

# AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO DE CÂMERAS NÃO METRICAS COM A VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA

Pedro Paulo Maciel Silva, UFU, pedropaulomacielsilva@gmail.com  
Marcio Augusto Reolon Schmidt, UFU, marcioschmidt@feciv.ufu.br

**Resumo:** O método de calibração de câmeras criado por Zhang (1998) é um dos mais aplicados por possuir execução simplificada e fornecer resultados satisfatórios. Entretanto, na literatura não existe qualquer estudo sobre as variações possíveis na montagem do sistema câmera/alvo durante o processo de calibração. Esta pesquisa apresenta uma verificação da influência da variação da distância entre a câmera de pequeno formato a ser calibrada e o padrão quadriculado usado como alvo na determinação dos parâmetros de calibração. Esta etapa é necessária para a utilização de câmeras em projetos de engenharia como o monitoramento de estruturas através da determinação dos parâmetros geométricos da câmera para que sejam realizadas as correções das distorções perspectivas das imagens. Foram realizadas três seções de fotos com montagens do alvo a curta, média e a longa distância. As fotos foram processadas no programa Matlab e os valores encontrados para as três situações foram comparados. Verificou-se que os parâmetros sofrem variações com a distância, sendo que quanto mais longe, piores são os resultados.

**Palavras chave:** Parâmetros de calibração. Método de Zhang. Matlab. Câmera de pequeno formato.

## ASSESSMENT OF VARIATION IN NON-METRIC CAMERA CALIBRATION PARAMETERS WITH CHANGE IN DISTANCE

**Abstract:** The camera calibration method created by Zhang (1998) is one of the most applied due to its simplified implementation and satisfactory results. However, in the literature there is no researches about possible variations in the configuration of the camera/target system during the calibration process. This study presents an assessment of how distance variation between the small-format camera and the planar pattern used as target influence on the determination of the calibration parameters. This step is necessary to use small format cameras in engineering projects, such as structures monitoring, through the determination of camera geometric parameters for subsequent corrections in the distortions of the images taken with it. For the experiment, there were three sections of photos, with the target at short, medium and long distance. The photographs were processed in Matlab and the values found for the three situations were compared. It was found that the calibration parameters are influenced by distance variations.

**Keyword:** Calibration parameters. Zhang's method. Small-format camera.

### 1. INTRODUÇÃO

A detecção e monitoramento do movimento de estruturas em obras civis e geotécnicas de médio e grande porte tem se tornado cada vez mais importantes para prevenção de desabamentos parciais ou totais, avaliações dos efeitos de subsidência ou sublevação do solo ou recalques de fundações anormais sob o ponto de vista de projeto.

A integração entre a superestrutura e a fundação tem como consequência deslocamentos verticais decorrentes dos carregamentos aplicados. O terreno sobre o qual recairão as futuras cargas projetadas torna-se elemento chave de investigação, pois parâmetros de deformação e resistência apresentam problemas devido à heterogeneidade natural do solo (Kavvadas, 2003) e, como consequência, não são completamente representativos das possíveis condições em toda obra. Desta forma, os deslocamentos de superfície tornam-se um importante indicador de estabilidade

estrutural e de superfície que devem ser incluídos em um regime de acompanhamento global, chamado de monitoramento (Stewart e Tsakiri, 2006).

O acompanhamento durante e após a construção permite investigar o seu comportamento a partir das medições de recalques da construção e movimentos do terreno do entorno baseado na previsão teórica dos limites admissíveis de deslocamento. No que diz respeito às propriedades de deformação não há duas obras civis idênticas e, portanto, as conclusões sobre o comportamento de uma não podem ser extrapoladas para outra (Stewart e Tsakiri, 2006). O monitoramento é usado para se avaliar a estabilidade e comportamento da obra.

Tradicionalmente se utiliza a auscultação geodésica para o monitoramento de campo dessas estruturas. Equipamentos topográficos de alta precisão são instalados nos entornos das estruturas e alvos são fixados nas suas paredes com o objetivo de detectar qualquer movimento fora dos previstos. Em longos períodos, esse acompanhamento permite avaliar as condições de segurança de barragens, hospitais, pontes e outras obras de engenharia. No âmbito da engenharia civil estes deslocamentos são representados pelos recalques e suas velocidades.

A comparação das coordenadas obtidas em campo em diferentes períodos permite o cálculo de deslocamentos e velocidades tridimensionais da estrutura como um todo. Para que esta comparação seja possível é necessário garantir as mesmas condições de levantamento nas diferentes épocas, sendo a desobstrução das linhas visadas entre os pontos de controle e monitoramento instalados nas estruturas, a adequada determinação das correções devido à variação de temperatura e pressão, a manutenção da qualidade dos equipamentos e a estabilidade dos pontos utilizados para a instalação dos equipamentos. Isto nem sempre é possível devido a dinâmica do processo construtivo, de modo que entre uma campanha e outra podem surgir impedimentos físicos. Associa-se a isso o fato dos métodos tradicionais exigirem a fixação dos alvos que as estações totais precisam apontar (prismas refletores ou fitas refletoras), ou antenas GPS, sejam colocados o mais próximo possível do ponto a se monitorar. Em muitos casos além de ser uma tarefa difícil, é bastante perigosa dado o contexto em que se encontram as estruturas monitoradas.

Alternativamente, Daí e Lu (2010) propuseram o uso da técnica de fotogrametria terrestre com câmeras fotográficas digitais de pequeno formato. Nesta técnica, o mesmo ponto de monitoramento é visado de diferentes locais estáveis para se determinar as suas coordenadas em imagens digitais de forma a correlacionar a posição na imagem com as coordenadas reais sem a necessidade de ocupação física de um alvo. O uso de câmeras digitais semiprofissionais em pequenas distâncias e vista lateral ainda apresentam a viabilidade financeira. Entretanto seu uso exige um correto conhecimento da posição e atitude da câmera no momento da tomada das imagens e seus parâmetros geométricos calibrados, o que não foi devidamente observado pelos autores.

A calibração é a determinação dos parâmetros geométricos e construtivos do sistema lentes-sensor. Em todos os trabalhos de fotogrametria, seja área com câmeras métricas ou terrestre com câmeras não-métricas, o conhecimento desses parâmetros é de fundamental importância. É necessário que o ponto de onde são tomadas as imagens seja conhecido com alta precisão para se restabelecer a geometria do modelo fotogramétrico (orientação interior, relativa e exterior) e se obter as coordenadas com

precisão. A determinação da atitude exige, portanto, o conhecimento da posição (X, Y, Z) e atitude (rotações  $\Phi$ ,  $K$  e  $\Omega$ , em relação aos eixos X, Y e Z) de forma que as equações de colinearidade possam ser resolvidas (Gonçalves e Mitshita, 2004).

Entretanto, para a aplicação de análises fotogramétricas com câmeras de pequeno formato no movimento de recalques e subsidências exige que os alvos sejam colocados de modo que exista uma linha de visada desobstruída entre a câmera e o ponto monitorado. Ou seja, as condições para a tomadas das fotos devem ser as mesmas daquelas dos métodos tradicionais. As vantagens do uso de técnicas de detecção remota estão na quantidade de pontos tomados, o intervalo de tempo para tomar os pontos representados nas fotos e a não necessidade de fixação de alvos em estruturas comprometidas ou que estejam se deslocando fora dos limites de projeto.

Para validar o uso de câmeras de pequeno formato, é necessário que os parâmetros geométricos da câmara usada sejam conhecidos em detalhes para, posteriormente, serem realizadas as correções das distorções perspectivas das imagens e realizar a resseção espacial. Por esta razão, esta pesquisa identificou a variação dos parâmetros de calibração obtidos pelo método de Zhang (1998) ao se variar a distância entre a câmera e a posição do alvo de calibração. Este método é um dos mais utilizados, pela sua facilidade de aplicação, mas não há qualquer estudo sobre as variações possíveis na montagem do sistema câmera/alvo durante o processo de calibração. Em outras palavras, foi identificado que a porcentagem de cobertura do alvo na imagem influencia a determinação dos parâmetros geométricos da câmera.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

Segundo Zhang (1998), as técnicas de calibração podem ser grosseiramente divididas em dois grupos: a calibração fotogramétrica e a autocalibração. A calibração fotogramétrica é realizada através da observação de um objeto tridimensional com a câmera instalada em uma posição definida com precisão. Em alguns métodos, a calibração também é realizada com a movimentação do objeto em um trajeto conhecido. Esta técnica permite a obtenção de valores bem definidos para os parâmetros de calibração, porém para sua execução, são necessários equipamentos específicos e caros montados em laboratórios e universidades. A técnica de autocalibração é executada sem o uso de objetos específicos. A câmera é apenas movimentada em uma cena estática e a rigidez da cena produz restrições aos parâmetros internos da câmera. Assim, através da correspondência de pontos homólogos entre diferentes imagens, é possível se descobrir todos os parâmetros necessários. Apesar de sua flexibilidade, o método ainda não é consistente o suficiente, pois muitos parâmetros precisam ser determinados e nem sempre é possível se chegar a resultados confiáveis.

O método de Zhang é um método híbrido, pois se encontra a meio caminho entre a calibração fotogramétrica e a autocalibração. Este método faz uso de um objeto 2D (um gabarito em xadrez com quadrados brancos e pretos impresso em uma superfície rígida) para a tomada da foto com a câmera a ser calibrada, ao invés do objeto 3D ou de nenhum objeto. Em termos práticos, o método de Zhang se mostra mais flexível que o primeiro e mais robusto que o último, sendo assim uma técnica bem sucedida (ZHANG, 1998) e que apresenta resultados satisfatórios.

Utiliza-se o Método dos Mínimos Quadrados (M.M.Q) para a determinação da estimativa única dos parâmetros ajustados e avaliação da sua variância (resíduos). O princípio fundamental do M.M.Q, é que a soma dos quadrados dos resíduos seja mínimo (Gemael, 1994; Dalmolin 2004). O MMQ, em seus diferentes métodos de ajustamento, permite definir a qualidade e o grau de confiança para as coordenadas e medidas envolvidas. Os parâmetros a serem definidos são a distância focal ( $f_c$ ), as distorções radiais ( $k_1, k_2, k_3$ ), a distorção descentrada ( $P_1, P_2$ ), a posição do centro do sensor da câmera ( $x_0, y_0$ ), e escalas nos eixos  $u$  e  $v$  da imagem.

O método de Zhang (ZHANG, 1998) consiste na tomada de, no mínimo, duas imagens (necessárias para a solução matemática) de um padrão quadriculado. A automação do método, realizada por Bouguet (2013), utiliza os cantos de cada quadrado presente no gabarito para aumentar o número de pontos existentes. Dessa forma, duas fotografias seriam suficientes para resolver o sistema de equações com solução única. Entretanto, para haver superabundância de equações e aumentar os graus de liberdade, o próprio autor recomenda a tomada de um número entre quinze e vinte e cinco fotografias. Além disso, o gabarito é movimentado para diferentes posições de forma a existir translações e rotações entre os pontos homólogos presentes nas diferentes imagens. Este procedimento quebra as correlações internas dos parâmetros e permite, conforme demonstrou Zhang (1998), a redução nos valores do desvio padrão dos parâmetros.

A automação do processo de calibração realizada por Bouguet (2013) gerou o *toolbox* gratuito *Camera Calibration* para o ambiente de programação Matlab e as instruções para sua utilização, assim como a documentação completa sobre o tema estão disponibilizadas online. Esta alternativa para a realização de calibração se tornou uma forma viável para instituições por envolver baixos custos e garantir resultados precisos.

Um aspecto a ser considerado na literatura é que, segundo Zhang (1998), os movimentos realizados com a câmera ou com o padrão não precisam ser conhecidos. Assim, a distância entre o padrão e a câmera não precisa ser conhecida, pois não influenciam negativamente os resultados da calibração. Esta pesquisa, entretanto, verificou que mesmo pequenas variações de distância mudam não apenas os resíduos, mas os próprios valores de calibração, em especial a distância focal e as distorções radiais.

## 2.1. Calibração pelo método de Zhang no matlab

Este método apenas requer o uso de um padrão de calibração coplanar e bidimensional. O movimento relativo envolvido nas imagens de calibração usadas não necessita de ser conhecido (AZEVEDO et al, 2008). O método exige que durante o processo de aquisição das imagens, as características internas da câmara não sejam alteradas, como alterar o zoom da câmera ou outras configurações. Ou seja, os seus parâmetros intrínsecos devem manter-se constantes durante a aquisição; assim, somente os parâmetros extrínsecos são alterados quando o padrão de calibração é reposicionado (AZEVEDO et al, 2008).

Ao restringir que os pontos 3D do padrão de calibração sejam coplanares ( $Z = 0$ ), o mapeamento entre pontos 3D e 2D da equação (1) simplifica-se, obtendo-se (AZEVEDO et al, 2008):

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \cong A [R | \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{Z=0} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \cong A \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

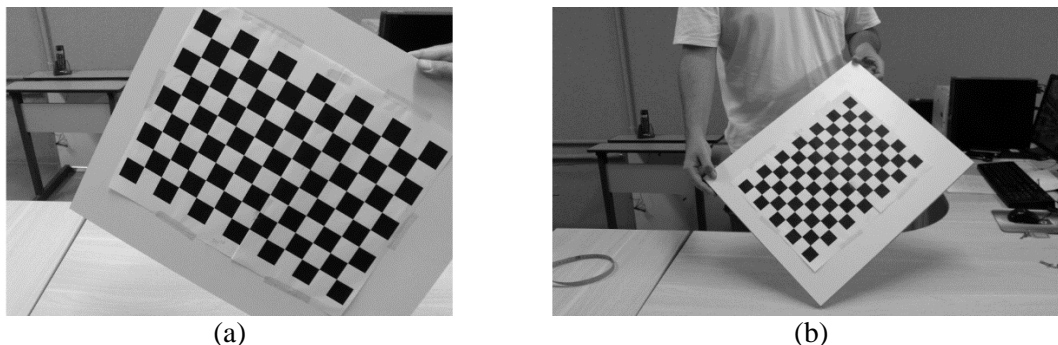
Na Equação 1,  $r_{ij}$  são os elementos da matriz de rotação  $R$  e  $t_i$  os elementos do vetor de translação. A restrição ao plano de  $Z = 0$  define uma transformação projetiva entre o plano real e o plano imagem. Assim, um ponto  $P = (X, Y, 1)$  do padrão de calibração e o ponto  $p = (u, v, 1)$ , estão relacionados pela transformação projetiva influenciada pela escala.

Como observa-se na equação 1, cada ponto  $p = (u, v, 1)$  tomado na imagem gera um conjunto de equações de colinearidade para  $u$  e para  $v$ . Dessa forma, são trabalhadas 17 incógnitas da orientação exterior ( $r_{11}$  a  $r_{32}$ ,  $t_1$  a  $t_3$ , escala em  $X$ , escala em  $Y$ , posição e atitude da câmera) e os 13 parâmetros internos (distância focal  $f_x$  e  $f_y$ , as distorções radiais das lentes  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$ , a distorção descentrada das lentes  $P_1$  e  $P_2$ , a posição do centro do sensor da câmera  $x_0$  e  $y_0$ , e escalas nos eixos  $u$  e  $v$  da imagem). Por esta razão, o padrão utiliza os cantos dos quadrados do padrão como forma de obter um número maior de equações do que as incógnitas envolvidas e, assim, obter aumentar o número de graus de liberdade do sistema aplicado ao M.M.Q paramétrico.

### 3. METODOLOGIA

O padrão quadriculado foi impresso nas dimensões 3 x 3 cm e fixado a placa rígida de madeira. A câmera utilizada na calibração foi uma FujiFilm Fd-1000s de 10Mp com aproximadamente nove anos de uso. A câmera foi instalada em um tripé a uma altura de 146 cm. A posição escolhida para a tomada das fotos foi mantida inalterada durante todo o processo, ou seja, nas três configurações de teste, a câmera permaneceu inalterada sendo alterada a posição do gabarito.

Foram definidos três diferentes conjuntos de dados em função da distância da câmera. A primeira tomada foi realizada com o padrão à 50 cm da câmera e foram feitas 22 fotos. Para a segunda tomada, o padrão foi posicionado à 95 cm da câmera e foram feitas 24 fotos. A terceira tomada foi feita com o padrão à 245 cm da câmera e foram batidas 26 fotos. A Figura 1a e 1b exemplificam as tomadas 1 e 2, respectivamente. Durante as tomadas das fotos, a temperatura e iluminação foram mantidas constantes no laboratório de forma a não alterar a captação das imagens.



(a) (b)  
Figura 1 – Foto a curta distância (a) e média distância (b)

Posteriormente foi realizado os processamentos segundo Bouguet (2013) para cada conjunto de imagens tomadas. As imagens foram carregadas no ambiente Matlab. O processamento do *camera calibration toolbox*, é parcialmente automatizado. O programa apresenta uma imagem de cada vez e o usuário deve informar a área do padrão a ser considerada. Foram utilizados 13 quadrados na direção X e 9 quadrados na direção Y. As fotos em diferentes posições tomada a curta distância estão apresentadas na Figura 2.

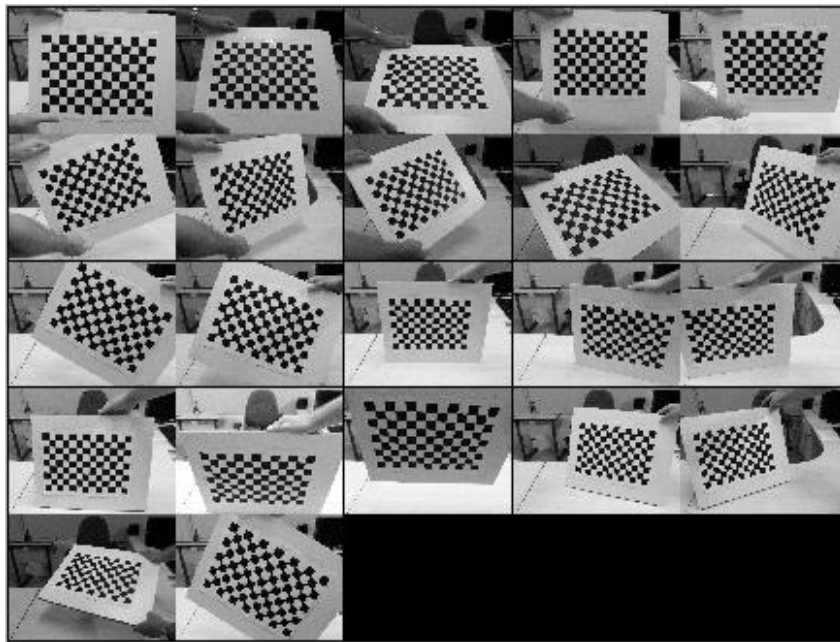


Figura 2 – Imagens lidas para a calibração

A partir da segunda foto processada o programa tem condições de oferecer em tempo real uma previsão das posições préprocessadas para as demais fotos através da indicação de cruzes vermelha nos cantos de cada quadrado (Figura 3). A medida que mais fotos são processadas, os resultados numéricos são apresentados no ambiente do Matlab e a posição das cruzes vermelhas é melhor aproximada nas imagens, devido a melhor estimativa dos parâmetros de calibração. Existe a opção de realizar a indicação das posições dos cantos de forma manual. Este método é consideravelmente mais trabalhoso e, a não ser que a foto possua muitas distorções, os resultados são semelhantes ao caso automático.

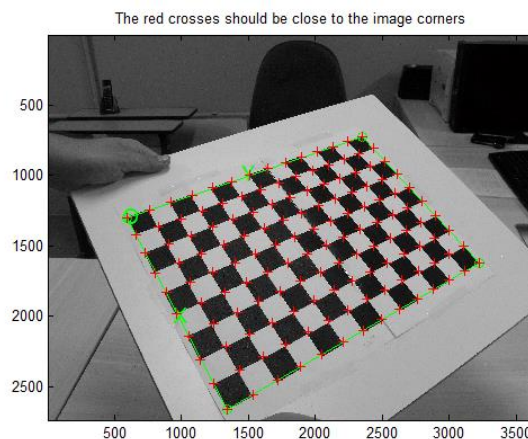


Figura 3 – Padrão com os cantos destacados

Com a calibração realizada, pode-se gerar gráficos para a visualização dos resultados e também da relação entre as diferentes posições do padrão e a posição fixa da câmera, através das estimativas dos parâmetros externos. As Figuras 4a e 4b mostram os gráficos de parâmetros extrínsecos para as fotos tiradas a meia e curta distância, respectivamente.

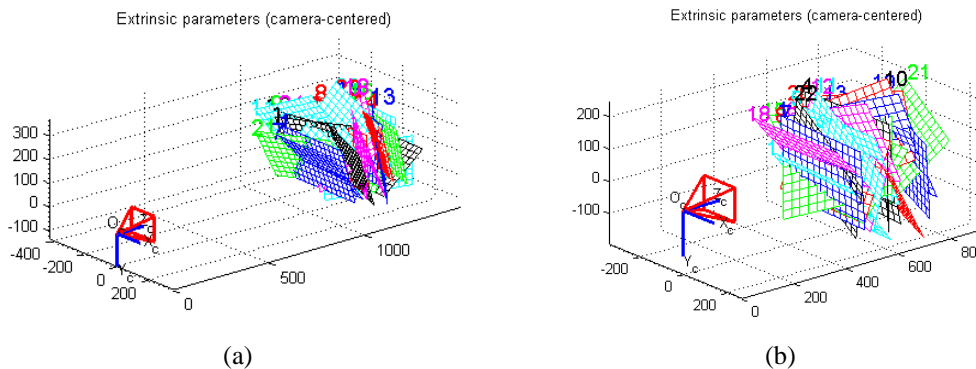


Figura 4 – Parâmetros extrínsecos para fotos a meia distância (a) e curta distância (b)

Após realizada a primeira calibração, pode-se refinar os resultados obtidos através uma nova interação com os valores ajustados como parâmetros de entrada. Esta etapa é opcional e baseia-se no valor médio de *pixel error* obtido no primeiro processamento. Entende-se que esse valor seja influenciado no processo de detecção e extração de cantos das células do padrão (Figura 3), algumas imperfeições acontecem e acabam influenciando no resultado final. Na nova interação, as posições mostradas na tela servirão para uma avaliação visual do usuário na tentativa de uma identificação aprimorada das coordenadas do padrão, minimizando assim os erros existentes na primeira calibração. As coordenadas destes pontos entram novamente como equações aprimoradas no ajustamento para refinamento dos parâmetros de calibração.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a extração dos cantos ser feita em todas as imagens, obtém-se os parâmetros de calibração através da opção *Calibration* contida no toolbox. Os parâmetros apresentados são a distância focal; as coordenadas do ponto principal do sensor em relação ao centro da imagem; a diferença do ângulo entre os eixos u e v da imagem (alpha c), em radianos, com o valor adotado como padrão ( $90^\circ$ ); os coeficientes de distorção radial e tangencial; e o valor de dispersão das medidas dos pixels (*pixel error*), que equivale ao erro médio quadrático em cada direção.

### 4.1. Resultados para fotos a curta distância

Os resultados do processamento das 22 fotografias tomadas à curta distância estão apresentados na Tabela 1. Os valores são expressos em pixels por se tratar da forma de implementação do programa. Nota-se que os desvios padrão da distância focal ficou em 6,21 pixels em X e 6,45 pixels em Y. O erro médio quadrático neste caso é de 8,95 pixels.

Tabela 1 – Resultados para fotos a curta distância

|                                       | Resultados                                   | Resíduos                                      |
|---------------------------------------|--|---|
| Distância focal (fc)                  | [ 3594.54058 3594.13463 ]                    | ± [ 6.21785 6.45835 ]                         |
| Ponto Principal (cc)                  | [ 1896.12731 1479.29151 ]                    | ± [ 8.60714 6.73448 ]                         |
| Alpha_c                               | [ 0.00000 ]                                  | ± [ 0.00000 ]                                 |
| Distorção Radial (k1, k2, k3, k4, k5) | [ -0.23029 0.24438 0.00206 0.00130 0.00000 ] | ± [ 0.00494 0.01965 0.00037 0.00040 0.00000 ] |
| Pixel Error                           | [ 1.23359 1.27176 ]                          |   |

A determinação da distância focal em mm para ser usada nas fórmulas da fotogrametria é dada pela Equação 2. Dessa forma a distância focal calibrada é de 10,9667 mm, um pouco acima da informado pelo fabricante que é de 6,7 mm para a posição automática. Entretanto, a câmera já conta com mais de nove anos de uso contínuo, o que pode ter alterado os valores originais de fábrica.

$$Fc = fc_{médio} * \frac{T_s}{T_c} \tag{2}$$

Em que:

$fc_{médio}$  é a média dos valores  $fc_x$  e  $fc_y$  em pixel;

$T_s$  é o tamanho do sensor informado pelo fabricante em mm. Para a Fuji finepix S 1000fd este tamanho é 11,13 mm;

$T_c$  é o número de colunas das imagens usadas, nesta pesquisa 3746 colunas.

Os valores de distorção radial apresentaram valores dentro do esperado, com desvios padrões relativamente pequenos. Da mesma forma o RMS calculado para a dispersão dos pixels após ajustamento ficou da ordem de 1,23359 pixels para X e 1,27176 pixels para Y. A Figura 5 mostra graficamente a dispersão dos valores dos pixels (*pixel error*) antes do refinamento do ajustamento (Figura 5a) e após a nova extração dos cantos com os parâmetros de distorção já ajustados (Figura 5b). Nota-se a mudança na escala da dispersão, sendo que antes os valores variam 60 pixels na direção Y e 80 na direção X, e após o ajustamento essa variação ficou em 5 e 6 pixels, respectivamente às direções X e Y.

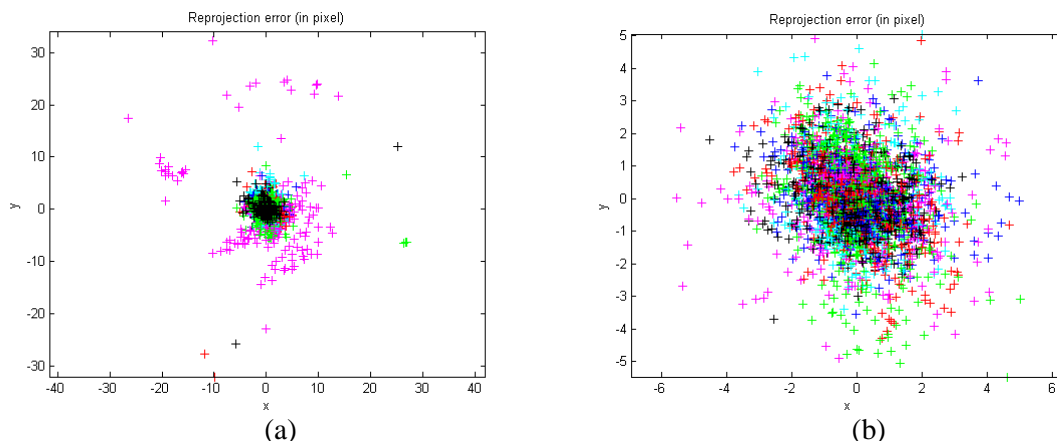


Figura 5 – Dispersão dos pixels amostrais extraído dos cantos antes (a) e após (b) ajustamento



## 4.2. Resultados para as fotos à meia distância

Os resultados encontrados para o processamento das 24 fotos tiradas a meia distância são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados para as fotos a meia distância

|                                       | Resultados                                      | Resíduos   |
|---------------------------------------|---|--|
| Distância focal (fc)                  | [ 3567.45518 3566.92557 ]                       | $\pm$ [ 15.50555 15.98087 ]                          |
| Ponto Principal (cc)                  | [ 1991.11706 1494.76506 ]                       | $\pm$ [ 19.99711 15.45651 ]                          |
| Alpha_c                               | [ 0.00000 ]                                     | $\pm$ [ 0.00000 ]                                    |
| Distorção Radial (k1, k2, k3, k4, k5) | [ -0.22954 0.19889 0.00199<br>0.00243 0.00000 ] | $\pm$ [ 0.01153 0.06745 0.00095<br>0.00076 0.00000 ] |
| Pixel Error                           | [ 0.85255 0.84679 ]                             |  |

Foi encontrado para a distância focal um erro médio quadrático de 22,27 pixels, consideravelmente maior do que o erro encontrado para as fotos a curta distância. A distância focal encontrada com a equação 2, foi de 10,5987 mm, valor próximo ao calculado para a primeira situação.

Os valores encontrados para a distorção radial foram próximos aos encontrados na seção 4.1, portanto dentro do esperado e com baixos valores de desvios padrões. O RMS calculado para a dispersão dos pixels após ajustamento foi da ordem de 0,85255 pixels para X e 0,84679 pixels para Y, sendo menor do que o encontrado para as fotos a curta distância. A figura 6 mostra graficamente a dispersão dos valores dos pixels (*pixel error*) antes do ajustamento (Figura 6a) e após a nova extração dos cantos com os parâmetros de distorção já ajustados (Figura 6b). Antes do ajustamento, os valores variam 30 pixels na direção Y e 35 na direção X, e após o ajustamento essa variação ficou em 6 e 5 pixels, respectivamente às direções X e Y.

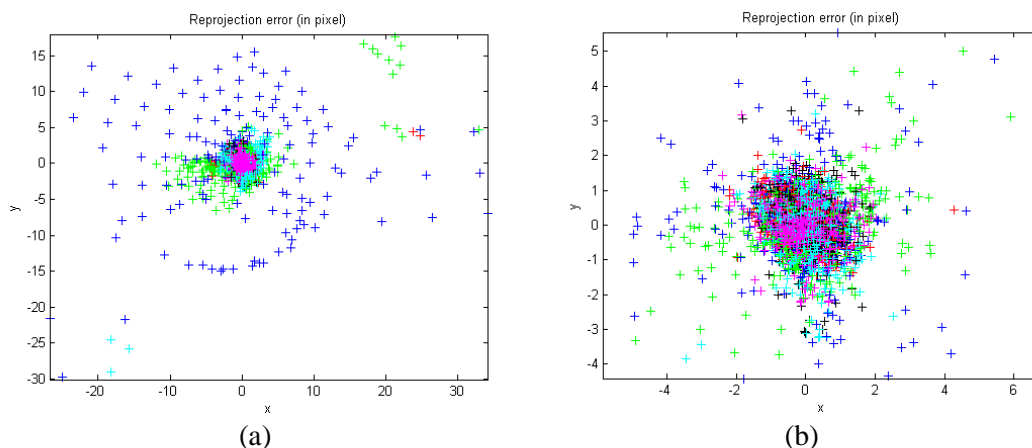


Figura 6 – Dispersão dos pixels extraídos dos cantos antes (a) e após (b) o ajustamento

## 4.3. Resultados para as fotos de longa distância

A Tabela 4 traz os resultados obtidos após o processamento das 26 fotos tiradas a longa distância. Foi encontrado um erro médio quadrático de 365,048 pixels para a distância focal, valor que está muito acima dos encontrados para as outras situações de teste.

Segundo a Equação 2, o valor da distância focal é de 24,3658 mm, muito acima do fornecido pelo fabricante e dos encontrados nas seções 4.1 e 4.2.

Tabela 4 – Resultados para as fotos a longa distância

|                                       | Resultados                                      | Resíduos   |
|---------------------------------------|---|--|
| Distância focal (fc)                  | [ 6792.31013 9609.20488 ]                       | ± [ 195.22191 308.45992 ]                        |
| Ponto Principal (cc)                  | [ 1730.60589 2790.85364 ]                       | ± [ 0.00000 0.00000 ]                            |
| Alpha_c                               | [ 0.00000 ]                                     | ± [ 0.00000 ]                                    |
| Distorção Radial (k1, k2, k3, k4, k5) | [ 2.52929 -0.97910 0.57498<br>0.00626 0.00000 ] | ± [ 0.21366 0.39526 0.02429<br>0.00234 0.00000 ] |
| Pixel Error                           | [ 1.71011 1.65239 ]                             |  |

Os valores encontrados para a distorção radial são discrepantes em relação aos encontrados para as fotos a curta e média distância e também apresentam resíduos consideravelmente superiores. Em comparação com as distorções para as fotos a curta distância, foram encontrados valores a cima, na ordem de 0,20872 para k1, 0,37561 para k2 e 0,02392 para k3.

O RMS calculado para a dispersão dos pixels após ajustamento foi da ordem de 1,71011 pixels para X e 1,65239 pixels para Y, sendo maior do que ambos os valores encontrados anteriormente. A Figura 7 mostra graficamente a dispersão dos valores dos pixels (*pixel error*) antes do ajustamento (Figura 7a) e após (Figura 7b) o ajustamento dos cantos das imagens. Antes do ajustamento, os valores variam até 90 pixels na direção Y e na direção X, e após o ajustamento essa variação ficou em torno de 5 pixels nas duas direções. Entretanto, pela dispersão pode-se aventar a possibilidade da influência de erros sistemáticos, pois a distribuição parece ter um padrão razoavelmente definido na Figura 7.

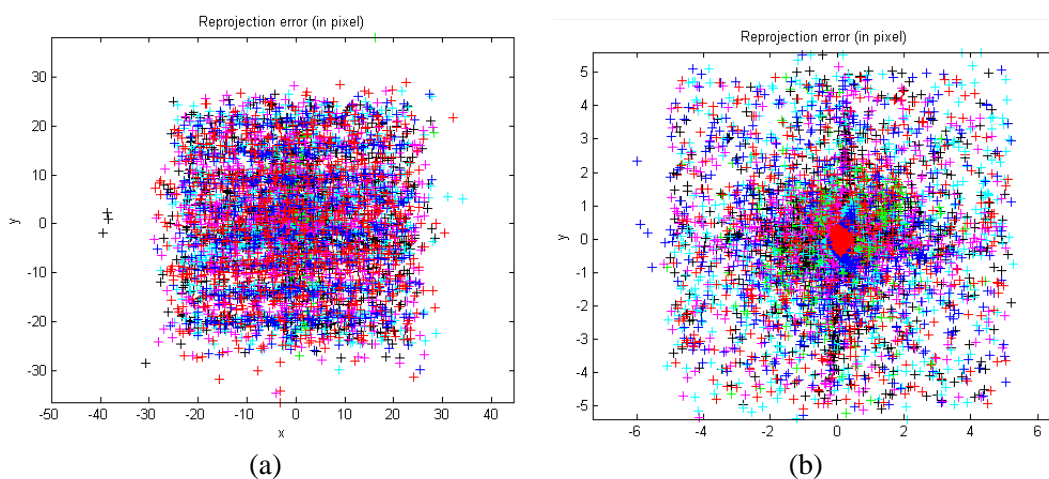


Figura 7 – Dispersão dos pixels extraídos dos cantos antes (a) e após (b) o ajustamento

Comparando-se os valores dos parâmetros encontrados após a nova extração dos cantos, nota-se que para as fotos a curta distância e a meia distância os valores possuem ordem de grandeza semelhante, sendo que a primeira possui menores resíduos e a segunda possui menor dispersão. Relacionando-se os parâmetros para as fotos a curta e média distância com as fotos a longa distância, vê-se que os valores são de ordem de

grandeza discrepantes e que os resíduos e o *pixel error* encontrados para a última são superiores aos valores encontrados para as duas primeiras.

Nas fotos da terceira tomada, pode-se notar a diminuição dos valores do *pixel error* encontrados antes e depois da nova extração dos cantos, porém os resíduos nos valores encontrados para os parâmetros continuam grandes. Tal fato leva a crer na pouca confiabilidade dos dados para as fotos de longa distância.

**4.4. Análise comparativa**

As variações dos parâmetros de calibração com a distância de captação das fotos são apresentadas abaixo. A análise permite a observação das diferenças existentes entre os resultados obtidos para as fotos a curta e média distância e as para as fotos a longa distância. Para todo os parâmetros, os resultados permanecem próximos para as duas primeiras tomadas e então sofre uma brusca variação para o último caso. Os dados estão nos gráficos de 1 a 3.

O Gráfico 1 mostra os valores da distância focal em relação à distância da câmera ao alvo. Nota-se que os dados sofrem forte variação para as fotos a longa distância. Por outro lado, nota-se que as menores incertezas foram encontradas para as fotos a curta distância, nas quais os cantos dos quadrados do alvo puderam ser melhor identificados.

O Gráfico 2 mostra as coordenadas do ponto principal x distância da câmera ao alvo e o Gráfico 3 traz os valores para a distorção radial x distância da câmera ao alvo. Em ambos, pode-se notar a proximidade dos resultados para as fotos a curta e a média distância e a considerável variação existente para as fotos a longa distância.

Pode-se ver uma comparação entre as incertezas encontradas para a distância focal nas três situações testadas no Gráfico 4. Nota-se que a incerteza cresce com o aumento da distância da câmera ao alvo, possuindo valores pequenos para as fotos a curta distância e valores muito superiores para as fotos a longa distância, mostrando a imprecisão para esses resultados.

Gráfico 1 – Distância focal x distância da câmera ao alvo

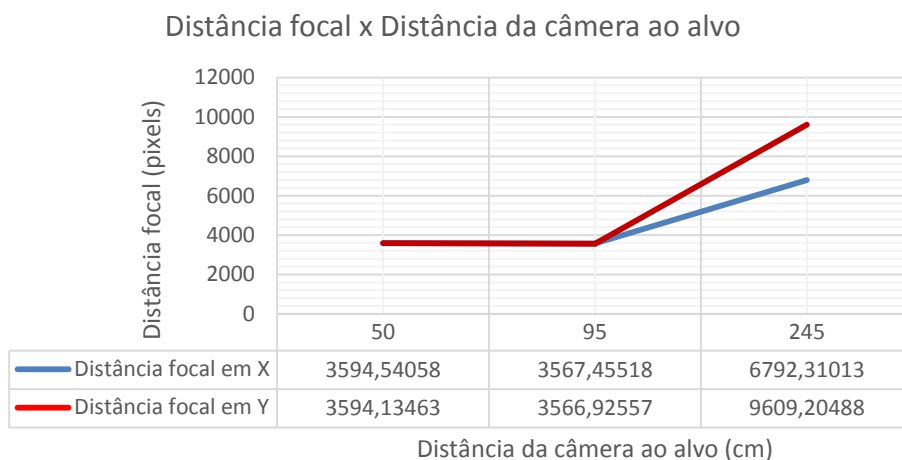


Gráfico 2 – Coordenadas do ponto principal x distância da câmera ao alvo

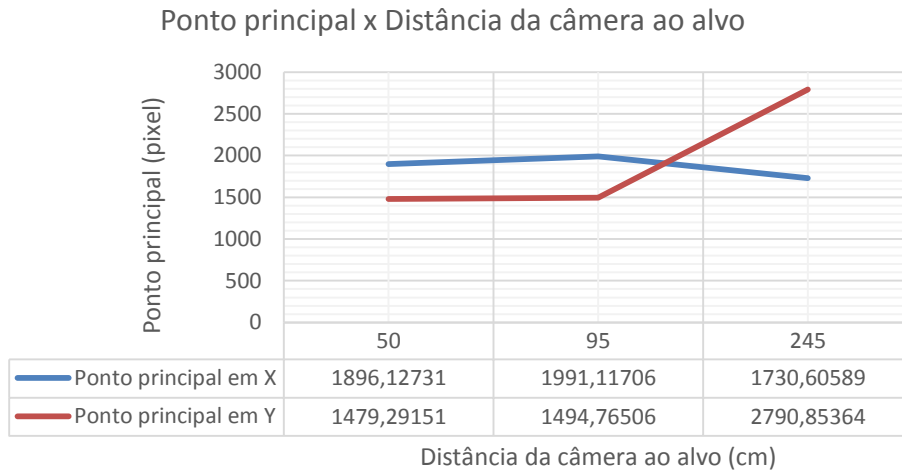


Gráfico 3 – Distorção radial x distância da câmera ao alvo

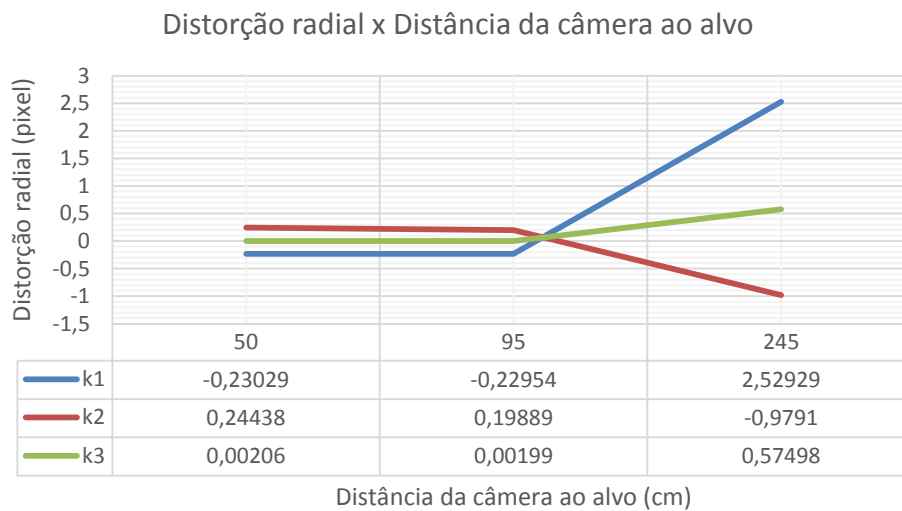
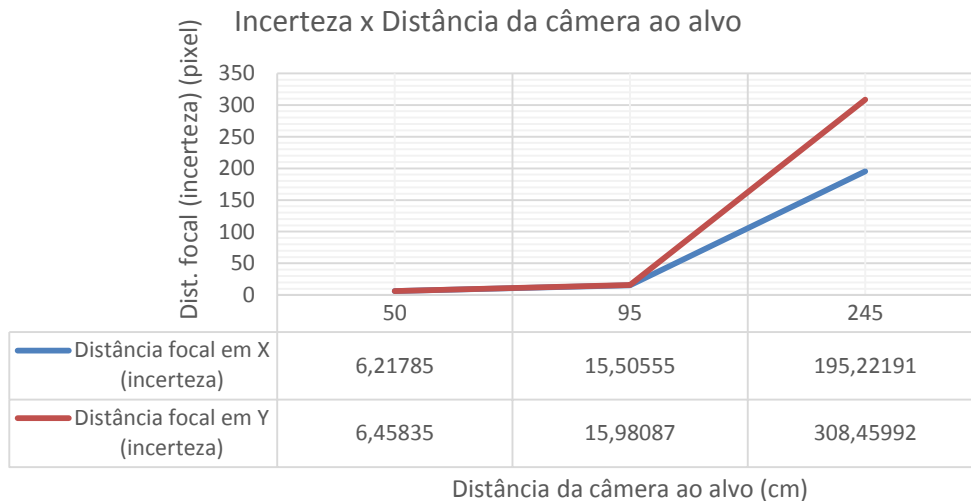


Gráfico 4 – resíduos (distância focal) x distância da câmera ao alvo



## 5. CONCLUSÕES

Nesta pesquisa foi verificada a existência de variações nos valores dos parâmetros de calibração encontrados pelo método de Zhang. Verificou-se que conforme aumenta a distância entre a câmera e o padrão quadriculado usado como alvo, os valores e os resíduos tendem a aumentar.

A partir dos resultados conclui-se, ainda que de forma não definitiva, que para a calibração de câmeras de pequeno formato através do método aplicado, a montagem do sistema câmera/alvo deve ser cuidadosamente definida. Entre os aspectos a serem observados estão a manutenção da curta distância, ou seja, entre 0,50m e 0,90m, que o padrão utilizado apareça por completo na imagem de forma que todas as células possam ser observadas em toda as fotos tomadas, a manutenção das condições de iluminação e temperatura para evitar dilatação do próprio padrão e da imagem durante o processo de captura.

Ressalta-se que esta variação pode estar ligada à incapacidade de detecção dos cantos do alvo para fotos a grandes distâncias. Em outras palavras, na longa distância pode-se questionar pequeno recobrimento de parte da imagem pelo padrão. Isso é justificado pela variação da dispersão dos pixels que parece seguir uma distribuição sistemática. Assim, o trabalho deve seguir com a variação de outras situações de testes, como mudanças na distância focal (zoom) e também a utilização de câmeras mais precisas e com maior resolução. Além disso, como os parâmetros de calibração são exclusivos para cada câmera, em especial após algum tempo de uso, recomenda-se que outros modelos de câmeras sejam calibrados para verificar a variação dos parâmetros pela distância.

## AGRADECIMENTO

Esta pesquisa conta com o apoio do CNPq Edital Universal nº 04/2012 e do Edital FAPEMIG/UFU 03/2014.

## REFERÊNCIAS

**AZEVEDO, T.C.S., TAVARES, J.M.R.S., VAZ, M.A.P.** *Análise do método de calibração proposto por Zhang.* In: 5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia. Maputo, Moçambique. ISBN: 978-972-8826-20-8, 12 pag, 2008. Disponível em [http://paginas.fe.up.pt/~tavares/publicacoes/publicacoes\\_pt.html](http://paginas.fe.up.pt/~tavares/publicacoes/publicacoes_pt.html). Acesso em 07/01/15.

**BOUGUET, J.** *Camera Calibration Toolbox for Matlab, 2013.* Disponível em [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/index.html](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html). Acesso em 14/12/2014.

**DAI, F. E LU, M.** *Evaluation of photogrammetry for monitoring settlement of building adjacent to foundation jobsite.* In: International Conference on Computing in Civil and Building Engineering. Nottingham University Press, 2010.

**DALMOLIN, Q.** *Ajustamento por Mínimos Quadrados, Imprensa Universitária, Curitiba, Brasil, 175 páginas, 2004.*

**GEMAEL, C.** *Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas.* Curitiba: Editora da UFPR, 319p, 1994.

**GONÇALVES, G.A. E MITISHITA, E.A.** *Detecção Automática de Alvos no Processo de Calibração pelo Método das Fotos Convergentes.* In: I SIMGEO. UFPE, Recife, 2004. Disponível em <http://www.ufpe.br/cgtg/ISIMGEO/CD/html/Fotogrametria%20e%20Sensoriamento%20Remoto/Artigos/f014.pdf>. Acesso em 14/10/2014.

**KAVVADAS, M. J.** *Monitoring and modelling ground deformations during tunneling.* In: 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece, 2003.

**STEWART, M. e TSAKIRI, M.** *Long-term dam surface monitoring using the global positioning system.* *Journal of Geospatial Engineering.* V. 3. Pp45-57, 2006. Disponível em [www.lsgu.polyu.edu.hk/staff/zlli/vol\\_3\\_1/05\\_maria.pdf](http://www.lsgu.polyu.edu.hk/staff/zlli/vol_3_1/05_maria.pdf) Acesso em 01/04/2012.

**ZHANG, Z.** *A Flexible New Technique for Camera Calibration, 1998.* Disponível em <http://research.microsoft.com/en-us/um/people/zhang/Calib/>. Acesso em 14/12/2014.