

## MÉTODO PARA LA COMPRENSIÓN ESTRUCTURAL DE LOS EDIFICIOS HISTÓRICOS A PARTIR DEL LEVANTAMIENTO GRÁFICO POR LÁSER ESCÁNER

### METHOD FOR IMPROVING STRUCTURAL COMPREHENSION OF HISTORICAL BUILDINGS BASED ON TERRESTRIAL LASER SCANNER TECHNOLOGY

Belén Onecha Pérez, Alicia Dotor Navarro

doi: 10.4995/ega.2022.17379

Como es bien sabido, la intervención en los edificios históricos requiere de un conocimiento previo de los mismos que debe ser lo más riguroso y exhaustivo posible. Entre los diversos estudios necesarios (histórico, arqueológico, materiales, geotecnia, etc.) asume gran importancia la comprensión del sistema constructivo y estructural, pero la interpretación de estos datos en edificios que, de manera habitual, han sufrido reformas y ampliaciones a lo largo del tiempo, suele ser compleja. Este artículo plantea un método replicable para facilitar la comprensión constructiva y estructural de los edificios históricos a través de la obtención de secciones específicas sobre la base del levantamiento gráfico por láser escáner terrestre (TLS). Su aplicación se ilustrará partiendo de un caso reciente de intervención en un edificio histórico: el palacio de Can Armengol en Palma de Mallorca.

**PALABRAS CLAVE:** PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO, EDIFICIOS HISTÓRICOS, LEVANTAMIENTO GRÁFICO, LÁSER ESCÁNER TERRESTRE, ANÁLISIS ESTRUCTURAL

*It is well known that the restoration of historical buildings requires prior knowledge of them, which must be as rigorous and exhaustive as possible. Among the various studies that are required (historical, archaeological, construction materials, geotechnical, etc.) the understanding of the structural system is of great importance. It is often hard to interpret these data in this kind of buildings, which have been retrofitted and extended over the years. This paper proposes a replicable method to improve the construction and structural comprehension and assessment of historical buildings, through the analysis of specific sections based on digital surveying by terrestrial laser scanner (TLS). Its application is demonstrated based on a recent case of intervention in a historical building: the Can Armengol Palace in Palma de Mallorca.*

**KEYWORDS:** ARCHITECTURAL HERITAGE, HISTORICAL BUILDINGS, DIGITAL SURVEY, DIGITAL TERRESTRIAL LASER SCANNER, STRUCTURAL ASSESSMENT

## Introducción

En todos los procesos de intervención en los edificios históricos, la captura de datos y la documentación gráfica constituyen una información previa indispensable, ya que describen la forma arquitectónica y cuantifican con precisión su geometría, **1**. Los sistemas tradicionales de levantamiento gráfico suelen conducir a resultados poco rigurosos, especialmente si se trata de edificios muy grandes, **2**. Si además son edificios muy antiguos, que han sufrido diversas reformas y ampliaciones, la complejidad se multiplica.

Existen diversos sistemas de levantamiento gráfico, pero entre ellos destaca la técnica del láser escáner terrestre, que se ha ido perfeccionando de tal manera en los últimos años, que permite obtener información geométrica con una precisión milimétrica, con lo que incluso puede dar apoyo al reconocimiento de deformaciones de los elementos constructivos y a la caracterización de ciertos estados patológicos en los materiales de construcción que constituyen los edificios históricos, así como a la monitorización de la evolución de dichos daños, resaltando el hecho de que además, es un método no destructivo, factor importante cuando hablamos del patrimonio histórico, **3**.

Las ventajas del TLS (*Terrestrial Laser Scanner*) frente a otros métodos de levantamiento gráfico son evidentes: permite obtener la geometría 3D de superficies complejas; no necesita contacto directo, lo que evita la alteración de los materiales, **4**; facilita el acceso a elementos estructurales que de otra manera serían difícilmente accesibles, como las bóvedas y las cúpulas; provee una gran densidad de datos con

gran precisión y a gran velocidad; la obtención de puntos no requiere iluminación específica, **5**.

No obstante, se debe tener en cuenta que el TLS también tiene ciertos inconvenientes, como el coste de los equipos, el tiempo dedicado al post proceso de los datos, cuestiones relativas al análisis e interpretación del objeto cuyo levantamiento se está realizando, **6**; o la dificultad de obtener datos de las zonas en contacto con otras edificaciones, puesto que no son visibles, o el hecho de que espacios muy complejos requieren gran cantidad de tomas de datos, **7**; también la complejidad que se deriva cuando las edificaciones objeto del levantamiento gráfico son muy altas y se encuentran en centros históricos, dada la posible prohibición de utilizar un dron sobre ellos, **8**; por otra parte y en relación a la utilización de drones para la toma de datos con precisión, cabe explicar que estos solo proporcionan imágenes que, mediante un programa de fotogrametría digital, permiten la generación de un “modelo fotográfico” tridimensional, que posteriormente se tiene que poner a escala para que las referencias métricas sean precisas y superponer al modelo en formato “nube de puntos” para así combinar la precisión métrica del TLS con la resolución de la imagen fotográfica.

El TLS aplicado a la comprensión estructural de los edificios históricos ya es algo habitual por varias razones: trabajar con una nube de puntos obtenida permite múltiples posibilidades de procesamiento, ya que se puede seccionar por cualquier plano en cualquiera de las direcciones del espacio, se puede subdividir la nube en diversos elementos, tomar medidas, aislar las áreas de interés, **9**, trasladar esta

## Introduction

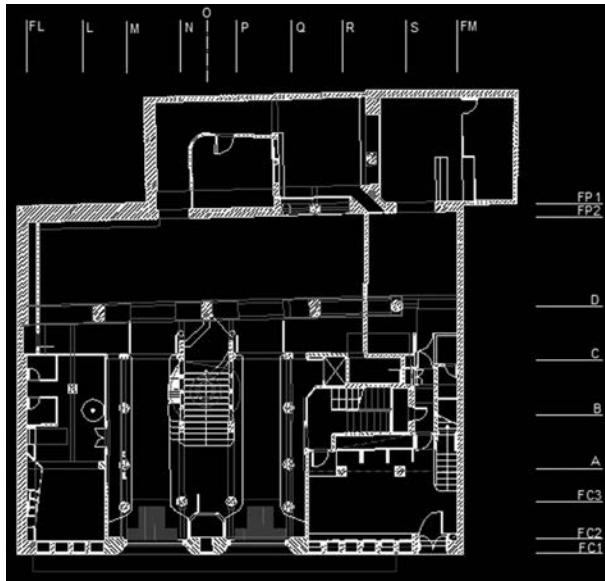
For every kind of architectural intervention in historical buildings, data capture and graphic documentation are essential prior information, to precisely describe the architectural shape and accurately quantify its geometry, **1**.

Traditional, handmade graphic survey systems usually lead to results that are not entirely rigorous, especially if they define very large buildings, **2**. If these buildings are also very old and have undergone several reforms and extensions, the complexity is multiplied.

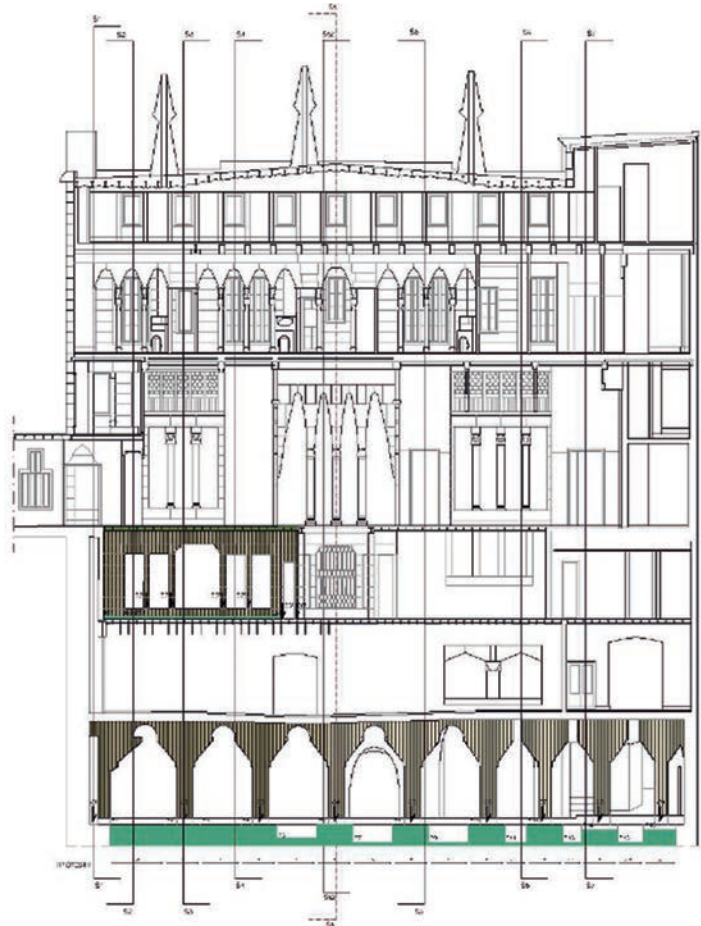
There are several graphic survey systems, but among them, the terrestrial laser scanner technique (TLS) stands out. TLS has been refined in such a way in recent years that it allows geometric information to be obtained with millimetric precision. Currently, it can even detect minimal deformations in building elements, characterize damage in certain construction materials, and monitor the evolution in this damage. Notably, it is a non-destructive method, which is an important factor in historical heritage, **3**.

The advantages of TLS compared to other graphic survey methods are evident. It allows the 3D geometry of complex surfaces to be obtained. It does not require direct contact, which avoids the alteration of materials, **4**. It facilitates access to structural elements that would otherwise be difficult to access, such as vaults and domes. It provides high data density with high accuracy and high speed. Finally, specific lighting is not required to obtain points, **5**.

However, TLS also has certain drawbacks, such as the cost of the equipment, the time dedicated to post-processing data and questions related to the analysis and interpretation of the object that is being surveyed, **6**. It is also difficult to obtain data from areas that are in contact with other buildings, since they are not visible. Furthermore, very complex spaces require a large number of data collection activities, **7**. When the buildings that are the object of the graphic survey are very tall and are located in historical city centres, the data gathering is complex, given the possible prohibition of using a drone over them, **8**. When drones are used for accurate data collection, they only provide images that, through a digital photogrammetry program, allow the generation of a 3D photographic model. The images must be scaled so that the metric references are precise and overlay the TLS model, to combine the metric precision of the TLS model with the high resolution of the photographic images.



1



2

TLS is sometimes applied to the structural comprehension of historical buildings, for several reasons. Working with the “point cloud” that is obtained provides multiple processing possibilities, since it can be sectioned by any plan in any direction of the space. The “cloud” can be subdivided into several elements, measurements can be taken and specific areas of interest isolated, **9**. Alternatively, this section can be transferred to a finite element model, **10**. Some research studies focus on the automation of this process, **11**. Accurate rigorous surveying is extremely important to understand structural stability. Often a survey already exists, but it was carried out by traditional means and there are doubts about its accuracy. In this case, the survey is performed again by laser scanner, **12**. This usually occurs when the behaviour of vaults needs to be studied to carry out an analysis according to the limit analysis security theorem, **13**. A rigorous structural analysis is vital to avoid erroneous conclusions that could lead to disproportionate reinforcement actions, causing unnecessary losses of the building’s cultural and material values, or to avoid insufficient interventions, which can generate unacceptable risks to people and heritage, **14**.

sección a un modelo de elementos finitos, **10**, e incluso, encontramos estudios que desarrollan la automatización de este proceso, **11**.

Es tan importante el levantamiento riguroso preciso para la comprensión de la estabilidad estructural que muchas veces el levantamiento ya existe, pero a través de medios tradicionales y se teme por la exactitud, con lo que se vuelve a realizar el levantamiento, pero por laser escáner, **12**. Esto ocurre habitualmente cuando se trata de estudiar el comportamiento de las bóvedas para realizar el análisis según el teorema de la seguridad del análisis límite, **13**. Cabe señalar la importancia de un análisis estructural riguroso para evitar conclusiones erróneas que podrían conducir a actuaciones de refuerzo desmesuradas, causando pérdidas innecesarias por lo que respecta a los valores culturales y materiales del edificio, pero también a inter-

venciones insuficientes, que pueden generar riesgos inadmisibles en la gente y el patrimonio, **14**.

Nuestro equipo de trabajo lleva años analizando la estructura y los sistemas constructivos de los edificios históricos. En 2003, para el estudio del Palau Güell de Gaudí se diseñó un método de estudio estructural a partir de una retícula aplicada a los planos de carga.

Sin embargo, el levantamiento gráfico existente no estaba completo, por lo que la aplicación del método, dada la complejidad del edificio, requirió una inversión de horas desproporcionada para revisar, confirmar y entender los elementos dibujados.

Con posterioridad, se aplicó el método a otros edificios históricos, de complejidad estructural inferior, a partir del levantamiento gráfico por TLS.

Este artículo recupera los estudios mencionados y aporta la experiencia de más de 20 años inter-



1 y 2. Palau Güell de Barcelona, diseñado por Antoni Gaudí en 1885. Reticula de planos de carga sobre el plano de planta baja y la sección transversal hacia la fachada posterior. (Fuente: autoras, 2003)  
 3. Santa María de Barberà del Vallès. Nube de puntos rectificadas con fotografías del levantamiento gráfico por TLS (Fuente: Autoras, 2007)

1 and 2. Palau Güell in Barcelona, designed by Antoni Gaudí in 1885. Loading plan grid overlapped on the ground floor plan, with a cross section towards the rear façade (Source: authors, 2003)  
 3. Santa María de Barberà del Vallès. Point cloud rectified through photographs (Source: authors, 2007)

viniendo en el patrimonio arquitectónico para proponer un método de comprensión estructural de los edificios históricos y patrimoniales a través del planteamiento de una retícula de planos de carga, en que el sistema de levantamiento gráfico de láser escáner terrestre y el resultado que genera, la nube de puntos, se convierte en pieza clave, puesto que su precisión, la magnitud de datos que proporciona y la ordenación de los datos a demanda según diversos criterios, permiten detectar, caracterizar y analizar los diversos componentes de la estructura del edificio en todas las direcciones del espacio.

### El Palacio de can Armengol

El edificio de Can Armengol, Bien de Interés Local, es el resultado de la unión y reforma de dos palacios de diversas épocas históricas.

La primera documentación escrita sobre el edificio data de 1685\*, aunque la zona en que se encuentra, junto con los restos arqueológicos encontrados, y la inclusión de algunos elementos de estilo gótico en las estructuras aéreas del edificio, hacen pensar en un origen anterior.

En 1810, se produjo la gran reforma neoclásica que unió los dos palacios, modificó las fachadas de uno de los patios y creó una serie de salas nobles, decoradas con pinturas murales, en la planta primera.

A principios del siglo XX se produjo otra gran reforma, en este caso novecentista, que modificó el perímetro del edificio, así como la altura y la composición de las fachadas sur y oeste del conjunto.

Can Armengol presenta todas las estrategias de la construcción histórica de la zona, muros de obra de fábrica de piedra de *marés* como ele-

mentos verticales, combinados con estructuras horizontales de forjados de vigas de madera y entrevigado de yeso o bóvedas de piedra de *marés*. A pesar de la uniformidad de los materiales constructivos empleados, la estructura el edificio es el resultado de las reformas mencionadas anteriormente, con lo que comprender el descenso de las cargas a través de ella, presenta una alta complejidad.

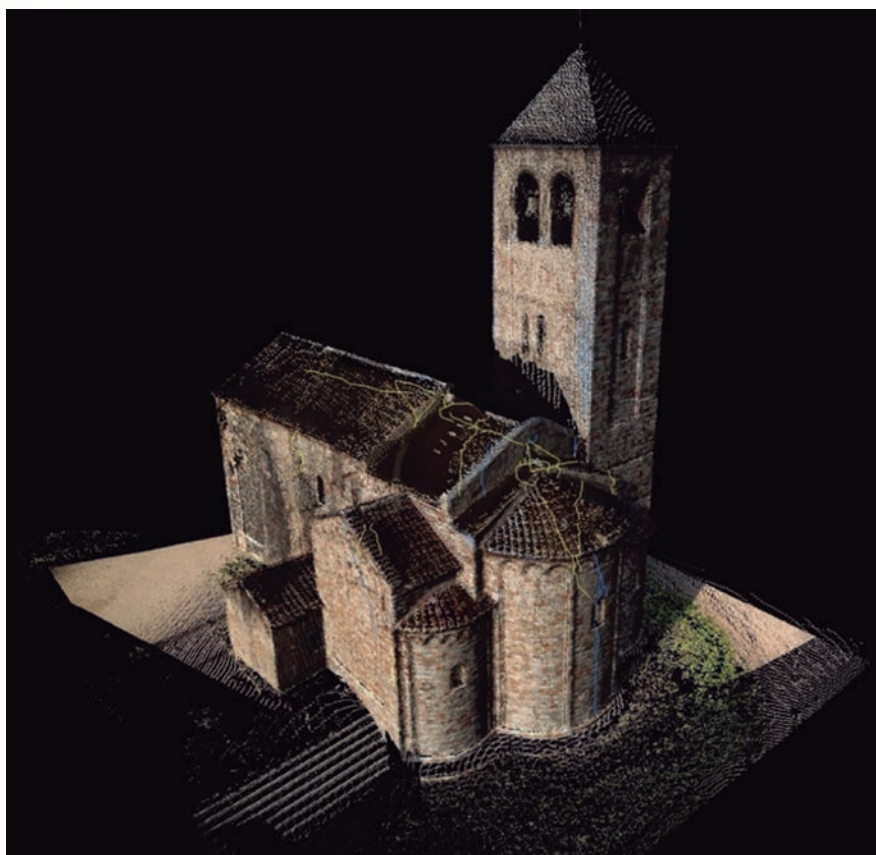
### Método de trabajo

Todo proceso de intervención en un edificio histórico comienza por su levantamiento gráfico riguroso. En el caso del palacio de Can Armengol, este levantamiento se realizó a través de la técnica de TLS.

En una primera etapa, de la nube de puntos obtenida, se generaron los

Our team has spent years analysing the structure and construction systems of historical buildings. In 2003, for the study of Gaudí's Palau Güell, a structural study method was designed based on a grid reflecting the loading plans. However, the existing graphic survey was incomplete. Given the building's complexity, the application of the method required a disproportionate investment in time to review, confirm and understand the drawn elements. Some years later, the method was applied to other historical buildings of lower structural complexity, on the basis of a TLS survey.

This article reviews these studies and provides the technical expertise gained in over 20 years intervening in architectural heritage to propose a method for structural understanding of historical and heritage buildings through the approach of a grid of loading plans. To apply this method, the use of the TLS system survey and the results it generates is a key factor. The point cloud is essential, since its precision, the magnitude of data obtained and the order of data on demand allow detection, characterization and analysis of





the various components of building structures in every direction of space.

## Can Armengol Palace

Can Armengol, an "Asset of Local Interest", is the result of the combination and renovation of two palaces from different historical periods. The first written documentation on the building dates back to 1685, although the area in which it is located, together with some archaeological remains found and the inclusion of some Gothic-style elements in the aerial structures of the building, suggest an earlier origin. In 1810, the great neoclassical reform took place that united the two palaces, modified the facades of one of the courtyards, and created a series of noble rooms, decorated with mural paintings, on the first floor. At the beginning of the twentieth century there was another major reform that modified the perimeter of the building, and the height and composition of the south and west façades. Can Armengol presents all the strategies of the area's historical construction: Marés stone masonry walls combined with horizontal structures of wooden beam slabs or Marés stone vaults. Despite the uniformity of the construction materials that were used, the structure of the building is the result of the reforms mentioned above, so it was highly complex to understand it.

## Working method

Every process of intervention in a historical building begins with a rigorous graphic survey. In

cortes correspondientes a las plantas y fachadas, así como varias secciones transversales y longitudinales.

Con esta información, junto con la derivada del resto de estudios previos para el conocimiento (histórico, arqueológico, geotécnico, etc.), se validó el anteproyecto con la propiedad, con lo que los criterios de intervención y la afectación estructural quedaba definida.

A partir de este momento, se inició el estudio estructural del descenso de cargas. Para simplificar la comprensión estructural, sobre la planta se superpuso una retícula correspondiente a los planos de carga.

La intención era analizar en detalle el número y la magnitud de las cargas que asumía cada plano de la retícula, para lo cual era necesario realizar cortes de la nube de puntos al ras de las dos caras del plano de carga.

La información obtenida, correspondiente a los forjados que se entregaban al plano, así como las singularidades de dicho plano que alteraban el peso propio del mismo, e incluso las lesiones de los materiales, se trasladaba a las secciones dibujadas en cad.

4. Sección obtenida a partir del levantamiento gráfico del pabellón de San Manuel del Hospital de la Santa Creu i Sant Pau de Barcelona (Fuente: Autoras, 2010)  
5. Palacio de Can Armengol en Palma de Mallorca. Vista aérea. (Fuente: google maps, 2018)  
6. Planta noble del Palacio de Can Armengol en Palma de Mallorca. Foto nube de puntos obtenida por TLS (Fuente: Claudio Hernández, 2019)

4. Cross section of the point cloud from the TLS survey of San Manuel pavilion, Hospital de la Santa Creu i Sant Pau de Barcelona (Source: authors, 2010)  
5. Can Armengol palace in Palma de Mallorca. Aerial view (Source: Google maps, 2018)  
6. Can Armengol Palace, first floor plan. Photograph of the point cloud obtained by TLS (Source: Claudio Hernández, 2019)

A partir de aquí, los datos numéricos se trasladaban a una hoja de cálculo, en que se planteaban diversas hipótesis de sobrecargas y se detectaban los estados tensionales límite, así como la tensión en el plano de contacto con el terreno. Para Can Armengol, las conclusiones fueron que el edificio gozaba de una buena estabilidad general y que podía asumir sin problema el uso derivado del proyecto de intervención, que no aumentaba las sobrecargas respecto al uso histórico, puesto que se conservaba la función residencial.

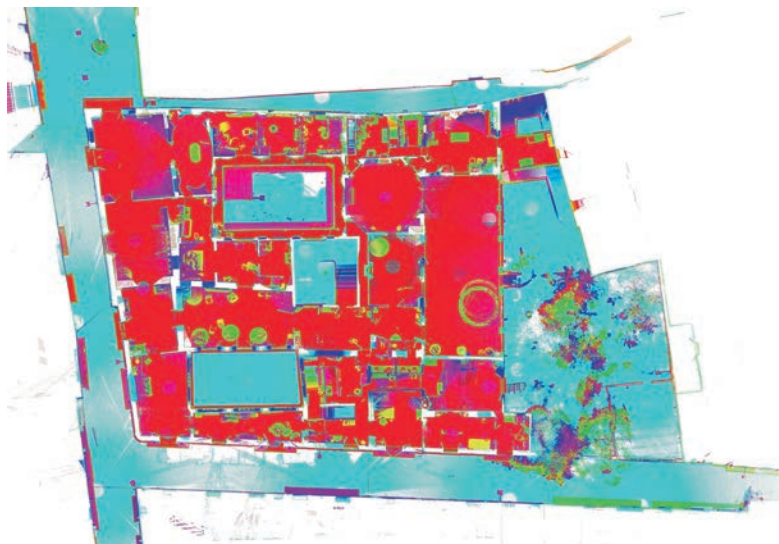
Cabe señalar que el proceso fue mucho más ágil y rápido que en ocasiones similares para edificios históricos complejos, como el caso del Palau Güell descrito anteriormente.

Este método se aplicó también al estudio en detalle de los elementos singulares curvos: la escalera princi-





5



6

pal y la cúpula octogonal del salón de la planta noble del edificio, ambas conformadas mediante bóveda a la catalana delgada de piezas de piedra de marés. La primera se analizó rigurosamente a través del método de estática gráfica, mientras que la segunda, como cúpula delgada, se consideró como una membrana y se estudió a través del método de Wolfe.

Del estudio se obtuvieron las tensiones precisas en la base de los muros y columnas, se localizaron puntos de concentración de cargas, se interpretaron las pocas lesiones estructurales que se observaban, etc.

### Análisis de resultados

Como se ha podido observar, el método propuesto para el análisis estructural de los edificios históricos, es relativamente sencillo, siempre que vaya apoyado en un levantamiento gráfico riguroso y que tratemos con edificios conformados en base a sistemas constructivos tradicionales, que trabajan a compresión mayoritariamente.

Los arcos, bóvedas y cúpulas, elementos habituales en este tipo de edificios, generan empujes horizontales, con lo que requieren estudios específicos para poder establecer las condiciones de equilibrio, pero también de tipo gráfico, como la estática gráfica o Wolfe, según el caso.

De todos modos, el método es asequible a cualquier arquitecto con formación en la comprensión de la construcción histórica, sin tener que recurrir a un análisis por elementos finitos, que muy pocos arquitectos pueden realizar, y menos aún interpretar.

### Conclusiones

El método de levantamiento gráfico más eficaz, riguroso y sencillo para analizar la estructura y la construcción de los edificios históricos complejos es el Láser Escáner Terrestre, ya que permite realizar secciones exhaustivas y concretas de los planos de carga, así como de los elementos singulares que provocan empujes.

Si bien es cierto que requiere un procesado de los datos y una interpretación de los mismos acompañada de la observación in situ, preferentemente por parte de diversos especialistas (arquitecto, historiador y arqueólogo principalmente), incluso esta parte de redibujado es didáctica y ayuda a la mejor comprensión de un tipo de edificios cuyos sistemas y estrategias constructivas no se enseñan en los grados de arquitectura, con lo que el medio de conocimiento adquiere una importancia suprema.

Así mismo, que el método sea asequible para todo arquitecto con

Can Armengol Palace, this survey was carried out using the TLS technique.

In the first stage, the cuts corresponding to floor plans and facades and the cross sections were obtained from the point cloud.

With this information, together with that derived from the rest of the previous studies undertaken to improve knowledge of the building (historical, archaeological, geotechnical, etc.), the preliminary project was validated with the property, including the intervention criteria and the structural impact. From this point, the structural study of the lowering of loads began. To simplify structural comprehension, a grid corresponding to the loading plans was overlapped on every floor plan. The main goal was to analyse in detail the number and magnitude of the loads assumed by each loading plan of the grid. To achieve this, slices of the point cloud needed to be made, flushing both sides of each loading plan.

The information that was obtained, corresponding to the slabs that were delivered to the plan, its singularities and even the damage to materials, were transferred to the cross sections drawn in CAD.

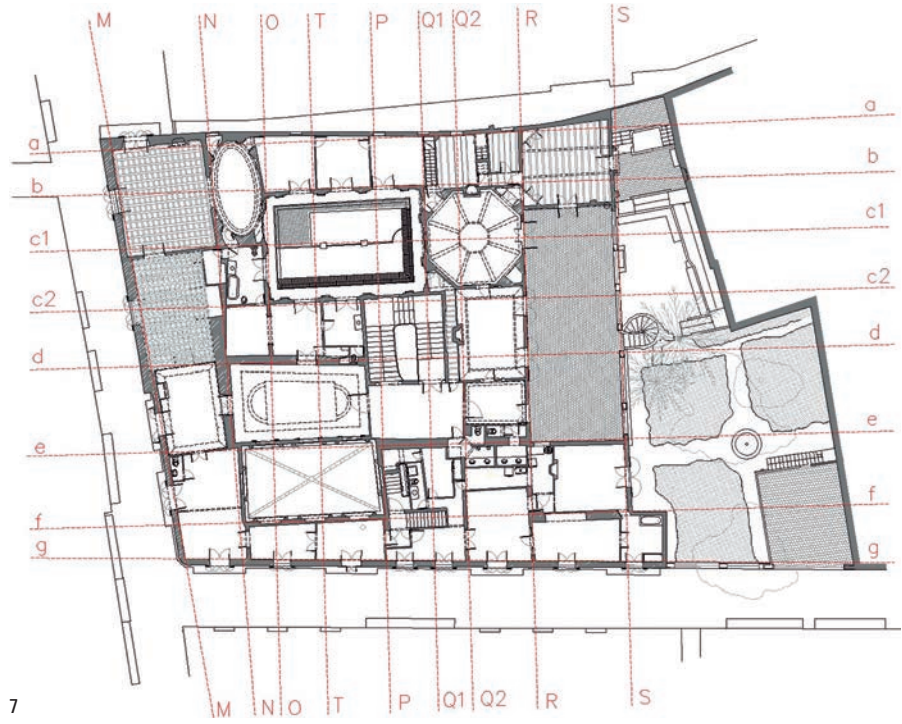
Then, the numerical data were transferred to a spreadsheet on which various overload hypotheses were proposed and the limit stress states were detected, as well as the compressive stress reaching the ground. For Can Armengol Palace, the conclusions were that the building had good general stability and it could easily take on the use detailed in the intervention project, which did not increase overloads compared to the historical use since the residential function was preserved. The process was much more effective than on similar occasions for complex historical buildings, such as the case of Palau Güell described above. This method was also applied to the detailed



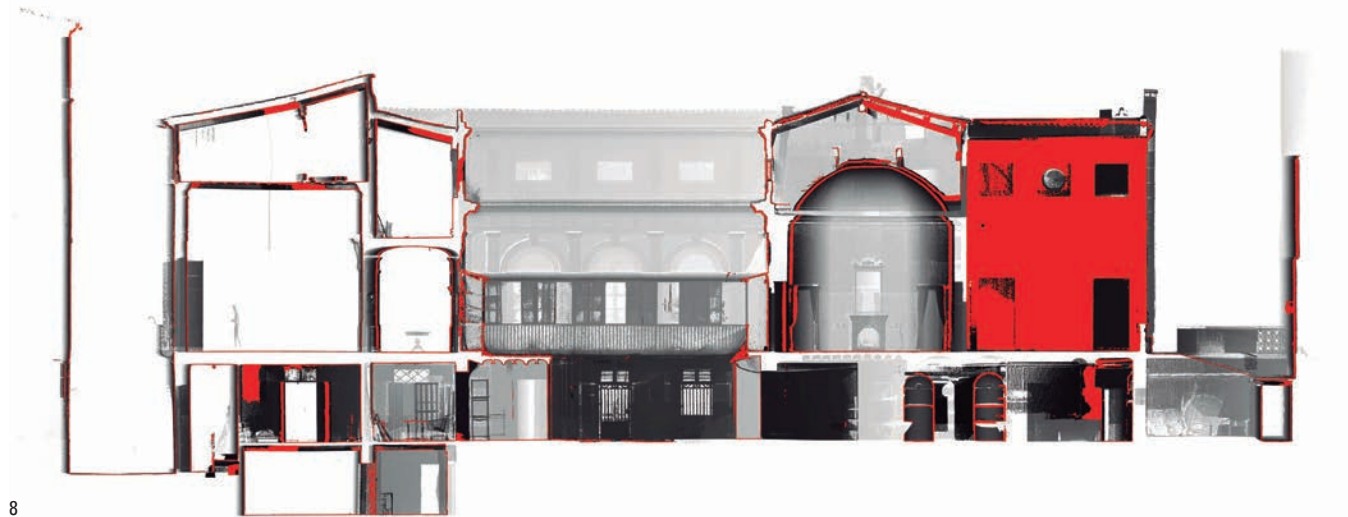
study of the curved elements: the main staircase and the octagonal dome of the hall in the main part of the building, which were both built using a thin Catalan vault of Marés stone pieces. The first was rigorously analysed through the graphical statics method, while the second of a thin dome membrane-type was studied using the Wolfe method. The precise stresses at the base of the walls and columns were obtained from the study, load concentration points were identified and the few elements of structural damages were interpreted.

### Analysis of results

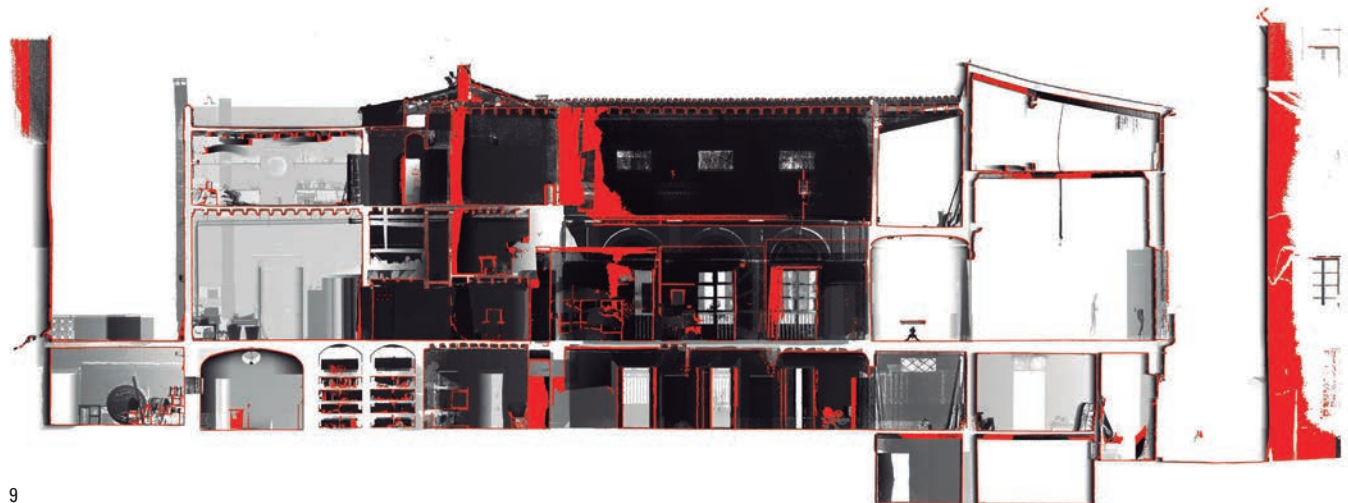
As observed, the method proposed for the structural analysis of historical buildings is



7



8



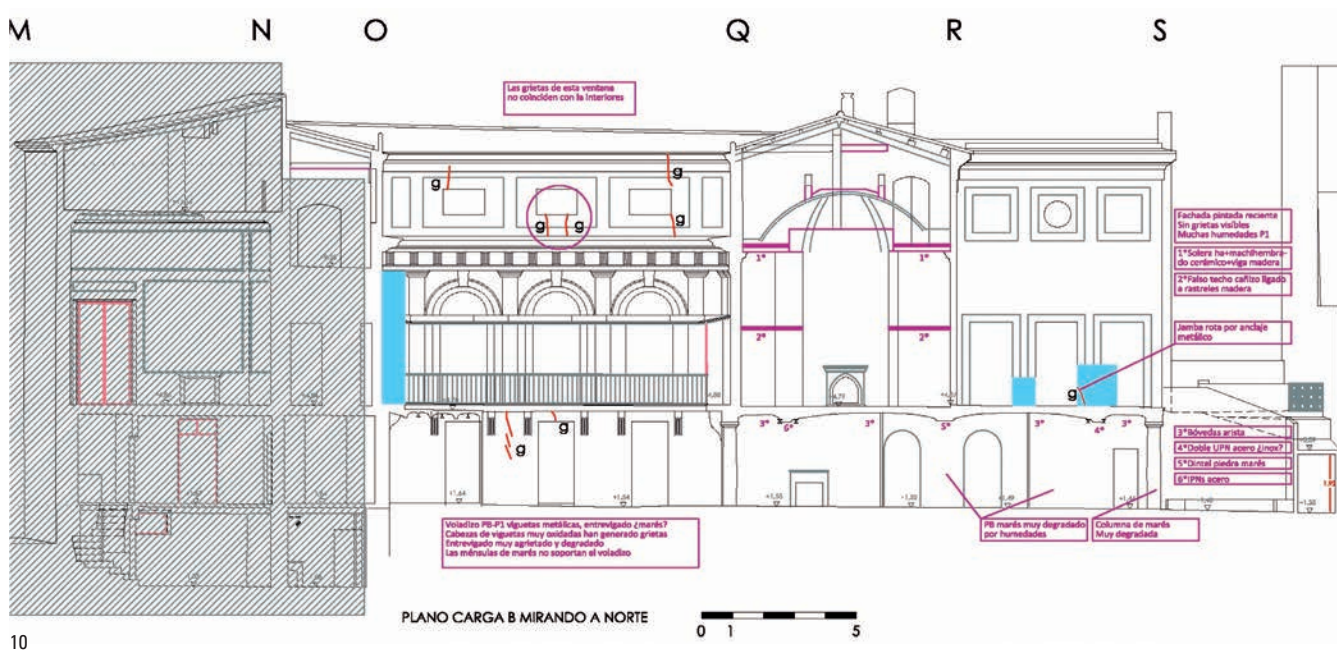
9



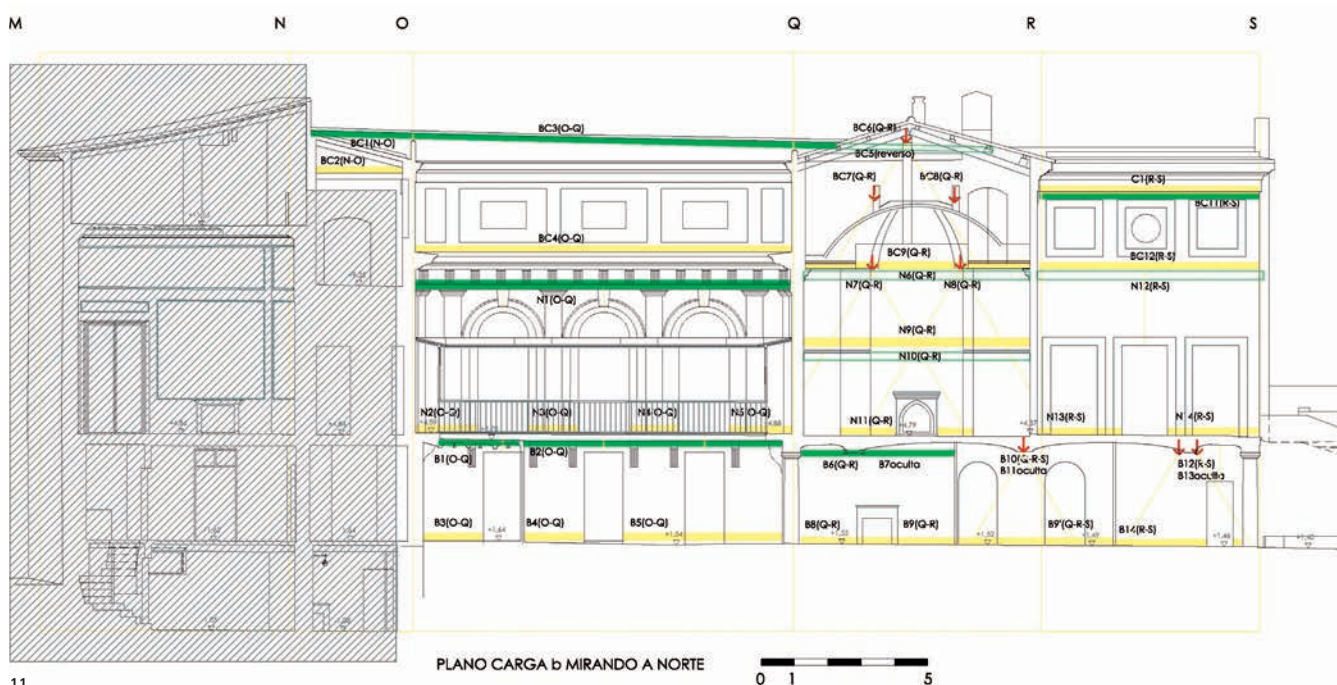
- 7. Planta noble del Palacio de Can Armengol en Palma de Mallorca. Reticula de planos de carga Norte-Sur y Este-Oeste establecida por las autoras. (Fuente: autoras, 2019)
- 8. Palacio Can Armengol. Sección por plano de carga b-b mirando a norte. (Fuente: autoras, 2019)
- 9. Palacio Can Armengol. Sección por plano de carga b-b mirando a sur. (Fuente: autoras, 2019)
- 10. Palacio Can Armengol. Sección por plano de carga b-b mirando a norte. Traslación de los datos sobre lesiones. (Fuente: autoras, 2019)
- 11. Palacio Can Armengol. Sección por plano de carga b-b mirando a norte. Traslación de los datos sobre cargas de forjados y pesos propios de los elementos verticales. (Fuente: autoras, 2019)

- 7. Can Armengol Palace main floor. Loading plan grid: north-south and east-west (Source: authors, 2019)
- 8. Can Armengol Palace. Cross section flushing loading plan b-b, looking north (Source: authors, 2019)
- 9. Can Armengol Palace. Cross section flushing loading plan b-b, looking south (Source: authors, 2019)
- 10. Can Armengol Palace. Cross section of loading plan b-b looking north, including damage data (Source: authors, 2019)
- 11. Can Armengol Palace. Cross section of loading plan b-b looking north, including slabs and vertical load data (Source: authors, 2019)

relatively simple, provided that it is supported by a rigorous graphic survey and that we deal with buildings based on traditional construction systems, which mostly work under compression. Arches, vaults and domes, common elements in this type of building, generate horizontal thrusts, which require specific studies to be able to establish the equilibrium conditions, but also graphic studies, such as the graphic statics of



10



11





12 y 13. Palacio Can Armengol. Imagen de la escalera principal y del análisis de la bóveda de escalera mediante estática gráfica, a partir de la sección concreta del TLS. (Fuente: autoras, 2019)  
 14 y 15. Palacio Can Armengol. Análisis de la cúpula octogonal por el método de Wolfe, a partir de la planta y la sección obtenidas a partir de la nube de puntos TLS. (Fuente: autoras, 2019)

12 and 13. Can Armengol Palace. Picture of main staircase and analysis of its vault through graphic statics, based on the specific cross section obtained with TLS (Source: authors, 2019)  
 14 and 15. Can Armengol Palace. Analysis of octagonal dome through the Wolfe method, based on the floor plan and the cross section obtained with TLS (Source: authors, 2019)

the Wolfe method, depending on the case. In any case, the method is accessible to any architect trained in the understanding of historical construction, without having to resort to finite element analysis, which very few architects can perform or interpret.

## Conclusions

The most effective, rigorous and simple graphical survey method to analyse the structure and construction of complex historical buildings is the terrestrial laser scanner, since it allows exhaustive, specific sections of load plans to be drawn up, as well as the singular elements that cause thrust. Although it requires data processing and interpretation accompanied by in situ observation, preferably by various specialists (mainly an architect, historian and

formación básica sobre los sistemas constructivos tradicionales, aumenta el número de profesionales capaces de realizar análisis y diagnosis estructurales. ■

### Nota

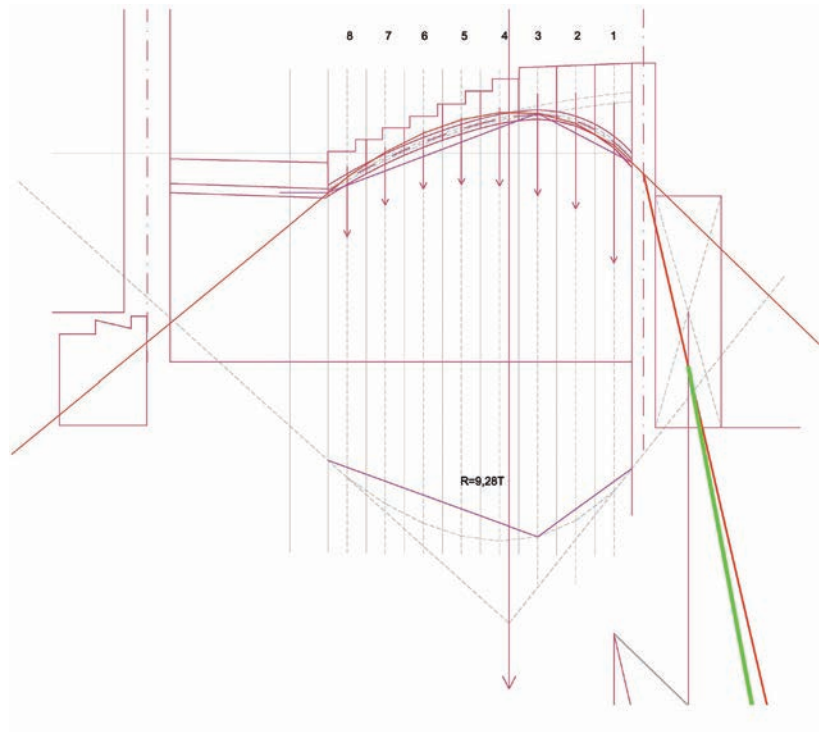
\* *Catàleg de protecció d'edificis i elements d'interès històric, artístic, arquitectònic i paisatgístic de Palma.*

### Referencias

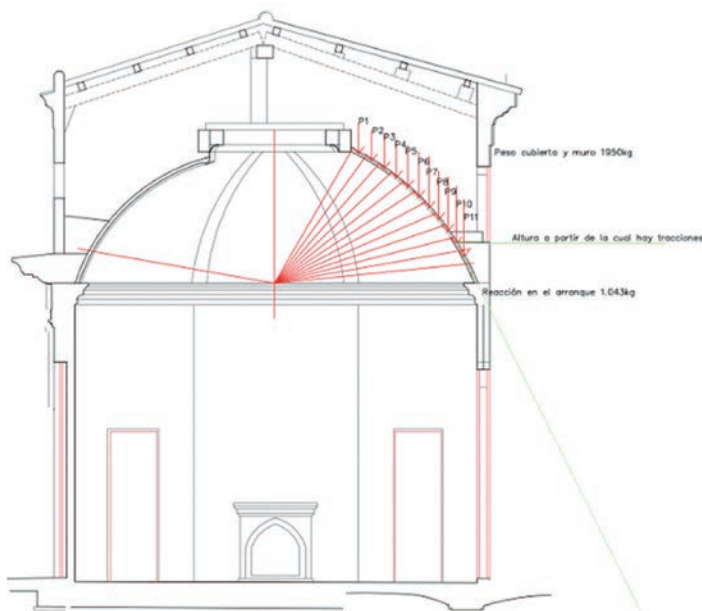
- MARTÍNEZ RUBIO, J., FERNÁNDEZ MARTÍN, J.J., SAN JOSÉ ALONSO, J.I., 2018. Implementación de escáner 3D y fotogrametría digital para la documentación de la iglesia de la Merced de Panamá, EGA, vol. 23, núm. 32, pp. 208-219, doi: 10.4995/ega.2018.9811
- CASCARDI, A., MICELLI, F., AIELLO, M.A., FUNARI, M., 2020. Brick and Block Masonry – From Historical to Sustainable Masonry” Chapter: Structural analysis of a masonry church with variable cross-section dome. 1<sup>st</sup> Edition, CRC Press, ebook ISBN 9781003098508
- ARMESTO, J., ROCA-PARDIÑAS, J., LORENZO, H., ARIAS, P., 2010. Modelling masonry arches shape using terrestrial laser scanning data and nonparametric methods. *Engineering Structures*, 32, pp. 607-615.
- KORUMAZ, M., BETTI, M., CONTI, A., TUCCI, G., BARTOLI, G., BONORA, V., KORUMAZ, A.G., FIORINI, L., 2017. An integrated Terrestrial Laser Scanner (TLS), Deviation Analysis (DA) and Finite Element (FE) approach for health assessment of historical structures. A minaret case study. *Engineering Structures*, 153, pp. 224-238
- ARMESTO-GONZÁLEZ, J., RIVEIRO-RODRÍGUEZ, B., GONZÁLEZ-AGUILEIRA, D., RIVAS-BREA, M.T., 2010. Terrestrial laser scanning intensity data applied to damage detection for historical buildings. *Journal of Archaeological Science*, 37, pp. 3037-3047
- ALMAGRO GORBEA, A., SOLER ESTRELLA, A., 2014. Levantamiento de bóvedas de arcos entrecruzados: técnicas aplicadas al caso de la torre del homenaje del Castillo de Villena (Alicante). EGA, NÚM. 23, PP. 204-213. doi: 10.495/ega.2014.1278
- MATAIX SANJUAN, J., LEÓN ROBLES, C., MONTES TUBÍO, F. DE P., 2013. Fortalezas y debilidades de la técnica de levantamiento gráfico con escáner láser para la catalogación del patrimonio cultural. Aplicación a la iglesia de San Francisco (Priego de Córdoba). EGA, núm. 21, pp. 216-225, doi: 10.4995/ega.2013.1535
- MOLINA SÁNCHEZ, S., VIDAL, E.J., CI-



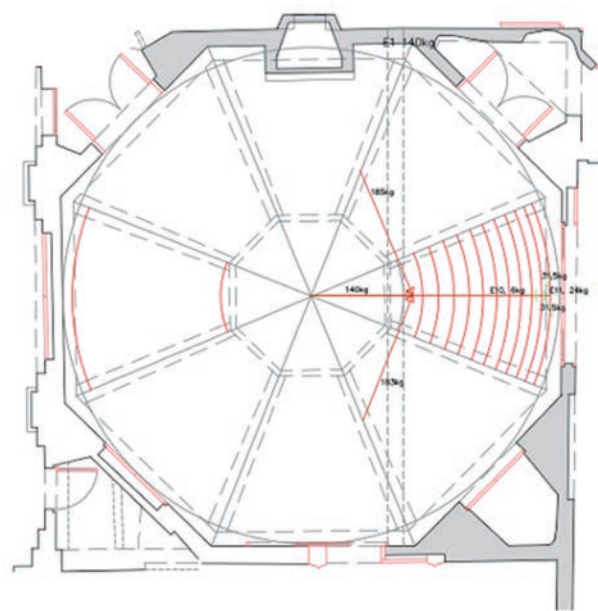
12



13



14



15

PRIANI, L., DENIA RÍOS, J.L., 2021, Limitaciones en el levantamiento digital de bienes patrimoniales con tipología de torre. EGA, 42, pp. 76-89, doi: 10.4995/ega.2021.14749

9/ KWOCZYNSKA, B., PIECH, I., SLEDZ, J., LITWIN, U., OBIREC, P., 2016. The use of terrestrial laser scanning in surveying historic buildings. Baltic Geodetic Congress (Geomatics). Gdansk University of Technology, 2-4 June 2016, Poland.

10/ CASTELLAZZI, G., D'ALTRI, A.M., BITELLI, G., SELVAGGI, I., LAMBERTINI, A., 2015. From Laser Scanning to Finite Element Analysis of Complex Buildings by Using a Semi-Automatic Procedure. Sensors, 15, 18360-18380; doi: 10.3390/s150818360

11/ CASTELLAZZI, G., D'ALTRI, A.M., DE MIRANDA, S., UBERTINI, F., 2017. An innovative numerical modeling strategy for the structural analysis of historical monumental buildings. Engineering Structures, 132, pp. 229-248

12/ ALESSANDRI, C., MALLARDO, V., 2018. Some laser-scanner applications in structural analysis. International Journal of Masonry Research and Innovation, vol. 4, n° 1-2

13/ BARSÌ, F., BARSOTTI, R., BENNATI, S., 2019. Equilibrium of masonry sail vaults: the case study of a subterranean vault by Antonio da Sangallo the Elder in the "Fortezza Vecchia" in Livorno. In book: Proceedings of XXIV AIMETA Conference. Doi: 10.1007/978-3-030-41057-5\_166

14/ ROCA, P., CERVERA, M., GARIUP, G., PELA, L., 2010. Structural Analysis of Masonry Historical Constructions. Classical and Advanced Approaches. Arch. Comput. Methods Eng., 17, pp. 200-325.

**Agradecimientos**

Claudio Hernández, arquitecto responsable del proyecto de rehabilitación de Can Armengol. VIMAC-UPC, Laboratorio Virtual de Innovación Modelando la Arquitectura y la Ciudad.

archaeologist), even this part of redrawing is didactic and helps to gain better understanding of a type of buildings whose construction systems and strategies are not taught in architecture degrees. Consequently, the knowledge acquires supreme importance. As the method is accessible to all architects with basic training in traditional construction systems, it increases the number of professionals who can carry out structural analyses and diagnoses. ■

**References**

1/ MARTÍNEZ RUBIO, J., FERNÁNDEZ MARTÍN, J.J., SAN JOSÉ ALONSO, J.I., 2018. Implementación de escáner 3D y fotogrametría digital para la documentación de la iglesia de la Merced de Panamá, EGA, vol. 23, no. 32, pp. 208-219, doi: 10.4995/ega.2018.9811

2/ CASCARDI, A., MICELLI, F., AIELLO, M.A., FUNARI, M., 2020. Brick and Block Masonry – From Historical to Sustainable Masonry" Chapter: Structural analysis of a masonry church with variable cross-section dome. 1<sup>st</sup> Edition, CRC Press, ebook ISBN 9781003098508

3/ ARMESTO, J., ROCA-PARDIÑAS, J., LORENZO, H., ARIAS, P., 2010. Modelling masonry arches shape using terrestrial laser scanning data and nonparametric methods. Engineering Structures, 32, pp. 607-615.

4/ KORUMAZ, M., BETTI, M., CONTI, A., TUCCI, G., BARTOLI, G., BONORA, V., KORUMAZ, A.G., FIORINI, L., 2017. An integrated Terrestrial Laser Scanner (TLS), Deviation Analysis (DA) and Finite Element (FE) approach for health assessment of historical structures. A minaret case study. Engineering Structures, 153, pp. 224-238

5/ ARMESTO-GONZÁLEZ, J., RIVEIRO-RODRÍGUEZ, B., GONZÁLEZ-AGUILERA, D., RIVAS-BREA, M.T., 2010. Terrestrial laser scanning intensity data applied to damage detection for historical buildings. Journal of Archaeological Science, 37, pp. 3037-3047

6/ ALMAGRO GORBEA, A., SOLER ESTRELA, A., 2014. Levantamiento de bóvedas de arcos entrecruzados: técnicas aplicadas al caso de la torre del homenaje

del Castillo de Villena (Alicante). EGA, NÚM. 23, PP. 204-213. doi: 10.495/ega.2014.1278

7/ MATAIX SANJUAN, J., LEÓN ROBLES, C., MONTES TUBÍO, F. de P., 2013. Fortalezas y debilidades de la técnica de levantamiento gráfico con escáner láser para la catalogación del patrimonio cultural. Aplicación a la iglesia de San Francisco (Priego de Córdoba). EGA, no. 21, pp. 216-225, doi: 10.4995/ega.2013.1535

8/ MOLINA SÁNCHEZ, S., VIDAL, F.J., CIPRIANI, L., DENIA RÍOS, J.L., 2021, Limitaciones en el levantamiento digital de bienes patrimoniales con tipología de torre. EGA, 42, pp. 76-89, doi: 10.4995/ega.2021.14749

9/ KWOCZYNSKA, B., PIECH, I., SLEDZ, J., LITWIN, U., OBIREC, P., 2016. The use of terrestrial laser scanning in surveying historic buildings. Baltic Geodetic Congress (Geomatics). Gdansk University of Technology, 2-4 June 2016, Poland.

10/ CASTELLAZZI, G., D'ALTRI, A.M., BITELLI, G., SELVAGGI, I., LAMBERTINI, A., 2015. From Laser Scanning to Finite Element Analysis of Complex Buildings by Using a Semi-Automatic Procedure. Sensors, 15, 18360-18380; doi: 10.3390/s150818360

11/ CASTELLAZZI, G., D'ALTRI, A.M., DE MIRANDA, S., UBERTINI, F., 2017. An innovative numerical modeling strategy for the structural analysis of historical monumental buildings. Engineering Structures, 132, pp. 229-248

12/ ALESSANDRI, C., MALLARDO, V., 2018. Some laser-scanner applications in structural analysis. International Journal of Masonry Research and Innovation, vol. 4, n° 1-2

13/ BARSÌ, F., BARSOTTI, R., BENNATI, S., 2019. Equilibrium of masonry sail vaults: the case study of a subterranean vault by Antonio da Sangallo the Elder in the "Fortezza Vecchia" in Livorno. In book: Proceedings of XXIV AIMETA Conference. Doi: 10.1007/978-3-030-41057-5\_166

14/ ROCA, P., CERVERA, M., GARIUP, G., PELA, L., 2010. Structural Analysis of Masonry Historical Constructions. Classical and Advanced Approaches. Arch. Comput. Methods Eng., 17, pp. 200-325.

**Acknowledgments**

Claudio Hernández, architect responsible for the restoration project for Can Armengol Palace. VIMAC-UPC, Virtual Laboratory of Innovation Modelling Architecture and the City.