

## LEVANTAMIENTO DE BÓVEDAS DE ARCOS ENTRECruzADOS: TÉCNICAS APLICADAS AL CASO DE LA TORRE DEL HOMENAJE DEL CASTILLO DE VILLENA (ALICANTE)

### SURVEY OF VAULTS WITH INTERCROSSED ARCHES: TECHNIQUES APPLIED TO THE CASE OF THE KEEP OF THE CASTLE OF VILLENA (ALICANTE)

Antonio Almagro Gorbea y Alba Soler Estrela

doi: 10.495/ega.2014.1278

Las bóvedas almohades de arcos entrecruzados de la torre del homenaje del castillo de Villena, deben situarse en el contexto de una tradición que comienza en el siglo X en la mezquita de Córdoba. El trazado de sus nervios materializa la descomposición en plementos mediante una geometría inherente a las creaciones artísticas y arquitectónicas de la cultura musulmana. Se ha realizado un levantamiento de planos riguroso, inexistente hasta la fecha, mediante la utilización de distintas técnicas, cuyas ventajas e inconvenientes se analizan. El estudio geométrico de las bóvedas pone en evidencia su singularidad, al no seguir ninguno de los modelos de trazado de otras bóvedas andalusíes o del Norte de África que utilizan la misma técnica, mostrando la enorme capacidad creativa de los alarifes basada en la geometría.

**Palabras clave:** Bóvedas de arcos entrecruzados; Levantamiento arquitectónico; Fotogrametría; Escáner láser 3D

*The Almohad vaults with intercrossed arches of the keep of the castle of Villena, must be placed in the context of a tradition that began in the 10th century in the mosque of Cordoba. The layout of their nerves materializes the decomposition into pieces of the vault using the geometry inherent to the architectural and artistic creations of Muslim culture. A rigorous survey, non-existent so far, has been done, through the use of different techniques, whose advantages and disadvantages are discussed. The geometric study of the vaults reveals its singularity, because they do not follow any of the models of other vaults using the same technique from al-Andalus or North Africa, showing the enormous creative capacity of the architects based on geometry.*

**Keywords:** Vaults with intercrossed arches; Architectural survey; Photogrammetry; Laser scanner 3D



1. Imagen exterior de la torre. Fachadas oeste y sur.  
1. Exterior image of the tower. West and south façades.



1

El castillo de la Atalaya se eleva dominando el valle del río Vinalopó y la población de Villena. En su silueta destaca la torre del homenaje, que presenta dos fases claramente diferenciadas: la inferior que se supone de época musulmana fechada a finales del siglo XII o principios del XIII y la superior, obra del segundo marques de Villena, del siglo XV (Azuar, 1983).

Nuestro interés principal se centra en el estudio de la fase almohade de la torre, que se corresponde en el exterior con los imponentes muros de tapia que alojan en el interior dos salas superpuestas, cuyos sistemas abovedados son de enorme interés. Se trata de bóvedas de arcos entrecruzados, que deben situarse en la tradición de las que empiezan a utilizarse en el siglo X en la mezquita de Córdoba y cuyo uso y evolución se extenderá incluso por los territorios cristianos, dando lugar, en opinión de Torres Balbás (1943) y otros estudiosos, a la aparición de las bóvedas de ojivas y de todo el sistema de cubrición desarrollado por el estilo gótico.

Estas bóvedas se perdieron parcialmente en 1811 en una explosión durante la guerra de la Independencia y fueron reconstruidas en 1958. Su aspecto actual se debe a las últimas restauraciones, en las que como se puede observar y según lo indicado en la memoria del proyecto (Beviá, Ivars, Varela, 1997), se repusieron las ménsulas desprendidas y se procedió a enlucir las paredes y perfilar los nervios con yeso.

Las bóvedas han merecido la atención de algunos autores. Por un lado, Pavón Maldonado (2010) las incluye en su inventario de bóvedas y cúpulas en la arquitectura andalusí. Ferre de Merlo (2000) aporta principalmente datos sobre las fábricas a raíz de su

observación antes de quedar revestidas. Pero para avanzar en su conocimiento se hace necesario un levantamiento riguroso que no existía hasta la fecha, por lo que su realización ha sido nuestro objetivo principal, aunque al mismo tiempo, se ha tratado de optimizar la integración de distintas técnicas para su realización con un coste mínimo. Se entiende éste fundamentalmente en su componente de tiempo de trabajo, partiendo de la base de que se disponía de una instrumentación muy completa.

### Proyecto de levantamiento

Para planificar el trabajo se realizó una visita inicial, con el fin de comprobar el estado del monumento y las posibilidades de acceso con el objetivo principal de definir los sistemas a utilizar para la toma de datos.

The castle of the Atalaya dominates the valley of the river Vinalopó and the town of Villena. A prominent feature of its skyline is the homage tower constructed in two clearly differentiated phases. The lower part of the tower is thought to date back to Muslim times, 12th or early 13th century, while the upper part was constructed by the second Marquis of Villena in the 15th century (Azuar, 1983).

Our interest focuses on the study of the Almohad phase of the tower, that of the exterior of the imposing tapia walls which house two superimposed rooms, with extremely interesting vault systems. These vaults have intercrossed arches and follow the tradition of those first used in the 10th century and found in the mosque of Córdoba, which then evolved and were used in Christian territories. According to Torres Balbás (1943) and other scholars, this gave rise to the development of cross ribbed vaults and the entire roofing system developed by the Gothic style. These vaults were partially lost in 1811 due to an explosion during the Independence War and were rebuilt in 1958. Their current appearance is the result of the most recent restorations during which, as can be seen in the project report (Beviá, Ivars, Varela, 1997), the corbels that had become detached were replaced, the walls were rendered and the ribs picked out in plaster. Several authors have assessed these vaults. Pavón Maldonado (2010) includes them in his inventory of vaults and cupolas of Andalusí architecture. Ferre de Merlo (2000) mainly provides data on their manufacture based on observations made before they were rendered. However, our main objective was to carry out a rigorous survey, essential for further research, as this had not been done before. At the same time, efforts were made to ensure the optimum integration of different techniques to carry out this survey at minimum cost. This was mainly a question of time spent, as it was assumed that a complete range of tools was already available.

### Survey project

The initial visit was to plan the work and check the condition of the monument and the possibilities for access in order to define the systems to be used for data collection.

Observation of the exterior of the tower showed that the walls required a detailed study, when observing the imprints of the construction process

using rammed earth construction: putlog and formwork traces, materials and textures. It is also possible to observe false joints simulating big ashlar on the walls which, despite having disappeared in certain areas, provide data of interest on the original appearance of the tower (Fig 1). It can be seen on inspection that at present almost all the interior walls and vaults are rendered, making it impossible to observe the materials or techniques used. Therefore, work in this case had to be limited to data collection on the geometry of ribs and vaults. The floorplan of both rooms is quite regular, but the characteristics of the vaults divided into sections by multiple ribs made measurement processes using traditional systems extremely difficult (Fig 2 and 3). In order to complete the workplan diagrams and an extensive photographic report were produced with general and detailed measurements of the springing of the ribs. After this analysis, the methods for data collection were chosen following the criteria of using whichever technique could provide the desired information with minimal labour cost. For the exterior we chose photogrammetrical techniques with a reduced topographical support. In order to reduce the necessary fieldwork we performed a detailed survey of the four elevations using the orientation system of a block of photographs around the tower by bundle adjustment. This procedure, which follows the CIPA 3 x 3 Rules (Waldhäusle and Ougleby 1994, Almagro 2004: 76-82), minimises the control measurements needed, allowing the survey to be carried out simply with very basic measurement techniques. Given the interest in the texture and information provided by the walls, we chose to use stereoscopic photogrammetry for the plotting since we believe it is necessary to view the object directly to interpret it correctly. This is reflected in the corresponding line drawing, regardless of whether photoplans have been produced using photography rectification. To make the survey as accurate as possible we chose to use a total station with a laser distance meter to measure at least three points of control, the minimum requirement for the complete orientation of a block of photographs. Given our previous experience with other surveys of similar vaults (Almagro 2011) and having seen the difficulty of determining homologue points on the photographs of

2. Imagen interior de la bóveda de planta baja.  
2. Interior image of the vault on ground floor.



2

La observación del exterior de la torre nos indicó que los paramentos merecían un levantamiento detallado, al observarse las huellas del proceso de construcción mediante la técnica de tapiería: huellas de agujas, juntas de encofrados así como materiales y texturas. Se aprecia además un fingido de sillares sobre las tapias, que aunque ha desaparecido en algunas zonas, aporta datos de interés sobre el aspecto que presentaba originalmente la torre (Fig. 1).

Al inspeccionar el interior detectamos que en el estado actual casi la totalidad de los paramentos y bóvedas se encuentran revestidos por lo que no es posible la observación de materiales ni de las técnicas constructivas utilizadas. Por lo tanto, el trabajo en este caso debía limitarse a recoger datos sobre la geometría de nervios y plementerías. La planta de ambas salas es sensiblemente regular, pero las características de las bóvedas, con multitud de nervios y consiguientes tramos de

plementerías, hacen que la medición por sistemas tradicionales sea muy difícil (Figs. 2 y 3). Para terminar de planificar los trabajos se realizaron croquis con las medidas generales y de detalle de los arranques de los nervios y un amplio reportaje fotográfico.

Tras este análisis se procedió a la elección de los métodos para la toma de datos siguiendo el criterio de utilizar aquella técnica que nos aportara la información deseada con un mínimo coste de trabajo. Para el exterior optamos por utilizar técnicas fotogramétricas con un apoyo topográfico reducido. A fin de reducir el trabajo de campo, planteamos el levantamiento de los cuatro alzados usando el sistema de orientación de un bloque de fotografías obtenidas alrededor de la torre mediante ajuste de haces. Este procedimiento para el que se han seguido las denominadas por el CIPA Reglas 3 x 3 (Waldhäusle y Ougleby 1994, Almagro 2004: 76-82) permite



3. Imagen interior de la bóveda de planta primera.  
3. Interior image of the vault on the first floor.



3

minimizar el sistema de apoyo y control que puede incluso realizarse con medios muy elementales de medición. Ante el interés que presenta la textura y la información que aportan los paramentos, optamos por usar fotogrametría estereoscópica para su restitución al considerar fundamental la visión directa del objeto para una correcta interpretación, plasmada en el correspondiente dibujo de línea, con independencia de que también se hayan realizado fotoplanos mediante la rectificación de fotografías.

Para conseguir una precisión que diera total garantía al levantamiento, optamos por utilizar un taquímetro con distanciómetro de láser para la medición de al menos tres puntos de control, apoyo mínimo indispensable para la orientación absoluta del bloque de fotografías.

La experiencia con que ya contamos de otros levantamientos de bóvedas de similares características

(Almagro 2011) y el haber constatado la dificultad que entraña la determinación de puntos homólogos sobre las fotografías de superficies carentes de textura como son las que han sido enlucidas con yeso o encaladas, nos aconsejó recurrir a sistemas de escaneado láser 3D para el levantamiento de los espacios interiores.

### Toma de datos

Para el levantamiento exterior utilizamos una cámara fotográfica digital Canon EOS 1 Ds, de 22 Mpíxeles de resolución, y dotada de objetivos de 20 y 28 mm con posición de enfoque bloqueada para garantizar la inalterabilidad de su geometría interna. Se obtuvieron 89 fotografías de las que se han seleccionado 18 para conformar el bloque a orientar por ajuste de haces. De estas 18 fotos, diez corresponden a cinco pares estereoscópicos, uno por cada cara más otro de la parte in-

surfaces lacking texture, due to being rendered with plaster or lime, we chose 3D laser scanning systems to survey the inside of the building.

### Data collection

For the exterior survey we used a 22 Mpixel Canon EOS1 Ds camera, with 20 and 28 mm lenses and a blocked focus position to guarantee internal consistency. From a total of 89 photographs taken, 18 were selected to constitute the block for orientation by bundle adjustment. Of these 18 photos, 10 were grouped in five stereoscopic pairs, one per face and another of the lower part of the west face. The other eight photos were taken as diagonal views in order to put adjoining faces into context. Subsequently, a Leica TCR 303 total station with laser distance meter was used to measure 10 points on the north and west façades and 4 points on the interior of the ground floor room using two stations, one situated on the northeast tower of the castle outer wall and the other at the door of the homage tower. The exterior points were used to orient the block of photographs and to control the precision achieved using bundle adjustment. The interior points were used to link the point cloud of the interior to the survey of the exterior. This task took two hours.

For the interior survey we used the 3D pulse-based Topcon GLS-1500 scanner. This long range ground-based class 1 laser scanner provides 4 mm accuracy in a scan range of up to 150 m with 6" angular accuracy (2.0 mgon) and a coaxially aligned built-in 2.0 Mpixel digital camera. Taking into consideration the geometry of the rooms and the position of parallel and diagonal ribs, and in order to optimise the time devoted to data collection we chose to place the scanning base in the centre of the room, thus obtaining a complete sweep of the surface of the ribs and almost all the vault compartment, showing small shaded areas in the side area of the ribs. The characteristics of the equipment used, specifically the angular amplitude, made it necessary to carry out 3 sweeps to cover the whole of the vault, linking them using retro-reflective targets. The resolution, which is defined using the density of points measured at a certain distance was 1.5mm to 5m in this case. Thus, it was possible to obtain a point cloud with image colour. Over one million points were measured for each of the two rooms of the tower.



The time spent on the scanning process for each room, including setting up equipment and placing and measuring of the targets was under 3 hours.

## Post-processing

The fieldwork data was used to begin the study phase. After selecting the photographs of the façades to be used in the orientation of the block we used the Orthoware program (Martos *et alii* 2008) developed by Metria Digital (<http://metria.es>) for this process. A total of 53 object points was measured so that each point appeared in at least three photographs and each photograph had a minimum of 10 points marked. A prior test was carried out to give absolute orientation of the block, using only the distance between two points and bearing in mind that the separation between the Muslim and Christian constructions was horizontal. The result obtained was fully valid for the size and shape of the tower, proving that this system makes it possible to work without resorting to topographical tools. In this case, the fact that the separation is not completely horizontal (the north façade slopes 5 cm to the west) introduces slight errors in the absolute position of the points measured which reaches 12 cm. Finally three control points measured with the total station were used, and the rest were used for verification. Maximum discrepancies between measurements with total station and those carried out with Orthoware were 3 cm, establishing the reliability of the system.

The 53 points measured using Orthoware were used as control points both for photographic rectifications and for the orientation of the stereoscopic pairs. ASRix software (<http://asrix.ca>) was used for the rectification of photographs while the Poivilliers F program was used for the stereophotogrammetric plotting. Work using Orthoware took approximately 4 hours, while the plotting of the elevations required an additional 12 hours.

For the part carried out using the laser scanner, the process for recording information and its post-processing began with the use of the software specific to the equipment, such as ScanMaster and Image Master by Topcon, which are used to analyse the point clouds obtained. In this case the different scans are interconnected to obtain a single cloud while non-architectural elements that were in the room at the time of scanning were removed.

Using the point cloud measured, these programs allow us to carry out operations to generate other

ferior de la cara oeste. Las otras ocho son fotos tomadas según las diagonales de la torre para poner en relación caras contiguas. Posteriormente, con un taquímetro Leica TCR 303 dotado con distanciómetro de láser se midieron 10 puntos sobre las fachadas norte y oeste y 4 puntos del interior de la sala de la planta baja a partir de dos estaciones, una situada en la torre noreste del recinto del castillo y otra ante la puerta de la torre del homenaje. Los puntos del exterior han servido para orientar el bloque de fotografías y para controlar la precisión conseguida mediante el ajuste de haces. Los puntos del interior se han usado para enlazar la nube de puntos del interior con el levantamiento del exterior. El tiempo necesario para la realización de este trabajo fue de 2 horas.

Para el levantamiento de los interiores se ha utilizado un escáner terrestre 3D basado en pulsos, láser invisible de clase uno de largo alcance, tipo Topcon GLS 1500 y precisión de 4 mm en un rango de escaneo hasta 150 m y angular de 6" (2,0 mgon), asociado con una cámara digital de 2.0 Megapíxeles integrada, alineada coaxialmente. Teniendo en cuenta la geometría de las salas, y la disposición de nervios paralelos y diagonales, para optimizar el tiempo dedicado a la toma de datos, se considera aceptable posicionar la base de escaneo en el centro de las salas, puesto que se obtiene el escaneado completo del intradós de los nervios y casi la totalidad de las plementerías, produciéndose pequeñas zonas de sombra en la zona del lateral de los nervios. Las características del equipo utilizado, y en concreto la amplitud angular, obliga a la realización de 3 escaneos para cubrir la totalidad de la bóveda, realizándose el enlace con la coloca-

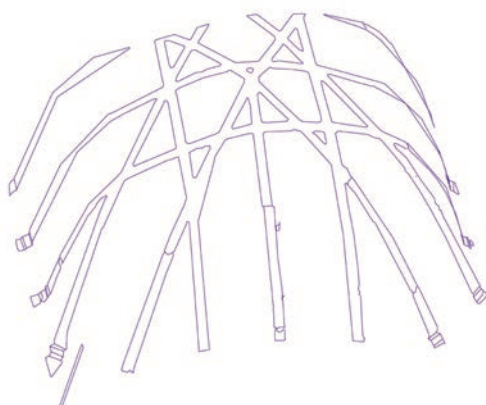
ción de dianas retrorreflectantes. La resolución, que se define mediante la densidad de puntos medidos a una determinada distancia, en este caso es de 1.5mm a 5m. Se adquiere así una nube de puntos con color de imagen. El número de puntos medidos para cada una de las dos salas de la torre es superior al millón. El tiempo empleado en el proceso de escaneo de cada sala, incluyendo el montaje de aparatos y la colocación y medición de las dianas es inferior a 3h.

## Postprocesado

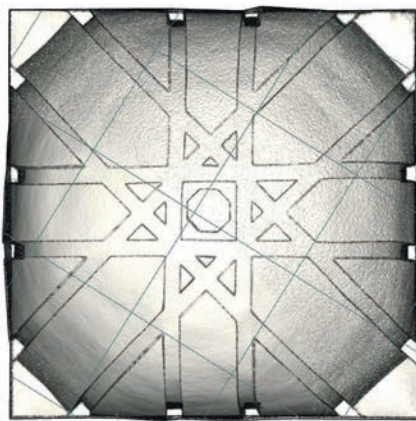
Con los datos obtenidos en campo se inició la fase de trabajo de gabinete. Seleccionadas las fotografías de las fachadas a utilizar en la orientación del bloque se empleó el programa Orthoware (Martos *et alii* 2008) desarrollado por Metria Digital (<http://metria.es>) para este proceso. Se midieron un total de 53 puntos del objeto de modo que cada punto apareciera en al menos tres fotografías y que cada fotografía tuviera un mínimo de 10 puntos marcados. Para la orientación absoluta del bloque se hizo una prueba previa utilizando solamente la distancia entre dos puntos y la consideración de que la imposta que separa la fábrica islámica de la cristiana definía un plano horizontal. El resultado obtenido era plenamente válido en lo que respecta a la dimensión y forma de la torre, demostrando que el sistema permite trabajar sin el recurso de instrumentos de topografía. En este caso, el hecho de que la imposta no sea totalmente horizontal (en la cara norte presenta un descenso hacia el oeste de 5 cm) introduce ligeros errores de posición absoluta de los puntos medidos que alcanza los 12 cm). Finalmente se usaron tres puntos de apoyo de los



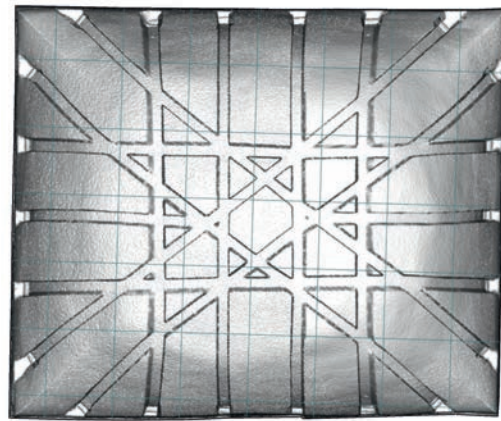
- 4. Definición automática de aristas.
- 5. Proyección horizontal de las superficies generadas por el programa.
- 4. Automatic definition of the arrises.
- 5. Horizontal projection of program-generated surfaces.



4



5



medidos con el taquímetro sirviendo los demás para comprobación. Las discrepancias máximas entre las mediciones con Orthoware fueron de 3 cm, lo que prueba la fiabilidad del sistema.

Los 53 puntos medidos mediante Orthoware se han utilizado como puntos de apoyo tanto para las rectificaciones fotográficas como para la orientación de los pares estereoscópicos. Para la rectificación de fotos se ha utilizado el software ASRix (<http://asrix.ca>) mientras para la restitución estereofotogramétrica se ha realizado con el programa Poivilliers F. El trabajo con Orthoware ha requerido unas 4 horas, mientras la restitución de cada alzado necesitó de otras 12 horas.

Para la parte realizada mediante láser escáner, el proceso de registro de la información y su postprocesado o trabajo de gabinete comienza con el uso del software propio del equipo empleado como son el ScanMaster y el Image Master de Topcon con el cual se gestionan las nubes de puntos obtenidas. En este caso se enlazan los distintos escaneos para obtener una nube única y se procede a eliminar elementos no arquitectónicos que se encontraban en

la sala en el momento del escaneo.

A partir de la nube de puntos medidos, estos programas permiten realizar operaciones para generar otro tipo de entidades (contornos, aristas, superficies...) esto tiene interés siempre y cuando se conozca la forma en que el programa interpreta los puntos que realmente se han medido, ya que se producen ciertas simplificaciones e inexactitudes que dependen de los parámetros que los programas permiten definir y de la densidad de puntos escaneados. Por este motivo conviene no perder de vista los datos en bruto, es decir los puntos escaneados, para poder hacer una buena interpretación en base a criterios geométricos o constructivos que los programas no consideran. Teniendo esto en cuenta, las entidades generadas por los programas han sido: aristas (fig. 4), superficies a partir de mallas (TIN, triangulated irregular network) (fig. 5) y secciones por planos concretos verticales, y horizontales. Estas últimas, definidas por planos equidistantes, permiten generar planos acotados que aportan información de interés sobre las plementerías (fig. 6).

types of features (contours, arrises, surfaces...).

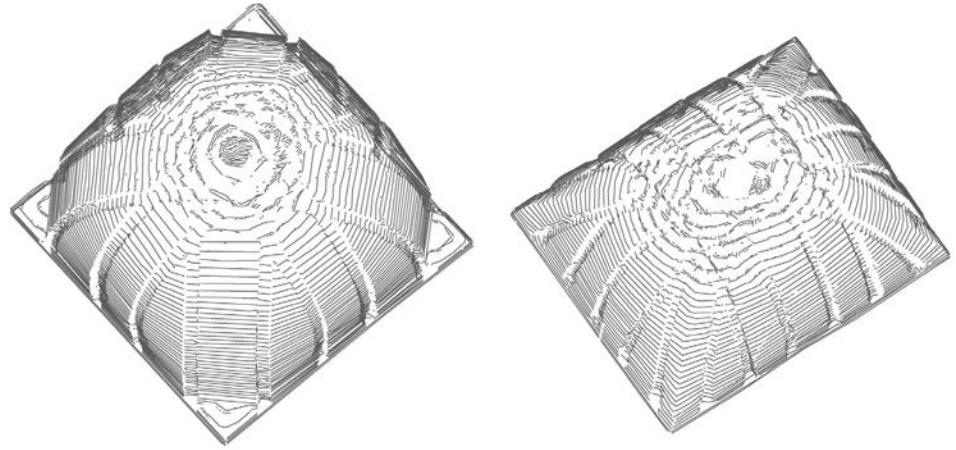
This is relevant as long as we know how the program interprets the points that have really been measured, since certain simplifications and inaccuracies occur which depend on the parameters the programs can define and the density of the points scanned. It is thus advisable to bear in mind raw data, that is to say, the points scanned, in order to obtain a good interpretation based on geometric or constructive criteria not taken into account by the programs. Taking this into account, the features generated by the programs were: arrises (fig 4), triangulated irregular networks (TIN) (fig 5) and sections according to specific vertical and horizontal planes. These are defined by equidistant planes and make it possible to generate dimensional drawings which provide relevant information on the vault (fig 6).

### Drawing up graphic documentation

All the 3D information of both the interior and exterior of the tower was included in a CAD program. For the ground floor the interior and exterior data collection was carried out using topographical tools and relating interior points to exterior points through the door. These connections were harder to measure in the case of the first floor and were collected through the few openings, whose current deterioration and the fact they are covered with safety glass, make it difficult to exactly identify points between the interior and exterior.



6. Definición de las plementerías por planos acotados (cada 10cm).  
 7. Vistas exteriores de la torre: Alzados este y oeste.  
 8. Vistas generales de la fase almohade de la torre homenaje.
6. Definition of vault compartments using dimensional plans (every 10cm).  
 7. External views of the tower. East and west façades.  
 8. General views of the Almohad phase of the homage tower.



The next step was to obtain graphic documentation in a diedric system to define the architecture and allow the analysis of the elements in their true size. General views of the tower were produced: elevations and horizontal and vertical sections that make it possible to situate the vaults within very thick walls.

The following documentation was produced for each of the two vaulted rooms (Fig 9 and 10):

- Floorplan. Horizontal section on the base of the outer walls. The projection of the arrises of the ribs is represented and in order to obtain further information a dotted line is used to superimpose horizontal sections that cut the vaults into selected planes, defining the vault compartment.
- Vertical, longitudinal and transversal sections of each room. These define the configuration of the room and the elevation of the ribs.

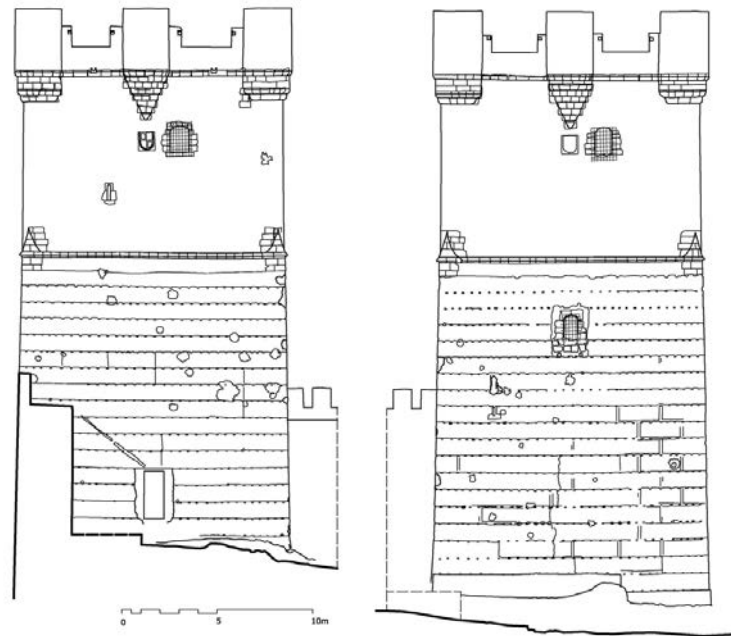
## Geometry and tracery

The vaulting systems of both rooms are based on the same geometrical and constructive composition principles, but these produced two differentiated models given the shape of the floorplans: one square and another rectangular. The peculiarity lies in the positioning of the interlinked ribs in planes that are parallel and perpendicular to the sides, following the directions of both diagonals, which divide up the vaulted space.

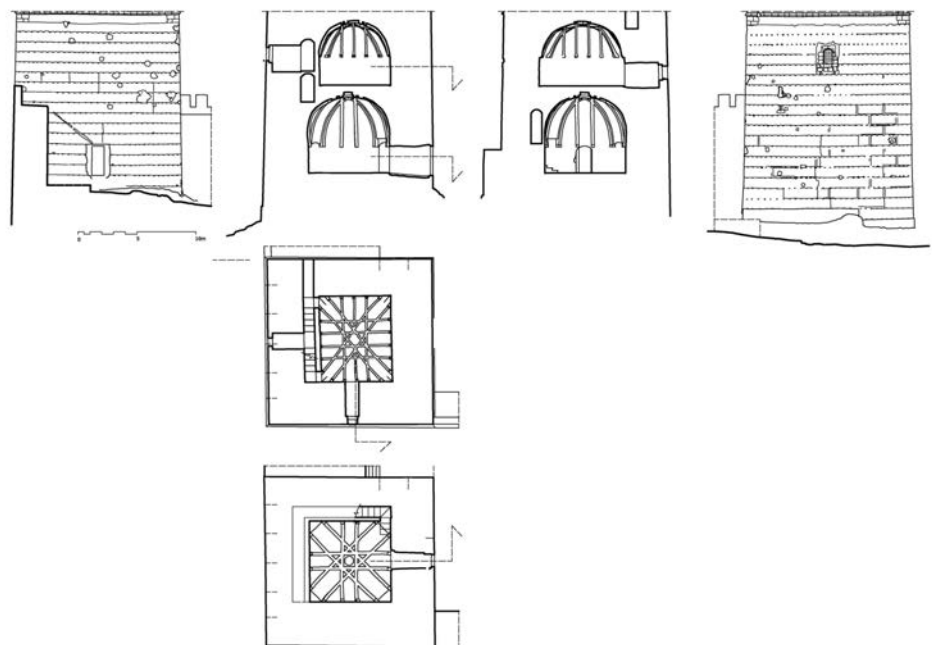
In the room of the lower level, the step is made from a basic square to an octagon through tapering pseudo-pendentives on all four corners. The tracery of the ribs springs from the network defined by dividing each side of the floorplan into five parts. The tracery of the vault on the first floor is rectangular and is more complex than that of the room below. However the network is created in the same way, but dividing each side of the floorplan into 6 and 7 parts.

The individual study of the actual ribs confirms the hypothesis of a curvature based on a geometric circle, a metaphor for perfect form which has proved to be advantageous for construction. As can be seen in the survey, these ribs show considerable irregularities which highlight noticeable discrepancies between the theoretical design and the real shape as it stands (fig 11).

6



7



8



- 9. Vistas de la sala del nivel inferior.
- 10. Vistas de la sala del nivel superior.

- 9. Views of lower room.
- 10. Views of upper room.

## Elaboración de la documentación gráfica

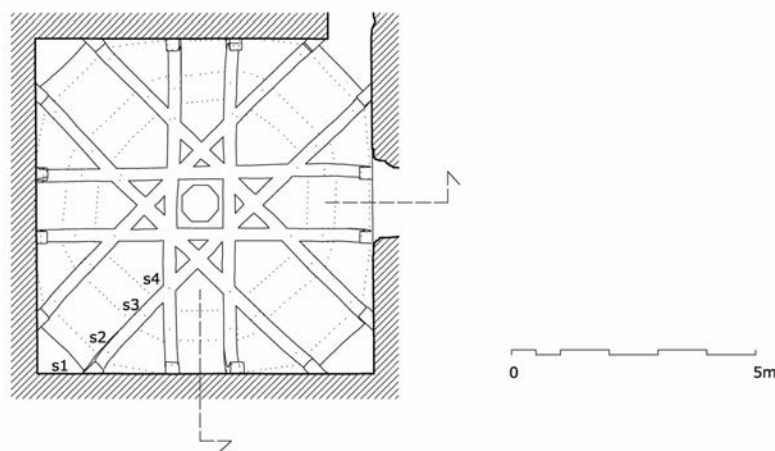
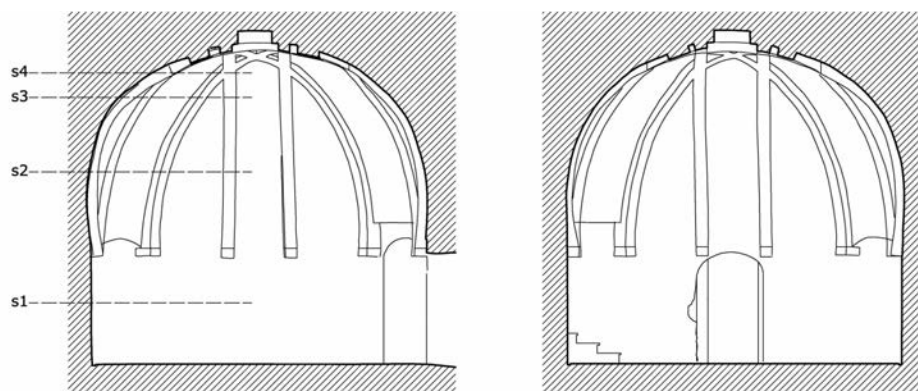
Toda la información en tres dimensiones tanto del interior como del exterior de la torre se ha integrado en un programa de dibujo asistido por ordenador. La conexión de la toma de datos interior y exterior, se realiza, en planta baja mediante apoyo topográfico, relacionado a través de la puerta puntos del interior con los puntos de la red exterior. La conexión de la sala de planta primera se realiza con mayor dificultad, enlazando a través de los escasos vanos, cuyo estado actual de deterioro y la existencia de un vidrio de seguridad dificulta la identificación exacta de puntos entre el interior y el exterior.

El siguiente objetivo es obtener una documentación gráfica en sistema diédrico que defina la arquitectura y permita el análisis de los elementos en su verdadera magnitud.

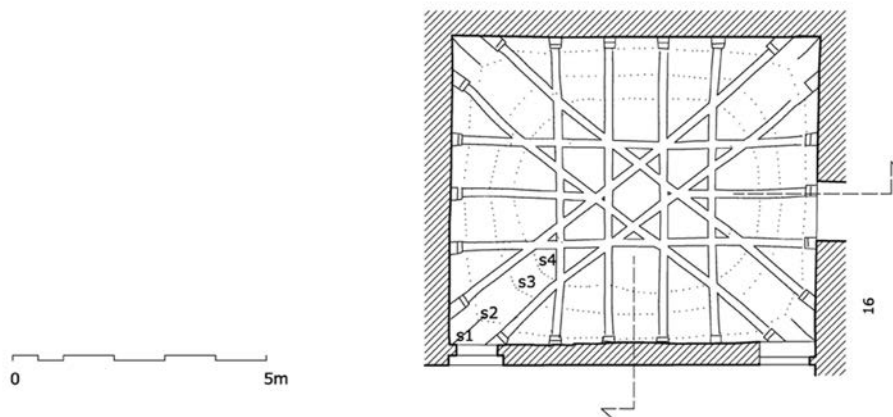
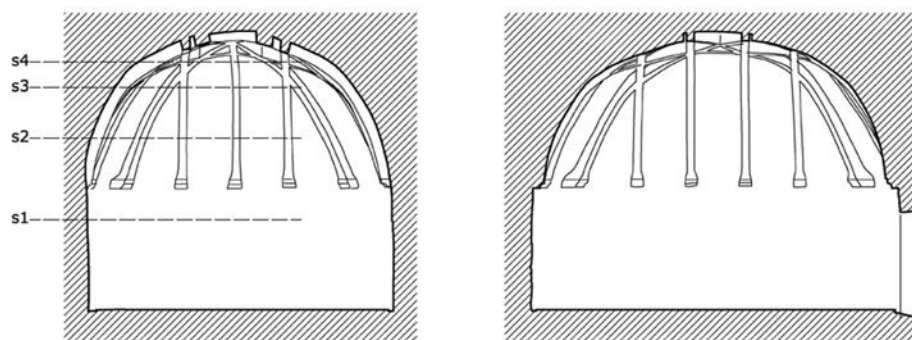
Por una parte se confeccionan las vistas generales de la torre: alzados y secciones horizontales y verticales que permiten ubicar las bóvedas en el interior de unas tapias de gran espesor.

Para cada una de las dos salas abovedadas se elabora la siguiente documentación (Figs. 9 y 10):

- Planta. Sección horizontal por la base de los muros. Se representa la proyección de las aristas de los nervios y para recoger mayor información se superponen (con línea de puntos) secciones horizontales que cortan las bóvedas por planos seleccionados para definir las plementerías.
- Secciones verticales, longitudinal y transversal, de cada sala. Definen la configuración de la sala y el alzado de los nervios.

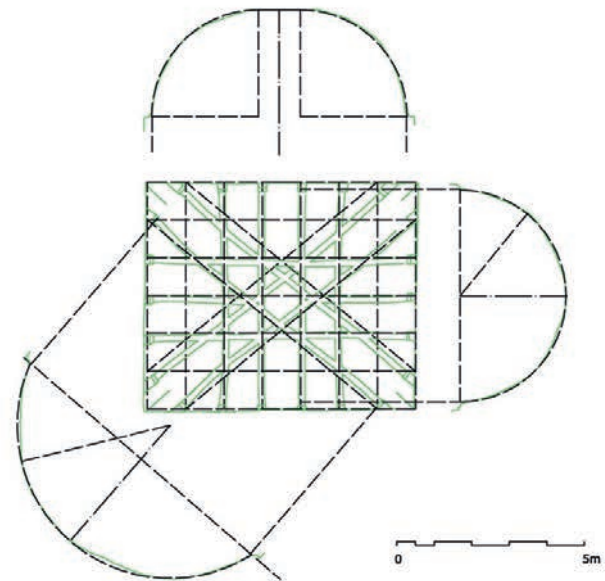
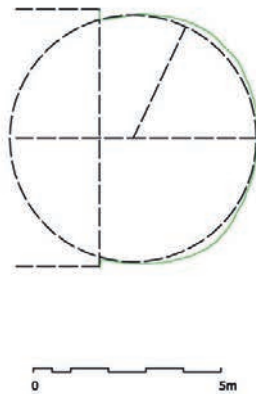
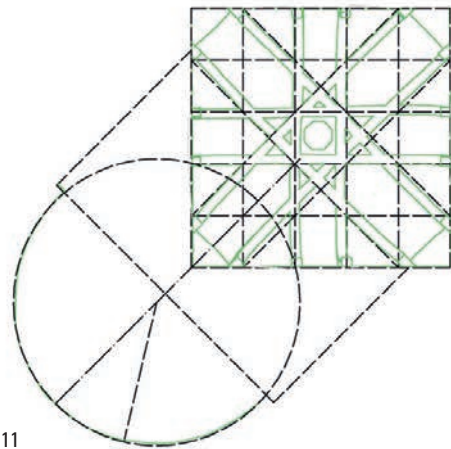
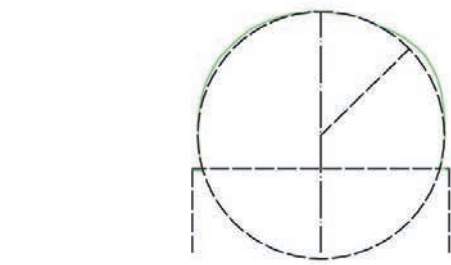


9



10





11. Geometría y trazado de las bóvedas.

11. Geometry and tracery of the vaults.

11

## Conclusions

Although the complete study of these vaults must be postponed until we obtain information on its form of construction and date, which will require other methods, the survey carried out has provided us with basic documentation that is essential to this type of work. The combined use of different measurement techniques and the comparison of costs and results proves that none of these provide ideal solutions, but rather that each must be applied according to the circumstances and, of course, availability. The advantage of photogrammetric methods is that these use low cost software and digital photography equipment. The orientation of blocks of photos using bundle adjustment makes it possible to dispense with topographical support in many cases, by collecting data with light equipment that is easy to use. The stereoscopic view during plotting process provides an analysis and interpretation very similar to those obtained in a direct survey, saving considerable time on fieldwork. Nevertheless, photogrammetry poses serious difficulties in specific cases, particularly when the object has smooth surfaces with barely any texture. In such cases it is almost impossible to identify homologue points using stereoscopic vision. The use of laser scanners resolves this problem and makes it possible to automatically obtain 3D models. Nevertheless, the cost of the equipment and the time needed for sweeps and post-processing together with other matters

## Geometría y trazado

Los sistemas de abovedamientos de las dos salas se basan en los mismos principios compositivos geométricos y constructivos capaces de producir dos modelos diferenciados debidos a la forma de las plantas: una cuadrada y otra rectangular. Lo peculiar es la disposición de nervios entrelazados contenidos en planos paralelos y perpendiculares a los lados y también según las direcciones de ambas diagonales que fraccionan el espacio abovedado.

En la sala del nivel inferior, del cuadrado base se pasa a un ochavo mediante unas pseudo-pechinas muy rebajadas dispuestas en los cuatro ángulos. El trazado de los nervios se apoya en la retícula definida al dividir cada lado de la sala en cinco partes. El trazado de la bóveda de la planta primera es rectangular, y adquiere mayor complejidad que la de la sala inferior. Con similar planteamiento la retícula se crea al dividir cada lado de la planta en 6 y 7 partes.

El estudio de cada nervio en verdadera magnitud confirma la hipótesis

de una curvatura regida por la geometría del círculo, cuyas virtudes son indudables, desde alusiones metafóricas acerca de su perfección hasta sus comprobadas ventajas de índole constructiva. La ejecución de estos nervios se hizo con notables irregularidades como puede apreciarse en el levantamiento lo que da lugar a discrepancias notables entre el trazado teórico y la forma real actual (fig. 11).

## Conclusiones

Aunque el estudio completo de estas bóvedas lo debemos posponer a la obtención de información sobre su forma constructiva y su datación, que requerirán de otros métodos, el levantamiento realizado nos ha proporcionado una documentación de base indispensable en este tipo de trabajos. El uso combinado de distintas técnicas de medición y la comparación de costes y resultados prueba que ninguna de ellas proporciona soluciones ideales sino que cada una debe aplicarse según las circunstancias, y por supuesto, la disponibilidad. Los métodos fotogramétricos

