

AEROFOTOGRAMETRIA: SIMPLICIDADE, QUALIDADE E PRECISÃO

Edson Rodrigues Torres

- Engenheiro Civil,
- Ex-Cartógrafo e Ex-Chefe da Seção de Restituição Aerofotogramétrica do extinto Departamento Geográfico do Estado de Minas Gerais (atual Instituto de Geociências Aplicadas I.G.A.,MG),

- Sócio Efetivo da Sociedade Brasileira de Cartografia,
- Ex-Professor de Cartografia, Desenho Geológico e Topografia da Universidade Federal de Minas Gerais,
- Ex-Chefe de Equipes de Projetos Rodoviários (Geometria) do DER-MG
- Engenheiro de Projetos Viários de Empresas de Consultoria.

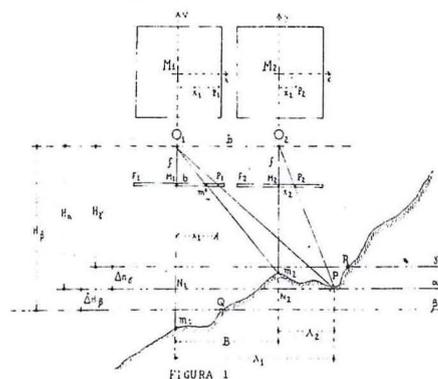
1.0. INTRODUÇÃO

Em Fevereiro de 1971, o autor publicou a matéria "Sobre a precisão dos levantamentos aerofotogramétricos", no N° 16 da REVISTA DA ESCOLA DE ENGENHARIA DA U.F.M.G.. Foi o primeiro e único trabalho versado sobre Aerofotogrametria até aquela época, publicado no Estado de Minas Gerais. Em 1969, o INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA, patrocinou o brilhante trabalho de um de seus renomados professores, intitulado "Seleção de Instrumentos Fotogramétricos". Seu autor, o Sr. Oficial do Exército R/1 Eng° José Moura Notari, teve o objetivo de tratar do assunto, de forma mais condensada, tendo em vista aqueles já familiarizados com a Ciência Aerofotogramétrica. No mesmo ano de 1969, a "DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO", publicou em seu ANUÁRIO N° 18, a matéria técnica "Levantamento Cadastral das Áreas Terminais da Ponte Rio-Niterói", de autoria do Sr. Oficial R/1 Eng° Ney da Fonseca (também professor do I.M.E.). Pode-se dizer que tal trabalho complementa o primeiro citado acima (Seleção dos Instrumentos Fotogramétricos), na medida em que usou, com êxito, a teoria exposta em levantamento real. O artigo técnico do Sr. Eng° José Moura Notari, ao tratar, estatisticamente, a variação dos erros acidentais, o fez de forma pouco detalhada, como convinha ao objetivo a que se propôs. Em 1967, o ANUÁRIO N° 17 da DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO, apresentou o belo estudo "Avaliação da Precisão de uma Carta pelo Erro Médio Quadrático", do Exmo Sr. Gen. R/1 Eng° Moyses Castello Branco Filho (também Professor do INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA) que tratou do aspecto estatístico, com simplicidade, clareza e profundidade, características muito comuns nos trabalhos daquele Professor. A matéria "Sobre a precisão dos levantamentos aerofotogramétricos", citado inicialmente, pretendeu ser a síntese, em certo sentido, dos outros três trabalhos (acima citados). Pretendeu também, através de uma linguagem mais acessível, transmitir o assunto aos Engenheiros não especialistas no mesmo. Erros de impressão e outros por simples distração, não lhe tiraram o mérito. A partir de Fevereiro de 1971, outras matérias foram publicadas sobre o tema, com brilhantismo, diga-se de passagem, na REVISTA DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA, principalmente nos N° 2 (Pág. 18), N° 17 (Pág. 42) e N° 22 (Pág. 53), respectivamente, como se pode ver na bibliografia a-ser citada. No presente trabalho, o autor teve o objetivo de apresentar aspectos da Ciência Fotogramétrica, não incluídos no anterior, publicado em Fevereiro de 1971. O item 2.0., ao tratar das medidas altimétricas, pretendeu transmitir aos Engenheiros Civis, de Minas, Geólogos e Bacharéis em Geografia, conhecimentos mais detalhados de tais medidas feitas com

Estereoscópios e respectivas Barras de Paralaxe, e até mesmo com os Estereomicrometros. Os outros itens, fornecem aos Engenheiros Civis, os conhecimentos mais profundos da Ciência Fotogramétrica, tendo em vista a aplicação das Cartas nos projetos e obras em geral.

2.0. SOBRE AS MEDIDAS ALTIMÉTRICAS

Considere-se a Fig. 1, onde:



- F_1 e F_2 - Par de fotos aéreas;
 f - Distância focal;
 M_1 e M_2 - Pontos principais de cada foto, respectivamente;
 m_1 e m_2 - Pontos do terreno, correspondentes, respectivamente, aos pontos principais das fotos;
 H_α - Altura média de vôo, correspondente ao plano horizontal médio α que contem o ponto P do terreno;
 H_γ - Altura de vôo correspondente ao plano horizontal γ , que contem o ponto R do terreno;
 H_β - Altura de vôo correspondente ao plano β , que contem o ponto Q do terreno;
 P_1 e P_2 - Imagens do ponto P (do terreno), em cada foto, respectivamente;
B - Aero-base;
b - Foto-base da foto 1;
 m_2 - Imagem na foto 1, do ponto m_2 do terreno;
 x_1 e x_2 - Abscissas das imagens P_1 e P_2 em cada foto, respectivamente;
 X_1 e X_2 - Abscissas do ponto P em relação aos pontos m_1 e m_2 , respectivamente;
 ΔH_γ - Diferença de nível entre os planos γ e α ;
 ΔH_β - Diferença de nível entre os planos α e β .

Por semelhança de triângulos ($O_1M_1P_1 \sim O_1N_1P$ e $O_2M_2P_2 \sim O_2N_2P$), temos:

$$\frac{x_1}{X_1} = \frac{x_2}{X_2} = \frac{f}{H_\alpha} \quad \frac{x_1 - x_2}{X_1 - X_2} = \frac{f}{H_\alpha} \therefore \frac{p_{x\alpha}}{B} = \frac{f}{H_\alpha} \quad (2.1)$$

Na fórmula (2.1), $p_{x\alpha} = x_1 - x_2$, é a "PARALAXE ESTEREOSCÓPICA LINEAR" do ponto P, e $B = X_1 - X_2$ é a aero-base.

Como B e f são constantes e a altura de vôo H_α é constante para todos os pontos do plano horizontal α , conclui-se que $p_{x\alpha} = x_1 - x_2$, será constante para todos os pontos do plano α . Se tomarmos outros dois pontos do terreno R e Q, pertencentes, respectivamente, aos planos γ e β , poderemos proceder como no caso do ponto P e chegar às relações:

$$\frac{p_{x\gamma}}{B} = \frac{f}{H_\gamma} \quad (2.2) \quad \text{e} \quad \frac{p_{x\beta}}{B} = \frac{f}{H_\beta} \quad (2.3)$$

Note-se que o plano γ tem cota superior à do plano α e o plano β tem cota inferior. Por intermédio das fórmulas (2.1) e (2.2), pode-se obter o desnível ΔH_γ entre os planos α e γ , em função da diferença das "paralaxes estereoscópicas" $p_{x\alpha}$ e $p_{x\gamma}$. Assim:

$$p_{x\gamma} - p_{x\alpha} = \frac{Bf}{H_\gamma} - \frac{Bf}{H_\alpha}$$

Fazendo $p_{x\gamma} - p_{x\alpha} = \Delta p_{\gamma\alpha}$, ter-se-á:

$$\Delta p_{\gamma\alpha} = \frac{B \cdot f \cdot (H_\alpha - H_\gamma)}{H_\gamma \cdot H_\alpha} \therefore \Delta p_{\gamma\alpha} = \frac{B \cdot f \cdot \Delta H_\gamma}{H_\alpha^2 - H_\alpha \cdot \Delta H_\gamma}$$

pois $H_\alpha - H_\gamma = H_\gamma$ e $H_\gamma = H_\alpha - \Delta H_\gamma$.
Desenvolvendo, convenientemente:

$$\Delta H_\gamma = H_\alpha^2 \cdot \frac{\Delta p_{\gamma\alpha}}{B \cdot f + \Delta p_{\alpha\beta} \cdot H_\alpha} \quad (2.4)$$

Do mesmo modo, desenvolvendo as fórmulas (2.1) e (2.3), chegaremos a:

$$\Delta H_\beta = H_\alpha^2 \cdot \frac{\Delta p_{\alpha\beta}}{B \cdot f - \Delta p_{\alpha\beta} \cdot H_\alpha} \quad (2.5)$$

Em termos genéricos, fazendo:

ΔH_γ e $\Delta H_\beta = \Delta h$ (Diferença de nível entre dois pontos do terreno);

$H_\alpha = H_v$ (Altura média de vôo) e $\Delta p_{\gamma\alpha}$ e $\Delta p_{\alpha\beta} = \Delta p_x$ (Diferença das medidas estereoscópicas lineares), teremos então a fórmula geral:

$$\Delta h = H_v^2 \frac{p_x}{B \cdot f \pm \Delta p_x \cdot H_v} \quad (2.6)$$

Na fórmula (2.6), se adotássemos como plano de referência

o que contém o ponto m_2 (do terreno), isto é, o plano horizontal que secciona o terreno e que contém o ponto nadir m_2 , a altura de vôo H de referência, seria em relação a tal plano. Assim, poder-se-ia, então, (Ver Fig. 1) substituir B.f pelo seu novo valor, ou seja:

$$\frac{b}{B} = \frac{f}{H} \therefore B \cdot f = b \cdot H \quad (\text{Onde } b \text{ é a foto-base da foto } 1).$$

A fórmula (2.6), ficaria então:

$$\Delta H = H \cdot \frac{p_x}{b \pm \Delta p_x} \quad (2.7)$$

Tal fórmula é usada nas medidas com os ESTEREOMICRÔMETROS, podendo ser simplificada, em função da precisão desejada. Tal simplificação, feita através de "Desenvolvimento em Séries", leva ao seguinte resultado:

$$\Delta H = H \cdot \frac{\Delta p_x}{b} \quad (2.8)$$

(Recomenda-se a leitura do trabalho técnico "O processo do Major Emilio Wolf para o emprego dos Estereomicrômetros", citado na bibliografia).

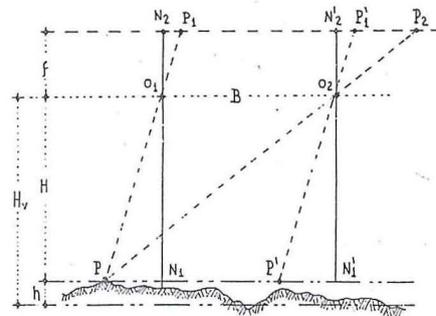


FIGURA 2

Por outro lado, sejam, na Fig. 2, os elementos das duas fotos P_1 e P_2 , obtidas com a altura de vôo H_v e distância focal igual a f, bem como:

- H - Altura de vôo em relação ao ponto P do terreno;
- N_2 e N_2' - Pontos principais das fotos;
- h - Altura do ponto P em relação ao plano de referência;
- B - Base-aérea;
- P - Ponto do terreno.

Chamando de $\overline{N_2 P_1} = x_1$ e $\overline{N_2' P_2} = x_2$ as abscissas das imagens em cada foto, teremos, então, $p_x = x_2 - x_1$, chamada PARALAXE ESTEREOSCÓPICA LINEAR.

Traçando por O_2 uma paralela a $\overline{P O_1}$, teremos a abscissa $\overline{N_2 P_1} = \overline{N_2' P_1'} = x_1$.

Os triângulos $\triangle P P' O_2 \sim \triangle P_2 P_1' O_2$ e $\triangle P' N_1' O_2 \sim \triangle P_1' N_2' O_2$, nos dão:

$$\frac{\overline{N_1' O_2}}{\overline{N_2' O_2}} = \frac{\overline{P' O_2}}{\overline{P_1' O_2}} = \frac{\overline{P P'}}{\overline{P_1' P_2}} = \frac{H}{f}$$

Mas como $\overline{P_1' P_2} = x_2 - x_1 = p_x$, a relação de proporcionalidade poderá ser escrita:

$$\frac{H}{f} = \frac{B}{p_x} \quad (2.9) \quad \text{ou} \quad H = \frac{f \cdot B}{p_x} \quad (2.10)$$

A expressão (2.10), mostra que sendo B e f constantes, a

variação de altura H é função da variação de paralaxe p_x . Sendo a altura H_v constante em relação ao plano de referência, a variação ΔH em H é igual à variação Δh na altura dos diversos pontos do terreno. Para variações dH , infinitamente pequenas, de H , teríamos as variações dh de h . Diferenciando a fórmula (2.10):

$$dH = \frac{B \cdot f}{p_x^2} \cdot dp_x \quad (2.11)$$

Sabendo-se que $p_x = \frac{B \cdot f}{H}$ e $dH = dh$, substituindo em (2.11) e desenvolvendo, chegaremos, finalmente, a:

$$dH = - \left(\frac{H}{B} \cdot \frac{H}{f} \right) \cdot dp_x \quad (2.12)$$

As fórmulas (2.6) e (2.12), nos mostram que as medidas verticais são, basicamente, as medidas de paralaxes em "x", no plano das fotos, e que a precisão altimétrica é função da altura de vôo e da medida da paralaxe.

3.0. PRECISÃO DOS APARELHOS RESTITUIDORES E AEROTRIANGULADORES

Os fabricantes de instrumentos aerofotogramétricos fornecem valores para a precisão de seus produtos, obtidos em condições ideais, através de testes. Por outro lado, a análise das precisões das medidas fotogramétricas, variam de processo. Nos Estados Unidos da América, o processo adotado é o FATOR "C"; na Europa, o processo adotado é o do "ERRO MÉDIO QUADRÁTICO" que se baseia na curva de GAUSS de distribuição dos erros acidentais.

3.1. PROCESSO DO FATOR C (NORTE-AMERICANO)

O Fator C, é uma constante fixada para cada aparelho restituidor, sendo função da altura de vôo e da equidistância mínima de curvas de nível, que o referido aparelho pode traçar. Assim:

$$\text{FATOR C} = \frac{\text{Altura de vôo}}{\text{Equid. mínima medida (com precisão)}} \quad (3.1.1)$$

A sua determinação, é feita através do traçado de curvas de nível com espaçamento cada vez menor, até que, a partir de certo valor, surjam discrepâncias inaceitáveis com os valores prévia e precisamente medidos no terreno. Tal comportamento operacional é repetido, várias vezes, em condições variadas de relevo. O mesmo é feito com outras alturas de vôo, até se obter um coeficiente para o aparelho. O FATOR C foi instituído por volta de 1952. Pela experiência das organizações de aerolevantamentos, recomenda-se os valores da TABELA 1, para o FATOR C dos aparelhos ali relacionados.

3.2. PROCESSO EUROPEU DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO

O processo do ERRO QUADRÁTICO MÉDIO, é um processo de avaliação das precisões dos instrumentos, através de testes acurados e com fundamentos matemáticos pro-

fundos. Logo, não se trata de avaliação com caráter empírico. Os valores fornecidos pelo fabricante são os apresentados na TABELA 2, para PLANIMETRIA e ALTIMETRIA. Com exceção dos AUTÓGRAFOS WILD A-7 e WILD A-10, os valores para os outros aparelhos são os, usualmente, adotados e obtidos pelos autores de matéria sobre o assunto e pelas Empresas de Aerolevantamentos, respectivamente.

Os valores dados para os instrumentos Carl Zeiss, PLANIMAT D2 e PLANICART E2,— foram extraídos de Catálogos do fabricante. Tendo em vista ser o AUTÓGRAFO WILD A-10, da mesma geração do PLANIMAT, adotamos, para sua precisão planimétrica, o mesmo valor dado ao Instrumento Zeiss (PLANIMAT D2). Para a precisão altimétrica, o valor adotado para o AUTÓGRAFO WILD A-10, nos foi fornecido, informalmente, por Fotogrametrista que já operou com o mesmo por muito tempo. Para o AUTÓGRAFO WILD A-7, por prudência, lhe atribuímos precisões planimétrica e altimétrica, respectivamente, iguais às do AUTÓGRAFO WILD A-5. De toda maneira, o procedimento aqui adotado não altera a teoria exposta sobre as precisões das Cartas. O usuário, quando tiver necessidade de lidar com trabalhos reais, poderá obter os verdadeiros valores, diretamente, com o fabricante. Fizemos constar os AUTÓGRAFOS WILD A-7 e WILD A-10 na TABELA 2, como uma forma de cortesia à WILD HEERBRUGG. Deve-se chamar a atenção, para o fato de que os valores de precisões fornecidos em Catálogos dos fabricantes, foram obtidos em testes com qualidade de controle excepcionais. Tal não ocorre no dia a dia da Fotogrametria, pois as condições de operação são dependentes de muitos fatores, muitas vezes adversos. Prudência não faz mal a ninguém.

3.3. O FATOR C E A LEI DE PROPAGAÇÃO DE ERROS DE GAUSS

O Dr. Richard Finsterwalder, em artigo publicado na Revista "PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING", no ano de 1954, ao analisar os processos de avaliação da precisão fotogramétrica, isto é, o do FATOR C e o que usa o ERRO QUADRÁTICO MÉDIO, demonstrou que os mesmos são de mesmo valor e se baseiam na "LEI DE PROPAGAÇÃO DE ERROS DE GAUSS". Assim, de acordo com a lei de erros de Gauss, para que as exigências de precisão vertical sejam atendidas, é preciso que a equidistância das curvas de nível adotada, não seja menor do que 3,3 vezes o erro quadrático médio das altitudes, obtidas por interpolação:

$$\text{Equidistância} \geq 3,3 \cdot M_{hc} \quad (3.3.1)$$

Substituindo os valores de (3.3.1) em (3.1.1):

$$\text{FATOR C} = \frac{H_v}{3,3 \cdot M_{hc}} \quad (3.3.2)$$

A fórmula (3.3.2), permite escolha segura da equidistância mínima ou o aparelho restituidor adequado. Sobre o assunto, recomenda-se a inteligente e criativa exposição da matéria, feita pelo Sr. Oficial Eng^o Paulo Moretsohn Brandi, no N^o1 da REVISTA DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA (Pág. 34 — "Critérios Adotados nos EUA e na Europa, para a Análise das Precisas Fotogramétricas").

4.0. EXIGÊNCIAS DE PRECISÃO

Conforme resolução aprovada na III Reunião Panamericana de Consulta sobre Cartografia, realizada em Caracas no ano de 1946, as exigências de precisão que uma carta topográfica deve satisfazer, são:

— PLANIMETRIA: 90% dos pontos testados no terreno, sendo estes bem definidos, deverão apresentar, na carta, erro de precisão inferior a $\pm 0,5\text{mm}$, em relação ao ponto de apoio mais próximo considerado como certo;

— ALTIMETRIA: 90% dos pontos testados no terreno, cujas altitudes tenham sido interpoladas entre as curvas de nível da carta, deverão apresentar erro inferior à metade da equidistância das curvas de nível e nenhum ponto deverá apresentar erro superior a uma equidistância.

O "Bureau of the Budget" dos EUA, que estabelece as precisões padronizadas para aquele País, que também são adotadas no ou pelo Brasil, recomenda:

— ELEMENTOS PLANIMÉTRICOS: 90% dos elementos bem definidos, como interseção de caminhos, marcos trigonométricos, cantos de grandes edifícios, etc., com exceção daqueles que estejam, inevitavelmente, deslocados pelo uso de convenções cartográficas, devem estar posicionados com erro inferior a $\pm 0,5\text{mm}$ para escalas de 1: 20.000 ou MAIORES, e $\pm 0,8\text{mm}$ para as INFERIORES a 1: 20.000, em relação ao quadriculado da carta;

— ELEMENTOS ALTIMÉTRICOS: 90% das curvas de nível e pontos com cotas interpoladas devem ter erro inferior a 1/2 equidistância, sendo que, no erro total de qualquer ponto, pode ser admitida uma parcela devida ao deslocamento horizontal, dentro da tolerância respectiva; 90% dos pontos cotados devem ter erro inferior a 1/4 da equidistância.

Por outro lado, as cartas em grandes escalas, tem sua precisão planimétrica condicionada ao mesmo valor que se pode obter através da medição gráfica. Assim, a precisão planimétrica das cartas topográficas em grandes escalas, é igual ao erro de graficismo, isto é, $\pm 0,2\text{mm}$ na escala da carta.

5.0. DISTRIBUIÇÃO DOS ERROS ACIDENTAIS

A precisão de 90% dos pontos com erros menores que Δ , pode ser definida pelo erro médio quadrático, de acordo com a curva de Gauss de distribuição de erros acidentais (Fig. 3).

O erro médio quadrático é a abscissa dos pontos de inflexão da curva. Sendo a probabilidade de erros da carta P% menores que Δ , o erro médio "M_p" de um ponto da mesma, será:

$$M_p = \pm \frac{1}{h \cdot \sqrt{2}} = \pm \frac{\Delta}{\Delta' \sqrt{2}}$$

$$(h = \frac{\Delta'}{\Delta} = \text{módulo de precisão da curva-Gauss})$$

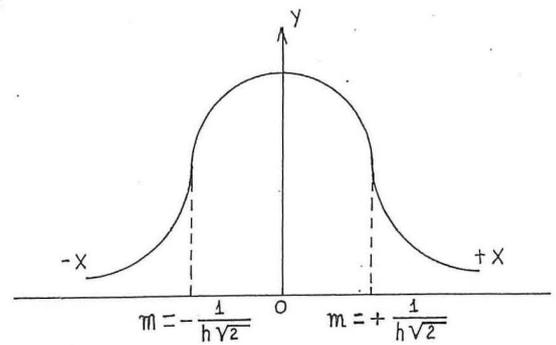


FIGURA 3

Com base nesse estudo dos erros acidentais, estabeleceram-se diversos valores de Δ' para os de "P", sendo que para P igual a 90% ou 0,9, ter-se-á $\Delta' = 1,16$.

Logo:

$$M_p = \pm \frac{\Delta}{1,16 \sqrt{2}} \quad M_p = \pm \frac{\Delta}{1,64} \quad (5.1)$$

Ver o trabalho do Sr. Gen. R/1 Eng^o Moysés Castello Branco Filho, intitulado "Avaliação da Precisão de uma Carta pelo Erro Médio Quadrático" - ANUÁRIO N^o 17 da DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO).

6.0. PRECISÃO DE 90% DE PONTOS PARA CARTAS EM GRANDES ESCALAS

Sendo o ERRO DE GRAFICISMO igual a $\pm 0,2\text{mm}$ (para um ponto medido), teremos, para a fórmula (5.1):

$$M_p = \pm \frac{\Delta}{1,64} \therefore \pm 0,2\text{mm} = \pm \frac{\Delta}{1,64} \therefore \Delta = \pm 0,33\text{mm}. (6.1)$$

7.0. VALORES DE "M_p" (EXIGÊNCIAS DE PRECISÃO PLANIMÉTRICA)

90% dos pontos testados no terreno, sendo estes bem definidos, deverão apresentar, na Carta, erro de precisão inferior a $\pm 0,8\text{mm}$ em Cartas de pequena escala, $\pm 0,5\text{mm}$ em Cartas de média escala e $\pm 0,33\text{mm}$ em Cartas de grande escala, em relação ao ponto de apoio mais próximo considerado como certo. Assim:

CARTAS EM PEQUENA ESCALA:

$$\Delta = \pm 0,8\text{mm} \text{ e } M_p = \pm 0,48\text{mm};$$

CARTAS EM MÉDIA ESCALA:

$$\Delta = \pm 0,5\text{mm} \text{ e } M_p = \pm 0,30\text{mm} \text{ e}$$

CARTAS EM GRANDE ESCALA:

$$\Delta = \pm 0,33\text{mm} \text{ e } M_p = \pm 0,20\text{mm}.$$

8.0. VALORES DE "M_{hc}" (ERRO MÉDIO NA ALTURA DE UM PONTO-PRECISÃO ALTIMÉTRICA)

90% dos pontos testados no terreno, cujas altitudes tenham sido interpoladas entre as curvas de nível da Carta,

deverão apresentar erro inferior à metade da equidistância das curvas e nenhum ponto deverá apresentar erro superior a uma equidistância; 90% dos pontos cotados deverão ter erro inferior a 1/4 da equidistância.

Assim, o erro médio na altura de um ponto, será:

$$+M_{hc} = \frac{\text{Meia Equidistância}}{1,64} \quad e$$

$$+M_{hc} = \frac{1/4 \text{ da Equidistância}}{1,64}$$

9.0. EXIGÊNCIAS FINAIS DE PRECISÃO ALTIMÉTRICA E PLANIMÉTRICA

A TABELA 3, apresenta as exigências de precisão planimétrica e altimétrica, para cada escala, separadamente, já classificadas em pequena, média e grande, com os respectivos espaçamentos de curvas de nível, adotados segundo as Normas Cartográficas.

10.0. PODER DE RESOLUÇÃO OU "AWAR TEÓRICO"

Chama-se poder de resolução de uma fotografia aérea, ao poder de identificação e de medição de detalhes do terreno, figurados na mesma. O poder de resolução, também chamado de "AWAR TEÓRICO" (nos EUA), é função da combinação CÂMARA AÉREA-EMULSÃO DO FILME. É dado em "LINHA/MICRÔMETRO". Assim, quando se diz que uma cobertura aérea tem um poder de resolução de "UMA LINHA POR 10 μ m", quer-se dizer que é possível definir 100 linhas em um (1) milímetro:

$$\frac{\text{uma linha}}{10\mu\text{m}} = \frac{\text{uma linha}}{0,01 \text{ mm}} = \frac{100 \text{ linhas}}{1 \text{ milímetro}}$$

Por exemplo, em fotografias na escala 1:60.000, com "poder de resolução" de uma linha por 40 m ou 25 linhas por milímetro, ter-se-á uma relação "foto/detalhes do terreno", igual a 01mm/60m, ou seja, cada milímetro medido na foto, corresponde a 60 metros no terreno. Se o poder de resolução das fotos é de 25 linhas por milímetro, conseguir-se-á identificar e medir detalhes com dimensão mínima igual a 60m/25, ou seja, 2,40 metros. Logo, quando se pretende obter uma Carta cuja escala deva ser bem maior do que a escala da foto, é necessário verificar o poder de resolução da cobertura aérea, tendo em vista as exigências de precisão da Carta. Assim, com fotos na escala igual a 1:60.000, poder de resolução de 25 linhas por milímetro, não podemos obter Cartas na escala 1:10.000, pois, pela TABELA 3, o "ERRO QUADRÁTICO MÉDIO" na posição de um (01) ponto é $M_p = \pm 2,00\text{m}$, valor numérico menor do que o valor numérico da medida do menor detalhe bem identificável e mensurável nas fotos, ou seja, 2,40 metros.

11.0. SUPERPOSIÇÕES LATERAIS E LONGITUDINAIS DAS COBERTURAS AEROFOTOGRAMÉTRICAS

Normalmente, as superposições das fotos são em torno de 30% (superposição lateral das faixas) e 60% (super-

posição longitudinal). Mas, chama-se a atenção para as coberturas aéreas urbanas, em grandes escalas, tendo em vista Cartas, também, em grandes escalas. As Figuras 6 e 7, referem-se a uma faixa de vôo, onde se vê três fotos seguidas com superposição de 60% (longitudinal). Os desenhos das Figuras 6 e 7, respectivamente, foram feitos em escalas compatíveis com os seguintes dados:

$H_v = 630\text{m}$, $f = 210,02\text{mm}$ (câmara normal ou semi-grande angular) e escala das fotos 1:3.000.

A Figura 6 mostra um corte transversal AB de uma via urbana, com 25 metros de largura, e duas edificações AC e BD, com 75 metros de altura, respectivamente.

A Figura 7 (ver Figuras 6 e 7, no final de todo o presente texto), é uma ampliação do referido corte transversal da via urbana, onde se mostra que a área hachurada só figura na foto 2, pois devido a altura dos edifícios, os raios luminosos das fotos 1 e 3, respectivamente, têm suas trajetórias interceptadas pelos mesmos (edifícios). Assim, não se poderá obter estereoscopia da plataforma da via urbana, ficando o operador da restituição aerofotogramétrica, impossibilitado de plotar detalhes planimétricos e altimétricos, tais como: passeios, alturas dos meios fios, testada das edificações, etc... Em termos de Aerofotogrametria, a solução encontrada é aumentar a superposição longitudinal para 70% ou 80%, na tomada das fotos aéreas. Fácil é ver, na Figura 6, que a diminuição do espaçamento entre duas tomadas de fotos, permite que os raios luminosos do par sejam refletidos por todos os detalhes do terreno, inclusive, por aqueles detalhes que, anteriormente, só figuravam em uma foto. Em vôos já realizados, a solução é completar a restituição, com medidas feitas no terreno por processo topográfico tradicional.

12.0. ERROS QUE OCORREM NA ELABORAÇÃO DE UMA CARTA

Os erros que ocorrem na elaboração de uma Carta, podem ser, como já vimos, Planimétricos e Altimétricos. Os erros Planimétricos classificam-se em: ERROS FOTOGRAMÉTRICOS e ERROS DE DESENHO. Os erros Altimétricos classificam-se em: ERROS DEVIDOS ÀS MEDIDAS DE PARALAXE e ERROS DEVIDOS À INFLUÊNCIA DOS ERROS PLANIMÉTRICOS NAS MEDIÇÕES DAS ALTURAS (DEVIDOS À DECLIVIDADE DO TERRENO).

12.1. ERROS PLANIMÉTRICOS

a) ERROS FOTOGRAMÉTRICOS - Os erros fotogramétricos são inerentes à imperfeição dos operadores e devidos a fenômenos de Física. São três, assim assinalados:

M_{pt} - erro cometido na orientação absoluta, usando pontos de aerotriangulação, os quais não são isentos de erro, seja qual for o método de compensação (em faixa ou bloco);

M_{pp} - erro devido às deformações na projeção dos raios luminosos e na observação do modelo (o instrumento não é automático e exige o operador com suas habilidades e imperfeições);

M_i - erro de identificação dos pontos de apoio e ocorre sempre que os referidos pontos não forem sinalizados no terreno, antes da cobertura aérea.

Pelo exposto, os ERROS FOTOGRAMÉTRICOS são ERROS ACIDENTAIS e pode-se colocá-los sob a forma:

$$M_f = \pm \sqrt{M_{pt}^2 + M_{pp}^2 + M_1^2} ; \quad (12.1.1)$$

b) ERROS DE DESENHO - Os erros de desenho são dois:

M_{d1} - erro do operador ao retocar a restituição;

M_{d2} - erro na gravação em plástico ou no desenho de acabamento a tinta.

Da mesma forma que os erros fotogramétricos, pode-se colocá-los sob a forma:

$$M_d = \pm \sqrt{M_{d1}^2 + M_{d2}^2} . \quad (12.1.2)$$

c) EXPRESSÃO TOTAL DOS ERROS PLANIMÉTRICOS

De (12.1.1) e (12.1.2), ter-se-á:

$$M_p = \pm \sqrt{M_{pt}^2 + M_{pp}^2 + M_1^2 + M_{d1}^2 + M_{d2}^2} , \quad (12.1.3)$$

(onde M_p é o erro médio quadrático da posição de cada ponto restituído).

O I.T.C. (INTERNATIONAL TRAINING CENTER FOR AERIAL SURVEY), de DELFT, HOLANDA, apresentou, no ano de 1967, em TABELA, os valores numéricos a serem adotados para os ERROS FOTOGRAMÉTRICOS e para os ERROS DE DESENHO. Tais valores numéricos, são os constantes na TABELA 4.

12.2. ERROS ALTIMÉTRICOS

a) ERROS DEVIDOS ÀS MEDIDAS DE PARALAXE (VER ÍTEM 2)

M_h - erro altimétrico médio do aparelho usado na restituição;

M_{ht} - erro médio devido à aerotriangulação e sua compensação.

Expressando-os, convenientemente, tem-se:

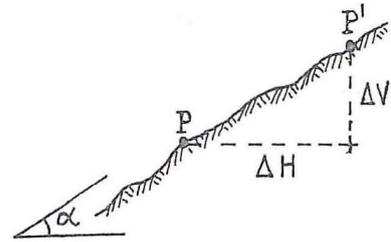
$$M_{hp} = \pm \sqrt{M_h^2 + M_{ht}^2} \quad (12.2.1)$$

Os valores numéricos dos erros altimétricos, devidos às medidas de paralaxe, são:

M_h — erro médio devido ao aparelho restituidor, dado pela TABELA 3;

M_{ht} — para a aerotriangulação em faixas, o Método Jerie (I.T.C.-DELFT) apresenta uma precisão de 0,25‰ da altura de vôo; para compensação em bloco, o Método Schlund fornece uma precisão de 0,185‰ da altura de vôo (ver considerações abaixo).

b) ERROS DEVIDOS À INFLUÊNCIA DOS ERROS PLANIMÉTRICOS NAS MEDIÇÕES DAS ALTURAS



F I G U R A 4

Na Figura 4, devido a erro planimétrico, o ponto "P", ao ser medido, o foi na posição de "P' ". Logo, devido ao deslocamento ΔH (erro planimétrico), surgiu um deslocamento ΔV (erro altimétrico). Sendo a inclinação ou declividade do terreno igual ao ângulo α , tem-se:

$$\text{Tg} \alpha = \frac{\Delta V}{\Delta H} \quad \therefore \quad \Delta V = \Delta H \cdot \text{Tg} \alpha . \quad (12.2.2)$$

Como $\Delta H = M_p$ e fazendo $M_{h\alpha} = \Delta V$, teremos:

$$M_{h\alpha} = M_p \cdot \text{Tg} \alpha \quad (12.2.3)$$

Levando (12.2.3) em (12.2.1):

$$M_{hc} = \pm \sqrt{M_h^2 + M_{ht}^2 + M_p^2 \cdot \text{Tg}^2 \alpha} \quad (12.2.4)$$

c) ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE A PRECISÃO DAS AEROTRIANGULAÇÕES E MÉTODOS DE COMPENSAÇÃO

O Dr. Arthur J. Brandenberger, da Universidade do Estado de Ohio, EUA, apresentou, nos anos de 1957-1958, duas fórmulas para a obtenção dos erros em planimetria e altimetria, respectivamente, das aerotriangulações compensadas em faixas, com um máximo de 20 modelos (Manual of Photogrammetry, 4ª Edição, 1980 — The American Society of Photogrammetry):

$$- M_{pt} = \pm 0,10 \cdot H_v \cdot \sqrt{N} \text{ (Planim.)}; \quad (12.2.5)$$

$$- M_{ht} = \pm 0,06 \cdot H_v \cdot \sqrt{N} \text{ (Altim.)} . \quad (12.2.6)$$

Nas fórmulas acima:

H_v = altura média de vôo em KM;

N = número de modelos ($5 \leq N \leq 20$).

Para $H_v = 9150\text{m}$, número de modelos entre 15 e 20, ter-se-á:

$M_{ht} = 0,25\%$ da altura de voo (ver Método Jerie citado acima, na letra "a").

O Dr. H. M. Karara, da Universidade do Estado de Illinois, EUA, no artigo "Possibilidades e limitações da aerotriangulação", de 1961, traduzido pelo Sr. Oficial Engº Ney C. Santin e publicado no ANUÁRIO N° 14, 1964, da DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO, fornece as seguintes relações entre as precisões das aerotriangulações, compensadas em faixas e em blocos, respectivamente:

$$- M_{pt} (F) = M_{pt} (B) \cdot \sqrt{2} \text{ (Planim.); (12.2.7)}$$

$$- M_{ht} (F) = M_{ht} (B) \cdot \sqrt{2} \text{ (Altim.); (12.2.8)}$$

onde $M_{pt} (F)$ e $M_{ht} (F)$ são, respectivamente, os erros planimétricos e altimétricos devidos às aerotriangulações compensadas em faixas; $M_{pt} (B)$ e $M_{ht} (B)$ são, respectivamente, os erros planimétricos e altimétricos devidos às aerotriangulações compensadas em bloco.

Realmente, aplicando a relação (12.2.7) aos valores fornecidos pelo I.T.C. de DELFT, contidos na TABELA 4, verificar-se-á a correção das relações propostas pelo Dr. H. M. Karara:

$$M_{pt} (F) = 0,040 \cdot 10^{-3} \cdot D_{EN} \cdot \sqrt{2}$$

$$M_{pt} (F) = 0,057 \cdot 10^{-3} \cdot D_{EN} \cong 0,06 \cdot 10^{-3} \cdot D_{EN}$$

d) EXPRESSÃO TOTAL DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO NA ALTURA DE UM (01) PONTO

Aplicando a equação (12.1.3) na equação (12.2.4), obter-se-á a expressão total do erro quadrático médio na altura de um ponto:

$$M_{hc} = \pm \sqrt{M_h^2 + M_{ht}^2 + (M_{pt}^2 + M_i^2 + M_{pp}^2 + M_{dl}^2 + M_{d2}^2) \text{Tg}^2 \alpha} \quad (12.2.9)$$

13.0 PRÉ-SINALIZAÇÃO

Tendo em vista evitar os erros de identificação "M_i", quando se executa um projeto global, isto é, realização de cobertura aerofotográfica para fim determinado (obras de engenharia civil, por exemplo), faz-se a PRÉ-SINALIZAÇÃO, no terreno, dos pontos de apoio de campo. Os sinais devem ser na COR BRANCA, COM FUNDO ESCURO (de preferência), tendo em vista maior nitidez nas fotos. Geralmente, são usados no formato apresentado na Figura 5. As dimensões variam com a escala da foto a ser obtida. As preconizadas na Figura 5, são para a escala da foto 1: 10.000. O Polyethylene opaco branco, com espessura de 0,10 ou 0,15mm, é excelente material para PRÉ-SINALIZAÇÃO, bem como madeira compensada (pintada na cor conveniente). O terreno rochoso ou vegetação (verde), oferecem, respectivamente, um excelente fundo (escu-

ro) para contraste. Recomenda-se a leitura da matéria publicada no n°39, página 52, desta Revista, que é editada pela SOCIEDADE BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA. Sob o título "UMA SUGESTÃO ONDE SE COMBINAM A SEGURANÇA DO TRÁFEGO E A PRÉ-SINALIZAÇÃO FOTOGRAFÉTRICA"; os autores (ver bibliografia) preconizam a utilização da sinalização horizontal, em vias urbanas ou rurais, combinada ou não com outros sinais complementares, como pré-sinalização para fotos aéreas. Os engenheiros especialistas em ENGENHARIA DE TRANSPORTES usam, nas demarcações das SINALIZAÇÕES HORIZONTAIS em VIAS URBANAS e RURAIS, TINTA REFLETORIZADA, através da aplicação de ESFERAS DE VIDRO RETRO-REFLETORAS. Assim, pelo alto poder de reflexão, as SINALIZAÇÕES HORIZONTAIS DE TRÁFEGO, são ALVOS excelentes de PRÉ-SINALIZAÇÃO AEROFOTOGRAFÉTRICA.

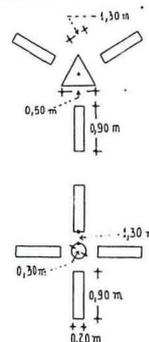


FIGURA 5

14.0. CAPACIDADE DE RESTITUIÇÃO

Chama-se, aqui, capacidade de restituição, ao poder de aplicação do Aparelho Restituidor em relação à escala da foto (negativo). Assim, dado um recobrimento com escala de foto determinada, o poder de restituição do Aparelho, lhe permite obter Cartas (ou plantas) em escalas maiores que as da foto (negativo), comporta uma abordagem bem mais ampla, dados os vários fatores a serem analisados, o que foge aos objetivos do presente trabalho. Apresenta-se, na TABELA 6, o poder de restituição (ampliação em fotocarta ou planta), de alguns Instrumentos Restituidores.

15.0. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em tudo que foi exposto, um aspecto não explícito no texto, é que merece louvor: o modesto e despretencioso trabalho, mesmo que por auto-didatismo, pertence a uma Escola de Fotogrametria, ou seja, aquela que no início do século foi fundada pelo Sr. Major Ex. Engº Alfredo Vidal e em 1920, sedimentada pela ilustre Missão Austríaca. Foi iniciada dentro dos padrões mais modernos da CIÊNCIA FOTOGRAFÉTRICA, na época. Gerações que receberam tal herança, a transmitiram cada vez mais atualizada e multiplicada, até aqui. O DEVER DE TODOS, É, NO MÍNIMO, CONSERVA-LA, PARA AS FUTURAS GERAÇÕES. A seguir; apresenta-se alguns problemas sobre o assunto tratado acima, bem como, suas possíveis soluções.

16.0. PROBLEMAS PROPOSTOS E SOLUÇÕES

- EXEMPLO 1

Deseja-se Planta na escala 1:500. Existe cobertura aérea na escala 1:5 000, altura de vôo $H_v = 763\text{m}$ ($f=152,55\text{mm}$), apoio de campo em todos os pares e pré-sinalização. Qual Instrumento Restituídor poderá ser usado?

I) Precisão Planimétrica-

A expressão (12.1.3), ficará:

$$M_p = \pm \sqrt{M_{pp}^2 + M_{d1}^2 + M_{d2}^2} \quad (M_{pt} = M_i = 0)$$

Aplicando os valores da TABELA 4:

$$M_p^2 = \pm [(0,02 \cdot 10^{-3} \cdot 5000)^2 + (0,15 \cdot 10^{-3} \cdot 500)^2 + (0,10 \cdot 10^{-3} \cdot 500)^2] \therefore M_p = \pm 0,135\text{m.}$$

Pela TABELA 3, a precisão planimétrica, é $M_p = \pm 0,10\text{m}$. Logo, a mesma não foi atendida. Eliminando o erro de gravação M_{d2} :

$$M_p = \pm \sqrt{M_{pp}^2 + M_{d1}^2} \therefore M_p = \pm 0,125\text{m.}$$

Como a precisão ainda não foi atendida, eliminar-se-á o retoque da restituição:

$$M_p = M_{pp} = \pm (0,02 \cdot 10^{-3} \cdot 5000) \quad M_p = \pm 0,10\text{m.}$$

Tal valor atende às exigências de precisão planimétrica.

II) Escolha do Instrumento Restituídor, como se pode ver por (12.1.1), o erro fotogramétrico M_f é igual a M_{pp} (M_{pt} e M_i são nulos). Assim, $M_f = \pm 0,10\text{m}$.

Pela TABELA 2, todos os Restituídores atendem às exigências de precisão, com exceção do MULTIPLEX e do AEROTOPO, como se pode ver (calcular)..

III) Precisão Altimétrica-Pontos Cotados-

A expressão (12.2.4), é:

$$M'_{hc} = \pm \sqrt{M_h^2 + M_p^2 \cdot \text{Tg}^2 \alpha}$$

Considerar-se-á tratar-se de mapeamento em área urbana limitada, com terreno de declividades insignificantes (como, por exemplo, as Avenidas marginais do Vale do Rib. Arrudas em Belo Horizonte). Logo:

$M'_{hc} = M_h$. Tomando o AUTOGRAFO WILD A-10 como primeira referência, obter-se-á, da tabela 2:

$$M'_h = \pm (0,10 \cdot 10^{-3} \cdot H_v) = \pm (0,10 \cdot 10^{-3} \cdot 763)$$

$M'_h = \pm 0,0763\text{m} \pm 0,076\text{m}$ (valor numérico das exigências de precisão altimétrica para os Pontos Cotados, de acordo com a TABELA 3). Logo, pela TABELA 2, só os Aparelhos WILD A-10, PLANIMAT ZEISS D2 e PLANICART

ZEISS E2, poderão ser utilizados na restituição.

IV) Poder de Restituição-

Pela TABELA 6, os Aparelhos acima indicados têm poder de Restituição para tal trabalho (ampliação de 10 vezes).

- EXEMPLO 2

Para o caso do EXEMPLO 1, qual escala de foto permitiria retoque na restituição?

$$M_p = \pm \sqrt{M_{pp}^2 + M_{d1}^2} \quad \text{ou}$$

$$M_p^2 = \pm [(0,02 \cdot 10^{-3} \cdot D_{EN})^2 + (0,15 \cdot 10^{-3} \cdot 500)^2].$$

Sendo $M_p = \pm 0,10\text{m}$ (ver TABELA 3), substituindo na equação acima e resolvendo, obter-se-á o valor de D_{EN} : $D_{EN} = 3\,307,189$ OU $D_{EN} = 3\,308$. Logo, a escala que permitirá retoque na Restituição será: 1:3 308.

Adotando o mesmo procedimento para apresentação final, com acabamento a tinta ou gravação em plástico, chegar-se-á à escala de fotos igual a 1:2 165.

No caso da escala da Planta igual a 1:500 e escala das fotos igual a 1:2 165, o Aparelho Restituídor será escolhido de acordo com os cálculos que se seguem. Devido à escala das fotos, a distância focal "f", poderá ser igual a 210,02mm. Assim, a altura de vôo será:

$$H_v = 210,02 \times 2165 \times 10^{-3} \therefore H_v = 455\text{m.}$$

Como já se viu, as exigências para os Pontos Cotados são maiores que as Planimétricas. Pela expressão (12.2.4) e de acordo com a TABELA 3:

$$M'_{hc} = M_h = \pm 0,076\text{m}$$

Aplicando os valores da TABELA 2:

$$M'_{hc} = M_h = \pm 0,076\text{m} = K \cdot 10^{-3} \cdot 455\text{m} \therefore$$

$$K = 0,1674 = 0,17$$

Logo, o Instrumento Restituídor deverá ter uma precisão altimétrica igual a 0,17‰ da altura de vôo:

$$M_h = 0,17\text{‰} (\text{da altura de vôo})$$

Pela TABELA 2, apenas os Aparelhos BALPLEX, WILD B-8, KERN PG-2, MULTIPLEX e AEROTOPO, não atendem as exigências de precisão vertical.

- EXEMPLO 3

Deseja-se uma planta, na escala 1: 2.000, de região urbana. Existem fotos da área, na escala 1: 10.000, obtidas com altura de vôo igual a 1.531 metros. O recobrimento longitudinal é de 60% e não existe pré-sinalização. Qual a conduta técnica a ser seguida, usando apoio terrestre em todos os pares (modelos)?

I) Precisão Planimétrica — Pela TABELA 3: $M_p = \pm 0,40m$.

A expressão (12.1.3), Sendo M_{pt} nulo, ficará:

$$M_p = \pm \sqrt{M_{pp}^2 + M_i^2 + M_{d1}^2 + M_{d2}^2}$$

Aplicando os valores da TABELA 4: $M_p = \pm 0,510m$

O valor acima, não atende as exigências de precisão planimétrica ($M_p = \pm 0,40m$). Eliminando a gravação em plástico, isto é, M_{d2} : $M_p = \pm 0,469m$.

Também, aqui, não foram atendidas as exigências de precisão planimétrica. Logo, não será possível obter-se a restituição, ou melhor, a Planta na escala de 1: 2.000. Chama-se a atenção para o fato de que, se fosse possível tal trabalho, haveria necessidade de complementar a restituição, com medidas topográficas no terreno, pois sendo a área edificada, a superposição de 60% o exigiria, como visto no item 11.0. .

Se houvessem sido pré-sinalizados os pontos de apoio de campo e eliminado o acabamento final ou gravação em plástico, a Planta poderia ser obtida. A seguir, apresentar-se-á (EXEMPLO 4) uma conduta técnica adotada em um mapeamento real, que pelas escalas de Fotos e Planta, respectivamente, se assemelham muito com o presente caso.

- EXEMPLO 4

Planta na escala 1: 1.000, Fotos na escala 1: 5.000, altura de vôo igual a 765 metros, superposição longitudinal da cobertura igual a 80%, apoio de campo em todos os pares (modelos) pré-sinalizados e sem acabamento final a tinta (ou gravação em plástico).

I) Precisão Planimétrica Pela TABELA 3: $M_p = \pm 0,20m$. A expressão (12.1.3), será (M_{pt} , M_i e M_{d2} , nulos):

$$M_p = \pm \sqrt{M_{pp}^2 + M_{d1}^2}$$

Aplicando os valores da TABELA 4:

$$M_p = \pm [(0,02 \cdot 10^{-3} \cdot 5000)^2 + (0,15 \cdot 10^{-3} \cdot 1000)^2]$$

$M_p = \pm 0,18m$ (valor inferior ao erro quadrático médio dado acima, ou seja, $\pm 0,20m$)

Se houvesse gravação em plástico, a expressão (12.1.3) forneceria:

$M_p = \pm 0,206m$ (valor superior ao erro quadrático médio, apesar da pequena diferença)

Este exemplo é de um mapeamento real, ou seja, o "Levantamento Cadastral das Áreas Terminais da Ponte Rio-Niterói", onde não houve a gravação em plástico ou acabamento final a tinta (ver bibliografia).

EXEMPLO 5

Em região cujo relevo tem declividade média de 18 graus, tem-se cobertura aérea na escala de 1: 60.000, com altura de vôo igual a 9150 metros. Deseja-se a edição de Cartas na escala de 1: 100.000, através de redução da restituição realizada na escala de 1: 25.000. Dispõem-se de aparelho MULTIPLEX. É possível a elaboração da Carta?

I) Poder de Restituição

Pela TABELA 6, o Poder de Restituição do MULTIPLEX é de 2,5 vezes a escala da foto. Assim, para fotos na escala de 1: 60.000, é possível a restituição em 1: 25.000.

II) Precisão Altimétrica

Como se pode ver na TABELA 3, as exigências para a precisão vertical, são maiores que para a precisão horizontal. Logo, tem-se (TABELA 3):

$$M_{hc} = \pm 12,19m \text{ (erro quadrático médio para as curvas de nível - espaçamento de 40m)}$$

$$M'_{hc} = \pm 6,10m \text{ (erro quadrático médio na altura de um Ponto Cotado).}$$

Usando a expressão (12.2.9)

$$M_{hc}^2 = \pm [M_h^2 + M_{ht}^2 + (M_{pt}^2 + M_i^2 + M_{pp}^2 + M_{d1}^2 + M_{d2}^2) \cdot \text{Tg}^2 \alpha]$$

tem-se: $M_h = 0,50\text{‰}$. H_v (TAB.2);

$M_{ht} = 0,185\text{‰}$. H_v (Compensação em Bloco); e

$\text{Tg}^2 \alpha = \text{Tg}^2 18^\circ = 0,1056$. Com os valores dados pela TABELA 4, ter-se-á:

$$M_{hc}^2 = \pm \left\{ (0,5 \times 10^{-3} \times 9150)^2 + (0,185 \times 10^{-3} \times 9150)^2 + [(0,04 \times 10^{-3} \times 60000)^2 + (0,02 \times 10^{-3} \times 60000)^2 + (0,15 \times 10^{-3} \times 25000)^2 + (0,10 \times 10^{-3} \times 100000)^2 \times 0,1056 \right\}$$

$$M_{hc} = \pm 6,078m.$$

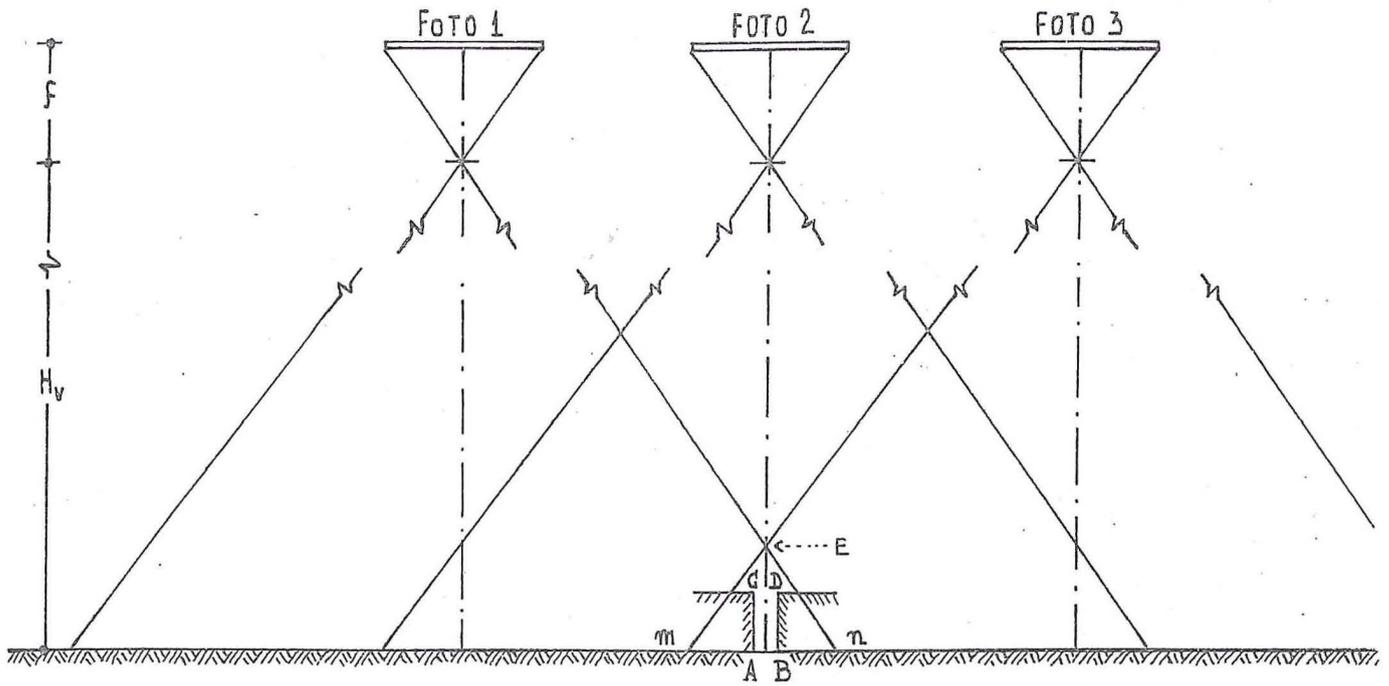
Como se pode ver, o RESTITUIDOR MULTIPLEX, atende às exigências de precisão (inclusive para Pontos Cotados, que, como se viu acima, é $M'_{hc} = \pm 6,10m$).

III) Critério do FATOR C

$$\text{FATOR C} = \frac{H_v}{3,3 \cdot M'_{hc}} = \frac{9150}{3,3 \times 6,10}$$

$$\text{FATOR C} = 455$$

A TABELA 1, mostra que o MULTIPLEX atende às exigências de precisão, pois possui um FATOR C igual a 650.



SUPERPOSIÇÃO LONGITUDINAL DE 60%

FIGURA 6

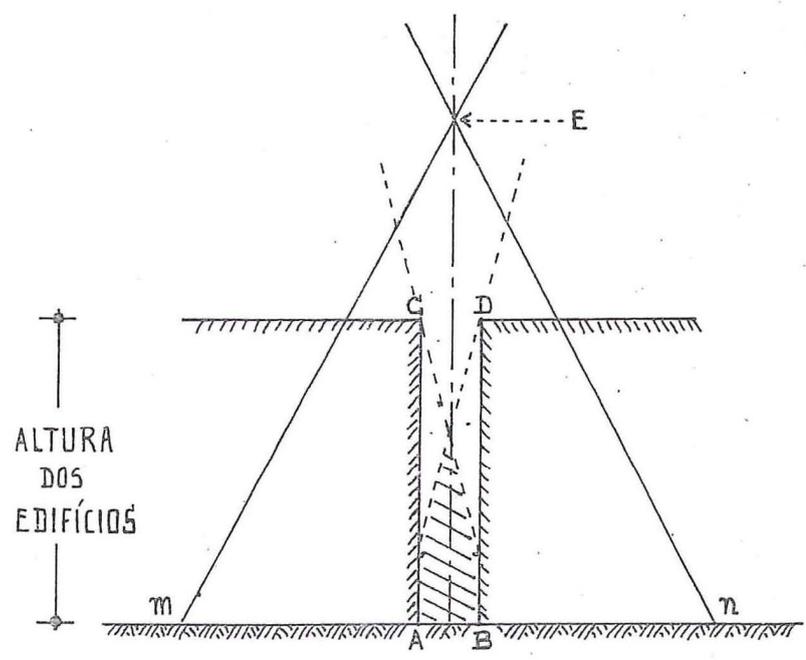


FIGURA 7

APARELHOS RESTITUIDORES		FATOR "C"
ESTEREOPLANÍGRAFO	ZEISS C-7	1250
ESTEREOPLANÍGRAFO	ZEISS C-8	1250
AUTÓGRAFO	WILD A-5	1250
AUTÓGRAFO	WILD A-7	1250
AUTÓGRAFO	WILD A-10	1250
KERN	PG-3	1250
AVIÓGRAFO	WILD B-8	950
KERN	PG-2	950
KELSH PLOTTER		950
AEROMULTIPLEX		650

TABELA 1

ERROS FOTOGRAMÉTRICOS E DE DESENHO (m) (VALORES SEGUNDO TABELA DO I.T.C. - DELET)		
ERROS FOTOGRAMÉTRICOS	$M_{pt(B)}$	$0,04 \cdot 10^{-3} \cdot D_{EN}$
	$M_{pt(F)}$	$0,06 \cdot 10^{-3} \cdot D_{EN}$
	M_i	$0,03 \cdot 10^{-3} \cdot D_{EN}$
	M_{pp}	$0,02 \cdot 10^{-3} \cdot D_{EN}$
ERROS DE DESENHO	M_{d1}	$0,15 \cdot 10^{-3} \cdot D_{EC}$
	M_{d2}	$0,10 \cdot 10^{-3} \cdot D_{EC}$
<p>$M_{pt(B)}$ - AEROTRIANGULAÇÃO: COMPENSAÇÃO EM BLOCO; $M_{pt(F)}$ - » » : COMPENSAÇÃO EM FAIXAS; D_{EN} - DENOMINADOR DA ESCALA DA FOTO (NEGATIVO); D_{EC} - DENOMINADOR DA ESCALA DA CARTA OU PLANTA.</p>		

TABELA 4

O R D E M	APARELHOS RESTITUIDORES		PRECISÃO PLANIMÉTRICA M_f	PRECISÃO ALTIMÉTRICA M_h
	1 ^a	AUTÓGRAFO (*)	WILD A-10	\pm 5,50 m (Na Escala do Negativo)
AUTÓGRAFO		WILD A-8	\pm 10,00 m (Na Escala do Negativo)	0,15 (Da Alt. de Vôo)
AUTÓGRAFO (*)		WILD A-7	\pm 10,00 m (Na Escala do Negativo)	0,15 (Da Alt. de Vôo)
AUTÓGRAFO		WILD A-5	\pm 10,00 m (Na Escala do Negativo)	0,15 (Da Alt. de Vôo)
ESTEREOPLANÍGRAFO		ZEISS C-8	\pm 10,00 m (Na Escala do Negativo)	0,15 (Da Alt. de Vôo)
ESTEREOPLANÍGRAFO		ZEISS C-7	\pm 10,00 m (Na Escala do Negativo)	0,15 (Da Alt. de Vôo)
PLANIMAT		ZEISS D2	\pm 5,50 m (Na Escala do Negativo)	0,028 (Da Alt. de Vôo)
2 ^a	PLANICART	ZEISS E2	\pm 16,50 m (Na Escala do Negativo)	0,056 (Da Alt. de Vôo)
	ESTEREOCOMPILADOR KELSH PLOTTER - THE INSTRUMENT CO., INC. E ABRAMS INSTRUMENTS CORP.		\pm 20,00 m (Na Escala do Negativo)	0,15 (Da Alt. de Vôo)
	BALPLEX	BAUSCH & LOMB	\pm 0,20 mm (Na Escala da Carta)	0,20 (Da Alt. de Vôo)
	AVIÓGRAFO	WILD B-8	\pm 0,20 mm (Na Escala da Carta)	0,20 (Da Alt. de Vôo)
3 ^a	ESTEREORESTITUIDOR	KERN PG-2	\pm 0,20 mm (Na Escala da Carta)	0,20 (Da Alt. de Vôo)
	AEROMULTIPLEX	ZEISS E BAUSCH & LOMB	\pm 0,30 mm (Na Escala da Carta)	0,50 (Da Alt. de Vôo)
	ESTEREOTOPO	ZEISS	\pm 0,30 mm (Na Escala da Carta)	0,50 (Da Alt. de Vôo)
(*) VALORES NÃO CONFIRMADOS POR FALTA DE DADOS (DOS FABRICANTES)				

TABELA 2

CARTAS	ESCALAS	EQUIDIST. DAS CÚRVAS DE NÍVEL	PRECISÃO VERTICAL				PRECISÃO HORIZONTAL		
			VALORES DE "Δ" (1/2 DA EQUI- DISTÂNCIA)	M _{hc} (ERRO QUADRÁ- TICO MÉDIO NA ALTURA DE UM PONTO)	VALORES DE "Δ" (1/4 DA EQUI- DISTÂNCIA)	M _{hc} (ERRO QUADRÁ- TICO MÉDIO NA ALTURA DE UM PONTO COTADO)	VALORES DE "Δ"	M _p (ERRO QUADRÁ- TICO MÉDIO NA POSIÇÃO DE UM PONTO)	VALORES DE M _p EM METROS
ESCALAS PEQUENAS	$\frac{1}{100.000}$	40m	20m	± 12,19m	10m	± 6,10m	± 0,8 mm (NA ESCALA DA CARTA)	± 0,48 mm (NA ESCALA DA CARTA)	± 48,00m
	$\frac{1}{50.000}$	20m	10m	± 6,09m	5m	± 3,05m			± 24,00m
ESCALAS MÉDIAS	$\frac{1}{25.000}$	10m	5m	± 3,04m	2,5m	± 1,52m	± 0,5 mm (NA ESCALA DA CARTA)	± 0,30 mm (NA ESCALA DA CARTA)	± 7,50m
	$\frac{1}{20.000}$	10m	5m	± 3,04m	2,5m	± 1,52m			± 6,00m
ESCALAS GRANDES	$\frac{1}{10.000}$	10m	5m	± 3,04m	2,5m	± 1,52m	± 0,33 mm (NA ESCALA DA CARTA)	± 0,20 mm (NA ESCALA DA CARTA)	± 2,00m
	$\frac{1}{5.000}$	5m	2,5m	± 1,52m	1,25m	± 0,76m			± 1,00m
	$\frac{1}{2.000}$	2m	1m	± 0,60m	0,50m	± 0,30m			± 0,40m
	$\frac{1}{1.000}$	1m	0,5m	± 0,30m	0,25m	± 0,15m			± 0,20m
	$\frac{1}{500}$	0,5m	0,25m	± 0,15m	0,125m	± 0,076m			± 0,10m

TABELA 3

CÁLCULO DE M_f EM METROS	
$M_f = \pm \sqrt{M_{pt}^2 + M_1^2 + M_{pp}^2}$	$M_f = \pm \sqrt{M_1^2 + M_{pp}^2}$
AEROTRIANGULAÇÃO— COMP. EM BLOCOS: $M_f = \pm 0,05385 \cdot 10^{-3} \cdot D_{EN}$	APOIO TERRESTRE EM TODOS OS MODELOS ($M_{pt}=0$): $M_f = \pm 0,036056 \cdot 10^{-3} \cdot D_{EN}$
AEROTRIANGULAÇÃO— COMP. EM FAIXAS: $M_f = \pm 0,07 \cdot 10^{-3} \cdot D_{EN}$	APOIO TERRESTRE EM TODOS OS MODELOS E PRÉ-SINALIZAÇÃO $M_f = M_{pp} = \pm 0,02 \cdot 10^{-3} \cdot D_{EN}$
D_{EN} - DENOMINADOR DA ESCALA DA FOTO (NEGATIVO).	

TABELA 5

APARELHOS RESTITUIDORES	PODER DE RESTITUIÇÃO OU AMPLIAÇÃO MÁXIMA DAS FOTOS AÉREAS	OBSERVAÇÕES
WILD A-10	16 X ESCALA-FOTO	GRANDE ANGULAR E SUPER GRANDE ANGULAR. ÂNGULO NORMAL
WILD A-7	16 X ESCALA-FOTO	
WILD A-5	5 X ESCALA-FOTO	
WILD B-8	5 X ESCALA-FOTO	
PLANICART ZEISS E2	3,5 X ESCALA-FOTO	
PLANICART ZEISS E2	16 X ESCALA-FOTO	
PLANIMAT ZEISS	16 X ESCALA-FOTO	
KELSH PLOTTER	5 X ESCALA-FOTO	
KERN PG-2	4 X ESCALA-FOTO	
AEROMULTIPLEX	2,5 X ESCALA-FOTO	

TABELA 6

BIBLIOGRAFIA

- 1) Arcoverde de A. Cavalcanti, Benjamin — “O PROCESSO DO MAJOR EMÍLIO WOLF PARA O EMPREGO DO ESTEREOMICRÔMETRO” — ANUÁRIO Nº6 da DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO — Rio de Janeiro — 1955;
- 2) Ricci, Mauro-Petri, Setembrino — “PRINCÍPIOS DE AEROFOTOGRAMETRIA E INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICA” — CIA. EDITORA NACIONAL — São Paulo — 1965;
- 3) Arcoverde de A. Cavalcanti, Benjamin — “CORREÇÕES DE ALTURA NO ESTEREOGRAMA” — SERVIÇO GEOGRÁFICO E HISTÓRICO DO EXÉRCITO — Rio de Janeiro — 1943;
- 4) O. Cavalleiro dos Santos, Harold — “O FATOR C DOS ESTEREORESTITUIDORES” — ANUÁRIO Nº7 da DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO — Rio de Janeiro — 1956;
- 5) Arcoverde de A. Cavalcanti, Benjamin — “CONDIÇÕES E SOLUÇÕES PARA PEQUENOS RESTITUIDORES TOPOGRÁFICOS” — ANUÁRIO Nº18 da DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO — Rio de Janeiro — 1968/1969;
- 6) Moretsohn Brandi, Paulo — “CRITÉRIOS ADOTADOS NOS EUA E NA EUROPA, PARA ANÁLISE DAS PRECISÕES FOTOGRAMÉTRICAS” — REVISTA BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA Nº1 — SOCIEDADE BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA — Rio de Janeiro — Novembro de 1970;
- 7) Fermin Navas Zamora, Leonel — “ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS PARA CONTRATAÇÃO DE SERVIÇOS CARTOGRAFICOS” — IVº CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA — Belo Horizonte — Julho de 1969;
- 8) Francisco P. N. de Andrade, Dinarte — “TOLERÂNCIA DA ORIENTAÇÃO ABSOLUTA” — REVISTA BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA Nº17 — SOCIEDADE BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA — Rio de Janeiro - Dezembro de 1976;
- 9) Castello Branco Filho, Moysés — “AVALIAÇÃO DA PRECISÃO DE UMA CARTA PELO ERRO MÉDIO QUADRÁTICO” — ANUÁRIO Nº17 da DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO — Rio de Janeiro — 1967;
- 10) Daniel, Roger — “CURSO DE FOTOGRAMETRIA” — INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL DE PARIS — DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO — Rio de Janeiro — 1949;
- 11) The American Society Of Photogrammetry — “MANUAL OF PHOTOGRAMMETRY” — 4ª Edição — EUA — 1980;
- 12) Notari, José Moura — “SELEÇÃO DE INSTRUMENTOS FOTOGRAMÉTRICOS” — INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA — Rio de Janeiro — 1969;
- 13) Novaes, José Roberto Duque — “TESTE DE CARTAS” — REVISTA BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA Nº2 — SOCIEDADE BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA — Rio de Janeiro - Março de 1971;
- 14) Lima, Divaldo Galvão — “CARTOGRAFIA METROPOLITANA” — REVISTA BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA Nº22 — SOCIEDADE BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA — Rio de Janeiro - Dezembro de 1978;
- 15) Karara, H. H. — “POSSIBILIDADES E LIMITAÇÕES DA AEROTRIANGULAÇÃO” — ANUÁRIO Nº14 da DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO — Tradução de Santin, Ney Cipriani — Rio de Janeiro — 1964;
- 16) Fonseca, Ney da — Santin, Ney Cipriani — “TESTES EXPERIMENTAIS DE AJUSTE DE UM BLOCO DE AEROTRIANGULAÇÃO PELO PROGRAMA U.S.G.S.” — ANUÁRIO Nº20 da DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO — Rio de Janeiro — 1971;
- 17) Vieira, Antônio J. B. — Oliveira, Edson L. — Silva, He-loiza H. da — Araki, Hideo — Brunetti, Mauricio F. — “UMA SUGESTÃO ONDE SE COMBINAM A SEGURANÇA DO TRÁFEGO E A PRÉ-SINALIZAÇÃO FOTOGRAMÉTRICA” — REVISTA BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA Nº 39 — SOCIEDADE BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA — Rio de Janeiro — Janeiro de 1986;
- 18) Barreto, Aristides — “MEDIDAS CONVENIENTES, ECONÔMICAS E PRÁTICAS PARA O MAPEAMENTO DO TERRITÓRIO NACIONAL A CURTO PRAZO” — REVISTA BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA Nº5 — SOCIEDADE BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA — Rio de Janeiro — Dezembro de 1971;
- 19) Mesquita, Paulo Ferraz de — “AEROFOTOGRAMETRIA” — VOLUME I da ENCICLOPÉDIA TÉCNICA UNIVERSAL — Editora Globo — Porto Alegre — 1958;
- 20) Fonseca, Ney da — “LEVANTAMENTO CADASTRAL DAS ÁREAS TERMINAIS DA PONTE RIO-NITERÓI” — ANUÁRIO Nº 18 da DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO — Rio de Janeiro — 1968/1969;
- 21) Torres, Edson Rodrigues — “SOBRE A PRECISÃO DOS LEVANTAMENTOS AEROFOTOGRAMÉTRICOS” — REVISTA DA ESCOLA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS Nº 16 — Belo Horizonte — Fevereiro de 1971;
- 22) Serviço Geodésico Interamericano — “PROCEDIMIENTO DEL ESTEREOCOMPILADOR KLSH” — Traducido por la Escuela Cartográfica — Fort Clayton — Zona del Canal — Panamá — 1957;
- 23) Serviço Geodésico Interamericano — “LEVANTAMIENTO DE MAPAS CON EL MULTIPLEX” — Traducido por la Escuela Cartográfica — Fort Clayton — Zona del Canal — Panamá — 1957;
- 24) Bausch — Lomb — Wild Heerbrugg — Carl Zeiss — Kern Swiss — “CATÁLOGOS DIVERSOS”.