

### 1.4.3 Análise do voo fotográfico

O voo fotográfico não é realizado em regra por engenheiros geoespaciais, mas a sua qualidade é controlada posteriormente por eles. Da qualidade do voo depende a qualidade e a precisão dos produtos fotogramétricos.

De posse das fiadas de fotografias do voo em formato digital, há que analisar:

- a qualidade da fotografia em si (luminosidade homogênea, ausência de nuvens e de sombras profundas, arrastamento dentro dos limites, contraste, nitidez, etc.)
- a verticalidade da foto, caso se trate de um voo vertical
- as linhas de voo (eixos de fiadas)
- as sobreposições entre fotos e entre fiadas
- a homogeneidade da escala ao longo do bloco

Tanto a presença de nuvens como a de sombras profundas impossibilita a restituição das zonas ocultas. Quanto à cobertura por nuvens, pode acontecer que a zona oculta numa faixa já não esteja oculta na faixa seguinte (a qual foi obtida num momento diferente, podendo as nuvens entretanto ter alterado a posição ou a respetiva densidade).

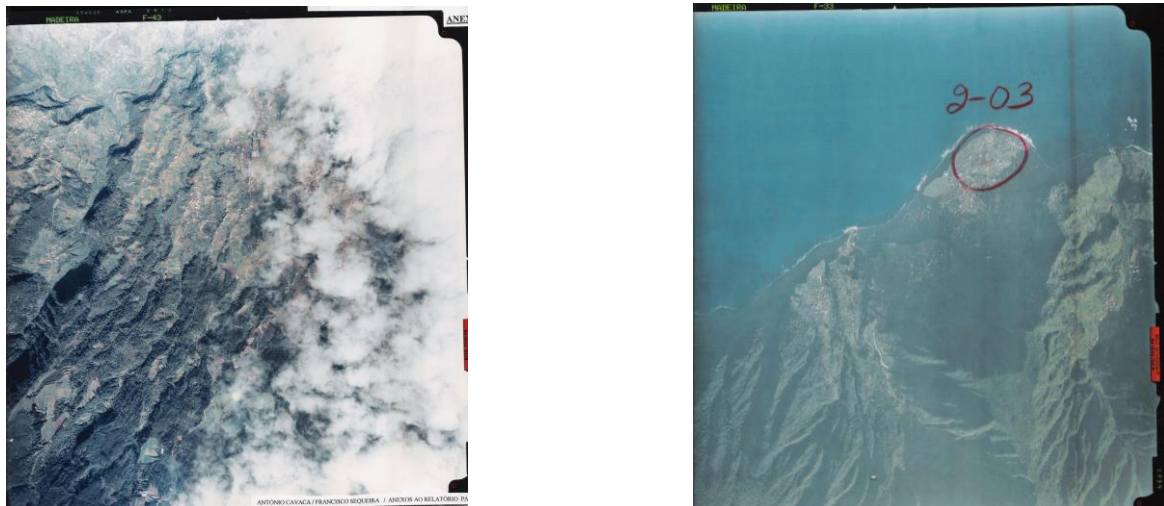


Figura 1.4.3.1 - Exemplos de fotografias não aceitáveis por cobertura por nuvens (esq.) e sombra profunda (dir. abaixo do círculo)

Enquanto a estereorrestituição dessas zonas poderá em grande parte ser realizada (desde que a cobertura por nuvens não seja total), a ortorretificação dessas imagens é impossível, pois, como é lógico, não deve constar qualquer nuvem numa ortofoto. Quanto às sombras profundas devidas ao relevo, elas impossibilitam qualquer tipo de restituição na zona oculta. Nas imagens de câmaras aéreas digitais que apresentam uma resolução radiométrica muito superior à do filme analógico (12 bits em vez de 8 bits) é possível restringir as sombras profundas a áreas muito menores, visto que é possível reconhecer pormenores suficientes para restituir nas zonas de sombra desde que se altere a luminosidade e o contraste localmente no momento de visualização e restituição no monitor do computador.



Figura 1.4.3.2 - Imagem da câmara digital DMC Z/I. Detalhes visíveis em zonas de sombra “profunda” limitadas pela linha branca (Lauenroth)

Se a linha de voo apresentar grandes desvios em relação ao planeado, pode acontecer que haja lacunas entre fiadas ou que todo o bloco se apresente rodado em relação ao que foi planeado.

Assumindo uma cobertura com sobreposições homogêneas ao longo do bloco, a análise das sobreposições e da escala é geralmente feita por amostragem representativa das fotografias, ou seja, perante o mosaico total da cobertura, é determinada a escala da foto, com base na carta topográfica, de três em três fotografias ou mesmo a intervalos maiores. A mesma regra se aplica para a determinação de sobreposições longitudinais e laterais.

Finda a análise do voo é elaborado um relatório, e consoante a gravidade das falhas encontradas, poderá o voo ter que ser repetido no seu todo ou em parte. Existe um regulamento para a execução de voos fotogramétricos em Portugal publicado pela Autoridade Nacional de Cartografia (Direção Geral do Território) onde estão compiladas todas as normas e tolerâncias aceitáveis para os diferentes parâmetros de voo - Regulamento Técnico para as Coberturas Aerofotográficas em Portugal (RTCAP).

Satisfazendo o voo fotográfico as condições exigidas no planeamento, dentro das tolerâncias do RTCAP, está-se em posição de encomendar as imagens digitais que interessam ao projeto e passar à fase seguinte. Normalmente é elaborado um mapa índice constituído pela implantação sobre uma base cartográfica (em formato digital) de todas as fotografias do projecto enquadradas pelo centro ou pela mancha (limites), com a respetiva identificação e data de voo.

## 1.5. Georreferenciação

A georreferenciação constitui a segunda fase das operações preliminares da cadeia de produção cartográfica. De posse da cobertura fotográfica de uma zona é necessário determinar a relação existente entre fotografias e terreno, a georreferenciação, a qual é inequivocamente descrita pelos parâmetros de orientação externa de cada fotografia da cobertura ( $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa$ ). Essa operação pode ser realizada de um modo direto, semi-direto ou indireto. O modo direto, também denominado georreferenciação direta, exige a utilização de um instrumento GNSS-IMU a bordo do avião associado à câmara durante o voo fotográfico. O modo semi-direto apenas utiliza GNSS a bordo durante o voo fotográfico e denomina-se geralmente por aerotriangulação com GNSS. O modo indireto, normalmente denominado aerotriangulação, não exige nenhuns instrumentos a bordo para além da câmara fotográfica aérea, mas necessita do chamado apoio geodésico. O apoio geodésico é constituído por um conjunto de pontos do terreno bem visíveis na cobertura fotográfica e que vai ser utilizado para calcular os parâmetros de orientação externa das fotografias do bloco.

### 1.5.1 Escolha de pontos de apoio nas fotografias

Os pontos de apoio (geodésico) devem ser pontos bem identificáveis em mais do que uma fotografia. Às diferentes imagens do mesmo ponto do terreno em fotografias distintas chama-se pontos homólogos. Normalmente, por causa da cobertura fotográfica ser realizada com sobreposições longitudinal e lateral, a maioria dos pontos numa fotografia tem pontos homólogos em fotografias vizinhas. No entanto, como cada fotografia é obtida de um ponto de vista diferente, acontece frequentemente que um ponto não tenha homólogo em fotografias vizinhas (por estar oculto) ou que este não esteja bem definido de modo a garantir uma boa medição de coordenadas. Daí a importância da escolha criteriosa dos pontos de apoio.

Os pontos de apoio dividem-se geralmente em

- pontos triangulados (PT ou TP)
- pontos fotogramétricos (PF)

#### 1.5.1.1. Pontos Triangulados

Enquanto é absolutamente necessário saber quais as coordenadas objeto (ou terreno) dos pontos fotogramétricos, as quais deverão ser determinadas de um modo direto em campo, os pontos triangulados verão as suas coordenadas objeto determinadas indiretamente por aerotriangulação, em gabinete, e primeiramente destinam-se a ser medidos nas fotos, e não no terreno. Por isso, a sua escolha deve recair sobre pontos bem visíveis mas não necessariamente acessíveis no terreno como é exigido para os PFs. Consoante a função que os PTs desempenham no bloco de fotografias, podem ainda ser subdivididos em duas classes: os pontos que servem para ligação entre modelos numa mesma fiada designam-se por pontos de passagem (em inglês: Passpoints); os pontos que servem de ligação entre fiadas adjacentes designam-se por pontos de ligação (em inglês: Tiepoints).

De um modo geral, atendendo a que nem todas as coberturas fotográficas têm a configuração regular ideal com sobreposições homogêneas em todo o bloco (sobretudo as coberturas por UAV são por norma irregulares) mais recentemente adoptou-se a designação de 'tiepoints' - TP, para todos os pontos homólogos independentemente de ligarem fotografias, modelos ou fiadas entre si.

A quantidade de pontos de apoio necessária depende do tipo de restituição a realizar. O mínimo teórico de pontos de apoio para orientar uma fotografia espacialmente é: três pontos não colineares. A orientação espacial de um modelo estereoscópico é também conseguida à custa de um mínimo de três pontos não colineares.

Para que não haja grandes zonas de extrapolação, é aconselhado localizar os pontos de apoio de modo a formarem um triângulo de maior área possível dentro da área da foto ou do modelo. Isso não evita, no entanto, que continue a haver uma grande área da imagem (ou modelo) não incluída no triângulo, visto que o formato desta não é triangular, mas quadrado ou rectangular. Quatro pontos de apoio localizados nos extremos do modelo já permitem minimizar a zona de extrapolação, para além de matematicamente permitirem um controlo de qualidade da orientação espacial calculada (orientação absoluta do modelo). No caso de uma fotografia individual, um ponto de apoio adicional na zona central da foto estabiliza a geometria do feixe melhorando a precisão da orientação externa calculada. Combinando os critérios apresentados para a foto e para o modelo numa só solução, chegou-se à conclusão que o número mínimo de pontos de apoio, do ponto de vista técnico será de seis por modelo, o que corresponde a nove por foto (no caso de voos com sobreposição longitudinal superior a 50%) com a localização indicada na figura 1.5.1.1.1., que coincide com as posições denominadas tradicionalmente como pontos de Von Gruber.

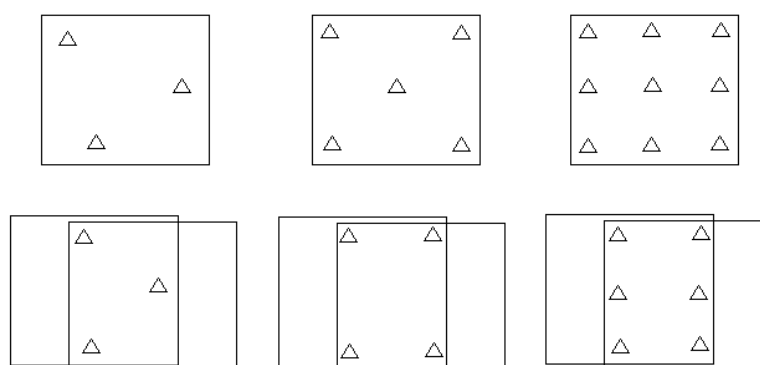


Figura 1.5.1.1.1 - Localização de pontos de apoio em fotos e modelos. Esquerda: mínimo teórico. Centro: área de extrapolação mínima. Direita: combinação dos dois critérios para foto e modelo

A distribuição de pontos de apoio num bloco deve ser tal, que cada ponto apoie o maior número possível de fotografias simultaneamente, garantindo-se assim uma ligação de modelos e de fiadas por pontos homólogos que favorece a estabilidade da geometria do bloco, o que se reflecte na precisão das orientações calculadas. A figura 1.5.1.1.2 ilustra a distribuição mínima (na prática) de pontos de apoio num bloco de três fiadas com cinco fotografias por fiada.

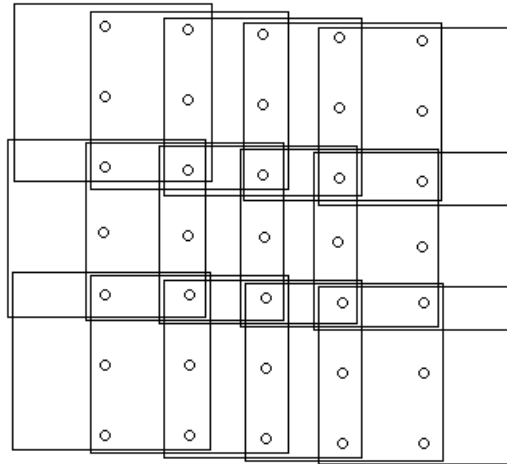


Figura 1.5.1.1.2 - Localização de pontos de apoio num bloco na sua configuração mínima

As características visuais destes pontos de apoio têm de ser tais que os tornem conspícuos (bem diferenciáveis do meio envolvente e bem identificáveis) em todas as fotos onde aparecem, de modo a garantir uma boa precisão na medição das suas coordenadas foto.

#### 1.5.1.2. Pontos Fotogramétricos

Utilizando a aerotriangulação para coordenar os pontos de apoio de um bloco de fotografias, só haverá necessidade de coordenar um número reduzido desses pontos diretamente no campo, os tais Pontos Fotogramétricos ou PFs. Regra geral para a escolha da localização desses pontos num bloco de forma retangular é a seguinte: localiza-se um PF duplo em cada canto do bloco, um PF de 3 em 3 modelos ao longo da primeira e da última fiada, e um PF de 3 em 3 modelos em todas as zonas de sobreposição lateral. Os PFs do interior do bloco só necessitam de ter a cota determinada (PFs altimétricos) enquanto os da periferia necessitam de ter as três coordenadas determinadas (PFs completos).

Os pontos fotogramétricos podem ser pré-sinalizados, como se descreverá a seguir ou naturais, ou seja, serem materializados por objetos existentes na paisagem com uma forma favorável. Esta última opção é mais económica mas pode redundar em menos precisão se os pontos escolhidos não forem adequados.

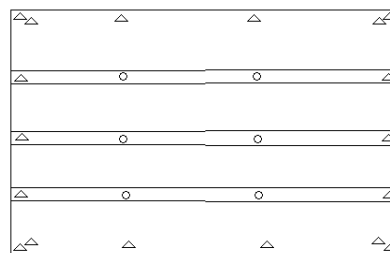


Figura 1.5.1.2.1 - Distribuição convencional de PFs num bloco

### 1.5.2. Sinalização de PFs no terreno

A sinalização aqui referida realiza-se antes do voo pelo que é também conhecida por pré-sinalização. Trata-se da marcação no terreno de marcas cujos centros virão a ser coordenados no terreno pelo topógrafo, as quais deverão ter uma forma que se veja bem na fotografia aérea. O objetivo dos PFs pré-sinalizados é proporcionar medições mais precisas de coordenadas foto, pelo facto de ser inequivocamente identificável na foto o ponto cujas coordenadas terreno foram determinadas pelo topógrafo. Uma correspondência precisa entre ponto imagem e ponto objeto nos PFs é essencial para a precisão da determinação da orientação externa da foto ou da orientação absoluta do modelo estereoscópico ou para permitir uma georreferenciação de precisão de todas as fotos de um bloco.

A operação de pré-sinalização deve ter em conta os seguintes aspetos:

- localização das marcas
- forma das marcas
- dimensão das marcas
- material de marcação
- cor utilizada

#### 1.5.2.1 Localização

A localização das marcas deverá ser planeada com base no mapa de voo da zona a levantar e deve satisfazer os requisitos para a distribuição geral e localização estratégica de PFs num bloco, a qual depende do objetivo a que o bloco se destina (tipo de aerotriangulação a utilizar, orientação par a par, orientação individual, etc). Cada marca deverá localizar-se em terreno plano horizontal, com boa visibilidade para cima e longe de objetos altos (edifícios, árvores, aterros) de modo a garantir a sua mensurabilidade em várias fotografias (quanto maior o número de fotos onde um mesmo ponto é medido mais fiáveis serão as coordenadas terreno calculadas). Locais privilegiados para as marcas de PFs pré-sinalizados são as faixas de socorro de auto-estradas, passeios largos, parques de estacionamento, clareiras em florestas e prados.

#### 1.5.2.2 Forma

As marcas são constituídas por:

- uma figura geométrica regular cujo centro geométrico constitui o ponto fotogramétrico propriamente dito (círculo, quadrado, triângulo equilátero)
- de uma a quatro faixas retangulares irradiando da marca central cujo objetivo é facilitar a localização das marcas na fotografia aérea não as confundindo com qualquer outro objeto.

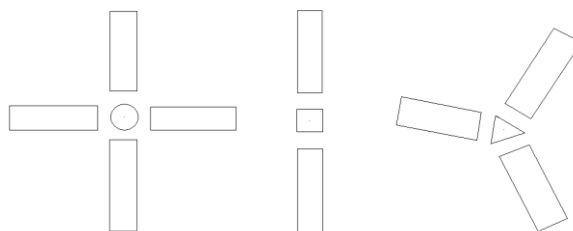


Figura 1.5.2.2.1 - Várias marcas de pré-sinalização

Apenas o espaço disponível no terreno para a sinalização de cada marca é determinante para a utilização de uma ou de mais faixas identificadoras. Os PFs sinalizados com três e quatro faixas identificam-se mais facilmente. Quanto à marca central, a experiência dita que o círculo proporciona leituras mais precisas de coordenadas na foto, pois em geral as distorções geométricas que o afetam permitem, ainda assim, uma identificação precisa do centro (o ponto que é coordenado), o mesmo já não acontecendo ao quadrado e ao triângulo. Estes últimos só deverão ser usados em voos de grande escala nos quais as distorções não são tão evidentes.



Figura 1.5.2.2.2 - Marcação de PF pré-sinalizado (Cavaca e Sequeira, Relatório de Estágio)

### 1.5.2.3 Dimensões

As dimensões das marcas dependem da escala da cobertura fotográfica que será realizada. Em teoria, a resolução da imagem sobre a qual serão medidas as coordenadas foto é um critério de partida para determinar a dimensão da marca pré-sinalizada. Considerando  $d$  igual ao diâmetro do círculo central (ou ao lado do quadrado ou ao lado do triângulo respetivamente) como o único parâmetro variável em função do qual se constrói toda a marca, dever-se-á tomar  $d$  igual a um múltiplo ímpar da dimensão do pixel no terreno (normalmente de 3 a 5 vezes o GSD). O esquema seguinte sugere as restantes dimensões da marca de centro circular, que se podem adaptar às de centro quadrado ou triangular. Não só a resolução da imagem, como também o contraste local, a luminosidade e as próprias condições atmosféricas na altura em que é realizado o voo são fortemente determinantes para a boa visualização dos PFs pré-sinalizados na fotografia aérea e consequentemente para a precisão da sua medição.

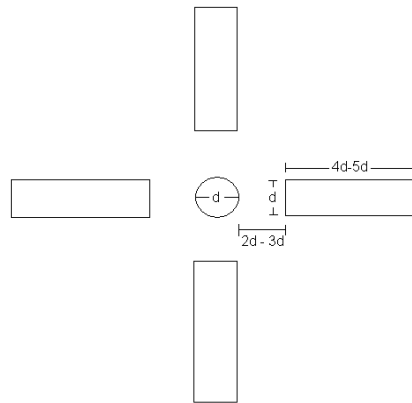


Figura 1.5.2.3.1 - Medidas aconselhadas para marcas de pré-sinalização

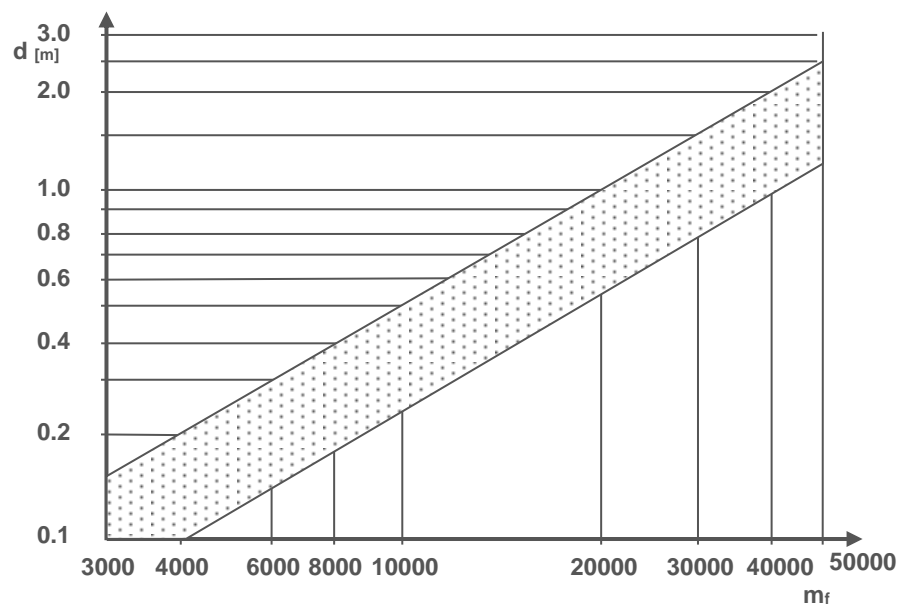


Figura 1.5.2.3.2 - Gráfico de  $d$  em função da escala da foto

#### 1.5.2.4 Material

As marcas são geralmente materializadas com tinta ou telas plásticas fixas ao chão. Na escolha da tinta a utilizar há que ponderar o grau de permanência pretendido para a marca. Do ponto de vista fotogramétrico, será desejável que as marcas sejam o mais permanentes possível, pelo que não se aconselha uma pintura que desapareça numa eventual chuvada próxima. No entanto, a localização de certas marcas, sobretudo em zonas urbanas, pode levantar problemas de ordem estética ou técnica (por ex. confundir-se com outros sinais na estrada) sendo então desejável que a sua permanência seja curta, havendo no entanto que garantir que a marca permanece em boas condições até ser realizado o voo e até o PF ser coordenado pelo topógrafo.

Quanto à cor a utilizar, ela deve ser tal que o contraste com o meio envolvente seja grande. Para imagens pancromáticas, cores claras como o branco e o amarelo são muito utilizadas, apesar do branco provocar por vezes uma reflexão da luz solar muito forte redundando em distorções geométricas do sinal. Para imagens RGB e IV usa-se frequentemente a cor vermelha que é bem captada pelos sensores.





Figura 1.5.2.4.1 - Coordenação de PF pré-sinalizado. (Cavaca e Sequeira, Relatório de Estágio)

### 1.5.3 Escolha de PFs Naturais

Caso não se pretenda ou não seja possível realizar aerotriangulação, todos os pontos de apoio referidos acima (de passagem e de ligação) têm de ser fotogramétricos, ou seja, têm de ser igualmente coordenados no terreno e por isso bem identificáveis não só na foto como também no terreno, para além de terem de ser acessíveis ao topógrafo que os vai coordenar. Neste caso, que atualmente é raro acontecer, se a área for extensa, normalmente coordenam-se apenas quatro pontos por modelo (nos cantos) em vez dos seis habituais, porque a determinação do apoio no campo é uma operação muito dispendiosa.

Tradicionalmente, as zonas onde se devem situar os PFs, eram assinaladas sobre as provas de contacto em papel das fotografias do bloco com um lápis dermatográfico. Eram geralmente marcadas com um círculo e identificadas com um código numérico ou alfanumérico único (Fig. 1.5.3.1), operação que se chamava “zonagem”.

Mais recentemente, esta fase de “zonagem” em papel foi substituída por uma “zonagem” digital na qual, com apoio do computador, são elaboradas fichas provisórias com ampliações das zonas de localização preferencial do ponto de apoio obtidas a partir da imagem digital, e identificadas com um código numérico ou alfanumérico (Fig. 1.5.3.2), o qual vai coincidir com a identificação do ponto de apoio que for coordenado nessa zona. Associada às fichas deve constar uma imagem completa com a indicação aproximada da zona ampliada para orientação geral.

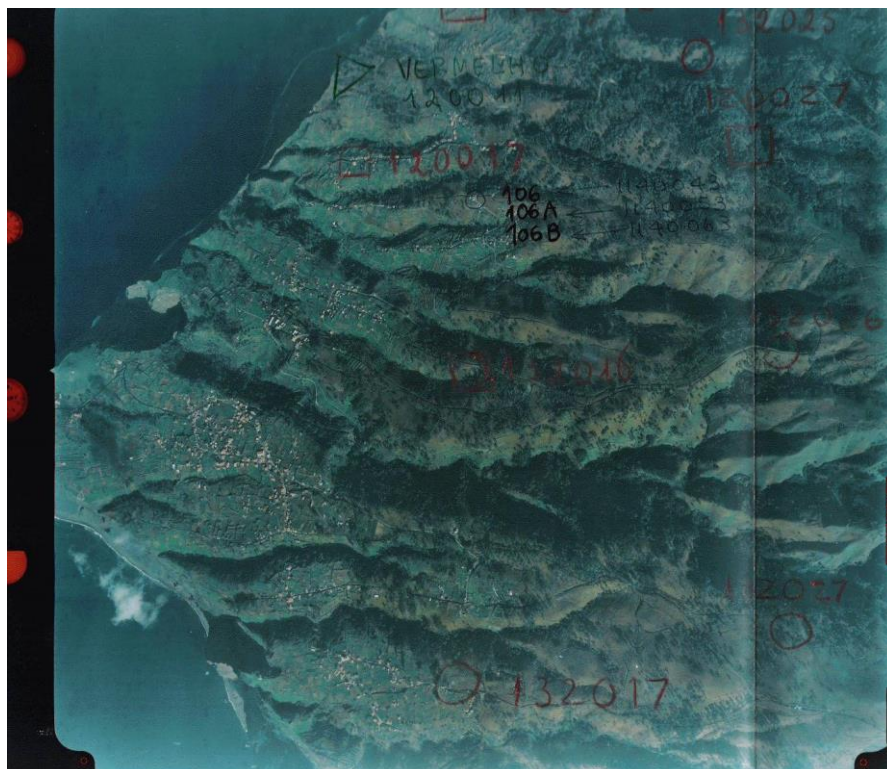


Figura 1.5.3.1 - zonas para pontos de apoio numa fotografia, marcadas com lápis dermatográfico (Cavaca e Sequeira, Relatório de Estágio)

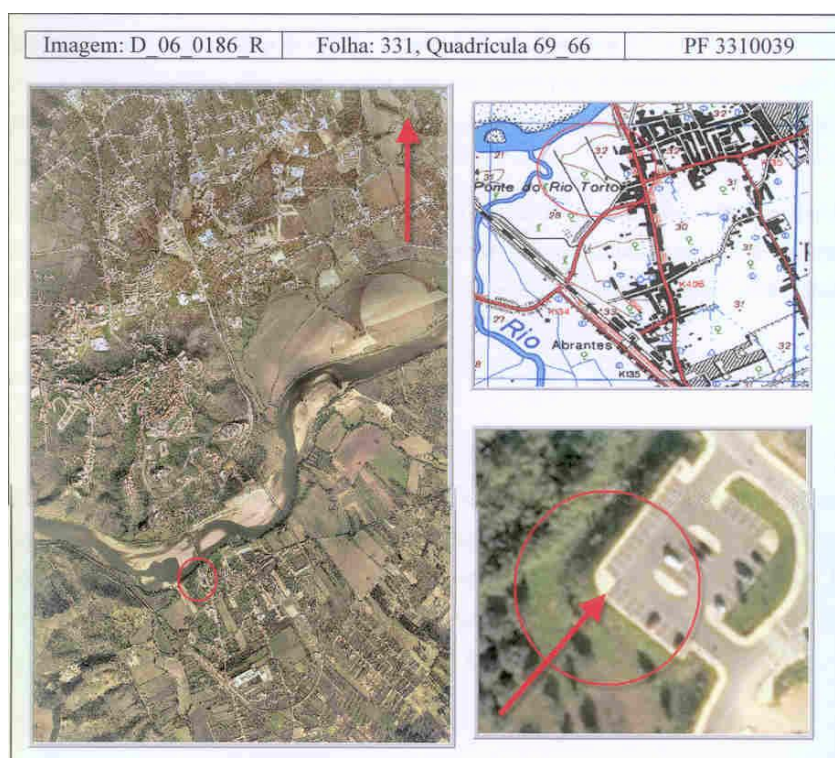


Figura 1.5.3.2 - Ficha provisória de marcação de ponto de apoio (Gaspar, Relatório de Estágio)

Enquanto a escolha da localização dos PFs pré-sinalizados se faz com base no mapa de voo seguindo os critérios já descritos em 1.5.2.1, as zonas de localização dos pontos fotogramétricos naturais a determinar no terreno deve obedecer a vários critérios, e deve ser feita observando o par de fotografias em causa em modo estereoscópico de modo a se poder avaliar as características do terreno e a acessibilidade para o topógrafo que se vai deslocar e os vai coordenar no local.

Bons pontos fotogramétricos são, em geral, pormenores no solo ou junto ao solo que apresentem uma forma geometricamente bem definida, contrastante com o meio envolvente e de carácter permanente, como por exemplo:

- cruzamento de eixos de vias
- intersecção de eixos de valas de irrigação
- esquinas de propriedades
- objectos isolados
- etc.

Exemplos de maus pontos fotogramétricos consistem em pormenores por vezes bem definidos na foto mas pouco definidos no terreno ou vice-versa ou ainda de carácter não permanente:


- esquinas arredondadas
- cruzamentos com ângulos pequenos
- pontos altos, árvores
- cantos de florestas
- pontos em aterros ou desaterros
- pontos em margens de cursos de água.

#### 1.5.4 Determinação de PFs no terreno

A escolha definitiva dos PFs é feita pelo topógrafo no campo após verificação das condições *in loco*. O PF, após terem sido determinadas as suas coordenadas topogeodesicamente, é gravado definitivamente numa ficha definitiva, que contenha um desenho (ou ampliação de fotografia aérea digital) que esclareça a localização do ponto no contexto geral da fotografia aérea, a descrição textual do mesmo (podendo ser substituída por uma foto esclarecedora obtida no local), a sua identificação inequívoca, as coordenadas M, P e cota determinadas bem como o método de coordenação utilizado para se poder avaliar da precisão das coordenadas obtidas.

PFs isolados são normalmente coordenados por intersecção directa ou inversa, podendo o PF eventualmente ser obtido por irradiação de um ponto auxiliar. Conjuntos de PFs são normalmente coordenados por poligonais. As cotas são determinadas, conforme a precisão exigida, por nivelamento trigonométrico ou geométrico. Actualmente, sempre que é possível, utilizam-se métodos de coordenação por GNSS. Prefere-se o método diferencial estático, estacionando um receptor num ponto de coordenadas conhecidas e estacionando um segundo receptor em cada ponto a coordenar durante 10 a 15 minutos. O receptor fixo pode ser substituído, caso possível, pela utilização dos dados de uma rede de estações GNSS permanente. O receptor móvel deve ser de dupla frequência e deve utilizar-se a fase das ondas portadoras como sinal, permitindo uma precisão centimétrica.




**FACULDADE DE CIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DE LISBOA**

**REGISTO DOS PONTOS FOTOGRAFÉTRICOS**

**P. F.: 006 – Muro da Capitania do lado da Avenida**

Coordenadas: **HG DATUM LISBOA Militares:**

M= ..... 113743,032

P= ..... 283207,127

Cota Terreno = ..... 3,675

Coordenadas: **HG DATUM 73**

M= ..... -86256,866

P= ..... -16789,796

Cota Terreno = ..... 3,675

**DESCRIÇÃO:**

Ponto situado junto à extremidade do Muro da Capitania do Porto de São Martinho do Porto, junto à Avenida Marginal. O Muro tem a altura de 1,28 metros.....


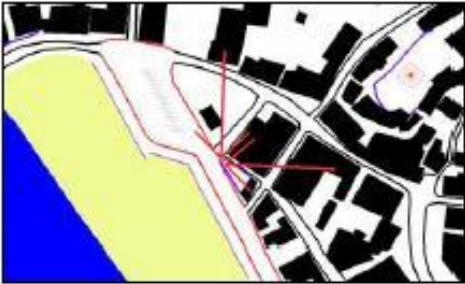

.....

.....

**Data de Aquisição:**

20 / Novembro / 2004

Elaborado por:




Figura 1.5.4.1 Exemplo de croquis - Ficha definitiva de PF.

A precisão exigida para a determinação das coordenadas dos PFs, depende da escala a que se destina a restituição e das limitações não só da imagem como do hardware/software utilizado na sua restituição.

Um dos indicadores numéricos para a precisão exigida baseia-se no erro de graficismo. Assim, admitindo uma tolerância para o erro geométrico no produto final (carta ou ortofoto) igual ao valor da incerteza devida ao graficismo (0.2 mm) e uma propagação igual do erro pelas três fases principais da cadeia de produção cartográfica (determinação de PFs no campo - determinação de pontos de apoio

por aerotriangulação - restituição) exige-se que o erro cometido na determinação das coordenadas dos pontos no terreno (na primeira fase) seja:

-em planimetria  $s_p[\text{cm}] \leq 1/3 \cdot 0,02 \cdot m_c$

$$s_p = \sqrt{sX^2 + sY^2}$$

onde  $m_c$  é o módulo da escala da carta a restituir sendo 0.02 [cm] o erro de graficismo.

Outro indicador baseia-se, não no produto final, mas sim na resolução geométrica da foto, a qual poderá ser utilizada para elaborar produtos em várias escalas. Assim sendo, o critério tolera uma incerteza em planimetria menor que o valor da resolução geométrica da imagem no terreno (o GSD em imagens digitais).

Em restituições digitais, a resolução geométrica é regida, então, pela dimensão do pixel (assumido como quadrado) da imagem (digitalizada ou digital de raiz). Exige-se, por este critério:

-em planimetria  $s_p \leq \text{pixel} \cdot m_f$

onde  $m_f$  - módulo da escala da foto e  $s_p = \sqrt{sX^2 + sY^2}$

Para a altimetria, toma-se como valor limite da incerteza da cota determinada por estereorrestituição o chamado erro de cota que se considera igual a 0.3 ‰ da altura média de voo. Pelo mesmo princípio referido anteriormente aplicado à deterioração da precisão altimétrica ao longo das três fases principais da cadeia de produção, exige-se uma incerteza na determinação dos PFs:

- em altimetria  $s_z \leq h \cdot 0,0001$  visto que  $1/3 \times 0,0003 = 0,0001$   
 $h$  = altura média de voo

Para determinados objetivos, como por exemplo a completagem de uma carta, poderá ser suficiente determinar as coordenadas de PFs em cartas já existentes, desde que sejam de qualidade e de escala maior. A incerteza associada a esses pontos terá como determinantes o erro de graficismo para a planimetria e um terço a um quinto da equidistância natural da carta para a altimetria.