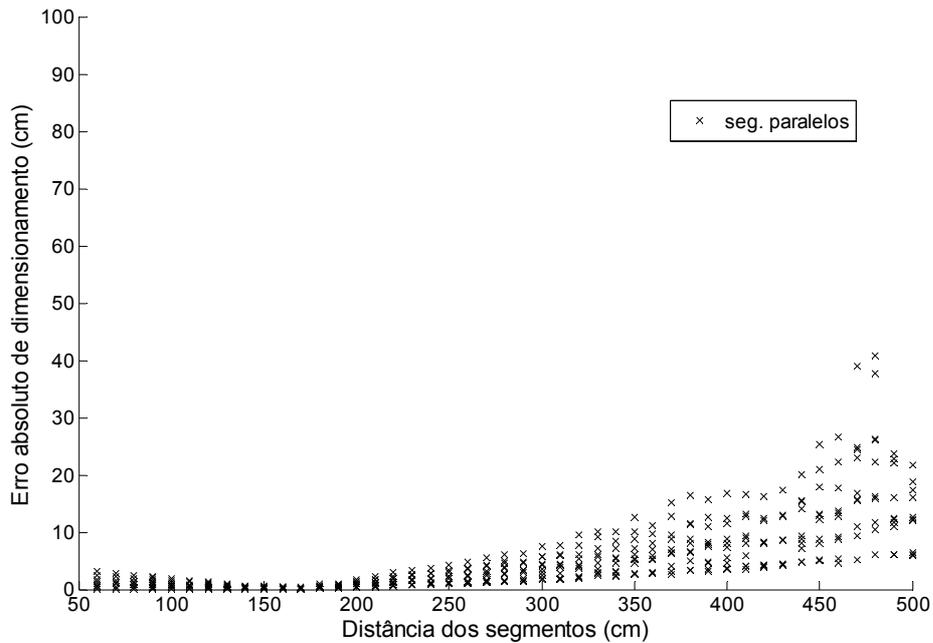


Figura 47 – Erro absoluto para segmentos paralelos com calibração em 200 cm

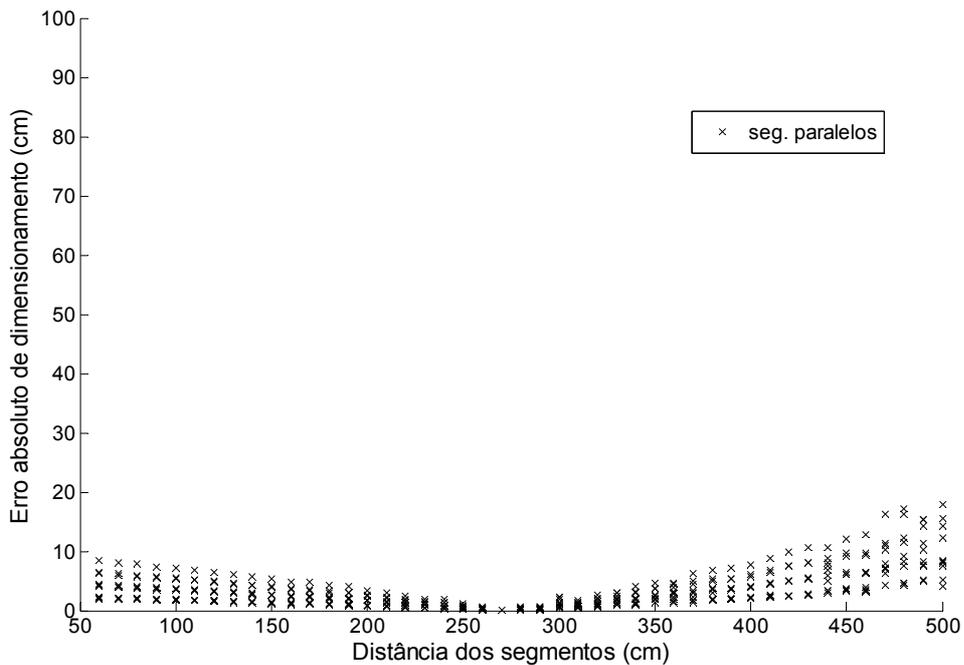


Figura 48 – Erro absoluto para segmentos paralelos com calibração em 300 cm

### 4.3. Resultados variando o índice de calibração para uma posição de calibração

É importante, também analisar a variação do dimensionamento usando, para uma mesma posição de calibração, diferentes calibrações, isto é com parâmetros e índices de calibração diferentes. Como exemplo, foi utilizada a distância de calibração de 350 centímetros, porém com índices de calibração distintos: 1,56%, 1,99% e 2,44%.

O resultado obtido, na Figura 49, mostra que o índice de calibração influencia no dimensionamento dos segmentos e, por conseguinte em seus erros. Porém não se pode afirmar que uma calibração com índice menor sempre será melhor que outra com índice um pouco maior, como é o caso mostrado abaixo, apesar das três calibrações terem mostrado resultados bastante semelhantes, a calibração com índice 2,44% obteve melhor desempenho de erro que a de índice 1,99%. Como visto, a calibração não pode ser utilizada apenas levando-se em conta o índice, mas também os parâmetros extrínsecos, como rotações e translações dos eixos da câmera, ou a criação de um parâmetro de qualidade de dimensionamento.

Contudo, os resultados não foram tão diferentes, mostrando que pequenas variações de índice de calibração não levam a resultados muito distintos.

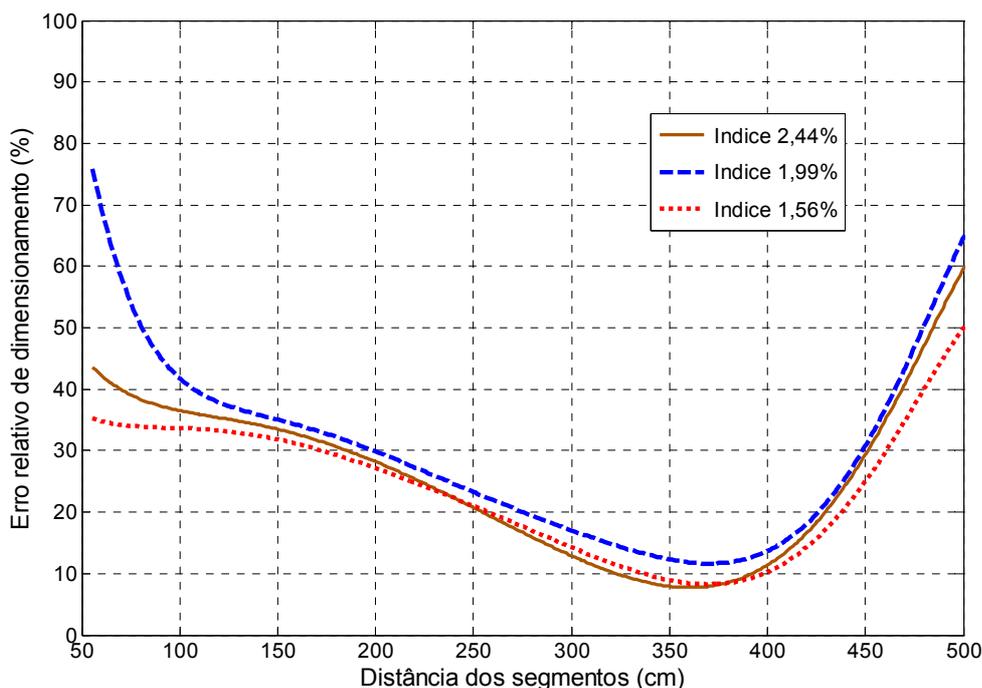


Figura 49 – Variando os índices de calibração para a calibração em 350 cm

# Capítulo 5

## Conclusões

Antes das considerações finais e observações sobre o que os resultados nos propiciam, é importante ressaltar que a utilização de câmeras com método de compressão JPEG pode dificultar consideravelmente (dependendo do ângulo das câmeras) a observação de objetos localizados a uma distância grande. Essa distância limite será uma variável tanto da qualidade do dispositivo quanto de sua resolução. No caso, utilizando uma câmera de 10 Megapixels, a partir de cinco metros já ocorreram efeitos de blocos e perda de informação por conta da compressão automática efetuada pelas câmeras. Um método que pode ser adotado para melhorar esse fator é a utilização da técnica de super-resolução (SR).

As técnicas de SR procuram remover possíveis distorções geradas no processo de aquisição, realçando, por exemplo, as bordas e os detalhes dos objetos para produzir imagens de alta-resolução (HR - high-resolution), considerando as limitações de um determinado sistema de aquisição. As técnicas SR obtêm esta melhoria utilizando modelos que descrevem o comportamento espacial das imagens da seqüência e considerando a informação existente em um conjunto de imagens capturadas da mesma cena.

A maioria das técnicas de SR utiliza um conjunto de imagens capturadas para recuperar os detalhes das imagens HR. O objetivo pode ser a produção de uma única imagem HR ou de várias imagens HR. Assume-se que as imagens capturadas, denominadas de

imagens de baixa resolução (LR - Low-resolution), têm grande similaridade entre si. Porém, uma pequena diferença de informação existente em cada imagem capturada proporciona uma nova informação para a recuperação dos detalhes nas imagens HR. A fonte mais comum desta diferença de informação é o movimento de “subpixel”, descrito em detalhes em Chaudhuri (2001) e Park (2003), o qual ocorre quando o movimento existente entre as imagens é fracionário com respeito à grade de baixa resolução.

Em relação aos resultados deste projeto, nota-se, a partir dos gráficos e informações obtidas no primeiro teste, que foi possível ter uma noção básica do comportamento dos erros de dimensionamento em função das posições de calibração. Uma tendência detectada, porém não muito definida, foi que o erro de dimensionamento é menor para os segmentos localizados próximos à distância de calibração. Além disso, há a hipótese de que a área ótima de calibração seja à frente da origem da grade, o que deslocaria o erro mínimo para uma posição anterior à distância de calibração.

No último teste, com muito mais segmentos, tamanhos e variações de calibrações, pôde-se observar, através de uma aproximação polinomial, que a hipótese adotada inicialmente estava correta. Quando dimensionamos um segmento com uma calibração em uma distância mais próxima possível da distância real do segmento, o erro é mínimo. Considero ser, este teste, de grande confiabilidade, já que com a quantidade de segmentos simulados (em torno de vinte e cinco mil), mesmo errando em alguns mapeamentos de pixels, o resultado final não é afetado. Também foi observado que conforme aumentamos a distância de um segmento que desejamos dimensionar, os erros tendem a serem maiores mesmo utilizando distâncias de calibração próximas às dos segmentos. Um estudo pertinente a ser realizado sobre esse assunto é sobre a hipótese de que se aumentamos a distância entre as duas câmeras, o dimensionamento para grandes distâncias possui um erro menor.

Com os testes realizados, concluiu-se que as rotinas de calibração das câmeras e dimensionamento de objetos são bastante robustas a erros nas coordenadas dos pixels, porém no caso da calibração, o índice de calibração calculado não pode ser a única métrica para comparação se uma calibração foi bem executada ou não. Isto foi observado quando obtivemos índices da ordem de 5% e no dimensionamento, o erro percentual relativo se deu em até 100% do valor do tamanho do segmento.

Através dos resultados do presente trabalho podemos alterar o atual método utilizado no processo de estereofotogrametria. Ao invés de capturarmos novas imagens com o grid a cada novo dimensionamento que desejamos realizar, podemos armazenar inúmeras calibrações para cada distância, em uma espécie de “banco de calibrações”, e apenas capturarmos as fotos do objeto a ser dimensionado, sem a necessidade de novas calibrações. Com isso, o processo de estereofotogrametria se torna bem mais simples, sendo somente necessário informar as coordenadas do objeto.

Muitas outras constatações podem ser inferidas em diversas pesquisas utilizando os resultados propostos e a base de dados obtida. Um exemplo é de como podemos determinar uma calibração para uma dada distância a partir de outra calibração pré-existente.

Este trabalho também se revelou interessante no sentido de ter obtido uma grande base de dados para futuros testes e pesquisas, visto que a visão estéreo está sendo cada vez mais utilizada em diversos segmentos da engenharia, não só em dimensionamento de objetos, mas também em técnicas de cartografia, reconstrução 3-D e robótica.

## Referências Bibliográficas

- [1] Silva, L. C., “Método Robusto para a Calibração de Câmeras em Estereofotogrametria”, Tese, COPPE-UFRJ, 2003.
- [2] Gonzalez, R. C., “Processamento de Imagens Digitais”, Ed. Edgar Blucher, 2000
- [3] Matsumoto, E. Y., “Matlab 7 – Fundamentos”, 2ª Edição. Ed. Erica, 2000
- [4] <http://www.usa.canon.com/consumer/controller?act=ModelInfoAct&fcategoryid=144&modelid=14321>

# Apêndice A

## Código-fonte do algoritmo de análise dos dados

```
function matriz_erro =  
erro_dimensao(tam_seg,tolerancia,colunas,pontos_L,pontos_R,grid_L,grid_R)  
  
% onde:  
% tam_seg = tamanho real do segmento  
% colunas = numero de colunas da matriz  
% pontos_L e pontos_R = são as matrizes com os pontos UV da imagem  
% grid_L e grid_R = os pontos da grade de calibração  
% tolerancia = faixa para mais ou menos em torno da distancia real. Ex: de  
% 20 a 40 -> 30 +- 10; somente 20 -> 20 += 0  
  
% Carga das imagens  
iloadleft = load(pontos_L);  
iloadright = load(pontos_R);  
aux=1;  
aux2=1;  
  
D = 10; %tamanho das quadrículas  
N=colunas; % no de colunas  
M = size(iloadleft,1)/N; %no de linhas  
k = 1;  
  
UL = iloadleft(:,1);  
VL = iloadleft(:,2);  
UR = iloadright(:,1);  
VR = iloadright(:,2);
```

```

% Calculando os parâmetros de calibracao
gridleft = load(grid_L);
gridright = load(grid_R);
pl = CalMF(gridleft);
pr = CalMF(gridright);

%disp('i1 - j1 - i2 - j2 - real - calib');

for i1=1:M
    for j1=1:N
        for i2=1:M
            for j2=1:N
                k1 = (j1-1)*M + i1;
                k2 = (j2-1)*M + i2;
                if (k1 > k2)
                    horizontal(k) = 1-and(i1 - i2,1);
                    vertical(k) = 1-and(j1 - j2,1);
                    dgrid(k) = (i2+i1-2)/2*D + 60;
                    ind_i1(k) = i1;
                    ind_j1(k) = j1;
                    ind_i2(k) = i2;
                    ind_j2(k) = j2;
                    dreal(k) = sqrt(((i1-i2)^2)+((j1-j2)^2))*D;
                    %          AUL AVL AUR AVR BUL BVL BUR BVR
                    dcalc(k) = DimMF([UL(k1) VL(k1) UR(k1) VR(k1) UL(k2) VL(k2) UR(k2)
VR(k2)],pl,pr);
                    erro(k) = 100*abs(dcalc(k)-dreal(k))/dreal(k);
                    k = k+1;
                end
            end
        end
    end
end

dcomparacao = [ind_i1', ind_j1', ind_i2', ind_j2', dgrid', dreal', dcalc', horizontal', vertical'];

%disp('i1 - j1 - i2 - j2 - dgrid - dreal - erro060 - erro100 - erro180');
matriz_erro = [dgrid', dreal', erro', horizontal', vertical'];

%[i,j] = find((matriz_erro(:,2) >= tam_seg-1) & (matriz_erro(:,2) < tam_seg+1));
[i,j] = find((matriz_erro(:,2) >= tam_seg-tolerancia-0.001) & (matriz_erro(:,2) <
tam_seg+tolerancia+0.001));
wk_erro = matriz_erro(i,:);

grafico_horizontal = [];
grafico_vertical = [];
grafico_erro = [];

for n = 1:size(wk_erro,1)
    if wk_erro(n,4)

```

```

        grafico_horizontal = [grafico_horizontal ; wk_erro(n, :)];
    else if wk_erro(n,5)
        grafico_vertical = [grafico_vertical ; wk_erro(n, :)];
    else
        grafico_erro = [grafico_erro ; wk_erro(n, :)];
    end
end
end

s = [];
clf
hold on

if(~isempty(grafico_erro))
    plot(grafico_erro(:,1,1)',grafico_erro(:,3,1)'),'o')
    s = 'seg. oblíquos  ';
end

if(~isempty(grafico_horizontal))
    plot (grafico_horizontal(:,1,1)',grafico_horizontal(:,3,1)'),'x');
    axis([ 60 180 0 20]);
    s = [ s ; 'seg. paralelos'];
end

if(~isempty(grafico_vertical))
    hold on
    plot (grafico_vertical(:,1,1)',grafico_vertical(:,3,1)'),'+' );
    axis([ 60 180 0 20]);
    s = [ s ; 'seg. ortogonais  '];
end

hold off
legend (s);

```