

Métodos geodésicos (angular, distanciométrico) y fotogramétrico (objeto cercano) para la auscultación de estructuras arquitectónicas dinámicas

El objetivo que persigue una auscultación, tanto geodésica como fotogramétrica, es la determinación con gran precisión del posible desplazamiento de estructuras naturales (deslizamiento de tierras, glaciares, dunas,...) y de estructuras artificiales (presas, edificios, puentes,...).

En concreto, este artículo pretende mostrar las técnicas geodésico-fotogramétricas que hacen posible la determinación de la dinámica (asentamientos, desplomes) de edificios (Fig. 1).

José Juan de Sanjosé Blasco

Dr. Ingeniero en Geodesia, Cartografía y Sistemas de Información Geográfica
Departamento de Expresión Gráfica. Escuela Politécnica de Cáceres.
Universidad de Extremadura

Con la técnica geodésica (angular, distanciométrica) se puede medir una cantidad limitada de puntos en sus distintas observaciones o campañas, en cambio, con la técnica fotogramétrica se puede obtener ilimitados

datos, debido a que la información del objeto queda almacenada en las fotografías.

Siempre la metodología fotogramétrica debe apoyarse en la técnica geodésica, puesto que es necesario determinar al menos tres puntos en el espacio para realizar una transformación tridimen-

Con la técnica fotogramétrica se puede obtener ilimitados datos

se puede medir una cantidad limitada de puntos en sus distintas observaciones

sional entre los puntos geodésicos y las coordenadas del modelo fotográfico (4).

DESARROLLO DE LA TÉCNICA GEODÉSICA

Elementos de campo de la auscultación geodésica

Las observaciones de campo deben disponer de los siguientes elementos:

● **Estaciones:** En estos puntos se estaciona el instrumental topográfico (teodolito, estación total), y desde ellos se realiza la observación. Las estaciones deben cumplir la condición de ser estables, por ello es aconsejable fabricar pilares de hormigón.

Las observaciones deben realizarse desde tres o más estaciones para tener redundancia en los cálculos.

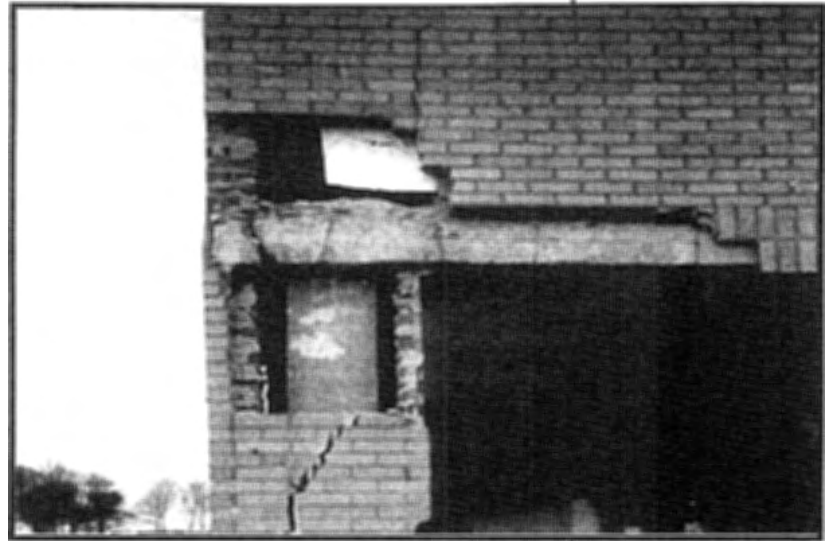
● **Señales de referencia:** Estos elementos también se colocan en puntos estables. Sobre dichas señales se hace puntería para las lecturas angulares de referencia (Fig. 2).

● **Dianas de puntería:** Estos elementos se moverán de forma solidaria con la estructura que quiere analizarse. Pueden utilizarse como objetos de puntería ciertos detalles de la fachada del edificio (esquinas de cornisas, bordes de balcones o ventanas, grietas...). También se puede hacer puntería sobre objetos preseñalizados (dianas) (Fig. 3).

En cualquier caso, las dianas deben ser elementos muy bien definidos y deben cubrir toda la estructura formando entre ellos una malla.

Metodología geodésica de observación

Una vez está colocado el instrumental topográfico sobre la estación debe establecerse una determi-



Grietas y desprendimientos de una fachada

nada lectura del limbo horizontal en dirección de una señal de referencia. Posteriormente, se realizan las siguientes observaciones:

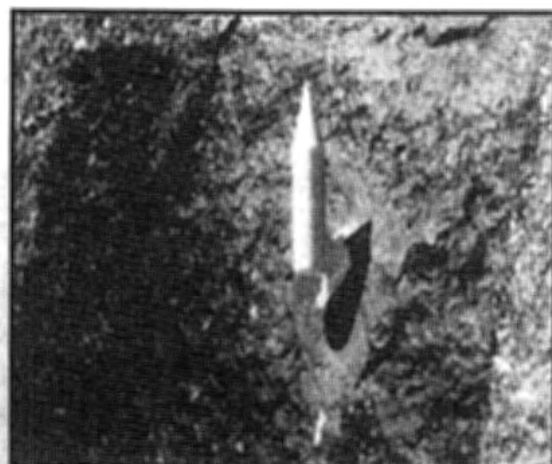
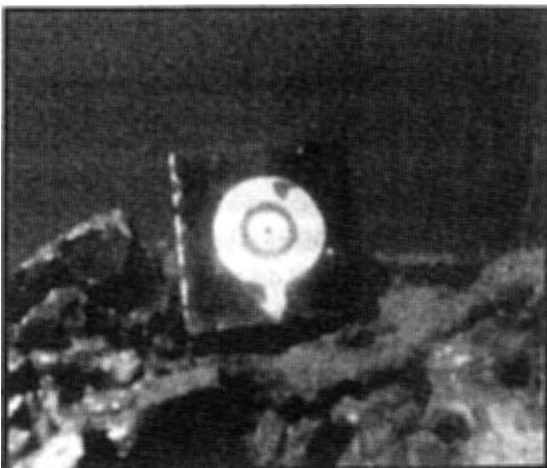
● **Angulares:** Medición de los ángulos entre la señal de referencia y cada una de las dianas. La técnica de observación es la intersección directa angular.

● **Distancias:** Mediante una "estación total" capaz de medir distancias sin prisma puede determinarse la distancia entre la estación y cada diana. La técnica de observación es la intersección directa de distancias.

Con los datos de la primera observación puede determinarse el acimut y la distancia reducida entre las estaciones y las dianas (1):

● **Acimut:**
$$\theta_{Estación}^{Diana} = \arctg \frac{\Delta x_{Estación}^{Diana}}{\Delta y_{Estación}^{Diana}}$$

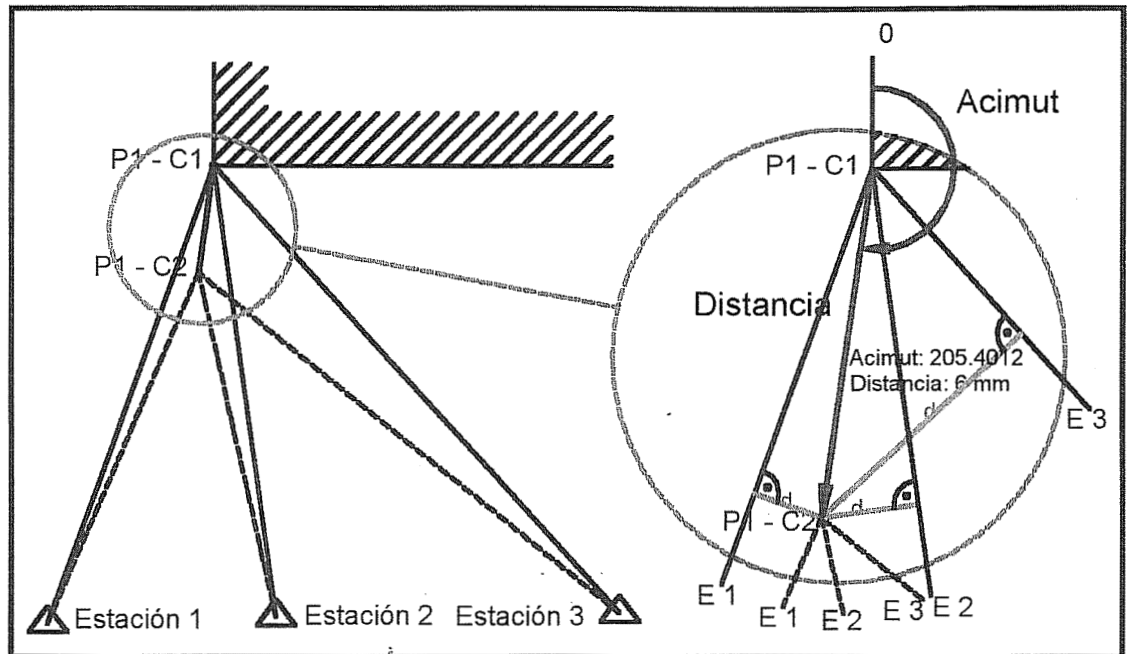
● **Distancia reducida:**
$$D_{Estación}^{Diana} = \left[(\Delta x_{Estación}^{Diana})^2 + (\Delta y_{Estación}^{Diana})^2 \right]^{1/2}$$



Diversas formas de las señales de puntería (referencias y dianas)

Desplazamiento de la diana mediante diferencias angulares

3



La representación gráfica se realiza a escala real 1/1

Metodología de cálculo

Desplazamiento de las dianas por diferencias angulares

Para una determinada estación en una campaña anterior $n-1$, el ángulo que se forma entre una señal de referencia y una cualquiera de las dianas es β . En una campaña actual n , el ángulo que se obtiene interviniendo los mismos elementos que en la campaña anterior es β' . Evidentemente, esto ocurrirá en el supuesto de que se produzca un desplazamiento de la diana ⁽³⁾.

Entre las lecturas angulares resultantes de las observaciones de una estación a las dianas existe un incremento angular $\Delta\beta''$ este incremento es la diferencia entre β' y β .

A continuación se calculan los desplazamientos correspondientes a cada diana desde cada estación de observación.

$$d_{\text{Estación}}^{\text{Diana}} = \frac{\Delta\beta''}{206265''} \cdot D_{\text{Estación}}^{\text{Diana}}$$

Con los desplazamientos deducidos para cada diana desde las distintas estaciones y con los acimutes aproximados calculados $\theta_{\text{Estación}}^{\text{Diana}}$, se puede realizar el diseño gráfico del desplazamiento. Los desplazamientos, al ser muy pequeños, se pueden considerar perpendiculares a la visual (Fig. 3).

Si las visuales (intersección directa) estuvieran exentas de errores determinarían un punto, sin

embargo, en la realidad esto no es así. Por lo tanto, se formará un polígono de indeterminación desde el cual se obtendrá el punto de intersección.

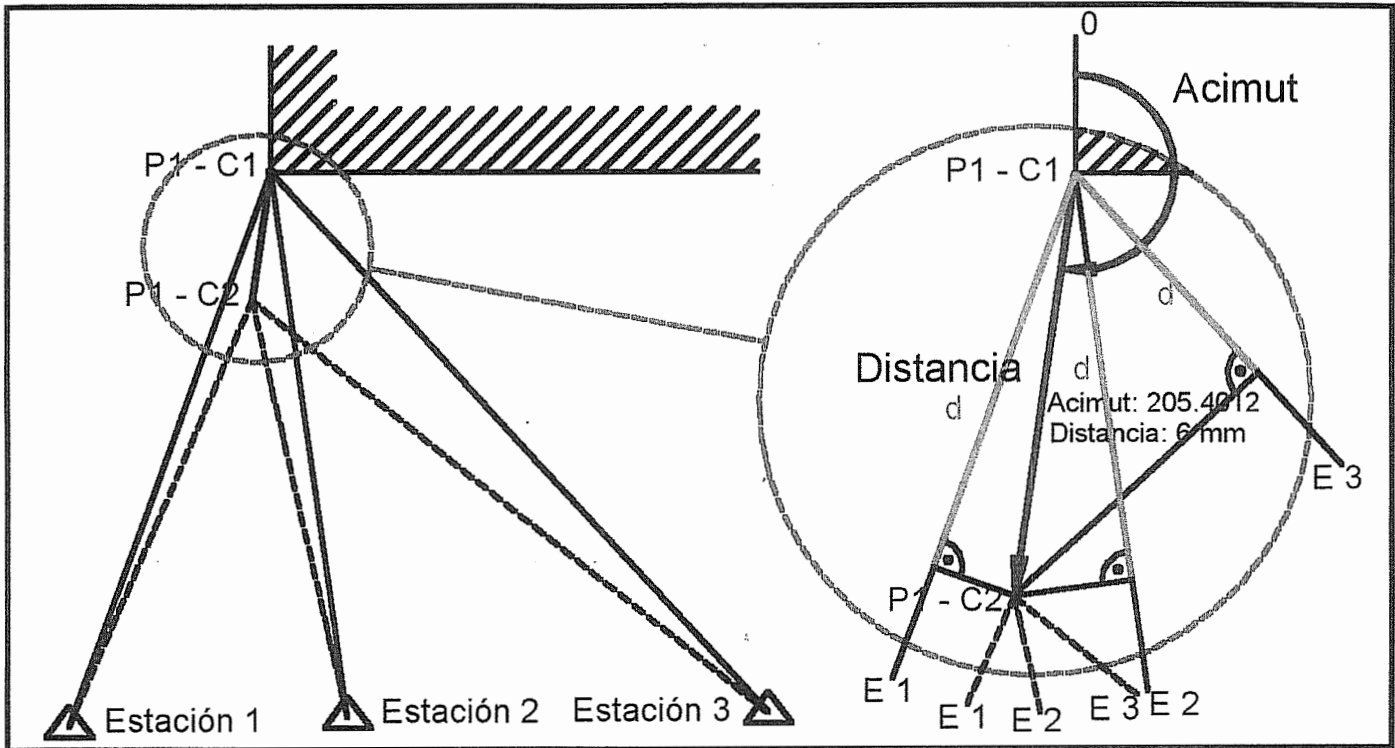
Desplazamiento de las dianas por diferencias de distancias

La única operación que se realiza entre dos campañas empleando la diferencia de distancias es la resta de sus correspondientes distancias reducidas (estación-diana).

Se designa por Δd , a la diferencia entre la distancia en una campaña anterior con la distancia en una campaña actual. Si el valor de Δd es negativo significa que la diana se ha alejado de la posición de la estación respecto a la campaña anterior. Los incrementos de las distancias se representan en la dirección de la visual o acimut y la intersección de los incrementos desde cada pilar dará la nueva posición de la diana (Fig. 4).

Representación gráfica de los desplazamientos de las dianas

Tanto en el método de las diferencias angulares como en el método de las diferencias de distancias, la representación gráfica se realiza a escala real 1/1, pero puede ocurrir que el desplazamiento de las dianas sea tan pequeño que no sea representativo a esa escala, y por lo tanto se tenga que dibujar a escalas: 2/1, 5/1, e incluso 10/1. Una vez dibujados los desplazamientos sufridos por las dianas se procede a medir la distancia del vector de despla-



Desplazamiento de la diana mediante diferencias de distancias

4

miento y el ángulo que se produce entre el origen de los mismos (eje Y del sistema de coordenadas cartesiano) y la diana en la situación determinada con la observación actual (3).

Al final del trabajo se obtiene un listado del ángulo y distancia reducida del vector de desplazamiento

de cada diana. Los resultados de la última observación se introducen en el historial de la dinámica de cada diana (Fig. 5).

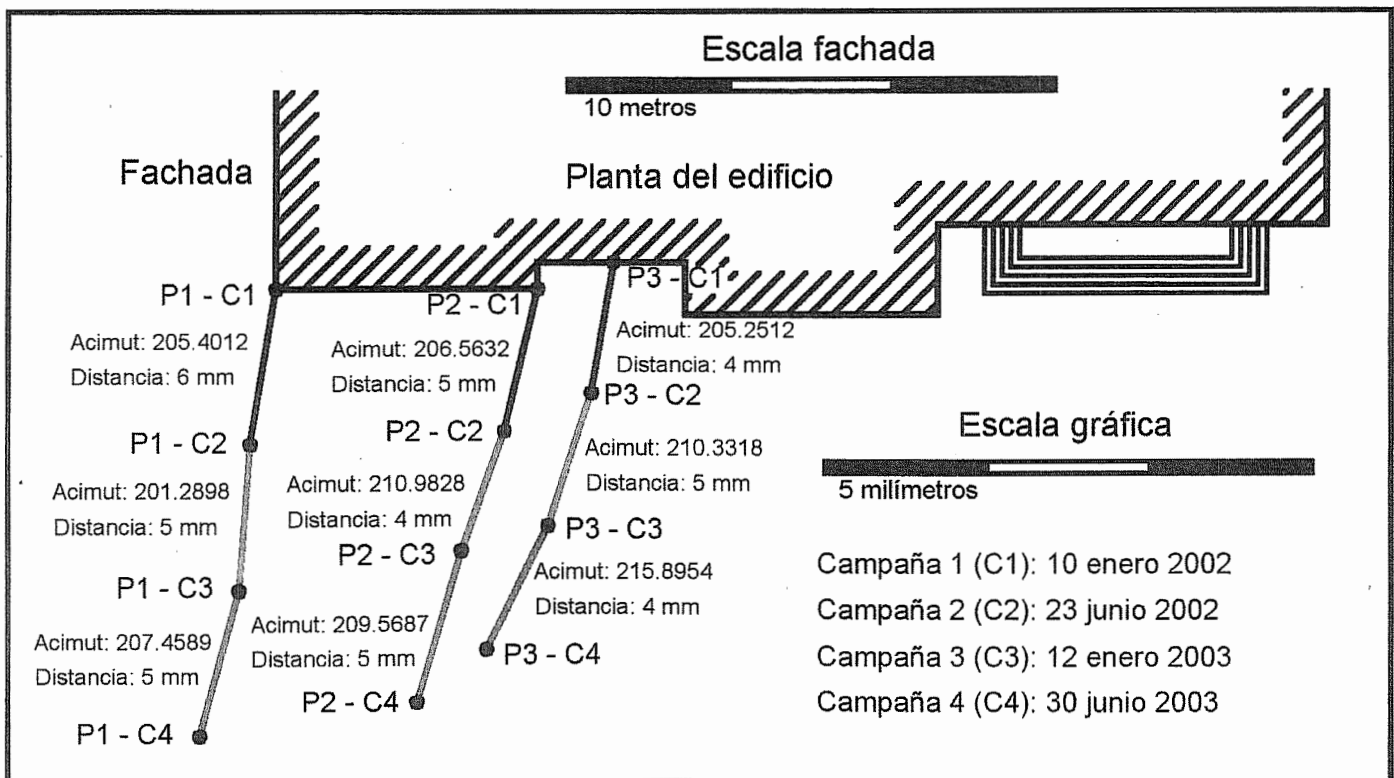
DESARROLLO DE LA TÉCNICA FOTOGRAMÉTRICA

Condicionantes fotogramétricos

Mediante el empleo de la fotogrametría se pueden realizar mediciones con una gran precisión

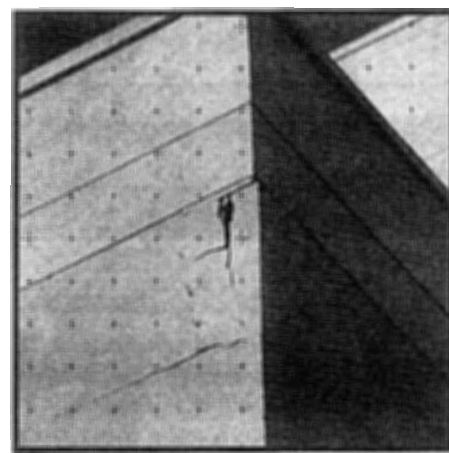
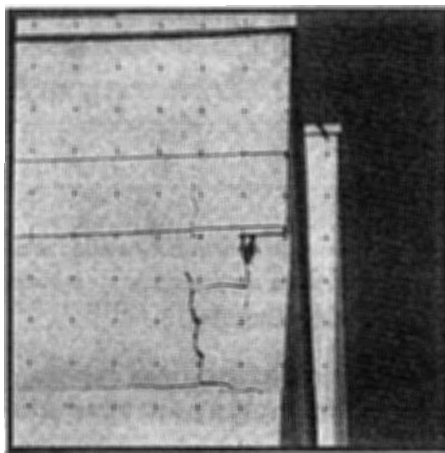
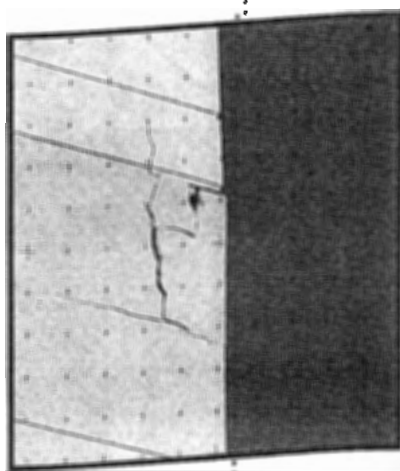
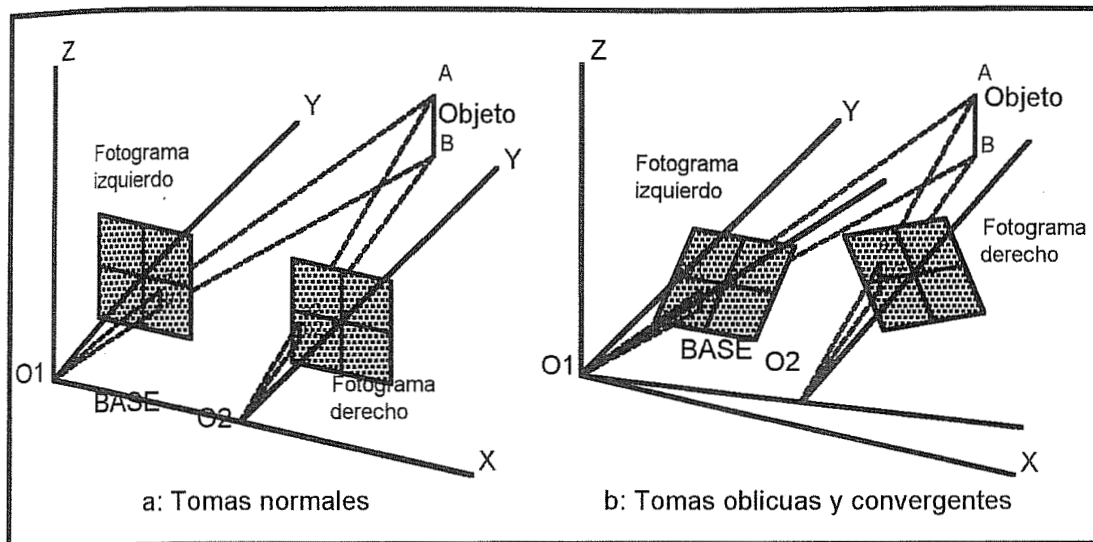
Historial de la dinámica de una fila de dianas

5



Geometría de las tomas fotográficas

6



Tomas fotogramétricas de una fachada para la aplicación de programa "CDW"

7

sobre las fotografías tomadas del objeto. Esta precisión dependerá en gran medida de la distancia del centro de proyección de la cámara fotográfica al objeto. Existen otros condicionantes que influyen en la precisión, tales como: la distancia focal de la cámara, el tamaño del píxel (cámara digital o escáner), precisión del "apoyo geodésico de campo" (explicado en el apartado 2).

Partiendo de la información bidimensional (x,y) suministrada por cada fotografía se puede determinar la posición espacial o 3D (X, Y, Z) de un punto objeto aplicando el "método general de la fotogrametría", es decir, resolviendo los procesos de orientación interna, orientación relativa y orientación absoluta. Para ejecutar esta técnica es necesario disponer de al menos dos fotografías "con recubrimiento" del objeto ⁽⁵⁾.

Según la geometría de las fotografías, puede clasificarse la fotogrametría ⁽²⁾:

- Toma normal: Las direcciones de las tomas fotográficas son paralelas y perpendiculares a la base (Fig. 6.a.).

- Toma convergente: Las direcciones de toma convergen y por ello no son perpendiculares a la base (Fig. 6.b.).

- Toma oblicua e inclinada: Las tomas son paralelas entre sí, pero oblicuas e inclinadas a la base (Fig. 6.b.).

Además de los casos anteriores existe la fotogrametría de objeto cercano. Su particularidad se encuentra en que la distancia de la cámara fotográfica al objeto es de algunos metros, y además las distancias de las bases fotogramétricas son muy cortas.

Fotogrametría de objeto cercano con el programa "CDW"

El cálculo fotogramétrico de objeto cercano puede hacerse con el programa "Close-Range Digital Workstation" (CDW). Este programa permite hacer los cálculos con tomas fotográficas sin una geometría normal (Fig. 7).

El proceso seguido por el programa informático "CDW" para aplicar la técnica fotogramétrica de objeto cercano es ⁽⁴⁾:

1. Procesamiento digital de los datos imagen: Las imágenes proceden de una cámara fotogramétrica digital o de la digitalización (escáner fotogramétrico) de fotografías analógicas (cámara fotogramétrica analógica).

Las cámaras fotogramétricas están calibradas y poseen una placa reticulada (placa de cristal) con una malla de precisión micrométrica que queda superpuesta sobre la película cuando se realiza la fotografía (Fig. 7). Para la orientación interna se procede a la medición manual de cuatro cruces "Reseau". Posteriormente, se mide automáticamente el resto de cruces.

2. Medición de puntos homólogos: Consiste en la identificación y medida de las coordenadas "imagen" de los mismos puntos en todos los fotogramas. La medida de puntos homólogos debe efectuarse bajo las reglas siguientes:

- Deben existir al menos tres fotogramas con recubrimiento de la misma zona del objeto (Fig. 7).

- La cantidad ideal de puntos homólogos medidos está entre 10 y 12. Entre estos puntos se encuentran los "puntos de apoyo" geodésicos.

3. Posición de la cámara: Inicialmente para un mejor cálculo se facilita una posición espacial aproximada de la cámara en cada una de las fotografías.

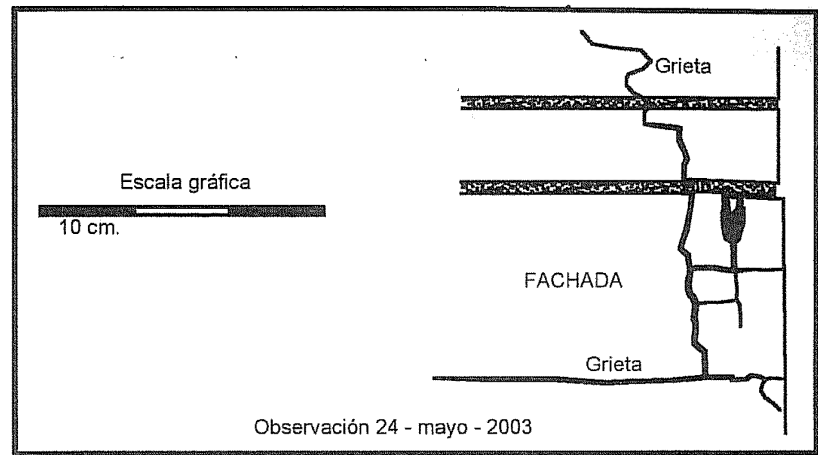
4. Determinación de coordenadas por ajuste de haces: El programa permite el empleo de varios fotogramas para llevar a cabo la restitución. En el caso fotogramétrico de tomas normales con sólo dos fotogramas es suficiente. El cálculo se realiza considerando el conjunto de imágenes como una unidad. El ajuste se realiza con el propósito de minimizar las desviaciones existentes (cuadrado de los errores residuales). Por ello, se emplea el método de mínimos cuadrados.

5. Realización de la restitución fotogramétrica: Una vez están orientadas las fotografías se procede a la restitución de los puntos más significativos (grietas, humedades, desprendimientos,...). Cada punto restituido muestra su residual, de forma que puede conocerse la calidad de la restitución. Las coordenadas tridimensionales de los puntos medidos son transferidas a un formato DXF para ser tratadas en un programa de CAD.

Resultados fotogramétricos

La precisión del producto fotogramétrico de "objeto cercano" está condicionada por el número de fotogramas, la posición de estos en el espacio y el número de puntos de apoyo. Resulta un método rápido y eficaz en el análisis de la dinámica de edificios, donde las condiciones geométricas de las tomas fotográficas no son tan restrictivas como las impuestas en la técnica fotogramétrica de tomas normales.

El producto fotogramétrico final es la cartografía con gran precisión de cualquier detalle de la fachada del edificio (Fig. 8). Si se realizan varias observacio-



nes espaciadas en el tiempo pueden obtenerse vectores de desplazamiento no sólo de elementos puntuales sino lineales (evolución en magnitud y dirección de las grietas,...).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos tanto por la técnica geodésica angular como distanciométrica deben tener una concordancia total, esto es, un método comprueba el resultado del otro. Para reforzar la técnica geodésica es conveniente ejecutar una nivelación geométrica de alta precisión en los alrededores y en el interior del edificio.

La ventaja del método gráfico con respecto a otras técnicas numéricas (programas de ordenador) es que los resultados finales se obtienen de manera gráfica, por lo tanto, si existe alguna visual que no interesa se elimina gráficamente y no interviene en el resultado final.

Si quiere emplearse la técnica fotogramétrica se escogen al menos tres puntos medidos geodésicamente y se introducen en el desarrollo del programa fotogramétrico. Esto produce que las auscultaciones geodésicas sean más precisas que las fotogramétricas, puesto que la técnica fotogramétrica tiene que apoyarse en la información geodésica. Como contrapartida existe mayor variedad de productos cartográficos (ortofotos, rectificaciones, cartografía de detalle,...) con la técnica fotogramétrica. ♦

Fig. 8: Restitución del deterioro de una fachada

8

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- CHUECA PAZOS, M. *Métodos topográficos*. Paraninfo. Madrid. 1996.
- 2.- KARARA, H.M. *Non topographic photogrammetry*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Virginia.
- 3.- SANJOSÉ BLASCO, J.J. *Introducción a las ciencias que estudian la geometría de la superficie terrestre*. Bellisco. Madrid. 2000.
- 4.- SANJOSÉ BLASCO, J.J. *Fotogrametría analítica*. Cáceres. 2002.
- 5.- WOLF, P. *Elements of photogrammetry: UIT air photo Interpretation and Remote Sensing*. Mac Graw-Hill. Auckland. 1974.