

FRANCISCO JAIME BEZERRA MENDONÇA

**MONITORAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO
COM FOTOGRAMETRIA À CURTA DISTÂNCIA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências.

CURITIBA
JUNHO
1984

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS

ATA DA SESSÃO PÚBLICA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS

Aos quinze dias do mês de junho do ano de um mil novecentos e oitenta e quatro, na Sala PI 12-13, do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná, às 14:00 horas, reuniu-se em sessão pública a Banca Examinadora da Prova de Dissertação do candidato ao Título de MESTRE EM CIÊNCIAS. o Sr. FRANCISCO JAIME BEZERRA MENDONÇA composta pelos seguintes membros:

Dr. JOSÉ BITTENCOURT DE ANDRADE


Prof.^a MARY ANGÉLICA AZEVEDO OLIVAS

Dr. FLÁVIO FELIPE KIRCHNER

Após os esclarecimentos prestados pelo candidato às arguições feitas pelos membros da Banca, os mesmos se reuniram em sessão secreta e atribuíram a referida Dissertação o conceito de TESE ACEITA, apenas condicionada à apresentação, no prazo de noventa dias, da redação final da mesma, com alterações sugeridas.

Curitiba, 15 de junho de 1984


Dr. JOSÉ BITTENCOURT DE ANDRADE


Prof.^a MARY ANGÉLICA AZEVEDO OLIVAS


Dr. FLÁVIO FELIPE KIRCHNER

Título da Dissertação: Monitoração de Estrutura de Conceito com Fotogrametria à Curta Distância.

D E D I C A T Ó R I A

A
minha esposa
Rosângela e meus
filhos Junior e Talita

A G R A D E C I M E N T O S

Aos meus pais.

Ao Prof. Dr. JOSÉ BITTENCOURT DE ANDRADE, pela orientação e interesse durante a elaboração do presente trabalho.

Ao C.E.S.E.C. - Centro de Estudos de Engenharia Civil (UFPR), pela colaboração na execução da experiência prática, principalmente na pessoa do Prof. Mauro Lacerda Santos Filho.

À U.F.P.E. - Universidade Federal de Pernambuco, por ter permitido me ausentar para a realização deste trabalho.

À U.F.P.R. - Universidade Federal do Paraná, pela oportunidade de fazer o mestrado.

À C.A.P.E.S. pelo apoio financeiro.

Ao Prof. Dr. CAMIL GEMAEL.

Ao Prof. Dr. JOÃO BOSCO LUGNANI.

Aos amigos e colaboradores, que de muitas maneiras me ajudaram e incentivaram,

Josemar Maria da Costa

Vanildo Rodrigues

José Berutti Vieira

Mary Angélica de Azevedo Olivas

Verônica Maria Costa Romão

François Albert Rosier

Carlos Alberto Pessoa Mello Galdino

R E S U M O

Através da fotogrametria analítica à curta distância, um elemento estrutural de concreto foi monitorado quando submetido a testes de comportamento estrutural. Empregou-se a câmara ROLLEIFLEX-SLX, com a distância focal de 50 mm, adaptada com um "reseau" composto de 121 cruces espaçadas de 5 mm. Foram tomadas fotografias convergentes, e esse método possibilitou a calibração da câmara simultaneamente a determinações das coordenadas dos pontos sinalizados. As fotos coordenadas foram medidas no ZEISS PLANICOMP C-100, pertencente ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná. Os resultados obtidos são de alta qualidade, ao nível do milímetro. O método apresenta a principal vantagem de possibilitar a monitoração de grande número de pontos com alta precisão e baixo custo.

A B S T R A C T

Through Analytical Short Range Photogrammetry, a structural element of concrete was monitored when submitted to tests of strain. It was employed a ROLLEIFLEX-SLX 50 mm focal length "reseau" camera. When convergent photographs were taken it became possible to calibrate the camera simultaneously with the determination of the coordinates of the targeted points. The photo-coordinates were measured with a PLANICOMP ZEISS C 100, property of the Graduate Program in Geodetic Science-Universidade Federal do Paraná (Federal University of Paraná). The results shown to be of high quality, at the level of milimeters. The method shows, as a main advantage, the possibility to monitor a great number of points with high accuracy and low cost.

SUMÁRIO

	pg
TÍTULO.....	i
DEDICATÓRIA.....	iii
AGRADECIMENTOS.....	iv
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
1. INTRODUÇÃO.....	01
2. FOTOGRAMETRIA ANALÍTICA E CALIBRAÇÃO.....	04
2.1 INTRODUÇÃO.....	05
2.2 FOTOGRAMETRIA.....	05
2.3 FOTOGRAMETRIA À CURTA DISTÂNCIA.....	05
2.4 POTENCIALIDADES DA FOTOGRAMETRIA À CURTA DISTÂNCIA.....	06
2.5 FOTOGRAMETRIA ANALÍTICA.....	06
2.5.1 SISTEMA DE COORDENADAS LIGADAS À FOTOGRAMETRIA ANALÍTICA.....	08
2.5.1.1 SISTEMA DE COORDENADAS DO ESPAÇO-OBJETO.....	08
2.5.1.2 SISTEMA DE COORDENADAS FOTOGRAMÉTRICAS.....	08
2.5.1.3 SISTEMA DE COORDENADAS FIDUCIAIS.....	08
2.5.2 EQUAÇÕES DE COLINEARIDADE.....	09
2.6 ERROS SISTEMÁTICOS EM FOTOGRAMETRIA.....	13

	pg
2.6.1	DISTORÇÕES ÓTICAS..... 14
2.6.1.1	DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA..... 14
2.6.1.2	DISTORÇÃO DESCENTRADA..... 15
2.6.2	REFRAÇÃO..... 16
2.6.3	O TRABALHO DO FILME..... 17
2.7	CALIBRAÇÃO EM FOTOGRAMETRIA..... 18
2.7.1	CALIBRAÇÃO PARA FOTOGRAMETRIA À CURTA DISTÂNCIA.. 19
2.7.2	CALIBRAÇÃO ANALÍTICA..... 19
2.7.3	MODELO MATEMÁTICO..... 19
2.7.4	INJUNÇÕES DE PESO..... 23
2.7.5	INJUNÇÕES DE POSIÇÃO..... 25
2.7.6	INJUNÇÕES DE DISTÂNCIA..... 25
3.	SISTEMÁTICA DE UTILIZAÇÃO DA FOTOGRAMETRIA À CUR- TA DISTÂNCIA..... 26
3.1	INTRODUÇÃO..... 27
3.2	DIFÍCIL PADRONIZAÇÃO..... 27
3.3	A AQUISIÇÃO DA INFORMAÇÃO..... 27
3.3.1	OS TIPOS DE CÂMARAS FOTOGRAMÉTRICAS..... 28
3.3.1.1	CÂMARA MÉTRICA..... 28
3.3.1.2	CÂMARA NÃO MÉTRICA..... 29
3.3.1.3	CÂMARAS ESTÉREO-MÉTRICAS..... 30
3.3.1.4	FOTO-TEODOLITOS..... 31
3.3.2	O FILME FOTOGRÁFICO..... 31
3.3.3	MÉTODOS DE LEVANTAMENTO FOTOGRAMÉTRICO..... 32

		pg
3.3.3.1	MÉTODO DAS CÂMARAS CONVERGENTES COM UMA ESTAÇÃO FIXA.....	36
3.3.3.2	EXPERIMENTO.....	36
3.3.4	A ORIENTAÇÃO DAS CÂMARAS NO ESPAÇO.....	40
3.3.4.1	OPERAÇÕES PARA DETERMINAR A ORIENTAÇÃO.....	41
3.3.5	SINALIZAÇÃO.....	42
3.3.5.1	GEOMETRIA DO DIMENSIONAMENTO.....	43
3.3.5.2	ESCALAS DIFERENTES.....	43
3.3.5.3	ESPESSURA DE TRAÇADO DA CIRCUNFERÊNCIA.....	47
3.3.5.4	DEFORMAÇÃO DO ALVO.....	48
3.3.5.5	A COR DO ALVO.....	49
3.3.6	A COLOCAÇÃO DOS ALVOS.....	50
3.4	PROCESSAMENTO DA INFORMAÇÃO.....	50
4.	MONITORAÇÃO DE UMA LAJE DE CONCRETO.....	52
4.1	INTRODUÇÃO.....	53
4.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	53
4.3	INTERCÂMBIO.....	54
4.4	LAJE DE CONCRETO COM ALVÉOLOS.....	55
4.5	PROCESSO MECÂNICO.....	56
4.6	PROCESSO FOTOGRAMÉTRICO.....	57
4.6.1	A AQUISIÇÃO DA INFORMAÇÃO.....	58
4.6.1.1	CÂMARA FOTOGRÁFICA.....	58
4.6.1.2	MÉTODO FOTOGRAMÉTRICO.....	59

		p9
4.6.1.2.1	MÉTODO COM CONVERGÊNCIA REDUZIDA.....	60
4.6.1.3	DIMENSIONAMENTO DOS ALVOS.....	61
4.6.1.3.1	TIPOS DE ALVOS.....	61
4.6.1.4	COLOCAÇÃO DOS ALVOS.....	62
4.6.1.5	PONTOS DE CONTROLE.....	65
4.6.1.6	TOMADA DAS FOTOS.....	65
4.6.2	PROCESSAMENTO DA INFORMAÇÃO.....	66
4.6.2.1	MEDIÇÃO DAS COORDENADAS FIDUCIAIS.....	68
4.6.2.2	TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS DE MÁQUINA EM FIDUCIAIS	71
4.6.2.3	DETERMINAÇÃO DAS COORDENADAS DO ESPAÇO-OBJETO E CALIBRAÇÃO.....	72
4.6.2.4	DETERMINAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS E DEFORMAÇÕES...	73
5.	RESULTADOS.....	74
5.1	INTRODUÇÃO.....	75
5.2	RESULTADO.....	75
5.3	COMPORTAMENTO DA LAJE EM UMA MESMA SECÇÃO VERTICAL.....	76
5.4	COMPARAÇÃO DO MÉTODO FOTOGRAMÉTRICO COM O MECÂNICO.....	76
5.4.1	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	77
5.5	RESULTADO DA CALIBRAÇÃO.....	77
6.	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	87
6.1	CONCLUSÃO.....	88
6.2	RECOMENDAÇÕES.....	88
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90

CAPÍTULO PRIMEIRO

INTRODUÇÃO

I N T R O D U Ç Ã O

Nos dias atuais monitorar movimentos e deformações implica em tarefa necessária e de difícil solução. A fotogrametria apresenta-se como uma ferramenta de grande utilidade pela sua versatilidade e precisão, podendo ser empregada, principalmente, nos seguintes casos:

- a) no controle do recalque de obras de engenharia;
- b) para acompanhar os movimentos das barragens, em função da variação do nível d'água dos reservatórios;
- c) na observação periódica de antigas construções, ou monumentos arquitetônicos, com a finalidade de estudar a evolução das deformações;
- d) para estudar o comportamento de peças submetidas a ensaio, em função da variação de parâmetros como pressão, temperatura, umidade, etc.;
- e) no estudo de correntes marítimas.

No presente trabalho realizou-se uma experiência com fotogrametria a curta distância, de processamento analítico, para estudar a viabilidade de seu emprego no monitoramento de deslocamentos relativos de **precisão**

A dissertação possui duas partes distintas: inicial -

mente, uma sistemática de utilização da fotogrametria à curta distância, abordada de maneira abrangente, não se detendo em nenhuma aplicação em particular. Discute-se os tipos de câmaras, o filme adequado, o dimensionamento dos pontos sinalizados, o método das câmaras convergentes e enfatiza-se a vantagem da utilização do método das câmaras convergentes com uma estação fixa.

Na segunda parte, uma experiência prática foi realizada, monitorando-se uma laje de concreto protendido submetida a ensaio, utilizando-se uma câmara não métrica associada a uma metodologia que permite a sua calibração.

CAPÍTULO SEGUNDO

FOTOGRAMETRIA ANALÍTICA E CALIBRAÇÃO

2.1 INTRODUÇÃO

Apresenta-se a Fotogrametria à curta distância e suas potencialidades. O método fotogramétrico analítico é detalhado, para futura utilização no presente trabalho, enfocando-se o modelo matemático, erros sistemáticos e calibração.

2.2 FOTOGRAMETRIA

Fotogrametria é a arte, ciência e técnica de obter informações geométricas e outras propriedades através de medidas e observações de fotografias. As fotos são normalmente aéreas e nelas são medidas posições, tamanhos, perfis e outras características presentes graficamente em um mapa.

2.3 FOTOGRAMETRIA À CURTA DISTÂNCIA

Significa que o objeto fotografado e a câmara estão próximos. A distância máxima é discutível mas 300 metros é um limite aceito por KARARA (1980) e TORLEGARD (1980), e a mínima pode chegar a milímetros.

O tempo é algumas vezes a quarta dimensão nesse tipo de Fotogrametria e, com mais essa variável é possível medir velocidades, acelerações e monitorar deformações.

2.4 POTENCIALIDADES DA FOTOGRAMETRIA À CURTA DISTÂNCIA

Suas potencialidades são amplas em muitos campos de aplicação para solucionar problemas de medição. A seguir suas principais vantagens:

- a) o objeto não precisa ser tocado durante a medição;
- b) a aquisição da informação é rápida;
- c) não somente objetos fixos, mas deformações e movimentos podem ser medidos;
- d) perfis complicados são facilmente medidos.

As características acima possibilitam que objetos quentes, frágeis e de formas instáveis sejam medidos e controlados.

2.5 FOTOGRAMETRIA ANALÍTICA

Na fotogrametria analítica o resultado final do levantamento fotogramétrico aparece na forma de coordenadas de pontos do espaço objeto.

O método analítico baseia-se na condição de colinearidade entre um ponto no espaço-objeto, o centro de perspectiva da câmara fotográfica e a sua imagem.

A figura 1 mostra graficamente a condição de colinearidade. Na origem O' , centro perspectivo, considera-se a coincidência dos nodos anterior e posterior, figura 2.

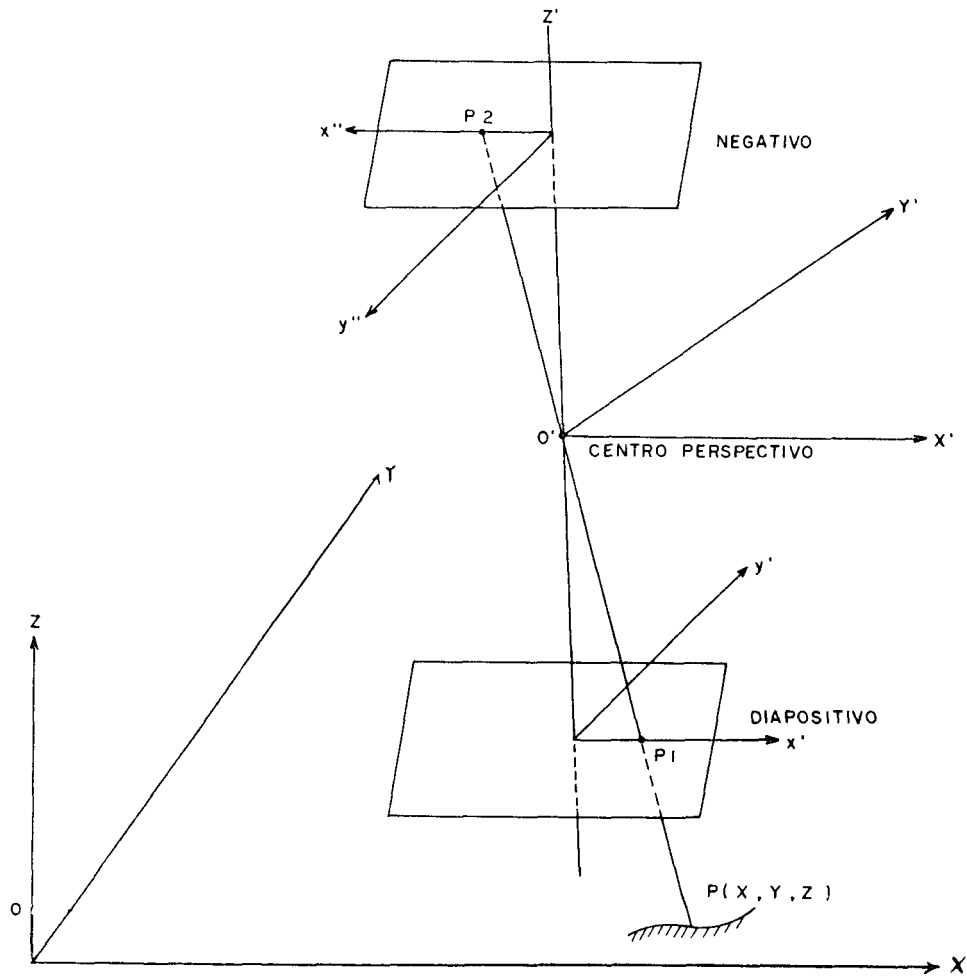


Fig. 2 Sistemas de Coordenadas da Fotogrametria Analítica.

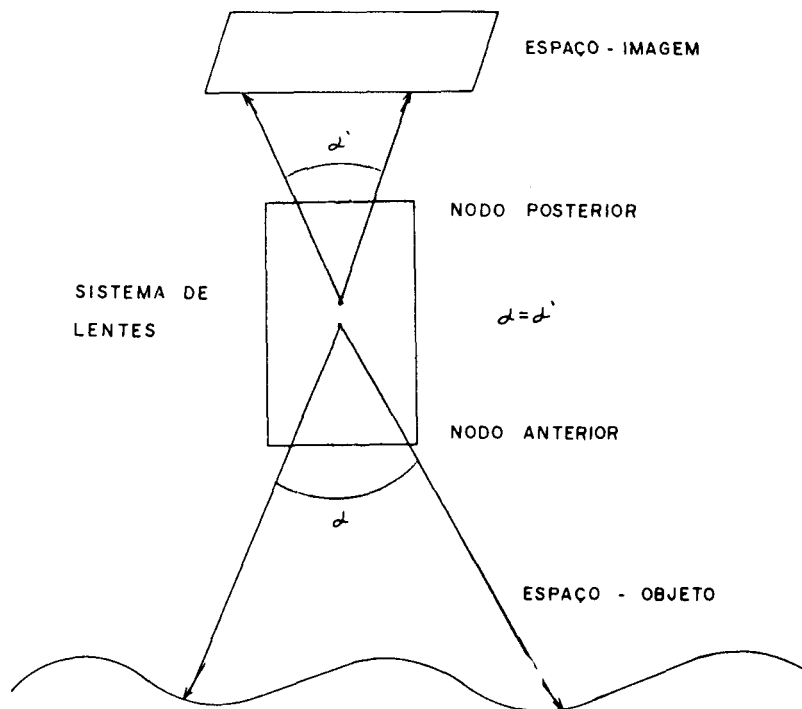


Fig. 2 Sistema de lentes com os nodos anterior e posterior.

2.5.1 SISTEMAS DE COORDENADAS LIGADAS À FOTOGRAMETRIA ANALÍTICA

Definem-se a partir da Fig. 1, MERCHANT (1979).

2.5.1.1 SISTEMA DE COORDENADAS DO ESPAÇO-OBJETO (O,X,Y,Z)

Trata-se de um sistema tri-dimensional, dextrógiro. O sistema de coordenadas do espaço-objeto é o sistema origem, ou seja qualquer sistema local pode ser ligado a sua origem através de rotações e translações de eixos.

2.5.1.2 SISTEMA DE COORDENADAS FOTOGRAMÉTRICAS (CP,X',Y',Z')

Trata-se de um sistema local com origem no centro perspectivo (CP). É tri-ortogonal, dextrógiro, com o eixo X' paralelo ao eixo fiducial x e positivo no mesmo sentido. O eixo Y' é paralelo ao plano da foto e normal ao eixo X'. O eixo Z' abriga o eixo ótico com orientação positiva para o negativo fotográfico, e negativa para o diapositivo.

2.5.1.3 SISTEMA DE COORDENADAS FIDUCIAIS (x,y)

Sistema ortogonal, com origem no centro fiducial. O eixo x coincide com a linha que une as marcas fiduciais opostas que mais se aproximam do eixo horizontal da câmara, é positivo do centro para a direita. O eixo y é perpendicular ao eixo x, jacente ao plano da foto.

2.5.2 EQUAÇÕES DE COLINEARIDADE

A condição de colinearidade é ressaltada na figura 3, de onde retira-se as equações (2.5.2.1).

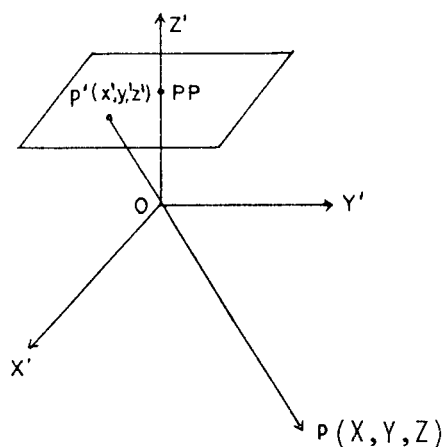


Fig. 3 Ressaltando a condição de colinearidade.

Um ponto $P(X, Y, Z)$ do espaço-objeto tem a sua imagem em $p'(x', y', z')$ no espaço-imagem e deverão, nas condições estabelecidas, estar alinhados com o ponto O .

$$\frac{x'}{z'} = \frac{X'}{Z'} \quad (2.5.2.1a)$$

$$\frac{y'}{z'} = \frac{Y'}{Z'} \quad (2.5.2.1b)$$

Nas equações acima fazendo-se $z=c$ (constante), igual a distância principal da câmara fotográfica, então as equações assumem a forma:

$$x' = c \frac{X'}{Z'} \quad (2.5.2.2a)$$

$$y' = c \frac{Y'}{Z'} \quad (2.5.2.2b)$$

Considerando n fotografias, teremos n sistemas de coordenadas fotogramétricas. A fim de que as coordenadas dos pontos do espaço-objeto sejam unívocas, tornando-se necessário adotar um único sistema de coordenadas para definir as posições desses pontos, aqui denominado de sistema de coordenadas do espaço-objeto $(0, X, Y, Z)$, ANDRADE, OLIVAS (1981).

$$X' = f_1 (X, Y, Z)$$

$$Y' = f_2 (X, Y, Z) \quad (2.5.2.3)$$

$$Z' = f_3 (X, Y, Z)$$

Na figura 4 é possível observar as funções f_1 , f_2 e f_3 que interligam os dois sistemas, a transformação é dada por:

- a) uma translação de eixos;
- b) pelo produto de três matrizes de rotação
- c) um fator de escala.

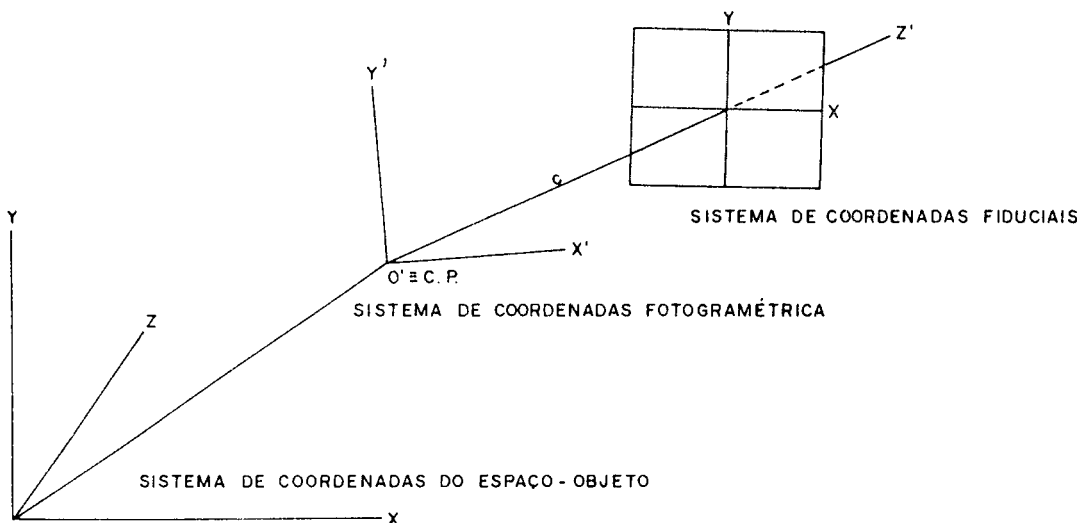


Fig. 4 Ligação entre o sistema fotogramétrico e do espaço-objeto.

Para um sistema de coordenadas do espaço-objeto definido como dextrôgiro, a transformação assume a seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{matrix} E & \cdot & R_Z(K) \cdot R_Y(\phi) \cdot R_X(W) \cdot \\ \text{(fator de} & & \text{(Matrizes de} \\ \text{escala)} & & \text{rotação)} \end{matrix} \begin{bmatrix} X-X' \\ Y-Y' \\ Z-Z' \end{bmatrix} \quad (2.5.2.4)$$

(Translação)

O produto das matrizes de rotação, $M=R_Z(K) \cdot R_Y(\phi) \cdot R_X(W)$ é composto das seguintes matrizes ortogonais, GEMAEL (1981):

$$M_W = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos W & \text{sen } W \\ 0 & -\text{sen } W & \cos W \end{bmatrix} \quad (2.5.2.5)$$

$$M_\phi = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\text{sen } \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen } \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2.5.2.6)$$

$$M_K = \begin{bmatrix} \cos K & \text{sen } K & 0 \\ -\text{sen } K & \cos K & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5.2.7)$$

Efetuando-se o produto M , tem-se:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (2.5.2.8)$$

Onde os elementos são os seguintes:

$$m_{11} = \cos \phi \cdot \cos K$$

$$m_{12} = \sin W \cdot \sin \phi \cdot \cos K + \cos W \cdot \sin K$$

$$m_{13} = -\cos W \cdot \sin \phi \cdot \cos K + \sin W \cdot \sin K$$

$$m_{21} = -\cos \phi \cdot \sin K$$

$$m_{22} = -\sin W \cdot \sin \phi \cdot \sin K + \cos W \cdot \cos K$$

$$m_{23} = \cos W \cdot \sin \phi \cdot \sin K + \sin W \cdot \cos K$$

$$m_{31} = \sin \phi$$

$$m_{32} = -\sin W \cdot \cos \phi$$

$$m_{33} = \cos W \cdot \cos \phi$$

Substituindo-se (2.5.2.8) em (2.5.2.4), tem-se:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = E \cdot \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X - X'_0 \\ Y - Y'_0 \\ Z - Z'_0 \end{bmatrix} \quad (2.5.2.9)$$

Substituindo-se (2.5.2.9) em (2.5.2.2) obtêm-se as equações de colinearidade em sua forma geral:

$$x' = c \cdot \frac{m_{11}(X-X'_0) + m_{12}(Y-Y'_0) + m_{13}(Z-Z'_0)}{m_{31}(X-X'_0) + m_{32}(Y-Y'_0) + m_{33}(Z-Z'_0)} \quad (2.5.2.10)$$

$$y' = c \cdot \frac{m_{21}(X-X'_0) + m_{22}(Y-Y'_0) + m_{23}(Z-Z'_0)}{m_{31}(X-X'_0) + m_{32}(Y-Y'_0) + m_{33}(Z-Z'_0)}$$

onde: x', y' são coordenadas fotogramétricas de pontos do espaço-imagem;

X, Y, Z são coordenadas no sistema do espaço-objeto de pontos do espaço-objeto;

X'_0, Y'_0, Z'_0 são coordenadas no sistema do espaço-objeto da origem do sistema fotogramétrico (centro de perspectiva);

K, ϕ, W são ângulos eulerianos, sendo a ordem das rotações, no caso a seguinte:

W - primária com respeito ao eixo OX ;

ϕ - secundária com respeito ao eixo OY , já rotado uma vez;

K - terciária com respeito ao eixo OZ , já rotado duas vezes;

c - a distância focal gaussiana.

2.6 ERROS SISTEMÁTICOS EM FOTOGRAMETRIA

Quando da dedução das equações (2.5.2.10), considerou-se uma linha reta ligando pontos do espaço-objeto à sua imagem no negativo fotográfico, entretanto erros sistemáticos durante e após o processo de aquisição de informação causam desvios na linha reta. Os erros sistemáticos são:

- a) as distorções óticas;
- b) a refração fotogramétrica;
- c) o trabalho do filme.

Sendo que as distorções óticas e a refração fotogramétrica independem do tempo sendo o trabalho do filme é dependente dessa variável.

2.6.1 DISTORÇÕES ÓTICAS

As distorções dos sistemas de lentes são causadas por dois motivos principais:

- a) a impossibilidade prática de polimento das lentes, até a forma ideal de uma parabolóide de revolução ao redor do eixo ótico;
- b) a inabilidade do construtor em alinhar os eixos óticos das lentes individuais, dentro do conjunto dos elementos que compõem a objetiva, OLIVAS (1980).

2.6.1.1 DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA

A distorção radial simétrica pode ser encarada como sendo a parcela não desejável da refração sofrida por um raio de luz ao atravessar uma lente ou sistema de lentes.

Esta distorção é representada por um polinômio desenvolvido por A.E.CONRADY, mostrado a seguir:

$$\begin{aligned}\delta x &= (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots) (x-x_0) \\ \delta y &= (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots) (y-y_0)\end{aligned}\tag{2.6.1.1.1}$$

onde: x, y são componentes do deslocamento do ponto de coordenadas (x, y) , devido à distorção radial simétrica;

r é a distância do ponto de coordenadas (x, y) ao ponto principal da foto de coordenadas (x_0, y_0) ;

K_1, K_2, K_3, \dots são os parâmetros recuperados no ajustamento.

2.6.1.2 DISTORÇÃO DESCENTRADA

A distorção denominada de descentrada é causada pela imperfeição do alinhamento dos eixos óticos das lentes da câmara fotográfica. Isto tanto causa a distorção radial como a tangencial.

O modelo matemático aceito atualmente pela maioria dos fotogrametristas é o apresentado por CONRADY em 1919 e modificado por BROWN (1966).

O chamado "MODELO REVISADO CONRADY-BROWN" é o seguinte:

$$\begin{aligned}\delta x_1 &= \left[P_1 (r^2 + 2x^2) + 2P_2 xy \right] (1 + P_3 r^2 + \dots) \\ \delta y_1 &= \left[P_2 (r^2 + 2y^2) + 2P_1 xy \right] (1 + P_3 r^2 + \dots)\end{aligned}\tag{2.6.1.2.1}$$

onde: $\delta x_1, \delta y_1$ são as componentes do deslocamento do ponto de coordenadas (x,y) , devido à distorção descentrada;

r é a distância do ponto de coordenadas (x,y) ao ponto principal da foto de coordenadas (x_0,y_0) ;

P_1, P_2, P_3, \dots são os parâmetros recuperados no ajustamento.

2.6.2 A REFRAÇÃO FOTOGRAMÉTRICA

A refração fotogramétrica é definida como o ângulo entre o raio colinear e a tangente ao raio real, medido no nodo exterior e tomado como positivo para deslocamentos radiais dirigidos para fora em relação ao ponto nadiral, causado pela refração atmosférica, figura 5.

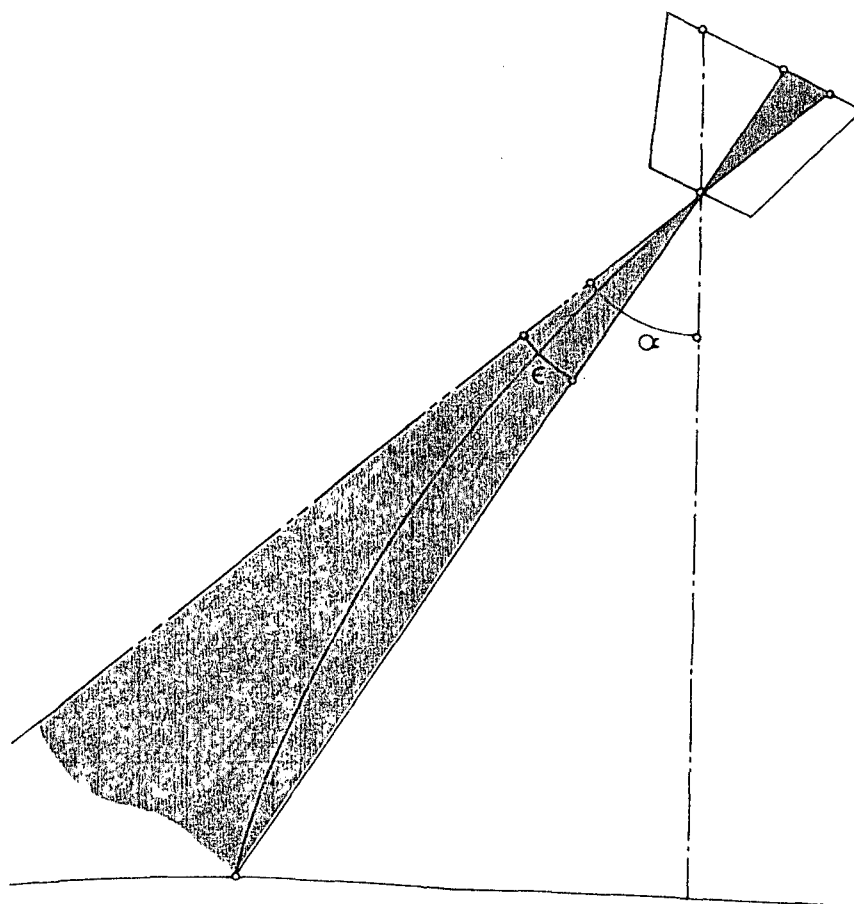


Fig. 5 Refração Fotogramétrica.

Na fotogrametria a curta distância a refração fotogramétrica é desprezada em razão da proximidade da câmara ao objeto fotografado.

2.6.3 O TRABALHO DO FILME

Numerosas fontes contribuem para a deformação do filme, entre elas incluem-se: a irregularidade do material do filme; as tensões exercidas no filme dentro da câmara (entre uma fotografia e outra) e fora da câmara no processamento; as variações de temperatura e umidade relativa na estocagem e posterior utilização, KARARA (1974).

O trabalho do filme é variável com o tempo, devido a esse fator é necessário corrigi-lo separadamente das distorções óticas e da refração fotogramétrica.

A transformação matemática adequada para corrigir essas variações é motivo de diversas pesquisas. O modelo matemático escolhido depende da quantidade e distribuição dos pontos de controle que a câmara possui. Em MERCHANT (1979) é sugerida a aplicação da transformação afim geral como a mais eficiente, para o caso de câmara com marcas fiduciais. Em pesquisas mais recentes ANDRADE (1982) conclui que para um "reseau" com intervalos de 0,5 mm a transformação afim geral torna o modelo superparametrizado e os melhores resultados foram encontrados quando utilizaram a transformação de similaridade, que é composta de uma translação, uma rotação e um fator de escala.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x' \\ \Delta y' \end{bmatrix} \quad (2.6.3.1)$$

onde: x, y são as coordenadas medidas na foto;

x', y' são as coordenadas transformadas;

$S, \phi, \Delta x', \Delta y'$ são parâmetros recuperados no ajustamento.

O termo "reseau" citado no presente item refere-se a uma placa de vidro quadriculada inserida na câmara fotográfica, que basicamente aumenta a quantidade de marcas fiduciais.

2.7 CALIBRAÇÃO EM FOTOGRAMETRIA

Segundo EISENHART citado em OLIVAS (1980), calibrar é uma forma refinada de medir. Em fotogrametria a calibração das câmaras fotogramétricas é necessária por fatores internos como: as distorções óticas (item 2.5.1), a excentricidade do ponto principal e o não perfeito conhecimento do comprimento da distância focal gaussiana, influem diretamente na condição de colinealidade, que é a melhor ligação geométrica entre o espaço-objeto e o espaço-imagem.

A falta de calibração acarreta erros no resultado final da triangulação analítica, ou seja, na determinação das coordenadas de pontos do espaço-objeto.

2.7.1 CALIBRAÇÃO PARA FOTOGRAMETRIA À CURTA DISTÂNCIA

As câmaras métricas (item 3.3.1.1) saem da fábrica com os parâmetros de calibração determinados e, devido suas características, tendem a manter sua calibração por determinado tempo, entretanto as câmaras não métricas (item 3.3.1.2) não possuem estabilidade interna, o que causa a necessidade de determinar seus parâmetros de calibração sempre que são utilizadas em trabalhos de precisão.

2.7.2 CALIBRAÇÃO ANALÍTICA

Por processo analítico é possível recuperar os seguintes parâmetros de calibração:

- a) distância principal calibrada;
- b) coordenadas do ponto principal;
- c) coeficientes para correção da distorção radial si métrica;
- d) coeficientes para correção da distorção descentrada.

2.7.3 MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático abaixo agrupa as equações de colinearidade (2.5.2.10) aos parâmetros de calibração e a solução é dada simultaneamente em uma triangulação analítica em bloco, KENEFICK (1972).

$$x-x_0 - (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)(x-x_0) - P_1 \left[r^2 + 2(x-x_0)^2 \right] + 2P_2(x-x_0)(y-y_0)$$

$$- c \frac{(X-X_0)m_{11} + (Y-Y_0)m_{12} + (Z-Z_0)m_{13}}{(X-X_0)m_{31} + (Y-Y_0)m_{32} + (Z-Z_0)m_{33}} = 0 \quad (2.7.3.1)$$

$$y-y_0 - (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)(y-y_0) - 2P_1(x-x_0)(y-y_0) - P_2 \left[r^2 + 2(y-y_0)^2 \right]$$

$$- c \frac{(X-X_0)m_{21} + (Y-Y_0)m_{22} + (Z-Z_0)m_{23}}{(X-X_0)m_{31} + (Y-Y_0)m_{32} + (Z-Z_0)m_{33}} = 0$$

onde: $r^2 = (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2$

x, y são as coordenadas fiduciais de pontos do espaço-imagem;

x_0, y_0 são as coordenadas fiduciais do ponto principal;

K_1, K_2, K_3 são os coeficientes da distorção radial simétrica;

P_1, P_2 são os coeficientes da distorção descentrada.

Os demais elementos estão descritos em (2.5.2.10).

O modelo matemático (2.7.3) pode ser apresentado sobre a forma de equações de observações.

$$F_x = x-x_0 - \delta x - \delta x_1 - c \frac{m}{q} = 0 \quad (2.7.3.2)$$

$$F_y = y - y_0 - \delta y - \delta y_1 - c \frac{n}{q} = 0$$

A essas equações está associado o modelo matemático de ajustamento de observações abaixo:

$$F(L_a, X_a) = 0 \quad (2.7.3.3)$$

onde: L_a são os valores ajustados das observações, que são no caso as coordenadas fiduciais ajustadas;

X_a são os parâmetros ajustados, que são as coordenadas tridimensionais dos pontos de campo (X, Y, Z) ; os elementos de orientação externa de cada foto $(W, \phi, K, X_0, Y_0, Z_0)$ e os parâmetros de calibração ajustados $(f, x, y_0, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2)$.

A citada função não é linear e em GEMAEL (1974) encontra-se a solução para esse problema, que é a linearização por meio de séries de Taylor, negligenciando-se os termos de potência igual e superiores à segunda ordem. A série então é calculada utilizando-se das observações originais (L_b) e de valores aproximados para os parâmetros incógnitos (X_0). Segue a série de Taylor e a função linearizada.

$$f(x) = f(a) + f'(a) \frac{(x-a)}{1} + \left| f''(a) \frac{(x-a)^2}{2} + \dots \right. \quad (2.7.3.4)$$

negligenciados

$$f(L_a, X_a) = F(L_b, X_0) + \left. \frac{\partial F}{\partial L_a} \right|_{L_b} (L_a - L_b) + \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_0} (X_a - X_0) = 0 \quad (2.7.3.5)$$

Adotando-se a notação matricial, o modelo linearizado

assume a forma:

$$BV + AX + W = 0 \quad (2.7.3.6)$$

onde: A é formada por submatrizes da forma abaixo:

$$A = \frac{\partial F}{\text{(orientação exterior, pontos de terreno, parâmetros de calibração)}} \quad (2.7.3.7)$$

$$A = A_e, A_t, A_c \quad (2.7.3.8)$$

X é o vetor das incógnitas, constituído de subvetores.

$$X = \left[X_e, X_t, X_c \right]^T, \text{ sendo:} \quad (2.7.3.9)$$

$$X_e = \left[\delta w, \delta \phi, \delta K, \delta X_0, \delta Y_0, \delta Z_0 \right]^T \quad (2.7.3.10)$$

$$X_t = \left[\delta X, \delta Y, \delta Z \right]^T \quad (2.7.3.11)$$

$$X_c = \left[\delta x_0, \delta y_0, \delta f, \delta K_1, \delta K_2, \delta K_3, \delta P_1, \delta P_2 \right] \quad (2.7.3.12)$$

W é o vetor dos erros de fechamento formado por:

$$W = \begin{vmatrix} x \text{ observado} - x \text{ calculado} \\ y \text{ observado} - y \text{ calculado} \end{vmatrix} \quad (2.7.3.13)$$

V é o vetor dos resíduos formado pelas observações ajustadas menos as iniciais $V = L_a - L_b$. $(2.7.3.14)$

B \bar{e} a matriz formada pelas derivadas parciais da função (2.7.3.2) em relação às observações (x_n, y_n) . Caso não houvesse a calibração simultânea, s \bar{o} a triangulação, essa matriz seria unitária, entretanto segundo ANDRADE (1984) mesmo para calibração ela pode ser considerada unitária, pois não afeta significativamente o resultado.

A solução para X \bar{e} dada por:

$$X = -N^{-1} U \quad (2.7.3.15)$$

sendo: $N = A^T P A \quad (2.7.3.16)$

$$U = A^T P W \quad (2.7.3.17)$$

A matriz dos pesos \bar{e} formada por:

$$P = \sigma_0^2 \sum_{L_b}^{-1} \quad (2.7.3.18)$$

sendo: σ_0^2 a variância da unidade de peso;

$\sum_{L_b}^{-1}$ a inversa da matriz variância-covariância das observações.

A matriz N \bar{e} singular, para encontrar soluções para X torna-se necessário aplicar algumas injunções de modo a tornar N não singular, ANDRADE (1977).

2.7.4 INJUNÇÕES COM PESO

O modelo matemático para injunções com peso \bar{e} de for-

ma:

$$G(L_x, X_a) = 0 \quad (2.7.4.1)$$

E na forma linearizada:

$$\overset{c}{V} + CX + \overset{c}{W} = 0 \quad (2.7.4.2)$$

Então, a função de variação assume a forma:

$$\phi = V^T P V + \overset{c}{V}^T \overset{c}{P} \overset{c}{V} - 2K^T (V + AX + W) - 2\overset{c}{K}^T (\overset{c}{V} + CX + \overset{c}{W}) \quad (2.7.4.3)$$

Para minimizar ϕ , resulta o sistema de equações:

$$PV - K = 0 \quad (2.7.4.4)$$

$$\overset{c}{c} \overset{c}{P} V - \overset{c}{c} K = 0 \quad (2.7.4.5)$$

$$V + AX + W = 0 \quad (2.7.4.6)$$

$$A^T K + \overset{c}{c} K = 0 \quad (2.7.4.7)$$

$$\overset{c}{c} V + CX + \overset{c}{c} W = 0 \quad (2.7.4.8)$$

A solução para X será:

$$X = -(A^T P A + \overset{c}{c} P C)^{-1} (A^T P W + \overset{c}{c} P W) \quad (2.7.4.9)$$

ou

$$X = -(N + \overset{c}{c} N)^{-1} (V + \overset{c}{c} V) \quad (2.7.4.10)$$

2.7.5 INJUNÇÕES DE POSIÇÃO

A fim de se fixar um sistema de coordenadas será necessário e suficiente fixar 7 coordenadas de três pontos não alinhados $P_1 (X,Y,Z)$, $P_2 (X,Y,Z)$ e $P_3 (Z)$. O modelo matemático da injunção é o seguinte:

$$\begin{aligned} X_{G_b} - Y_{G_o} &= 0 \\ Y_{G_b} - Y_{G_o} &= 0 \\ Z_{B_b} - Z_{G_o} &= 0 \end{aligned} \tag{2.7.5.1}$$

2.7.6 INJUNÇÕES DE DISTÂNCIA

Essa injunção fixa as escalas horizontal e vertical, e o modelo matemático desta injunção é o seguinte:

$$G = r_{ij} \left[(X_{G_i} - X_{G_j})^2 + (Y_{G_i} - Y_{G_j})^2 + (Z_{G_i} - Z_{G_j})^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \tag{2.7.6.1}$$

Maiores detalhes sobre as injunções ver ANDRADE(1977).

CAPÍTULO TERCEIRO

SISTEMÁTICA DE UTILIZAÇÃO DA FOTOGRAMETRIA À CURTA DISTÂNCIA

3.1 INTRODUÇÃO

Apresenta-se os aspectos gerais da utilização da fotogrametria a curta distância, sem se deter em nenhuma aplicação particular, caso que será abordado no capítulo 4. Discute-se desde os tipos de câmaras e filmes, a métodos fotogramétricos e sinalização de pontos.

3.2 DIFÍCIL PADRONIZAÇÃO

Na fotogrametria a curta distância não existe a padronização da fotogrametria aérea, cada caso precisa ser estudado e planejado diferentemente, tem-se sempre características particulares a serem observadas. Essa falta de padronização é uma das causas desse tipo de fotogrametria ser mais utilizada em institutos e universidades, que em firmas particulares.

Um trabalho de fotogrametria a curta distância pode ser separado em duas fases distintas:

- a) a aquisição da informação;
- b) o processamento da informação.

3.3 A AQUISIÇÃO DA INFORMAÇÃO

Na aquisição da informação, o fotogrametrista precisa tomar decisões sobre o material e o método a serem utilizados.

Essas decisões dependerão da natureza, da precisão requerida no levantamento e da disponibilidade financeira. Um projeto para restauração arquitetônica é diferente de quando controlam-se grandes partes de navios a serem encaixados ou de quando realiza-se o monitoramento de uma laje de concreto.

Os principais fatores a serem estudados são:

- a) o tipo de câmara;
- b) o tipo de filme;
- c) a escolha do método fotogramétrico;
- d) a orientação das câmaras;
- e) o dimensionamento dos alvos;
- f) o local de colocação dos alvos.

3.3.1 OS TIPOS DE CÂMARAS FOTOGRAMÉTRICAS

Dos muitos equipamentos utilizados na fotogrametria a câmara fotográfica é o mais importante, pois delas dependem a obtenção das fotografias.

Em fotogrametria a curta distância as câmaras são de dois tipos:

- a) câmaras métricas;
- b) câmaras não métricas.

3.3.1.1 CÂMARAS MÉTRICAS

São câmaras construídas para propósitos fotogramétricos. Possuem lentes de alta resolução, orientação interna conhecida e estável, apresentam no mínimo quatro marcas fiduciais e

um mecanismo de fixação do filme durante a exposição.

3.3.1.2 CÂMARA NÃO MÉTRICA

A câmara não métrica é aquela cuja orientação interior é completa ou parcialmente desconhecida e frequentemente instável. A falta de marcas fiduciais é também uma característica desse tipo de câmara, também conhecida por câmara simples ou de amador.

A dificuldade de classificar uma câmara reside no fato de que é possível introduzir marcas fiduciais e muitas outras sofisticações em câmaras simples. Para FAIG (1976) é a instabilidade da orientação interior o fator que as diferencia das câmaras métricas.

KARARA (1978) apresenta as seguintes vantagens das câmaras não métricas, quando comparando com as métricas:

- a) disponibilidade geral;
- b) maior flexibilidade na focalização;
- c) algumas utilizam-se de motor permitindo uma rápida sucessão de fotos;
- d) são menores e mais leves;
- e) portáteis, facilitam a orientação em qualquer direção;
- f) o preço é consideravelmente menor.

As desvantagens são:

- a) as lentes são elaboradas para alta resolução e apre

- sentam grandes distorções;
- b) grande instabilidade da orientação interna;
- c) falta marcas fiduciais;
- d) falta níveis que auxiliem na determinação da orientação exterior;
- e) falta dispositivos para planificação do filme.

3.3.1.3 CÂMARAS ESTÉREO-MÉTRICAS

A câmara estéreo-métrica consiste de duas câmaras montadas rigidamente nos extremos de uma barra metálica, figura 6.

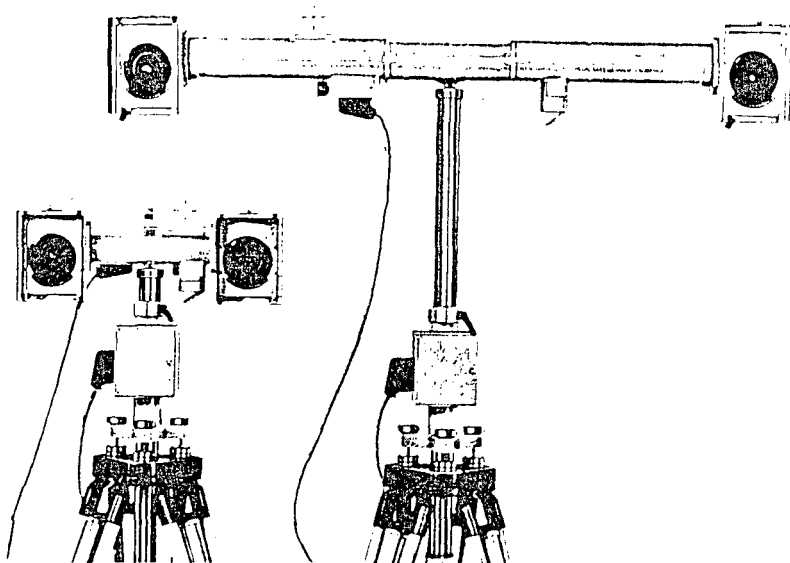


Fig. 6 Câmaras estéreo-métricas SMK 40 e SMK 120.

Para fotogrametria a curta distância o uso de câmaras estéreo-métricas apresenta as seguintes vantagens:

- a) as fotos são tomadas simultaneamente e assim ocor

rências dinâmicas podem formar pares estereoscópicos;

b) desde que a orientação relativa das fotografias se ja conhecida, as medidas delas serão simplificadas através de instrumentos restituidores especiais construídos para esse tipo de foto.

A desvantagem é que, devido o tamanho curto das bases, no máximo 2.0 m, a relação base/distância restringe a distância operacional câmaras-objeto.

3.3.1.4 FOTO-TEODOLITOS

O termo "Foto-teodolitos" é aplicado à combinação câmara-teodolito; trata-se de uma câmara normalmente métrica, equipada com mecanismo de orientação do eixo ótico em relação à base. Os Foto-teodolitos são montados em tripês e centrados, WOLF (1974).

3.3.2 O FILME FOTOGRÁFICO

O filme fotográfico, para o projetista, apresenta duas características básicas:

- a) a sensibilidade;
- b) a seletividade ou resolução.

A resolução é a propriedade que o filme possui de apresentar distintamente dois objetos próximos. A resolução é importante em fotogrametria, entretanto para cenas rápidas a sensibilidade é desejada. As duas características não se apresentam juntas, por exemplo, um filme de 1000 ASA apresenta alta sen

sibilidade mas baixa resolução e o contrário acontece com um de 50 ASA.

Excetuando-se os trabalhos especiais, os filmes utilizados na fotogrametria situam-se entre 80 e 125 ASA, levando-se em conta as especificações do fabricante relativas à iluminação, abertura do diafragma e velocidade do obturador.

3.3.3 MÉTODOS DE LEVANTAMENTOS FOTOGRAMÉTRICO

O método utilizado dependerá do tipo final de informação do levantamento e dos instrumentos acessíveis para processar os dados.

A informação final de um levantamento é basicamente de duas formas:

a) tipo desenho, para trabalhos topográficos, arquitetônicos e geológicos;

b) em forma de coordenadas discretas de pontos do espaço-objeto para aplicação em engenharia, medicina, etc.

Os métodos que se utilizam na fotogrametria à curta distância são os seguintes:

a) Câmaras paralelas (caso normal).

O método em que as câmaras são colocadas de maneira similar ao levantamento aéreo, com os eixos das câmaras paralelas, ou aproximadamente paralelos e normais à base, figura 7. A diferença entre a aérea e a terrestre é que na segunda, efetua-se um giro de 90° em volta da base.

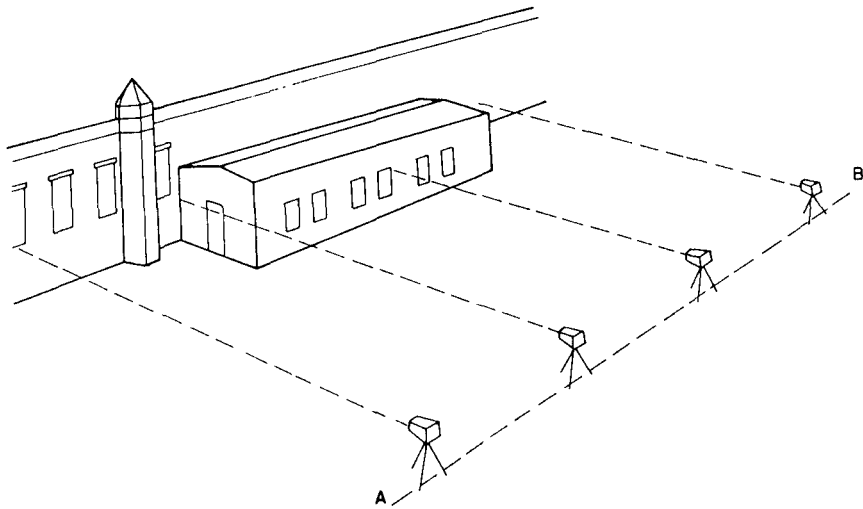


Fig. 7 Câmaras com eixos paralelos, "caso normal".

O método citado é indicado em dois casos:

a1) quando a informação final é em forma de desenho, pois os restituidores analógicos normalmente só aceitam esse tipo de posicionamento de câmaras, conhecido como "caso normal".

a2) quando a informação final são coordenadas discretas, desde que a câmara utilizada seja métrica (item 3.3.1.1), pois nesse caso não é necessária a calibração e esse método não permite a recuperação dos parâmetros de calibração e das coordenadas do espaço-objeto simultaneamente. Esclarecimentos sobre o problema no método das câmaras convergentes apresentado a seguir.

b) Método das câmaras convergentes

O método foi desenvolvido por DUANE C. BROWN e tem uma utilização histórica. Quando a Apollo 14 foi lançada levava

uma câmara topográfica lunar destinada a obter fotografias para mapeamento. A câmara não funcionou, somente uma HASSELBLAD 500, não métrica, que a nave conduzia, obteve fotografias. Não era possível calibrar a câmara de imediato, sendo necessário permanecer em quarentena. O problema foi entregue à D.B.A. (firma fotogramétrica pertencente a D.C.BROWN), a qual depois de observar que as fotos eram convergentes desenvolveu o "método das câmaras convergentes", que após a quarentena comparado com o método Stellar apresentou resultados absolutamente satisfatórios.

Em MERCHANT (1979) apresenta-se o problema da alta correlação entre os elementos da orientação interna (x_0, y_0 e f) e as coordenadas da estação de exposição (X_0, Y_0, Z_0) para o caso de fotos verticais e o relevo apresentar variação pequena em relação à distância câmara-objeto. Esta correlação não permite que esses parâmetros sejam recuperados juntos e assim, impossibilita a utilização de um modelo matemático que realize simultaneamente a calibração e triangulação (item 2.7.3).

O método das câmaras convergentes quebra a correlação citada, pois utiliza-se de fotografias convergentes onde procura-se forçar a convergência ao máximo com exposição de $\phi \approx 45^\circ$ e $\phi \approx -45^\circ$, o que leva a formação entre si de 90° , como mostra a figura 8.

É importante ressaltar que só a convergência não permite a completa recuperação dos parâmetros do cone interno. Os mecanismos primários de correlação são suprimidos, surgem compensações secundárias entre elementos da orientação interna e da orientação exterior. Para controlar mais esse problema e

também facilitar a separação entre os coeficientes da distorção descentrada P_1 , P_2 dos coeficientes da distorção radial simétrica K_1 , K_2 , K_3 , toma-se pelo menos uma exposição com o ângulo $Kappa$ de 90^0 , KENEFICK (1982).

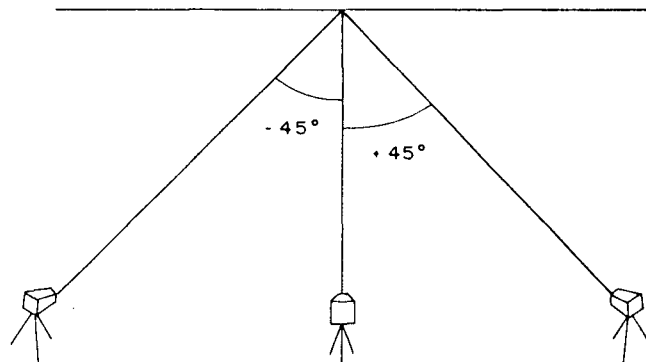


Fig. 8 Esquema de utilização de câmaras convergentes com o máximo de convergência.

O método das câmaras convergentes é indicado para:

b1) quando deseja-se calibrar uma câmara fotográfica, métrica ou não métrica. Este método é muito útil para câmaras terrestres, sendo inadequado para câmaras aéreas pela necessidade da convergência das fotos. OLIVAS (1980) cita que a vantagem desse método é que os pontos de controle da triangulação podem ser os valores aproximados das coordenadas de campo e o apoio pode ser reduzido ao mínimo, ou seja, apenas o suficiente para definir o sistema de coordenadas. Para informações adicionais sobre calibração consultar ANDRADE (1981), OLIVAS(1980) e MERCHANT (1979).

b2) quando o resultado final do levantamento são coordenadas de pontos do espaço-objeto esse método também é muito útil, pois possibilita que a informação seja tomada com dados

superabundantes que acarretam maior número de equações. O aumento do número de equações sem o acréscimo de incógnitas aumentam os graus de liberdade do ajustamento dando mais confiabilidade aos resultados.

b3) restituição, desde que a informação seja processada em restituidores analíticos, tipo Planicomp C-100, que não apresentam nenhuma restrição quanto a posição das câmaras e ao comprimento de distância principal.

3.3.3.1 MÉTODO DAS CÂMARAS CONVERGENTES COM UMA ESTAÇÃO FIXA

A geometria do método das câmaras convergentes permite que uma câmara seja fixada e que as outras ajustem seus feixes a ela.

Observou-se que com a fixação de uma câmara, sua posição e direção $(x_0, y_0, z_0, W, \phi, K)$, o apoio mínimo necessário para definir o sistema de coordenadas reduz-se a uma distância conhecida no espaço-objeto.

Utilizando-se de dados reais, provenientes de triangulação de pontos de uma laje de concreto, pesquisou-se a exatidão das coordenadas do espaço-objeto para quando se utiliza a câmara fixa e somente distâncias como apoio no espaço-objeto em relação ao apoio com pontos.

3.3.3.2 EXPERIMENTO

De uma triangulação onde utilizou-se o apoio mínimo, dois pontos com coordenadas tridimensionais (X, Y, Z) e um ponto

com (Z) conhecido, obteve-se as coordenadas tridimensionais de vinte pontos, quadro 3.1. Determinou-se a distância tridimensional entre dois pontos, e realizou-se nova triangulação onde era fixada a posição e direção da câmara número um, cujos valores haviam sido ajustados e, como apoio do espaço-objeto, a distância entre os pontos sete e dezessete (97,968 cm). O quadro 3.2, apresenta os valores das novas coordenadas dos pontos e o quadro 3.3, as discrepâncias entre as mesmas.

Quadro 3.1 Coordenadas tridimensionais (cm), provenientes de triangulação com apoio de pontos.

PONTO	C O O R D E N A D A S		
	Z	Y	Z
1	178,331	389,781	52,000
2	79,000	261,000	19,200
3	297,000	235,000	19,200
4	76,664	227,251	51,077
5	96,498	227,240	51,134
6	116,394	227,252	50,927
7	136,274	227,167	50,976
8	145,385	227,263	50,774
9	155,009	227,237	50,974
10	164,771	227,058	51,172
11	174,612	227,080	51,311
12	184,638	227,063	51,233
13	194,530	227,009	51,484
14	204,482	226,998	51,363
15	214,507	226,856	51,045
16	224,211	226,878	51,485
17	234,240	226,908	51,528
18	253,098	226,808	51,831
19	272,870	226,674	52,154
20	292,846	226,516	51,986

Quadro 3.2 Coordenadas tridimensionais (cm), provenientes de uma triangulação com câmara fixa e uma distância conhecida.

PONTO	C O O R D E N A D A S		
	X	Y	Z
1	178,328	389,782	52,002
2	78,998	261,001	19,201
3	296,998	235,003	19,202
4	76,663	227,252	51,078
5	96,497	227,242	51,135
6	116,393	227,254	50,929
7	136,273	227,169	50,978
8	145,383	227,265	50,776
9	155,008	227,239	50,976
10	164,770	227,060	51,174
11	174,611	227,083	51,313
12	184,637	227,065	51,234
13	194,529	227,011	51,486
14	204,481	227,001	51,365
15	214,506	226,858	51,047
16	224,210	226,881	51,487
17	234,239	226,911	51,530
18	253,097	226,812	51,833
19	272,869	226,677	52,156
20	292,845	226,519	51,989

Quadro 3.3 Discrepâncias (cm) entre o quadro 3.1 e 3.2.

PONTO	C O O R D E N A D A S		
	X	Y	Z
1	0,003	-0,001	-0,002
2	0,002	-0,001	-0,001
3	0,002	-0,003	-0,002
4	0,001	-0,001	-0,001
5	0,001	-0,002	-0,001
6	0,001	-0,002	-0,002
7	0,001	-0,002	-0,002
8	0,002	-0,002	-0,002
9	0,001	-0,002	-0,002
10	0,001	-0,002	-0,002
11	0,001	-0,003	-0,002
12	0,001	-0,002	-0,001
13	0,001	-0,002	-0,002
14	0,001	-0,003	-0,002
15	0,001	-0,002	-0,002
16	0,001	-0,003	-0,002
17	0,001	-0,003	-0,002
18	0,001	-0,004	-0,002
19	0,001	-0,003	-0,002
20	0,001	-0,003	-0,003

O menor desvio padrão das coordenadas do espaço-objeto fornecido pela triangulação é de 0,06 cm. Como as discrepâncias apresentadas entre os dois métodos é de ordem de grandeza inferior a esse desvio (quadro 3.3), aceita-se que o método onde se fixa a câmara e utiliza-se como apoio uma distância conhecida no espaço-objeto, e o método onde a câmara é solta e o apoio é feito com pontos no espaço-objeto, fornecem os mesmos valores de coordenadas do espaço-objeto.

Para a fotogrametria à curta distância o método da câmara fixa, e tendo como apoio distâncias conhecidas é

de grande utilidade, pois a posição e orientação da câmara é sempre possível de ser determinada e as distâncias podem ser objetos ou figuras geométricas de dimensões previamente conhecidas e colocadas onde se deseja fotografar.

3.3.4 A ORIENTAÇÃO DAS CÂMARAS NO ESPAÇO

Ao utilizar-se da fotogrametria analítica, a orientação das câmaras no espaço é determinada juntamente com a posição das câmaras e as coordenadas dos pontos no espaço-objeto. Porém o modelo matemático descrito no item 2.7.3, necessita de valores iniciais de orientação das câmaras, pois na solução pelo método dos mínimos quadrados determina-se incrementos a serem adicionados algebricamente aos valores iniciais.

$$X_a = X_0 + X \quad (3.3.4.1)$$

Onde:

X_a = valor final após o ajustamento

X_0 = valor inicial

X = incremento determinado pelo método dos mínimos quadrados.

Na fotogrametria aérea a determinação da orientação da câmara no espaço é relativamente simples. Os ângulos PHI e OMEGA são para fotos verticais próximos de 0^0 e a orientação KAPPA é determinada no planejamento de vôo. Entretanto na fotogrametria terrestre as câmaras executam giros dos mais variados e para determinar as suas orientações é necessário seguir alguns procedimentos.

Determinar a orientação aproximada da câmara no espaço é determinar as rotações que o sistema de coordenada local realizou, em relação ao sistema fotogramétrico. A afirmação anterior pode causar alguma dúvida, pois o operador movimenta a câmara e não o sistema que está fixo. Entretanto deve-se lembrar que as equações de colinearidade utilizadas na fotogrametria analítica (eq. 2.5.2.10) são deduzidas para o sistema fotogramétrico, ANDRADE (1984).

3.3.4.1 OPERAÇÕES PARA DETERMINAR A ORIENTAÇÃO

Para recuperar a posição aproximada da câmara no espaço, o primeiro procedimento é colocar os eixos do sistema fotogramétrico (item 2.5.1.2) paralelos ou aproximadamente paralelos aos respectivos eixos do sistema local.

O sistema local é definido de acordo com as características do levantamento; a única restrição para sua definição é que ele deve ter a mesma orientação do sistema fotogramétrico, ou seja, deve ser também dextrógiro para que haja possibilidade de coincidência dos dois sistemas sem a necessidade de se fazer uma reflexão de eixo.

Após a coincidência dos eixos são feitas rotações até que a câmara recupere a posição aproximada no espaço em que as fotos foram tomadas.

As rotações em OMEGA, PHI e KAPPA, são ligadas respectivamente aos eixos X, Y e Z, figura 9.

Por convenção as rotações são positivas quando giram no sentido anti-horário e negativas no sentido horário.

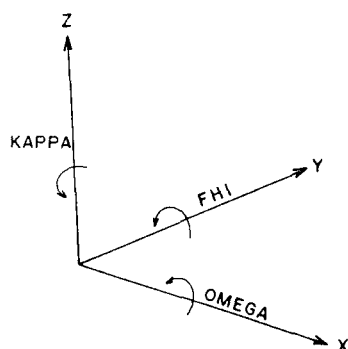


Fig. 9 Eixos e as respectivas rotações.

Um fator importante no momento de recuperar a posição da câmara no espaço é o conhecimento de qual das rotações é a primária, secundária e a terciária, ou seja, qual deve ser o primeiro eixo a ser girado e a seqüência dos seguintes. Os programas computacionais e os aparelhos restituidores são elaborados segundo uma seqüência de rotações e é obrigatório manter a ordem das rotações.

3.3.5 SINALIZAÇÃO

Quando utiliza-se fotogrametria analítica, os diapositivos ou negativos precisam ser medidos em um estêreo ou em um monocomparador para a determinação das coordenadas fotogrâficas de cada ponto.

A medida das coordenadas fotogrâficas dos pontos é um fator primordial na precisão final do trabalho, e deve-se procurar uma maneira de fazer com que as medições sejam as melhores possíveis.

O principal fator que afeta a medida é a falta de de

definição precisa do local a ser medido, outros fatores são:

- a) a precisão do instrumento utilizado;
- b) os erros aleatórios ou acidentais provenientes do operador.

O instrumento afetará as medidas de maneira sistemática e conhecida e os erros acidentais podem ser controlados fazendo-se diversas observações e utilizando-se um critério de rejeição, que variará de acordo com a necessidade do projeto.

Para o problema da definição dos pontos a serem medidos, a solução é a utilização de alvos artificiais, previamente dimensionados, que definirão com clareza os pontos.

3.3.5.1 GEOMETRIA DO DIMENSIONAMENTO

Quando do dimensionamento dos alvos é necessário levar-se em consideração os seguintes fatores:

- a) o tamanho da marca flutuante do aparelho onde serão feitas as medidas;
- b) as diferentes escalas que aparecem em uma mesma fotografia;
- c) a distância principal da câmara.

O esquema abaixo apresenta a geometria para o dimensionamento.

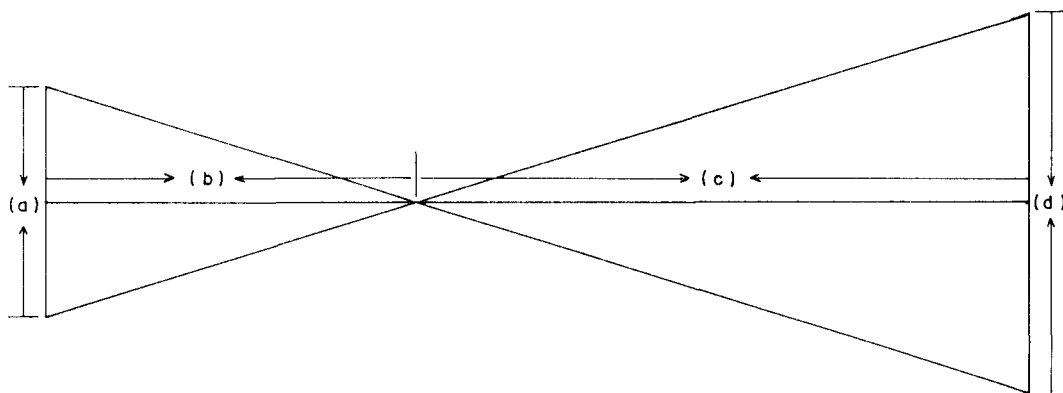


Fig. 10 Geometria do dimensionamento de alvos.

Onde:

(a) é o tamanho do alvo no negativo, que deve aproximar-se do tamanho da marca flutuante;

(b) é a distância principal da câmara;

(c) é a distância do centro de perspectiva da câmara ao alvo no espaço-objeto;

(d) é o tamanho do alvo no espaço-objeto.

A relação $(b)/(c)$ define a escala.

FORMA E TAMANHO DO ALVO

A forma mais adequada é a forma circular, semelhante a da marca flutuante e o tamanho deve ser um pouco maior que o da marca, o que possibilita que se coloque a marca sobre o alvo com boa precisão.

O tamanho do alvo no negativo ou diapositivo é muito

crítico, se o alvo aparece muito grande em relação à marca flutuante fica difícil de determinar seu centro, entretanto se o alvo aparece menor, causa grande problema, pois será encoberto pela marca flutuante.

Utilizando-se de esquemas, fica fácil perceber os problemas do dimensionamento:

a) quando o alvo aparece muito grande em relação à marca flutuante e a determinação do centro do alvo torna-se imprecisa, como mostra a figura 11.

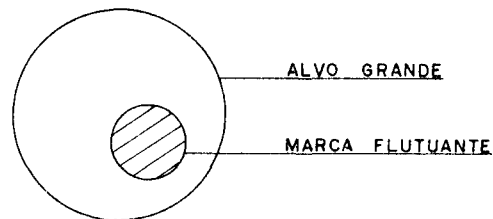


Fig. 11 Alvo grande em relação à marca flutuante.

b) quando a marca é maior que o alvo, o problema da definição do centro do alvo agrava-se, pois a marca encobre o alvo, como mostra a figura 12.

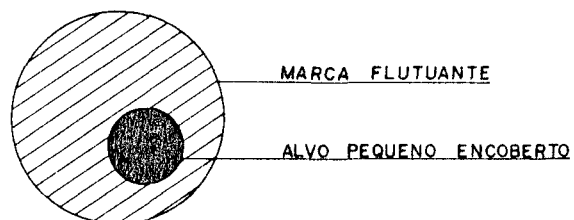


Fig. 12 Marca flutuante encobrindo o alvo.

Para o tamanho adequado do alvo, a prática tem mostrado que as melhores medidas são efetuadas quando o alvo aparece no diapositivo, um pouco maior que a marca flutuante do aparelho onde realiza-se a medição. O quanto o alvo deve ser maior dependerá da escolha do operador, segundo HOBBIÉ (1977) o alvo deve ter o tamanho aproximado de $5/3$ do diâmetro da marca de medir do instrumento.

3.3.5.2 ESCALAS DIFERENTES

Sabe-se que na fotografia aérea quando o terreno sobrevoado é muito acidentado, tem-se em uma mesma foto uma razoável variação na escala, entretanto quando trata-se de fotografias à curta distância a escala varia em um grande intervalo de valores, tem-se normalmente pontos desde um ou dois metros da câmara até vinte ou trinta metros em uma mesma foto.

Devido essa grande variação de escala, o problema do dimensionamento dos alvos torna-se complicado e lento, para uma mesma posição da câmara seriam necessários colocar-se muitos alvos de tamanhos diferentes, como ilustra a figura 13, onde observa-se que para cada distância "Sn" é necessário utilizar-se de um tamanho diferente de alvo e que, para uma mesma tomada, o número de alvos a serem dimensionados é muito grande, o que torna o processo impraticável.

Para a solução do problema, utiliza-se circunferências concêntricas, sendo a menor dimensionada para a posição mais próxima e a maior conseqüentemente para o ponto com alvo mais distante da câmara, de acordo com a figura 14.

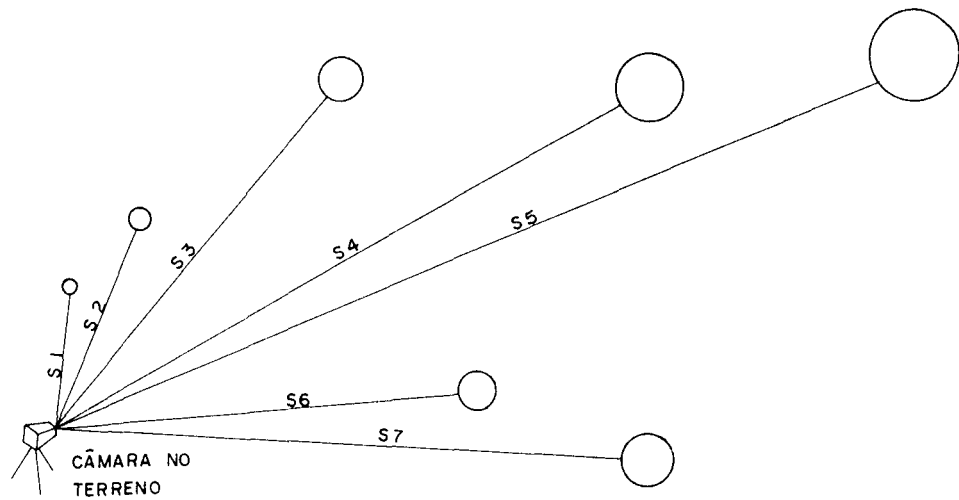


Fig. 13 Alvos variando de tamanho com a escala

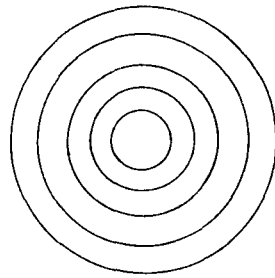


Fig. 14 Alvo composto de circunferências concêntricas.

3.3.5.3 ESPESSURA DO TRAÇADO DA CIRCUNFERÊNCIA

Com a utilização de circunferências concêntricas o problema de diversidade de escalas é simplificado, porém outro detalhe precisa ser observado, é que a espessura do traçado das circunferências pode aparecer na imagem muito estreita ou mesmo não aparecer, devido a variação de escala, figura 15.

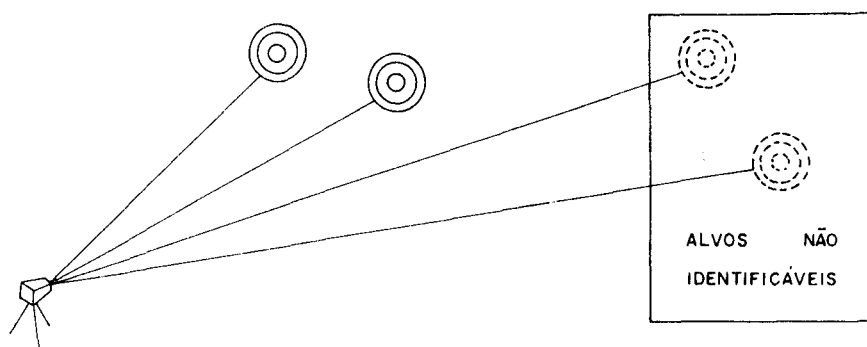


Fig. 15 Alvos não identificáveis devido a escala.

Torna-se necessário pois determinar a espessura mínima do traçado do alvo colocado a maior distância da câmara. Considerando-se mais esse fator conclui-se que quando a escala é muito variada as circunferências maiores devem ter o traçado dimensionado mais largo, figura 16.

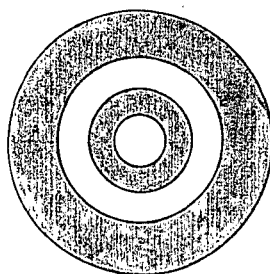


Fig. 16 Alvos com circunferências concêntricas com traçados mais largos.

3.3.5.4 DEFORMAÇÃO DO ALVO

Quando se utilizam alvos planos e fotos convergentes, dependendo da posição dos alvos eles se deformam, passando da forma original de circunferências a elipses. Para essas posi

ções alvos esféricos são recomendados e em SILVA (1983) concluiu-se que, apesar do aparente erro sistemático, pois o ponto medido deixa de estar diretamente sobre a superfície, na realidade há apenas uma translação do sistema referencial, figura 17.

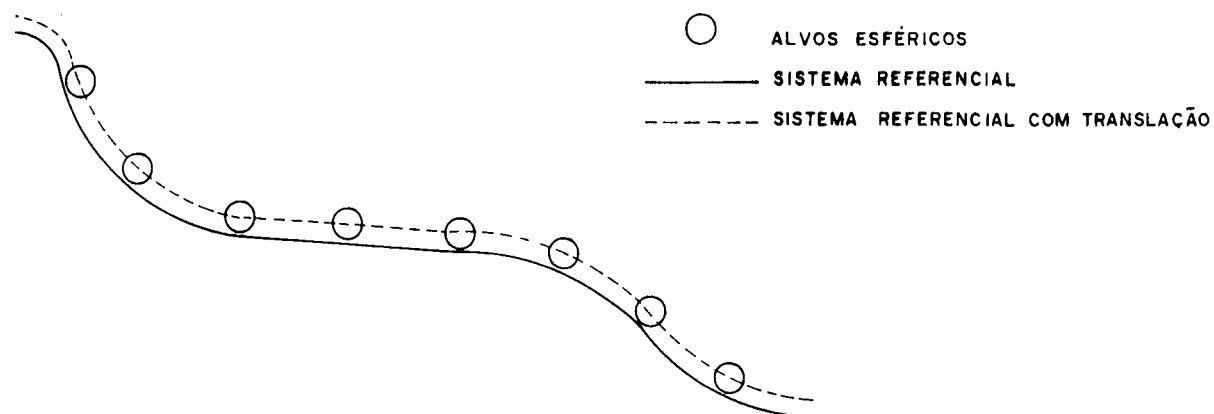


Fig. 17 Translação do sistema referencial devido a alvos esféricos.

3.3.5.5 A COR DO ALVO

Quando se utiliza filme preto e branco, as circunferências e os espaços entre as mesmas devem ser necessariamente pretos e brancos. Utilizar-se, na confecção dos alvos, de cores escuras ou claras próximas do preto e branco, não fornece resultados satisfatórios, pois a falta de contraste entre as partes do alvo dificulta a identificação.

Os melhores resultados são conseguidos quando se utiliza o nanquim preto sobre uma superfície branca ou mesmo uma caneta esferográfica preta com o traçado reforçado para escure

cimento.

No caso da utilização de filmes coloridos é necessário que o projetista conheça bem as cores contrastantes para confecção e colocação dos alvos.

3.3.6 A COLOCAÇÃO DOS ALVOS

Para se conseguir uma boa definição dos pontos do levantamento fotogramétrico a utilização de alvos é necessária, e a colocação adequada é fundamental. A informação proveniente do trabalho aparecerá através da posição ou da variação da posição dos alvos, se os alvos não estiverem devidamente posicionados a informação será insuficiente ou até mesmo tendenciosa.

Caso deseja-se detectar através da fotogrametria deformações em uma dada superfície, os alvos devem ser colocados de maneira homogênea, porém se certos pontos do material estudado são de maior importância, então nesses locais deve-se concentrá-los.

Para melhor localização dos pontos demarcados é preferível que o suporte em que os alvos são desenhados sejam de cores contrastantes com os locais onde estejam colocados.

3.4 PROCESSAMENTO DA INFORMAÇÃO

A informação é processada através de uma fototriangulação, que é um processo que se utiliza de fotografias adjacentes, estêreo-par, para retirar informações geométricas. As fototriangulações quanto ao tipo de processamento são classificadas em:

a) analógica

Quando utiliza-se um computador analógico, através de projeção ótica ou mecânica pode-se conectar sucessivos modelos estereoscópicos, e utilizando-se métodos tradicionais obtem-se informações geométricas do espaço-objeto. A precisão neste método é aceitável para determinados projetos.

b) analítica

Quando utiliza-se de um modelo matemático que interliga pontos do espaço-objeto às suas imagens. O processamento é feito por computadores digitais e a solução final são coordenadas de pontos do espaço-objeto.

c) semi-analítica

Quando o processamento para obtenção das coordenadas dos pontos do espaço-objeto é efetuado parte analogicamente e parte analiticamente. Forma-se o modelo em computadores analógicos, efetua-se medições de coordenadas de modelo, e posteriormente utiliza-se de uma transformação matemática que liga o modelo ao espaço-objeto.

CAPÍTULO QUARTO

MONITORAÇÃO DE UMA LAJE DE CONCRETO

4.1 INTRODUÇÃO

Em engenharia, a determinação de deslocamentos e deformações em grandes obras ou em peças isoladas é trabalho necessário e de difícil realização. Apresenta-se um método para monitorar deslocamentos, o qual se utiliza da fotogrametria analítica associada à calibração simultânea da câmara fotográfica.

4.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Pesquisou-se na literatura especializada a viabilidade do método fotogramétrico para monitoração, levando-se em conta a precisão e o aspecto econômico.

ERLANDSON (1975) concluiu: o método fotogramétrico para grandes obras é preferível ao geodésico, por que a aquisição da informação é mais rápida. Já no geodésico é necessário observar-se ponto a ponto; quando uma grande estrutura apresenta deformações contínuas, o método mais rápido apresenta melhores resultados. BRANDENBERGER (1974) apresenta conclusões similares às anteriores e afirma que, para um grande número de pontos, o método fotogramétrico suplanta por critérios técnicos e econômicos o geodésico. Em SILVA (1983a) encontra-se a citação de EREZ, que depois de compilar diversos trabalhos afirmou ser, para trabalhos onde a precisão requerida é de ordem de milímetros, a fotogrametria adequada.

A literatura específica sobre monitoração é restrita a alguns trabalhos apresentados, principalmente no último Congresso da Sociedade Internacional de Fotogrametria realizado na cidade de Hamburgo, em 1980. BARBALATA (1980) realizou um trabalho de monitoração de uma construção, a qual foi montada sobre uma plataforma possibilitando a simulação de um terremoto. Concluiu que o processo fornecia bons resultados, mas não os apresentou. Em CHRISTENSEN (1980) encontra-se o estudo de uma ponte com problemas. No processo utilizaram-se duas câmaras UMK/10, que fotografaram a estrutura à medida que se aumentava a carga. Em COOPER (1980) encontra-se um bom trabalho de acompanhamento das deformações na Catedral de São Paulo, em Londres, quando foram feitos dois levantamentos: o primeiro em 1978 e posteriormente em 1980. Computados os resultados foi possível concluir que algumas deformações na estrutura da catedral estavam estáveis, e deveriam ter ocorrido quando da sua construção no século XVII. SZCZECOWSKI (1980) apresentou um trabalho realizado nos estaleiros de Gdansk, onde durante cinco anos, de 1974-1979, fotografou navios em construção para estudar o comportamento do casco em relação às variações de temperatura.

4.3 INTERCÂMBIO

Na Universidade Federal do Paraná, o Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (C.P.C.G.) e o Centro de Estudos de Engenharia Civil (C.E.S.E.C.) uniram-se em uma pesquisa, na qual duas dissertações de mestrado foram desenvolvidas. Em SANTOS (1984) um modelo matemático utilizando elementos finitos para determinar, nos pontos de integração, os deslocamentos, as ten

sões e o estado de fissuramento de elementos retangulares, necessitava de um suporte prático. Concomitantemente procurava-se uma estrutura que possibilitasse a aplicação da fotogrametria a curta distância para monitorar deslocamentos. A princípio havia-se pensado em fazer o recalque de uma grande estrutura, entretanto, por se tratar de um processo em fase experimental, necessitava-se de um bom controle para comparação que a grande obra não fornecia. Em contatos com o C.E.S.E.C. encontraram-se soluções unindo os dois experimentos, ou seja, a mesma laje de concreto que foi ensaiada para confirmação do modelo matemático de SANTOS (1984), utilizou-se para determinar seus deslocamentos através da fotogrametria. As vantagens implicam na possibilidade de medirem-se os deslocamentos nos pontos controlados por instrumentação mecânica, de utilização já comprovada, que são colocadas no corpo de prova. Sendo assim o método fotogramétrico pode ser devidamente testado.

4.4 LAJE DE CONCRETO COM ALVÉOLOS

Uma laje de concreto é uma peça estrutural plana, para compor o piso ou a cobertura de uma edificação qualquer.

A laje é chamada de protendida por pré-tensão, quando a sua construção processa-se da seguinte maneira: tensiona-se a armadura, depois concretiza-se a peça e só após o concreto secar é que se solta a armadura. Com isso a tensão transfere por aderência para toda a laje de concreto. Essa protensão é para compensar as tensões de tração, que aparecem durante sua utilização. A compressão aplicada à placa antes do carregamento garante, dentro de certo limite, que a seção transversal da laje

sempre esteja sujeita apenas ao esforço de compressão. A figura 18 mostra a laje de concreto protendido utilizada no ensaio.

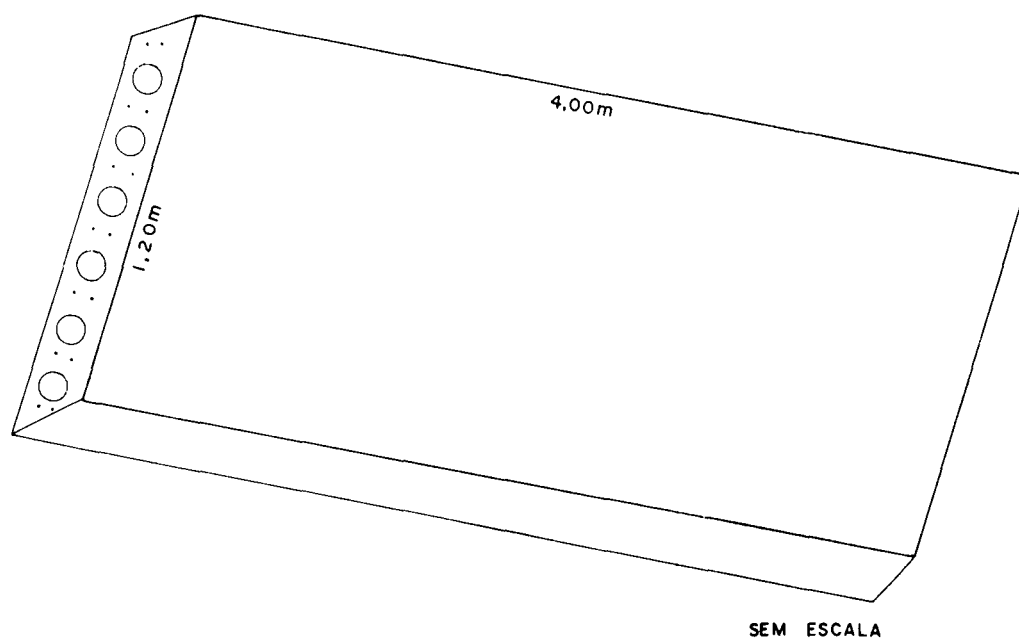


Fig. 18 Laje de concreto com alvéolos.

4.5 PROCESSO MECÂNICO

O método teórico para determinar deslocamentos e o fotogramétrico necessitavam que fossem acompanhados de um processo já devidamente reconhecido e testado, o qual pudesse ser utilizado como aferidor entre eles: com essa finalidade empregou-se instrumentos mecânicos chamados de relógios comparadores ou defletômetros e cuja função é medir deslocamentos lineares relativos. São utilizados através de suportes mecânicos que os fixa à superfície tomada como referência.

Os equipamentos utilizados são fabricados em Zurique

por HUGGENBERGER. Neles é possível fazer leituras com intervalos de 0,05 mm. A figura 19 apresenta o relógio comparador.

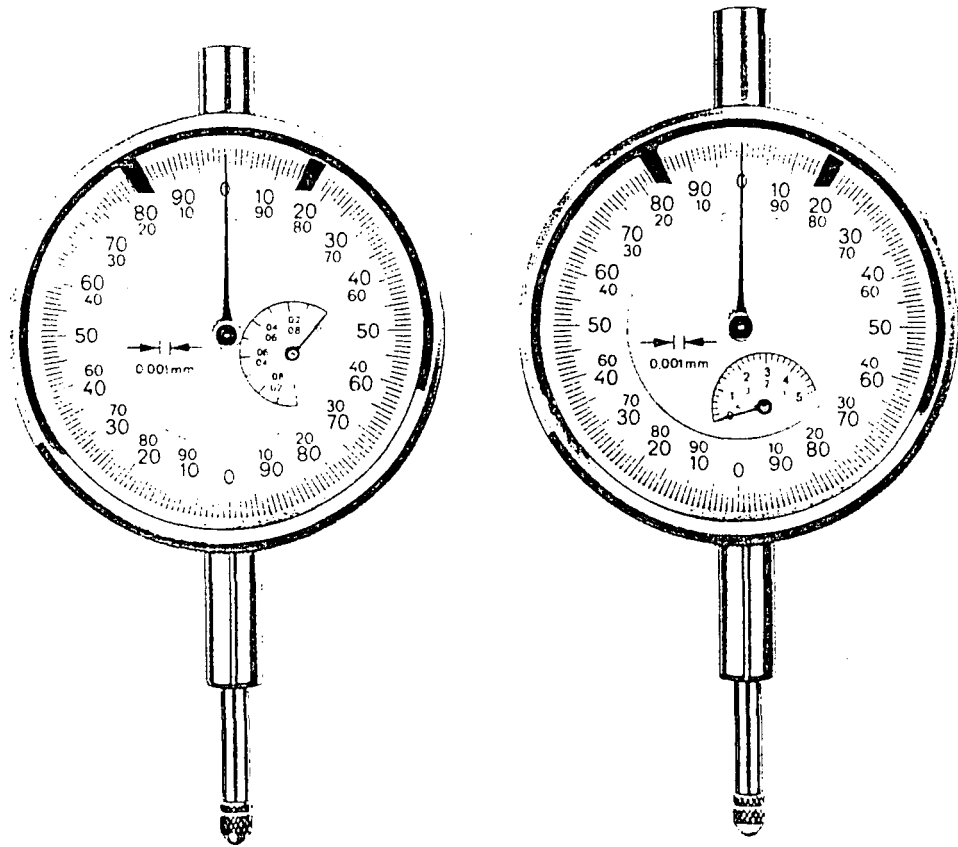


Fig. 19 Relógios comparadores ou defletômetros.

4.6 PROCESSO FOTOGRAMÉTRICO

O processo fotogramétrico se utiliza da fotogrametria analítica, descrita no item 2.5, e por se tratar de um método matemático a solução é dada em forma de coordenadas tridimensionais dos pontos medidos, com suas respectivas variâncias.

Os deslocamentos e deformações são determinados a partir de variações das coordenadas de cada ponto.

4.6.1 A AQUISIÇÃO DA INFORMAÇÃO

Para a fase inicial do processo fotogramétrico, quando a informação é coletada, a principal preocupação foi com relação à precisão final do trabalho. Na monitoração da laje ensaiada procurou-se atingir a máxima precisão possível e para isso foram escolhidos equipamentos e métodos coerentes com tal pretensão.

4.6.1.1 CÂMARA FOTOGRÁFICA

A câmara fotográfica utilizada foi a Rolleiflex - SLX número de série 602.530.054, fabricada pela Rollei Braunschweig (República Federal da Alemanha). Segundo ANDRADE (1982) esse tipo de câmara foi primeiramente empregado para aplicações em fotogrametria por Wester-Ebbinghaus (Universidade de Bonn), que sugeriram a incorporação de um "reseau", o qual foi produzido pela Heidenhain e que consiste de 121 cruzes no intervalo de 50 mm, onde as marcas foram gravadas com erros inferiores ao m_x cron, sendo $m_x = 0.8 \mu\text{m}$ e $m_y = 0.9 \mu\text{m}$.

Na Universidade Federal do Paraná, a câmara citada foi utilizada em diversos trabalhos: ANDRADE (1982), SILVA (1983) e VIEIRA (1984) apresentando sempre resultados satisfatórios.

Para o trabalho de monitoramento, a câmara inicialmente indicada seria uma câmara métrica devida a precisão requerida. Entretanto, tendo em vista as vantagens do menor preço e a grande versatilidade de foco da câmara Rolleiflex-SLX, associando-se a ela um modelo matemático de calibração para os parâme

tros internos, além do "reseau" para corrigir o trabalho do filme, a câmara passou a ser indicada para levantamentos. Suas principais características são:

- a) totalmente elétrica, alimentada com uma bateria de 12V;
- b) a objetiva padrão é a Planar 80 mm, mas aceita intercambiáveis;
- c) emprega filme de rolo 120 ou 220, respectivamente, de 12 e 24 exposições no formato 6 x 6 cm;
- d) o obturador tem sua velocidade ajustada desde 1/500 s até 30 s;
- e) pode operar de maneira contínua, obtendo-se 1,5 exposições por segundo;
- f) o filme é bobinado através de um motor elétrico, automaticamente após cada exposição.

4.6.1.2 MÉTODO FOTOGRAFÉTICO

O método fotogramétrico que se utilizou para monitorar a laje de concreto submetida a ensaio, foi o das câmaras convergentes, discutido no item 3.3.3. A sua utilização se deve ao fato de que a câmara Rolley-SLX não é uma câmara métrica, portanto necessitar para levantamentos de alta precisão de ser calibrada, e esse método propicia que se realize simultaneamente a calibração e a triangulação.

4.6.1.2.1 MÉTODO COM CONVERGÊNCIA REDUZIDA

Para que a observação das coordenadas fiduciais dos pontos seja bem feita, o ideal é que todos os pontos a serem medidos estejam devidamente focalizados. No presente trabalho devido a obstáculos não foi possível fotografar a peça de uma distância superior a 3,0 m. A objetiva de 50,0 mm utilizada é focalizada desde 0,5 a 8,0 m e a partir dessa distância câmara-objeto tem focalização no infinito. Se as câmaras fossem posicionadas de modo a se obter a convergência entre elas de 90° , ocorreria um sério problema de focalização nos extremos da peça fotografada, pois teríamos pontos distanciados da câmara de 2,2 até 4,3 m, conforme esquematiza a figura 20.

A solução normal seria fechar o diafragma para aumentar o campo de foco, porém no presente trabalho tal solução não é adequada devido aos seguintes fatores:

a) as fotos são tomadas em ambiente fechado, e para suprir a falta de luz, já se utiliza de iluminação artificial associada a uma velocidade do obturador de 1/2 s. Caso o diafragma fosse fechado, o tempo de exposição seria muito grande;

b) a peça submetida a ensaio deforma-se continuamente essa deformação é detectada na instrumentação, e acontece mesmo quando a carga permanece constante, sendo assim é necessário que as fotos sejam tomadas o mais rápido possível.

Para contornar o problema da focalização foi necessário posicionar as câmaras de maneira a reduzir a diferença de afastamento entre os pontos extremos para as câmaras, quando da

tomada das fotos convergentes. Minimizou-se o problema deslocando-se a posição das câmaras de maneira a aproximá-las, entretanto com isso a convergência diminuiu muito, figura 20. A solução encontrada para o impasse é mostrada na figura 21, quando para compensar a diminuição da convergência causada pela aproximação das câmaras, deixa-se de visar o mesmo ponto e força-se o aumento da convergência visando-se pontos opostos com relação ao centro da laje. É possível forçar até que a abertura do campo visual da lente não perca o extremo mais próximo.

Para completar o método uma foto foi tomada com uma rotação de 90° em Kappa.

4.6.1.3 DIMENSIONAMENTO DOS ALVOS

Os alvos foram dimensionados segundo critérios apresentados no item 3.3.5, ou seja, levando-se em conta a escala da foto, o tamanho da marca flutuante do aparelho onde se realizam as medidas e a distância principal da câmara.

4.6.1.3.1 TIPOS DE ALVOS

Dois tipos de alvos foram utilizados:

- a) circunferências concêntricas;
- b) esferas.

As circunferências concêntricas foram colocadas na parte frontal da laje. Na parte superior da peça, devido o po

sicionamento das câmaras as circunferências deformar-se-iam da forma circular para a elíptica, para esses locais dimensionou-se esferas que evitassem esse problema e cuja utilização discutiu-se no item 3.3.5.4.

4.6.1.4 COLOCAÇÃO DOS ALVOS

Os alvos foram colocados no local do experimento com diversas funções, figura 21, que são esclarecidas a seguir

a) alvos posicionados nos locais em que se define o sistema de coordenadas, foram posicionados fora da peça ensaiada nas proximidades dos cantos da área fotografada. As finalidades são: definir o sistema de coordenadas e fortalecer a geometria do modelo, já que a peça fotografada concentra os pontos observados em uma faixa central;

b) diversos alvos colocados sobre a mesma vertical onde os deslocamentos são computados, e cuja finalidade é determinar através das discrepâncias as variações no comportamento da laje em uma mesma secção vertical;

c) houve um cuidado na colocação dos alvos para que eles fossem posicionados simetricamente em relação ao centro da laje com o intuito de que os seus deslocamentos fornecessem dados sobre a homogeneidade do material estudado.

Observação: No presente trabalho além dos pontos de controle estarão situados nos cantos das fotos, o outro fator que fortalece a geometria e proporciona uma boa

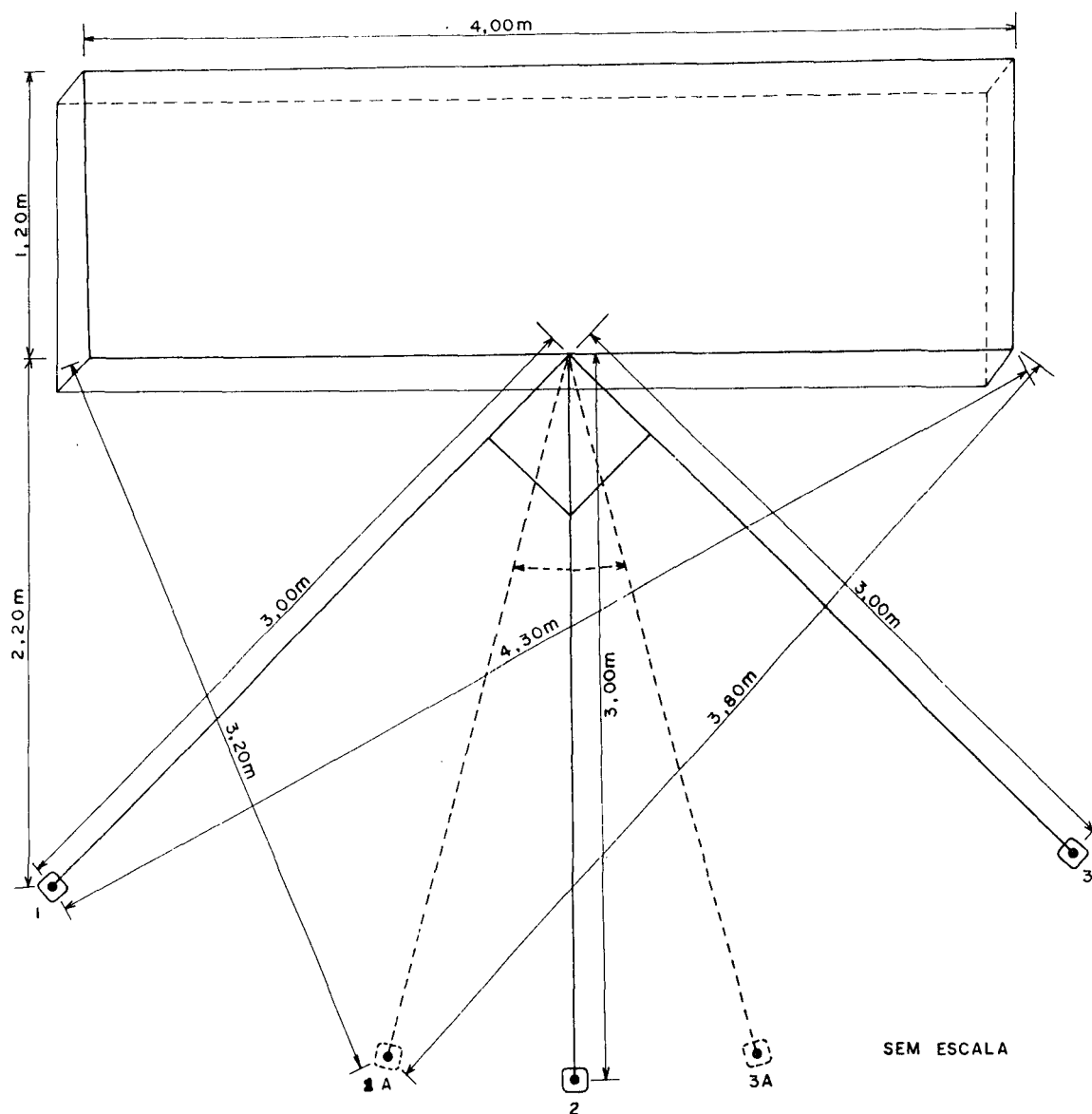
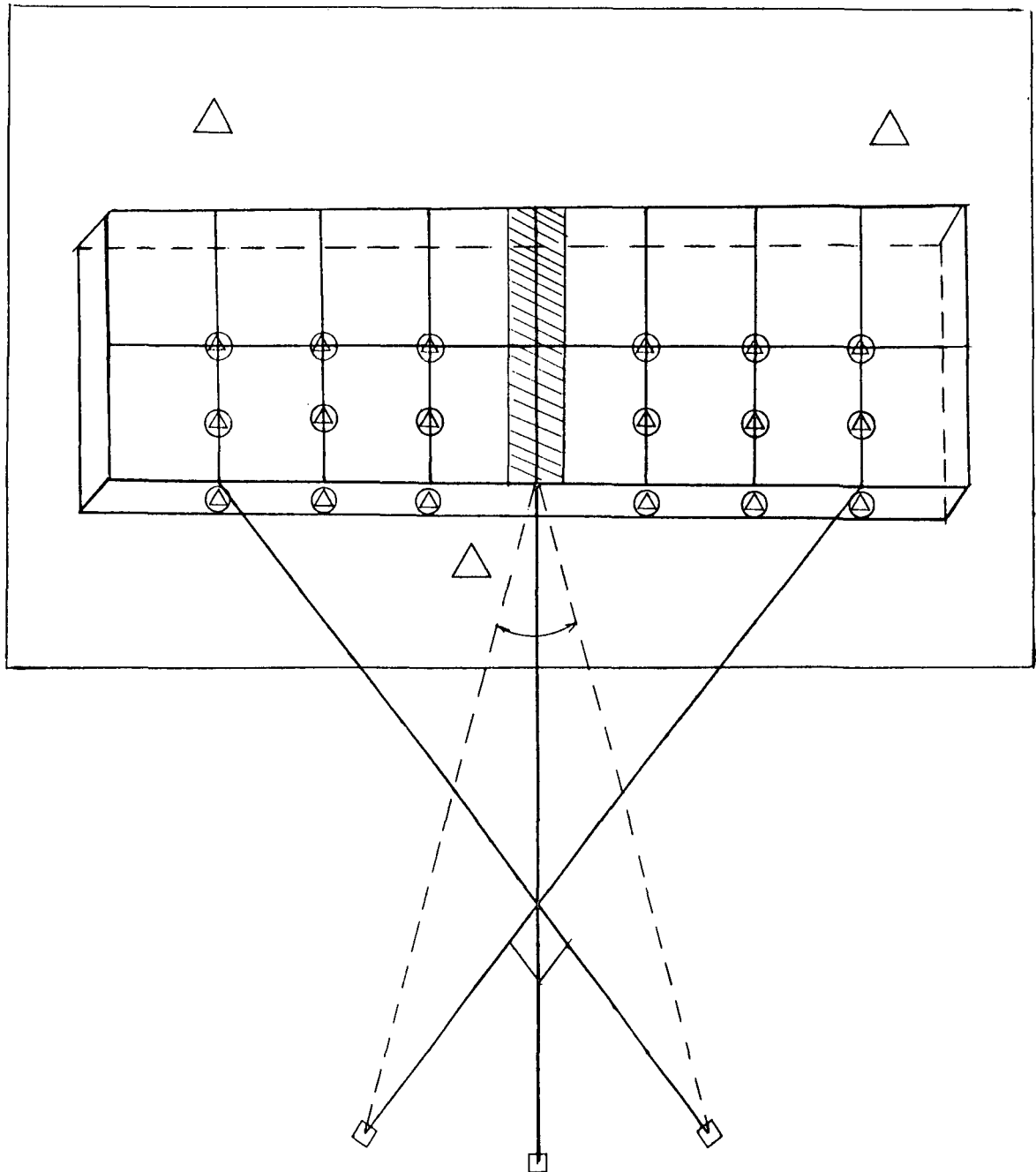
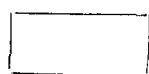


Fig. 20 Distâncias entre as câmaras e os pontos extremos.

Fig. 21 Posicionamento das câmaras e alvos diferenciados por função.



LEGENDA



CAMPO FOTOGRAFADO



ALVOS QUE DEFINEM O SISTEMA DE COORDENADAS



ALVOS SOBRE A MESMA SECÇÃO VERTICAL



POSICIONAMENTO DAS CÂMARAS



LOCAL DE APLICAÇÃO DA CARGA

orientação relativa, mesmo para condições não favoráveis, é o método das câmaras convergentes, fornecendo a possibilidade de diversas estações cubrirem a mesma cena, DOWMAN (1980).

4.6.1.5 PONTOS DE CONTROLE

A característica principal dos pontos de controle, no presente trabalho, é que são inerciais em relação aos deslocamentos e as deformações da peça monitorada. É importante que eles não variem com a peça, pois a partir do sistema de coordenadas definidas por eles é que se realiza a monitoração.

4.6.1.6 TOMADA DAS FOTOS

No presente trabalho pesquisou-se a viabilidade da utilização da fotogrametria analítica para monitorar deslocamentos, e com essa finalidade realizou-se quatro triangulações. Para cada levantamento foram tomadas três fotos, perfazendo um total de doze exposições. A posição das estações e os eixos óticos estão representados na figura 21. Na estação número dois, a central, a câmara foi girada em Kappa de 90° .

A primeira série foi tomada com a laje livre de pressão externa, para que suas posições fossem consideradas como referência para os deslocamentos e deformações. Na segunda série a laje encontrava-se flexionada devido a aplicação de uma pressão de 50 Kg/cm^2 no seu vão central. Para a terceira série a pressão foi aumentada para 83 Kg/cm^2 .

A última triangulação foi realizada para estudar a de formação plástica da peça ensaiada, para que fosse possível essa determinação procedeu-se da seguinte maneira:

a) após fotografar a peça flexionada, retirou-se toda a pressão aplicada;

b) a laje reagiu e tendeu a voltar a posição inicial, aguardou-se até que os defletômetros apresentassem uma medida estável. Para isso foi necessário uns dez minutos, só então foram tomadas as fotos.

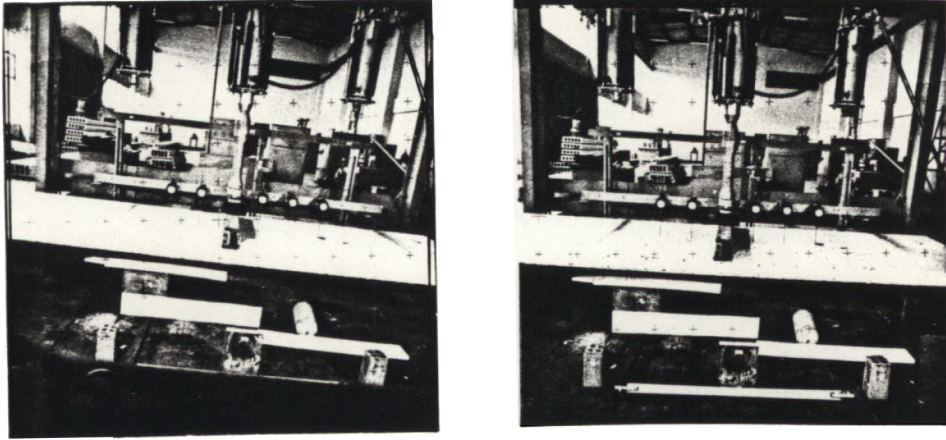
Na figura 22 tem-se uma das séries de três fotos que se utilizou na monitoração. As duas fotos colocadas na parte superior formam um par estereoscópico, que pode ser observado com um estereoscópio de bolso, e na terceira foto observa-se o efeito da rotação de 90° em Kappa.

4.6.2 PROCESSAMENTO DA INFORMAÇÃO

O processamento da informação inicia-se após a tomada das fotos até o resultado final do trabalho. Torna-se importante, nesta fase, que os procedimentos não deterioremem as informações obtidas, porém sabe-se que estas tomadas de forma inadequada, independente do seu processamento, jamais apresentarão bons resultados.

O primeiro passo é, logicamente, a revelação do filme. No presente trabalho este foi entregue a um laboratório onde foram observadas as especificações do fabricante. Os procedi -

Fig. 22 Fotos do levantamento fotogramétrico.



par estereoscópico

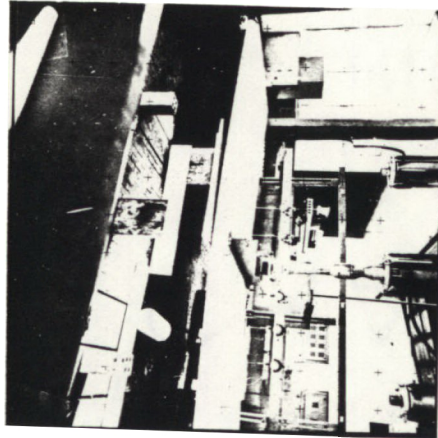


Foto com Kappa de 90°

mentos seguintes — o trabalho com a imagem fotográfica — são comentados a seguir.

4.6.2.1 MEDIÇÃO DAS COORDENADAS FIDUCIAIS

Como se trata de um método analítico (2.5.1), as informações retiradas das fotos constituem as coordenadas fiduciais dos pontos, definidos em 2.5.1.3. A medida destas coordenadas exige grande precisão, preferencialmente a nível de micron. Cabe aos comparadores — mono ou estéreos — a realização precisa das medições. Os monocomparadores são instrumentos que só permitem medir pontos de fotos individuais enquanto os estereocomparadores possibilitam, simultaneamente, a operação usando-se coordenadas de pontos de duas fotos formadoras de um modelo estereoscópico.

Os comparadores quanto a forma de medir as coordenadas são divididos em:

- a) analógicos;
- b) analíticos.

Analógicos são aqueles onde as medidas realizam-se mecanicamente através de micrômetros.

Quanto aos comparadores analíticos as medidas das coordenadas são feitas eletronicamente; inexistem ligações mecânicas entre as manivelas e o porta-placa, onde as fotos são colocadas para serem medidas.

As coordenadas são avaliadas através da contagem de

pulsos enviados por "encaders" ligados às manivelas, com as quais o operador movimenta o porta-placa. Os pulsos são contados a partir da origem do sistema de coordenadas do instrumento, a figura 23 mostra a esquematização de um estereorestituidor analítico.

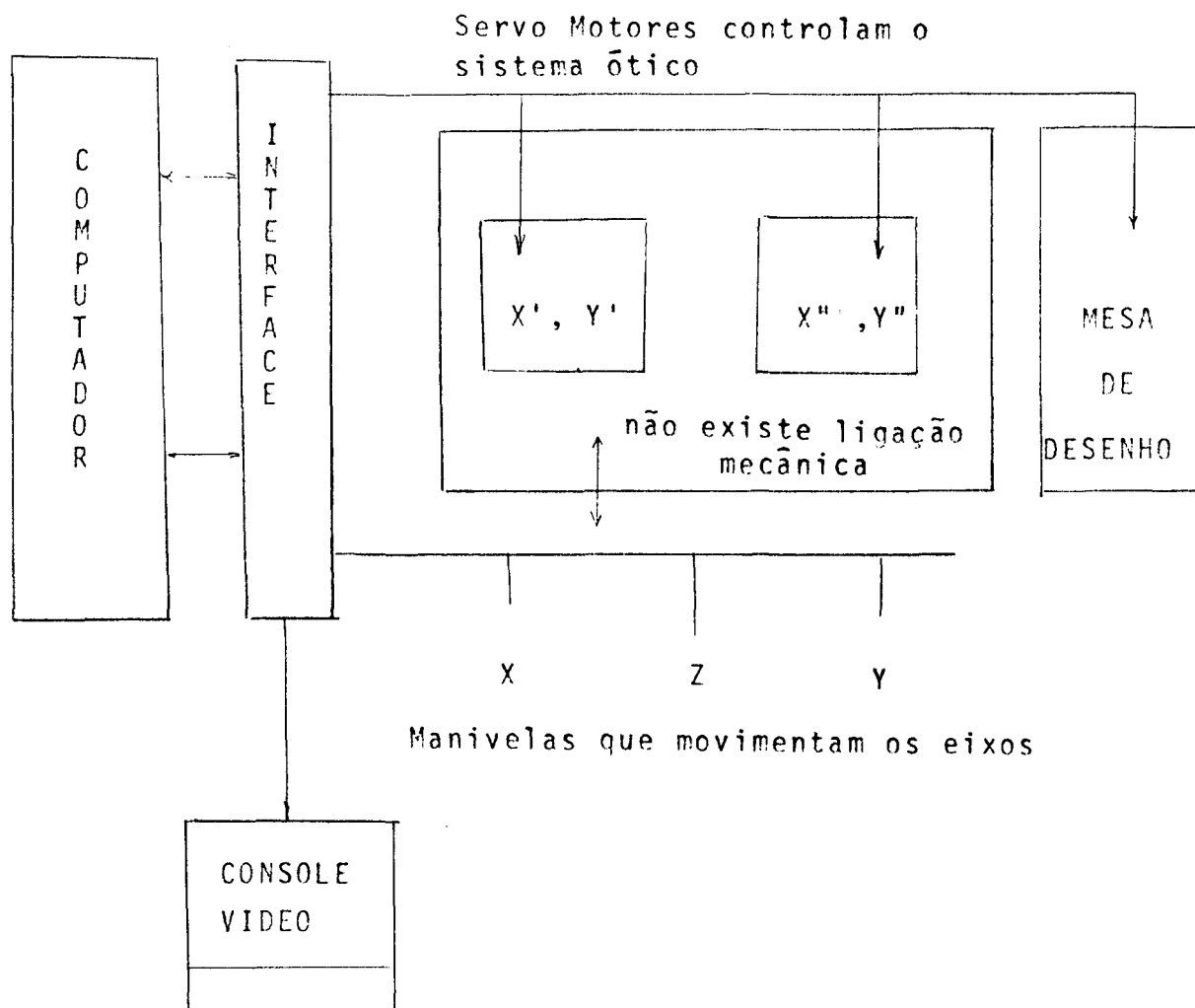
As medidas das coordenadas fiduciais no presente trabalho foram executadas no ZEISS PLANICOMP C-100, um estereorestituidor analítico, doado pelo Governo da Alemanha Federal para o Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná. O sistema PLANICOMP possui o mini-computador HP-1000, que interliga os periféricos e amplia a utilização com programas de aplicação.

Para realizar as medições utilizou-se o programa B-70, que pertence ao "software" do sistema Planicomp. Esse programa é de fácil utilização e possibilita que as coordenadas dos pontos sejam medidas, numeradas e retiradas de cinco maneiras diferentes:

- a) observando-as no visor numérico que se encontra a esquerda sobre o painel do Planicomp;
- b) no terminal de "video";
- c) na impressora de papel;
- d) gravadas em fita magnética;
- e) gravadas no arquivo do mini-computador HP-1000.

O manual de manejo fornecido pela ZEISS detalha a maneira de utilizar esse programa.

Fig. 23 Estereorestituidor analítico



Sobre a parte operacional, que independe da programação, ressaltam-se os seguintes detalhes:

- a) colocação da foto no porta-placa;
- b) critério de rejeição para a medida das coordenadas.

A colocação, no porta-placa do diapositivo ou negativo, necessita que se observe o lado que deve ficar a emulsão e a posição da imagem. Para quem trabalha com negativos fotográficos o lado emulsionado deve ser colocado para baixo e com o diapositivo para cima. A posição da imagem é outro problema a ser solucionado. Nas fotografias aéreas determina-se seu posicionamento através de informações contidas no certificado de calibração da câmara, que indica a posição em que se encontra o valor da distância focal ou outra informação qualquer. As câmaras métricas utilizadas em fotogrametria terrestre também possuem essa informação, o que não acontece nas câmaras não-métricas, inexistindo qualquer indicação.

Na câmara Rollei-SLX utilizada, aproveitou-se a placa do "reseau" e sinalizou-se o canto superior direito da imagem com um "V" invertido.

Na medida das coordenadas aplica-se um critério de rejeição para evitar erros grosseiros. Fixou-se que em três medidas os resíduos em relação à média não deveriam exceder de três microns.

4.6.2.2 TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS DE MÁQUINA EM FIDUCIAIS

As coordenadas medidas no sistema Planicomp, não são

as fiduciais dos pontos, e sim aquelas referidas a um sistema que tem origem no instrumento, denominados, comumente, de coordenadas de máquina. No Planicomp essa origem é aproximadamente no centro do porta-placa.

Para que seja possível realizar uma transformação de coordenadas entre dois sistemas é necessário que existam pontos comuns aos dois sistemas, sendo em número suficiente para determinar os parâmetros da transformação adequada LUGNANI(1984). No presente trabalho os pontos comuns ao sistema de máquina e ao fiducial são as cruzes do "reseau", adaptado à máquina fotográfica, item 4.7.1.1.

A transformação matemática utilizada é a de similaridade, comentada e descrita no item 2.6.3.

Os programas computacionais utilizados foram elaborados pela M.Sc. Mary Angélica de Azevedo Olivas e por Martin Behmann (R.F.A.). Trata-se de dois programas elaborados separadamente, sendo que um partindo da medida de determinados pontos do "reseau" numera as outras cruzes observadas. Quando ao outro programa, calcula os parâmetros da transformação de similaridade, utilizando-se dos pontos do "reseau" medidos, enumerados e dos calibrados, aplicando a transformação aos pontos da imagem, que se encontrarem entre as quatro marcas.

4.6.2.3 DETERMINAÇÃO DAS COORDENADAS DO ESPAÇO-OBJETO E CALIBRAÇÃO

As coordenadas dos pontos do espaço-objeto e os parâ-

metros de calibração são determinados simultaneamente. Após a resolução das equações de colinearidade adicionadas aos parâmetros de calibração (eq. 2.7.3.1). A solução é encontrada a partir dos valores aproximados das incógnitas e da fixação de um sistema de coordenadas.

O programa computacional utilizado foi elaborado pelo Ph.D. José Bittencourt de Andrade, que é responsável pela parte de triangulação e em OLIVAS (1980) foi acrescentada a calibração simultânea da câmara.

O programa em linguagem FORTRAN IV é muito versátil, possibilitando que além da fixação do sistema de coordenadas, através de pontos de apoio seja possível se fixar distâncias conhecidas do terreno, o que enriquece a escala; pode-se também determinar o sistema de coordenadas através da fixação da posição de uma câmara e distâncias conhecidas; controla-se o número de iterações e os critérios de convergência angular, para calibração e das coordenadas. O programa pode ser encontrado em OLIVAS (1980) ou na Universidade Federal do Paraná, no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e contém comentários com instruções que possibilitam sua utilização.

4.6.2.4 DETERMINAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS E DEFORMAÇÕES

O monitoramento da laje ensaiada é feito em função da variação das coordenadas tridimensionais dos pontos medidos. Primeiro determina-se as coordenadas da peça estática não sujeita a pressão; depois flexionada sob a ação de um macaco hidráulico e finalmente após retirado o carregamento, quando se observa a deformação da peça ensaiada.

CAPÍTULO QUINTO

RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

São apresentados os valores obtidos na monitoração, a comparação entre os resultados fornecidos pelos métodos fotogramétrico e o mecânico, com uma análise estatística e os parâmetros de calibração da câmara.

5.2 RESULTADOS

Nos Quadros 5.2 a 5.5 encontram-se as coordenadas tri dimensionais, determinadas por ajustamento de vinte e seis pon tos sinalizados da laje de concreto ensaiada. Foram colocados seis grupos de quatro pontos aproximadamente sobre a mesma ver tical, dois na parte frontal e dois sobre a peça. A finalidade foi, além de determinar os deslocamentos, pesquisar através das discrepâncias a precisão interna do método fotogramétrico. No centro da peça foram colocados dois alvos sobre a mesma verti cal, devido ao fato de, nesse local, estar sendo aplicada a for ça e impossibilitar a colocação dos outros; o deslocamento de terminado nesse local só será utilizado para a observação do ponto de máxima flexão, não sendo computado nos demais cálcu los, onde serão considerados os deslocamentos de seis pontos simétricos em relação ao centro da laje. O deslocamento de cada vertical será o resultado da média dos quatro pontos.

Nos Quadros 5.6 a 5.8 determina-se a variação das co ordenadas dos pontos em relação à laje livre de qualquer pres-

são externa. Observa-se que as diferenças entre as coordenadas X e Y, dos pontos, são valores quase sempre menores que um milímetro, poucos chegam a esse valor. Baseando-se no menor desvio padrão das coordenadas de 0,6 mm, e considerando ainda, a duplicação do desvio para o resultado da subtração de duas coordenadas, é possível afirmar que os valores das diferenças entre as coordenadas X e Y não são significativas e o sistema definido para a monitoração permaneceu estável. Na experiência a peça ensaiada sofreu apenas pressão no sentido vertical e somente na diferença de coordenadas em Z é que devem aparecer valores significativos.

5.3 COMPORTAMENTO DA LAJE EM UMA MESMA SECÇÃO VERTICAL

Para estudar o comportamento da laje com relação aos deslocamento, em uma mesma secção vertical, levou-se em conta as dezoito secções verticais sinalizadas com quatro alvos onde o desvio da média desses quatro valores é de 0,27 mm. Considerando-se ser esse desvio menor que o menor desvio padrão das coordenadas ajustadas, $\sigma = 0,60$ mm, é possível concluir-se que a laje ensaiada apresenta, com relação aos deslocamentos, em uma mesma secção vertical comportamento homogêneo.

5.4 COMPARAÇÃO DO MÉTODO FOTOGRAMÉTRICO COM O MECÂNICO

No quadro 5.9 encontra-se a comparação entre os deslocamentos determinados pelo método fotogramétrico e os valores obtidos com instrumentação mecânica. O desvio padrão das discrepâncias entre eles é de 0,52 mm.

5.4.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para avaliar as discrepâncias entre os dois processos utilizou-se a análise de variância, que é um dos mais importantes métodos para análise estatística. Pode ser empregado no caso de duas amostras independentes.

A hipótese básica H_0 é de que não existe diferença significativa entre os métodos no nível de significância de 95%.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

Empregou-se a formulação que pode ser encontrada em MARQUES (1982), BORGES (1973) ou com KIRCHNER (1984), obteve-se o valor de $F = 1,51$. Comparando com o valor tabelado $F_{\alpha}(1,14) = 4,60$. Aceita-se a hipótese básica H_0 , pois $F_0 < F_{\alpha}$, ou seja, ao nível de significância de 95% que não existe diferenças entre os métodos examinados.

QUADRO 5.1 A N O V A

FONTE DE VARIACÃO	SOMA DE QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADOS MÉDIOS	F
Entre linha	0,0021	1	0,0021	1,5176
Entre colunas	78,3010	14		
Dentro (residual)	0,0201	14	0,0014	
Total	78,3233	29		

5.5 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO

No Quadro 5.10 encontram-se os valores ajustados dos parâmetros de calibração da câmara, nas quatro triangulações que foram realizadas no presente trabalho.

QUADRO 5.2 Coordenadas tridimensionais (em cm) da triangulação de pontos de uma laje de concreto livre da ação de forças externas.

SECÇÕES VERTICAIS	NÚMERO DO PONTO	C O O R D E N A D A S		
		X	Y	Z
1	1	30,6649	212,4839	46,8366
	2	30,5003	214,2783	53,4769
	3	30,1827	234,6357	54,5482
	4	29,8992	256,7074	54,4286
2	5	55,4066	212,5386	46,8389
	6	55,5136	213,9669	53,4886
	7	55,1663	234,2737	54,7848
	8	54,7750	255,4154	54,8604
3	9	80,3494	212,7143	47,3309
	10	80,0803	214,3128	53,8559
	11	79,9873	235,2061	54,6932
	12	80,0097	256,1211	54,5696
4	13	104,8291	212,9178	47,1842
	14	104,6848	214,5919	53,7519
5	15	129,5263	213,1449	47,0901
	16	129,4624	214,5834	53,5982
	17	129,3369	236,1629	55,0038
	18	129,5612	257,3954	55,0041
6	19	154,4073	213,3127	47,1913
	20	154,3616	215,0266	54,1281
	21	154,5407	236,2209	55,4815
	22	154,6318	257,0177	55,4721
7	23	179,5992	213,6077	47,6124
	24	179,2710	215,4273	54,4493
	25	179,8042	236,5501	55,3718
	26	180,2678	257,2459	55,4831

QUADRO 5.3 Coordenadas tridimensionais (em cm) da triangulação de pontos provenientes de uma laje de concreto flexionada sob a ação de uma pressão de 50 Kg/cm^2 aplicada na parte central.

SECCÕES VERTICAIS	NÚMERO DO PONTO	C O O R D E N A D A S		
		X	Y	Z
1	1	30,5686	212,3966	45,3155
	2	30,5699	214,2832	51,9981
	3	30,1125	234,7647	53,0676
	4	29,8498	256,7261	52,9330
2	5	55,3739	212,5588	45,0459
	6	55,4873	214,0271	51,7019
	7	55,1915	234,2409	53,0043
	8	54,7192	255,4439	53,0431
3	9	80,3439	212,7508	45,3361
	10	80,0952	214,3671	51,9037
	11	79,9587	235,2714	52,7326
	12	79,9563	256,1961	52,6029
4	13	104,8485	212,9760	45,1421
	14	104,6539	214,5069	51,7236
5	15	129,5465	213,1193	45,2024
	16	129,4955	214,5372	51,6817
	17	129,2184	236,1778	53,1663
	18	129,5384	257,4281	53,0604
6	19	154,4761	213,3995	45,5306
	20	154,3036	215,1283	52,4100
	21	154,5832	236,2895	53,7567
	22	154,6845	257,1499	53,7429
7	23	179,6167	213,6440	46,1805
	24	179,2333	215,4984	53,0567
	25	179,8343	236,5295	53,9667
	26	180,2454	257,3303	54,0488

QUADRO 5.4 Coordenadas tridimensionais (em cm) da triangulação de pontos provenientes de uma laje de concreto flexionada sob a ação de uma pressão de 83 Kg/cm^2 aplicada na parte central.

SECÇÕES VERTICAIS	NÚMERO DO PONTO	C O O R D E N A D A S		
		X	Y	Z
1	1	30,5897	212,4331	43,1082
	2	30,5588	214,2839	49,7630
	3	30,2888	234,6953	50,7883
	4	30,0392	256,7429	50,6440
2	5	55,4642	212,5899	42,4983
	6	55,5978	213,9390	49,1633
	7	55,2336	234,3266	50,4324
	8	54,7379	255,4481	50,4450
3	9	80,4243	212,7884	42,5942
	10	80,0926	214,3867	49,1540
	11	80,0376	235,2606	49,8843
	12	80,0314	256,1766	49,7634
4	13	104,8954	212,9158	42,2786
	14	104,6364	214,5104	48,8462
5	15	129,5663	213,1920	42,3729
	16	129,4329	214,5288	48,9011
	17	129,3623	236,2240	50,3712
	18	129,5509	257,4066	50,2734
6	19	154,4573	213,2385	42,9788
	20	154,3896	215,0052	49,8505
	21	154,5224	236,2885	51,2406
	22	154,5513	257,0713	51,2602
7	23	179,4822	213,6404	44,0284
	24	179,2064	215,4469	50,8721
	25	179,8771	236,5204	51,7952
	26	180,2427	257,3091	51,8788

QUADRO 5.5 Coordenadas tridimensionais (em cm) da triangulação de pontos de uma laje de concreto flexionada sob o efeito de de formação residual, que permaneceu após retirada a pressão.

SECÇÕES VERTICAIS	NÚMERO DO PONTO	C O O R D E N A D A S		
		X	Y	Z
1	1	30,6124	212,4571	46,4176
	2	30,4738	214,2670	53,0787
	3	30,1337	234,6376	54,1570
	4	29,8709	256,6568	54,0212
2	5	55,4169	212,6547	46,4340
	6	55,5696	214,0975	53,0727
	7	55,1577	234,3581	54,3349
	8	54,7678	255,4812	54,3723
3	9	80,3649	212,8045	46,8293
	10	80,0989	214,2740	53,3731
	11	80,0004	235,1688	54,2037
	12	80,0114	256,0763	54,0391
4	13	104,8877	212,9641	46,6882
	14	104,7650	214,6874	53,2309
5	15	129,6092	213,0903	46,6306
	16	129,5348	214,5035	53,1396
	17	129,4496	236,1017	54,5661
	18	129,6165	257,3998	54,4808
6	19	154,5660	213,2747	46,7515
	20	154,4021	214,9455	53,6973
	21	154,5771	236,1970	55,0165
	22	154,6611	256,9533	55,0109
7	23	179,6111	213,5675	47,2242
	24	179,2558	215,3988	54,0316
	25	179,7820	236,5089	54,9249
	26	180,2134	257,2062	55,0404

QUADRO 5.6 Mostra a diferença (em cm) entre as coordenadas tridimensionais da laje em repouso, e quando flexionada sob a ação de uma pressão de 50 Kg/cm^2 , aplicada na parte central.

SECÇÕES VERTICAIS	NÚMERO DO PONTO	COORDENADAS			Z (Médio)	DESVIO DA MÉDIA
		X	Y	Z		
1	1	0,0963	0,0873	1,5211	1,4940	0,019
	2	-0,0696	-0,0049	1,4788		
	3	0,0702	-0,1290	1,4806		
	4	0,0494	-0,0187	1,4956		
2	5	0,0327	-0,0202	1,7930	1,7942	0,016
	6	0,0263	-0,0602	1,7861		
	7	-0,0252	0,0328	1,7805		
	8	0,0558	-0,0285	1,8173		
3	9	0,0055	-0,0365	1,9948	1,9686	0,018
	10	-0,0149	-0,0543	1,9522		
	11	0,0286	-0,0653	1,9606		
	12	0,0530	-0,0750	1,9671		
4	13	-0,0194	-0,0582	2,0421	2,0352	0,009
	14	0,0309	0,0850	2,0283		
5	15	-0,0202	0,0256	1,8877	1,8964	0,045
	16	-0,0331	0,0462	1,9165		
	17	0,1185	-0,0149	1,8375		
	18	0,0228	-0,0327	1,9437		
6	19	-0,0688	-0,0868	1,6613	1,7083	0,031
	20	0,0580	-0,1017	1,7181		
	21	-0,0425	-0,0686	1,7248		
	22	-0,0527	-0,1322	1,7292		
7	23	-0,0175	-0,0363	1,4319	1,4159	0,020
	24	0,0377	-0,0711	1,3926		
	25	0,0301	0,0206	1,4051		
	26	0,0224	-0,0844	1,4343		

QUADRO 5.7 Mostra a diferença (em cm) entre as coordenadas tridimensionais da laje em repouso e quando flexionada sob a ação de uma pressão de 83 Kg/cm^2 , aplicada na parte central.

SECÇÕES VERTICAIS	NÚMERO DO PONTO	COORDENADAS			Z (Médio)	DESVIO DA MÉDIA
		X	Y	Z		
1	1	0,0752	0,0508	3,7284	3,7467	0,031
	2	-0,0585	-0,0056	3,7139		
	3	-0,1061	-0,0598	3,7599		
	4	-0,1400	-0,0355	3,7846		
2	5	-0,0576	-0,0513	4,3406	4,3582	0,039
	6	-0,0842	0,0279	4,3247		
	7	-0,0673	-0,0529	4,3524		
	8	0,0371	-0,0327	4,4154		
3	9	-0,0749	-0,0741	4,7367	4,7634	0,053
	10	-0,0117	-0,0739	4,7019		
	11	-0,0503	-0,0545	4,8089		
	12	-0,0221	-0,0555	4,8062		
4	13	-0,0663	0,0020	4,9056	4,9056	0,000
	14	0,0484	0,0815	4,9057		
5	15	-0,0400	-0,0471	4,7172	4,6944	0,043
	16	0,0295	0,0546	4,6971		
	17	-0,0254	-0,0611	4,6326		
	18	0,0103	-0,0112	4,7307		
6	19	-0,0500	0,0742	4,2125	4,2358	0,031
	20	-0,0274	0,0214	4,2776		
	21	0,0183	-0,0676	4,2415		
	22	0,0805	-0,0536	4,2119		
7	23	0,1170	-0,0327	3,5846	3,5855	0,013
	24	0,0646	-0,0196	3,5772		
	25	0,0729	0,0297	3,5766		
	26	0,0251	-0,0632	3,6043		

QUADRO 5.8 Mostra a diferença (em cm) entre as coordenadas tridimensionais da laje em repouso, e quando flexionada sob o efeito da deformação residual, que permaneceu após retirada da pressão.

SECÇÕES VERTICAIS	NÚMERO DO PONTO	COORDENADAS			Z (Médio)	DESVIO DA MÉDIA
		X	Y	Z		
1	1	0,0525	0,0268	0,4193	0,4040	0,012
	2	0,0265	0,0113	0,3982		
	3	0,0496	-0,0019	0,3912		
	4	0,0283	0,0506	0,4074		
2	5	-0,0103	-0,1161	0,4049	0,4395	0,037
	6	-0,0560	-0,1306	0,4153		
	7	0,0086	-0,0844	0,4499		
	8	0,0072	-0,0658	0,4881		
3	9	-0,0155	-0,0902	0,5016	0,5011	0,021
	10	-0,0186	0,0388	0,4828		
	11	-0,0131	0,0373	0,4895		
	12	-0,0021	0,0448	0,5305		
4	13	-0,0586	-0,0463	0,4960	0,5085	0,017
	14	-0,0802	-0,0955	0,5210		
5	15	-0,0829	0,0546	0,4595	0,4697	0,037
	16	-0,0724	0,0799	0,4586		
	17	-0,1121	0,0612	0,4377		
	18	-0,0553	-0,0044	0,5233		
6	19	-0,1587	0,0380	0,4398	0,4492	0,016
	20	-0,0405	0,0811	0,4308		
	21	-0,0364	0,0239	0,4650		
	22	-0,0293	0,0644	0,4612		
7	23	-0,0119	0,0402	0,3882	0,4238	0,027
	24	0,0152	0,0285	0,4177		
	25	0,0222	0,0412	0,4469		
	26	0,0544	0,0397	0,4427		

QUADRO 5.9 Comparação entre os deslocamentos (em cm) medidos por fotogrametria e com defletômetros mecânicos.

FASES	M E T O D O S			DIFERENÇAS
	MECÂNICO	FOTOGRAFÉTICO (VALOR MÉDIO)	DESVIO DA MÉDIA	M — F
1a. F L E X Ã O	1,800	1,7942	0,016	0,0058
	2,045	1,9686	0,018	0,0764
	1,975	1,8964	0,045	0,0786
	1,780	1,7083	0,031	0,0717
	1,525	1,4159	0,020	0,1091
2a. F L E X Ã O	4,370	4,3582	0,039	0,0118
	4,740	4,7634	0,053	-0,0234
	4,610	4,6944	0,043	-0,0844
	4,170	4,2358	0,031	-0,0658
	3,565	3,5855	0,013	-0,0205
D E F O R M A Ç Ã O	0,450	0,4395	0,037	0,0105
	0,505	0,5011	0,021	0,0039
	0,515	0,4697	0,037	0,0453
	0,480	0,4492	0,016	0,0308
	0,430	0,4238	0,027	0,0062

QUADRO 5.10- VALORES AJUSTADOS DOS PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO DA CÂMARA EM QUATRO TRIÂNGULAÇÕES

P A R Â M E T R O S	VALORES INICIAIS		VALORES AJUSTADOS							
			TRIANGULAÇÕES							
			LAJE SEM CARGA		PRIMEIRA FLEXÃO		SEGUNDA FLEXÃO		DEFORMAÇÃO	
	PARÂMETROS	VARIÂNCIA	PARÂMETROS	DESVIO PADRÃO	PARÂMETROS	DESVIO PADRÃO	PARÂMETROS	DESVIO PADRÃO	PARÂMETROS	DESVIO PADRÃO
f	50,8	10^{-2}	50,8375	0,098	50,8263	0,098	50,8871	0,097	50,7686	0,098
X ₀	0,0	10^{-2}	-0,1215	0,072	- 0,1253	0,065	- 0,2186	0,078	- 0,0835	0,073
Y ₀	0,0	10^{-2}	-0,0173	0,090	- 0,0943	0,088	- 0,0145	0,085	- 0,1226	0,092
K ₁	0,0	10^{-5}	$-0,041 \cdot 10^{-4}$	$6,63 \cdot 10^{-6}$	$- 0,22 \cdot 10^{-4}$	$2,79 \cdot 10^{-5}$	$- 0,22 \cdot 10^{-4}$	$6,26 \cdot 10^{-6}$	$- 0,16 \cdot 10^{-4}$	$7,96 \cdot 10^{-6}$
K ₂	0,0	10^{-5}	$0,31 \cdot 10^{-7}$	$2,72 \cdot 10^{-8}$	$- 0,56 \cdot 10^{-7}$	$3,31 \cdot 10^{-8}$	$- 0,49 \cdot 10^{-7}$	$2,85 \cdot 10^{-8}$	$- 0,47 \cdot 10^{-7}$	$3,30 \cdot 10^{-8}$
K ₃	0,0	10^{-5}	$-0,70 \cdot 10^{-11}$	$2,75 \cdot 10^{-11}$	$0,90 \cdot 10^{-10}$	$3,57 \cdot 10^{-11}$	$0,79 \cdot 10^{-10}$	$3,59 \cdot 10^{-11}$	$0,74 \cdot 10^{-10}$	$3,56 \cdot 10^{-11}$
P ₁	0,0	10^{-5}	$0,75 \cdot 10^{-5}$	$1,45 \cdot 10^{-5}$	$0,26 \cdot 10^{-4}$	$9,36 \cdot 10^{-6}$	$- 0,44 \cdot 10^{-4}$	$1,51 \cdot 10^{-5}$	$0,65 \cdot 10^{-5}$	$1,02 \cdot 10^{-5}$
P ₂	0,0	10^{-5}	$0,62 \cdot 10^{-4}$	$1,11 \cdot 10^{-5}$	$0,22 \cdot 10^{-4}$	$9,73 \cdot 10^{-6}$	$0,54 \cdot 10^{-4}$	$1,19 \cdot 10^{-5}$	$0,35 \cdot 10^{-4}$	$1,53 \cdot 10^{-5}$

CAPÍTULO SEXTO

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONCLUSÃO

O emprego do método fotogramétrico para monitorar deslocamentos, quando se utiliza uma câmara não métrica, de baixo preço e fácil aquisição, associada a uma calibração simultânea, apresenta bons resultados ao nível do milímetro e é notável a facilidade oferecida no sentido de aumentar o número de pontos monitorados, sem um acréscimo significativo nos custos.

6.2 RECOMENDAÇÕES

1) O emprego de câmaras não métricas para levantamentos de precisão quando se faz uso de uma metodologia que permita a calibração simultânea, "on job calibration".

2) Para a sinalização de pontos é aconselhável o uso de circunferências concêntricas e, caso ocorra uma grande variação na escala das fotos, as maiores deverão possuir um traçado dimensionado mais largo.

3) Para trabalho de fotogrametria à curta distância recomenda-se a utilização do método das câmaras convergentes, com estação fixa e o apoio através de distâncias conhecidas no espaço-objeto.

4) Quando se utiliza câmaras não métricas, uma modificação no seu interior torna-se necessária, com o propósito de determinar a posição correta da imagem nos negativos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, J.B. de (1977) Photogrammetric refraction. The Ohio State University, 117 p.
- ANDRADE, J.B. de & OLIVAS, M.A. de A. (1981) Calibração de câmaras aerofotogramétricas. Boletim Universidade Federal do Paraná, Geodésia nº 26, 39 p.
- ANDRADE, J.B. de, BAHR, H.P. & OLIVAS, M.A. de A. (1982) Calibration and resolution test of Rollei-SLX reseau camera. Congresso de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, Camberra, Austrália.
- ANDRADE, J.B. de (1984) Comunicação pessoal.
- BARBALATA, I.C. (1980) Analytical photogrammetric method used in resistance structure deformations applied on seismic stress. In: International Archives of Photogrammetry, XIVth Congress, Hamburg, V. XXIII, pt. B5, p. 041-050.
- BRANDENBERGER, A.J. (1974) Deformation measurements of power dams. Photogrammetry Engineering, 40(9): 1051-58.
- BROWN, D.C. (1966) Decentering distortion of lenses. Photogrammetric Engineering, 32(3):444-62.
- CHRISTENSEN, J.R. (1980) Observations of displacements of a bridge loaded to failure, using analytical photogrammetry. In: International Archives of Photogrammetry, XIVth Congress, Hamburg, V. XXIII, pt. B5, p. 129-36.
- COOPER, M.A.R., SHORTIS, M.R. (1980) Analytical photogrammetry applied to the measurement of large structures. In: International Archives of Photogrammetry, XIVth Congress, Hamburg, V. XXIII, pt. B5, p. 137-48.
- DOWMAN, I.J., SCOTT, P.J. (1980) Photogrammetry theorys techniques and problems. In: ATKINSON, K.B. Developments in close range photogrammetry. London, Applied Science.
- ERLANSON, J.P. (1975) Monitoring deformations of structures. Photogrammetric Engineering, 41(11):1375-1384.
- FAIG, I.W. (1976) Photogrammetric potentials of non-metric cameras. Photogrammetric Engineering, 42(1):47-49.
- GEMAEL, C. (1974) Aplicação do cálculo matricial em geodésia ; ajustamento das observações. Curitiba, Universidade Federal

- do Paraná - Curso de Pós-Gradua o em Ciências Geodésicas ,
92 p.
- GEMAEL, C. (1981) Referenciais cartesianos utilizados em geodésia. Curitiba, Universidade Federal do Paraná - Curso de Pós-Gradua o em Ciências Geodésicas, 68 p.
- GOMES, F.P. (1973) Estatística Experimental, Picacicaba, 430 p.
- HOBBIE, I.D. (1977) C-100 Planicomp, the analytical stereoplating system from Carl Zeiss. Photogrammetric Engineering, 43 (11):1377-90.
- KARARA, H.M. (1974) Accuracy aspects of non-metric imageries. Photogrammetric Engineering, 40(9):1107-17.
- KARARA, H.M. (1978) Handbook of non-topographic photogrammetry. S.A. American Society of Photogrammetry.
- KARARA, H.M. (1980) Non-topographic photogrammetry. In: American Society of Photogrammetry. Manual of Photogrammetry. 4. ed., Falls Church, V.
- KENEFICH, J.F., GYER, M.S., HARP, B.F. (1972) Analytical self-calibration. Photogrammetric Engineering, 38(11):1117-26.
- KIRCHNER, F.F. (1984) Comunica o pessoal.
- LUGNANI, J.B. (1984) Comunica o pessoal.
- MARQUES, J.M. (1982) Análise de Variância. Curitiba. Universidade Federal do Parana - Curso de Pos-Gradua o em Ciências Geodésicas. Seminário, 22p.
- MERCHANT, D.C. (1979) Analytical photogrammetry: teory and practice. 2. ed., S.I., The Ohio University.
- OLIVAS, M.A. de A. (1980) Calibra o de câmaras fotogramétricas. Aplica o dos métodos: câmaras convergentes e campos mistos. Curitiba, Curso de Pós-Gradua o em Ciências Geodésicas, 98 p.
- SANTOS, M.L.F. (1984) Modelo analítico para análise de placas alveolares pré-moldadas de concreto protendido. Rio de Janeiro, Pontifícia Universidade Católica, 170 p.
- SILVA, J.F.C. da (1983) Verifica o de modelos hidráulicos. Curitiba, Curso de Pós-Gradua o em Ciências Geodésicas, 136 p.
- SILVA, A.S. (1983a) Controle de estruturas de engenharia pelo método fotogramétrico. Curitiba, Curso de Pós-Gradua o em Ciências Geodésicas, 90 p.
- SZCZECHOWSKI, B. (1980) The photogrammetric measurements of the ship deformations. In: International Archives of Photogrammetry, XIVth Congress, Hamburg, V. XXIII, pt. B5, p. 714-23.
- TORLEGARD, A.K.I. (1980) An introduction to close range photo-

- grammetry. In: ATKINSON, K.B. Developments in close range photogrammetry. London, Applied Science.
- VIEIRA, A.J.B. (1984) Compilação planimétrica de originais (1:100.000) com desenho automático, por meio do Planicomp C-100 e a partir de imagens digitais de LANDSAT. Curitiba, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 82 p.
- WOLF, P.R. (1974) Elements of photogrammetry. Tokyo, McGraw-Hill Kogakusha, 562 p.