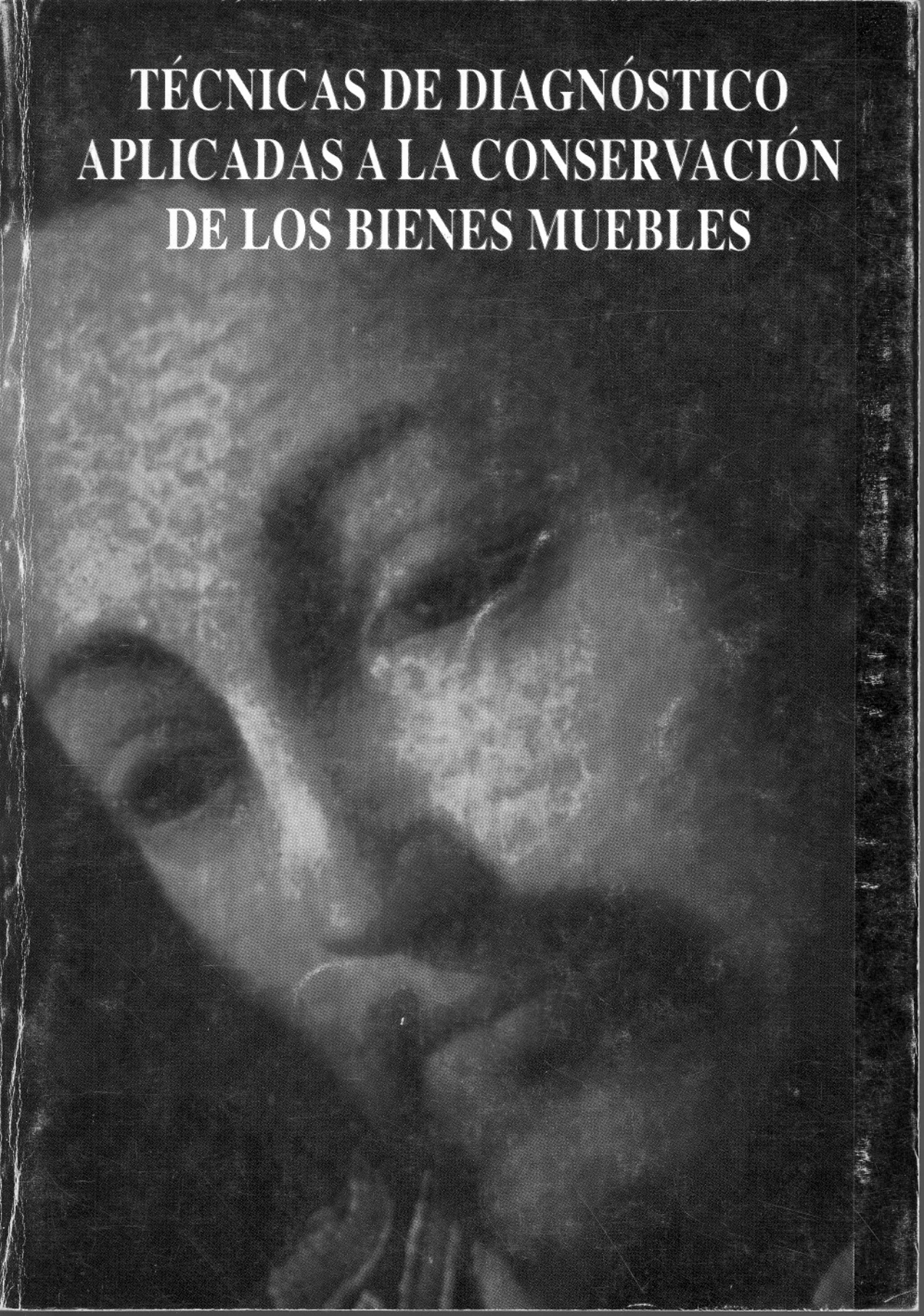
TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO APLICADAS A LA CONSERVACIÓN DE LOS BIENES MUEBLES



REALIZACION DE MAPAS DE DAÑOS Y DE VOLUMEN: FOTOGRAMETRIA

Antonio Almagro Gorbea
Dr. Arquitecto. Escuela de Estudios Arabes C.S.I.C. Granada

1. Introducción

Toda intervención sobre el Patrimonio Histórico, ya sea sobre bienes muebles o inmuebles, ha de ser realizada garantizando la preservación de los valores intrínsecos de ese Patrimonio. Ello obliga a establecer una metodología que asegure no solo la eficacia de la intervención en lo que se refiere a la pervivencia física de la obra, sino además, de todos los restantes valores, a veces inmateriales, que la obra contiene. Esta metodología comporta inevitablemente la necesidad de unos análisis previos y el seguimiento continuado durante toda la intervención, de los estudios e investigaciones que garanticen la buena ejecución de la misma a la vez que el mejor conocimiento de todos sus aspectos, físicos, históricos y estéticos. Toda esta información tiene validez y utilidad no solo para la propia actuación restauradora, sino para el conocimiento general de la obra singular, de otras obras coetáneas o relacionadas con ella y en general, de todo el Patrimonio.

Así pues, al considerar que nos estamos ocupando de unas obras de interés histórico y artístico y que nuestra actuación, por tanto, tiene por objeto participar en la recuperación de unos bienes de interés cultural, es importante no perder esta perspectiva, ya que precisamente en los estudios previos a toda actuación de este tipo, este carácter debe ser determinante. Porque en la salvaguardia de los valores consustanciales a todo edificio histórico, debe estar presente que no solo se trata de salvaguardar la pura materialidad de la obra, sino que debemos recuperar, en mayor medida si cabe, aquellos otros elementos inmateriales que son seguramente más frágiles, ya que muchas veces su conocimiento solo lo podremos lograr a partir de un cuidadoso análisis y estudio de los elementos materiales, y que en muchos casos desaparece con la mera transformación de éstos. Nos referimos, claro está, a los valores históricos, estéticos y culturales, es decir, a todo aquello que la obra de arte representa o ha podido representar para la sociedad que la produjo, la que la utilizó y en último caso, para

nuestra sociedad actual, responsable de conservar, acrecentar y trasmitir todo esto a quiénes vengan después.

La existencia de estos valores nos obliga a ser especialmente cautos y cuidadosos en nuestras actuaciones y a afrontar la responsabilidad que adquirimos al manipular datos y objetos que no son solo patrimonio de toda la sociedad actual, sino de las futuras generaciones.

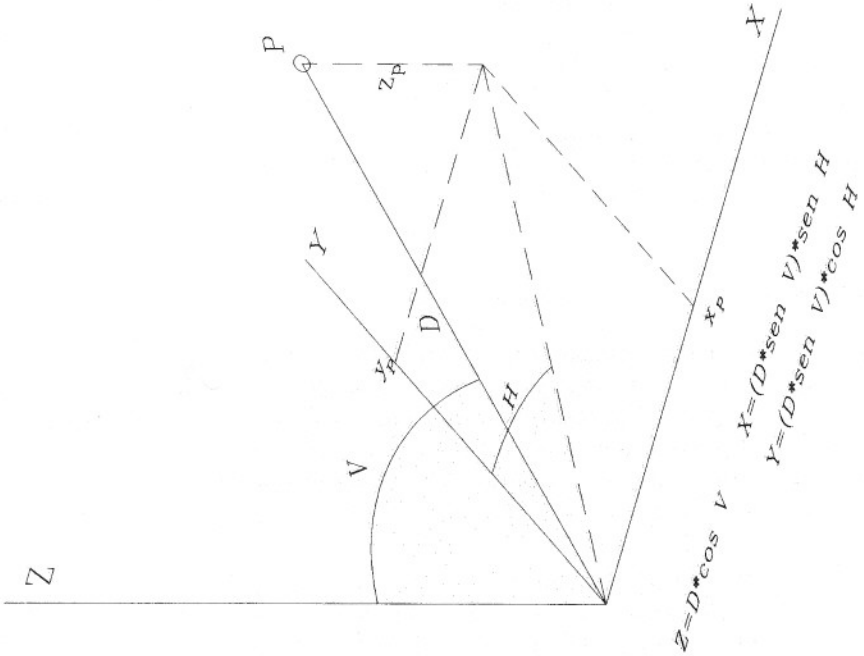
Esta breve reflexión puede servir de introducción para abordar la necesidad y la problemática de todo lo que supone la documentación previa de cualquier edificio, a realizar antes y durante las intervenciones restauradoras. Es evidente que en primer lugar debemos documentar de manera precisa el estado de la obra antes de nuestra actuación. El análisis y estudio previo debe siempre incluir la documentación gráfica y dentro de ella, la planimétrica. La documentación gráfica, bien sea fotográfica o de dibujo, nos permite conocer la forma y las cualidades visuales de la obra. La documentación planimétrica nos aporta además la información dimensional. Especialmente esta última posee una gran importancia pues unida o sirviendo de soporte a la representación gráfica de otras informaciones, les confiere un valor de precisión y coherencia que de otro modo difícilmente alcanzarían. Ante todo, los planos deben recoger la información física del estado de la obra que permita saber cual era su situación, forma y estructura con anterioridad a nuestra actuación y posteriormente deberán recoger cuanta información el propio objeto nos vaya facilitando en el transcurso de la actuación, que deberá quedar registrada por todos los medios disponibles, especialmente si la propia intervención va a suponer una alteración, ocultación o incluso desaparición de tales datos.

2. Principios generales

La determinación de la forma real de un objeto no resulta siempre una labor sencilla, y máxime cuando el objeto presenta dificultades intrínsecas como pueden ser su tamaño o su propia forma. En general la adecuada definición de sus formas nos obliga a considerar su posible carácter tridimensional y a realizar su medición mediante sistemas que nos proporcionen la ubicación en el espacio de sus distintos elementos, es decir, que nos permita conocer las tres coordenadas cartesianas de los distintos puntos que definen su forma.

La medición y levantamiento planimétrico de edificios y construcciones ya existentes o la de objetos muebles con importante volumetría, plantea generalmente dificultades debido a la inaccesibilidad de muchas partes o a las dificultades intrínsecas de la forma del objeto. En los edificios históricos, esta inaccesibilidad suele ser especialmente acusada por el gran tamaño de los espacios y de las estructuras y su altura sobre el suelo o sobre las zonas a las que es posible acceder. Las técnicas habituales de medición, basadas en el empleo de simples dispositivos de medición lineal (cintas métricas), combinados con dispositivos para el control de la verticalidad y de los niveles (plomadas y niveles de agua y albañil), exigen poder acceder a los puntos extremos entre los que se realiza la medición. Por ello, en los casos en que no es posible este acceso se hace preciso acudir a técnicas instrumentales que mediante el concurso de aparatos o equipos más o menos sofisticados, nos permiten la medición a distancia y sin tener accesibilidad, de cuantos puntos del objeto o edifico podamos observar desde zonas fácilmente alcanzables.

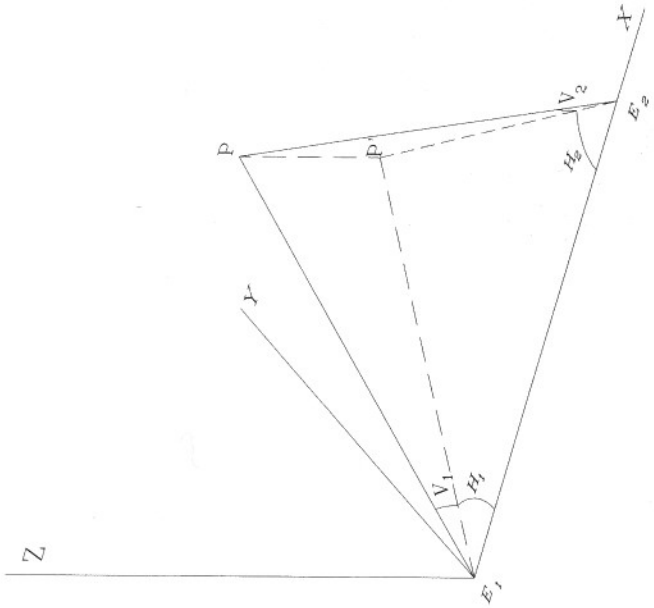
Las técnicas instrumentales de medición se basan fundamentalmente en la determinación de las direcciones en que se encuentran los puntos a medir, desde puntos accesibles desde los que se realizan las observaciones. Pero la determinación de la posición en el espacio de los puntos a medir no suele ser posible con la sola observación de direcciones desde una única estación o punto de observación. si solo disponemos de una estación es necesario que conozcamos también las distancias desde la estación a los puntos o que conozcamos algunas condiciones adicionales, como la inclusión de los puntos en un plano determinado y definido. En el primer caso podremos con facilidad transformar las coordenadas polares (direcciones y distancia) en cartesianas (X,Y,Z) (Fig. 1). En el segundo caso bastará con hacer intersecar el haz de direcciones con dicho plano para que queden definidas las posiciones de los puntos. Pero la medición de distancias desde la estación a los puntos no se puede generalmente realizar si no se puede acceder a ellos, por lo que nos encontramos nuevamente con el problema de no poder determinar su posición.



1.- Determinación de la posición en el espacio de un punto (coordenadas cartesianas) a partir de las direcciones y distancia desde una estación (coordenadas polares).

En tales casos se puede resolver el problema determinando las direcciones de los puntos desde al menos dos estaciones cuya posición en el espacio quede bien definida. El conjunto de las dos estaciones y el punto medido forman un triángulo en el espacio que puede quedar determinado conociendo la posición de uno de sus lados (el que une las dos estaciones) y

los ángulos adyacentes (definidos a partir de las direcciones en que se encuentra el punto a medir desde ambas estaciones) (Fig. 2).

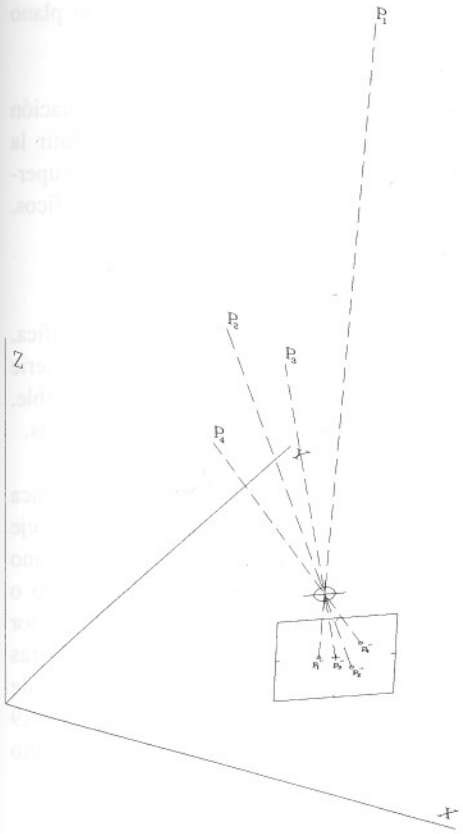


2.-Determinación de la posición en el espacio de un punto a partir de las direcciones desde dos estaciones (intersección de visuales).

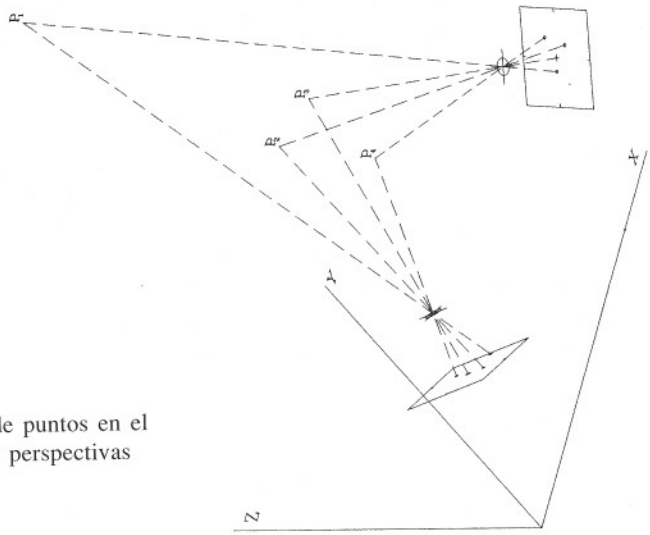
La determinación y medición de estas direcciones puede realizarse por dos procedimientos instrumentales. El primero es el que se basa en el empleo de instrumentos de medición angular como el teodolito. Este instrumento permite medir las direcciones de observación en base a dos medidas angulares, una horizontal o azimut y otra vertical o altura angular. El otro procedimiento se basa en la utilización de perspectivas fotográficas, es decir, fotografías.

La fotografía es un sistema automático de registro de imágenes perspectivas. La perspectiva, como sistema de representación con proyección centrada, se forma por la intersección del haz de direcciones formado por la unión de los puntos a representar con el centro de proyección, con un plano de proyección o plano de imagen. Esto significa que si disponemos de una imagen fotográfica y conocemos la posición relativa del centro de proyección (orientación interna), podremos reconstruir el haz proyectivo y por tanto, las direcciones de todos los puntos que aparezcan registrados en la imagen. Si además conocemos la posición y orientación de la cámara en el momento de obtención de la imagen (orientación externa), tendremos determinadas las direcciones del espacio de todos esos puntos referidas a la estación o punto de toma de la fotografía (Fig. 3).

Como ya hemos indicado, con una sola imagen, es decir, con un solo haz de direcciones, no podremos determinar la posición en el espacio de ningún punto, salvo que conozcamos



3.- Determinación de direcciones en el espacio mediante una imagen perspectiva (fotografía)



4.- Determinación de la posición de puntos en el espacio a partir de dos imágenes perspectivas (fotografías)

algún otro dato como puede ser la pertenencia de determinados puntos a un mismo plano perfectamente definido en su situación y orientación.

Pero si disponemos de dos imágenes obtenidas desde dos estaciones cuya situación conozcamos perfectamente, el problema puede resolverse. Podemos por tanto definir la fotogrametría como aquella técnica que permite medir objetos, edificios o la misma superficie terrestre, a partir de imágenes perspectivas obtenidas por procedimientos fotográficos.

3. Cámaras de fotogrametría

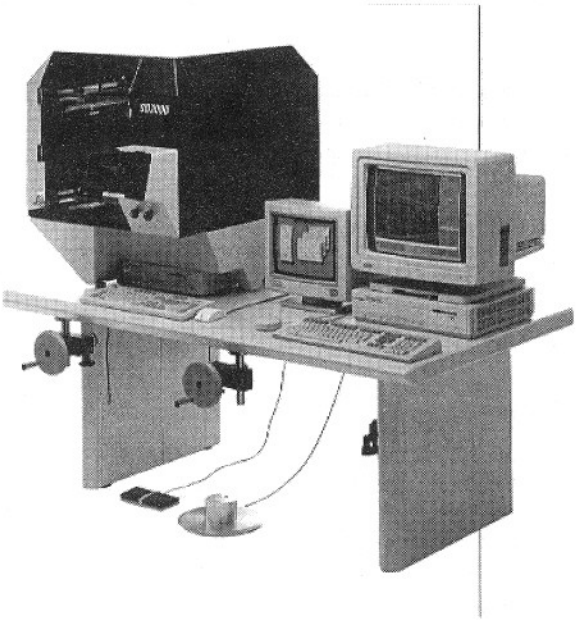
Como ya hemos dicho, la base de la medición fotogramétrica es una imagen fotográfica. Pero en general no sirve cualquier fotografía, sino que es preciso que ésta cumpla una serie de requisitos para garantizar que la fotografía sea una perspectiva lo más rigurosa posible. Esto exige el empleo de cámaras fotográficas especiales denominadas cámaras métricas.

Las características más importantes de estas cámaras estriban en poseer una óptica prácticamente exenta de distorsión (generalmente menor de unas pocas micras), con su eje óptico rigurosamente perpendicular al plano de la imagen y con éste rigurosamente plano e indeformable. Para lograr esto último se suelen utilizar placas fotográficas de vidrio o distintos sistemas que aplanan la película sobre una base de absoluta planeidad, bien por aspiración neumática, o por prensado contra un vidrio plano. En una palabra, estas cámaras garantizan una geometría interna conocida e indeformable. Además suelen ser cámaras de gran formato, generalmente de 24x24 cms. las de fotogrametría aérea, y de 13x18 hasta 6x9 las de fotogrametría terrestre. Por todo esto las cámaras sean de gran robustez y por tanto bastante pesadas.

Pero además, es imprescindible conocer una serie de datos de la cámara que permitan reconstruir su geometría interna, que suelen quedar registrados en la imagen fotográfica. Primeramente hay que conocer, con precisión (centésima de milímetro), la distancia principal del objetivo, es decir, la distancia entre el centro óptico que es el centro de proyección, y el plano de la imagen. Por otro lado, hay que conocer la posición del punto principal en la imagen, es decir, del punto que es proyección ortogonal del centro de proyección. El primer dato suele quedar marcado en las fotografías en uno de los ángulos o bordes. El segundo queda determinado por cuatro marcas fiduciales en los borde o ángulos, que son los extremos de dos rectas teóricas cuya intersección determina dicho punto.

La utilización de restituidores analíticos y las posibilidades que ofrecen de corregir mediante software los errores sistemáticos debidos a la distorsión de los objetivos o a la deformación del negativo, ha propiciado el desarrollo en los últimos años de las denominadas cámaras semimétricas. Se trata de cámaras fotográficas de serie, de formato 60x60 mm o incluso 24x36 mm y dotadas de óptica también se serie (Fig. 5). Estas cámaras sufren una sencilla transformación consistente en la colocación en el fondo de la cámara, de una placa de vidrio con una retícula de cruces calibradas o retícula *reseau*, y en la fijación de posiciones de enfoque mediante muescas o sistemas de bloqueo. Las cámaras se someten a un proceso de calibración en laboratorio que permite conocer su distancia principal para cada uno de los puntos de bloqueo del enfoque, la posición del punto principal referido a la

5.- Cámara semimétrica Rollei 6006



6.- Restituidor analítico Leica SD2000

7.- Sistema digital de restitución

retícula *reseau* y una fórmula que permite conocer el valor de la distorsión en función de la distancia al punto principal (distorsión simétrica). Como la retícula queda impresionada sobre la imagen fotográfica, es posible determinar las deformaciones de la película por comparación entre las cruces que aparecen en la imagen y los valores de la calibración de la *reseau*. Con todos estos datos, las mediciones de las coordenadas de imagen realizadas en el restituidor son corregidas directamente, en tiempo real, teniendo en cuenta todos los factores antes mencionados. De este modo, y al tratarse de cámaras de serie modificadas, su precio es sensiblemente menor que el de las cámaras métricas.

4. Toma de datos fotogramétrica

Lo primero que hay que considerar a la hora de planificar un levantamiento por fotogrametría es la escala a la que se desea hacer la restitución que estará en relación con la precisión, detalle y densidad de información que se quieran obtener. La escala no deberá ser nunca mayor de 10 veces la escala del negativo. La escala del negativo viene determinada por la focal del objetivo utilizado y por la distancia desde la cámara al objeto.

En función de la distancia y del objetivo utilizado se obtendrá un campo visual. Con estas variables debe hacerse la elección del objetivo a utilizar. Resulta una forma muy adecuada de planificar la toma fotográfica realizar sobre papel transparente una plantilla con el ángulo visual del objetivo, analizando sobre una planimetría existente, aunque sea aproximada, la mejor forma de realizar las tomas y la posición más conveniente de las estaciones.

En el caso de cámaras semimétricas, la cámara puede operarse bien sobre un trípode, lo que facilitará la orientación aproximada y la nivelación de la cámara o también a pulso.

En este caso la nivelación resulta más problemática, pero si disponemos de puntos fijos de apoyo, esto no supondrá ningún inconveniente.

La base (distancia entre los puntos de toma de un par de fotografías estereoscópicas) debe de estar en una relación con la distancia al objeto entre 1/3 y 1/10. No es recomendable llegar al primer valor si el objeto tiene mucho relieve, so pena de tener luego dificultades en la visión estereoscópica. Con la relación de 1/10 la apreciación de la profundidad y por tanto, la precisión de la medición puede resultar insuficiente. Un valor medio recomendable puede ser el de 1/5.

Las dos fotografías de un par deben tener la misma escala aproximada. Por ello deben tomarse a igual distancia del objeto y con los ejes paralelos. Una ligera convergencia puede admitirse e incluso beneficia la precisión, pero si ésta es muy grande se obtienen diferencias de escala en los extremos de ambas fotografías, incompatible con una correcta visión estereoscópica. Una convergencia máxima admisible es la que se produce con un ángulo de 15° entre los ejes ópticos de las dos fotografías.

La toma ideal es la que tiene los planos de los negativos paralelos al plano de proyección de la restitución. Aunque no hay limitación en principio para inclinar el eje de la cámara hacia arriba o abajo, o incluso hacia la derecha o izquierda, en tales casos debe procurarse que las dos tomas tengan similares inclinaciones. No obstante, debe tenerse en cuenta que en las zonas más alejadas, la escala es menor y también resulta menor la relación base/distancia, por lo que la precisión de la medición en esas partes será menor. Debe considerarse igualmente que en estos casos la restitución es también más laboriosa al no ser paralelos los planos de la imágen fotográfica y de la proyección y por ello diferir la forma en que el objeto aparece en ambos.

En el momento de hacer las tomas fotográficas deben anotarse los valores aproximados de la distancia al objeto, la base y la inclinación de la cámara. Igualmente, en el caso de utilizar una cámara no métrica, es fundamental anotar el objetivo y la posición del enfoque utilizados, ya que en las cámaras no métricas no se registra el dato de la distancia principal sobre el negativo.

Para poder restituir un par de fotografías debemos contar, además de con éstas, con sus datos de orientación, o lo que es lo mismo, debemos conocer las posiciones desde donde fueron tomadas las fotos, en forma de sus tres coordenadas y los tres ángulos de giro de la cámara en cada posición. Estos valores pueden obtenerse, bien directamente, midiéndolos en el momento de realizar las tomas fotográficas, o bien indirectamente mediante la medición de puntos de apoyo. Este último procedimiento es el más habitual y el que proporciona mejores resultados de precisión.

Los datos de orientación pueden calcularse en el restituidor si conocemos las tres coordenadas de al menos cuatro puntos bien visibles en cada par de fotografías. Las coordenadas de estos puntos se miden normalmente por medio de un taquímetro, bien por radiación o bien por intersección de visuales. Los puntos de apoyo deben de elegirse de tal modo que la zona a restituir quede comprendida dentro de un perímetro cuyos vértices sean dichos puntos. Los puntos de apoyo pueden preseñalizarse y medirse previamente a la obtención

de las fotos o pueden ser simples puntos del objeto que se miden a la vez o después de obtenidas éstas. En ambos casos habrá de tenerse especial cuidado en que los puntos puedan ser fácilmente identificados en ambas fotografías.

Por último, conviene tener en cuenta las posibilidades que el CAD nos ofrece en cuanto a la definición de planos de proyección, ajuste de escala y transformación de coordenadas. Siempre que podamos definir libremente el sistema de coordenadas, podremos prácticamente prescindir de un apoyo a base de puntos definidos con sus tres coordenadas. Nos bastará con conocer una longitud dentro del objeto, que nos permita darle escala, y determinar la relación entre el edificio y la dirección vertical del espacio, único elemento de referencia que siempre es inamovible en la representación arquitectónica. Esta referencia puede quedar definida por una simple plomada o línea vertical que aparezca en las fotografías, o mediante la nivelación de tres puntos.

5. Sistemas de Restitución.

Existen diversos procedimientos para calcular las coordenadas de los puntos que queramos medir a partir de las fotografías. Básicamente podemos resumirlos en procedimientos gráficos, procedimientos analógicos y procedimientos analíticos. Dentro de estos últimos, la fotogrametría digital constituye hoy el más claro campo de desarrollo para el futuro de esta técnica.

5.1 Restitución gráfica.

Los procedimientos gráficos, que fueron los inicialmente utilizados, se basan en abatir primero sobre el plano horizontal y luego sobre otro vertical, los haces perspectivos y determinar la posición de los puntos por intersección de los pares de rayos homólogos. Para ello se une cada uno de los puntos homólogos de las imágenes fotográficas (puntos que corresponden a un mismo punto del objeto) con los centros de proyección y se prolongan hasta que intersecan con el otro rayo homólogo. El punto de intersección será la posición en planta del punto medido. Conocida esta posición resulta sencillo, ya con una sola fotografía, calcular la altura del punto por trazado sobre un plano vertical abatido.

Este procedimiento, que no requiere de ningún instrumento especial, tiene el inconveniente de que la restitución debe realizarse punto por punto, identificando puntos homólogos en cada una de las fotografías. Ello hace que sea muy laborioso e inexacto en el caso de que no puedan ser fácilmente identificados los pares de puntos homólogos. Por otro lado, la precisión depende notablemente de la escala de la fotografía.

5.2 Restitución analógica.

Los sistemas analógicos se basan en el empleo de instrumentos llamados restituidores, que reproducen, a escala, modelos virtuales del objeto sobre los que se mide mediante dispositivos mecánicos de precisión. La identificación de los puntos homólogos se realiza merced a un artificio basado en la visión estereoscópica del objeto. Para ello se requiere que las fotografías se tomen en la disposición que se denomina «caso normal» o sensiblemente

cercana a ella. Esta disposición consiste en que los ejes de las dos tomas fotográficas sean paralelos y perpendiculares a la base o línea que une las dos estaciones de toma. La distancia entre las dos tomas debe guardar una relación con la distancia al objeto comprendida entre los valores de 1/10 y 1/2.

Las fotografías así obtenidas tienen la propiedad de permitir la visión estereoscópica o en relieve del objeto cuando se observan simultáneamente cada una de ellas con un ojo distinto. Como la base es siempre mayor que la distancia interpupilar, la sensación de relieve se ve notablemente aumentada.

El restituidor introduce dentro de esta visión estereoscópica un punto llamado punto o marca flotante, que puede moverse en las tres direcciones del espacio mediante algún tipo de dispositivo mecánico (generalmente manivelas o un pantógrafo y un volante accionado con el pie). El operador del instrumento debe hacer que el punto flotante «toque» el punto del objeto que se quiere medir. El restituidor facilita en cada momento las tres coordenadas cartesianas (x,y,z) de la marca flotante medidas en el modelo virtual y por tanto las coordenadas de los puntos que el observador va «tocando» con dicha marca. Dos de los tres movimientos en el espacio de la marca, pueden transmitirse a un dispositivo trazador que irá dibujando las proyecciones de los movimientos de la marca a la escala que se haya determinado.

Estos instrumentos analógicos tienen el inconveniente de sus grandes limitaciones en cuanto al rango de las distancias focales de las cámaras utilizables para las tomas fotográficas y en cuanto a los giros o inclinaciones con que pueden tomarse las fotografías, lo que limita notablemente su aplicación en fotogrametría terrestre.

5.3 Restitución analítica.

El tercer procedimiento se basa en el cálculo de las coordenadas del objeto a partir de las coordenadas de los puntos homólogos medidas en cada fotografía. Es fácil deducir que las relaciones geométricas que existen entre los haces proyectivos de cada una de las dos imágenes y los puntos del objeto pueden establecerse de forma matemática. Este sistema, conocido desde los primeros tiempos de la fotogrametría, presentó siempre el inconveniente de lo engorroso y lento de los cálculos que hay que realizar para cada punto. Este inconveniente limitó notablemente la utilización de los métodos analíticos hasta que los ordenadores permitieron efectuar dichos cálculos en tiempo real. En estos sistemas no existe limitación alguna en cuanto a las distancias focales utilizadas, ni en lo referente a giros o inclinaciones de las cámaras. Las coordenadas obtenidas en el ordenador pueden introducirse como datos directamente en cualquier sistema de diseño asistido (CAD) y por tanto proyectarse en cualquier sistema de proyección y a cualquier escala. Por otro lado, la enorme velocidad de cálculo de los ordenadores permite corregir mediante software errores sistemáticos de las imágenes producidos por deformaciones del soporte fotográfico o por distorsión de la óptica, lo que hace posible la restitución de fotografías obtenidas con cámaras convencionales en lugar de con las más costosas cámaras métricas. Por ello hoy en día es el procedimiento más extendido y que ha dejado en completa obsolescencia a los procedimientos analógicos.

La restitución analítica parte de la medición sobre la fotografía, referida al punto prin-

cipal o punto en que se proyecta el centro de proyección, de las coordenadas de los puntos homólogos. Esta medición puede realizarse de dos formas. Una de ellas sigue basándose en el empleo de la visión estereoscópica y de la marca flotante, lo que exige utilizar fotografías tomadas aproximadamente en «caso normal». El procedimiento para el operador del instrumento es semejante al de los instrumentos analógicos que antes describimos.

Otro procedimiento consiste en colocar ampliaciones de las fotografías sobre una tableta digitalizadora e ir digitalizando puntos homólogos siguiendo las instrucciones del programa. Estos sistemas cuentan con procedimientos para corregir las deformaciones de la imagen debidas a distorsión, deformación de la película y deformaciones de las ampliaciones. Al no utilizarse la visión estereoscópica como auxilio para la determinación de los puntos homólogos, con estos procedimientos se pueden utilizar más de dos fotografías que además pueden estar tomadas con ángulos convergentes entre sí. De este modo se aumenta notablemente la precisión de las mediciones. Generalmente estos sistemas funcionan dentro de un entorno de CAD, de tal forma que constituyen en realidad sistemas de digitalización en 3D del propio programa de CAD.

Dentro de estos sistemas analíticos integrados en un sistema CAD, existen algunas aplicaciones que funcionan a base de una sola imagen fotográfica para la restitución de puntos situados todos ellos en un mismo plano (caso de una fachada plana). Basta en este caso conocer las coordenadas de cuatro puntos del plano y digitalizar esos mismos puntos sobre una ampliación de la fotografía fijada sobre una tableta digitalizadora. Con estos datos, el programa calcula la posición del plano y la orientación de la foto o simplemente establece una función de transformación perspectiva, que nos permite calcular a partir de las coordenadas de imagen, las coordenadas del objeto. A continuación, cualquier nuevo punto que digitalicemos en la fotografía y que se encuentre en dicho plano será directamente calculado y digitalizado en el programa CAD. Existe en concreto dentro de AutoCAD a partir de la versión 12, la posibilidad de realizar este tipo de transformaciones.

5.4 Fotogrametría digital.

Los avances que la informática está produciendo en todos los campos de manera continua afecta ya desde hace tiempo a la fotogrametría. La utilización de ordenadores en el cálculo permitió el desarrollo de los restituidores analíticos gracias a la capacidad de cálculo en tiempo real. Sucesivos desarrollos de la informática han hecho posible las aplicaciones de CAD y su interrelación con la fotogrametría. Hoy, el tratamiento digital de imágenes está produciendo una nueva revolución al permitir sustituir los elementos de alto costo de los equipos de restitución (mecánica y óptica de precisión) por equipos de hardware informáticos de costo cada día más reducidos. Por otro lado, la enorme gama de posibilidades que el tratamiento digital de imágenes permite, abre amplísimas aplicaciones al campo de la fotogrametría, tanto en cuanto a la automatización de muchos procesos de medición, como en cuanto a la posibilidad de aunar en el documento final definiciones de tipo fotográfico con calidad dimensional o incluso lograr procesos automáticos de animación y realidad virtual sobre modelos de dimensiones precisas.

La mayor parte de estas aplicaciones se encuentran todavía en proceso de investigación

y de primeros desarrollos aunque muchas están ya disponibles sobre grandes equipos. Pero a la velocidad que está evolucionando todo el mundo de la informática y sus aplicaciones, no cabe ninguna duda de que en brevísimo plazo podremos contar con potentes instrumentos de trabajo funcionando en ordenadores de bajo costo, hecho éste que abre posibilidades enormes en la aplicación cotidiana de la fotogrametría arquitectónica.

La fotogrametría digital se basa en la utilización de imágenes digitales. Una imagen digital es simplemente un mapa de pixels, es decir, un mosaico de pequeños cuadrados, tal como se nos aparecen en el monitor del ordenador, que se almacena de forma digital, mediante números.

La forma más sencilla de concebir una imagen digital es pensar en una matriz rectangular. Cada elemento de la matriz corresponde a un pixel o tesela del mosaico. Su posición en la matriz es equivalente a la posición del pixel en la imagen o en la pantalla. El valor numérico del elemento de la matriz corresponde a un valor en una escala de grises o en una de colores. La imagen desaparece como elemento físico, con su soporte y su emulsión pigmentada y todos los inconvenientes que conllevan: alteración de los pigmentos, variación dimensional, etc. Los valores dimensionales de la imagen están garantizados desde un principio en base al tamaño del pixel; los cromáticos en base a un patrón de la escala de colores con equivalencia numérica. Desde el punto de vista de las aplicaciones fotogramétricas, nos bastará con conocer qué píxel corresponde al punto principal y cual es la distancia principal medida en pixels. Ni siquiera es necesario saber el tamaño del pixel, basta con que todos los valores estén referidos en esta unidad. Como toda esta información es puramente numérica, desaparecen todos los errores que provocan los sistemas mecánicos de medición y los ópticos de observación. Las coordenadas de un punto de la imagen están ya definidas numéricamente por la posición del pixel en la matriz numérica de la propia imagen. La determinación de puntos homólogos puede realizarse incluso de manera automática mediante procesos de correlación de las imágenes: Definido un pixel en una de las imágenes, puede buscarse en la otra un pixel que cumpla unas condiciones de valores cromáticos del propio pixel y de los de su entorno próximo equivalentes a los del pixel inicial. Las funciones de equivalencia del pixel y de su entorno pueden definirse matemáticamente y su aplicación se efectúa por el ordenador automáticamente y en tiempo real.

Existen dos procedimientos para la obtención de imágenes digitales. Uno consiste en utilizar una cámara digital que es aquella cámara que en lugar de un negativo sensible a la luz dispone de un CCD o placa formada por una matriz de puntos sensibles, cada uno de los cuales suministra una información numérica sobre el color o el nivel de luz que recibe, formando de esa manera la matriz numérica directamente. La limitación actual de estas cámaras radica en el todavía reducido tamaño de los CCD y la resolución de los mismos, en general inferior a la de la emulsión fotográfica.

El otro procedimiento consiste en obtener una imagen fotográfica normal y digitalizarla mediante un scanner. Como este procedimiento puede hacerse en un período de tiempo más largo que la toma fotográfica, se puede utilizar un CCD móvil que vaya recorriendo distintas partes de la fotografía, lográndose así altas resoluciones. Existen scanners de precisión para aplicaciones fotogramétricas con precisiones de 2 o 3 micras y resolución de hasta solo 4

micras por pixel. El inconveniente que presentan estas altas resoluciones es el enorme tamaño de los ficheros de las imágenes que resultan difíciles de gestionar en los ordenadores corrientes. No obstante, no cabe duda que este problema se resolverá en breve plazo dado el cada día más rápido aumento de las prestaciones de los ordenadores.

Imágenes digitales de una superficie plana o sensiblemente plana pueden rectificarse fácilmente con solo conocerse las coordenadas planas de cuatro puntos, de modo semejante a como veíamos se podía obtener un dibujo rectificado digitalizando una fotografía con una tableta digitalizadora y el programa AutoCAD.

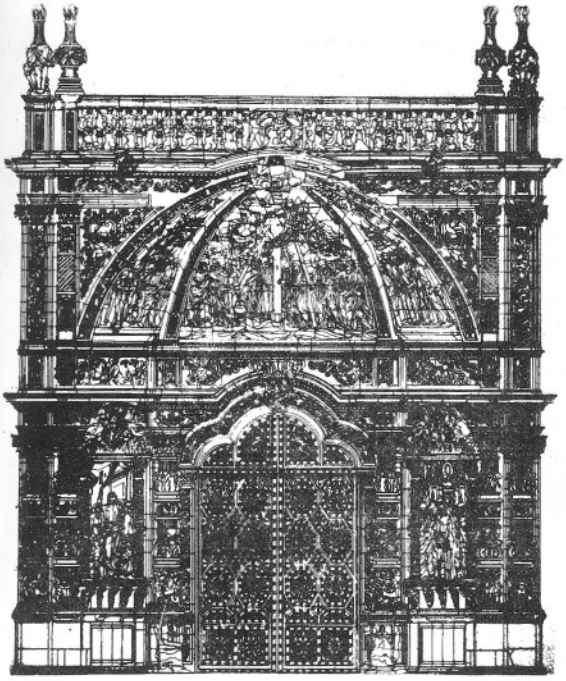
Para la observación y medición con fotos estereoscópicas se utilizan básicamente dos procedimientos. El más sencillo consiste en colocar cada una de las imágenes en una mitad de la pantalla y observarlas mediante un sencillo estereóscopo. El software genera sobre cada imagen una marca que al observarlas mediante el estereóscopo se convierten en una marca flotante semejante a la de los restituidores analógicos o analíticos. Su movimiento se realiza mediante uno o dos ratones. El otro procedimiento más sofisticado utiliza monitores estereoscópicos. Estos monitores alternan las dos imágenes a alta frecuencia. Para hacer la discriminación y que cada ojo observe solo una de las imágenes pueden utilizarse gafas con obturación alternativa de cada ojo sincronizados con la alternancia de las imágenes en el monitor o filtros con polarización alternativa en direcciones contrarias junto con unas sencillas gafas con cristales polarizantes dispuestos con las direcciones de polarización también contrarias.

Una de las ventajas de la fotogrametría digital es que podemos obtener un fichero de imagen digital a cada uno de cuyos pixels podremos asignar no solo unos valores numéricos de color, sino las coordenadas espaciales del punto del objeto al que corresponde dicho pixel. Es decir, obtenemos un modelo digital no solo con datos métricos tridimensionales, sino con información cromática y de texturas. A partir de estos datos es fácil generar representaciones del objeto desde cualquier dirección, en cualquier sistema de proyección y con calidad de imagen fotográfica.

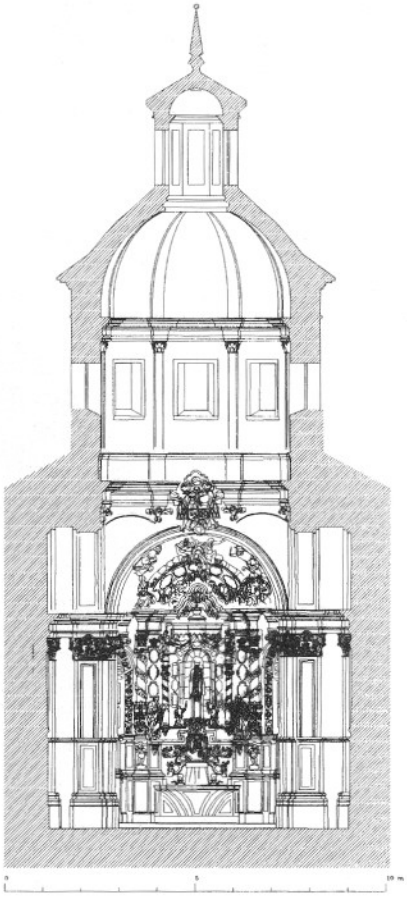
6. Aplicaciones

Conviene tener presente que a partir de un par de fotos estereoscópicas, podemos obtener desde un fotoplano, hasta dibujos a distintas escalas y con distintos niveles de detalle y con distintas proyecciones (plantas o perfiles horizontales, alzados y secciones o perfiles verticales) e incluso digitalizaciones de perfiles o de determinados elementos con las que podremos hacer un sin fin de aplicaciones, ya sea de calculo de estructuras, análisis de deformaciones, tratamiento de imágenes de síntesis en ordenador, formación de mapas de daños, etc. Las aplicaciones más corrientes hoy en día, siguen siendo la obtención de planos de edificios y de objetos muebles (Figs. 8-14).

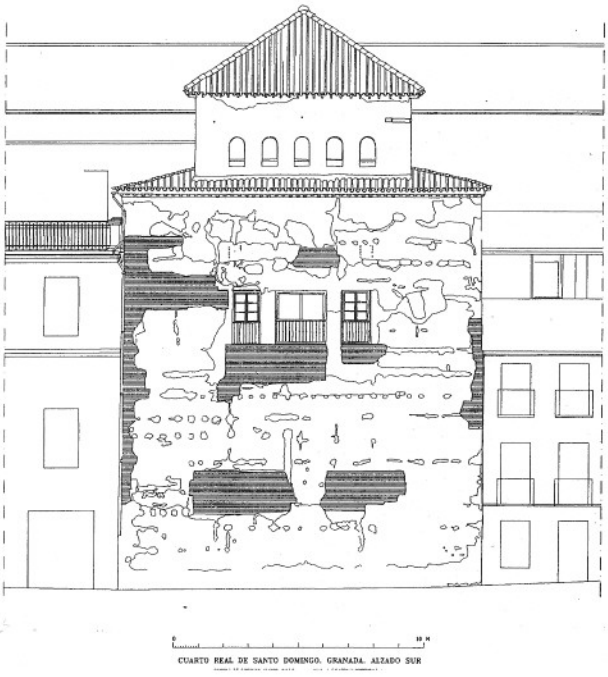
No obstante, y sobre todo merced a la utilización del CAD como medio de guardar y representar la información gráfica obtenida mediante la restitución fotogramétrica, los levantamientos pueden tener un sin fin de aplicaciones, especialmente para representar otro tipo de informaciones. Una forma relativamente simple de aplicación es la confección de los



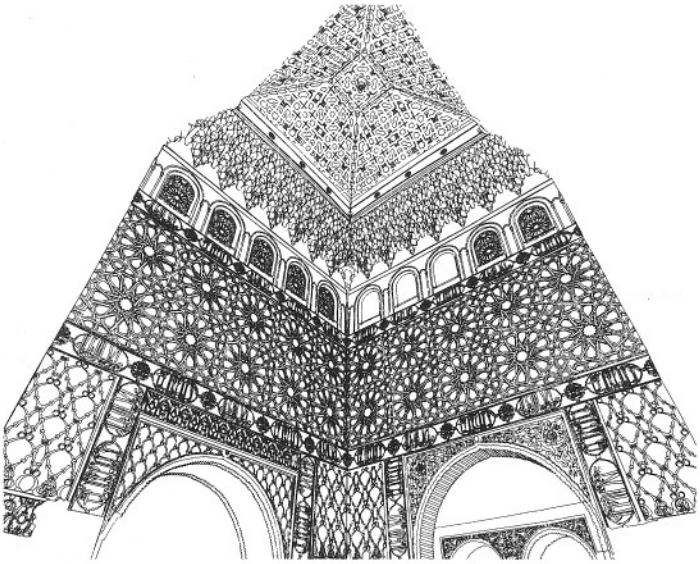
8.- Portada principal de la catedral de Astorga (León) restituida con un restituidor analógico.



9.- Sección de la Capilla del Pilar de la Catedral de Albarracín (Teruel)

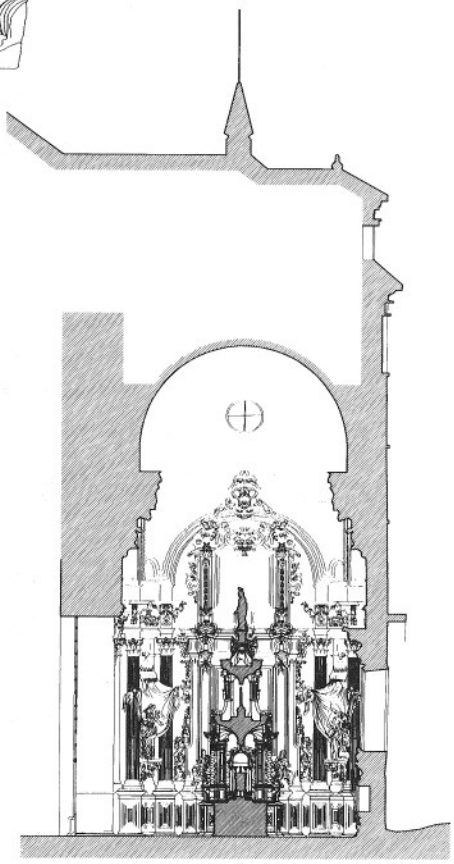


10.- Alzado exterior del Cuarto Real de Santo Domingo de Granada

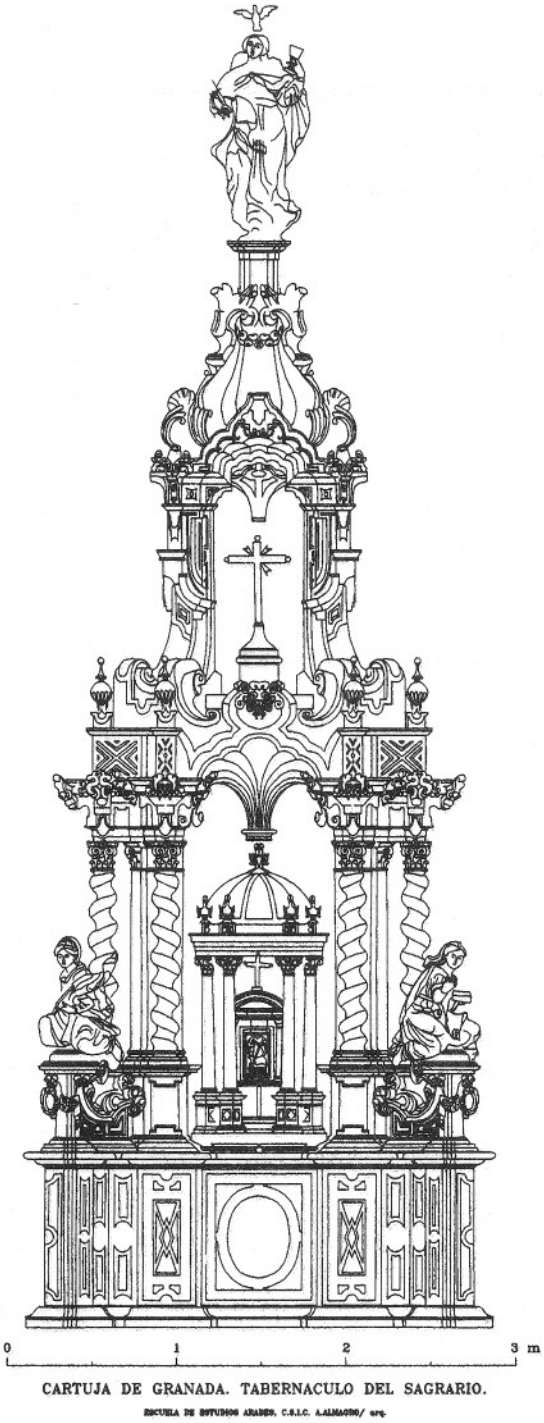


11.- Perspectiva cónica del interior del Alcazar Genil de Granada

12.- Restitución de dos relieves del retablo mayor de la catedral de Sevilla

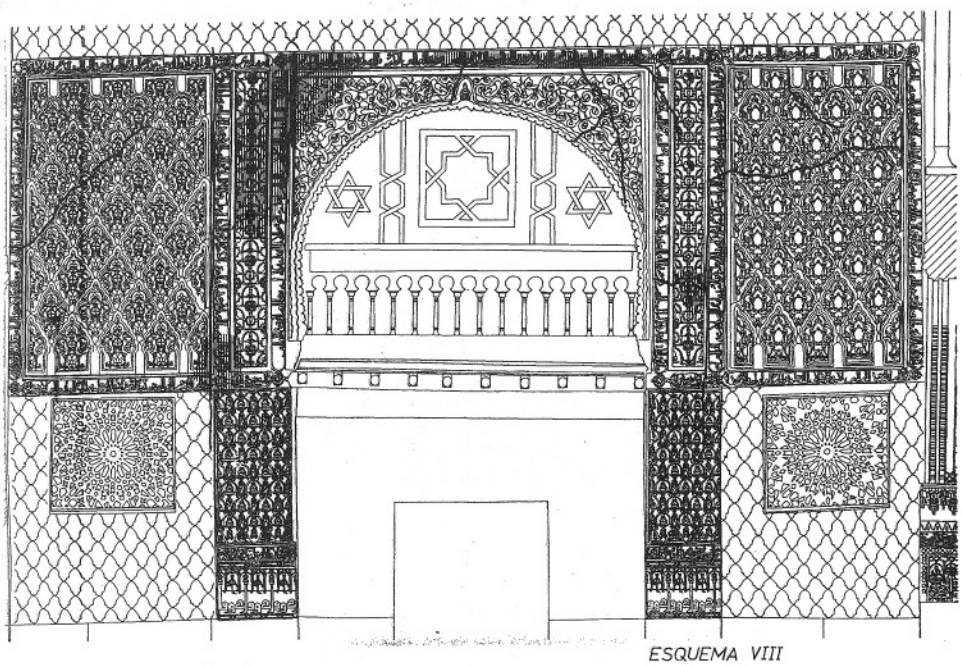


13.- Sección del Sagrario de la Cartuja de Granada.



14.- Tabernáculo del Sagrario de la Cartuja de Granada.

llamados mapas de daños (Fig.15). Consisten éstos en grafiar, sobre un plano o dibujo a escala, las zonas afectadas por una determinada lesión o que presentan similar naturaleza.



15.- Mapeo de lesiones sobre un levantamiento fotogramétrico del Cuarto Real de Santo Domingo (Fotogrametría de la Escuela de Estudios Arabes. Mapeo de V.Medina, A.García, C.Rallo)

La superposición de la información sobre un mismo soporte gráfico con posibilidades de seleccionar la parte de aquella que en un momento dado interese, constituye uno de los medios más eficaces para realizar un diagnóstico. Este tipo de documentación se realiza de un modo muy eficaz mediante el empleo de CAD ya que utilizando distintas capas para representar las diversas informaciones, la selección de las que se quiere visualizar en un momento dado resulta sumamente sencilla. Como la fotogrametría constituye el método más adecuado y eficaz para generar modelos tridimensionales o simples representaciones planas de objetos existentes en este sistema de representación, constituye igualmente el sistema ideal para crear los documentos de mapeo. Simples daños físicos o cambios de material que sean visibles a simple vista, pueden ya ser representados en el dibujo en CAD directamente durante el proceso de restitución.

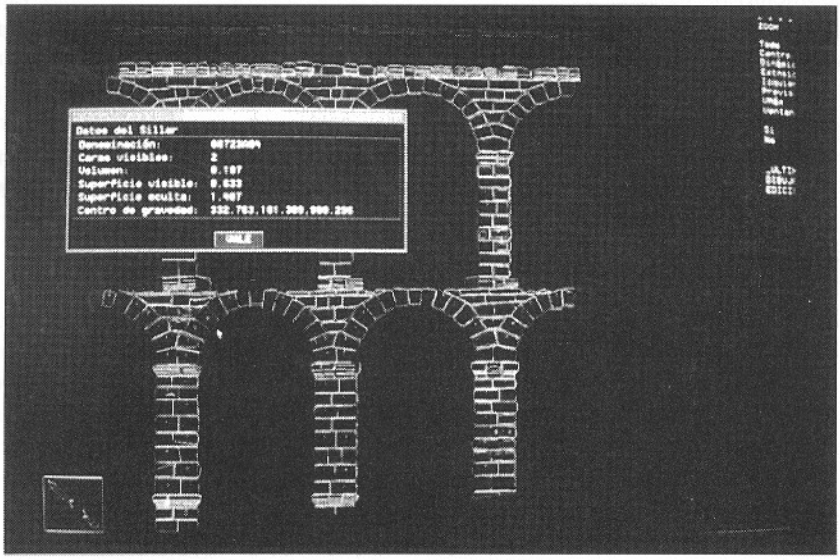
Un caso especialmente espectacular de este tipo de aplicaciones lo constituyó la documentación realizada durante la restauración de los frescos de Miguel Angel de la Capilla Sixtina. Sobre la base de una restitución fotogramétrica de la bóveda, con dibujo de contorno de las figuras pintadas, se fue integrando otra enorme cantidad de información: giornatas, arrepentimientos, repintes, restauraciones antiguas, elementos de fijación y refuerzo, áreas desprendidas, etc. Todo ello formando parte de una representación tridimensional que contenía la forma real de la bóveda, muy alejada de la cilíndrica teórica.

La documentación del acueducto de Segovia, obra romana inscrita en la lista del Patrimonio Mundial, constituye el ejemplo más interesante de los realizados hasta ahora en España, de utilización de un levantamiento gráfico como base para contener y representar una información más extensa y diversificada del monumento. La obra visible del acueducto tiene una longitud de 915 metros con dos pequeños tramos de muros ciegos de mampostería y 120 pilares que soportan uno o dos ordenes de arcos, todos ellos de sillería de granito asentada sin mortero. En la zona de mayor altura llega a tener 29 metros. El objetivo de esta documentación era doble. Por un lado se pretendía obtener una información tridimensional, lo que obligaba a documentar todas las superficies visibles del acueducto y a generar un modelo tridimensional del mismo. Por otro lado, se pretendía generar una base de datos cuya unidad de registro es el sillar relacionada con el modelo digital que permitiera contener desde simples datos de tipo físico (dimensiones del sillar, peso, centro de gravedad, etc.. obtenidos de modo automático a partir del modelo) a otro tipo de datos sobre estado de conservación, lesiones, intervenciones de restauración etc. Naturalmente, este segundo tipo de información se ha recogido de forma independiente a la generación del modelo. Como la unidad de registro en la base de datos es el sillar, cada sillar tiene el carácter de un bloque dentro del sistema de CAD utilizado (AutoCAD), aunque dentro del bloque, las distintas líneas que lo caracterizan se codifican el capas distintas según sean aristas, grietas, líneas de perfil, etc. y según la orientación de la cara del sillar.

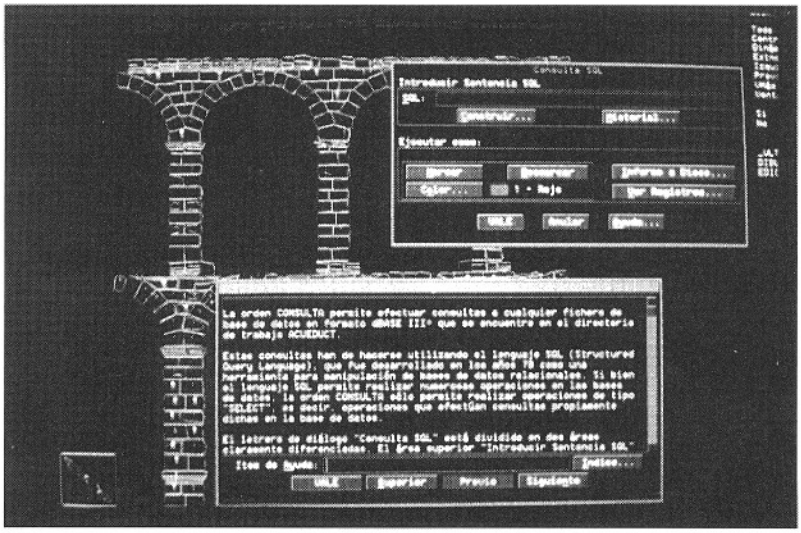
Para la realización del modelo digital se han utilizado 1260 pares estereoscópicos obtenidos desde el suelo y con sistemas especiales de elevación mediante cámaras semimétricas Rollei 6006 con focales de 40 y 80 mm y Hasselblad SWC, con focal de 38 mm. Para la orientación de los modelos se han señalizado y medido 2900 puntos mediante teodolito. Los errores medios de esta medición han sido inferiores a 10 mm. La restitución se ha realizado mediante restituidores analíticos ADAM MPS2 y Leica SD2000 trabajando directamente sobre AutoCAD.

Mediante rutinas de AutoLisp, las distintas polilíneas en 3D se codifican en la capa correspondiente y se enlazan con la base de datos. Como los sillares se encuentran en general muy erosionados, se ha optado por no restituir las aristas de ángulo, realizando en su lugar dos perfiles verticales, uno en cada cara, que sirven para definir el contorno aparente en una visión en alzado. Mediante rutinas de Lisp se agrupan las líneas de un mismo sillar formando un bloque. Otras ordenes de Lisp permiten visualizar los distintos alzados mediante la congelación automática de las capas no visibles. Cada pilar forma un dibujo independiente con dos medios arcos, facilitando el manejo de la información. Varios dibujos pueden agruparse para analizar elementos mayores. Cada bloque correspondiente a un sillar es manipulable como un objeto individual obteniendo así una similitud física entre el modelo digital y el propio edificio.

El resultado final de este trabajo es, no tanto un dibujo de precisión, sino además y sobre todo, un instrumento de gestión de la información, dotado de todas las condiciones de «inteligencia» de los sistemas de gestión de bases de datos informáticas. El dibujo funciona como un índice gráfico de acceso y consulta a la base de datos, que puede contestar mediante códigos gráficos preguntas sobre el estado físico de cualquier piedra del acueducto. La base de datos es además un documento abierto y actualizable en cada momento (Fig. 16).



a



b

16.- Base de datos del acueducto de Segovia (Cortesía de Latorre y Cámara S.L.)
a) información de un sillar. b) Señalización de sillares que cumplen determinadas condiciones.

Por otro lado, el modelo digital puede ser simplificado de modo que cada bloque quede convertido en un prisma de caras planas. Este modelo más simple se puede utilizar en la simulación de comportamientos estáticos de la estructura del acueducto, simulación que de este modo se aproxima de forma notable a la realidad. El levantamiento fotogramétrico y

el establecimiento de la base de datos con él relacionada ha sido realizado por Latorre y Cámara, S.L. con la colaboración de la Escuela de Estudios Arabes para los trabajos de fotogrametría.

La apertura de estas posibilidades de manipulación, estudio y mantenimiento de un edificio histórico constituye uno de los principales intereses de la formación de modelos digitales, para cuya generación la fotogrametría ofrece el medio más rápido y eficaz.

7. Consideraciones finales.

Quisiera para terminar llamar la atención de que la fotogrametría no es más que una técnica de medición y que los aparatos que se utilizan no son sino meros instrumentos de medida, sin duda más sofisticados y más precisos que una cinta métrica, pero al fin y al cabo meros instrumentos. La calidad del resultado final del trabajo, sobre todo en cuanto a expresión gráfica, va a depender por tanto de quién maneje el instrumento. Y tratándose de obras de arte, el proceso de selección y abstracción que supone pasar de la realidad de la obra a su representación en un plano requiere de una actividad de tipo intelectual que la máquina no puede realizar. Por tanto, la calidad de un levantamiento va a depender en gran medida de la habilidad, la práctica y sobre todo, la capacidad de selección del operador que maneje el aparato de restitución.

También quiero añadir algunos consejos prácticos para quién desee o necesite realizar un levantamiento con fotogrametría clásica, utilizando cámaras métricas y restituidores de precisión. En primer lugar debe analizar si la fotogrametría es el método que le brinda las mejores posibilidades para realizar el trabajo. No todos los levantamientos se hacen mejor con esta técnica y no conviene en absoluto despreciar los sistemas tradicionales. Como norma general conviene pensar que cuanto más fácil sea el hacer un levantamiento con medios tradicionales es más barato y más rápido hacerlo con estos medios. Cuanto más complicado sea hacerlo de esta forma, porque haya dificultades de accesibilidad o porque el objeto sea muy complicado o tenga mucha decoración, en estos casos será más adecuado acudir a la fotogrametría.

Si se decide emplear fotogrametría se debe tener en cuenta que esta técnica es en principio costosa, pues precisa de instrumentos caros, aun cuando hoy existen ya sistemas cuyo costo es notablemente inferior al de hace algunos años. Por ello conviene racionalizar al máximo su utilización y no pedir que se dibuje, como norma general, más que aquello que realmente se necesite. Hay que tener en cuenta que las fotografías necesarias para hacer un trabajo a una escala determinada, van a ser las mismas tanto si se va a dibujar todo el detalle como si sólo se van a representar las líneas principales. Por ello, la toma de datos es en principio un término fijo del coste. Sin embargo, podemos decir que el coste de la restitución es proporcional a la longitud de línea que se dibuje. Por ello, no tiene sentido dibujar todo el detalle y la decoración si ese dibujo no va a tener una utilidad inmediata. La información está en las fotografías y podremos en cualquier momento utilizarla para completar el dibujo. Pero considerando el alto costo de la hora de restitución, conviene reducir ésta al mínimo indispensable. Por ello es muy importante que al encargar el trabajo se tenga una idea muy clara de lo que se necesita y se concrete muy bien con quién vaya

a hacer el levantamiento, el documento gráfico final que se pretende obtener. Si esto no se hace así, podemos encontrarnos con que los costes de un levantamiento son disparatados o el resultado final no es el apetecido. También conviene tener en cuenta que en fotogrametría no se pueden reducir costos bajando la precisión del trabajo, pues en general ésta es siempre uniforme y elevada. Las operaciones a realizar son, en muchos casos, prácticamente las mismas para distintas escalas y precisiones, pues estas últimas están en función de las primeras. En fotogrametría no se puede inventar lo que no se ve en las fotos, como a veces se hace en los levantamientos tradicionales, en que se interpolan líneas y elementos entre pocos puntos realmente medidos.

Coma ya hemos indicado, la calidad del levantamiento debe ser siempre responsabilidad de quién tiene encomendada la restauración y no cabe excusarse en haber utilizado las más sofisticadas técnicas. Estas no son más que un instrumento, en muchos casos valioso, pero su efectividad siempre estará en función de la forma en que se empleen y de las personas que las manejen.