

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

ANÁLISE DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR DE
UMA CÂMERA EM FUNÇÃO DA RESOLUÇÃO DE SUAS IMAGENS

Autor:

Kleber Mattos Borges

Orientador:

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

Examinadora:

Prof^a. Mariane Rembold Petraglia, Ph.D.

Examinador:

Prof. Flávio Luis de Mello, D.Sc

Examinador:

Prof. Júlio Cesar Boscher Torres, D.Sc.

DEL
AGOSTO DE 2007

Dedicatória

Aos meus pais, a eles devo tudo.

Agradecimentos

Ao meu professor e orientador, José Gabriel R. C. Gomes, que seguiu firme com a orientação deste trabalho e, com isso, me ajudou a dar um grande passo em minha vida.

Aos meus amigos da UFRJ que fizeram parte do meu aprendizado da Engenharia ao longo dos 5 anos de estudo.

Ao meu amigo Markus que compartilhou muitas horas de seu tempo comigo estudando diversas disciplinas.

Ao meu amigo Leonardo Inafuku que se tornou um grande amigo ao longo dos anos e me deu forças para terminar este trabalho.

Aos meus amigos Gilberto e Vinícius que sempre estiveram por perto nos bons e maus momentos da vida há muitos anos.

Aos meus familiares e amigos mais afastados que, mesmo à distância, me deram forças para continuar.

À minha família Beth, Patrick, Kareen e Sarah, pelos ensinamentos de vida recebidos até hoje.

Ao meu pai, Paulo que, sem dúvida alguma, é o cara mais brilhante que já conheci.

Resumo

Em hipótese, a resolução de uma câmera influencia no cálculo dos seus parâmetros de orientação exterior. Neste projeto, são feitos testes para avaliar a validade desta hipótese.

Este projeto está dividido em três testes diferentes: 1- análise da variação dos parâmetros de orientação exterior da câmera em função da variação da resolução das imagens, utilizando um algoritmo de calibração da câmera; 2- comprovação dos resultados encontrados no Teste 1 e aprimoramento do método utilizado; 3- estudo preliminar dos resultados de um algoritmo de dimensionamento em função da variação da resolução das imagens.

Na análise do algoritmo de calibração são utilizadas imagens de um *grid* situado a distâncias diferentes a partir das imagens da câmera. Geramos dados para uma análise dos erros encontrados em estimativas de posição calculadas pela rotina de calibração da câmera. Foram avaliadas as estimativas do algoritmo de calibração para a posição da câmera em relação a translações dos eixos ordenados do *grid*. Os Testes 1 e 2 foram feitos com a câmera em posições diferentes (sempre a mesma posição, dentro de cada teste) e verificando se as estimativas do algoritmo de calibração para as coordenadas da câmera em relação ao *grid* estavam coerentes com os valores medidos diretamente. São também geradas variações nos ângulos dos eixos ordenados da câmera para analisar os parâmetros de orientação referentes às estimativas de rotações em torno dos eixos do *grid*.

Na análise do algoritmo de dimensionamento foi utilizado um par de imagens estéreo para estimar a precisão da rotina. Foram feitas duas medições dispostas em ângulos e réguas diferentes nas imagens.

Palavras-chave

Estereofotogrametria

Calibração

Processamento de Sinais

Visão Computacional

Geometria Projetiva

Índice

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	3
1.2	Organização	4
2	Fundamentos Teóricos	5
2.1	Estereofotogrametria	5
2.2	Calibração.....	8
2.2.1	Algoritmo de Transformação Linear	11
2.3	Dimensionamento	12
3	Método	14
3.1	Primeiro Teste – Coordenadas X, Y, Z e Ângulo ϕ	16
3.1.1	Escolha das Posições de Teste para a Câmera e para o <i>Grid</i>	17
3.1.1.1	Câmera Alinhada com o <i>Grid</i>	17
3.1.1.2	Câmera Girada de + 20° sobre o Eixo $Y_{CÂMERA}$	18
3.1.1.3	Câmera Girada de - 20° sobre o Eixo $Y_{CÂMERA}$	18
3.1.2	Procedimentos no Computador	18
3.2	Segundo Teste – Coordenadas X, Y, Z e Ângulos ω , ϕ , κ	19
3.2.1	Escolha das Posições de Teste para a Câmera e para o <i>Grid</i>	20
3.2.1.1	Câmera Alinhada com o <i>Grid</i>	21
3.2.1.2	Câmera Girada de +10° sobre o Eixo $X_{CÂMERA}$	21
3.2.1.3	Câmera Girada de -10° sobre o Eixo $Y_{CÂMERA}$	21
3.2.1.4	Câmera Girada de +10° sobre o Eixo $Z_{CÂMERA}$	22

3.2.2	Procedimentos no Computador	22
3.3	Terceiro Teste – Dimensionamento.....	22
3.3.1	Escolha das Posições de Teste para a Câmera e para o <i>Grid</i>	23
3.3.2	Procedimentos no Computador	24
3.4	Método dos Mínimos Quadrados	25
4	Resultados	27
4.1	Teste 1 – Precisão da Calibração em Relação aos Eixos X, Y, Z e Ângulo ϕ	28
4.1.1	Parâmetros da Realização do Teste 1	31
4.1.2	Estimativa da Posição da Câmera em Relação ao Eixo X do <i>Grid</i>	32
4.1.3	Estimativa da Posição da Câmera em Relação ao Eixo Y do <i>Grid</i>	33
4.1.4	Estimativa da Posição da Câmera em Relação ao Eixo Z do <i>Grid</i>	34
4.1.5	Estimativa da Posição da Câmera em Relação aos Eixos X, Y, Z do <i>Grid</i>	40
4.1.6	Estimativa do Ângulo ϕ	41
4.1.6.1	Câmera Girada de - 20° sobre o Eixo $Y_{CÂMERA}$	42
4.1.6.2	Câmera Girada de + 20° sobre o Eixo $Y_{CÂMERA}$	44
4.1.6.3	Estimativa do Ângulo ϕ em Relação aos dois Ângulos gerados	45
4.1.7	Estimativa da Posição da Câmera em Relação aos Eixos X, Y, Z do <i>Grid</i> com Erros Relativos à Imagem de Maior Resolução	46
4.1.7.1	Estimativa da Posição da Câmera em Relação ao Eixo X do <i>Grid</i>	46
4.1.7.2	Estimativa da Posição da Câmera em Relação ao Eixo Y do <i>Grid</i>	48
4.1.7.3	Estimativa da Posição da Câmera em Relação ao Eixo Z do <i>Grid</i>	49
4.1.7.4	Estimativa da Posição da Câmera em Relação aos Eixos X, Y, Z do <i>Grid</i> ..	51
4.1.8	Estimativa do Ângulo ϕ com Erros Relativos à Imagem de Maior Resolução	52
4.1.8.1	Câmera Girada de - 20° sobre o Eixo $Y_{CÂMERA}$	52
4.1.8.2	Câmera Girada de + 20° sobre o Eixo $Y_{CÂMERA}$	53

4.1.8.3	Estimativa do Ângulo ϕ em Relação aos dois Ângulos Gerados	54
4.1.9	Comparação das Estimativas em Relação às Medidas Reais e às Medidas da Imagem de 10,08 megapixels	54
4.2	Teste 2 - Precisão da Calibração em Relação aos Eixos X, Y, Z e Ângulos ω , ϕ , κ	56
4.2.1	Parâmetros do Teste 2	56
4.2.2	Estimativa da Posição da Câmera em Relação ao Eixo X do <i>Grid</i>	57
4.2.3	Estimativa da Posição da Câmera em Relação ao Eixo Y do <i>Grid</i>	58
4.2.4	Estimativa da Posição da Câmera em Relação ao Eixo Z do <i>Grid</i>	60
4.2.5	Estimativa da Posição da Câmera em Relação aos Eixos X, Y, Z do <i>Grid</i>	61
4.2.6	Estimativa do Ângulo ω	62
4.2.6.1	Câmera Girada de -10° sobre o Eixo $X_{CÂMERA}$	62
4.2.7	Estimativa do Ângulo ϕ	64
4.2.7.1	Câmera Girada de $+10^\circ$ sobre o Eixo $Y_{CÂMERA}$	64
4.2.8	Estimativa do Ângulo κ	66
4.2.8.1	Câmera Girada de $+10^\circ$ sobre o Eixo $Z_{CÂMERA}$	66
4.2.9	Estimativa dos Ângulos ω , ϕ , κ do Posicionamento da Câmera em Relação aos Eixos X, Y, Z do <i>Grid</i>	68
4.2.10	Erro da Posição da Câmera em Relação à Posição obtida com a Imagem de Maior Resolução	68
4.3	Teste 3 – Dimensionamento	70
4.3.1	Parâmetros do Teste 3	71
4.3.2	Estimativa do Erro do Algoritmo de Dimensionamento em Função da Resolução das Imagens	71
5	Conclusões	74
A	Rotinas de Calibração	78

B	Rotina de Dimensionamento	80
C	Rotina de Procura de Coordenadas de <i>Pixels</i>	81
D	Fotos Tomadas do <i>Grid</i> para o Teste 1	82
E	Fotos Tomadas do <i>Grid</i> para o Teste 2	85
F	Fotos Tomadas do <i>Grid</i> para o Teste 3	91
G	Parâmetros de Calibração para o Teste 1	93
H	Parâmetros de Calibração para o Teste 2	95
I	Parâmetros de Calibração para o Teste 3	99
	Referências Bibliográficas.....	101

Lista de Figuras

Figura 2.1 Câmera alinhada com o <i>grid</i>	6
Figura 2.2 Câmera girada de +10° em $Z_{CÂMERA}$	10
Figura 2.3 Foto para dimensionamento	13
Figura 3.1 Eixos e ângulos do <i>grid</i> e da câmera.....	15
Figura 3.2 Montagem para o Teste 1	16
Figura 3.3 Montagem para o Teste 2.....	20
Figura 3.4 Montagem para o Teste 3	23
Figura 4.1 Erros relativos no parâmetro de calibração X: (a) percentuais e (b) em dB	30
Figura 4.2 Erros relativos no parâmetro de calibração X: (a) percentuais e (b) em dB	32
Figura 4.3 Erros relativos no parâmetro de calibração Y: (a) percentuais e (b) em dB	34
Figura 4.4 Erros relativos no parâmetro de calibração Z, assumindo $Z_0 = 3,75$ cm: (a) percentuais e (b) em dB	36
Figura 4.5 Erros relativos no parâmetro de calibração Z, assumindo $Z_0 = 2,1$ cm: (a) percentuais e (b) em dB	37
Figura 4.6 Erros relativos no parâmetro de calibração Z, assumindo $Z_0 = 0,55$ cm: (a) percentuais e (b) em dB	38
Figura 4.7 Erros médios nos eixos X, Y, Z, assumindo $Z_0 = 2,1$ cm : (a) percentuais	40
Figura 4.8 Erro relativo entre ângulo ϕ estimado e ângulo ϕ medido com transferidor.....	43
Figura 4.9 Erro relativo entre ângulo ϕ estimado e medido com transferidor.....	45
Figura 4.10 Erros relativos no parâmetro de calibração X, usando como referência o valor de X_0 estimado a partir da foto de 10,08 megapixels : (a) percentuais e (b) em dB	47
Figura 4.11 Erros relativos no parâmetro de calibração Y, usando como referência o valor de Y_0 estimado a partir da foto de 10,08 megapixels : (a) percentuais e (b) em dB	48

Figura 4.12 Erros relativos no parâmetro de calibração Z, usando como referência o valor de Z_0 estimado a partir da foto de 10,08 megapixels : (a) percentuais e (b) em dB.....	50
Figura 4.13 Erros médios nos eixos X, Y, Z : (a) percentuais e (b) em dB	51
Figura 4.14 Comparação de Erros	55
Figura 4.15 Erros médios relativos no parâmetro de calibração X: (a) percentuais e.....	58
Figura 4.16 Erros médios relativos no parâmetro de calibração Y: (a) percentuais e.....	59
Figura 4.17 Erros médios relativos no parâmetro de calibração Z: (a) percentuais	60
Figura 4.18 Erros médios nos eixos X, Y, Z : (a) percentuais e (b) em dB	61
Figura 4.19 Erro relativo entre ângulo ω estimado e ângulo medido com transferidor	63
Figura 4.20 Erro relativo entre ângulo ϕ estimado e ângulo medido com transferidor	65
Figura 4.21 Erro relativo entre ângulo κ estimado e ângulo medido com transferidor	67
Figura 4.22 (a) objeto com 2 cm de comprimento, (b) objeto com 5 cm de comprimento.....	72
Figura D.1 Foto tirada do <i>grid</i> com a câmera alinhada com o <i>grid</i>	82
Figura D.2 Foto tirada do <i>grid</i> com a câmera girada de -20° em $Y_{CÂMERA}$	83
Figura D.3 Foto tirada do <i>grid</i> com a câmera girada de $+20^\circ$ em $Y_{CÂMERA}$	84
Figura E.1 Foto tirada do <i>grid</i> com a câmera alinhada com o <i>grid</i>	85
Figura E.2 Foto tirada do <i>grid</i> com a câmera girada de -10° em $X_{CÂMERA}$	86
Figura E.3 Foto tirada do <i>grid</i> com a câmera alinhada com o <i>grid</i>	87
Figura E.4 Foto tirada do <i>grid</i> com a câmera girada de $+10^\circ$ em $Y_{CÂMERA}$	88
Figura E.5 Foto tirada do <i>grid</i> com a câmera alinhada com o <i>grid</i>	89
Figura E.6 Foto tirada do <i>grid</i> com a câmera girada de $+10^\circ$ em $Z_{CÂMERA}$	90
Figura F.1 Foto tirada do <i>grid</i> com a câmera à direita.	91
Figura F.2 Foto tirada do <i>grid</i> com a câmera à esquerda.	92

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Parâmetros extrínsecos e intrínsecos para imagem da Figura 2.1 (a resolução é 10,08 megapixels).....	8
Tabela 2.2 Parâmetros extrínsecos e intrínsecos estimados para calibração da imagem com o <i>grid</i> girado de + 10° em $Z_{CÂMERA}$ (10,08 megapixels)	10
Tabela 2.3 Parâmetros extrínsecos e intrínsecos estimados para calibração da imagem com o <i>grid</i> alinhado em 0° com a câmera. No eixo $Z_{CÂMERA}$ (10,08 megapixels).....	11
Tabela 4.1 Fotos e resoluções.....	28
Tabela 4.2 Vetor de estimativas	29
Tabela 4.3 Vetor de erros em X, Y, Z	29
Tabela 4.4 Parâmetros do Teste 1	31
Tabela 4.5 Ajuste linear nas estimativas do parâmetro X_0	33
Tabela 4.6 Ajuste linear nas estimativas do parâmetro Y_0	34
Tabela 4.7 Ajuste linear nas estimativas do parâmetro Z_0	36
Tabela 4.8 Ajuste linear nas estimativas do parâmetro Z_0	37
Tabela 4.9 Ajuste linear nas estimativas do parâmetro Z_0	39
Tabela 4.10 Ajuste linear para erro médio nas estimativas dos parâmetros X_0 , Y_0 e Z_0	40
Tabela 4.11 Valores dos ângulos estimados para rotação em $\phi_0 = -20^\circ$ ao redor do eixo $Y_{CÂMERA}$	42
Tabela 4.12 Ajuste linear para erro na estimativa do parâmetro ϕ_0	43
Tabela 4.13 Valores dos ângulos estimados para rotação em $\phi_0 = +20^\circ$ ao redor do eixo $Y_{CÂMERA}$	44
Tabela 4.14 Ajuste linear para erro na estimativa do parâmetro ϕ_0	45
Tabela 4.15 Ajuste linear para erro médio na estimativa do parâmetro ϕ_0	46

Tabela 4.16 Estimativa de X_0 usando foto de 10,08 megapixels e ajuste linear dos erros em relação a esta estimativa	48
Tabela 4.17 Estimativa de Y_0 usando foto de 10,08 megapixels e ajuste linear dos erros em relação a esta estimativa	49
Tabela 4.18 Estimativa de Z_0 usando foto de 10,08 megapixels e ajuste linear dos erros em relação a esta estimativa	50
Tabela 4.19 Parâmetros médios das estimativas em relação aos eixos XYZ	52
Tabela 4.20 Estimativa de ϕ_0 usando foto de 10,08 megapixels e ajuste linear dos erros em relação a esta estimativa	53
Tabela 4.21 Estimativa de ϕ_0 usando foto de 10,08 megapixels e ajuste linear dos erros em relação a esta estimativa	53
Tabela 4.22 Estimativa de ϕ_0 médio usando foto de 10,08 megapixels e ajuste linear dos erros em relação a esta estimativa	54
Tabela 4.23 Comparação de erros e coeficientes lineares	55
Tabela 4.24 Parâmetros do Teste 2	57
Tabela 4.25 Ajuste linear nas estimativas do parâmetro X_0	58
Tabela 4.26 Ajuste linear nas estimativas do parâmetro Y_0	59
Tabela 4.27 Ajuste linear nas estimativas do parâmetro Z_0	61
Tabela 4.28 Ajuste linear para erro médio nas estimativas dos parâmetros X_0, Y_0, Z_0	62
Tabela 4.29 Ajuste linear para erro na estimativa do parâmetro ω_0	63
Tabela 4.30 Ajuste linear para erro na estimativa do parâmetro ϕ_0	65
Tabela 4.31 Ajuste linear para erro na estimativa do parâmetro κ_0	67
Tabela 4.32 Ajuste linear para erro médio nas estimativas dos parâmetros: ω_0, ϕ_0 e κ_0	68

Tabela 4.33 Erros relativos e coeficientes de ajustes lineares obtidos nas Seções 4.2.2 até 4.2.9. Erros relativos às estimativas para imagem de 10,08 megapixels e ajuste linear dos erros em relação a esta estimativa	69
Tabela 4.34 Parâmetros do Teste 3.....	71
Tabela 4.35 Tabela com valores de erros relativos do dimensionamento.....	73
Tabela A.1 Rotina de calibração para os parâmetros de posicionamento da câmera.....	78
Tabela A.2 Rotina de calibração para os parâmetros de rotação da câmera, utilizando:	79
Tabela B.1 Rotina de dimensionamento.....	80
Tabela C.1 Rotina de procura de coordenadas de <i>pixels</i>	81
Tabela G.1 Parâmetros de entrada do algoritmo de calibração de todas as imagens geradas a partir da Foto D.1.	93
Tabela G.2 Parâmetros de entrada do algoritmo de calibração de todas as imagens geradas a partir da Foto D.2.	94
Tabela G.3 Parâmetros de entrada do algoritmo de calibração de todas as imagens geradas a partir da Foto D.3.	94
Tabela H.1 Parâmetros de entrada do algoritmo de calibração de todas as imagens geradas a partir da Foto E.1.....	95
Tabela H.2 Parâmetros de entrada do algoritmo de calibração de todas as imagens geradas a partir da Foto E.2.....	96
Tabela H.3 Parâmetros de entrada do algoritmo de calibração de todas as imagens geradas a partir da Foto E.3.....	96
Tabela H.4 Parâmetros de entrada do algoritmo de calibração de todas as imagens geradas a partir da Foto E.4.....	97
Tabela H.5 Parâmetros de entrada do algoritmo de calibração de todas as imagens geradas a partir da Foto E.5.....	97

Tabela H.6 Parâmetros de entrada do algoritmo de calibração de todas as imagens geradas a partir da Foto E.16.....	98
Tabela I.1 Parâmetros de entrada do algoritmo de calibração de todas as imagens geradas a partir da Foto F.1	99
Tabela I.2 Parâmetros de entrada do algoritmo de calibração de todas as imagens geradas a partir da Foto F.2	100

Glossário, Abreviaturas, Siglas, Símbolos e Sinais

- Bit : Em computação, é a sigla *binary digit*. Assume os valores 0 ou 1 e representa a unidade básica de sinais digitais para comunicação e armazenamento.
- JPEG : Em processamento de imagens, é a sigla *Joint Photographic Experts Group*. Trata-se de um formato de compressão de dados.
- BMP : Em processamento de imagens, é uma abreviatura para a palavra *bitmap*. Significa um mapa de bits para representar uma imagem sem compressão de dados.
- *Grid* : Ferramenta de estudo deste trabalho, constituindo-se de uma grade de calibração com alvos marcados, sendo que os alvos indicam pontos que têm coordenadas espaciais conhecidas com precisão alta.
- Alvo : Marcadores colocados no *grid* que ajudaram na coleta das coordenadas dos pontos de calibração das imagens.
- X : Eixo ordenado do *grid* (para as definições de X até $Z_{\text{CÂMERA}}$ ver Figura 3.1).
- Y : Eixo ordenado do *grid*.
- Z : Eixo ordenado do *grid*.
- ω : Ângulo de rotação do *grid* em torno do eixo X.
- ϕ : Ângulo de rotação do *grid* em torno do eixo Y.
- κ : Ângulo de rotação do *grid* em torno do eixo Z.
- $X_{\text{CÂMERA}}$: Eixo ordenado da câmera correspondente ao eixo X do *grid*.
- $Y_{\text{CÂMERA}}$: Eixo ordenado da câmera correspondente ao eixo Y do *grid*.
- $Z_{\text{CÂMERA}}$: Eixo ordenado da câmera correspondente ao eixo Z do *grid*.

- Eixo Óptico da Câmera : Eixo auxiliar perpendicular ao plano focal da câmera, e que passa pelo centro óptico.
- Parâmetros Internos : Parâmetros gerados pelo algoritmo de calibração, que estão relacionados com a lente e a construção da câmera.
- Parâmetros Externos : Parâmetros gerados pelo algoritmo de calibração, que estão relacionados com o posicionamento da câmera em relação ao *grid*.
- Algoritmo de Calibração : Rotina que gera parâmetros internos e externos para uma câmera, que nos permitem determinar estimativas de sua posição a partir de uma imagem tirada por ela.
- Algoritmo de Dimensionamento : Rotina que gera estimativas de comprimento a partir de técnicas de estereofotogrametria, usando um par de câmeras calibradas.
- CalMF.dll : Biblioteca dinâmica que contém as funções de calibração da câmera.
- DimMF.dll : Biblioteca dinâmica que contém as funções usadas no dimensionamento de um objeto.
- PADS : Laboratório de Processamento Analógico e Digital de Sinais da COPPE / UFRJ.

Capítulo 1

Introdução

A determinação de informações geométricas tridimensionais de uma cena a partir de duas ou mais imagens tem aplicação importante em sensoriamento e dimensionamento remoto. O método utilizado para realizar este procedimento denomina-se *visão estéreo* e pode ser encontrado, dentre muitos exemplos possíveis, no sistema óptico dos seres humanos. Em seres humanos se dá um caso particular da *visão estéreo*, a *visão estéreo binocular*.

No caso da *visão estéreo binocular*, faz-se a utilização de apenas duas imagens para determinação das informações espaciais da cena em análise. Desse modo, a *visão estéreo* possibilita a determinação de informações como profundidade e posição de objetos no espaço, a partir da inspeção de duas ou mais imagens da cena, extraídas de referenciais diferentes com câmeras fotográficas previamente calibradas.

O procedimento de realizar medidas a partir de duas ou mais imagens denomina-se *estereofotogrametria* e a modelagem matemática aplicada na obtenção dessas informações denomina-se *estereofotogrametria analítica*.

A *topometria* é uma divisão da topografia que trata da medição de distâncias e ângulos, auxiliando em levantamentos topográficos. A *topometria* e a *fotogrametria*

caminham juntas auxiliando o mapeamento de terrenos e a especificação de mapas cartográficos, fazendo utilização de imagens geradas por satélites e aviões. A fotogrametria associada ao dimensionamento remoto é útil especialmente para empresas que realizam pesquisas em águas profundas, como a PETROBRAS. A necessidade de inspeção de objetos em profundidades impróprias ao ser humano levou à utilização de equipamentos robóticos, que auxiliam na captação de imagens dentro do espectro visível.

A execução da estereofotogrametria analítica está vinculada à realização prévia da calibração das câmeras fotográficas que geram as imagens. O algoritmo de calibração das câmeras nos fornece 10 parâmetros, sendo 6 de orientação exterior e 4 de orientação interior. Os parâmetros de orientação exterior são aqueles que relacionam o referencial da câmera com o referencial global, por meio de três rotações e três translações sobre o referencial global. Tais parâmetros também podem ser encontrados na literatura com a denominação de parâmetros *extrínsecos*. Já os parâmetros de orientação interior modelam as características da câmera. Eles estão relacionados com a distância focal e com a interseção do eixo óptico com o plano imagem.

A execução da rotina de calibração (Apêndice A) nos possibilita estimar as coordenadas de posição da câmera em relação a um referencial externo. Uma vez calibradas as câmeras, podemos também estimar dimensões de objetos no espaço (Apêndice B) utilizando algoritmos da estereofotogrametria. A resolução das câmeras utilizadas afeta os resultados obtidos para os seis parâmetros de calibração extrínsecos. Sabe-se que outros detalhes do teste, como por exemplo o posicionamento das câmeras em relação ao *grid* de calibração, também afetam os resultados. Neste projeto, estamos interessados na influência da resolução sobre a precisão da calibração.

1.1 Objetivo

O presente estudo é uma análise da variação dos parâmetros extrínsecos da câmera em função da variação da resolução das imagens utilizadas para este fim. É também feita uma breve análise da influência do algoritmo de resolução sobre o algoritmo de dimensionamento. O estudo está baseado na utilização de um algoritmo desenvolvido [1] no PADS para atividades de inspeção tridimensional de imagens. O foco da utilização do algoritmo neste projeto será para a calibração de câmeras em estereofotogrametria.

O algoritmo de calibração não faz uma análise prévia da resolução das imagens obtidas, focando apenas na obtenção dos dez parâmetros de calibração, a serem fornecidos para o usuário. A precisão dos parâmetros de calibração está associada, em hipótese, à resolução das câmeras. E quanto maior a resolução, maior será o custo das câmeras. É interessante realizarmos um estudo do comportamento dos parâmetros de calibração quando variamos a resolução das imagens, para verificarmos a hipótese proposta.

A coleta das imagens será feita com a utilização de uma câmera digital (Canon EOS Digital Rebel XTi 10.1 megapixels) pertencente ao PADS e destinada a este estudo. Será utilizado um *grid*, que servirá como uma referência para calibração. A elaboração do procedimento de análise foi dada mediante a observação e a manipulação cuidadosa das imagens. Foram criadas diversas imagens, com diferentes resoluções. A análise pode ser realizada por diversos usuários, com resultados semelhantes. Um aspecto crucial do procedimento de análise é a sua *reprodutibilidade*.

Serão apresentados gráficos referentes à variação do erro no posicionamento das câmeras em função da resolução das imagens utilizadas. Os resultados indicam a necessidade da elaboração de novas metodologias de estudo do posicionamento das câmeras, especialmente com relação à obtenção de valores precisos para as referências de calibração.

1.2 Organização

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O Capítulo 2 aborda a teoria envolvida na estereofotogrametria, bem como sua aplicação para o desenvolvimento dos algoritmos de calibração da câmera e dimensionamento de objetos. O Capítulo 3 aborda os métodos práticos utilizados para realização dos testes de calibração e dimensionamento de objetos. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos na utilização dos algoritmos de calibração e dimensionamento com resoluções bastante variadas. O Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas a partir dos resultados apresentados no Capítulo 4, e delinea algumas sugestões para melhoramentos futuros.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

A formulação matemática necessária ao entendimento dos algoritmos de calibração e dimensionamento não entra no escopo deste estudo e pode ser encontrada em [1]. Contudo, faremos uma dissertação breve a respeito dos algoritmos nas subseções a seguir.

2.1 Estereofotogrametria

A estereofotogrametria é feita tomando-se pelo menos um par estéreo de imagens da cena em estudo, tiradas no mesmo instante e em referenciais diferentes. Deve-se inspecionar um conjunto suficientemente grande de pontos das imagens para que seja possível inferir informações da cena, como a localização espacial de objetos e a distância entre os pontos no espaço.

Após a determinação de parâmetros de calibração a partir das coordenadas de pontos de referência, é possível fazer uma associação entre as coordenadas 2D das imagens obtidas e as coordenadas 3D da cena. As coordenadas da câmera podem ser obtidas através

de três translações e três rotações aplicadas sobre os eixos do *grid*. A posição da câmera é dada por coordenadas x , y , e z da posição da câmera em relação ao referencial global, e um vetor com ângulos de rotação ω , ϕ e κ dos eixos da câmera em relação aos eixos do *grid*. A Figura 2.1 mostra um exemplo de imagem que foi utilizada neste estudo. A câmera está alinhada com a direção da bissetriz dos eixos XY do *grid*.

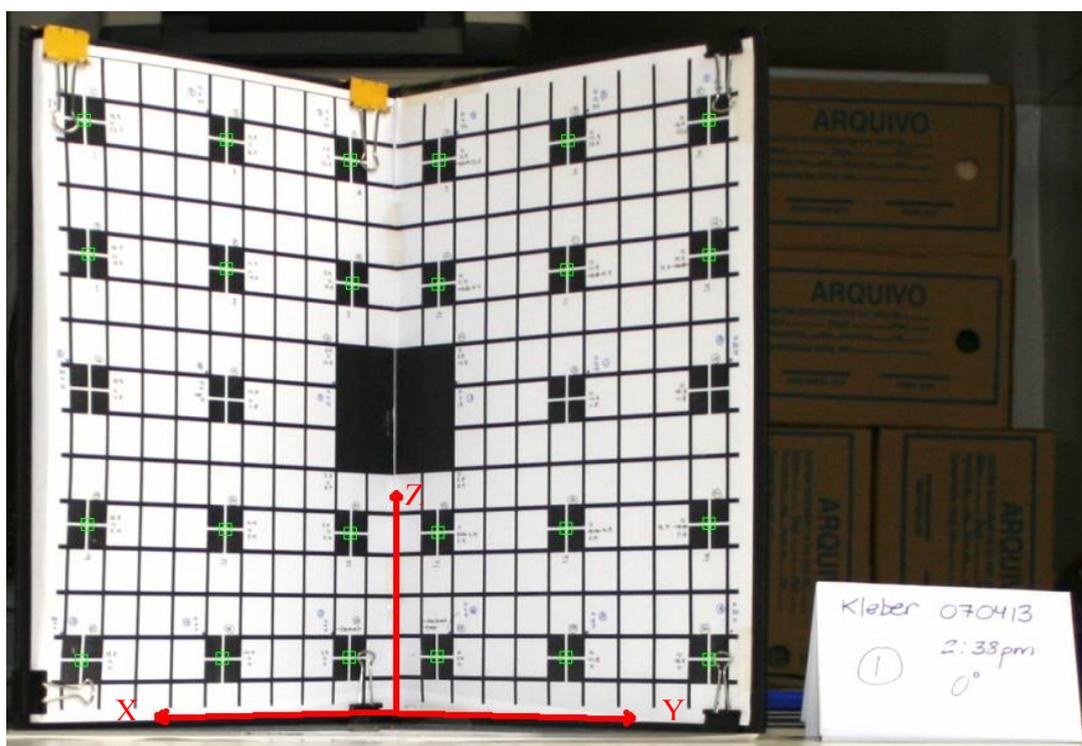


Figura 2.1 Câmera alinhada com o *grid*

A origem do *grid* foi escolhida como o referencial global para a cena. Na Figura 2.1, foram desenhados em vermelho, os eixos ordenados do *grid* sobre a sua origem para facilitar o entendimento da notação de coordenadas adotada ao longo deste trabalho. O vetor que determina a posição da origem da câmera (Figura 3.1) é dado por :

$$p_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

A câmara foi considerada um objeto pontual e as coordenadas que a caracterizam são referentes ao seu centro óptico. Foi convencionado que o centro óptico está situado no centro da lente da câmara. Para determinar as coordenadas da câmara, calcula-se primeiro o vetor de sua translação em relação à origem do *grid*:

$$t = \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

A rotação do eixo óptico da câmara sofrida após a translação pode ser representada pela rotação dos eixos da câmara (ver Seção 2.2.1) em relação aos eixos do *grid*. Essa rotação será modelada segundo uma transformação linear dada por:

$$R(\omega, \phi, \kappa) = R_1(\kappa)R_2(\phi)R_3(\omega) \quad (2.3)$$

A transformação $R(\omega, \phi, \kappa)$ consiste em um conjunto de três rotações em torno de cada eixo do *grid*. Esta transformação, quando aplicada sobre cada eixo do *grid*, gera o vetor p_1 dado por:

$$p_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = R(\omega, \phi, \kappa) \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Temos que p_1 é o vetor de coordenadas da posição da câmara em relação aos eixos do *grid*. Em seguida, toma-se outra imagem com a câmara situada em $p_2 \neq p_1$.

Com este par estéreo de imagens é possível inferir informações acerca de dimensões e profundidade de objetos, e coordenadas espaciais de pontos da cena. Podemos

fazer utilização da estereofotogrametria para realizar medições em águas profundas a partir de imagens captadas por robôs, como foi exemplificado anteriormente.

2.2 Calibração

Neste projeto, a calibração das câmeras consiste em determinar somente os seus parâmetros de orientação exterior. Os parâmetros intrínsecos não são utilizados. O cálculo desses parâmetros é feito a partir de uma biblioteca dinâmica (Apêndice A), aplicada sobre as coordenadas no plano e no espaço (ver Apêndices G, H e I) do conjunto de pontos mapeados da cena em análise. Podemos ver em verde na Figura 2.1 o conjunto de 24 alvos mapeados da imagem projetada no plano. A rotina de calibração utiliza o conjunto de coordenadas 2D (projetadas no plano) e 3D (coordenadas espaciais) desses pontos como entrada e gera como saídas os 6 parâmetros de orientação exterior (3 ângulos e 3 coordenadas em relação aos eixos X, Y, Z) e 4 parâmetros de orientação interior. As saídas geradas pela rotina de calibração são referenciadas aos eixos do *grid*. É preciso estimar a translação e a rotação aplicadas na câmera segundo o referencial dos eixos ordenados X, Y, Z.

Temos na Tabela 2.1 os 6 parâmetros de orientação exterior e os 4 parâmetros de orientação interior gerados pela rotina de calibração para a imagem da Figura 2.1.

Tabela 2.1 Parâmetros extrínsecos e intrínsecos para imagem da Figura 2.1 (a resolução é 10,08 megapixels)

Extrínsecos	Deslocamento horizontal x	93,2 cm
	Deslocamento vertical y	88,8 cm
	Deslocamento profundidade z	2,2 cm
	Rotação horizontal ω	1,5 rad
	Rotação vertical ϕ	1,0 rad
	Rotação profundidade κ	3,1 rad
Intrínsecos	Projeção horizontal distância focal f_u	1551 pixels
	Projeção vertical distância focal f_v	1190 pixels
	Coordenada horizontal da origem u_0	3009 pixels
	Coordenada vertical da origem v_0	3035 pixels

As medidas estimadas pelo algoritmo de calibração para os três primeiros parâmetros são de fácil interpretação e pode-se inferir visualmente que há correspondência desses três parâmetros com as coordenadas medidas com régua para a posição da câmera em relação ao *grid* nos testes realizados. A visualização é mais difícil para os parâmetros de rotação. As rotações dos eixos da câmera geradas a partir dos eixos do *grid* são de difícil visualização. Foi usada uma transformação linear (ver Seção 2.2.1) aplicada sobre os parâmetros ω , ϕ e κ para facilitar a análise com rotações na câmera.

Usando a transformação linear aplicada sobre os parâmetros ω , ϕ e κ , podemos corresponder as rotações geradas sobre os eixos do *grid* aos eixos $X_{CÂMERA}$, $Y_{CÂMERA}$ e $Z_{CÂMERA}$, referencial amplamente usado neste estudo. O uso da transformação linear facilitou a análise dos parâmetros de rotação do *grid* quando foram aplicadas rotações nos eixos da câmera.

Temos na Figura 2.2 um exemplo de uma imagem com rotação de $+10^\circ$ em $Z_{CÂMERA}$. A imagem mais clara do *grid* o representa antes da rotação de $+10^\circ$ em $Z_{CÂMERA}$. Foram superpostas as imagens de referência para rotação e a imagem girada para que se pudesse fazer uma comparação do efeito gerado pela rotação. Os parâmetros de calibração para a imagem girada exibida na Figura 2.2 estão na Tabela 2.2.

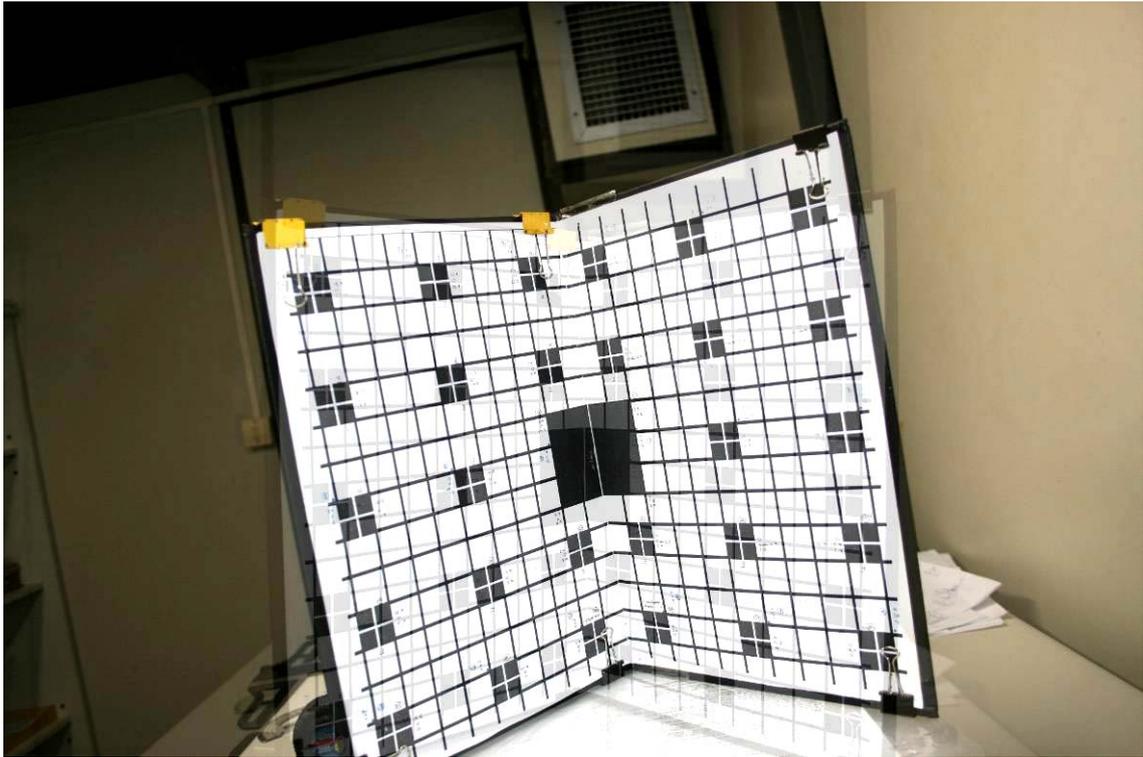


Figura 2.2 Câmera girada de $+10^\circ$ em $Z_{CÂMERA}$

Tabela 2.2 Parâmetros extrínsecos e intrínsecos estimados para calibração da imagem com o *grid* girado de $+10^\circ$ em $Z_{CÂMERA}$ (10,08 megapixels)

Extrínsecos	Deslocamento horizontal x	44,9 cm
	Deslocamento vertical y	44,9 cm
	Deslocamento profundidade z	18,0 cm
	Rotação horizontal ω	1,7 rad
	Rotação vertical ϕ	-0,8 rad
	Rotação profundidade κ	-2,9 rad
Intrínsecos	Projeção horizontal distância focal f_u	1960 pixels
	Projeção vertical distância focal f_v	1415 pixels
	Coordenada horizontal da origem u_0	3219 pixels
	Coordenada vertical da origem v_0	3308 pixels

Para efeito de comparação dos parâmetros de calibração entre as duas imagens exibidas na Figura 2.2, encontra-se na Tabela 2.3 os parâmetros de calibração da imagem de fundo com a câmera e *grid* alinhados no eixo $Z_{CÂMERA}$.

Tabela 2.3 Parâmetros extrínsecos e intrínsecos estimados para calibração da imagem com o *grid* alinhado em 0° com a câmera. No eixo $Z_{CÂMERA}$ (10,08 megapixels)

Deslocamento horizontal x	46,9 cm
Deslocamento vertical y	46,2 cm
Deslocamento profundidade z	18,2 cm
Rotação horizontal ω	1,6 rad
Rotação vertical ϕ	-0,8 rad
Rotação profundidade κ	-3,1 rad
Projeção horizontal distância focal f_u	1934 pixels
Projeção vertical distância focal f_v	1458 pixels
Coordenada horizontal da origem u_0	3487 pixels
Coordenada vertical da origem v_0	3440 pixels

2.2.1 Algoritmo de Transformação Linear

Os parâmetros extrínsecos representam o posicionamento da câmera em relação aos eixos do *grid*. Como observado na Seção 2.2, as análises com rotações da câmera são facilitadas quando as fazemos em relação aos eixos da câmera. Primeiro, é feita uma rotação sobre os vetores unitários canônicos dos eixos do *grid* e depois uma translação até o ponto onde a câmera se encontra. Esta transformação foi usada dentro da rotina de calibração para estimar rotações dos eixos do *grid* (ver Apêndice A, Tabela A.2) em função dos eixos da câmera.

A transformação linear de rotação $R(\omega, \phi, \kappa) = R_1(\kappa)R_2(\phi)R_3(\omega)$, apresentada em [1], é dada por:

$$R = \begin{bmatrix} c(\phi).c(\kappa) & (c(\omega).s(\kappa)) + (s(\omega).s(\phi).c(\kappa)) & (s(\omega).s(\kappa)) - (c(\omega).s(\phi).c(\kappa)) \\ -c(\phi).s(\kappa) & (c(\omega).c(\kappa)) - (s(\omega).s(\phi).s(\kappa)) & (s(\omega).c(\kappa)) + (c(\omega).s(\phi).s(\kappa)) \\ s(\phi) & -s(\omega).c(\phi) & c(\omega).c(\phi) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Em (2.5), as funções c e s correspondem às funções trigonométricas co-seno e seno, e está representado somente o resultado do produto das rotações $R_1(\kappa), R_2(\phi), R_3(\omega)$ de cada eixo do *grid*. A representação simplificada da matriz R fica:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Calculam-se os novos parâmetros $\omega_{CÂMERA}$, $\phi_{CÂMERA}$ e $\kappa_{CÂMERA}$ a partir das seguintes equações apresentadas em [1]:

$$\omega_{CÂMERA} = -tg^{-1}(r_{32}, r_{33}) \quad (2.7)$$

$$\phi_{CÂMERA} = tg^{-1}\left(r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2}\right) \quad (2.8)$$

$$\kappa_{CÂMERA} = -tg^{-1}(r_{21}, r_{11}) \quad (2.9)$$

2.3 Dimensionamento

O dimensionamento é uma das funcionalidades permitidas pelas técnicas de estereofotogrametria. É possível, a partir de um modelo matemático do par de câmeras calibradas, gerar uma rotina que calcula o comprimento de um objeto a partir de um par de imagens estéreo. O cálculo é gerado inspecionando-se o par de imagens estéreo. O algoritmo de dimensionamento usa como entradas os parâmetros intrínsecos e extrínsecos gerados pelo

algoritmo de calibração, e as coordenadas das extremidades do segmento cujo comprimento será estimado, localizadas nas duas imagens do par estéreo.

Na Figura 2.3, temos um exemplo de uma imagem usada para o cálculo da estimativa de duas dimensões. Estão marcados dois segmentos, um de 2 cm no esquadro em pé, e outro de 5 cm, no esquadro deitado. O dimensionamento destes segmentos será feito na Seção 4.3.

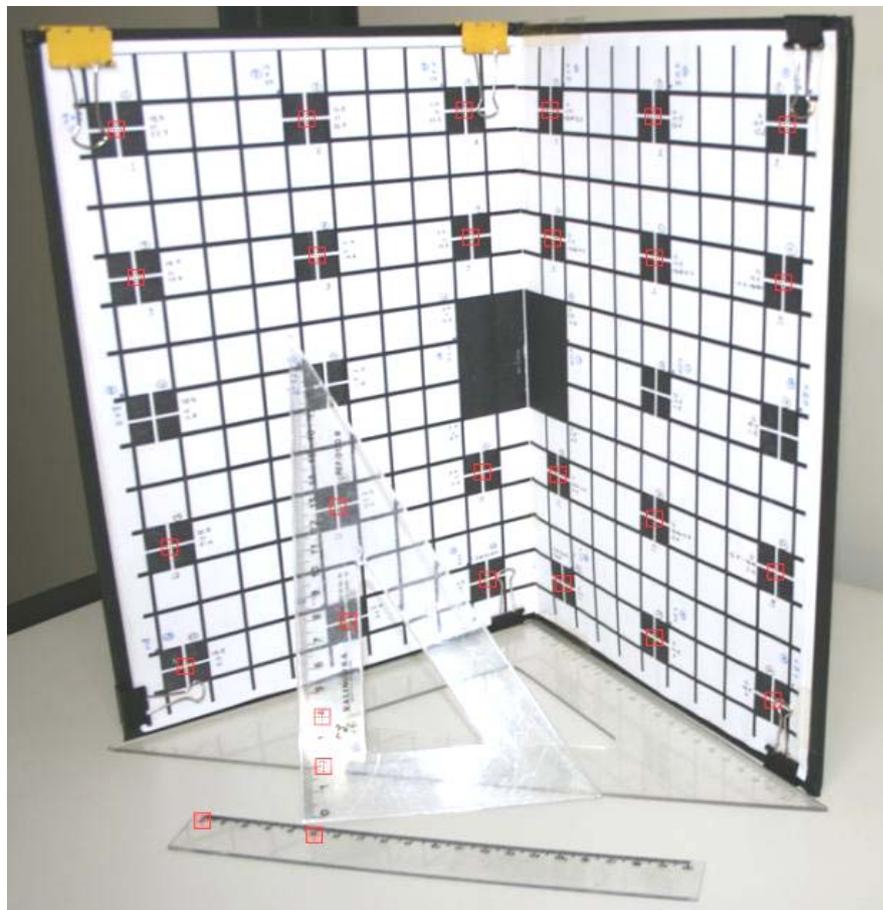


Figura 2.3 Foto para dimensionamento

Capítulo 3

Método

Este capítulo descreve sucintamente os procedimentos realizados para cada um dos três testes deste trabalho. Para o Teste 1, foram realizados procedimentos para verificação de erros de posição da câmera relativos aos eixos X , Y , Z do *grid*. Também foram analisados os erros de rotação da câmera sobre o eixo $Y_{CÂMERA}$ (Figura 3.1) relativos ao parâmetro ϕ do algoritmo de calibração (ver Seção 2.2).

Para o Teste 2, foram realizados os mesmos procedimentos do Teste 1. O objetivo do Teste 2 foi reproduzir os resultados encontrados no Teste 1 e também estender a análise de rotação da câmera para os eixos $X_{CÂMERA}$ e $Z_{CÂMERA}$. O método aplicado no Teste 1 pôde ser aprimorado com as duas novas análises incluídas no Teste 2.

No Teste 3, encontra-se uma breve análise dos erros do algoritmo de dimensionamento. A metodologia aplicada neste teste foi diferente da utilizada nos Testes 1 e 2. Não foi preciso para o Teste 3, assegurar posições específicas para a câmera ao tomar fotos do *grid*, pois o teste tinha caráter qualitativo. Os procedimentos no computador foram os mesmos executados nos Testes 1 e 2, no que diz respeito à geração e ao redimensionamento

das imagens. A diferença do Teste 3 é a utilização do algoritmo de dimensionamento (ver Seção 2.3) após a execução do algoritmo de calibração.

Foi usado o mesmo material (grid, mesa, câmera, etc.) para realização dos três testes, para facilitar a reprodução dos resultados em experimentos independentes. A Figura 3.1 ilustra os eixos do *grid* e da câmera mencionados neste trabalho.

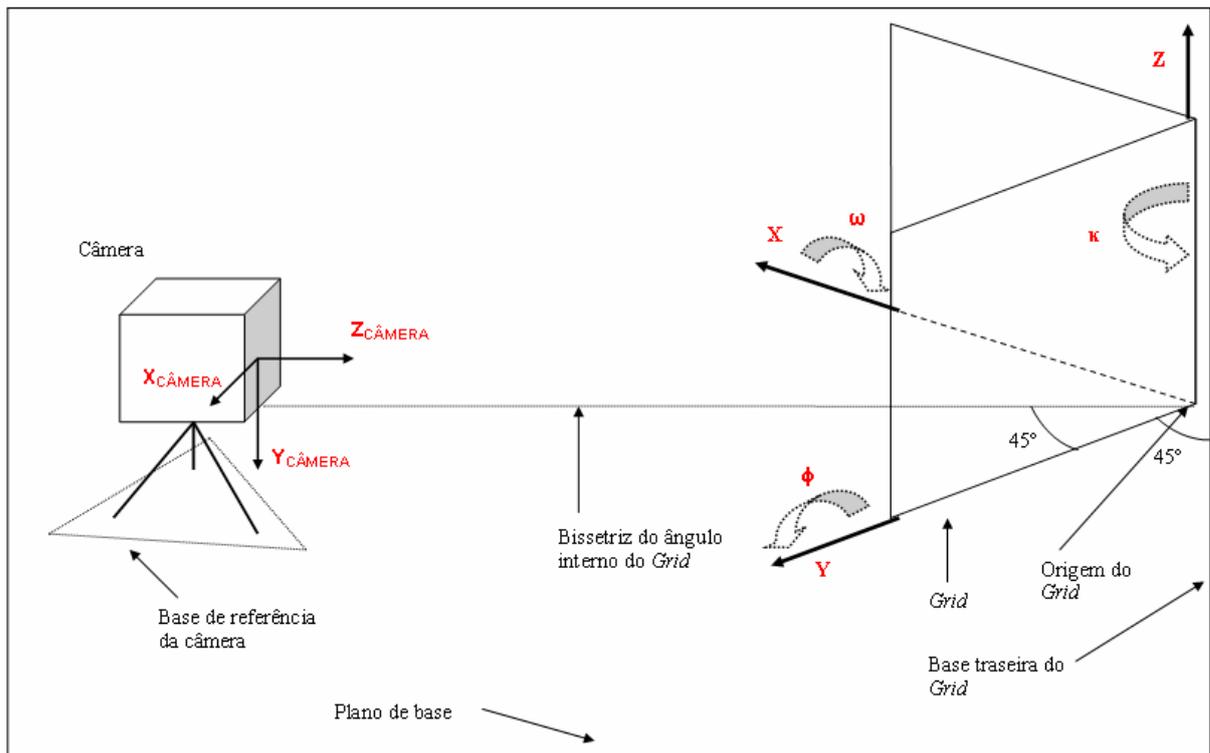


Figura 3.1 Eixos e ângulos do *grid* e da câmera

Temos as seguintes informações relevantes na Figura 3.1:

- X – Eixo ordenado X no sistema de coordenadas do *grid*;
- Y – Eixo ordenado Y no sistema de coordenadas do *grid*;
- Z – Eixo ordenado Z no sistema de coordenadas do *grid*;
- ω – Ângulo de rotação em torno do eixo ordenado X do *grid*;
- ϕ – Ângulo de rotação em torno do eixo ordenado Y do *grid*;
- κ – Ângulo de rotação em torno do eixo ordenado Z do *grid*;

- $X_{CÂMERA}$ – Eixo ordenado X no sistema de coordenadas da câmera;
- $Y_{CÂMERA}$ – Eixo ordenado Y no sistema de coordenadas da câmera;
- $Z_{CÂMERA}$ – Eixo ordenado Z no sistema de coordenadas da câmera.

Os eixos X, Y, Z formam o conjunto de eixos ordenados do *grid*. Todos os seis parâmetros de orientação exterior do algoritmo de calibração são representados em relação a esses eixos. Para facilitar a compreensão dos ângulos gerados sobre os eixos X, Y, Z, foi criado um sistema de coordenadas auxiliar (eixos $X_{CÂMERA}$, $Y_{CÂMERA}$, e $Z_{CÂMERA}$) que dispõem os ângulos ω , ϕ , κ no sistema de coordenadas da câmera através da transformação linear descrita na Seção 2.2.1.

3.1 Primeiro Teste – Coordenadas X, Y, Z e Ângulo ϕ

Pode-se ver na Figura 3.2 o esquema de montagem para o Teste 1.

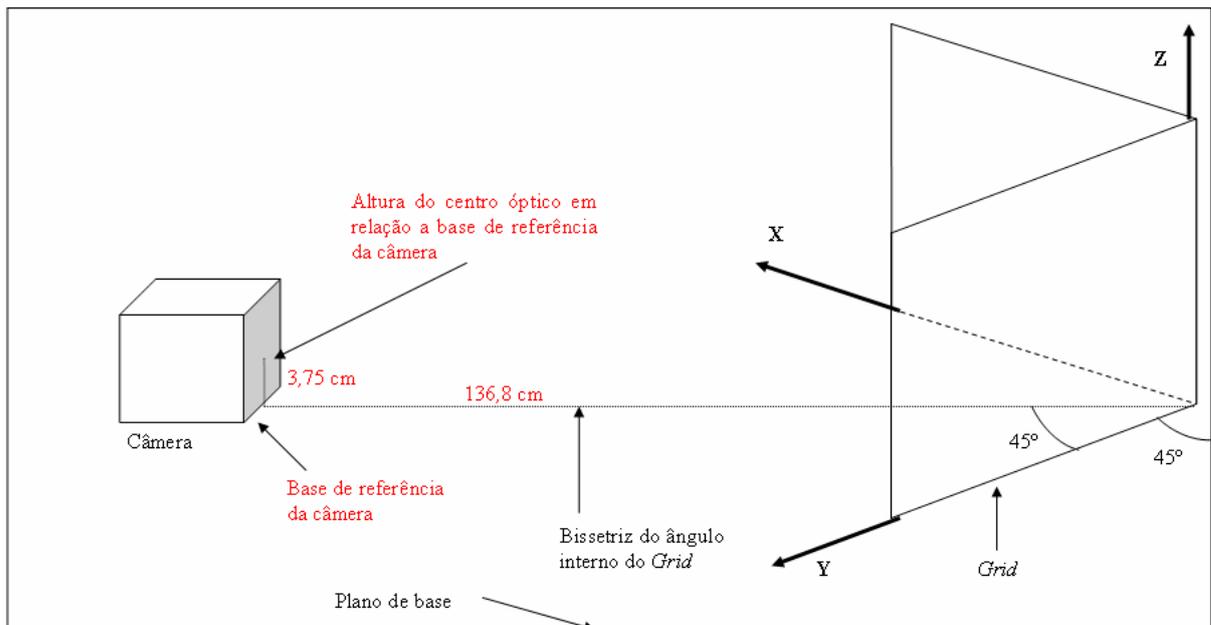


Figura 3.2 Montagem para o Teste 1

3.1.1 Escolha das Posições de Teste para a Câmera e para o *Grid*

Iluminação intensa foi usada no ambiente perto do *grid*. Para as medições de translações (deslocamentos em X, Y ou Z), a base da câmera e a base do *grid* foram dispostas em um mesmo plano, ou seja, na mesma altura. Para as medições de rotação (rotações apenas em ϕ para o Teste 1), a câmera teve grau de liberdade no eixo $Y_{CÂMERA}$. Foram verificados com esquadros que o *grid* estava perpendicular ao plano de base, que o ângulo entre os dois planos do *grid* era de 90° e, conseqüentemente, que cada plano do *grid* fazia 45° de abertura em relação ao apoio traseiro da base do *grid*. A câmera possuía um parâmetro de ajuste manual com os valores 18, 24, 35 e 55. Este parâmetro foi mantido com valor 18 para todas as fotos. Foi assumido que o eixo óptico da câmera era a reta perpendicular ao plano XY da câmera, passando pelo centro da lente. A coordenada Z_0 , altura do eixo óptico, assumiu 3 valores diferentes para o Teste 1: 0,55 cm, 2,1 cm e 3,75 cm. As razões para escolha destas coordenadas serão detalhadas no Capítulo 4. Para o Teste 1, a distância do centro da base de referência da câmera à origem do *grid* foi igual a 136,8 cm. Foram feitas anotações em papel ao lado do *grid* nas fotos que ajudaram nas suas identificações. Na tomada de fotos para o Teste 1, a câmera foi fixada sobre o plano de base de forma que foi assegurado o paralelismo entre este plano e a direção do seu eixo óptico. A cada foto tomada, a montagem do ambiente de teste foi refeita e o conjunto de procedimentos foi realizado sempre pelo mesmo usuário.

3.1.1.1 Câmera Alinhada com o *Grid*

A distância entre o eixo Z do *grid* e o centro da base de referência da câmera era igual a 136,8cm. O ângulo entre a direção do eixo óptico da câmera e a bissetriz do ângulo interno do *grid* era igual a 0° . As distâncias entre o centro óptico da câmera até as interseções com o eixo

X e com o eixo Y, quando projetadas no plano de base, foram iguais a 96,73cm. Então, capturamos a foto D.1 (Apêndice D).

3.1.1.2 Câmera Girada de + 20° sobre o Eixo $Y_{CÂMERA}$

A distância entre o eixo Z do *grid* e o centro da base de referência da câmera era igual a 136,8cm. O ângulo agudo entre a direção do eixo óptico da câmera e a bissetriz do ângulo interno do *grid* era igual a 20° à direita. As distâncias entre o centro óptico da câmera até as interseções com o eixo X e com o eixo Y, quando projetadas no plano de base, foram iguais a 96,73cm. Então, capturamos a foto da D.3 (Apêndice D).

3.1.1.3 Câmera Girada de - 20° sobre o Eixo $Y_{CÂMERA}$

A distância entre o eixo Z do *grid* e o centro da base de referência da câmera era igual a 136,8cm. O ângulo agudo entre a direção do eixo óptico da câmera e a bissetriz do ângulo interno do *grid* era igual a 20° à esquerda. As distâncias entre o centro óptico da câmera até as interseções com o eixo X e com o eixo Y, quando projetadas no plano de base, foram iguais a 96,73cm. Então, capturamos a foto da D.2 (Apêndice D).

3.1.2 Procedimentos no Computador

Foi utilizado um programa editor de imagens para converter o arquivo de imagem da câmera de JPG para BMP. Com este programa, geramos 9 imagens reduzidas fazendo reduções sucessivas de 10% em relação à imagem original, até que obtivemos uma imagem final com resolução de 10% em relação à resolução da imagem original. As resoluções obtidas em megapixels foram 10,08; 8,16; 6,45; 4,94; 3,63; 2,52; 1,61; 0,91; 0,40; e 0,10. A única restrição quanto à escolha do programa é que o mesmo pudesse realizar a conversão de

imagens citada. A preferência para essa escolha é que seja um programa que não faça um processamento desconhecido das imagens ao redimensioná-las. No entanto, o programa utilizado (Microsoft Office Picture Manager) não possui código fonte aberto e não podemos ter certeza do tipo de processamento aplicado para esta funcionalidade. Veremos no Capítulo 4 que os erros relativos obtidos das estimativas do algoritmo de calibração não apresentaram grande variação com a resolução das imagens usadas. Até este ponto, não sabemos dizer se há alguma relação entre este resultado e o tipo de processamento de imagens utilizado no redimensionamento das imagens.

Foi utilizado um programa editor de imagens para marcar com *pixels* verdes os centros de cada um dos 24 alvos escolhidos do *grid*. Os *pixels* são mapeados pelo algoritmo de calibração para cada uma das 10 imagens do teste. Foi executada uma rotina de procura de coordenadas dos *pixels* verdes, com valor (R,G,B) = (0,255,0), marcados nas imagens (Apêndice C).

Foi utilizada a rotina do algoritmo de calibração (ver Seção 2.2) para estimar os parâmetros externos de calibração da câmera. A rotação gerada na câmera sobre os eixos $X_{CÂMERA}$, $Y_{CÂMERA}$ e $Z_{CÂMERA}$ pôde ser estimada com ajuda do algoritmo de transformação linear (ver Seção 2.2.1) aplicado sobre o parâmetro de rotação ϕ em relação ao eixo $Y_{CÂMERA}$.

3.2 Segundo Teste – Coordenadas X, Y, Z e Ângulos ω , ϕ , κ

Pode-se ver na Figura 3.3 que, no Teste 2, a câmera está sobre um tripé. Sua utilização neste teste está relacionada com a necessidade de medir os ângulos ω e κ em torno dos eixos $X_{CÂMERA}$ e $Z_{CÂMERA}$, o que não foi realizado para o Teste 1 (ver Seção 3.1.1.2 e Seção 3.1.1.3). No Teste 2, além de estendermos a análise para mais duas rotações da câmera, devemos confirmar os resultados obtidos para o Teste 1 e também devemos certificar a qualidade do método descrito na Seção 3.1.

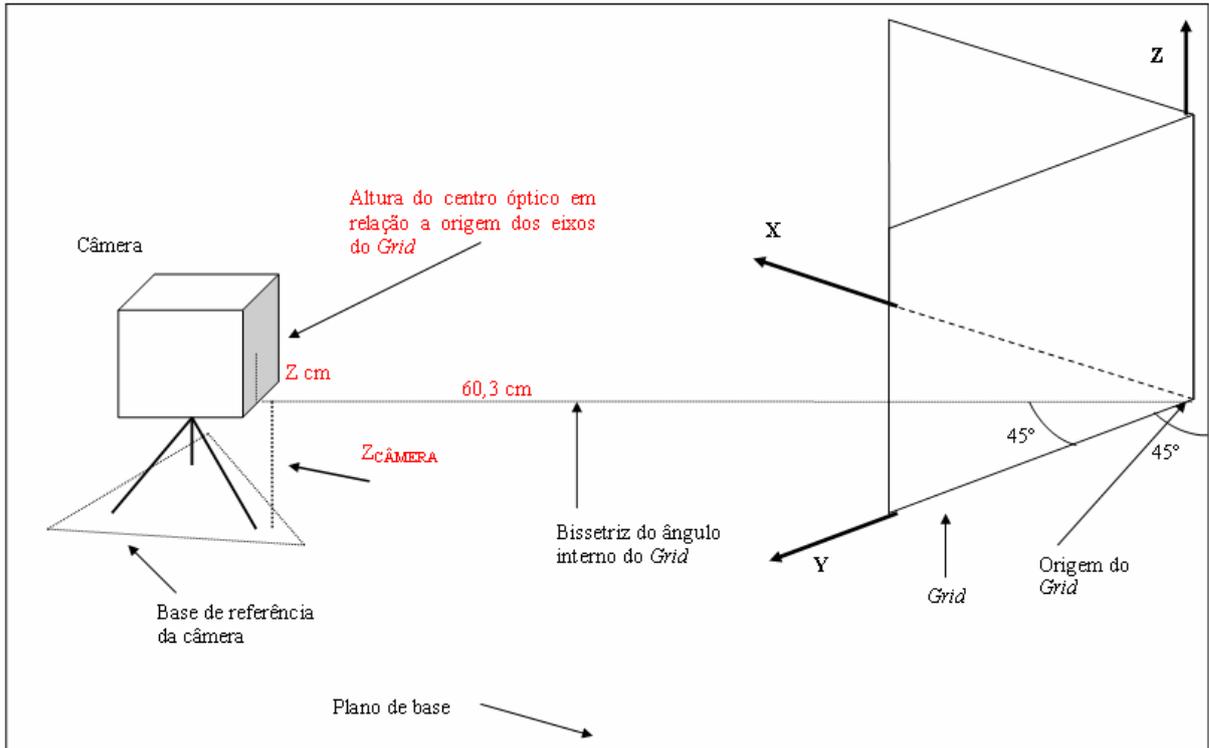


Figura 3.3 Montagem para o Teste 2

3.2.1 Escolha das Posições de Teste para a Câmera e para o *Grid*

Como foi visto na Seção 3.1, deve-se garantir que a câmera está firme na posição da tomada de fotos. A diferença da Seção 3.2.1 para a Seção 3.1.1 é que no Teste 2 foi realizado apenas uma estimativa de posição para $Z_{0, \text{Teste 2}}$ (20,8 cm), visto que os erros com esta coordenada foram menores que os erros na análise do mesmo parâmetro no Teste 1. Verificou-se que a distância do centro da base de referência da câmera até a origem dos eixos do *grid* era igual a 60,3 cm. No Teste 2 não foram feitas anotações nas fotos. As informações relevantes foram escritas no nome do arquivo JPEG usado para cada foto. Isto permitiu organizar e armazenar melhor as fotos. A cada foto tomada, a montagem do ambiente de teste foi refeita e o conjunto de procedimentos foi realizado sempre pelo mesmo usuário.

3.2.1.1 Câmera Alinhada com o *Grid*

A distância entre o eixo *Z* do *grid* e o centro da base de referência da câmera era igual a 60,3 cm. O ângulo entre a direção do eixo óptico da câmera e a bissetriz do ângulo interno do *grid* era igual a 0°. As distâncias entre o centro óptico da câmera até as interseções com o eixo *X* e com o eixo *Y*, quando projetadas no plano de base, foram iguais a 42,64 cm. Então, capturamos as fotos E.1, E.3, e E.5 (Apêndice E).

3.2.1.2 Câmera Girada de +10° sobre o Eixo $X_{CÂMERA}$

A distância entre o eixo *Z* do *grid* e o centro da base de referência da câmera era 60,3 cm. Para determinar o ângulo no eixo $X_{CÂMERA}$ foi usado um esquadro paralelo à lateral da câmera. O tripé usado neste teste possui um globo de rotação que serve de apoio à câmera. Este globo permitiu amplo movimento angular da câmera nos eixos $X_{CÂMERA}$, $Y_{CÂMERA}$ e $Z_{CÂMERA}$. O centro do esquadro estava alinhado com o globo de rotação do tripé. Considerou-se que o centro de rotação do eixo óptico coincidia com o centro deste globo. A câmera foi girada somente em torno do eixo $X_{CÂMERA}$ e o ângulo agudo entre a direção do eixo óptico e a bissetriz do ângulo interno do *grid* era igual a 10°. As distâncias entre o centro óptico da câmera até as interseções com o eixo *X* e com o eixo *Y*, quando projetadas no plano de base, foram iguais a 42,64 cm. O *zoom* ajustado foi o mesmo descrito na Seção 3.1.1. Então, capturamos a foto E.2 (Apêndice E).

3.2.1.3 Câmera Girada de -10° sobre o Eixo $Y_{CÂMERA}$

Os passos para a tomada da foto girada sobre $Y_{CÂMERA}$ foram muito semelhantes aos da Seção 3.1.1.3. A diferença foi que, no Teste 2, a câmera estava apoiada sobre o globo do tripé. Foi conferido que a distância entre o eixo *Z* do *grid* e o *centro da base de referência da câmera* era igual a 60,3 cm. O ângulo agudo entre a direção do eixo óptico da câmera e a bissetriz do

ângulo interno do *grid* era igual a 10° . As distâncias entre o centro óptico da câmera até as interseções com o eixo X e com o eixo Y, quando projetadas no plano de base, foram iguais a 42,64 cm. Então, capturamos a foto E.4 (Apêndice E).

3.2.1.4 Câmera Girada de $+10^\circ$ sobre o Eixo $Z_{CÂMERA}$

Os parâmetros utilizados para a tomada da foto girada sobre o eixo $Z_{CÂMERA}$ foram muito semelhantes àqueles descritos na Seção 3.2.1.2. A diferença foi que para medir a rotação em $Z_{CÂMERA}$ um transferidor foi posicionado junto à parte traseira da câmera. A câmera foi girada de 10° para a direita sobre o eixo $Z_{CÂMERA}$. Foi conferido que a distância entre o eixo Z do *grid* e o centro da base de referência da câmera era 60.3 cm. A distância entre o centro óptico da câmera até a interseção do eixo X com o eixo Y, quando projetada no plano de base, foi igual a 42,64 cm. Então, capturamos a foto E.6 (Apêndice E).

3.2.2 Procedimentos no Computador

Os procedimentos no computador para o Teste 2 foram muito semelhantes aos da Seção 3.1.2. A diferença foi que, no Teste 2, foram acrescentadas rotinas para estimar as rotações geradas na câmera sobre os eixos $X_{CÂMERA}$ e $Z_{CÂMERA}$, analisadas nos parâmetros ω e κ em relação aos eixos X e Z, que não foram estimados para o Teste 1.

3.3 Terceiro Teste – Dimensionamento

Podemos ver na Figura 3.4 que o Teste 3 teve uma disposição diferente em sua montagem quando comparado com os Testes 1 e 2. Temos agora a montagem característica de um teste de dimensionamento. As câmeras não precisam estar alinhadas com o *grid* neste teste. Foi

apresentado um caso em que se desejou estimar uma medida usando o algoritmo de dimensionamento. Para tanto, tivemos que dispor a câmera em duas posições diferentes para tomar um par de fotos.

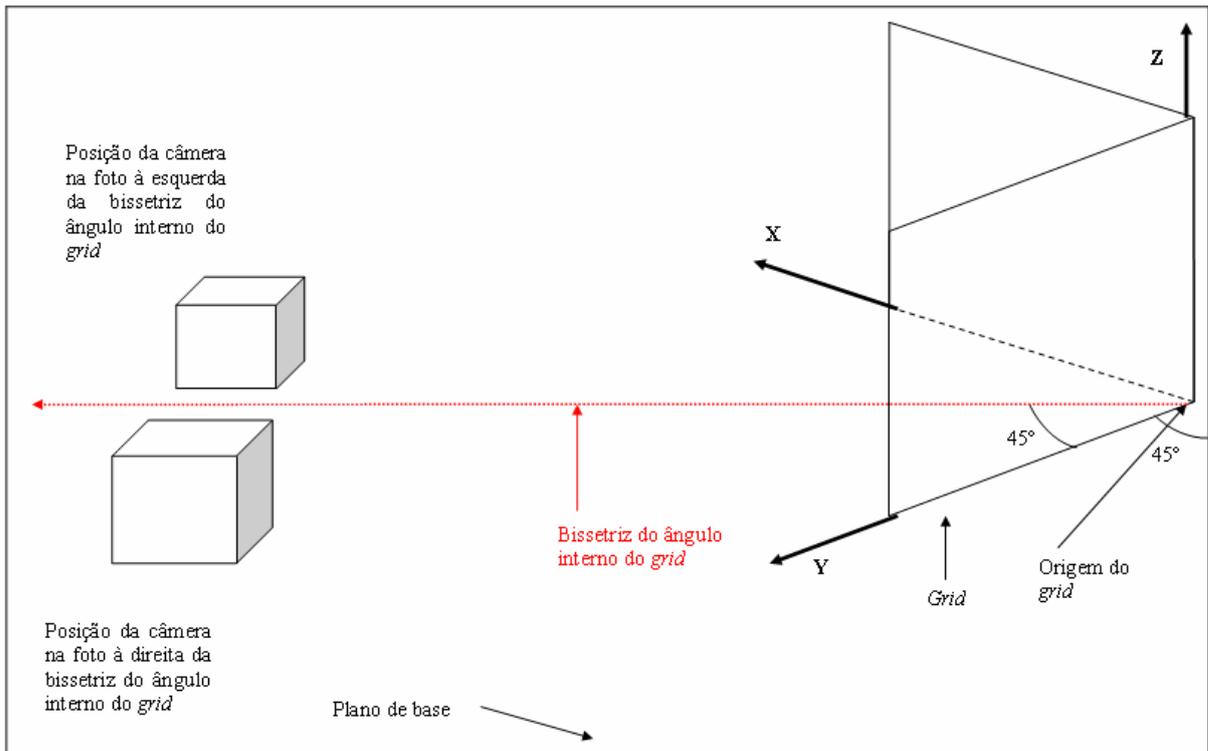


Figura 3.4 Montagem para o Teste 3

3.3.1 Escolha das Posições de Teste para a Câmera e para o Grid

No Teste 3, não foi necessário um posicionamento específico para a câmera. O objetivo do teste era somente verificar que os erros de dimensionamento diminuía quando aumentávamos a resolução das imagens. As câmeras foram dispostas de frente para o grid. A foto em que o grid aparece à esquerda da imagem corresponde àquela tomada com a câmera à direita da bissetriz do ângulo interno do grid. A outra foto corresponde àquela tomada com a câmera à esquerda da bissetriz do ângulo interno do grid, como podemos notar na Figura 3.4. As distâncias da câmera aos eixos X e Y não foram medidas porque o caráter deste teste foi somente qualitativo. Os parâmetros para o zoom da câmera usado neste teste foram os

mesmos descritos na Seção 3.1.1. O tripé não foi usado no Teste 3, porque dimensionar objetos a partir de parâmetros de calibração obtidos com fotos do *grid* giradas não pertence ao escopo deste projeto. Então, capturamos as fotos F.1 e F.2 (Apêndice F).

3.3.2 Procedimentos no Computador

No Teste 3, também há necessidade de um programa editor de imagens e operações de redimensionamento de imagens (conforme a Seção 3.1.2). Para completar a análise deste teste, foi executado o algoritmo de dimensionamento (ver Seção 2.3) a partir dos 10 pares de imagens e seus respectivos arquivos de calibração, gerados com o algoritmo da Seção 2.2. O algoritmo de dimensionamento gerou as estimativas de comprimento. A curva de tendência dos erros foi ajustada a partir do Método dos Mínimos Quadrados (Seção 3.4).

3.4 Método dos Mínimos Quadrados

O Método dos Mínimos Quadrados é comumente usado para a modelagem de relações analíticas (curvas) entre variáveis de interesse prático, no caso em que a única informação sobre estas variáveis vem de um conjunto de pontos adquiridos de forma imprecisa. Esta modelagem recebe o nome de *ajuste de curvas*, ou *regressão*. Uma explicação mais detalhada sobre o método pode ser encontrada em [2]. O método consiste em ajustar um conjunto de dados a uma curva em função da minimização da soma dos quadrados dos erros entre a curva e os dados. Sejam $A_{N \times 2}$ e $b_{N \times 1}$ matrizes com coeficientes reais. Suponha o sistema linear descrito pela equação:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \\ a_{41} & a_{42} \\ \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Deseja-se descobrir a solução de mínimos quadrados da Equação (3.1), representada pela equação:

$$A \cdot x_{LS} = b \quad (3.2)$$

Verifica-se que pode não existir solução exata para a Equação (3.2). Desse modo, desejamos minimizar o erro dado por:

$$e = b - A \cdot x \quad (3.3)$$

Para tanto, vamos fazer:

$$J = \|e\|^2 = e^T e, \quad (3.4)$$

onde a operação M^T representa a transposição de uma dada matriz M .

Desenvolvendo (3.4), temos:

$$J = (b - Ax)^T (b - Ax) \quad (3.5)$$

Aplicando a propriedade distributiva na Equação (3.5), temos:

$$J = b^T b - b^T Ax - x^T A^T b + x^T A^T Ax. \quad (3.6)$$

Para encontrar o valor onde a soma dos quadrados dos erros é mínima, fazemos:

$$\frac{\partial J}{\partial x} = -2A^T b + 2A^T Ax_{LS} = 0 \quad (3.7)$$

Derivando a Equação (3.7), ficamos com a seguinte expressão na variável x :

$$A^T Ax_{LS} = A^T b, \quad (3.8)$$

A Equação (3.8) nos leva à seguinte expressão matricial para os coeficientes ajustados com o Método dos Mínimos Quadrados:

$$x_{LS} = (A^T A)^{-1} A^T b. \quad (3.9)$$

Capítulo 4

Resultados

Este capítulo descreve todos os resultados para os Testes 1, 2 e 3. Para o Teste 1, foram gerados gráficos de erros relativos percentuais e erros em $20\log_{10}(E_{\text{relativo}})$ (ou dB) para os parâmetros extrínsecos de calibração X, Y, Z e ϕ . Foram geradas tabelas com os valores dos coeficientes de ajuste linear para os erros relativos em dB dos parâmetros analisados no Teste 1. Os valores das coordenadas do *grid* usadas para gerar os parâmetros de calibração do Teste 1 encontram-se no Apêndice G e as fotos utilizadas para gerar esses parâmetros de calibração encontram-se no Apêndice D. A rotina de calibração usada nos Testes 1 e 2 encontra-se no Apêndice A.

Gráficos e tabelas semelhantes aos gerados no Teste 1 foram gerados para o Teste 2. A análise dos parâmetros extrínsecos de calibração foi estendida para ω e κ , que não haviam sido analisados no Teste 1. Os valores das coordenadas do *grid* usadas para gerar os parâmetros de calibração do Teste 2 encontram-se no Apêndice H. As fotos utilizadas para gerar esses parâmetros encontram-se no Apêndice E.

No Teste 3, realizamos um estudo preliminar de dimensionamento. Foram gerados gráficos para as estimativas dos erros relativos percentuais de dois comprimentos marcados nas imagens esquerda e direita (as fotos do Teste 3 estão no Apêndice F) e erros em $20\log_{10}(E_{\text{relativo}})$. A Tabela 4.35 mostra erros relativos percentuais e coeficientes de ajuste linear para os erros em dB. As coordenadas do *grid* usadas para extrair parâmetros de calibração do Teste 3 encontram-se no Apêndice F e a rotina de dimensionamento usada encontra-se no Apêndice B.

4.1 Teste 1 – Precisão da Calibração em Relação aos Eixos X, Y, Z e Ângulo ϕ

O Teste 1 foi realizado para que se pudesse observar a precisão do algoritmo de calibração ao determinar o posicionamento de um objeto. O posicionamento é descrito pelos parâmetros externos da câmera. Observou-se os dados fornecidos pelo algoritmo com enfoque nas estimativas de posicionamento do objeto em relação ao *grid* nos eixos X,Y, e Z e na estimativa do ângulo ϕ .

A seguir temos uma tabela com o esquema da ordem de imagens e resoluções usadas para este teste.

Tabela 4.1 Fotos e resoluções

Foto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Resolução em megapixels	10,08	8,16	6,45	4,94	3,63	2,52	1,61	0,91	0,40	0,10

A foto 1 na Tabela 4.1 representa a foto D.1 do Teste 1 e as outras fotos, imagens de menor resolução criadas a partir da foto D.1. Os procedimentos de tomada de fotos para o

Teste 1 encontram-se na Seção 3.1. e as 3 fotos originais do Teste 1 encontram-se no Apêndice D.

A seguir, será exibido um dos vetores gerados durante a calibração para melhor compreensão dos dados gerados nos gráficos que apresentamos neste capítulo.

Tabela 4.2 Vetor de estimativas

Resolução	10,08	8,16	6,45	4,94	3,63	2,52	1,61	0,91	0,4	0,1
$X_{CÂMERA}$ em cm	94,6	92,7	92,8	93,9	93,1	93,3	93,8	92,6	88,4	80,2
$Y_{CÂMERA}$ em cm	92,1	90,1	90,5	91,4	90,6	90,9	91,1	90	86,6	75,8
$Z_{CÂMERA}$ em cm	2,1	2,4	2,2	2,1	2,2	2,4	1,9	2,2	3,2	3,6

Os erros são gerados a partir da diferença relativa entre a dimensão estimada pelo algoritmo e a dimensão real medida durante a tomada das fotos. Isto gera, para cada estimativa, um vetor de erros relativos (por exemplo $E_{relativo, X}$ na Tabela 4.3) com 10 posições. O vetor de erros relativos pode ser plotado em função da resolução de cada uma das 10 imagens da Tabela 4.1. Assim são obtidos gráficos como o da Figura 4.1 (a).

Para exemplificar a origem dos dados plotados, foram apresentados os erros da estimativa do algoritmo para as coordenadas X, Y, Z na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Vetor de erros em X, Y, Z

Resolução	10,08	8,16	6,45	4,94	3,63	2,52	1,61	0,91	0,4	0,1
$E_{relativo, X}$ percentual	2,18	4,2	4,07	2,9	3,74	3,51	3,01	4,28	8,6	17,11
$E_{relativo, Y}$ percentual	4,82	6,86	6,39	5,52	6,37	6,04	5,82	6,93	10,48	21,62
$E_{relativo, Z}$ percentual	43,66	36,86	41,85	44,29	40,86	37,06	50,23	41,22	14,46	4,76

O valor real dos erros relativos na Tabela 4.3 está multiplicado por 100 para que tivéssemos os erros em porcentagem. Já no caso dos gráficos de erro plotados em $20\log_{10}(E_{relativo})$, devemos eliminar este fator multiplicativo. O que foi plotado no gráfico de $20\log_{10}(E_{relativo})$ foram as ordens de grandeza dos erros em relação às medidas reais, medidas para as coordenadas da câmera em relação ao *grid*. Com isso, obtivemos gráficos com pontos

sempre abaixo de 0 dB, representando erros relativos menores do que 100%. Representamos somente a diferença relativa entre os valores estimados e calculados obtendo gráficos como o da Figura 4.1 (b) para os vetores apresentados na Tabela 4.2.

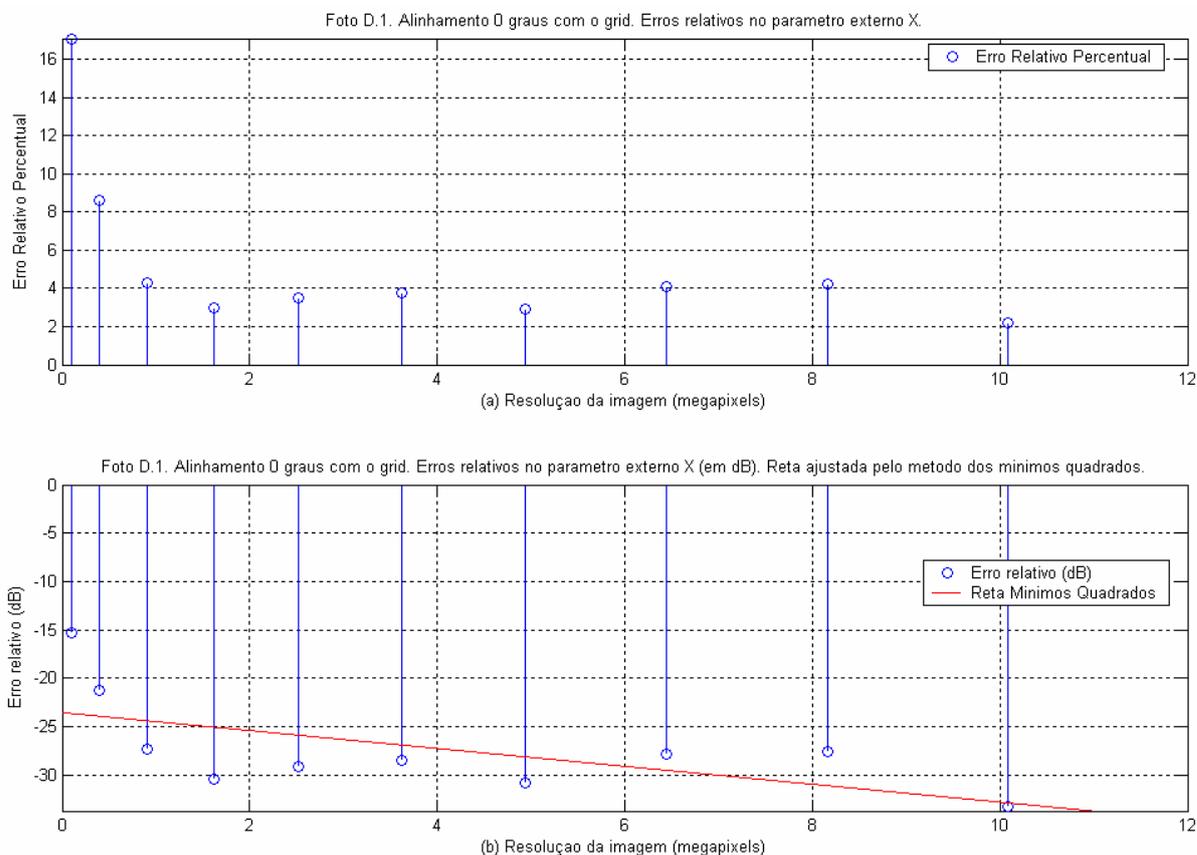


Figura 4.1 Erros relativos no parâmetro de calibração X: (a) percentuais e (b) em dB

O gráfico de erros em dB na Figura 4.1(b) apresenta as ordens de grandeza dos valores de erro relativo entre as coordenadas estimadas pelo algoritmo e aquelas medidas diretamente.

O objetivo deste teste é buscar uma relação linear aproximada do erro do algoritmo ao estimar as coordenadas do posicionamento do objeto. Não faz diferença exibirmos os gráficos em dB usando os mesmos valores exibidos no gráfico de erros em percentagem com o fator multiplicativo 100, como na Tabela 4.3. O efeito será que haverá um ganho constante adicional de 40 dB para todos os erros plotados no gráfico em dB, gerando

um gráfico acima do eixo das resoluções da imagens. O coeficiente angular da reta aproximada não será alterado e o coeficiente linear será acrescido de 40 unidades.

Seguimos com o os resultados do Teste 1 apresentando os gráficos de Erro do posicionamento x Resolução, bem como os respectivos coeficientes angular e linear das retas ajustadas pelo Método dos Mínimos Quadrados que representam a tendência desses gráficos. No Teste 1, obteve-se uma tendência crescente da precisão do algoritmo de calibração em função da resolução das imagens usadas. Tendências decrescentes do erro do algoritmo na determinação do posicionamento do objeto em relação ao *grid* foram obtidos quando aumentamos a resolução das imagens.

4.1.1 Parâmetros da Realização do Teste 1

Vemos na Tabela 4.4 os parâmetros da realização do Teste 1 utilizados para extrair os gráficos que seguem no restante da Seção 4.1.

Tabela 4.4 Parâmetros do Teste 1

Teste 1						
Número de fotos por teste	1					
Ângulo da câmera em relação ao <i>grid</i>	0 ° em X	0 ° em Y	0 ° em Z	-	± 20 °	-
Número de imagens geradas por foto	10					
Porcentagem de redução da resolução das imagens	10%					
Número de pontos marcados no <i>grid</i>	24					
Erro observado	Relativo (Percentual / dB)					
Distância entre centro óptico da câmera e eixo X do <i>grid</i>	$X_0 = 96,73 \text{ cm}$					
Distância entre centro óptico da câmera e eixo Y do <i>grid</i>	$Y_0 = 96,73 \text{ cm}$					
Distância entre centro óptico da câmera e eixo Z do <i>grid</i>	$\sqrt{X_0^2 + Y_0^2} = 136,8 \text{ cm}$					
Altura do centro óptico da câmera em relação à origem do <i>grid</i>	$Z_0 = 3,75 \text{ cm}$					

4.1.2 Estimativa da Posição da Câmera em Relação ao Eixo X do *Grid*

Com o coeficiente angular da Tabela 4.5 obtido a partir da reta de ajuste linear da Figura 4.2 (b), a tendência do erro do algoritmo de calibração decrescia quando se aumentava a resolução das imagens. Tal comportamento já era previsível, no entanto, esperava-se que fosse mais acentuado quando se comparou o $E_{\text{Relativo}, X}$ obtido da imagem com a resolução mais baixa com o $E_{\text{Relativo}, X}$ obtido da imagem de resolução mais alta, visto que há uma diferença de cerca de 10 megapixels entre essas resoluções. Vemos também que, para as imagens com mais de 1 megapixel, o erro praticamente se mantém constante. A curva acentua-se para resoluções muito baixas, quando de fato a determinação das coordenadas dos alvos no *grid* se torna inviável.

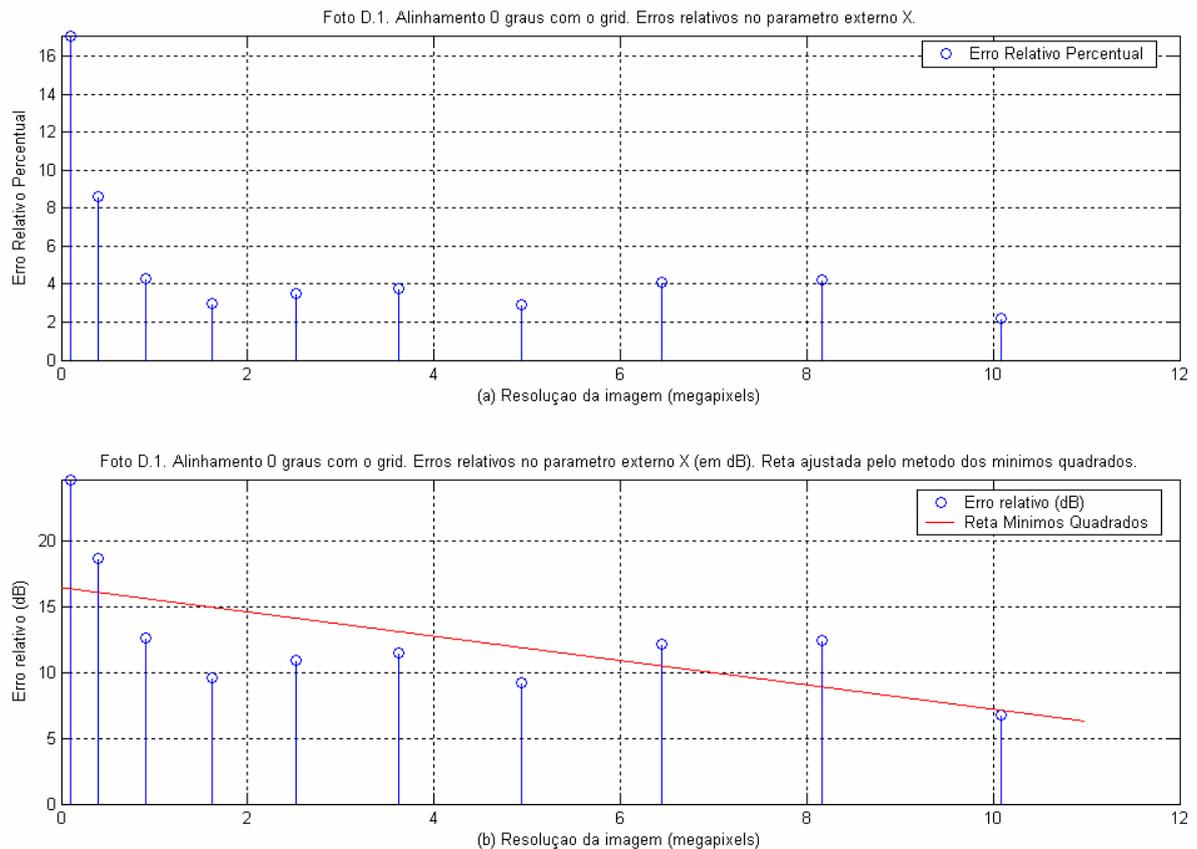


Figura 4.2 Erros relativos no parâmetro de calibração X: (a) percentuais e (b) em dB

Tabela 4.5 Ajuste linear nas estimativas do parâmetro X_0

Erro percentual médio	$X_0 = 5,36\%$
Coefficiente angular	-0.93 dB/megapixel
Coefficiente linear	16,45 dB

4.1.3 Estimativa da Posição da Câmera em Relação ao Eixo Y do *Grid*

O comportamento da curva de erro da coordenada Y em função das resoluções das imagens utilizadas (Tabela 4.6) foi muito similar ao resultado encontrado para o eixo X. na Seção 4.1.2. Isto também já era esperado visto que o eixo focal da câmera foi posto na direção da bissetriz dos eixos X e Y do *grid*: esperava-se que houvesse uma repetição dos dados observados na Tabela 4.5.

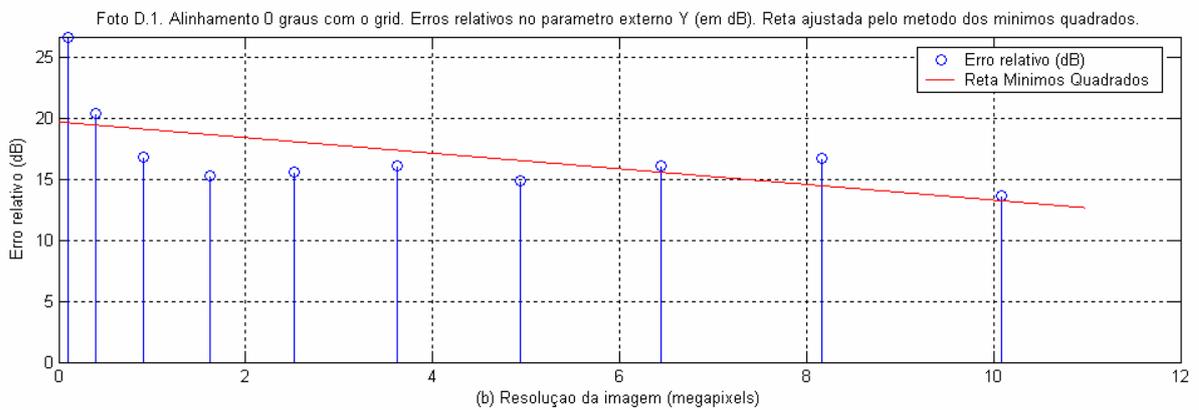
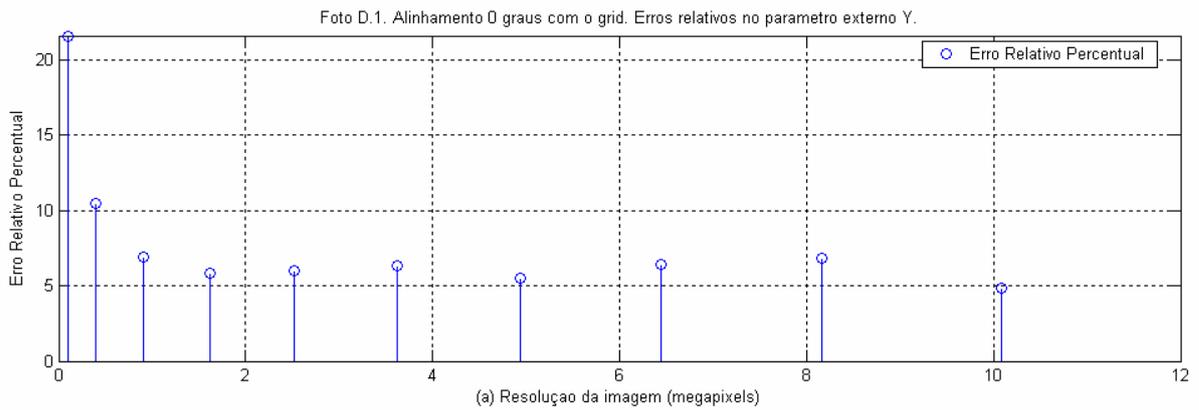


Figura 4.3 Erros relativos no parâmetro de calibração Y: (a) percentuais e (b) em dB

Tabela 4.6 Ajuste linear nas estimativas do parâmetro Y_0

Erro percentual médio	$Y_0 = 8,08\%$
Coefficiente angular	-0,64 dB/megapixel
Coefficiente linear	19,71 dB

4.1.4 Estimativa da Posição da Câmera em Relação ao Eixo Z do *Grid*

A tendência de erro do algoritmo sofreu uma mudança notável quando analisamos seu comportamento ao longo da direção vertical (eixo Z). Esperava-se que o erro das coordenadas geradas pelo algoritmo de calibração para o eixo Z (Figura 4.4) mantivessem tendências semelhantes àsquelas observadas nas análises com relação aos eixos X e Y.

Tentou-se estimar o posicionamento do eixo focal da câmera como sendo no centro na lente, no que diz respeito ao eixo $Z_{CÂMERA}$ (Figura 3.1). Não foi possível ter certeza de seu posicionamento em relação aos eixos $X_{CÂMERA}$ e $Y_{CÂMERA}$ pois seria necessário fazer a desmontagem da câmera, o que estava fora do escopo deste estudo. Com isso, um erro absoluto pode ter sido introduzido no estudo.

Embora não tenhamos precisão na determinação da posição real do eixo focal da câmera, sabemos que a coordenada Z estimada pelo algoritmo seria aquela mais suscetível a erros dado que sua análise foi feita na direção perpendicular à da ligação entre o *grid* e a câmera. Dessa forma, optou-se por fazer outros dois ajustes lineares para o erro do eixo Z variando a altura do *grid* em relação à câmera.

Veremos nas Tabelas 4.7, 4.8 e 4.9 a seguir, os resultados de três ajustes lineares realizados somente para verificar se o erro de precisão da coordenada Z estava realmente prejudicado em relação aos eixos X e Y devido ao pequeno ângulo de observação das condições originais do teste.

Obeve-se um comportamento inesperado dos erros relativos encontrados nas estimativas de Z_0 quando a altura do eixo focal da câmera foi suposta estando a 3,75 cm acima da origem do *grid*. Observa-se na Figura 4.4 (b) que a tendência para os erros relativos é crescente com o aumento da resolução das imagens.

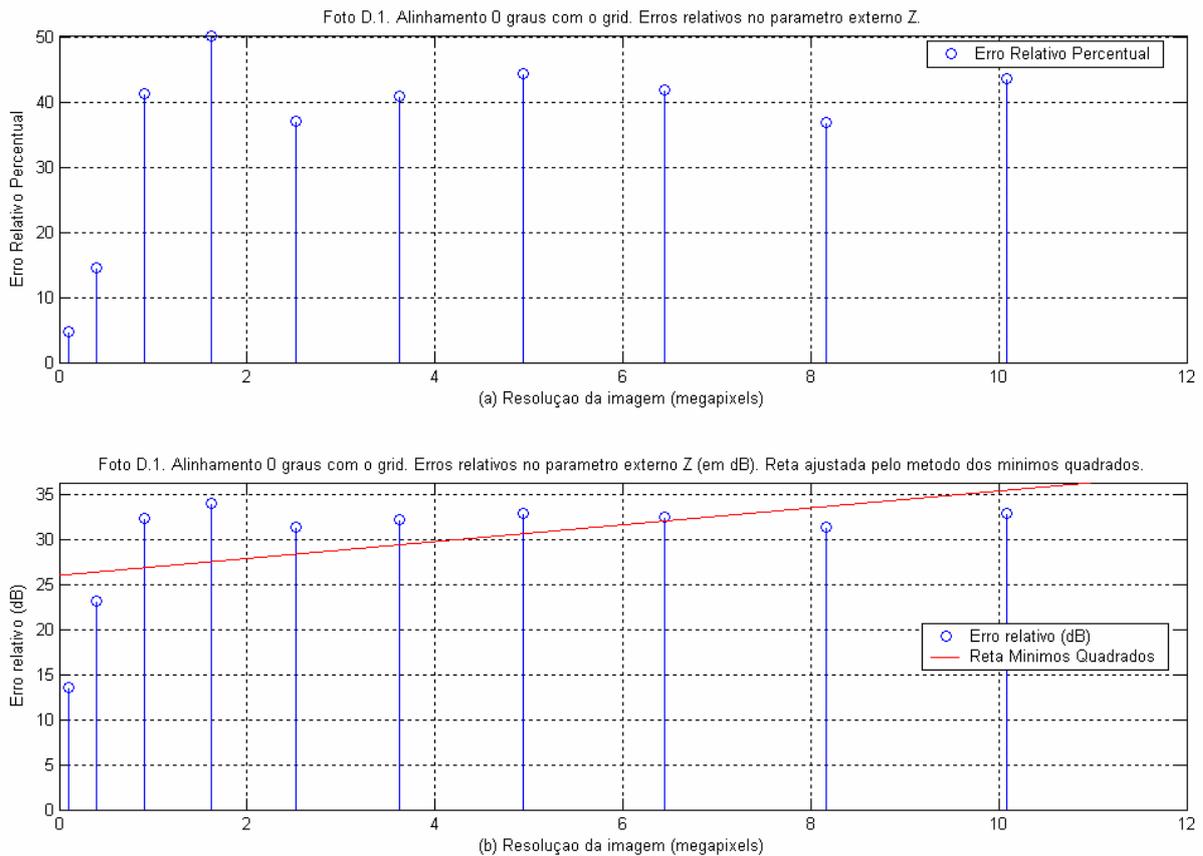


Figura 4.4 Erros relativos no parâmetro de calibração Z , assumindo $Z_0 = 3,75$ cm: (a) percentuais e (b) em dB

Tabela 4.7 Ajuste linear nas estimativas do parâmetro Z_0

Erro percentual médio	$Z_0 = 35,52\%$
Coefficiente angular	0,94 dB/megapixel
Coefficiente linear	25,99 dB

No teste feito estimando que a altura do eixo focal da câmera estaria 2,1 cm mais alto em relação à origem dos eixos do *grid*, tivemos um comportamento mais parecido com o esperado, ou seja, uma estimativa linear do comportamento da tendência da precisão do algoritmo com um coeficiente angular negativo. No entanto, podemos observar nos gráficos da Figura 4.5 que houve uma oscilação muito acentuada dos erros da coordenada Z mesmo

com resoluções maiores que 1 megapixel. Contudo, a maioria dos erros da estimativa do algoritmo se concentra abaixo de 10% em relação às medidas reais.

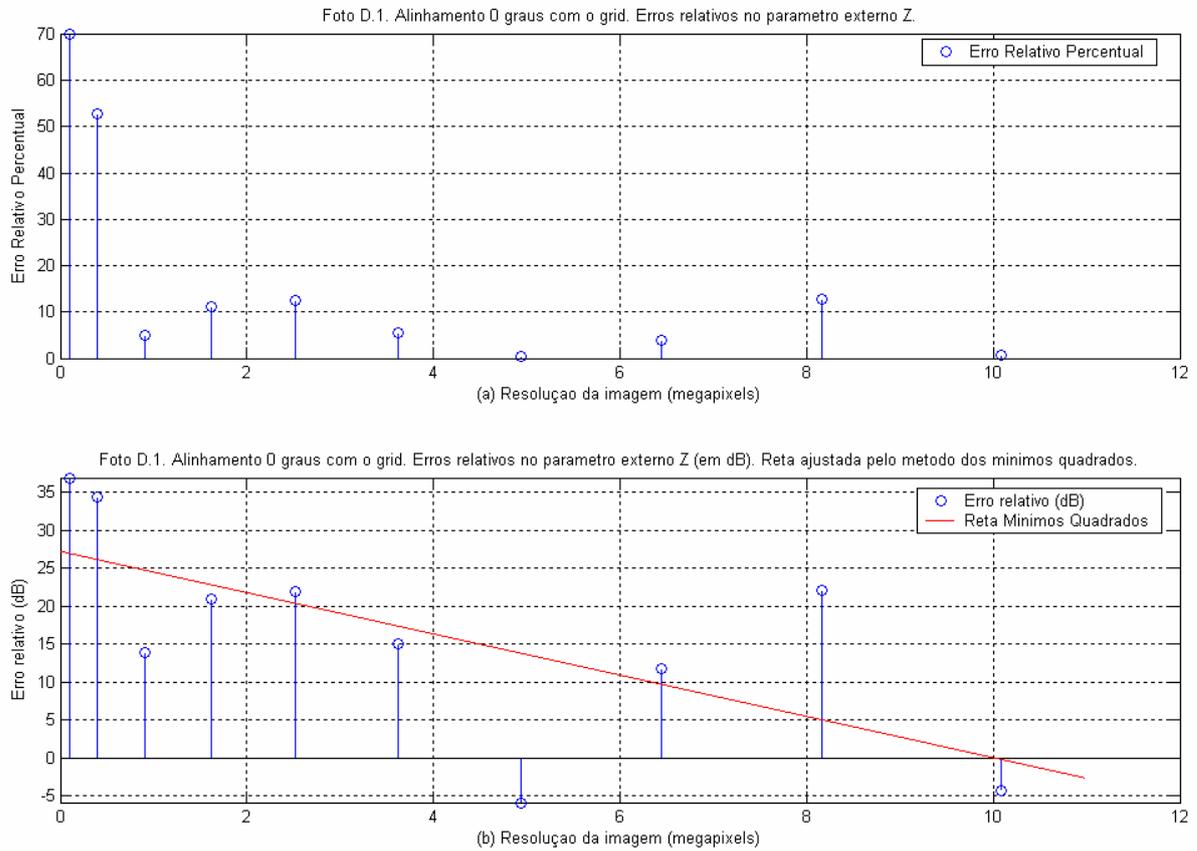


Figura 4.5 Erros relativos no parâmetro de calibração Z , assumindo $Z_0 = 2,1$ cm: (a) percentuais e (b) em dB

Tabela 4.8 Ajuste linear nas estimativas do parâmetro Z_0

Erro percentual médio	$Z_0 = 17,46\%$
Coefficiente angular	-2,71 dB/megapixel
Coefficiente linear	27,20 dB

Da mesma forma que não pudemos explicar com exatidão a alteração da tendência da curva de erros no experimento com $Z = 3,75$ cm (Tabela 4.7), acreditamos que o comportamento dos erros das estimativas para Z_0 geradas pelo algoritmo não tenha sido como

o esperado devido ao erro na estimativa da posição do eixo focal da câmara. Fizemos o teste com o eixo Z mais uma vez, situando o eixo focal da câmara, por hipótese, a 0,55 cm acima da origem do *grid*.

A escolha das três posições para Z_0 foi baseada nos parâmetros a seguir: 1) em $Z_0 = 3,75$ cm encontra-se a altura do centro da lente câmara; 2) $Z_0 = 2,1$ cm é a estimativa correspondente à imagem de maior resolução. Obteve-se o menor erro em relativo com esta estimativa; 3) em $Z_0 = 0,55$ cm encontra-se a altura da origem do *grid*. As duas análises observadas nas Figuras 4.5 e 4.6 não requereram novas fotos. Apenas mudou-se o valor do parâmetro Z_0 utilizado no procedimento que gerou a análise da Figura 4.4. para os valores $Z_0 = 2,1$ cm (Figura 4.5) e para $Z_0 = 0,55$ cm (Figura 4.6).

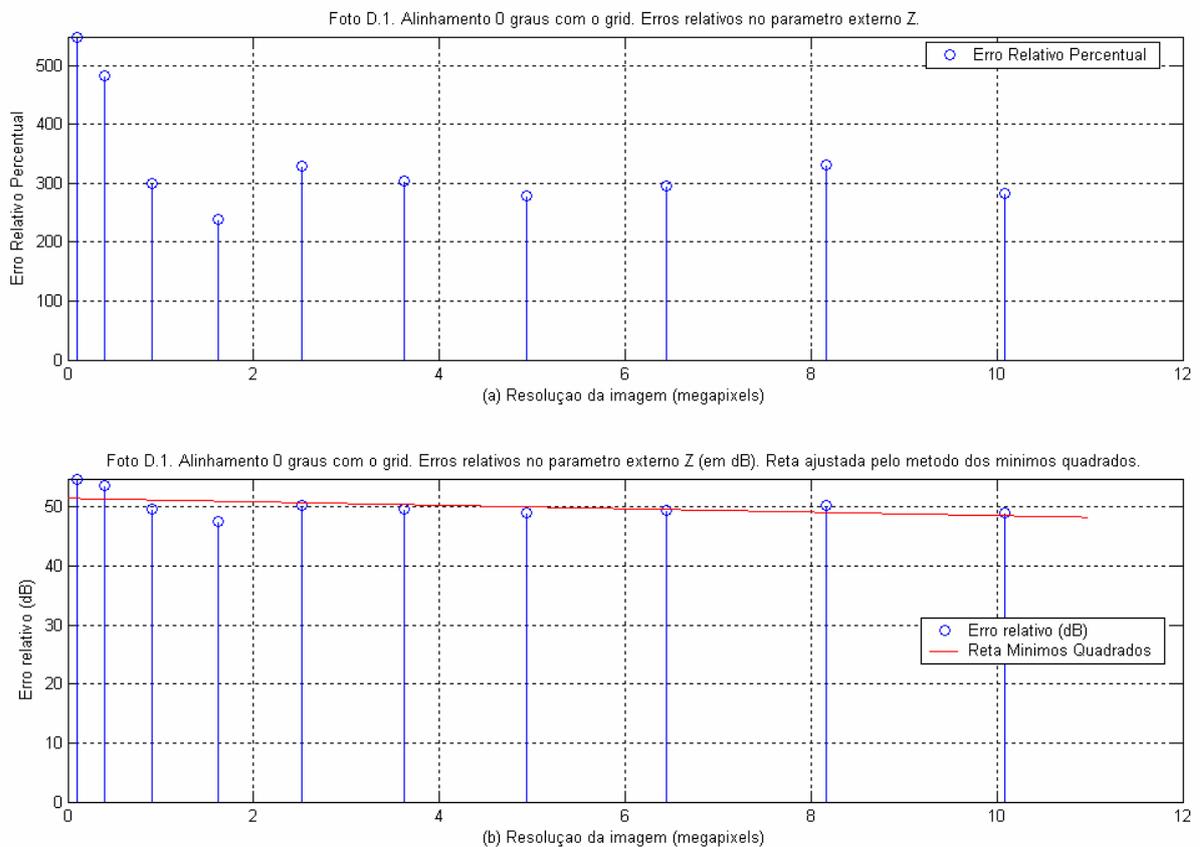


Figura 4.6 Erros relativos no parâmetro de calibração Z , assumindo $Z_0 = 0,55$ cm: (a) percentuais e (b) em dB

Tabela 4.9 Ajuste linear nas estimativas do parâmetro Z_0

Erro percentual médio	$Z_0 = 339,61\%$
Coefficiente angular	-0,29 dB/megapixel
Coefficiente linear	51,48 dB

Os três testes realizados com o eixo Z nos ajudaram a verificar que a nossa estimativa inicial da posição do eixo focal na direção do eixo Z *grid* não foi bem determinada. Vimos neste teste que, estimando que o eixo focal da câmera situa-se 0,55 cm mais alto que a origem do *grid* na direção do eixo Z , o gráfico apresentou o mesmo comportamento daquele observado para os gráficos de Precisão x Resolução das imagens gerados para os eixos X e Y , no entanto, com um erro fixo de 200% em todos os valores. Devido a este erro constante para todas as imagens, constatamos que a melhor estimativa para a coordenada Z do eixo focal da câmera é próxima de 2,1 cm (Figura 4.5).

Vale ressaltar neste ponto que os gráficos em dB estão com um ganho acrescido de 40 dB somente para facilitar as suas visualizações.

O erro do algoritmo ao estimar a coordenada Z do eixo focal da câmera apresentou uma forte queda desde a imagem com resolução mais baixa até a imagem com resolução próxima de 1 megapixel. A partir da resolução de 1 megapixel, o comportamento do erro de estimativa da coordenada Z do posicionamento da câmera manteve-se praticamente constante, permitindo-nos estimar um comportamento linear com um coeficiente angular negativo e próximo de zero para os erros do algoritmo nesta coordenada.

4.1.5 Estimativa da Posição da Câmera em Relação aos Eixos X, Y, Z do Grid

Para completar os resultados dos erros das estimativas de posição da câmera, é interessante observar que o comportamento médio do erro do algoritmo de calibração ao estimar as coordenadas do objeto é semelhante àquele observado para as retas ajustadas na Seção 4.1.

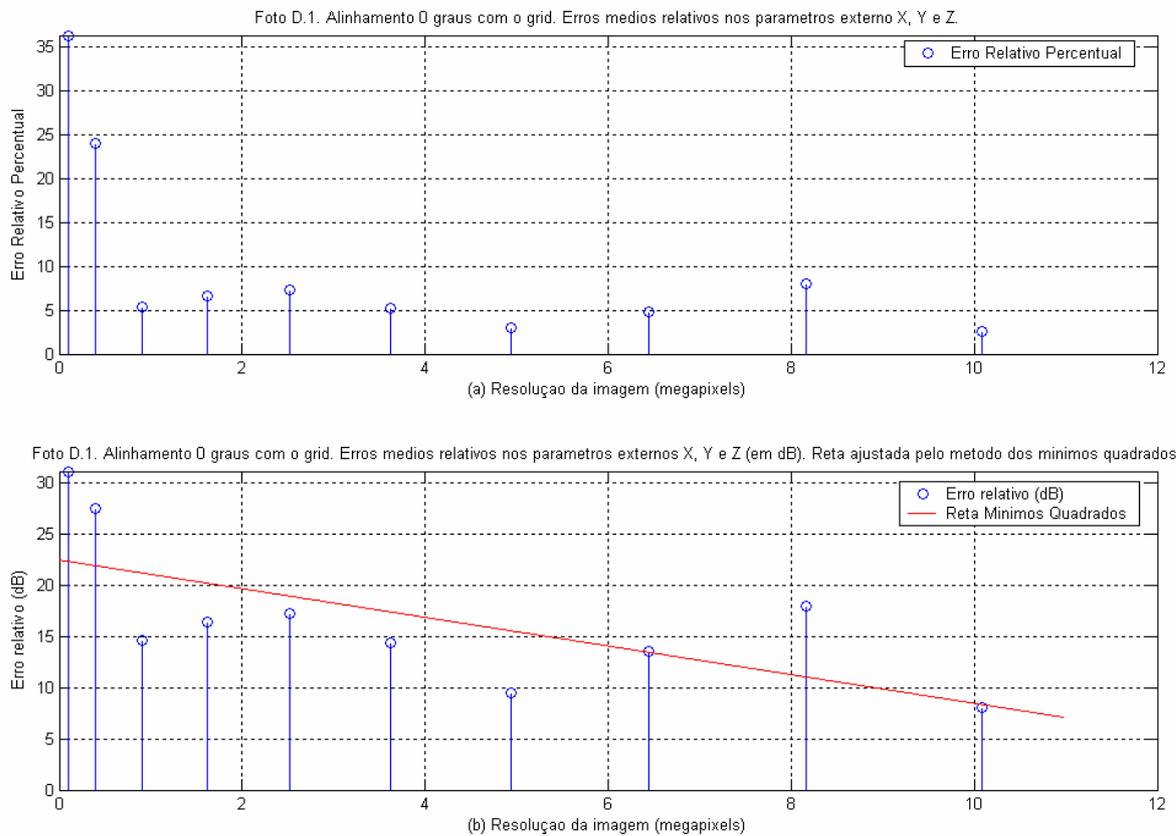


Figura 4.7 Erros médios nos eixos X, Y, Z, assumindo $Z_0 = 2,1$ cm : (a) percentuais e (b) em dB

Tabela 4.10 Ajuste linear para erro médio nas estimativas dos parâmetros X_0 , Y_0 e Z_0

Erro percentual médio	10,30%
Coefficiente angular	-1,40 dB/megapixel
Coefficiente linear	22,51 dB

Para os coeficientes médios do ajuste linear dos erros em dB (Tabela 4.10), temos as seguintes observações: Os erros de estimativa do posicionamento da câmera diminuem muito pouco em função da resolução das imagens utilizadas; A grande influência da resolução das imagens sobre a tendência da reta ajustada ocorreu para as imagens com resoluções abaixo de 1 megapixel; Os coeficientes lineares próximos de 20 das retas ajustadas para os erros das estimativas de X_0 , Y_0 e Z_0 , indicam que, para todos os gráficos, houve um erro próximo e constante de (20 – 40) dB, ou seja, 10% de erro nas estimativas do algoritmo para as coordenadas da câmera em relação ao *grid*.

Conforme mencionado no início da Seção 4.1, para se obter os gráficos de E_{relativo} percentual X Resolução das imagens, multiplicou-se por 100 o vetor de erro relativo entre os valores das distâncias medidas com instrumentos e coordenadas estimadas pelo algoritmo.

O gráfico de erro médio em X, Y, Z (Figura 4.7) foi realizado assumindo-se que a altura do eixo focal da câmera é $Z_0 = 2,1$ cm. Esta hipótese levou ao resultado para o teste feito com erros no eixo Z.

4.1.6 Estimativa do Ângulo ϕ

O teste com o ângulo ϕ deve exibir erros na estimativa dos ângulos semelhantes aos erros observados para as estimativas das coordenadas da câmera em relação aos eixos do *grid*. O ângulo ϕ estimado pelo algoritmo corresponde a uma rotação em torno do eixo $Y_{\text{CÂMERA}}$. O eixo $Y_{\text{CÂMERA}}$ encontra-se na direção vertical e orientado para baixo, como pudemos ver na Figura 3.1.

Foram geradas rotações de -20° e $+20^\circ$ em torno do eixo $Y_{\text{CÂMERA}}$. Observa-se nas Seções 4.1.6.1 e 4.1.6.2 os erros de estimativas de rotação da câmera para os ângulos gerados em torno de $Y_{\text{CÂMERA}}$. As fotos correspondentes às rotações de -20° e $+20^\circ$ encontram-se no Apêndice D, (fotos D.2 e D.3 , respectivamente).

4.1.6.1 Câmera Girada de - 20° sobre o Eixo $Y_{CÂMERA}$

Neste teste posicionamos a câmera girada de 20° para a esquerda em torno de $Y_{CÂMERA}$. Os valores dos ângulos estimados pelo algoritmo podem ser vistos na Tabela 4.11 a seguir.

Tabela 4.11 Valores dos ângulos estimados para rotação em $\phi_0 = -20^\circ$ ao redor do eixo $Y_{CÂMERA}$

Foto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Resolução em megapixels	10,08	8,16	6,45	4,94	3,63	2,52	1,61	0,91	0,40	0,10
Ângulo Estimado para ϕ em graus	-13,90	-13,40	-14,03	-13,44	-13,88	-13,88	-14,20	-14,51	-10,41	-13,49

A foto 1 na Tabela 4.11 corresponde à foto D.2 (Apêndice D) do Teste 1 e as outras fotos (2 a 10), imagens de menor resolução criadas a partir da foto D.2. Os procedimentos de tomada da foto D.2 encontram-se na Seção 3.1.1.3.

Temos na Figura 4.8 e na Tabela 4.12 a seguir, os gráficos correspondentes aos erros encontrados a partir da diferença relativa entre o ângulo conhecido em torno do eixo $Y_{CÂMERA}$ ($\phi_0 = -20^\circ$) e o ângulo estimado pelo algoritmo.

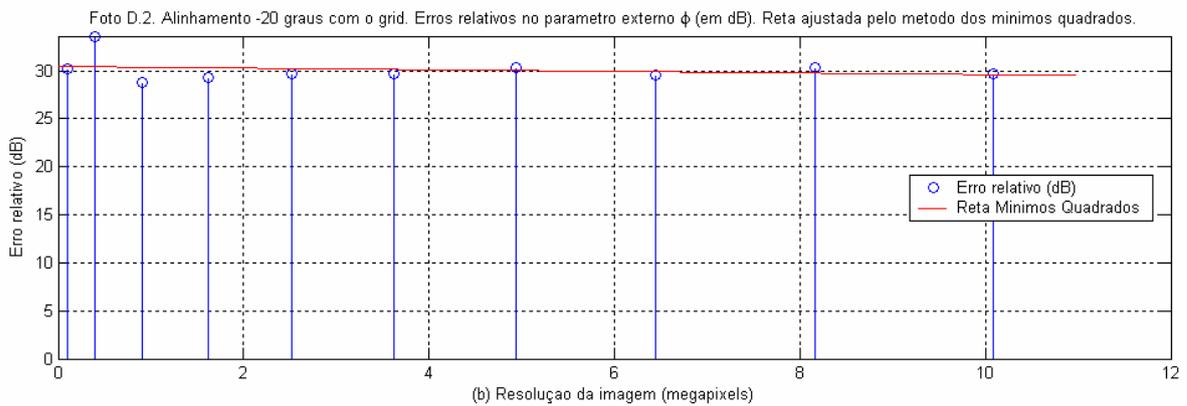
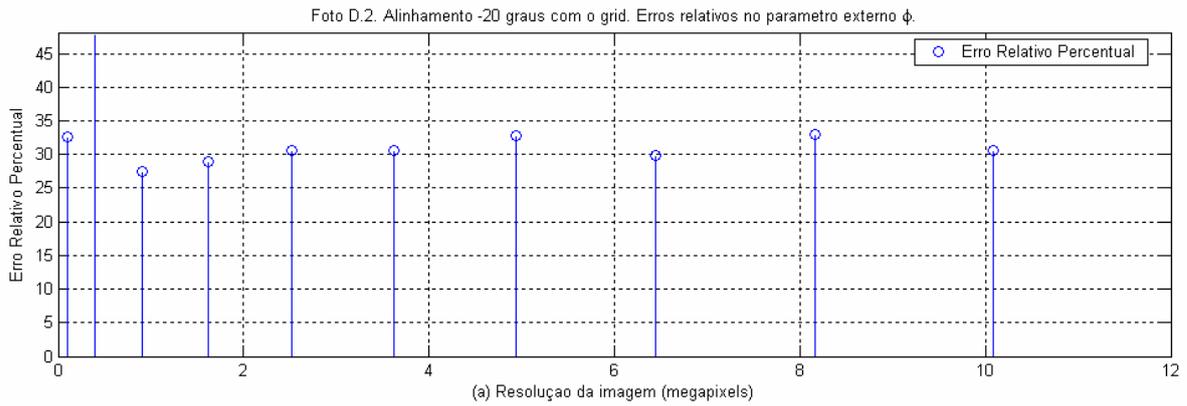


Figura 4.8 Erro relativo entre ângulo ϕ estimado e ângulo ϕ medido com transferidor

Tabela 4.12 Ajuste linear para erro na estimativa do parâmetro ϕ_0

Erro percentual médio	$\phi_0 = 32,44\%$
Coefficiente angular	-0,09 dB/megapixel
Coefficiente linear	30,45 dB

Podemos ver pela Tabela 4.11 e pelo gráfico da Figura 4.8 (a) que o algoritmo de calibração errou em média 32% abaixo do valor real medido para a rotação da câmera em $Y_{CÂMERA}$. Este erro pode ter sido provocado pelo mesmo problema já observado anteriormente: a falta de precisão em se definir a posição do centro óptico da câmera.

4.1.6.2 Câmera Girada de + 20° sobre o Eixo $Y_{CÂMERA}$

Vemos na Tabela 4.13 os valores estimados pelo algoritmo para o ângulo de +20° gerados na câmera em torno do eixo $Y_{CÂMERA}$. O erro médio da estimativa de ϕ_0 foi de 32,7% para baixo e a possível causa para este erro já foi explicada na Seção 4.1.6.1.

Tabela 4.13 Valores dos ângulos estimados para rotação em $\phi_0 = +20^\circ$ ao redor do eixo $Y_{CÂMERA}$

Foto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Resolução em megapixels	10,08	8,16	6,45	4,94	3,63	2,52	1,61	0,91	0,40	0,10
Ângulo Estimado para ϕ em graus	13,82	14,16	14,30	14,04	14,36	14,27	13,51	14,67	14,28	8,45

Pode-se ver pelos gráficos da Figura 4.9 e pela Tabela 4.14 que a influência da resolução na precisão do algoritmo de calibração foi acentuada apenas para imagens com resoluções abaixo de 1 megapixel. O erro percentual para a estimativa de ϕ_0 obtido com a imagem de 0,1 megapixels foi o único que esteve distante do erro médio. Os demais erros tiveram valores próximos da média, gerando um coeficiente angular próximo de zero, como podemos ver na Tabela 4.14.

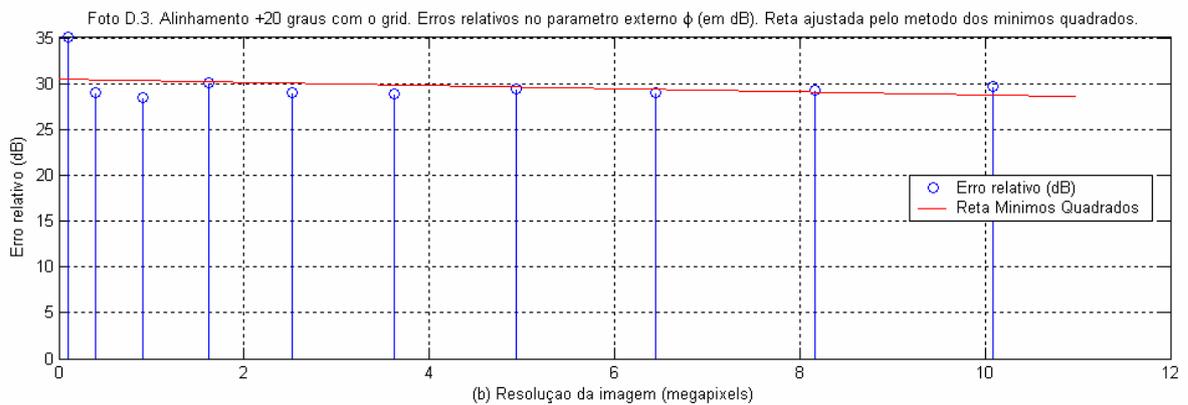
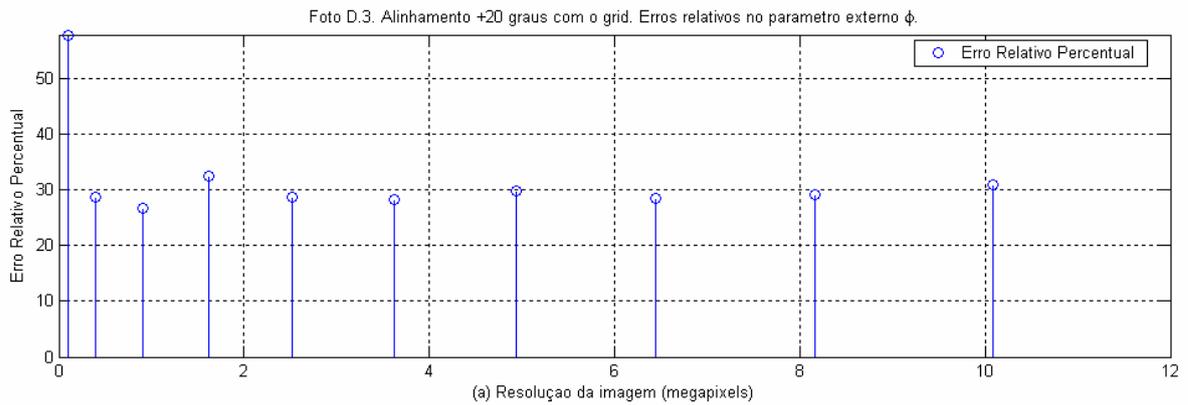


Figura 4.9 Erro relativo entre ângulo ϕ estimado e medido com transferidor

Tabela 4.14 Ajuste linear para erro na estimativa do parâmetro ϕ_0

Erro percentual médio	$\phi_0 = 32,07\%$
Coefficiente angular	-0,17 dB/megapixel
Coefficiente linear	30,57 dB

4.1.6.3 Estimativa do Ângulo ϕ em Relação aos dois Ângulos gerados

A Tabela 4.15 contém os valores médios entre aqueles encontrados nas Tabelas 4.13 e 1.14. O coeficiente angular médio obtido não mostrou um relacionamento acentuado entre as estimativas do parâmetro ϕ_0 e as resoluções das imagens.

Tabela 4.15 Ajuste linear para erro médio na estimativa do parâmetro ϕ_0

Erro percentual médio em ϕ	$\phi_0 = 32,26\%$
Coefficiente angular	-0,13 dB/megapixel
Coefficiente linear	30,51 dB

4.1.7 Estimativa da Posição da Câmera em Relação aos Eixos X, Y, Z do *Grid* com Erros Relativos à Imagem de Maior Resolução

Devido aos resultados das Seções 4.1.2 até 4.1.6 indicarem erros de estimativas de posição e rotação maiores que 5% para todos os parâmetros de calibração analisados, optou-se por repetir o Teste 1 usando-se os parâmetros de calibração da imagem com resolução mais alta como referência para calcular os erros de estimativa com as outras imagens. Dessa forma, não consideraremos aqui a diferença entre as estimativas e os parâmetros reais medidos com a régua e transferidor.

Não foi exibido o erro relativo às imagens de 10.08 megapixels nos gráficos que seguem pois o mesmo seria nulo, já que foram feitas medidas relativas à esta estimativa.

4.1.7.1 Estimativa da Posição da Câmera em Relação ao Eixo X do *Grid*

O erro médio de 3,61% para a estimativa de X_0 (Tabela 4.16) foi 33% menor do que o erro médio obtido da câmera em relação ao eixo X_0 real da câmera, medido com a régua (Tabela 4.5). Conforme observado na Seção 4.1.2, a Figura 4.2 (a) exibiu uma queda acentuada dos erros quando a resolução das imagens aumentou até 1 megapixel. O mesmo comportamento dos erros relativos percentuais foi observado na Figura 4.10(a).

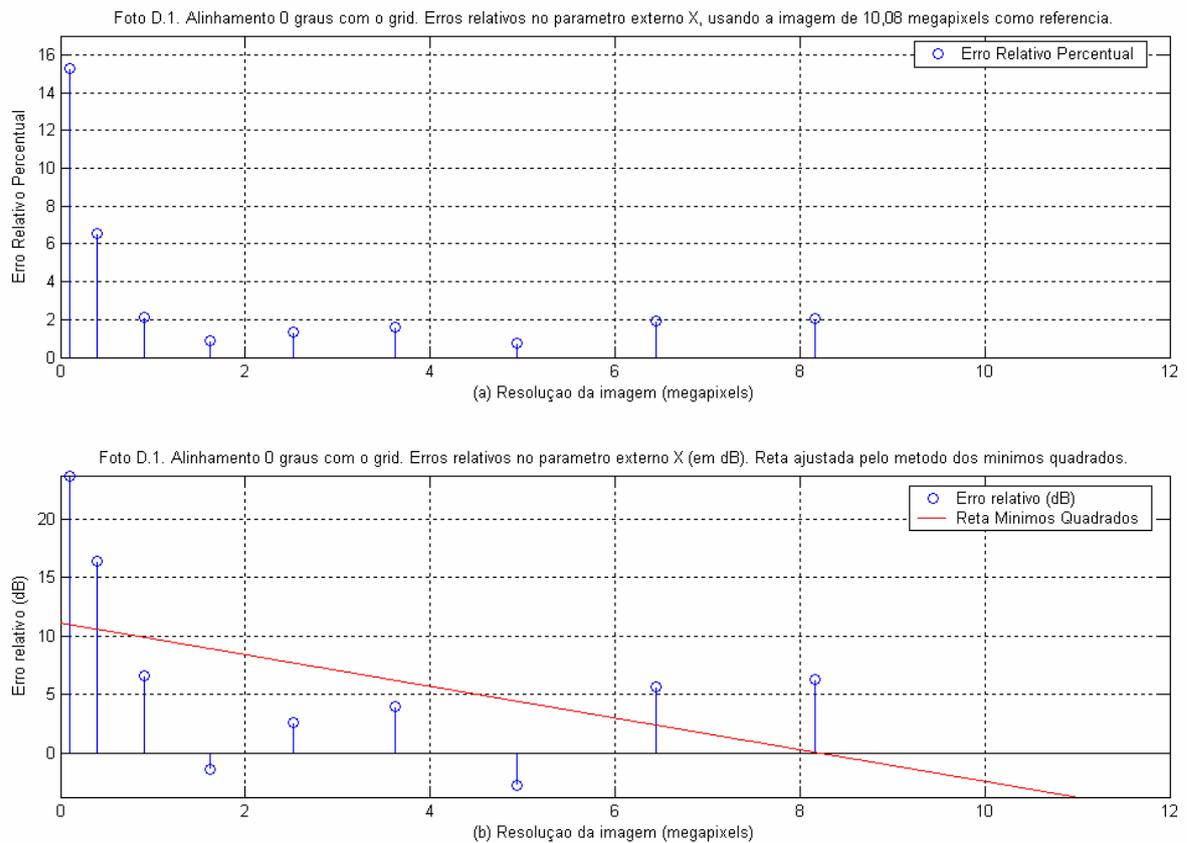


Figura 4.10 Erros relativos no parâmetro de calibração X, usando como referência o valor de X_0 estimado a partir da foto de 10,08 megapixels : (a) percentuais e (b) em dB

Obteve-se um erro relativo percentual médio inferior àquele obtido na análise da Seção 4.1.2. O valor absoluto do coeficiente angular foi maior nesta Seção quando comparado ao valor encontrado na Seção 4.1.2. Isto se deve aos erros absolutos de estimativa dos parâmetros de calibração ocorridos para todas as imagens quando usamos como referência as medidas calculadas com instrumentos para posição da câmera. É esperado que este efeito ocorra nas estimativas de todas as análises que têm como referência as estimativas da imagem de maior resolução. Um resultado semelhante será observado na Tabela 4.33 do Teste 2.

Tabela 4.16 Estimativa de X_0 usando foto de 10,08 megapixels e ajuste linear dos erros em relação a esta estimativa

X_0 10,08 megapixels	$X_0 = 91,18$ cm
Erro percentual médio	3,61%
Coefficiente angular	-1,35 dB/megapixel
Coefficiente linear	11,12 dB

4.1.7.2 Estimativa da Posição da Câmera em Relação ao Eixo Y do Grid

Observa-se na Tabela 4.17 que o erro médio de 3,81% foi 52,9% menor do que o erro médio obtido em relação às medidas estimadas para os parâmetros de posição da câmera em relação ao eixo Y (Tabela 4.6).

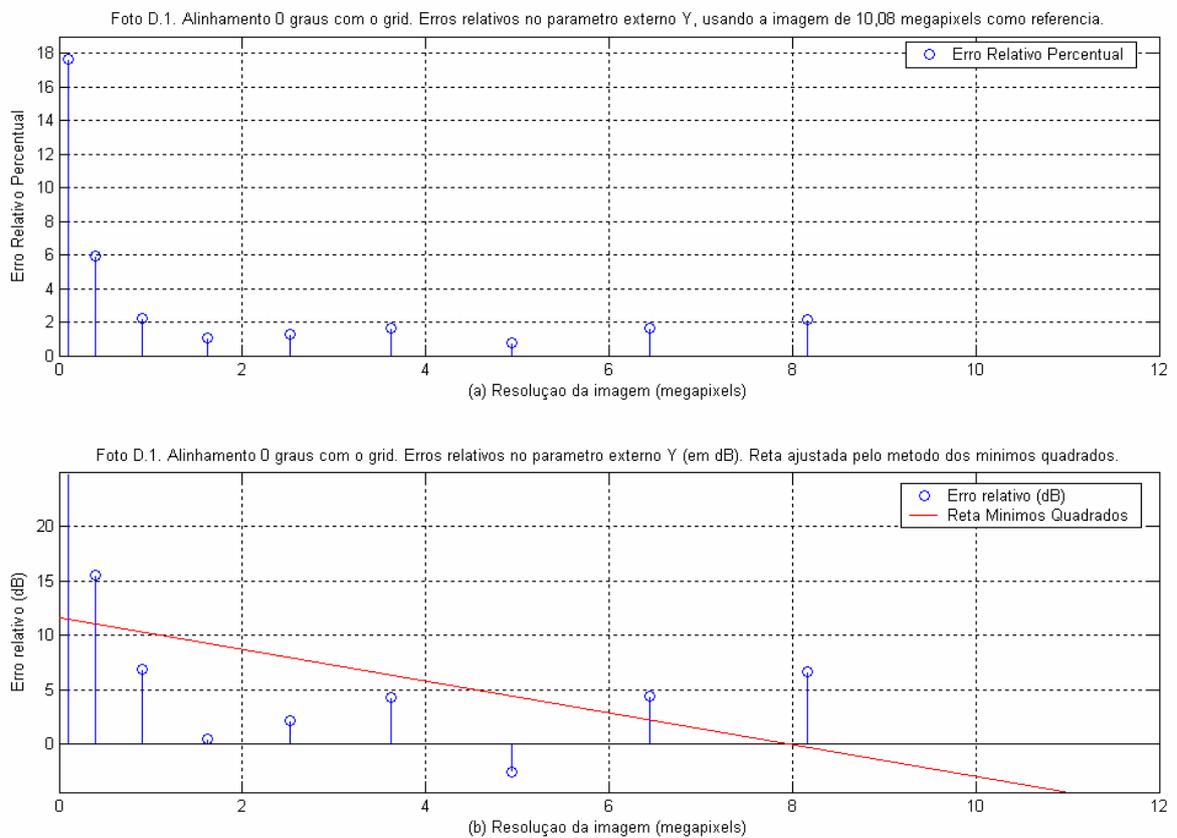


Figura 4.11 Erros relativos no parâmetro de calibração Y, usando como referência o valor de Y_0 estimado a partir da foto de 10,08 megapixels : (a) percentuais e (b) em dB

O comportamento dos erros relativos percentuais da Figura 4.11 (a) foi semelhante àquele observado na Figura 4.10 (a).

Tabela 4.17 Estimativa de Y_0 usando foto de 10,08 megapixels e ajuste linear dos erros em relação a esta estimativa

Y_0 10,08 megapixels	$Y_0 = 88,59$ cm
Erro percentual médio	3,81%
Coefficiente angular	-1,46 dB/megapixel
Coefficiente linear	11,62 dB

4.1.7.3 Estimativa da Posição da Câmera em Relação ao Eixo Z do *Grid*

O erro médio de 18,88% obtido para Z_0 (Tabela 4.18), foi 7,5% maior do que o erro médio obtido em relação às melhores medidas estimadas para os parâmetros de posição da câmera em relação ao eixo Z (Tabela 4.8).

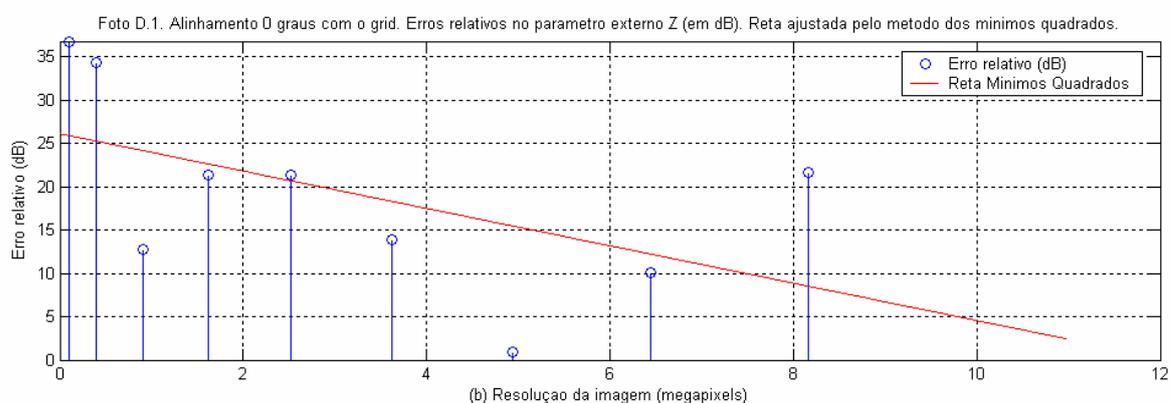
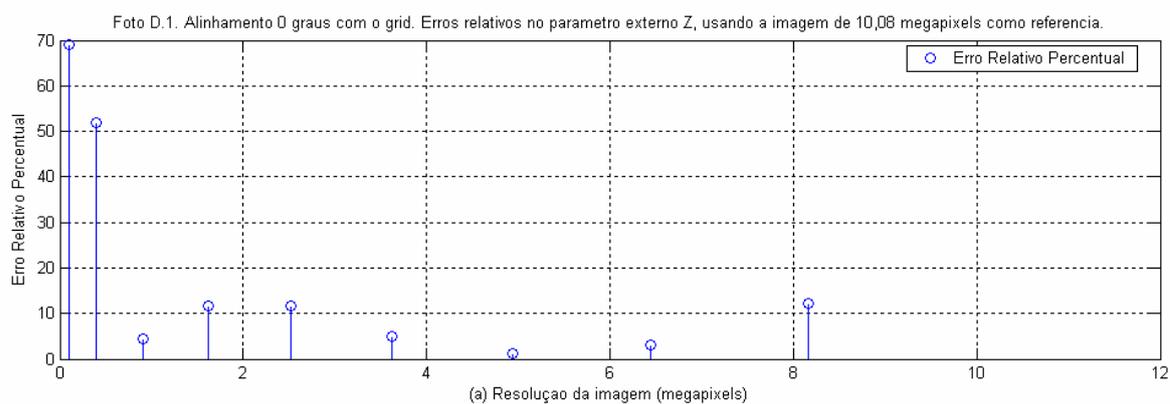


Figura 4.12 Erros relativos no parâmetro de calibração Z, usando como referência o valor de Z_0 estimado a partir da foto de 10,08 megapixels : (a) percentuais e (b) em dB

Tabela 4.18 Estimativa de Z_0 usando foto de 10,08 megapixels e ajuste linear dos erros em relação a esta estimativa

10,08 megapixels	$Z_0 = 1,70$ cm
Erro percentual médio	18,88%
Coefficiente angular	-2,16 dB/megapixel
Coefficiente linear	26,12 dB

4.1.7.4 Estimativa da Posição da Câmera em Relação aos Eixos X, Y, Z do Grid

Foram obtidos, em média, erros 14,9% menores em relação aos erros obtidos com as estimativas de posição da câmera relacionadas às medidas reais calculadas. A Figura 4.13 (a) mostra a distribuição dos erros percentuais para a média dos erros em X, Y, Z e a Figura 4.13 (b) mostra a reta de ajuste linear para as ordens de grandeza dos erros percentuais da Figura 4.13 (a). Na Tabela 4.19 encontram-se os coeficientes da reta ajustada pelo Método dos Mínimos Quadrados.

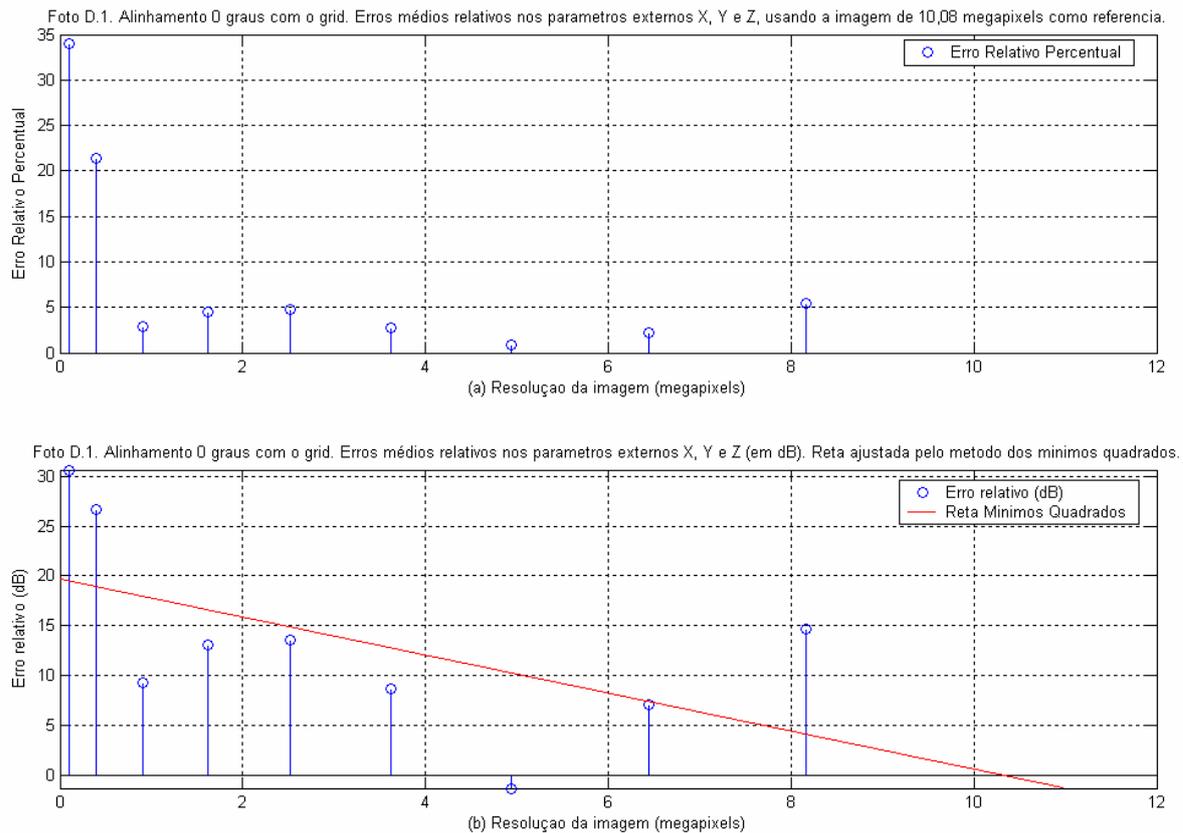


Figura 4.13 Erros médios nos eixos X, Y, Z : (a) percentuais e (b) em dB

Na Figura 4.13 vemos que o valor absoluto do coeficiente angular de ajuste para os erros médios relativos foi maior quando a referência foram os erros relativos das estimativas para a imagem de maior resolução. Uma comparação pode ser feita com a Tabela 4.10, na Seção 4.1.5.

Tabela 4.19 Parâmetros médios das estimativas em relação aos eixos X, Y, Z

Erro percentual médio	8,77%
Coeficiente angular	-1,91 dB/megapixel
Coeficiente linear	19,69 dB

4.1.8 Estimativa do Ângulo ϕ com Erros Relativos à Imagem de Maior Resolução

Conforme foi explicado na Seção 4.1.7, foram gerados novos resultados para os erros relativos da estimativa do parâmetro ϕ_0 . Os ajustes lineares desta seção para os erros relativos percentuais foram semelhantes àqueles observados nas Seções 4.1.7.1, 4.1.7.2, e 4.1.7.3. Houve uma relação mais acentuada entre as estimativas para os parâmetros de calibração e as resoluções das imagens quando a referência para a análise foi a estimativa da imagem de 10,08 megapixels.

4.1.8.1 Câmera Girada de - 20° sobre o Eixo $Y_{CÂMERA}$

Observa-se pela Tabela 4.20 que o erro percentual médio foi 86,8% menor em relação ao erro percentual médio obtido a partir das estimativas de posição da câmera relacionadas às medidas reais calculadas (ver Tabela 4.12). Uma possível razão para este erro relativo ter sido menor aqui foi que a estimativa de ϕ_0 para a imagem de 10,08 megapixels teve um erro absoluto grande, baixando a média de todos os erros relativos à esta estimativa.

Tabela 4.20 Estimativa de ϕ_0 usando foto de 10,08 megapixels e ajuste linear dos erros em relação a esta estimativa

10,08 megapixels	$\phi_0 = - 13,9^\circ$
Erro percentual médio	4,27%
Coefficiente angular	-1,13 dB/megapixel
Coefficiente linear	8,67 dB

Nota-se que o valor absoluto do coeficiente angular na Tabela 4.20 é maior do que aquele obtido na Seção 4.1.6.1 (Tabela 4.12). Conforme foi observado na Seção 4.1.7.1, este efeito era esperado tanto na análise dos parâmetros de posição da câmera quanto na análise dos parâmetros de rotação da câmera.

4.1.8.2 Câmera Girada de + 20° sobre o Eixo $Y_{CÂMERA}$

Os erros obtidos com a câmera girada de 20° para a direita foram, em média, 56,9% menores com as estimativas de posição da câmera relacionadas às medidas reais calculadas. Comparando os coeficientes da Tabela 4.4 com os coeficientes da Tabela 4.14, infere-se que havia um grande erro absoluto no cálculo do ângulo girado em torno de $Y_{CÂMERA}$.

Tabela 4.21 Estimativa de ϕ_0 usando foto de 10,08 megapixels e ajuste linear dos erros em relação a esta estimativa

ϕ_0 10,08 megapixels	$\phi_0 = + 13,82^\circ$
Erro percentual médio	6,54%
Coefficiente angular	-1,47 dB/megapixel
Coefficiente linear	16,91 dB

4.1.8.3 Estimativa do Ângulo ϕ em Relação aos dois Ângulos Gerados

O erro percentual médio da Tabela 4.22 foi, em média, 57,0% menor em relação ao erro percentual médio obtido com as estimativas de posição da câmera relacionadas às medidas reais calculadas (Tabela 4.15).

Tabela 4.22 Estimativa de ϕ_0 médio usando foto de 10,08 megapixels e ajuste linear dos erros em relação a esta estimativa

10,08 megapixels	$\phi_0 = 13,86^\circ$
Erro percentual médio	5,41%
Coefficiente angular	-1,30 dB/megapixel
Coefficiente linear	12,79 dB

4.1.9 Comparação das Estimativas em Relação às Medidas Reais e às Medidas da Imagem de 10,08 megapixels

Como foi visto no início da Seção 4.1.7, os erros percentuais relativos das estimativas dos parâmetros de calibração assumiram valores menores quando foram usadas as estimativas obtidas da imagem de 10,08 megapixels como referência. Os erros percentuais médios das estimativas aparecem na Tabela 4.23.

A Figura 4.1.4 mostra que a maioria dos erros médios em relação às medidas reais superou os erros em relação às estimativas da imagem com maior resolução. O eixo das abcissas contém erro médio em relação a cada eixo X, Y, Z, erro médio nas estimativas dos eixos X, Y, Z, e erro médio na estimativa de ϕ .

Na Tabela 4.23, encontra-se um resumo dos erros médios percentuais relativos aos parâmetros de calibração obtidos da imagem de maior resolução e um resumo desses erros relativos aos parâmetros de calibração medidos com instrumentos.

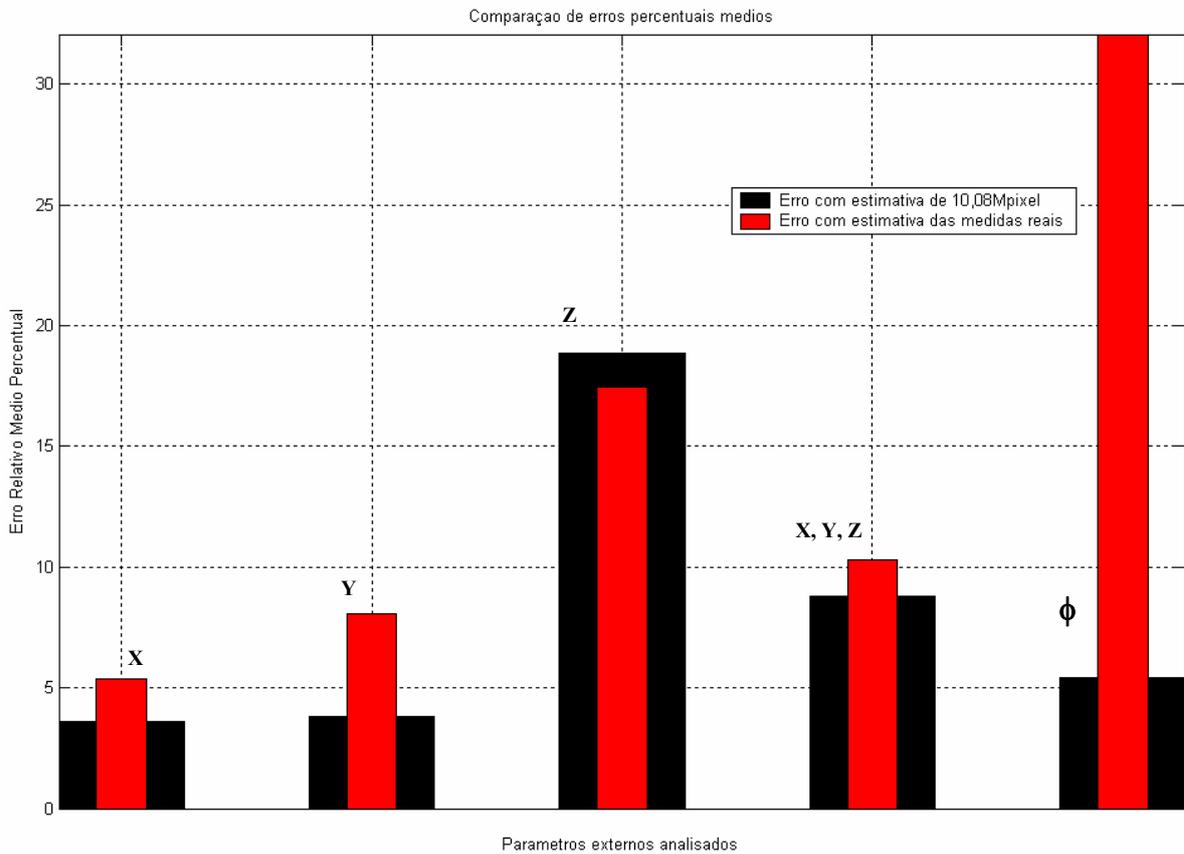


Figura 4.14 Comparação de erros

Tabela 4.23 Comparação de erros e coeficientes lineares

Teste	Parâmetros	Erros percentuais	Coefficiente angular (em dB/megapixel)	Coefficiente linear (em dB)
Erros e coeficientes lineares em relação às medidas calculadas com instrumentos	X	5,36	-0,93	16,45
	Y	8,08	-0,64	19,71
	Z	17,46	-2,71	27,20
	XYZ	10,30	-1,40	22,51
	ϕ	32,70	-0,13	30,51
Erros e coeficientes lineares em relação às medidas da imagem de resolução de 10,08 megapixels	X	3,61	-1,35	11,12
	Y	3,81	-1,46	11,62
	Z	18,88	-2,16	26,12
	XYZ	8,77	-1,91	19,69
	ϕ	5,41	-1,30	12,79

4.2 Teste 2 - Precisão da Calibração em Relação aos Eixos X, Y, Z e Ângulos ω , ϕ , κ

Os resultados do Teste 2 devem reproduzir os resultados obtidos no Teste 1. Foram geradas rotações isoladas nos eixos $X_{CÂMERA}$, $Y_{CÂMERA}$, e $Z_{CÂMERA}$. Uma foto foi tomada para a rotação de cada eixo. Para cada foto da câmera girada existe uma foto correspondente da câmera centrada com o *grid* antes da rotação. As fotos utilizadas para o Teste 2 encontram-se no Apêndice E.

Como dispusemos de três fotos alinhadas com o *grid*, exibiremos nas próximas seções a média entre os erros de estimação da posição (X_0 , Y_0 , Z_0) da câmera nas três imagens alinhadas. O valor absoluto do erro de estimação das coordenadas X, Y, Z foi plotado.

Optou-se por plotar o erro entre a estimativa do algoritmo para a posição da câmera e o seu valor real medido com régua e transferidor na montagem do teste. Este erro relativo foi utilizado para a análise dos parâmetros de translação (X_0 , Y_0 , Z_0) e de rotação (ω_0 , ϕ_0 , κ_0).

4.2.1 Parâmetros do Teste 2

A estrutura da Tabela 4.24 é semelhante àquela da Tabela 4.4 na Seção 4.1.1.

Tabela 4.24 Parâmetros do Teste 2

Teste 2						
Número de fotos por teste	1					
Ângulo da câmera em relação ao <i>grid</i>	0 ° em X	0 ° em Y	0 ° em Z	- 10 °	+ 10 °	+ 10 ° -
Número de imagens geradas por foto	10					
Porcentagem de redução da resolução das imagens	10%					
Número de pontos marcados no <i>grid</i>	24					
Erro observado	Relativo (Percentual / dB)					
Distância entre centro óptico da câmera e eixo X do <i>grid</i>	$X_0 = 42,64$ cm					
Distância entre centro óptico da câmera e eixo Y do <i>grid</i>	$Y_0 = 42,64$ cm					
Distância entre centro óptico da câmera e eixo Z do <i>grid</i>	$\sqrt{X_0^2 + Y_0^2}$ 60,3 cm					
Altura do centro óptico da câmera em relação à origem do <i>grid</i>	$Z_0 = 20,8$ cm					

4.2.2 Estimativa da Posição da Câmera em Relação ao Eixo X do *Grid*

Vemos na Figura 4.15 (a) que os erros relativos tiveram valores muito próximos para todas as resoluções. A reta ajustada pelo Método dos Mínimos Quadrados teve um coeficiente angular muito perto de zero, evidenciando pouca relação entre as resoluções das imagens e as estimativas de posição da câmera no eixo X. A reta ajustada encontra-se na Figura 4.15 (b) e os coeficientes do ajuste linear estão na Tabela 4.25.

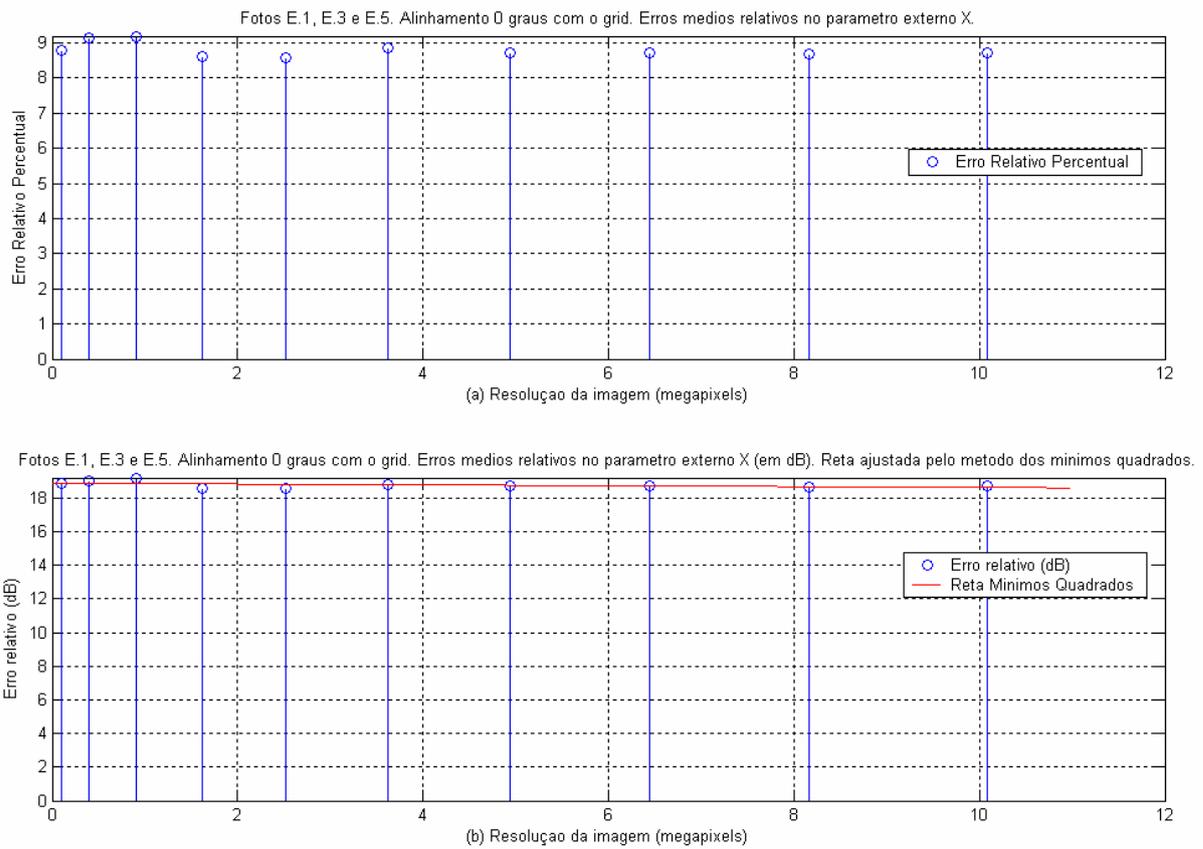


Figura 4.15 Erros médios relativos no parâmetro de calibração X: (a) percentuais e (b) em dB

Tabela 4.25 Ajuste linear nas estimativas do parâmetro X_0

Erro percentual médio	$X_0 = 8,80\%$
Coefficiente angular	-0.03 dB/megapixel
Coefficiente linear	18,90 dB

4.2.3 Estimativa da Posição da Câmera em Relação ao Eixo Y do *Grid*

Os erros relativos percentuais observados na Figura 4.16 (a) tiveram valores parecidos com aqueles encontrados na Seção 4.2.2. A variação da resolução também não teve uma influência

considerável nos erros do algoritmo ao estimar as coordenadas da câmera. A Tabela 4.26
exibe os coeficientes de ajuste linear para a reta da Figura 4.16 (b).

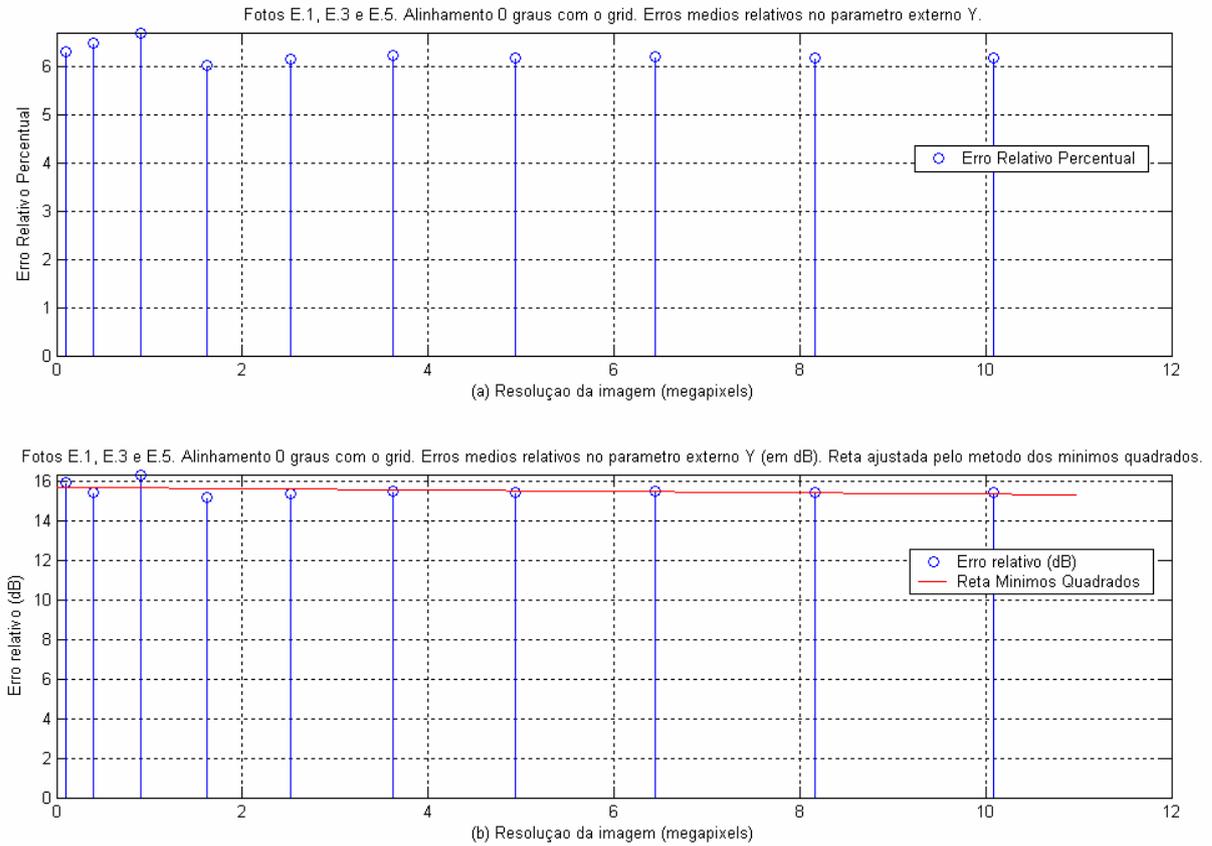


Figura 4.16 Erros médios relativos no parâmetro de calibração Y: (a) percentuais e
(b) em dB

Tabela 4.26 Ajuste linear nas estimativas do parâmetro Y_0

Erro percentual médio	$Y_0 = 6,28\%$
Coefficiente angular	-0,04 dB/megapixel
Coefficiente linear	15,70 dB

4.2.4 Estimativa da Posição da Câmera em Relação ao Eixo Z do Grid

Apesar de termos obtido um coeficiente angular positivo para a reta ajustada (Figura 4.17 (b)) a partir dos erros de estimação do algoritmo para posição da câmera (Tabela 4.27), vemos que ele é também muito próximo de zero. Este coeficiente só teria um valor relevante se ele representasse uma grande variação de erro quando comparássemos os erros obtidos a partir da imagem com resolução máxima com os erros obtidos a partir da imagem de resolução mínima gerada.

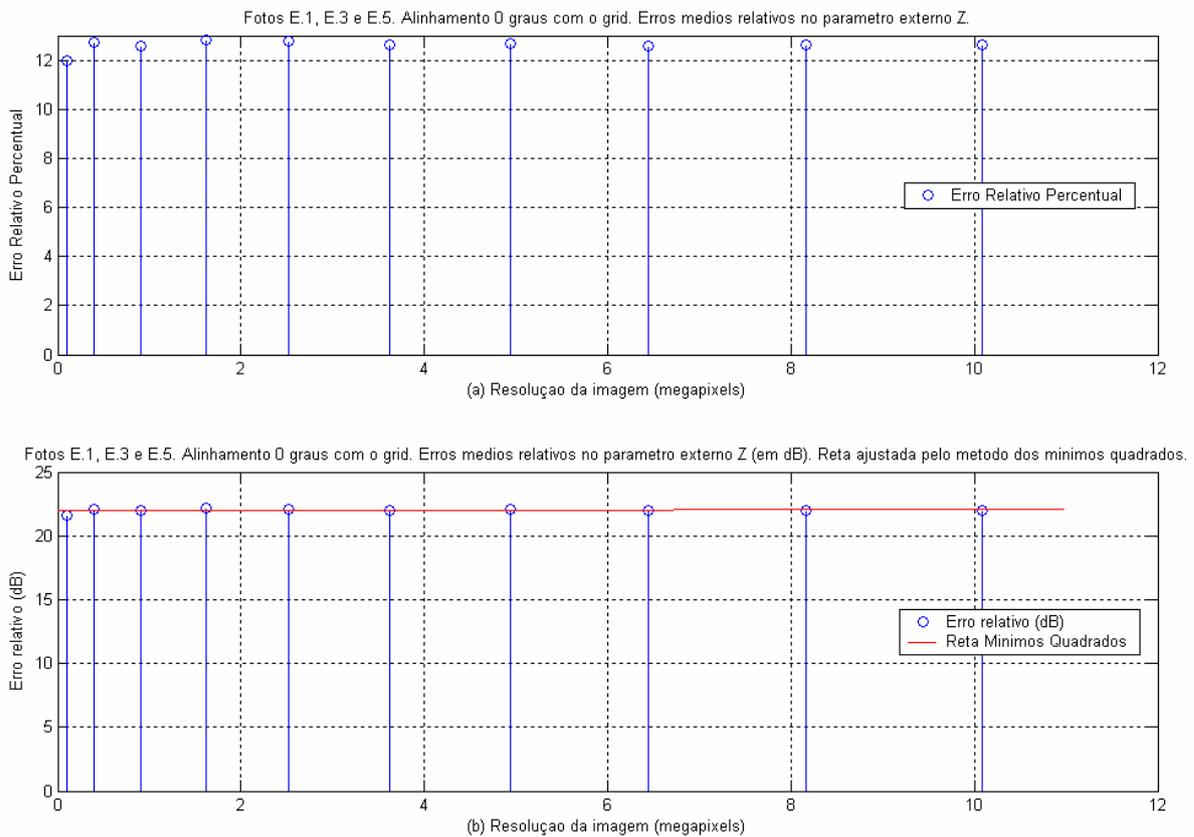


Figura 4.17 Erros médios relativos no parâmetro de calibração Z: (a) percentuais e (b) em dB

Tabela 4.27 Ajuste linear nas estimativas do parâmetro Z_0

Erro percentual médio	$Z_0 = 12,60\%$
Coefficiente angular	0,01 dB/megapixel
Coefficiente linear	21,97 dB

4.2.5 Estimativa da Posição da Câmera em Relação aos Eixos X, Y, Z do Grid

Para concluir esta primeira parte do Teste 2, na qual foram analisados os erros das estimativas das coordenadas X_0 , Y_0 e Z_0 de posição da câmera, vemos na Figura 4.18 (a), que o erro médio de estimativa das coordenadas menor que 10 %, validando parcialmente os resultados do Teste 1 no que diz respeito à eficiência do algoritmo para as condições de teste aplicadas.

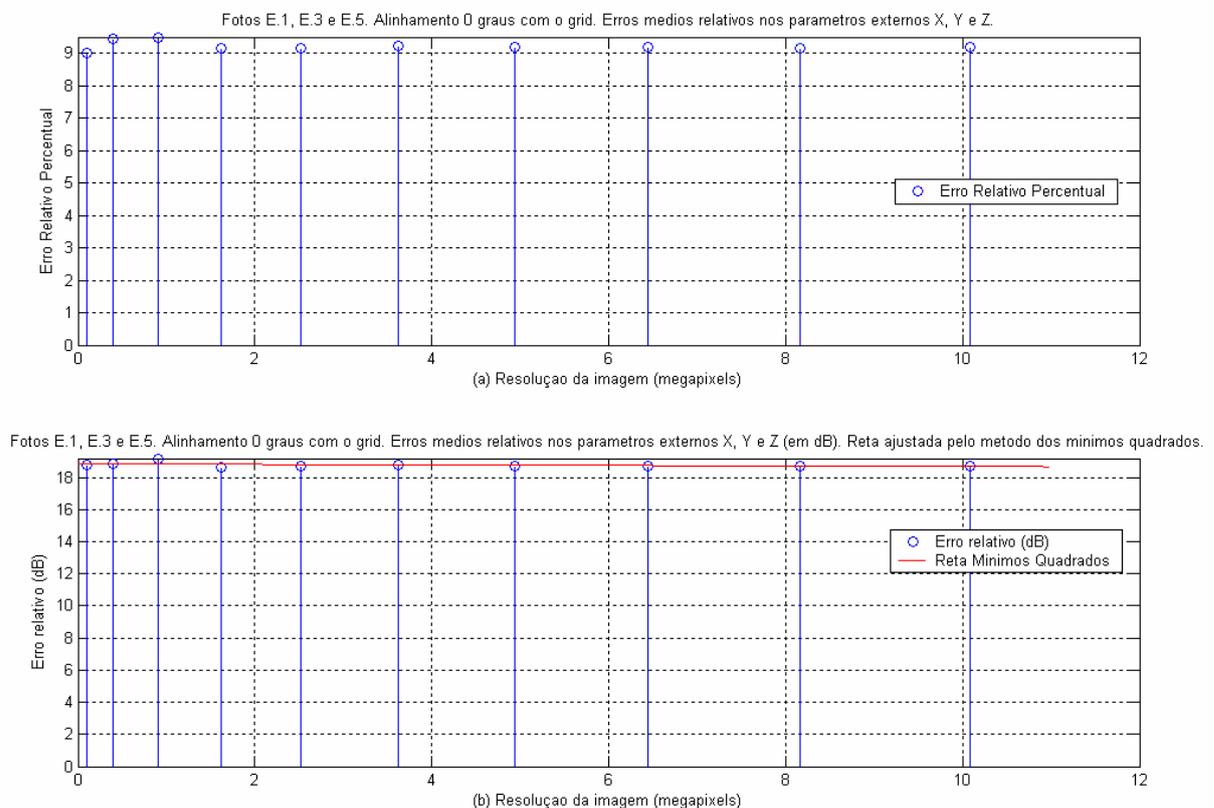


Figura 4.18 Erros médios nos eixos X, Y, Z : (a) percentuais e (b) em dB

Tabela 4.28 Ajuste linear para erro médio nas estimativas dos parâmetros X_0 , Y_0 , Z_0

Erro percentual médio	9,23%
Coefficiente angular	-0,02 dB/megapixel
Coefficiente linear	18,86 dB

4.2.6 Estimativa do Ângulo ω

Na Seção 4.1.8 foram analisadas as estimativas de erro para o parâmetro ϕ_0 de calibração. No Teste 2 foi necessário completar a análise de rotação da câmera para os parâmetros ω e κ . Nas Seções 4.2.6.1, 4.2.7.1 e 4.2.8.1 encontram-se os erros das estimativas para rotações em $\omega_{CÂMERA}$, $\phi_{CÂMERA}$ e $\kappa_{CÂMERA}$.

4.2.6.1 Câmera Girada de -10° sobre o Eixo $X_{CÂMERA}$

Podemos observar, pelo gráfico de erro relativo percentual (Figura 4.1.9 (a)), que tivemos um erro médio de 30,45% na estimativa do parâmetro ω_0 de rotação da câmera em relação ao eixo $X_{CÂMERA}$. Este erro foi justificado pela falta de precisão na localização do eixo focal da câmera, gerando também uma translação da câmera ao tentar girá-la.

Apesar do grande erro encontrado para todas as resoluções, verificou-se pela Figura 4.19 (a) que os erros foram praticamente constantes para todas as estimativas, constatando que a variação da resolução não teve grande influência nos resultados do algoritmo de calibração.

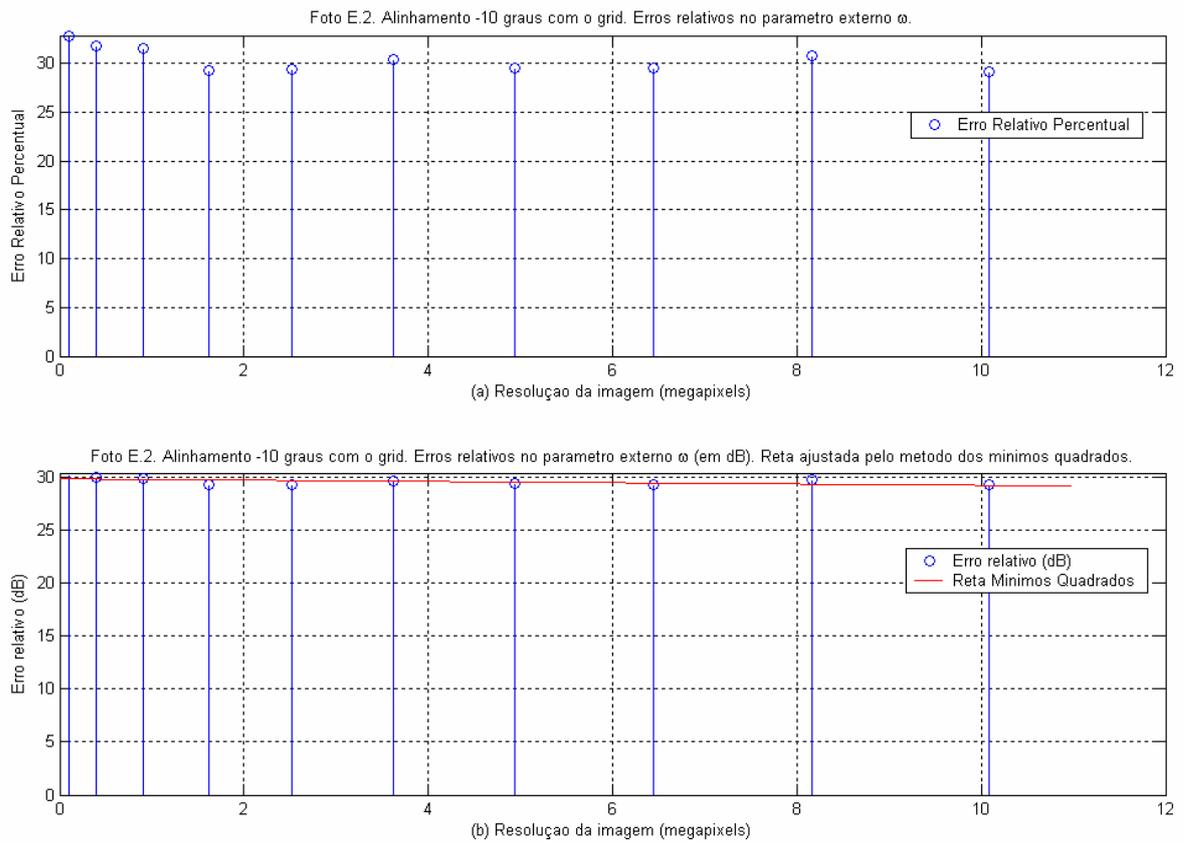


Figura 4.19 Erro relativo entre ângulo ω estimado e ângulo medido com transferidor

Tabela 4.29 Ajuste linear para erro na estimativa do parâmetro ω_0

10,08 megapixels	$\omega_0 = -7,08^\circ$
Erro percentual médio	30,45%
Coefficiente angular	-0,06 dB/megapixel
Coefficiente linear	29,90 dB

4.2.7 Estimativa do Ângulo ϕ

Na Seção 4.1.6.3 observamos que o erro médio de estimativa para o parâmetro ϕ_0 foi de 32%. Podemos agora comparar este erro relativo médio ao erro da estimativa do algoritmo de calibração para uma rotação de 10° no eixo $Y_{CÂMERA}$.

4.2.7.1 Câmera Girada de $+10^\circ$ sobre o Eixo $Y_{CÂMERA}$

Assim como pôde ser observado (Seção 4.2.6.1) nos erros da estimativa do algoritmo para o ângulo ω_0 , era esperado que um grande erro médio acontecesse para a estimativa do ângulo ϕ_0 . Não podemos ter certeza se estamos girando a câmera em torno do seu eixo focal, como deveria ter sido feito. Com isso, acabamos por gerar uma translação na câmera associada à sua rotação provocando um erro de estimação maior do que o esperado.

A Figura 4.20 (a) mostra os grandes erros relativos percentuais encontrados para as estimativas de ϕ_0 em função das resoluções das imagens. A Tabela 4.30 mostra os coeficientes de ajuste para a reta exibida na Figura 4.20 (b) e o valor médio de ϕ_0 .

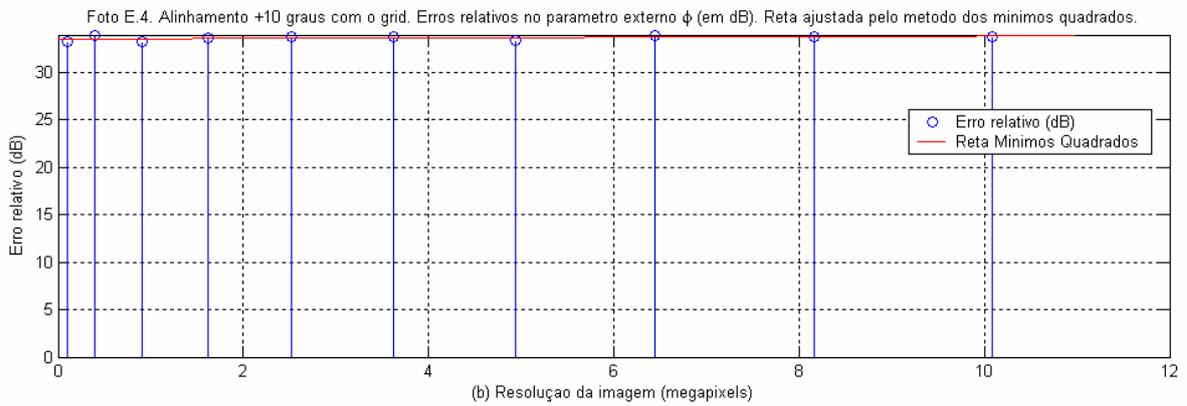
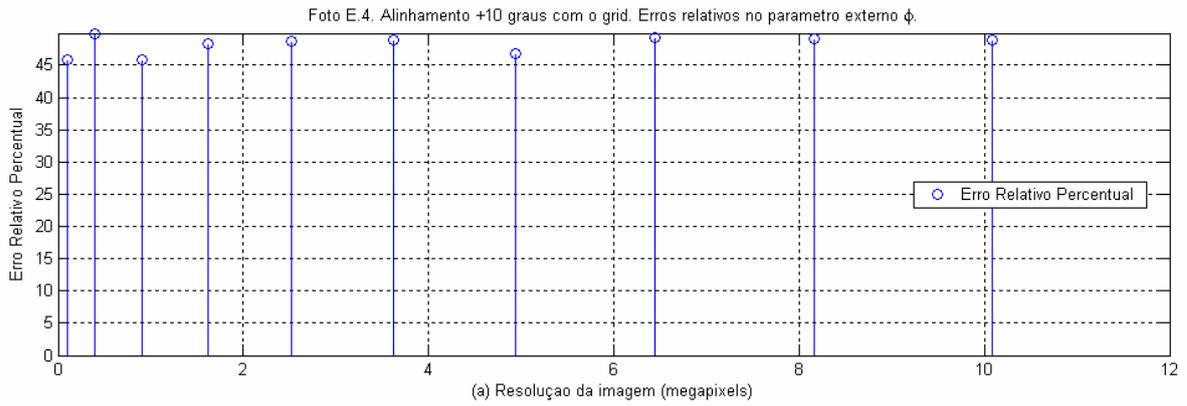


Figura 4.20 Erro relativo entre ângulo ϕ estimado e ângulo medido com transferidor

Tabela 4.30 Ajuste linear para erro na estimativa do parâmetro ϕ_0

ϕ 10,08 megapixels	$\phi_0 = 5,12^\circ$
Erro percentual médio	48,20%
Coefficiente angular	-0,03 dB/megapixel
Coefficiente linear	33,54 dB

4.2.8 Estimativa do Ângulo κ

Completando a análise dos parâmetros de rotação da câmera, a Seção 4.2.8.1 apresentou as melhores estimativas dos parâmetros de rotação dentre os eixos $X_{CÂMERA}$, $Y_{CÂMERA}$ e $Z_{CÂMERA}$.

4.2.8.1 Câmera Girada de +10° sobre o Eixo $Z_{CÂMERA}$

O último ângulo analisado foi avaliado pela rotação da câmera em torno da mesma direção na qual aponta o seu eixo focal. Os erros da estimativa do algoritmo foram menores aqui devido ao fato do eixo focal situar-se na mesma direção perpendicular ao centro da lente da câmera. Ao girar a câmera de - 10° em torno de seu eixo Z, foi possível errar menos. Podemos ver na Tabela 4.31 que o método foi eficaz nesse caso, gerando uma média de erros de 10,83% ou - 19,31 dB. Apesar do erro percentual médio baixo, a Figura 4.21 (a) mostra que os erros quase não mudaram com a variação da resolução das imagens.

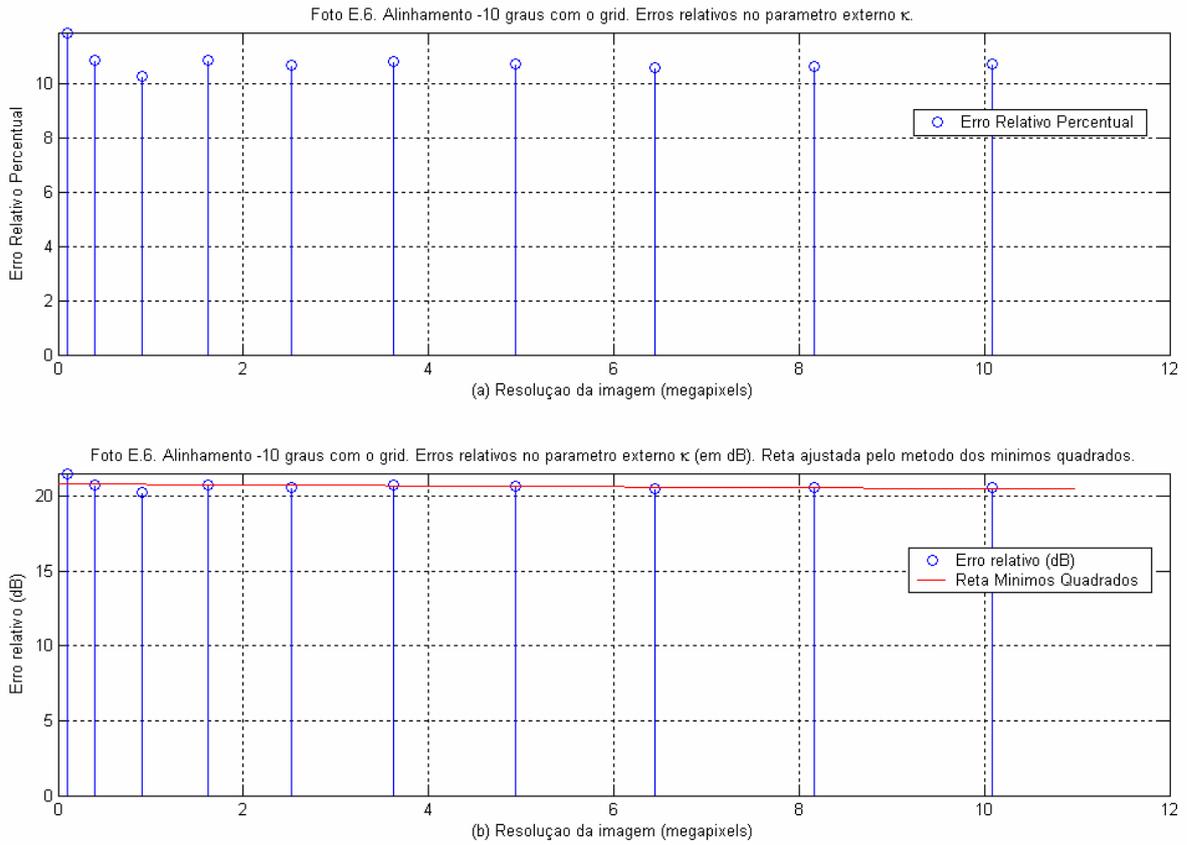


Figura 4.21 Erro relativo entre ângulo κ estimado e ângulo medido com transferidor

Tabela 4.31 Ajuste linear para erro na estimativa do parâmetro κ_0

κ 10,08 megapixels	$K_0 = + 8,93^\circ$
Erro percentual médio	10,83%
Coefficiente angular	-0,03 dB/megapixel
Coefficiente linear	20,81 dB

4.2.9 Estimativa dos Ângulos ω , ϕ , κ do Posicionamento da Câmera em Relação aos Eixos X, Y, Z do *Grid*

Em média podemos conferir na tabela 4.32 que, dos três ângulos de 10° a serem estimados, pudemos acertá-los com um erro médio de 29,83 %. Embora seja uma margem grande de erro, foi verificado que ocorreram situações em que não pudemos ter precisão na geração do ângulo sobre os eixos da câmera, sendo difícil saber a medida real do ângulo gerado.

Na média, as estimativas dos ângulos ω_0 , ϕ_0 e κ_0 , tiveram uma variação quase nula para todas as resoluções das imagens.

Tabela 4.32 Ajuste linear para erro médio nas estimativas dos parâmetros: ω_0 , ϕ_0 e κ_0

Ângulo médio	7,04°
Erro percentual médio	29,83%
Coefficiente angular	-0,04 dB/megapixel
Coefficiente linear	28,08 dB

4.2.10 Erro da Posição da Câmera em Relação à Posição obtida com a Imagem de Maior Resolução

Foram gerados, nas Seções 4.2.2 até 4.2.9, todos os erros das estimativas para os parâmetros extrínsecos de calibração com referência aos parâmetros medidos diretamente com régua e transferidor. Na Tabela 4.33 encontram-se a média dos erros relativos e os ajustes lineares dos erros com base nas estimativas dos parâmetros da câmera para a imagem de maior resolução (10,08 megapixels), e um resumo destes erros relativos e coeficientes de ajustes lineares exibidos nas Seções 4.2.2 até 4.2.9.

Tabela 4.33 Erros relativos e coeficientes de ajustes lineares obtidos nas Seções 4.2.2 até 4.2.9. Erros relativos às estimativas para imagem de 10,08 megapixels e ajuste linear dos erros em relação a esta estimativa.

Teste	Parâmetros	Erros percentuais	Coeficiente angular (em dB/megapixel)	Coeficiente linear (em dB)
Erros e coeficientes lineares em relação às medidas calculadas com instrumentos	X	8,80	-0,03	18,90
	Y	6,28	-0,04	15,70
	Z	12,60	+0,01	21,97
	ω	30,45	-0,06	29,90
	ϕ	48,20	-0,03	33,54
	κ	10,83	-0,03	20,81
Erros e coeficientes lineares em relação às medidas da imagem de resolução de 10,08 megapixels	X	0,34	-3,33	-5,21
	Y	0,37	-3,57	-4,43
	Z	0,21	-3,12	-11,78
	ω	1,97	-0,99	4,27
	ϕ	2,28	-1,19	4,63
	κ	0,29	-2,63	-9,42

Os valores dos erros relativos observados nas Seções 4.2.2 até 4.2.9 são relativos aos parâmetros de posição da câmera calculados com instrumentos. Devido à análise da Seção 4.2.10 ter sido feita em relação às estimativas da imagem de maior resolução, era esperado que os erros relativos fossem menores. Os coeficientes angulares exibidos na Tabela 4.33 possuem valores absolutos mais elevados quando comparados àqueles obtidos nas Seções 4.2.2 até 4.2.9. Este comportamento está consistente com os resultados obtidos nas Seções 4.1.7 e 4.1.8, quando foram analisadas as estimativas dos parâmetros de calibração do Teste 1 referentes às estimativas das imagens de maior resolução.

4.3 Teste 3 – Dimensionamento

O Teste 3 trata de um experimento diferente daquele realizado nos Testes 1 e 2. Observaremos agora o comportamento dos resultados do algoritmo de dimensionamento quando variamos a resoluções das imagens geradas. Foi aplicado nesse teste o procedimento de estereofotogrametria utilizando duas fotos do *grid*, uma esquerda e uma direita. Nessas duas fotos foram marcados 4 pontos, representando duas dimensões a serem analisadas. Uma delas está sobre uma régua e mede 5 cm e a outra está sobre outra régua e mede 2 cm (as fotos estão no Apêndice F). Assim como foi feito nos Testes 1 e 2, também foram geradas para o Teste 3 nove imagens com resoluções reduzidas a partir das fotos tomadas.

O algoritmo de calibração foi utilizado para obter os arquivos de calibração para cada uma das imagens esquerdas e direitas gerada. Neste teste observamos que o erro do algoritmo de dimensionamento foi consideravelmente menor em relação aos erros obtidos com os Testes 1 e 2. Veremos nas Seções 4.3.1 e 4.3.2 os parâmetros do Teste 3 bem como seus resultados expostos em gráficos de $\text{Erro}_{\text{relativo}} \times \text{Resolução}$ das imagens. O erro plotado foi a diferença entre a medida real observada na régua e a medida calculada pelo algoritmo de dimensionamento. O valor absoluto desta diferença foi dividido pela medida observada na régua.

4.3.1 Parâmetros do Teste 3

Tabela 4.34 Parâmetros do Teste 3

Teste 3	
Número de fotos por teste	1
Número de imagens geradas por teste	10
Percentagem de redução da resolução das imagens	10%
Número de pontos observados no <i>grid</i>	28
Número de dimensões calculadas e observadas	2
Erro observado	Relativo (Percentual / dB)

No Teste 3 não foram feitos os cálculos de translação e rotação dos eixos da câmera realizados nos Testes 1 e 2. Objetivamos apenas mostrar que os erros relativos de dimensionamento são menores que os erros de calibração da câmera e melhoram à medida que a resolução das imagens aumenta. Os erros encontrados podem ser vistos na Seção 4.3.2.

4.3.2 Estimativa do Erro do Algoritmo de Dimensionamento em Função da Resolução das Imagens

Foram geradas imagens reduzidas segundo as mesmas porcentagens dos Testes 1 e 2. As resoluções das imagens usadas foram as mesmas encontradas na Tabela 4.1. Foram geradas 18 imagens reduzidas (nove esquerdas e nove direitas).

Vemos na Figura 4.22 (a) os resultados para os erros relativos entre as medidas obtidas do algoritmo de dimensionamento e as medidas reais dos objetos. O cálculo desse erro foi feito para duas medidas observadas nas imagens: 2 cm e 5 cm.

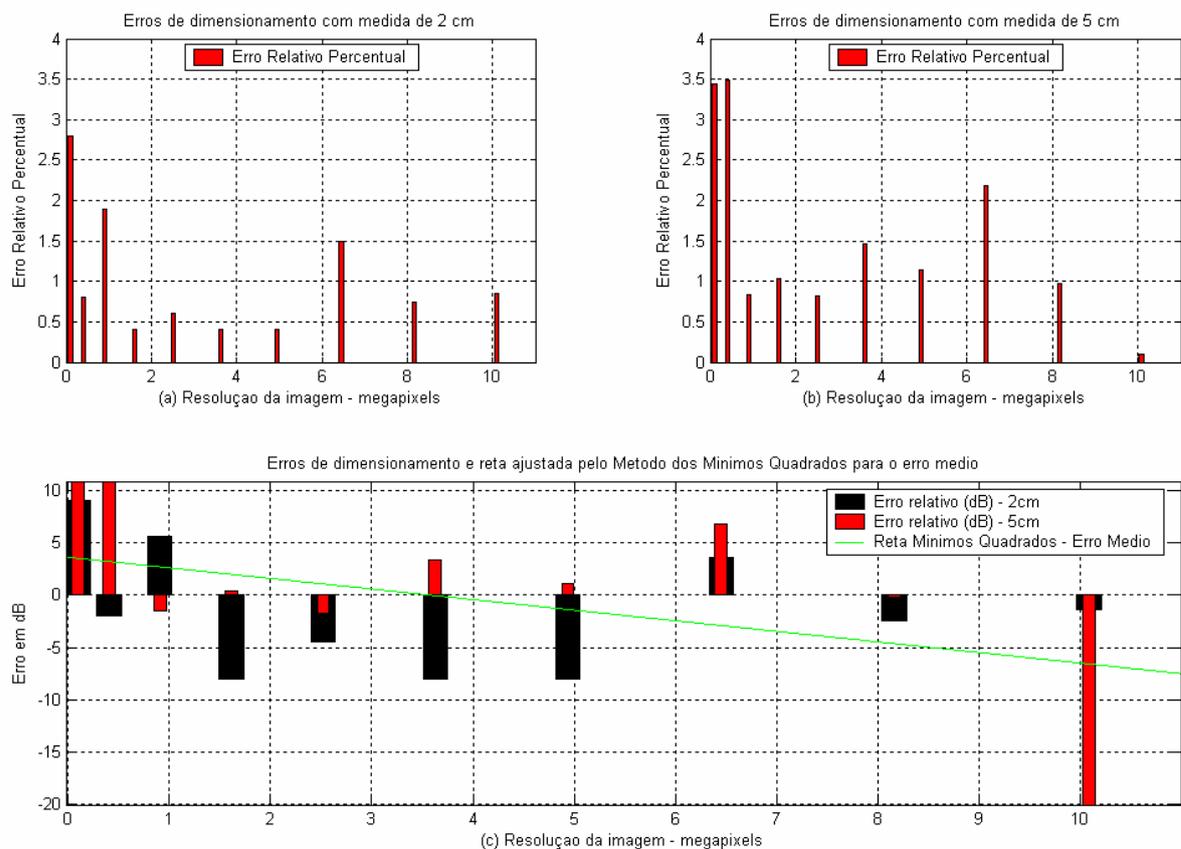


Figura 4.22 (a) objeto com 2 cm de comprimento, (b) objeto com 5 cm de comprimento e (c) comparação e ajuste de mínimos quadrados.

Os erros médios percentuais foram de 1,04 % para a medida de 2 cm e de 1,55% para a medida de 5cm. Foi gerada a reta ajustada com o Método dos Mínimos Quadrados somente para o erro médio em dB. O coeficiente angular da reta foi de -1,01 dB/megapixel e o coeficiente linear foi de 3,59 dB. O erro percentual obtido para as imagens com resolução de 6,45 megapixels ficou fora dos valores esperados ao compararmos este erro com os erros para resoluções menores. Este resultado não invalidou a análise de dimensionamento, mas indicou que o método usado pode ser melhorado. Em testes futuros, deverão ser feitos testes com objetos de dimensões maiores para que o erro das estimativas esteja mais distribuído. Os resultados para os erros relativos obtidos neste teste nos encorajam a seguir futuramente com testes usando o algoritmo de dimensionamento. Dessa forma poderemos descobrir outros fatores limitantes para utilização do algoritmo além do fator resolução das imagens.

Seguem na Tabela 4.35 os valores dos erros obtidos com o algoritmo de dimensionamento.

Tabela 4.35 Tabela com valores de erros relativos do dimensionamento

Foto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Resolução em megapixels	10,08	8,16	6,45	4,94	3,63	2,52	1,61	0,91	0,40	0,10	
Erros relativos percentuais	2 cm	0,85	0,75	1,50	0,40	0,40	0,60	0,40	1,90	0,80	2,80
	5 cm	0,10	0,98	2,18	1,14	1,46	0,82	1,04	0,84	3,48	3,44
	Médio	0,48	0,87	1,84	0,77	0,93	0,71	0,72	1,37	2,14	3,12

Capítulo 5

Conclusões

Este estudo propôs uma análise do comportamento dos erros das estimativas dos algoritmos de calibração e dimensionamento em função da resolução das imagens.

Os testes e rotinas aplicados foram eficientes para verificação dos erros das estimativas dos algoritmos para os parâmetros de orientação exterior da câmera. Foi utilizado o Método dos Mínimos Quadrados para modelar a estatística dos dados observados. O método foi eficaz, visto que todas as curvas observadas têm um comportamento semelhante.

Os erros das estimativas foram observados tanto em porcentagem quanto em escala logarítmica (dB) com zero dB sendo referente a erro de 1%. As retas obtidas com o Método dos Mínimos Quadrados foram geradas para os erros observados em dB pois, no início do estudo, imaginava-se que os erros poderiam ter uma variação relativa acentuada ao longo das resoluções.

Foram realizados 2 testes para o algoritmo de calibração usando imagens com resoluções de 0,10 megapixels até 10,08 megapixels. Foram geradas curvas de erros de estimativa dos parâmetros em função da variação da resolução das imagens. Os testes foram

capazes de estimar as coordenadas da posição da câmera com 10% de erro no Teste 1, e 9% no Teste 2, em média, apesar de ter havido picos de erros que chegaram até 70% para as imagens com resolução inferior a 1 megapixel. Os testes estimaram as rotações das imagens com 32% de erro em média no Teste 1, medindo ângulos de 20°. O erro foi de 30% em média para o Teste 2, medindo ângulos de 10°. A análise dos erros do Teste 1 foi refeita usando as estimativas da imagem de maior resolução como gabarito. Este procedimento gerou um erro médio de 9% para as estimativas das coordenadas na posição da câmera, e um erro médio de 5% para as estimativas dos parâmetros de rotação. No Teste 2, também foi feita a análise dos erros das estimativas dos parâmetro usando as estimativas das imagens de 10,08 megapixels como gabarito. No Teste 2, a tabela de erros foi mostrada apenas para esta análise. Os erros médios obtidos foram de 0,31% de erro para os parâmetros de posicionamento da câmera e de 1,51% para os parâmetros de rotação.

Embora os erros de estimativas dos parâmetros de posicionamento da câmera tenham sido de 9% em média para os Testes 1 e 2, deve-se ressaltar que o erro foi desta magnitude devido aos erros para as estimativas da coordenada Z da câmera terem sido bem maiores que as estimativas das coordenadas em relação aos eixos X e Y. Obteve-se em média no Teste 1, erros de 4% para as estimativas em relação aos eixos X e Y, e erros de 19% em relação ao eixo Z. No Teste 2, foram obtidos em média erros de 9%, 6% e 13% para as estimativas de posição em relação aos eixos X,Y e Z, respectivamente.

As porcentagens de erros médios encontrados nas estimativas de todos os parâmetros foram baixas nos dois testes, quando comparamos com os erros encontrados para as estimativas das imagens com resoluções inferiores a 1 megapixel. Houve picos de 70% de erros para resoluções abaixo de 1 megapixel.

O Teste 3 analisou a eficiência do algoritmo de dimensionamento. Os resultados foram muito bons, gerando uma aproximação média para a reta de Mínimos Quadrados com

coeficiente angular de -1 dB/megapixel e coeficiente linear de 3,6 dB. Este coeficiente linear nos indica que os erros obtidos para as estimativas de dimensionamento foram menores que 2% e o coeficiente angular indica que os erros de dimensionamento diminuem quando aumenta-se a resolução das imagens.

A robustez do método aplicado para os testes pôde ser verificada pela pequena variação dos erros médios ao longo das resoluções. Para as estimativas da posição da câmera, os erros não ultrapassaram 5% de variação no Teste 1. A variação foi inferior a 2 % no Teste 2. Em ambos os testes, a variação dos erros na estimativa para a rotação da câmera em relação aos eixos ordenados não passou de 5%.

Os métodos foram aplicados em um ambiente propício e iluminado. O foco da câmera não foi alterado em nenhuma foto tirada para que isso não representasse mais uma variável de análise no estudo. A comparação dos erros do Teste 1 com os erros do Teste 2 indica que a distância entre o *grid* e a câmera pode influenciar os resultados. Os erros do Teste 2 foram menores que os erros do Teste 1, e no Teste 2 a câmera estava mais próxima do *grid*.

Uma proposta futura a este estudo seria a realização de uma análise mais profunda a respeito do teste com dimensionamento. Pôde-se verificar que os erros do algoritmo de dimensionamento são menores que aqueles encontrados com o algoritmo de calibração, mesmo com um teste qualitativo para o dimensionamento. É provável que exista uma combinação de condições que gere erros menores para as estimativas da rotina de calibração. Este teste exibiria uma tendência decrescente para os erros de estimativas desde as resoluções de 1 megapixel até as resoluções muito altas.

Devemos ressaltar neste ponto que o método utilizado para escolher os *pixels* dos centros dos alvos marcados no *grid* (ver Seção 2.2) não foi preciso o suficiente para garantir erros mínimos nas estimativas geradas pelo algoritmo de calibração. Sugere-se que, em um

trabalho futuro, se possa coletar as coordenadas desses *pixels* usando uma rotina que faça um pré-processamento das imagens, auxiliando na identificação desses pontos específicos do *grid* e minimizando os erros causados por falha humana na precisão em determinar essas coordenadas.

Como a distância entre a câmera e o *grid* não foi grande nos Testes 1 e 2 (nos dois testes esta distância foi menor do que 1,5m), seria interessante observar em um trabalho futuro o comportamento dos Testes 1 e 2 para distâncias maiores entre a câmera e o *grid*. Espera-se que os erros das estimativas apresentem variações relativas maiores.

Um trabalho futuro poderia considerar perturbações aleatórias na determinação dos pixels dos centros dos alvos do *grid*. Seriam marcados mais de um pixel para determinar o centro de cada alvo e a estimativa das coordenadas do centro do alvo seria uma média entre todos os pontos marcados.

Conclui-se que os erros absolutos das estimativas para os parâmetros de orientação exterior têm uma tendência quase constante quando as resoluções das imagens são variadas de 1 megapixel até 10 megapixels.

Apêndice A

Rotinas de Calibração

Tabela A.1 Rotina de calibração para os parâmetros de posicionamento da câmera.

1. *Carregar em memória o arquivo texto com coordenadas espaciais dos alvos marcados no grid e coordenadas planas desses alvos obtidas nas fotos;*
2. *Executar CalMF.dll passando como parâmetro as coordenadas carregadas em memória no passo 1 para gerar estimativas dos parâmetros de calibração;*
3. *Destacar as estimativas dos três parâmetros de calibração referentes à posição da câmera;*
4. *Calcular erros das estimativas.*

Tabela A.2 Rotina de calibração para os parâmetros de rotação da câmera, utilizando:
 R_3 (câmera girada) = R_2 (rotação local) . R_1 (câmera alinhada).

1. Carregar em memória o arquivo texto com coordenadas espaciais dos alvos marcados no grid e coordenadas planas desses alvos obtidas nas fotos da câmera alinhada com o grid;
2. Executar *CalMF.dll* passando como parâmetro as coordenadas carregadas em memória no passo 1 para gerar estimativas dos parâmetros de calibração;
3. Destacar as estimativas dos três parâmetros de rotação da câmera;
4. Carregar na variável *MatrizR1* a saída da execução da função que gera a rotação (2.1) descrita na Seção 2.2.1, passando como parâmetros as estimativas dos três parâmetros de rotação da câmera;
5. Carregar em memória o arquivo texto com coordenadas espaciais dos alvos marcados no grid e coordenadas planas desses alvos obtidas nas fotos da câmera girada em relação ao grid;
6. Executar a *CalMF.dll* passando como parâmetro as coordenadas carregadas em memória no passo 5 para gerar estimativas dos parâmetros de calibração;
7. Destacar as estimativas dos três parâmetros de rotação da câmera;
8. Repetir o passo 4 carregando o resultado na variável *MatrizR3*;
9. Calcular e carregar na variável *MatrizR2* os parâmetros da matriz de rotação entre a imagem alinhada com o grid e a imagem girada em relação ao grid fazendo: $MatrizR2 = MatrizR3.(MatrizR1)^{-1}$;
10. Executar a função que transforma os parâmetros da *MatrizR2* em estimativas de rotação da câmera;
11. Calcular erros das estimativas.

Apêndice B

Rotina de Dimensionamento

Tabela B.1 Rotina de dimensionamento.

- 1. Carregar em memória o arquivo texto com coordenadas espaciais dos alvos marcados no grid e coordenadas planas desses alvos obtidas nas fotos esquerda e direita do grid;*
- 2. Executar para cada imagem do par estéreo a CalMF.dll passando como parâmetro as coordenadas carregadas em memória no passo 1 para gerar estimativas dos parâmetros de calibração;*
- 3. Executar a DimMF.dll passando como parâmetros as coordenadas da dimensão do objeto obtidas das imagens esquerda e direita, e os arquivos de calibração para cada imagem;*

Apêndice C

Rotina de Procura de Coordenadas de *Pixels*

Tabela C.1 Rotina de procura de coordenadas de *pixels*.

1. Carregar em memória o arquivo do tipo BMP da imagem com os alvos verdes marcados;
2. Fazer uma varredura de todos os pixels da imagem começando de cima para baixo e da esquerda para direita executando os seguintes comandos:
 - a. Verificar se o pixel tem cores do tipo $(0,255,0)$ – que representa a cor verde em RGB;
 - b. Armazenar em uma variável as coordenadas do pixel caso ele seja $(0,255,0)$;

FIM;

3. Verificar se foram encontrados os 24 pixels verdes marcados no grid;
4. Em caso positivo
 - a. Usar o algoritmo Bubblesort em cada grupo de 6 pares de coordenadas armazenados para ordená-los em um vetor

Apêndice D

Fotos Tomadas do *Grid* para o Teste 1

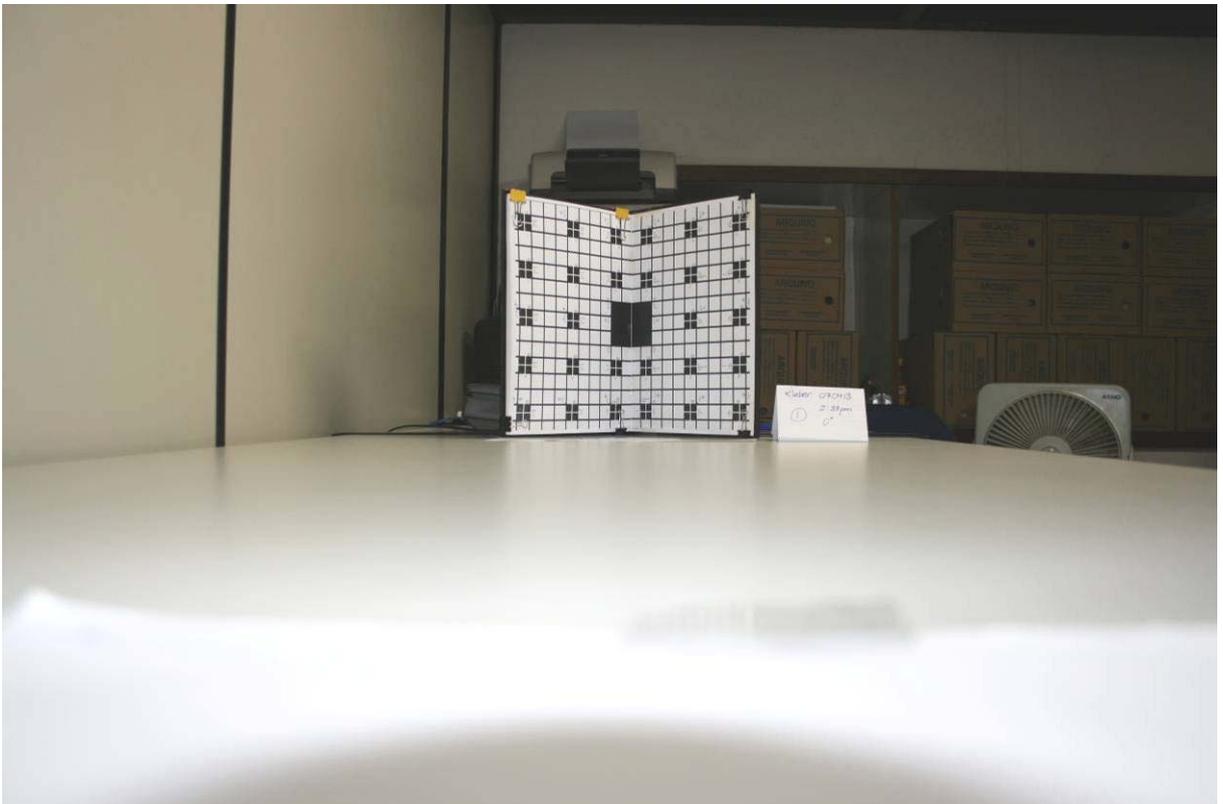


Figura D.1 Foto tirada do *grid* com a câmera alinhada com o *grid*.



Figura D.2 Foto tirada do *grid* com a câmera girada de -20° em $Y_{\text{CÂMERA}}$.



Figura D.3 Foto tirada do *grid* com a câmera girada de $+20^\circ$ em $Y_{\text{CÂMERA}}$.

Apêndice E

Fotos Tomadas do *Grid* para o Teste 2

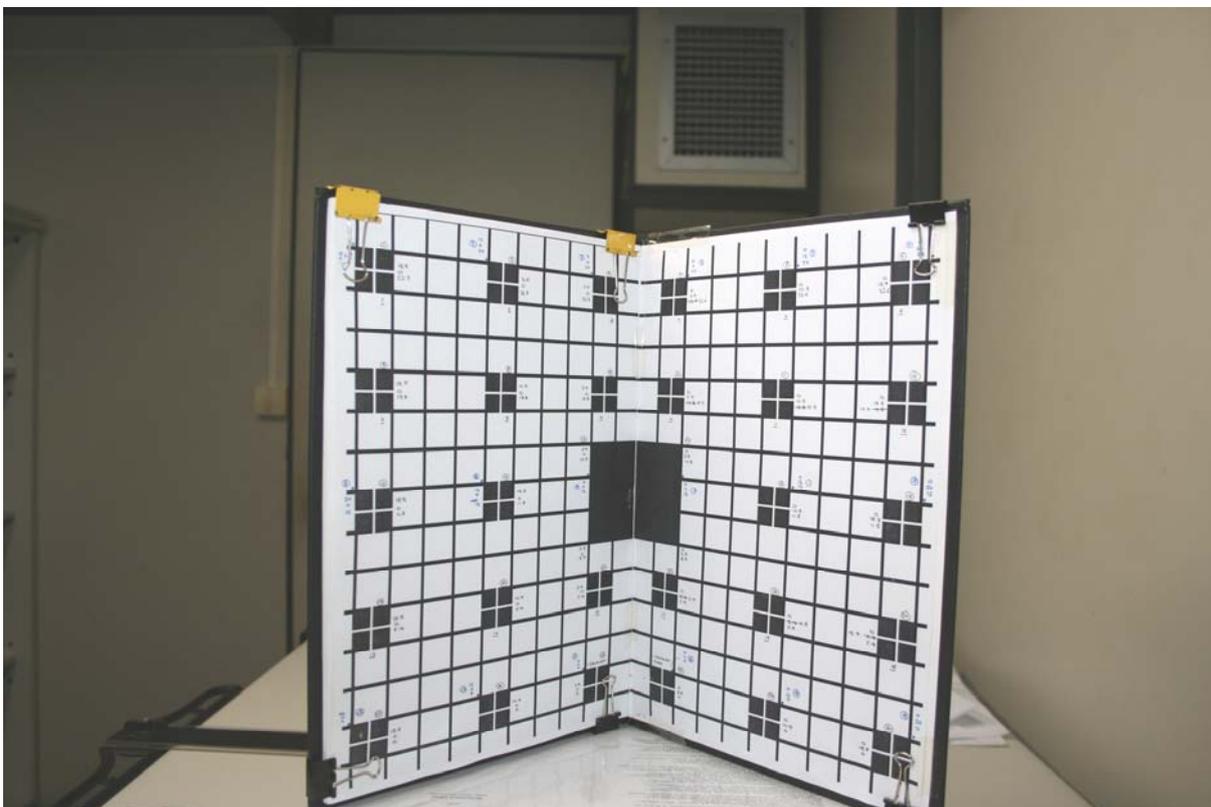


Figura E.1 Foto tirada do *grid* com a câmera alinhada com o *grid*.

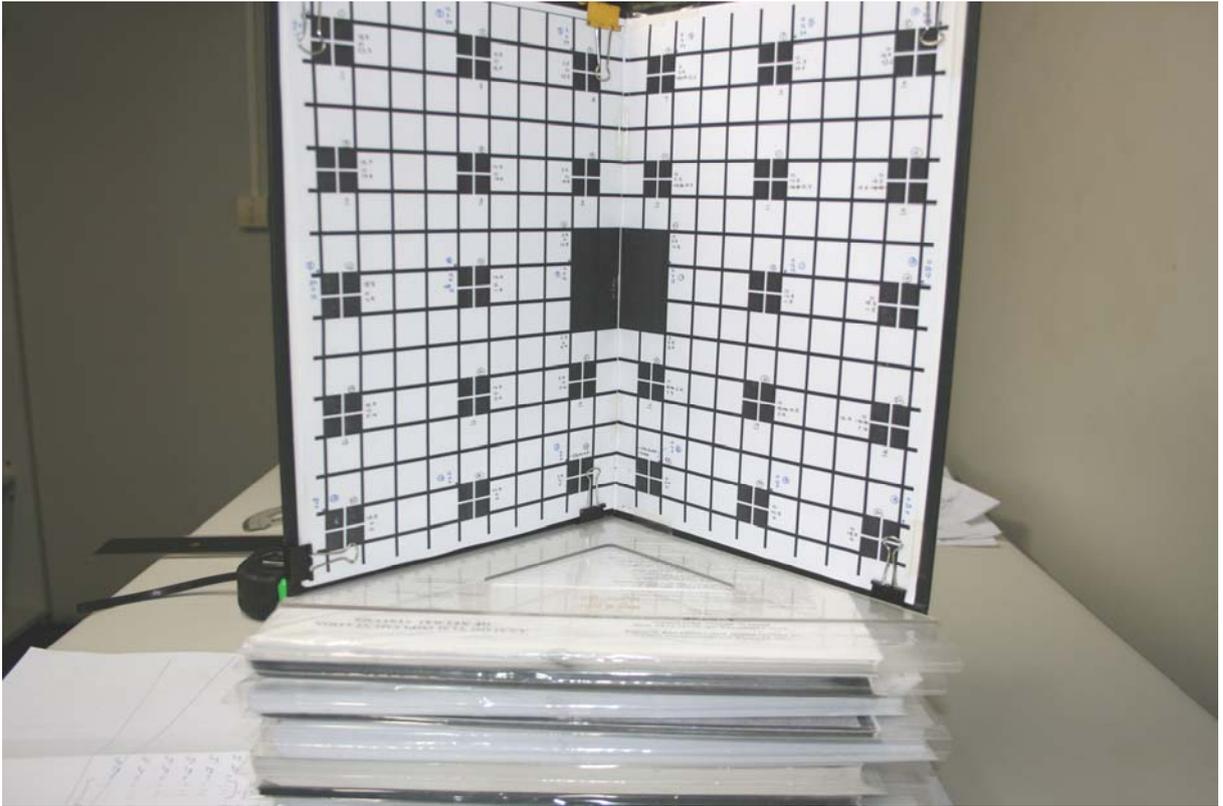


Figura E.2 Foto tirada do *grid* com a câmera girada de -10° em $X_{\text{CÂMERA}}$.

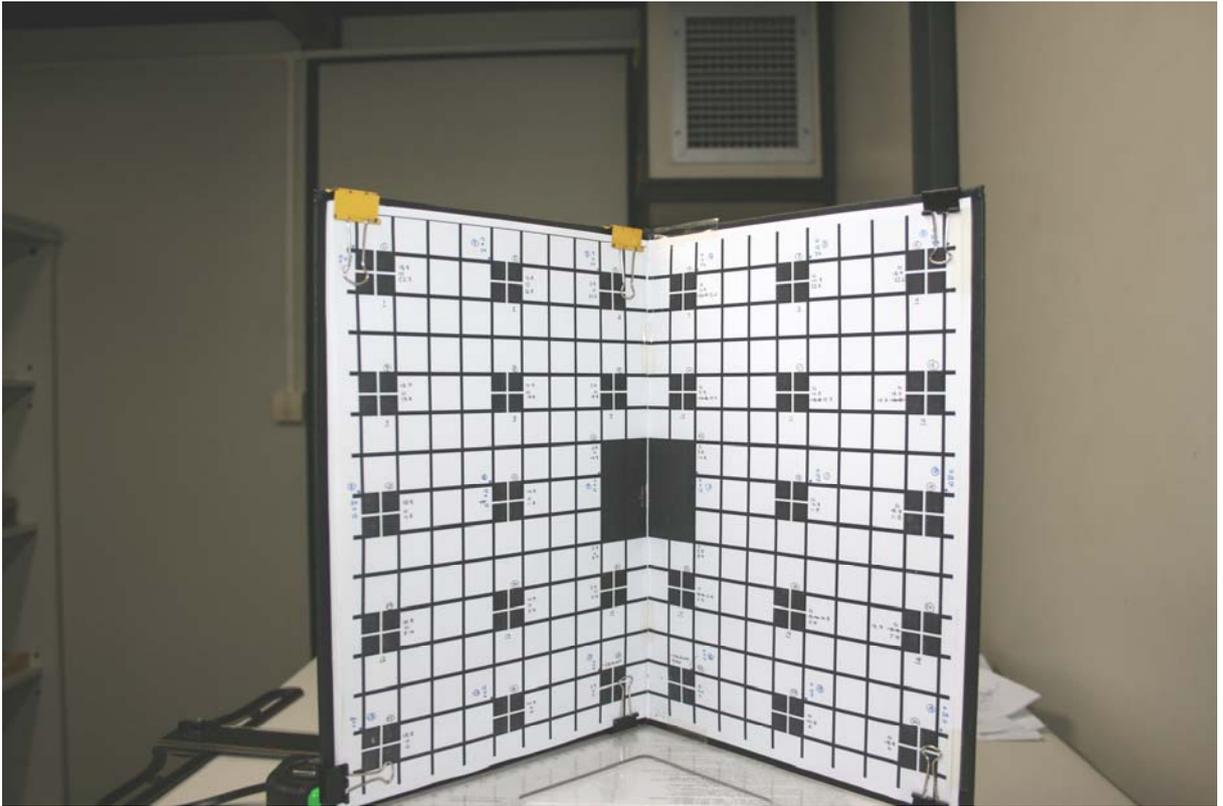


Figura E.3 Foto tirada do *grid* com a câmera alinhada com o *grid*.

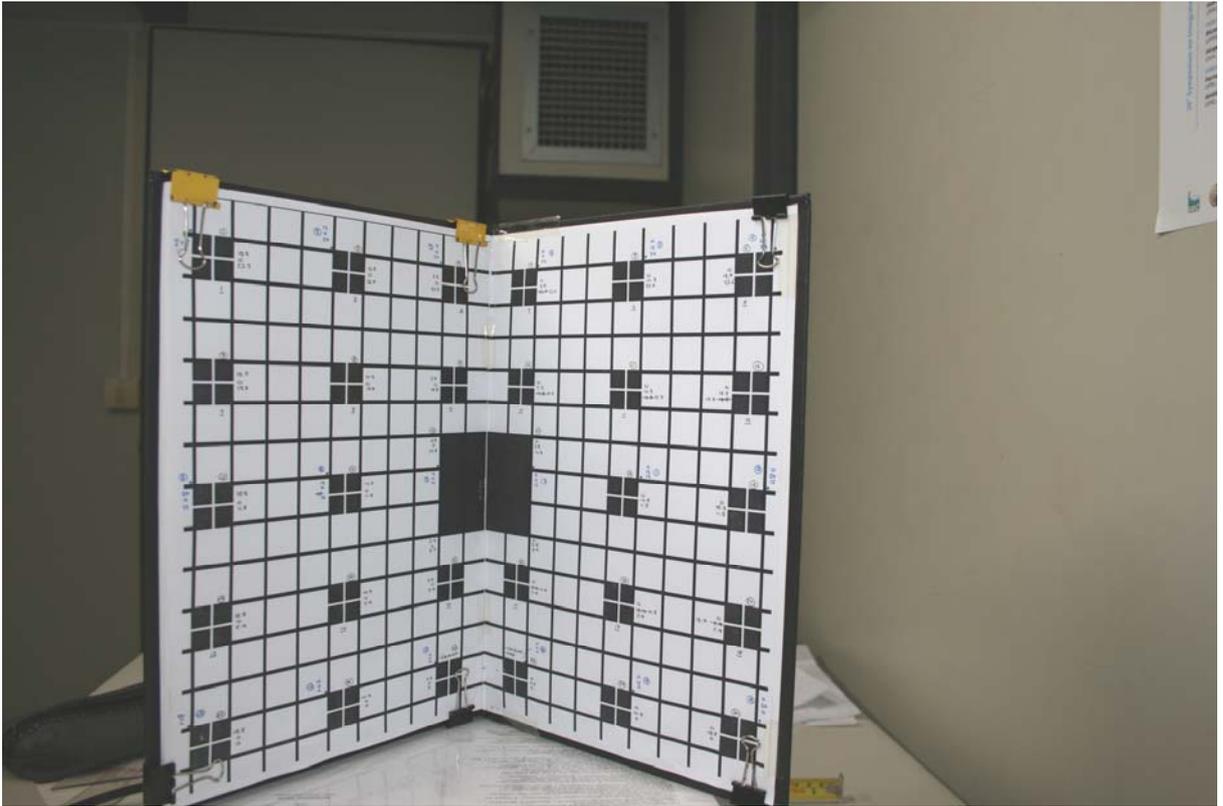


Figura E.4 Foto tirada do *grid* com a câmera girada de $+10^\circ$ em $Y_{\text{CÂMERA}}$.

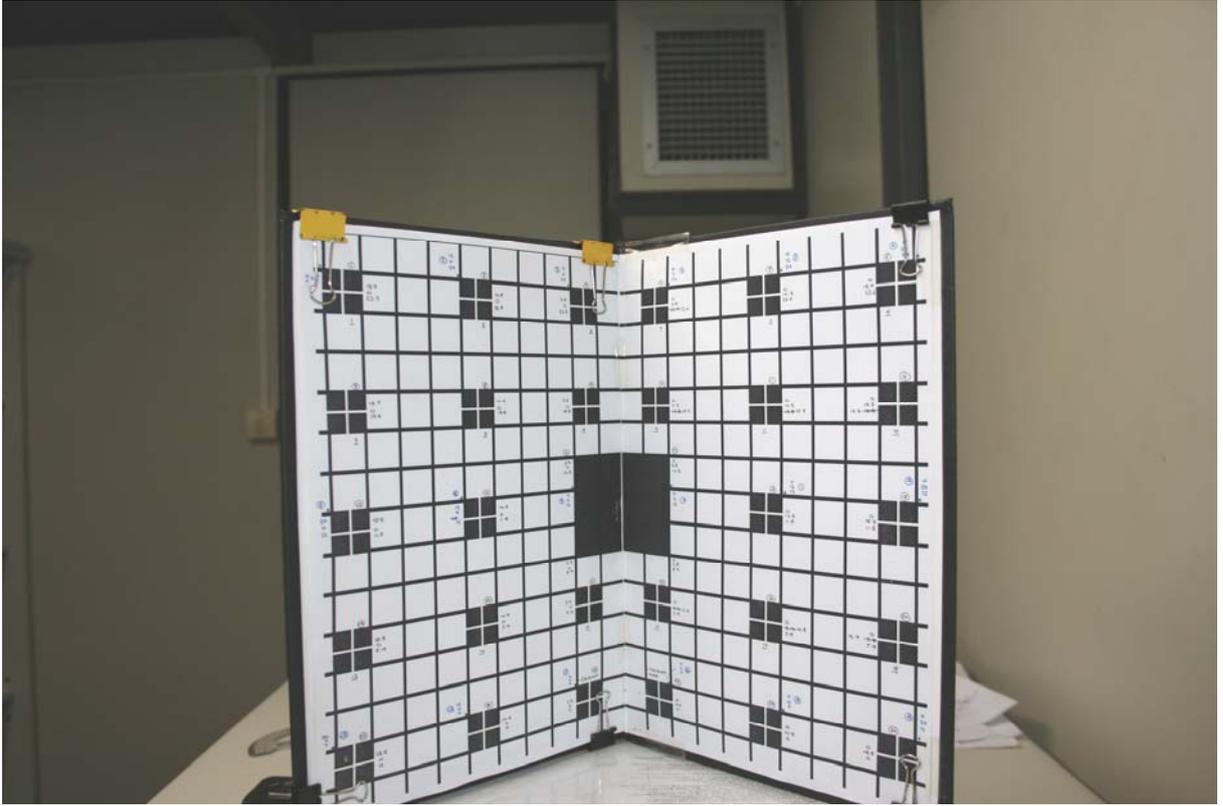


Figura E.5 Foto tirada do *grid* com a câmera alinhada com o *grid*.

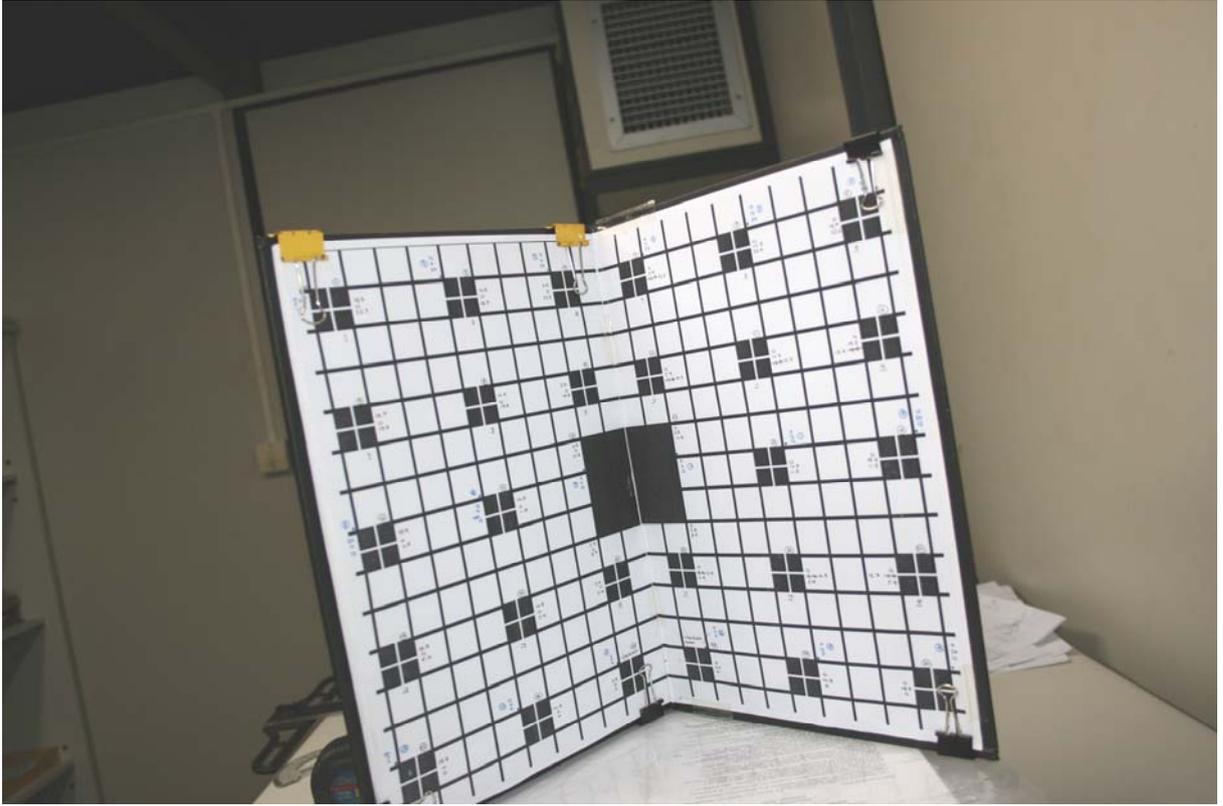


Figura E.6 Foto tirada do *grid* com a câmera girada de $+10^\circ$ em $Z_{CÂMERA}$.

Apêndice F

Fotos Tomadas do *Grid* para o Teste 3

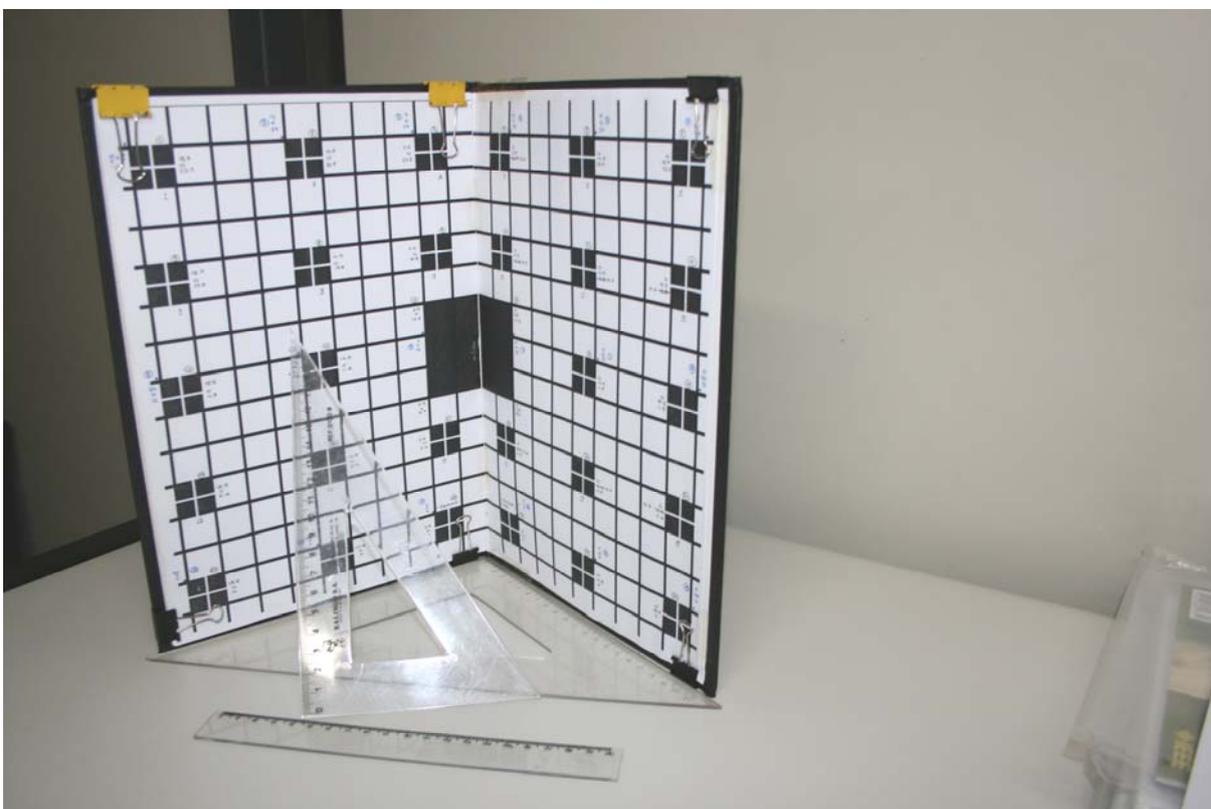
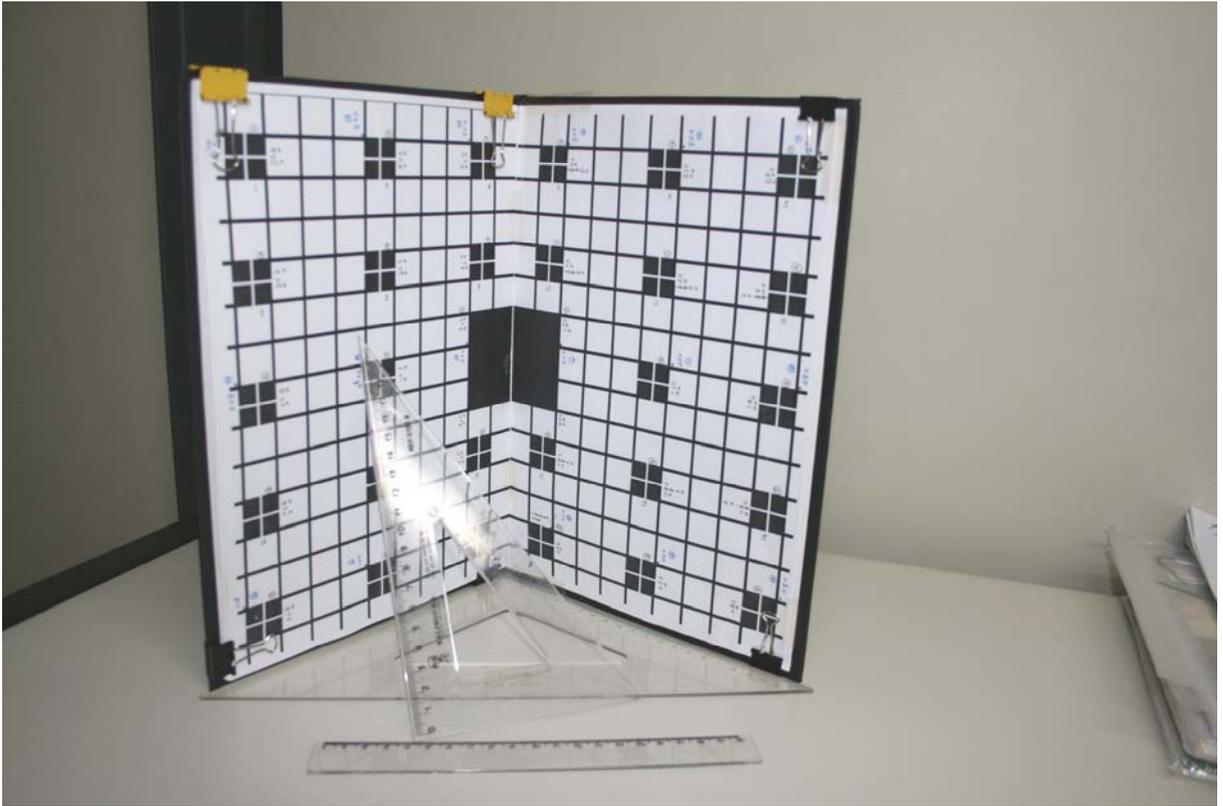


Figura F.1 Foto tirada do *grid* com a câmera à direita.



FiguraF.2 Foto tirada do *grid* com a câmera à esquerda.

Apêndice G

Parâmetros de Calibração para o Teste 1

Tabela G.1 Parâmetros de entrada do algoritmo de calibração de todas as imagens geradas a partir da Foto D.1.

Foto D.1																						
			10.08 MP		8.163 MP		6.45 MP		4.937 MP		3.627 MP		2.519 MP		1,613 MP		0,907 MP		0,403 MP		0,101 MP	
X	Y	Z	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v
18,8	0	23,7	1671	703	1503	633	1336	562	1170	492	1002	422	835	352	668	281	501	211	334	141	167	70
10,9	0	23,7	1827	726	1644	653	1462	581	1279	508	1096	436	914	363	731	290	548	218	365	145	183	72
2,9	0	23,7	1964	748	1768	674	1571	599	1375	523	1179	449	982	374	785	299	589	225	393	150	196	74
0	2,9	23,7	2061	749	1855	674	1649	599	1443	524	1237	449	1031	374	824	300	618	225	412	149	206	75
0	10,8	23,7	2203	727	1983	654	1763	581	1542	509	1322	436	1102	364	881	291	661	218	441	145	220	72
0	18,7	23,7	2359	703	2123	633	1887	562	1651	492	1415	422	1179	351	943	281	707	211	472	140	236	70
18,8	0	17,8	1674	855	1507	769	1340	684	1172	598	1005	513	837	428	670	342	502	257	335	171	168	85
10,9	0	17,8	1827	872	1644	786	1461	698	1279	611	1097	523	913	436	731	349	548	262	366	174	183	87
2,9	0	17,8	1965	889	1769	800	1572	712	1375	623	1179	534	983	445	786	356	589	267	393	177	196	89
0	2,9	17,7	2061	890	1855	801	1649	712	1443	623	1237	534	1030	445	824	356	618	267	412	177	206	89
0	10,8	17,7	2203	873	1982	786	1762	699	1542	611	1322	524	1101	437	881	349	660	262	441	174	220	87
0	18,7	17,7	2359	856	2124	770	1887	684	1652	599	1416	513	1180	428	944	342	708	257	472	171	236	85
18,8	0	5,9	1673	1163	1506	1047	1338	931	1171	814	1004	698	837	581	669	465	502	349	335	232	167	116
10,9	0	5,9	1825	1168	1643	1051	1460	935	1278	818	1095	701	913	584	730	467	547	351	365	233	183	116
2,9	0	5,9	1964	1173	1767	1055	1571	938	1375	821	1179	703	982	587	786	469	589	352	393	234	196	117
0	2,9	5,9	2060	1172	1854	1055	1648	938	1442	821	1236	704	1030	586	824	469	618	352	412	234	206	117
0	10,8	5,9	2202	1167	1981	1051	1761	934	1541	817	1321	700	1101	583	881	467	660	350	440	233	220	116
0	18,7	5,9	2359	1163	2124	1046	1887	930	1652	814	1416	697	1180	581	944	465	708	349	472	232	236	116
18,8	0	0	1667	1317	1501	1185	1333	1054	1167	921	1001	790	834	659	667	527	500	395	333	263	167	132
10,9	0	0	1823	1316	1641	1185	1458	1053	1276	921	1094	790	911	658	729	526	547	395	365	263	182	131
2,9	0	0	1962	1315	1766	1183	1570	1052	1374	920	1177	789	981	657	785	526	588	395	393	263	196	131
0	2,9	0	2059	1314	1853	1182	1647	1051	1441	919	1235	788	1030	656	824	526	618	394	412	262	206	131
0	10,8	0	2201	1315	1981	1183	1761	1052	1541	920	1321	789	1101	657	882	526	660	394	440	262	220	131
0	18,7	0	2359	1316	2123	1185	1887	1053	1651	921	1416	790	1179	658	943	526	707	395	472	263	236	131

Tabela G.2 Parâmetros de entrada do algoritmo de calibração de todas as imagens geradas a partir da Foto D.2.

Foto D.2																						
			10.08 MP		8.163 MP		6.45 MP		4.937 MP		3.627 MP		2.519 MP		1.613 MP		0,907 MP		0,403 MP		0,101 MP	
X	Y	Z	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v
18,8	0	23,7	2782	694	2503	624	2225	555	1947	485	1669	416	1391	347	1112	277	834	208	557	138	278	69
10,9	0	23,7	2947	709	2652	638	2357	567	2063	496	1768	426	1473	355	1178	284	884	213	590	141	295	71
2,9	0	23,7	3094	727	2784	654	2475	581	2166	508	1857	436	1547	363	1237	290	928	218	619	145	310	72
0	2,9	23,7	3200	723	2880	651	2560	578	2240	506	1920	434	1600	361	1280	289	960	217	641	144	320	72
0	10,8	23,7	3357	692	3021	622	2685	553	2350	484	2014	415	1678	346	1342	277	1007	207	672	138	336	69
0	18,7	23,7	3533	657	3180	592	2826	526	2473	460	2120	394	1767	329	1413	263	1060	197	707	132	353	66
18,8	0	17,8	2788	848	2509	763	2230	679	1952	593	1673	509	1394	424	1115	339	836	255	558	169	279	84
10,9	0	17,8	2949	861	2654	775	2359	689	2065	603	1770	516	1475	430	1179	344	885	258	590	172	295	86
2,9	0	17,8	3098	874	2788	786	2478	699	2168	612	1858	524	1549	437	1239	349	929	262	620	174	310	87
0	2,9	17,7	3201	871	2881	784	2561	697	2241	609	1921	522	1601	435	1280	348	960	261	640	174	320	87
0	10,8	17,7	3358	848	3022	763	2686	678	2351	593	2015	509	1679	424	1343	339	1007	254	672	169	336	85
0	18,7	17,7	3535	823	3181	740	2828	658	2475	576	2121	494	1768	411	1414	329	1060	247	708	165	353	82
18,8	0	5,9	2790	1163	2511	1047	2232	930	1953	814	1674	698	1395	582	1116	465	837	349	558	232	279	116
10,9	0	5,9	2950	1167	2655	1050	2360	933	2065	816	1770	700	1475	583	1180	467	885	350	590	233	295	116
2,9	0	5,9	3099	1170	2789	1053	2479	936	2169	819	1859	702	1549	585	1239	468	929	351	620	234	310	117
0	2,9	5,9	3202	1168	2882	1052	2561	935	2242	817	1922	701	1601	584	1281	467	960	351	641	234	320	117
0	10,8	5,9	3359	1162	3023	1045	2687	929	2351	813	2016	697	1679	581	1343	465	1007	349	672	232	336	116
0	18,7	5,9	3537	1155	3183	1039	2829	923	2476	808	2123	692	1768	577	1415	462	1061	347	708	231	354	115
18,8	0	0	2784	1320	2506	1188	2227	1056	1949	924	1671	792	1392	660	1114	528	835	396	557	264	279	132
10,9	0	0	2948	1320	2653	1188	2358	1056	2064	923	1769	791	1474	660	1179	528	884	396	590	264	295	132
2,9	0	0	3097	1318	2787	1187	2477	1055	2168	922	1858	791	1549	659	1239	527	929	396	620	263	310	132
0	2,9	0	3202	1317	2881	1185	2561	1054	2241	922	1921	790	1601	659	1281	527	960	396	641	263	320	132
0	10,8	0	3359	1319	3023	1187	2687	1055	2351	923	2016	792	1679	659	1343	528	1007	396	672	263	336	132
0	18,7	0	3537	1320	3183	1188	2829	1056	2476	924	2122	792	1769	660	1415	528	1061	396	708	264	354	132

Tabela G.3 Parâmetros de entrada do algoritmo de calibração de todas as imagens geradas a partir da Foto D.3.

Foto D.3																						
			10.08 MP		8.163 MP		6.45 MP		4.937 MP		3.627 MP		2.519 MP		1.613 MP		0,907 MP		0,403 MP		0,101 MP	
X	Y	Z	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v
18,8	0	23,7	502	661	453	596	402	530	352	463	301	397	251	331	201	265	151	198	100	132	50	66
10,9	0	23,7	674	694	606	624	539	555	472	485	404	417	337	347	269	278	202	208	135	138	67	69
2,9	0	23,7	820	724	737	652	655	580	574	507	491	434	409	362	328	290	246	217	164	145	82	72
0	2,9	23,7	922	729	830	657	737	584	646	511	553	437	461	365	369	292	277	219	184	146	92	72
0	10,8	23,7	1071	713	964	642	857	571	750	499	642	428	535	356	428	285	321	214	214	143	107	71
0	18,7	23,7	1231	696	1108	627	984	558	861	487	738	418	615	348	492	279	369	209	246	139	123	69
18,8	0	17,8	505	823	454	741	404	659	353	576	303	494	252	412	202	330	151	247	101	165	50	82
10,9	0	17,8	672	848	605	763	537	678	470	594	403	509	336	424	269	339	202	254	134	169	67	84
2,9	0	17,8	819	870	737	784	655	697	573	609	492	522	410	435	328	348	246	261	164	174	82	87
0	2,9	17,7	920	874	828	787	736	699	644	611	552	524	460	437	368	350	276	263	184	174	92	87
0	10,8	17,7	1069	861	961	775	855	690	748	603	641	517	534	431	427	345	320	259	214	172	106	86
0	18,7	17,7	1229	849	1106	765	982	680	860	595	737	509	614	425	491	340	368	255	246	169	123	85
18,8	0	5,9	502	1150	452	1035	401	920	351	805	301	690	251	575	200	460	150	345	100	230	50	115
10,9	0	5,9	668	1157	601	1043	534	927	467	810	400	695	334	579	267	463	200	347	133	231	67	115
2,9	0	5,9	816	1164	734	1048	652	931	571	814	490	699	408	582	326	466	244	349	163	232	81	116
0	2,9	5,9	916	1164	824	1048	733	931	642	814	550	698	458	582	366	466	275	349	183	232	92	116
0	10,8	5,9	1065	1160	958	1044	852	929	745	812	639	696	533	581	426	465	319	348	213	232	106	116
0	18,7	5,9	1226	1157	1103	1042	981	926	858	810	736	694	613	578	490	463	368	348	245	231	122	116
18,8	0	0	495	1313	446	1182	396	1051	347	919	297	788	247	657	198	526	148	394	99	262	50	131
10,9	0	0	665	1312	598	1181	532	1050	465	918	399	788	332	657	266	525	199	394	133	262	67	131
2,9	0	0	813	1311	732	1180	650	1049	569	917	488	787	406	656	325	524	244	393	163	262	82	131
0	2,9	0	915	1309	824	1179	732	1048	641	916	549	786	458	655	366	524	274	393	183	262	92	131
0	10,8	0	1065	1310	958	1179	851	1049	745	917	639	787	532	655	426	524	319	393	213	262	106	131
0	18,7	0	1225	1312	1103	1181	980	1050	857	918	735	787	612	656	490	525	367	393	245	262	123	131

Apêndice H

Parâmetros de Calibração para o Teste 2

Tabela H.1 Parâmetros de entrada do algoritmo de calibração de todas as imagens geradas a partir da Foto E.1.

Foto E.1																						
X	Y	Z	10.08 MP		8.163 MP		6.45 MP		4.937 MP		3.627 MP		2.519 MP		1.613 MP		0,907 MP		0,403 MP		0,101 MP	
			u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v
18,8	0	23,7	1193	874	1074	787	955	699	835	612	716	524	597	437	477	350	358	262	239	175	119	87
10,9	0	23,7	1614	905	1452	814	1291	724	1130	633	969	543	807	452	646	362	484	271	323	181	161	90
2,9	0	23,7	1953	934	1757	841	1562	747	1367	654	1172	560	976	467	781	374	585	280	391	186	195	93
0	2,9	23,7	2178	936	1961	842	1743	748	1525	654	1307	561	1089	468	871	374	653	281	436	187	218	93
0	10,8	23,7	2529	905	2276	814	2023	724	1771	633	1517	543	1264	452	1011	362	759	271	506	180	253	90
0	18,7	23,7	2956	870	2660	783	2364	696	2069	608	1774	522	1478	435	1182	348	887	261	592	173	296	87
18,8	0	17,8	1204	1264	1083	1137	963	1011	843	884	722	758	602	631	482	505	361	379	241	252	120	126
10,9	0	17,8	1617	1260	1455	1134	1293	1008	1132	881	970	755	808	630	646	504	485	378	323	251	162	126
2,9	0	17,8	1956	1257	1761	1131	1565	1006	1369	879	1174	754	978	628	782	503	587	377	391	251	195	125
0	2,9	17,7	2177	1257	1959	1132	1741	1006	1524	880	1306	754	1089	629	871	503	653	377	436	251	218	125
0	10,8	17,7	2529	1259	2276	1133	2023	1007	1771	881	1518	755	1264	629	1011	504	759	378	506	251	253	126
0	18,7	17,7	2954	1261	2659	1135	2363	1009	2068	882	1773	756	1477	630	1182	504	886	378	591	252	295	126
18,8	0	5,9	1212	2036	1091	1832	969	1629	848	1424	728	1221	606	1017	485	815	364	611	243	407	121	203
10,9	0	5,9	1620	1961	1458	1765	1296	1569	1134	1372	972	1176	810	980	648	784	486	589	324	392	162	196
2,9	0	5,9	1956	1896	1761	1706	1565	1517	1370	1327	1174	1137	978	948	782	758	587	569	391	379	195	189
0	2,9	5,9	2173	1896	1956	1706	1738	1517	1521	1326	1304	1137	1087	948	869	759	652	569	435	379	218	189
0	10,8	5,9	2520	1961	2268	1764	2015	1568	1764	1372	1512	1176	1260	980	1008	784	756	588	504	392	252	196
0	18,7	5,9	2942	2036	2647	1833	2353	1629	2059	1425	1765	1221	1471	1018	1176	814	882	611	588	407	294	203
18,8	0	0	1212	2404	1092	2164	970	1923	849	1682	728	1442	607	1202	485	962	364	721	243	480	121	240
10,9	0	0	1621	2299	1459	2069	1296	1840	1135	1609	973	1379	810	1149	648	920	486	690	324	459	162	230
2,9	0	0	1953	2206	1758	1985	1562	1765	1367	1543	1172	1324	977	1103	781	882	586	662	391	441	195	220
0	2,9	0	2173	2206	1956	1985	1738	1765	1521	1544	1304	1324	1087	1103	869	883	652	662	435	441	217	220
0	10,8	0	2514	2302	2262	2072	2011	1842	1760	1611	1508	1381	1257	1151	1005	921	754	691	503	460	251	230
0	18,7	0	2931	2413	2638	2171	2345	1930	2052	1689	1759	1447	1466	1206	1172	965	879	724	587	482	293	241

Tabela H.2 Parâmetros de entrada do algoritmo de calibração de todas as imagens geradas a partir da Foto E.2.

Foto E.2																						
			10.08 MP		8.163 MP		6.45 MP		4.937 MP		3.627 MP		2.519 MP		1.613 MP		0,907 MP		0,403 MP		0,101 MP	
X	Y	Z	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v
18,8	0	23,7	1055	128	949	114	844	102	739	89	633	76	528	63	422	51	316	38	211	25	106	12
10,9	0	23,7	1507	178	1356	160	1206	142	1055	124	905	107	754	89	603	71	452	54	302	36	151	18
2,9	0	23,7	1868	226	1681	203	1495	181	1308	158	1121	135	934	113	747	90	560	68	374	45	187	22
0	2,9	23,7	2106	232	1895	209	1684	186	1474	162	1264	139	1053	116	842	93	631	69	422	46	211	23
0	10,8	23,7	2471	199	2224	179	1977	159	1730	139	1483	119	1236	99	988	79	741	59	494	39	247	20
0	18,7	23,7	2919	163	2627	147	2335	130	2044	114	1752	98	1460	81	1168	65	876	49	584	32	292	16
18,8	0	17,8	1071	542	964	487	857	433	750	378	643	324	536	270	429	216	321	162	214	108	107	54
10,9	0	17,8	1507	553	1357	498	1206	442	1055	386	904	331	754	276	603	221	452	166	302	110	151	55
2,9	0	17,8	1866	566	1679	509	1492	452	1306	395	1120	339	933	283	746	226	560	170	373	113	187	56
0	2,9	17,7	2095	571	1886	514	1676	457	1467	399	1257	342	1047	285	838	228	628	171	419	114	210	57
0	10,8	17,7	2456	572	2211	515	1965	457	1720	400	1474	343	1228	286	982	229	737	171	491	114	246	57
0	18,7	17,7	2894	577	2604	519	2315	461	2026	403	1737	346	1447	288	1157	230	868	173	579	115	290	57
18,8	0	5,9	1089	1333	980	1200	871	1066	762	932	653	799	545	666	436	533	327	400	218	266	109	133
10,9	0	5,9	1508	1272	1357	1145	1206	1018	1056	890	905	763	754	636	603	509	452	382	302	254	151	127
2,9	0	5,9	1854	1221	1669	1099	1483	976	1298	854	1113	732	927	610	742	488	556	367	371	244	185	122
0	2,9	5,9	2075	1224	1867	1102	1659	980	1452	856	1245	734	1037	612	829	490	622	367	415	244	207	122
0	10,8	5,9	2419	1289	2176	1160	1934	1031	1693	902	1451	773	1209	644	967	516	725	387	484	257	242	129
0	18,7	5,9	2837	1366	2553	1230	2269	1093	1986	956	1702	819	1419	683	1134	546	851	410	567	273	284	136
18,8	0	0	1096	1698	985	1529	876	1358	767	1188	657	1019	548	849	438	679	329	510	219	339	110	169
10,9	0	0	1508	1609	1357	1448	1206	1287	1056	1126	905	965	754	804	603	644	452	483	302	321	151	160
2,9	0	0	1847	1530	1662	1377	1477	1224	1293	1070	1108	918	923	765	739	612	554	459	369	306	185	153
0	2,9	0	2067	1534	1860	1381	1653	1227	1447	1073	1240	920	1033	767	827	614	620	461	413	306	207	153
0	10,8	0	2399	1628	2159	1465	1919	1302	1680	1139	1440	976	1200	813	960	651	720	489	480	325	240	163
0	18,7	0	2806	1736	2526	1563	2244	1389	1964	1214	1684	1041	1403	868	1122	694	842	521	561	347	281	173

Tabela H.3 Parâmetros de entrada do algoritmo de calibração de todas as imagens geradas a partir da Foto E.3.

Foto E.3																						
			10.08 MP		8.163 MP		6.45 MP		4.937 MP		3.627 MP		2.519 MP		1.613 MP		0,907 MP		0,403 MP		0,101 MP	
X	Y	Z	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v
18,8	0	23,7	1187	849	1068	764	949	679	831	594	712	509	594	424	475	339	356	255	238	169	119	85
10,9	0	23,7	1599	890	1439	801	1279	712	1119	623	960	534	799	445	640	356	480	267	320	178	160	89
2,9	0	23,7	1928	928	1735	835	1542	742	1349	649	1156	557	964	464	771	371	578	278	386	185	193	92
0	2,9	23,7	2146	935	1931	841	1716	748	1502	654	1288	561	1073	467	858	374	644	280	429	187	215	93
0	10,8	23,7	2485	913	2237	821	1988	730	1740	638	1492	547	1243	456	994	365	746	273	497	182	248	91
0	18,7	23,7	2903	889	2613	800	2322	711	2032	621	1742	533	1452	444	1161	355	871	266	581	177	290	89
18,8	0	17,8	1188	1237	1069	1113	950	990	832	866	713	742	594	619	475	495	356	371	238	247	119	123
10,9	0	17,8	1592	1242	1433	1118	1274	994	1115	869	955	745	796	621	637	497	477	373	319	248	159	124
2,9	0	17,8	1923	1247	1731	1123	1538	998	1346	873	1154	748	962	624	769	499	577	374	385	249	192	124
0	2,9	17,7	2136	1253	1922	1128	1709	1002	1495	877	1282	752	1068	626	855	501	641	376	427	250	214	125
0	10,8	17,7	2478	1263	2230	1137	1982	1011	1735	884	1487	758	1239	632	991	505	743	379	496	252	248	126
0	18,7	17,7	2892	1276	2603	1149	2313	1021	2024	893	1735	766	1446	638	1157	510	867	383	579	255	289	127
18,8	0	5,9	1178	2005	1060	1804	942	1604	824	1402	707	1203	589	1002	471	802	353	601	236	401	118	200
10,9	0	5,9	1579	1938	1421	1744	1263	1550	1106	1356	948	1162	790	968	632	775	474	581	316	387	158	194
2,9	0	5,9	1908	1879	1717	1691	1526	1504	1335	1315	1145	1127	954	940	763	752	572	564	382	376	191	188
0	2,9	5,9	2116	1884	1905	1696	1693	1507	1481	1319	1270	1130	1058	942	847	754	635	566	423	376	212	188
0	10,8	5,9	2450	1957	2205	1762	1960	1566	1715	1369	1470	1174	1225	978	980	783	735	588	490	391	245	195
0	18,7	5,9	2860	2043	2574	1839	2288	1635	2002	1430	1716	1225	1430	1021	1144	817	858	613	572	408	286	204
18,8	0	0	1170	2370	1053	2133	936	1896	819	1658	702	1422	585	1185	468	948	351	711	234	474	117	237
10,9	0	0	1572	2272	1415	2045	1257	1818	1101	1590	943	1363	786	1136	629	909	472	682	314	454	157	227
2,9	0	0	1898	2185	1708	1967	1518	1748	1328	1529	1139	1311	949	1092	759	874	569	656	380	437	190	218
0	2,9	0	2108	2191	1897	1972	1686	1753	1475	1533	1265	1314	1054	1095	843	876	632	658	422	438	211	219
0	10,8	0	2435	2295	2191	2066	1947	1836	1704	1606	1461	1377	1217	1147	974	918	730	689	487	458	243	229
0	18,7	0	2841	2414	2557	2173	2273	1932	1989	1689	1705	1448	1420	1207	1137	965	852	724	569	482	284	241

Tabela H.4 Parâmetros de entrada do algoritmo de calibração de todas as imagens geradas a partir da Foto E.4.

Foto E.4																						
X	Y	Z	10.08 MP		8.163 MP		6.45 MP		4.937 MP		3.627 MP		2.519 MP		1.613 MP		0,907 MP		0,403 MP		0,101 MP	
			u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v
18,8	0	23,7	674	827	607	744	540	661	472	578	405	496	337	413	270	330	202	248	135	165	67	82
10,9	0	23,7	1109	873	998	786	887	699	776	611	665	524	554	437	444	349	333	262	222	174	111	87
2,9	0	23,7	1450	914	1304	822	1159	731	1015	639	870	548	725	457	580	366	435	274	290	182	145	91
0	2,9	23,7	1670	922	1502	830	1336	737	1169	645	1002	553	835	461	668	369	501	276	334	184	167	92
0	10,8	23,7	2003	902	1802	811	1602	721	1402	631	1202	541	1001	451	801	361	600	270	401	180	200	90
0	18,7	23,7	2406	880	2165	792	1925	704	1685	616	1444	528	1203	440	962	352	721	264	481	176	241	88
18,8	0	17,8	676	1226	608	1104	540	981	473	858	406	735	338	613	270	491	202	368	135	245	67	122
10,9	0	17,8	1102	1231	992	1108	881	985	772	861	661	738	551	616	441	493	331	369	220	246	110	123
2,9	0	17,8	1446	1236	1301	1112	1156	989	1012	864	867	741	723	618	578	494	433	371	289	247	144	123
0	2,9	17,7	1660	1241	1494	1117	1328	993	1162	868	996	744	830	621	664	496	498	372	332	248	166	124
0	10,8	17,7	1995	1250	1796	1125	1596	1000	1397	875	1197	750	998	625	798	500	598	375	399	249	199	125
0	18,7	17,7	2395	1262	2155	1135	1916	1009	1677	883	1437	757	1198	631	958	505	718	379	479	252	239	126
18,8	0	5,9	671	2017	603	1815	537	1613	469	1411	403	1210	335	1008	268	807	201	605	134	403	67	201
10,9	0	5,9	1095	1939	985	1745	876	1551	766	1357	657	1163	547	969	438	775	328	582	219	387	109	193
2,9	0	5,9	1435	1873	1291	1686	1148	1498	1004	1311	861	1124	718	936	574	749	430	562	287	374	143	187
0	2,9	5,9	1645	1874	1481	1686	1316	1499	1152	1311	988	1124	823	937	658	750	493	562	329	374	164	187
0	10,8	5,9	1973	1940	1776	1746	1579	1552	1381	1357	1184	1164	987	970	789	776	592	582	395	388	197	194
0	18,7	5,9	2370	2016	2133	1815	1896	1613	1659	1411	1422	1209	1185	1008	948	806	711	605	474	403	237	201
18,8	0	0	667	2395	600	2156	533	1916	467	1676	400	1437	333	1198	267	958	200	719	133	479	66	240
10,9	0	0	1092	2280	983	2052	873	1824	764	1595	655	1368	546	1140	437	912	327	684	218	455	109	228
2,9	0	0	1429	2182	1286	1963	1143	1745	1000	1527	857	1309	714	1091	571	873	428	655	286	436	143	218
0	2,9	0	1641	2182	1477	1963	1312	1745	1148	1526	985	1309	821	1091	656	873	492	655	328	436	164	218
0	10,8	0	1963	2275	1767	2048	1570	1820	1374	1592	1178	1365	982	1138	785	910	589	683	393	455	196	227
0	18,7	0	2356	2380	2120	2143	1885	1905	1649	1665	1414	1428	1179	1190	942	952	707	714	471	475	236	238

Tabela H.5 Parâmetros de entrada do algoritmo de calibração de todas as imagens geradas a partir da Foto E.5.

Foto E.5																						
X	Y	Z	10.08 MP		8.163 MP		6.45 MP		4.937 MP		3.627 MP		2.519 MP		1.613 MP		0,907 MP		0,403 MP		0,101 MP	
			u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v
18,8	0	23,7	1088	942	979	847	870	753	762	659	653	565	544	471	435	376	327	282	218	188	109	94
10,9	0	23,7	1516	966	1364	869	1213	773	1061	676	910	579	758	483	606	386	455	290	303	193	151	96
2,9	0	23,7	1860	990	1674	890	1488	791	1302	692	1116	593	930	495	744	396	558	297	372	198	186	99
0	2,9	23,7	2087	988	1879	889	1670	790	1461	691	1253	593	1044	494	835	395	626	296	418	197	209	98
0	10,8	23,7	2437	954	2193	858	1949	763	1706	667	1462	572	1218	477	974	381	731	286	487	190	244	95
0	18,7	23,7	2861	915	2575	824	2288	732	2003	640	1717	549	1430	457	1144	366	858	275	572	183	286	91
18,8	0	17,8	1103	1329	993	1197	882	1063	772	930	662	798	551	665	441	532	331	399	221	266	110	133
10,9	0	17,8	1522	1319	1370	1188	1218	1056	1066	923	913	792	761	659	609	528	457	396	305	263	152	132
2,9	0	17,8	1868	1311	1681	1180	1494	1049	1308	918	1121	787	934	656	747	524	560	393	374	262	187	131
0	2,9	17,7	2091	1309	1881	1178	1672	1047	1463	916	1254	785	1045	654	836	524	627	393	418	261	209	131
0	10,8	17,7	2443	1306	2198	1175	1954	1045	1710	914	1466	784	1221	653	977	523	733	392	489	261	244	130
0	18,7	17,7	2866	1303	2579	1172	2292	1042	2006	912	1720	782	1433	651	1146	521	860	391	573	260	287	130
18,8	0	5,9	1121	2100	1009	1890	897	1680	785	1470	673	1260	561	1050	448	840	336	630	224	420	112	210
10,9	0	5,9	1536	2020	1382	1818	1229	1616	1075	1414	922	1212	768	1010	614	808	460	606	307	404	154	202
2,9	0	5,9	1877	1950	1690	1756	1501	1560	1314	1365	1126	1170	939	975	751	780	563	585	376	390	188	195
0	2,9	5,9	2096	1947	1886	1752	1677	1557	1467	1362	1258	1168	1048	973	838	779	629	584	419	389	210	195
0	10,8	5,9	2443	2006	2198	1805	1954	1605	1710	1403	1466	1203	1221	1003	977	802	733	602	489	401	244	200
0	18,7	5,9	2866	2072	2580	1865	2293	1658	2007	1450	1720	1243	1433	1036	1146	829	859	622	574	414	287	207
18,8	0	0	1127	2470	1014	2223	901	1976	789	1728	676	1482	563	1235	451	988	338	741	225	493	113	247
10,9	0	0	1541	2359	1387	2123	1233	1887	1079	1651	925	1415	771	1179	617	944	462	708	308	471	154	235
2,9	0	0	1879	2260	1691	2034	1503	1808	1315	1582	1128	1356	940	1130	752	904	564	679	376	452	188	225
0	2,9	0	2102	2257	1891	2032	1681	1806	1471	1579	1261	1354	1051	1129	841	903	630	677	420	451	210	225
0	10,8	0	2442	2347	2198	2112	1953	1878	1710	1642	1466	1408	1221	1174	977	939	732	704	489	469	244	234
0	18,7	0	2863	2447	2577	2203	2290	1958	2005	1713	1718	1468	1432	1224	1145	979	859	735	573	489	286	244

Tabela H.6 Parâmetros de entrada do algoritmo de calibração de todas as imagens geradas a partir da Foto E.6

Foto E.6																						
X	Y	Z	10.08 MP		8.163 MP		6.45 MP		4.937 MP		3.627 MP		2.519 MP		1.613 MP		0,907 MP		0,403 MP		0,101 MP	
			u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v
18,8	0	23,7	1054	998	949	899	843	799	737	698	632	599	527	499	421	399	316	300	211	199	105	99
10,9	0	23,7	1470	960	1323	864	1176	768	1029	671	882	575	735	480	588	384	441	288	294	192	147	96
2,9	0	23,7	1803	934	1623	841	1442	747	1262	653	1082	560	901	467	721	374	541	280	361	186	180	93
0	2,9	23,7	2018	898	1817	808	1615	719	1413	629	1211	539	1009	449	807	360	605	270	404	179	202	90
0	10,8	23,7	2345	810	2110	730	1875	648	1641	567	1407	486	1172	405	938	324	703	243	469	161	235	81
0	18,7	23,7	2745	706	2470	634	2196	564	1922	493	1648	423	1372	352	1098	282	823	211	549	141	275	70
18,8	0	17,8	1130	1381	1017	1243	904	1105	792	966	678	828	565	690	452	552	339	414	226	276	113	138
10,9	0	17,8	1533	1308	1379	1178	1226	1047	1073	915	919	785	766	654	613	523	460	393	307	261	153	131
2,9	0	17,8	1862	1250	1675	1125	1489	1000	1303	875	1117	750	931	625	744	500	558	375	373	250	186	125
0	2,9	17,7	2071	1215	1864	1094	1657	972	1450	850	1243	729	1036	607	828	486	621	365	414	243	207	121
0	10,8	17,7	2405	1159	2164	1043	1923	927	1683	810	1443	695	1202	579	962	463	721	348	481	231	241	115
0	18,7	17,7	2809	1091	2528	982	2247	873	1967	763	1686	654	1405	545	1124	436	843	327	562	218	281	109
18,8	0	5,9	1271	2142	1144	1928	1016	1714	890	1499	762	1285	635	1071	508	857	381	643	254	428	127	214
10,9	0	5,9	1656	1999	1490	1799	1324	1599	1159	1399	994	1199	828	999	662	800	496	600	331	399	166	199
2,9	0	5,9	1970	1878	1772	1690	1576	1502	1379	1314	1182	1126	985	939	788	751	591	564	394	375	197	187
0	2,9	5,9	2176	1842	1958	1658	1740	1474	1523	1289	1305	1105	1088	921	870	737	652	553	435	368	217	184
0	10,8	5,9	2513	1850	2261	1665	2010	1480	1760	1295	1508	1110	1256	925	1005	740	753	555	503	370	251	185
0	18,7	5,9	2928	1856	2635	1670	2342	1484	2050	1299	1757	1113	1464	928	1171	742	878	557	586	371	293	185
18,8	0	0	1334	2507	1201	2256	1067	2006	934	1754	800	1503	667	1253	533	1003	400	752	267	501	133	250
10,9	0	0	1714	2332	1542	2099	1371	1866	1200	1632	1029	1399	857	1166	685	933	514	700	343	466	171	233
2,9	0	0	2019	2182	1817	1964	1615	1746	1413	1527	1211	1309	1010	1091	807	873	605	655	404	436	202	218
0	2,9	0	2230	2146	2006	1931	1783	1717	1561	1502	1338	1287	1115	1073	892	858	668	644	446	429	223	214
0	10,8	0	2565	2187	2308	1968	2052	1750	1795	1530	1539	1312	1283	1093	1026	875	769	656	513	437	256	218
0	18,7	0	2982	2227	2684	2004	2386	1782	2088	1558	1790	1336	1491	1113	1193	891	894	668	597	445	298	222

Apêndice I

Parâmetros de Calibração para o Teste 3

Tabela I.1 Parâmetros de entrada do algoritmo de calibração de todas as imagens geradas a partir da Foto F.1

Foto F.1																						
			10.08 MP		8.163 MP		6.45 MP		4.937 MP		3.627 MP		2.519 MP		1.613 MP		0,907 MP		0,403 MP		0,101 MP	
X	Y	Z	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v
18,8	0	23,7	478	507	430	456	382	406	335	355	287	304	239	253	191	203	143	152	96	101	48	50
10,9	0	23,7	963	479	866	431	770	383	674	335	578	287	481	239	385	191	289	144	193	96	96	47
2,9	0	23,7	1369	458	1232	413	1095	366	958	320	821	274	684	229	547	183	410	137	274	91	137	45
0	2,9	23,7	1588	459	1429	413	1270	367	1111	321	953	275	794	229	635	183	476	137	318	91	159	46
0	10,8	23,7	1852	473	1666	427	1481	379	1296	331	1111	284	926	237	740	190	555	142	371	94	185	47
0	18,7	23,7	2194	494	1974	446	1755	396	1536	346	1317	297	1097	247	878	198	658	148	439	99	219	49
18,8	0	17,8	527	887	474	799	422	710	369	621	316	532	264	444	211	355	158	266	105	177	52	88
10,9	0	17,8	988	831	890	748	791	664	692	581	593	498	494	415	395	332	297	249	198	166	99	83
2,9	0	17,8	1385	784	1246	705	1108	626	970	548	831	470	693	391	554	313	415	235	277	156	139	78
0	2,9	17,7	1593	786	1435	707	1275	629	1116	550	956	472	797	393	638	314	478	236	319	157	159	78
0	10,8	17,7	1856	837	1671	754	1485	669	1300	586	1114	502	928	418	743	335	556	251	372	167	186	83
0	18,7	17,7	2184	902	1965	812	1747	721	1529	631	1311	541	1092	451	873	361	655	270	437	180	218	90
18,8	0	5,9	615	1579	553	1421	491	1263	430	1105	369	947	307	789	246	631	184	474	123	315	61	157
10,9	0	5,9	1042	1477	937	1329	833	1181	729	1033	626	885	521	738	417	590	313	443	208	295	104	147
2,9	0	5,9	1413	1388	1272	1249	1131	1110	989	970	848	832	707	694	566	555	424	416	283	277	141	139
0	2,9	5,9	1608	1395	1447	1256	1286	1116	1126	976	965	837	804	697	643	558	482	418	322	279	161	139
0	10,8	5,9	1855	1508	1669	1358	1483	1207	1298	1055	1113	905	927	754	742	603	556	452	371	300	185	151
0	18,7	5,9	2165	1643	1948	1479	1732	1315	1516	1150	1299	986	1083	821	866	657	649	493	433	328	216	164
18,8	0	0	654	1885	589	1696	524	1508	458	1319	393	1131	327	942	262	754	196	566	131	377	65	188
10,9	0	0	1070	1769	962	1592	855	1415	749	1237	642	1061	535	884	428	707	321	531	214	354	107	177
2,9	0	0	1426	1663	1284	1497	1141	1330	999	1163	856	997	713	831	571	665	428	499	285	332	143	166
0	2,9	0	1620	1674	1458	1506	1296	1340	1135	1171	973	1004	810	837	648	669	486	502	324	334	162	168
0	10,8	0	1854	1813	1669	1632	1483	1450	1298	1268	1113	1087	927	906	742	725	556	544	371	362	185	181
0	18,7	0	2156	1974	1940	1777	1725	1579	1510	1381	1294	1184	1078	987	863	789	647	592	431	394	216	197

Tabela I.2 Parâmetros de entrada do algoritmo de calibração de todas as imagens geradas a partir da Foto F.2

Foto F.2																						
X	Y	Z	10.08 MP		8.163 MP		6.45 MP		4.937 MP		3.627 MP		2.519 MP		1.613 MP		0,907 MP		0,403 MP		0,101 MP	
			u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v
18,8	0	23,7	778	498	700	448	622	399	545	348	467	299	389	249	311	199	233	149	156	99	78	49
10,9	0	23,7	1209	504	1088	454	967	403	846	353	725	302	605	252	483	202	363	151	242	100	121	50
2,9	0	23,7	1539	511	1384	460	1230	409	1077	358	923	307	769	256	615	204	461	154	308	102	154	51
0	2,9	23,7	1762	521	1586	469	1410	417	1234	365	1058	313	881	261	705	208	529	157	353	104	176	52
0	10,8	23,7	2119	538	1906	484	1694	431	1483	377	1271	323	1059	269	847	215	635	161	424	108	212	54
0	18,7	23,7	2544	562	2289	506	2035	450	1781	393	1526	337	1272	281	1017	225	763	169	509	112	254	56
18,8	0	17,8	801	907	721	816	640	725	560	634	481	544	401	453	320	363	240	272	160	181	80	90
10,9	0	17,8	1209	870	1088	782	967	695	846	608	725	521	604	434	484	347	363	261	242	173	121	87
2,9	0	17,8	1535	839	1382	755	1228	671	1075	587	921	504	768	420	614	336	460	252	307	168	153	84
0	2,9	17,7	1750	845	1575	760	1400	676	1225	591	1050	507	875	422	700	338	525	253	350	169	175	84
0	10,8	17,7	2102	888	1891	800	1681	711	1471	621	1261	533	1051	444	840	355	630	267	420	177	210	89
0	18,7	17,7	2513	941	2262	846	2010	753	1760	658	1508	564	1257	471	1005	376	754	282	503	188	251	94
18,8	0	5,9	829	1662	746	1496	663	1329	580	1162	497	997	414	831	332	665	249	499	166	332	83	166
10,9	0	5,9	1214	1549	1088	1396	970	1240	852	1083	729	929	607	775	485	620	363	465	242	310	120	156
2,9	0	5,9	1525	1457	1372	1311	1220	1165	1067	1019	915	874	762	728	610	583	457	437	305	291	152	146
0	2,9	5,9	1729	1458	1556	1312	1383	1166	1210	1020	1037	875	864	729	691	583	518	437	346	291	173	146
0	10,8	5,9	2061	1547	1855	1393	1648	1238	1443	1083	1237	928	1030	773	824	619	618	465	412	309	206	155
0	18,7	5,9	2452	1649	2206	1484	1961	1319	1717	1154	1472	989	1226	824	981	659	735	495	491	329	245	165
18,8	0	0	839	1999	755	1800	670	1600	587	1399	503	1199	419	999	335	800	251	600	168	400	84	200
10,9	0	0	1215	1861	1094	1675	972	1489	851	1302	729	1116	607	931	486	745	364	559	243	372	121	186
2,9	0	0	1521	1743	1368	1568	1217	1394	1064	1219	912	1045	760	872	608	697	456	523	304	348	152	175
0	2,9	0	1724	1741	1551	1568	1378	1394	1206	1219	1034	1045	862	871	689	697	517	523	345	348	172	174
0	10,8	0	2042	1853	1837	1667	1633	1482	1429	1296	1225	1111	1021	926	817	741	612	556	408	370	204	185
0	18,7	0	2422	1973	2180	1776	1937	1578	1695	1380	1453	1184	1211	986	969	789	726	592	485	394	242	197

Referências Bibliográficas

[1] Silva, L. C. “Método Robusto para a Calibração de Câmeras em Estereofotogrametria”, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 2003.

[2] Strang, Gilbert. “Linear Algebra and Its Applications”, 3ª Edição, Ed. Harcourt, Brace, Jovanovich, 1988.