

Introdução á Teoria das Orientações em Fotogrametria

AMANDIO LUÍS DE ALMEIDA TEIXEIRA

1. INTRODUÇÃO

Em fotogrametria a fotografia por si mesmo não é o elemento principal de trabalho, mas sim os raios luminosos que refletidos pelos objetos viajam pelo espaço e, depois de passar pelo ponto nodal das lentes, são registrados no filme fotográfico.

Através do uso de instrumentos chamados de estereo-restituidores ou somente restituidores, é possível reproduzir ou reconstruir os feixes de raios luminosos na forma exata em que estes se comportavam no momento da tomada da foto.

Estes instrumentos possuem basicamente dois projetores onde os negativos de duas fotos são inseridas reconstituindo os feixes luminosos correspondentes.

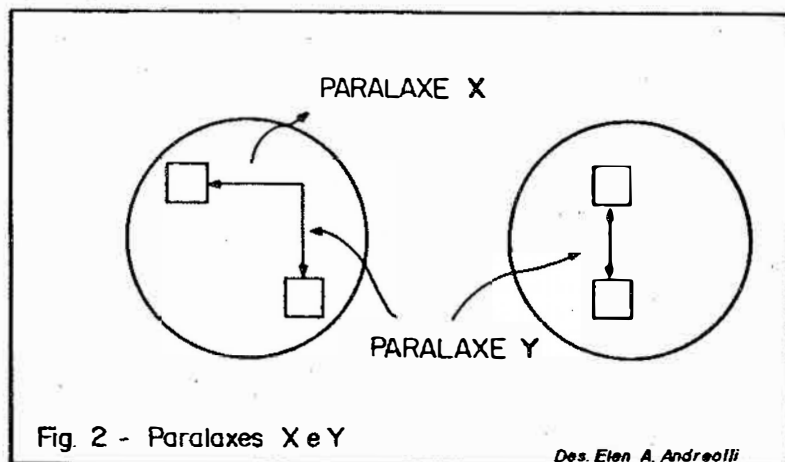
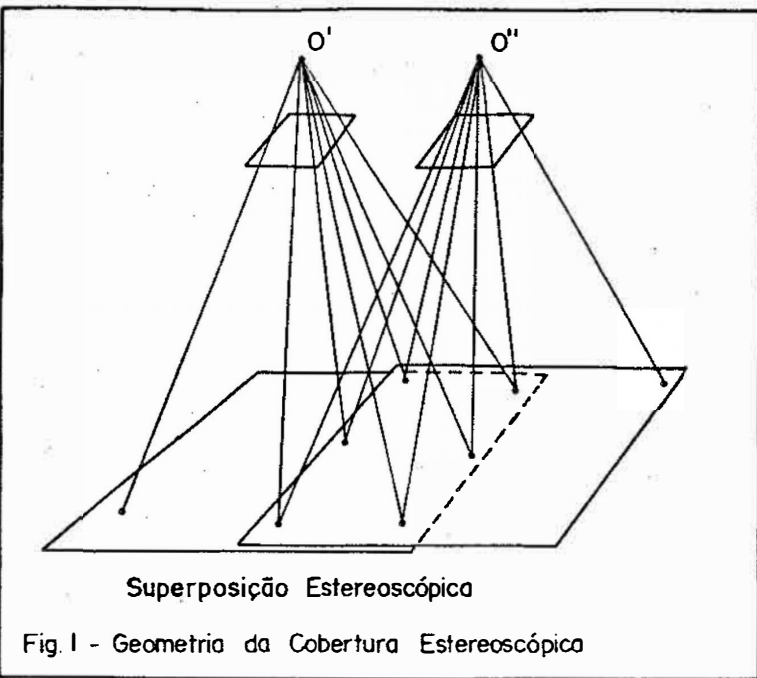
2. ORIENTAÇÃO INTERNA

Ao processo de reconstrução da geometria interna (figura 1) dos feixes de raios luminosos em cada projetor, dá-se o nome de orientação interior. A orientação interior está diretamente ligada à geometria perspectiva da câmara fotográfica, sendo definida pelos seguintes parâmetros:

- distância focal calibrada;
- posição do ponto principal no plano da imagem;
- as distorções geométricas características do sistema de lentes usado.

Para reproduzir a posição em que o filme estava dentro da câmara, a fotografia (negativo ou diapositivo) deve ser colocada no projetor de tal maneira que o centro de perspectiva esteja perpendicularmente sob o ponto principal, a uma distância igual àquela que existia durante a exposição: a distância principal "e". Para que isto possa ser feito usam-se as marcas fiduciais que permitem reproduzir o ponto principal e, no restituidor, ajusta-se a distância principal.

* Departamento de Cartografia e Análise da Informação Geográfica — IGCE — UNESP — RIO CLARO - SP.



3. ORIENTAÇÃO RELATIVA

Após a execução da orientação interior procede-se à orientação relativa. Este procedimento visa a reprodução da posição relativa que os feixes de raios luminosos de cada foto tinham entre si durante os instantes de tomadas das fotos. O critério para execução da orientação relativa, baseia-se no fato de que os feixes de raios homólogos (correspondentes) se intersectam. (Figura 1).

Para melhor explicar o processo de orientação relativa, considere-se um instrumento ótico simples (tipo Kelsh, Multiplex, ...); projetando-se os dois feixes de raios (duas fotos) sobre a mesa, vê-se por exemplo uma mesma casa duas vezes (duas imagens).

Este fato deve-se à presença de paralaxes x e y (Figura 2) o que, em outras palavras, significa dizer que os feixes de raios homólogos não se intersectam. Para conseguir-se a interseção deve-se eliminar as paralaxes, através de procedimentos próprios, que serão vistos mais adiante. Matematicamente pode-se provar que se 5 pares de raios homólogos dos dois feixes intersectarem entre si e se a orientação interior estiver correta, todos os outros raios de um feixe intersectarão os seus homólogos.

A paralaxe x pode ser eliminada variando-se a altura da mesa, através do movimento de um dos projetores. A orientação relativa pode ser obtida eliminando-se, simultaneamente, a paralaxe y em 5 pontos sobre a área de superposição das duas fotos.

3.1 Elementos da Orientação Relativa

Tomemos agora um sistema tridimensional de coordenadas (x, y, z) . Considerando tal sistema, uma pergunta faz-se revelante: Quantos movimentos pode uma câmara realizar com relação aos 3 eixos? Chega-se à conclusão de que são 6 os movimentos possíveis: Três de translação ao longo dos eixos x, y, z chamados b_x, b_y, b_z e três de rotação, ao redor dos eixos x, y e z , chamados ω (omega), ϕ (phi) e k (kappa) respectivamente. As pequenas variações deste movimentos dá-se o nome: $\Delta b_x, \Delta b_y, \Delta b_z, \Delta \omega, \Delta \phi$ e Δk respectivamente, (figura 3).

3.2 Que Pontos Usar

Como a orientação relativa consiste em se eliminar paralaxes y torna-se claro que um destes elementos deve ser usado para remover a paralaxe em um dado ponto. Como já comentado, precisa-se eliminar a paralaxe em 5 pontos para garantir a interseção de todos os raios homólogos. Na prática um sexto ponto é usado para checar o resultado. Estes 6 pontos, conhecidos como "Pontos de Gruber", estão distribuídos de maneira uniforme sobre a área de superposição. A numeração destes pontos é universalmente usada conforme mostra a figura 4. Observe-se que embora a palavra "ponto" seja usada, melhor seria referir-se a regiões, com diâmetros aproximados de 20 mm, onde se localizam tais pontos. Assim, 1 seria um ponto ao redor do ponto principal da foto da esquerda, 2 um ponto ao redor do ponto principal da foto da direita e assim por diante.

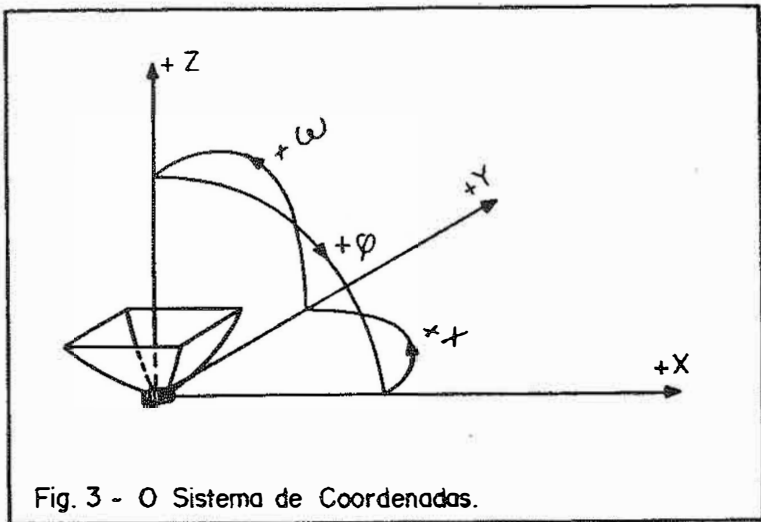


Fig. 3 - O Sistema de Coordenadas.

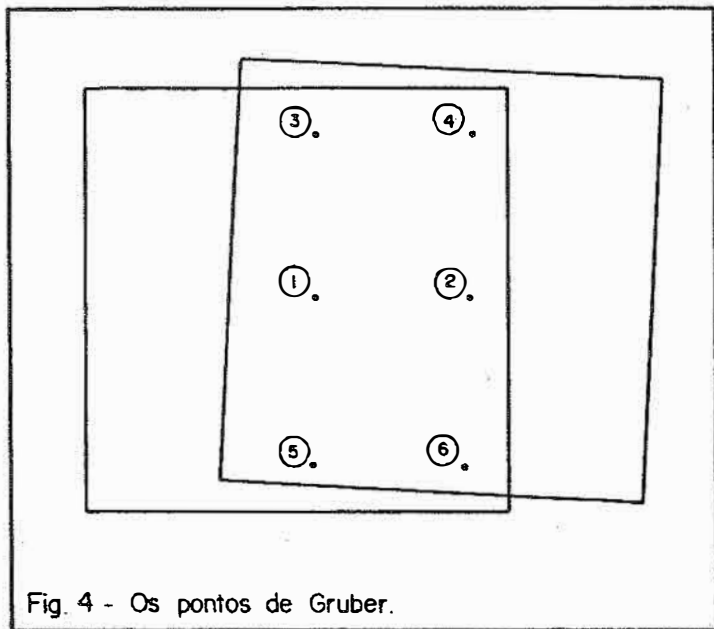


Fig. 4 - Os pontos de Gruber.

3.3 Que Elementos Usar

Frisando-se uma vez mais que a orientação relativa consiste em se eliminar paralaxes y, torna-se claro que para remover a paralaxe em um determinado ponto (1, 2, 3, 4, 5 e 6), deve-se usar aquele elemento que tenham maior influência no referido ponto.

Na figura 5 estão indicados os efeitos dos elementos de orientação (ω , ϕ , κ , b_x , b_y e b_z), sobre as paralaxes x e y presentes em uma foto. Observando-se a mesma figura, pode-se ainda notar que para os 6 pontos, as paralaxes y podem ser eliminadas da seguinte maneira:

Pontos	→ Elementos
1	→ b_y' , b_y'' ou κ''
2	→ b_y' , b_y'' ou κ''
3 e 5	→ b_y' , b_y'' , b_z' , b_z'' , ω' , ω'' ou ϕ''
4 e 6	→ b_y' , b_y'' , b_z' , b_z'' , ω' , ω'' ou ϕ'

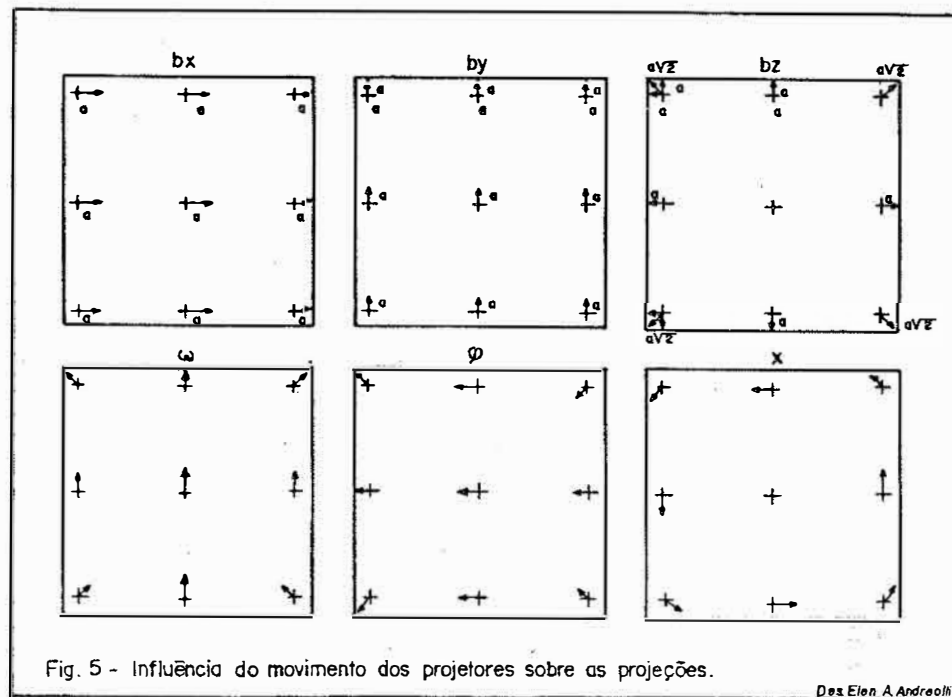


Fig. 5 - Influência do movimento dos projetores sobre as projeções.

Des. Elen A. Andreati

FIGURA 5

Convencionou-se diferenciar os elementos do projetor esquerdo e os elementos do projetor direito com (') e (") respectivamente.

3.4 Combinando os Elementos de Orientação

São 6 os elementos por projetor, totalizando 12 elementos passíveis de uso. Uma vez que bx' e bx'' não tem influência na paralaxe y eles não são usados. Como os efeitos de by' e by'' , bz' e bz'' , ω' e ω'' são iguais apenas um deles é utilizado. Restam então, para a orientação relativa, 7 elementos.

by' ou by'' — 1
 bz' ou bz'' — 1
 ω' ou ω'' — 1
 k' e k'' — 2

e

ϕ' e ϕ'' — 2
TOTAL = 7

Na prática utilizam-se apenas 5 elementos.

De maneira empírica podemos demonstrar que isto é possível da seguinte maneira: Se um projetor for mantido fixo, deve ser possível orientar o segundo projetor com relação a este. Para um projetor temos 6 elementos. Como bx não tem influência sobre a paralaxe y sobram 5 elementos para a orientação, como se queria demonstrar.

Muitas combinações destes 5 elementos podem ser produzidas. As duas mais comuns são:

- a) k' , k'' , ϕ' , ϕ'' e ω' ou ω''
 b) k' , by' , bz' , ϕ' e ω'
 ou
 k'' , by'' , bz'' , ϕ'' e ω''

Em a) utilizaram-se apenas rotações;

Em b) utilizou-se apenas um projetor.

O exemplo a seguir mostra o procedimento de uma orientação relativa usando o caso a.

Exemplo:

- Passo 1 — Elimina-se a paralaxe em 1 com k''
 Passo 2 — Elimina-se a paralaxe em 2 com k'
 Passo 3 — Igualar-se a paralaxe de 3 e 5 com ϕ''
 Passo 4 — Igualar-se a paralaxe de 3 à de 1 com ω' ou ω''
 Passo 5 — Repete-se o processo até 1, 2, 3, 5 estarem livres de paralaxe
 Passo 6 — Elimina-se a paralaxe em 4 com ϕ'
 Passo 7 — Checa-se o ponto 6

Deve-se notar que no passo 4 as paralaxes em 3 e 5 não são visíveis ao mesmo tempo, o que torna este processo algo trabalhoso. Para possibilitar a eliminação de paralaxe em cada ponto sem a necessidade de igualá-lo em dois pontos, usa-se um fator de correção no passo 4, ficando o processo desta forma:

Passo 3 — Elimina-se a paralaxe em 3 com ϕ'' .

Passo 4 — Elimina-se a paralaxe em 5 com ω' ou ω'' e aplica-se a sobre-correção usando-se a fórmula.

$$\frac{1}{2} \frac{Z^2}{D^2} (-1) \quad \text{onde:}$$

$Z \rightarrow$ a altura do centro de perspectiva sobre a mesa traçadora

$D \rightarrow$ distância do ponto 1 ao ponto 5 na projeção

Passo 5 — Repete-se o processo até que 1, 2, 3 e 5 estejam livres de paralaxe.

Passo 6 — Elimina-se a paralaxe em 4 com ϕ' .

Passo 7 — Checa-se o ponto 6.

Note-se que o procedimento continua o mesmo se, ao invés de usar a seção transversal da esquerda usar-se a da direita (2, 4, 6) checando em 5.

3.5 Casos Particulares

O exposto no item anterior refere-se aos casos genéricos em que o terreno é plano. Nos casos de terreno montanhoso o cálculo de ω obedece a fórmulas específicas que não serão tratadas neste trabalho. Nestes casos, artifícios como o "Círculo de Kasper" e o método de interpolação devem ser usados.

4. ORIENTAÇÃO ABSOLUTA

O modelo obtido após completada a orientação relativa, ainda não tem sua posição absoluta relativa à vertical definida, nem sua escala estabelecida. Para nivelar e colocar o modelo em escala necessita-se de pontos de controle no terreno. Se as coordenadas x e y e a altura de alguns pontos visíveis no modelo forem conhecidas, pode-se então proceder à orientação absoluta. Para explicar o processo da orientação absoluta tomar-se-á um exemplo.

Na figura 6 vemos, à esquerda, os pontos de controle A e B como aparecem no modelo após orientados relativamente e, os mesmos pontos, à direita, marcados sobre a folha em que será plotado o mapa. A única forma de se mudar a escala do modelo é mudando-se o valor da base do instrumento (bx). Para colocar-se o modelo em escala necessita-se de dois pontos de controle, posicionados o mais afastados possível, como é o caso dos pontos A e B. Faz-se correr a folha até que o ponto A coincida com A' no modelo. Fixando-se A, gira-se a folha até que os alinhamentos AB e A'B' sejam coincidentes. A situação obtida é apresentada na figura 7.

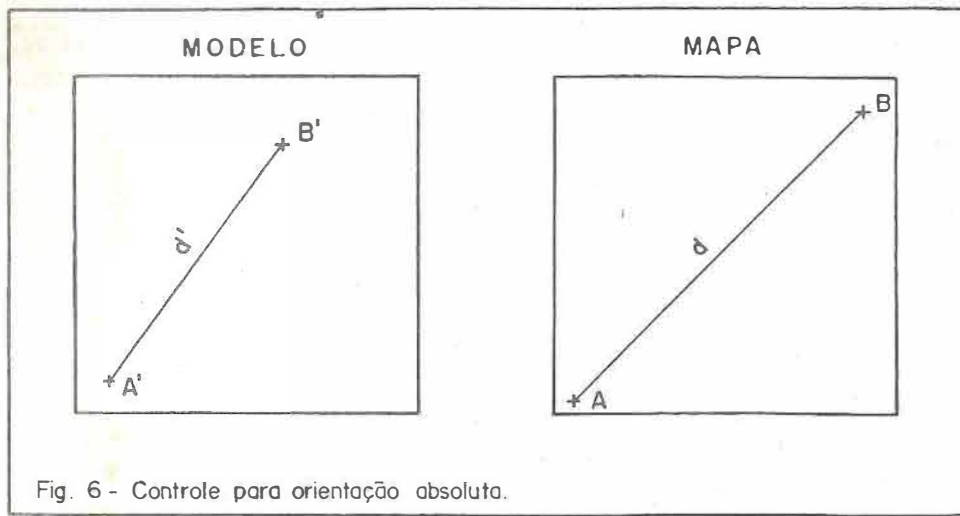


Fig. 6 - Controle para orientação absoluta.

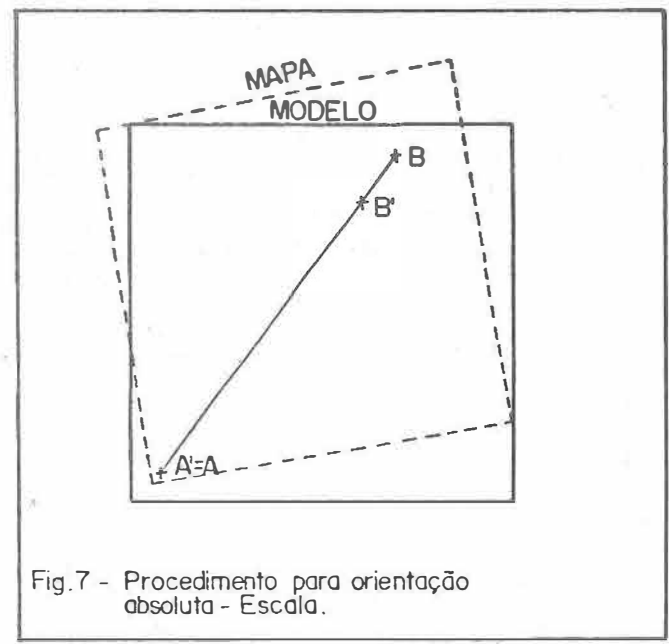


Fig.7 - Procedimento para orientação absoluta - Escala.

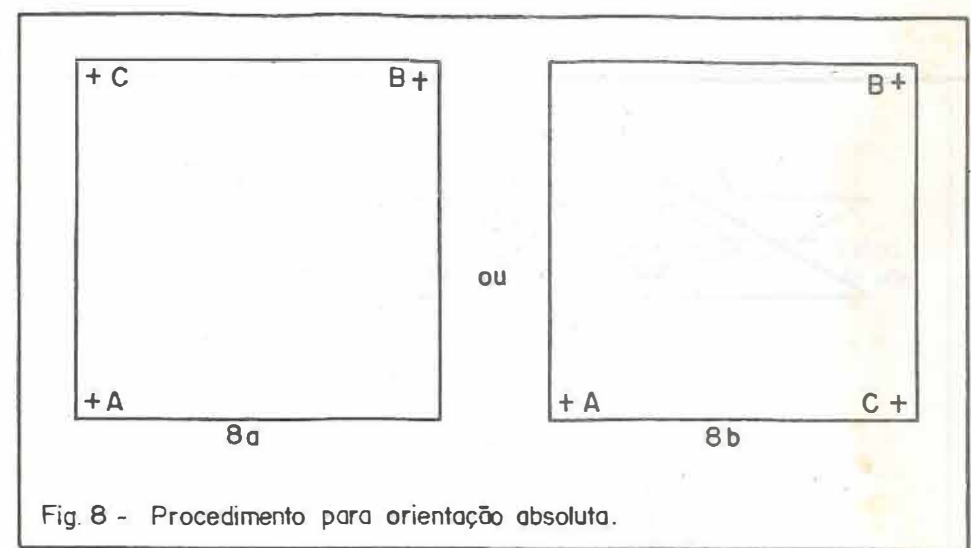


Fig. 8 - Procedimento para orientação absoluta.

FIGURA 8

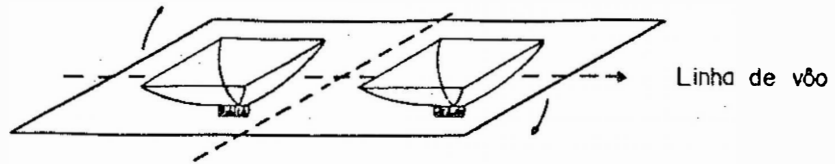
Como pode ser visto na figura 7, d e d' não são iguais. Para obter-se a escala correta, usa-se a fórmula:

$$\frac{bx}{bx'} = \frac{d'}{d} \quad \text{onde } bx' \text{ é o novo valor da base a ser introduzido no instrumento.}$$

Isto feito, deve-se agora nivelar o modelo, sendo para isto necessários 3 pontos de controle. Como já se dispõe dos pontos A e B, toma-se agora um terceiro ponto C, situado preferivelmente como mostra a figura 8.

Calcula-se as diferenças de nível entre os pontos A e C e B e C. Tomando a figura 8b como exemplo, o procedimento é o seguinte: Para nivelar as alturas entre A e C deve-se girar os dois projetores igualmente sobre o eixo perpendicular à linha de vôo (Figura 9). Esta rotação é conhecida por "common phi" (Φ) representada pela letra grega phi maiúscula. Para se obter o nivelamento entre B e C giram-se os projetores ao redor do eixo paralelo à linha de vôo, rotação esta conhecida como "common omega" (Ω), representada pela letra grega ômega maiúscula (Figura 10).

Na prática, nivelamento e escala são feitos em um processo interativo, devendo-se repetir este processo até que a precisão desejada seja alcançada. Um quarto ponto deve ser usado para cheque. A figura 11 mostra o modelo orientado e sua projeção ortogonal sobre o mapa.



APÓS Φ

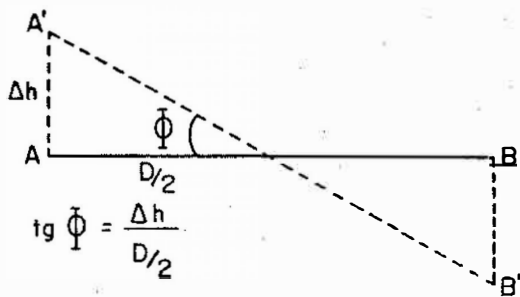
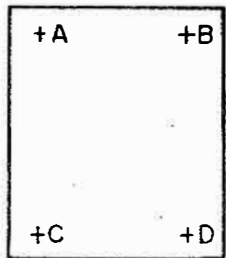
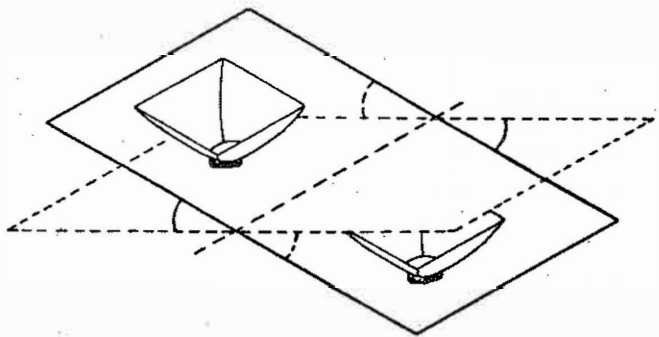
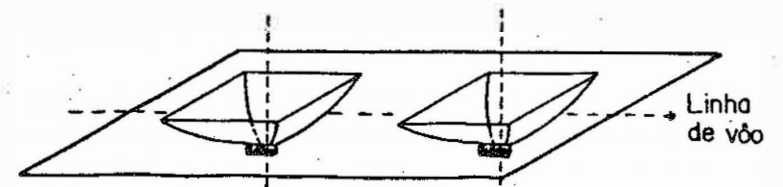


Fig. 9 - Correção de Φ .



USANDO Ω

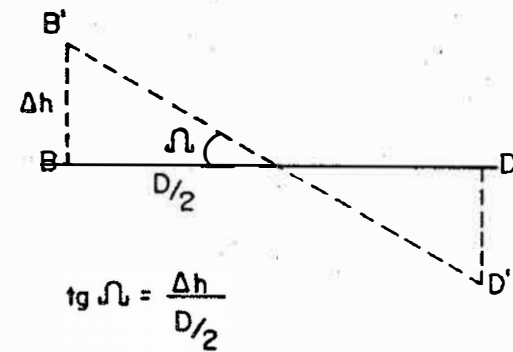
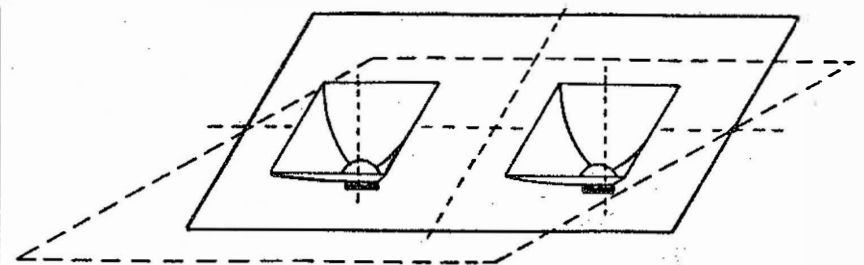
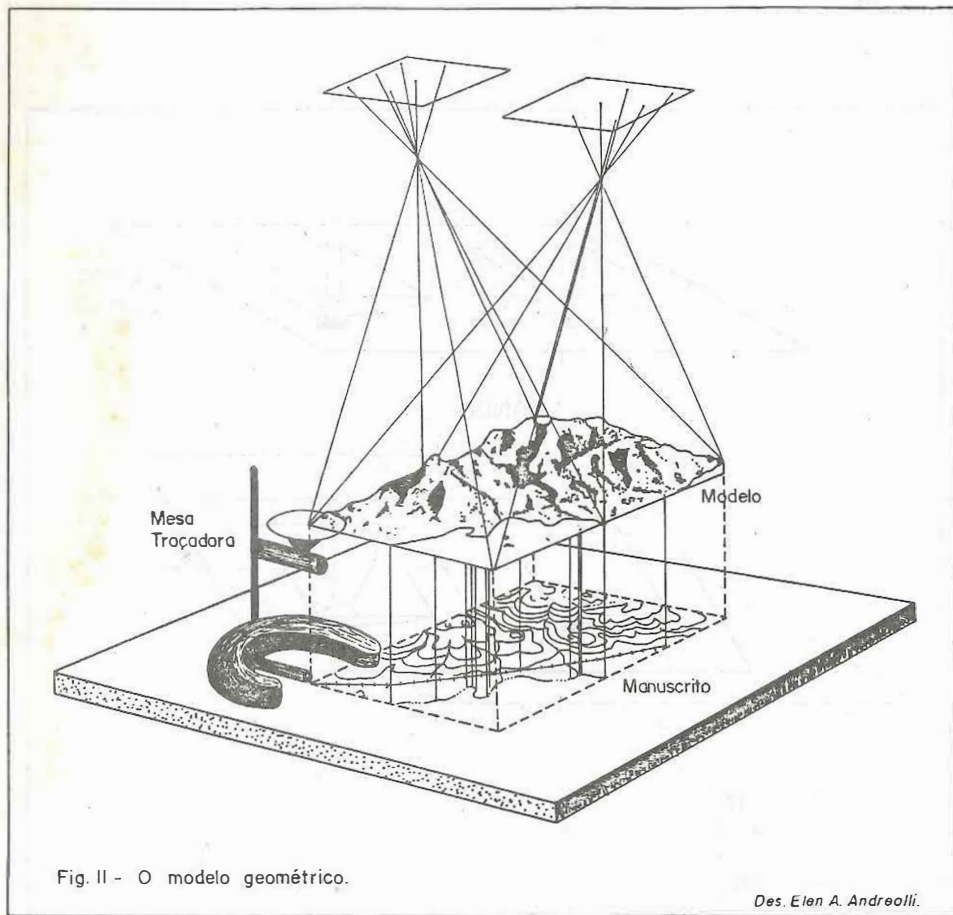


Fig. 10 - Correção de Ω .



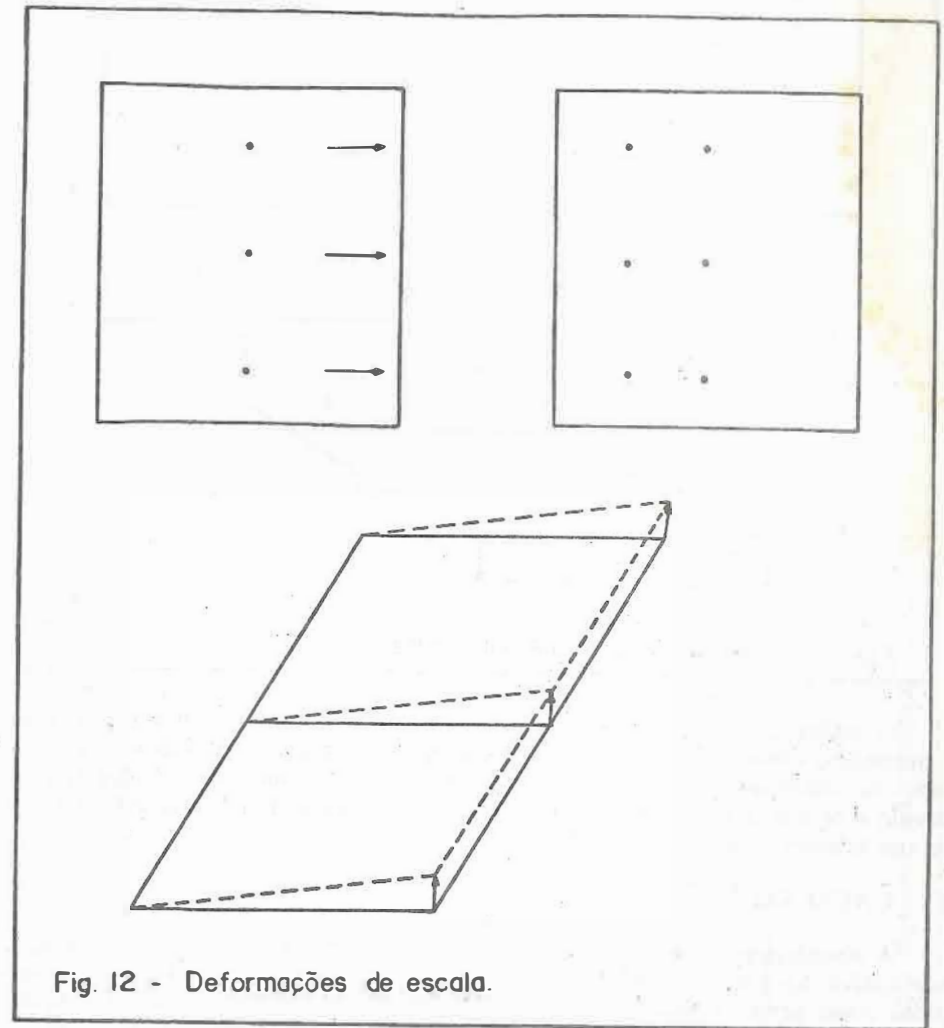
4.1. Deformações do Modelo

Ao se fazer a orientação relativa deve-se ter em conta que o resultado obtido nunca é perfeito. Assim, os elementos de orientação não estarão ajustados em seu valor correto. Considerando que os elementos tem um componente de paralaxe x e outro de paralaxe y , conclui-se que haverá paralaxe x presente no modelo, o que implica em que apesar desta paralaxe ser eliminada com a variação da altura no instrumento, o modelo apresenta deformação, sendo portanto incorretas as alturas lidas. A compreensão deste fato torna-se ainda mais importante quando se pensa em observações feitas com a barra de paralaxe, onde apenas os elementos b_y e k podem ser corrigidos.

Mostrar-se-á a seguir algumas das deformações causadas pelos elementos de orientação.

a) diferença de escala — Deformação causada por b_z nas alturas a serem medidas no modelo, considerando-se apenas o componente x . O modelo apresenta uma falsa inclinação na direção x (figura 12). Note-se que essa deformação pode ser eliminada com o common ϕ (Φ);

b) rotação de uma das fotografias — erro causado por k . O modelo apresenta uma falsa inclinação na direção y . Note-se que essa deformação pode ser eliminada com "common ômega" (Ω) figura 13).



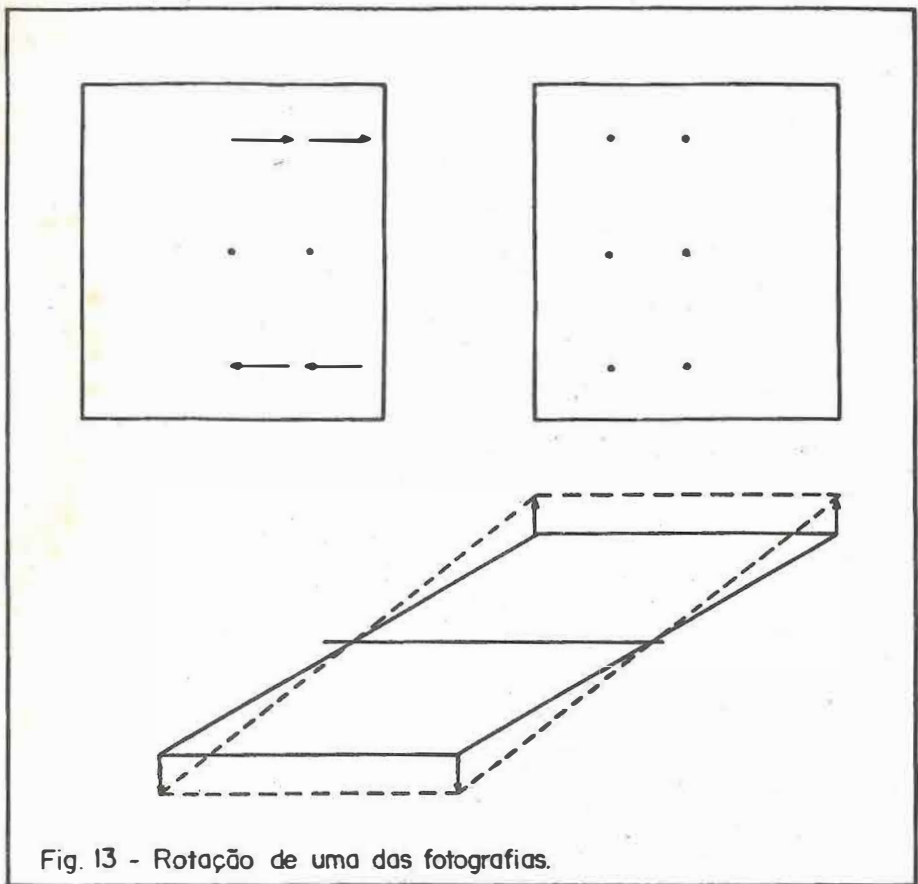


Fig. 13 - Rotação de uma das fotografias.

c) inclinação de uma das fotografias — causada por erro em ϕ ou ω . Aqui é necessário observar que estas são deformações reais e não podem ser compensadas na orientação absoluta como é o caso das duas anteriores. A deformação devido a ω tem a forma de uma parábola hiperbólica e aquela causada por ϕ a de um cilindro parabólico (figura 14).

5. CONCLUSÃO

A abordagem dada as orientações neste trabalho tem um caráter prático e explicativo dos processos de execução. Limitou-se a discussão aqueles casos entendidos como gerais. Casos particulares não foram tratados, bem como não houve preocupação com a derivação matemática das fórmulas, ou dos processos numéricos de cálculo. Se o leitor desejar aprofundar-se mais na teoria das orientações, deverá buscar literatura técnica mais especializada, podendo tomar como referência, algumas das obras citadas na bibliografia deste trabalho.

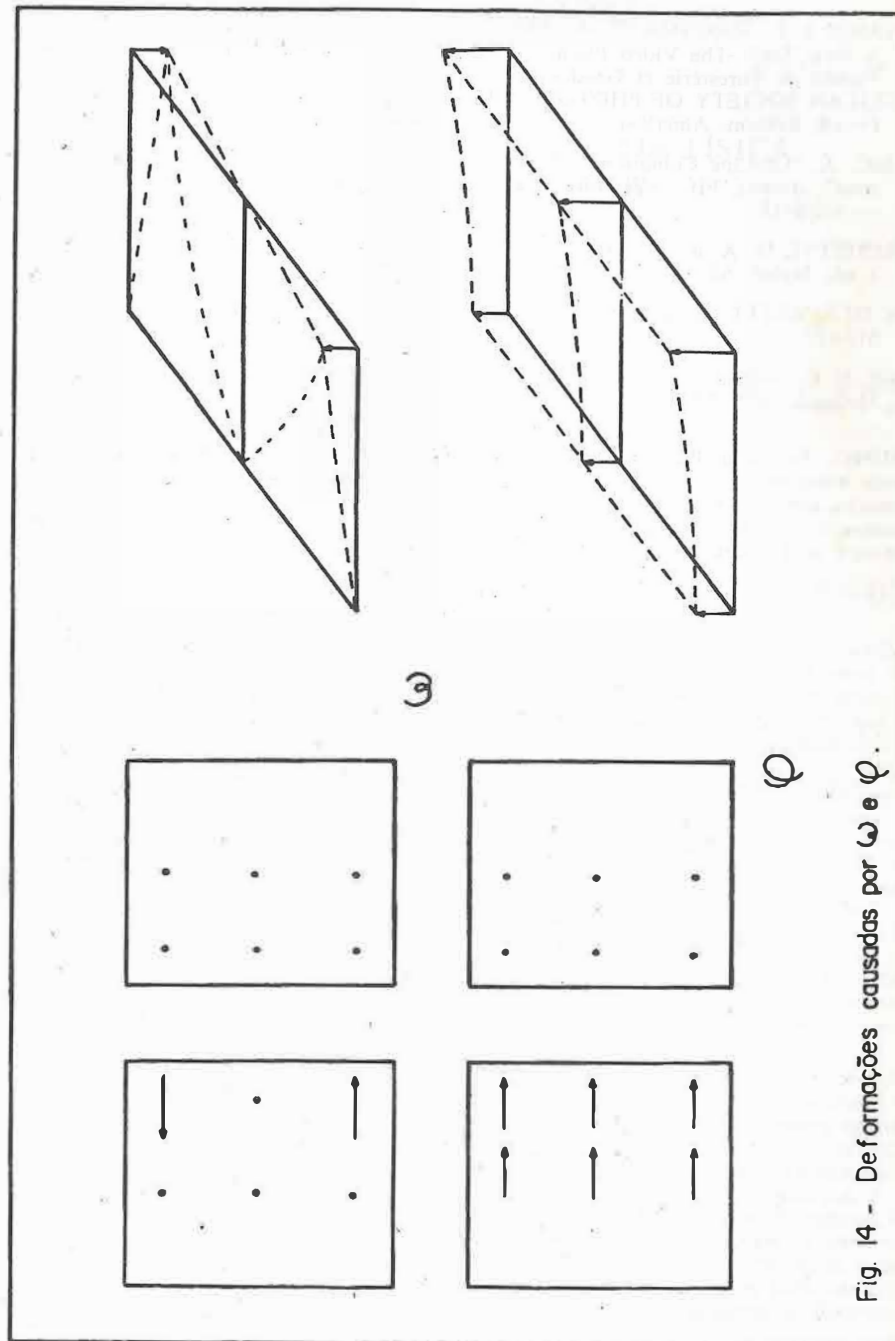


Fig. 14 - Deformações causadas por ω e ϕ .

- AGNARD, J. P., GAGNON, P. A.; NOLETTE, C. "Microcomputers and Photogrammetry. A New Tool: The Video Plotter", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Faculté de Foresterie et Geodesie, Laval University, Québec, Canada, 1988, 1165 p.
- AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY. "Manual of Photogrammetry", *Manual*, Fourth Edition. American Society of Photogrammetry, 1980, 1056 p.
- JAKSIC, A. "On-Line Computational Photogrammetry in Geocoded Land Information Systems", *Annals*, FIG XVI, International Congress, Montreux, Switzerland, 1981:510.6/1 — 510.6/13.
- MARCHETTI, D. A. B.; GARCIA, G. J. *Princípios de Fotogrametria e Fotointerpretação*, 1 ed., Nobel, São Paulo, 1986, 247 p.
- VAN DER WEELE, A. J. "Photogrammetry for Cadastral Surveys". *ITC Journal*, 5, 1947: 617-627.
- ZORN, H. C. "Introductory Course in Photogrammetry", *ITC Lecture Notes*, ITC, Enschede, Holland, 1981:101 p.

RESUMO: Este trabalho trata do processo de orientação dos pares aerofotogramétricos, visando a restituição cartográfica. Procura apresentar de maneira simplificada as etapas da orientação interior, relativa e absoluta, analisando a técnica e os erros presentes. Também apresenta alguns procedimentos básicos para a execução da orientação, baseados na prática deste tipo de trabalho.

UNITERMOS: Fotogrametria; Teoria das orientações.

SUMMARY: *Introduction to the Theory of Orientation in Photogrammetry*. This paper deals with the theory of orientations in Photogrammetry. It presents, in a simple way, the steps necessary to accomplish inner, relative and absolute orientation, analysing the technic and the errors present. Also presents commonly used basic procedures to perform orientation based upon practice in this work.

KEY WORDS: Photogrammetry; Theory of Orientations.

Recebido em 10-11-1988