

THE SPRINGS OF THE STARRED VAULT OF THE CHAPEL OF THE *Lonja* IN VALENCIA AND OTHER VALENCIAN STARRED VAULTS. GEOMETRIC ANALYSIS

LOS ENJARJES DE LA BÓVEDA ESTRELLADA DE LA CAPILLA DE LA LONJA DE VALENCIA Y OTRAS BÓVEDAS VALENCIANAS ESTRELLADAS. ANÁLISIS GEOMÉTRICO

Esther Capilla Tamborero 

Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio, Universitat Politècnica de València, Spain
ecapilla@ega.upv.es

Abstract

The geometric analysis and the design and execution process of the springs of the starred vault that covers the Chapel of the *Lonja de los Mercaderes* in Valencia (Spain), built in the late 15th century is the subject of study and research in this paper. The springs of other starred vaults are also mentioned, such as the one that covered the chapter house of the *Valldigna* monastery (Simat, Valencia) or those of the church of San Bartolomé in Jávea (Alicante). The geometry of the basket arches that start from the springs, the arrangement of the courses in the *tas-de-charge*, and the way in which the intersection of the five arches that start from the springs occurs in a horizontal plane located above the springer corbel, is shown. Other geometric relationships are shown, such as the one that relates the height of the horizontal spring planes with the general geometry of the vault; or the way in which the springs were designed and executed with the finality of relating or ruling out possible authorship of other vaults.

Keywords: Cross vaults; Starred vaults; Geometric layout; *Tas-de-charge*; *Valldigna* monastery; Church of San Bartolomé in Jávea.

Resumen

El análisis geométrico y el procedimiento de diseño y ejecución de los enjarjes de la bóveda estrellada que cubre la Capilla de la *Lonja* de los mercaderes de Valencia (España), construida en los últimos años del siglo XV es el tema de estudio e investigación en el que se centra este artículo, si bien también se hace referencia a los enjarjes de otras bóvedas estrelladas, como la que cubría la sala capitular del monasterio de la *Valldigna* (Simat, Valencia) o de la iglesia de San Bartolomé de Jávea (Alicante). Se muestra la geometría de los arcos carpaneles que parten de los arranques, la disposición de las hiladas en el *tas de charge* y el modo en que se produce la intersección de los cinco arcos que parten de los enjarjes en un plano horizontal situado por encima de la ménsula de arranque. Asimismo, se muestran otras relaciones geométricas como la que relaciona la altura de los planos horizontales de arranque con la geometría general de la bóveda o la del modo de diseño y ejecución de los enjarjes para relacionar o descartar posibles autorías de otras bóvedas.

Palabras clave: Bóvedas de crucería; Bóvedas estrelladas; Trazado geométrico; *Tas-de-charge*; Monasterio de la *Valldigna*; Iglesia de San Bartolomé de Jávea.

1. INTRODUCTION, OBJECTIVES AND METHODOLOGY

The research shows the analysis of the geometry and the design and execution process of the springs of the starred vault that covers the chapel of the *Lonja de la seda* in the city of Valencia in Spain (Fig. 1). The springs of other starred vaults are also mentioned, such as the one that covered the Chapterhouse of the *Valldigna* monastery (Simat, Valencia) or those of the church of San Bartolomé in Jávea, studied in the *R+D+i* project “*Bóvedas de crucería valencianas de los siglos XIII a XVI. Análisis especial, geométrico, constructivo y modelización matemática*” (Valencian cross vaults from the 13th to 16th centuries. Geometric, constructive spatial analysis and mathematical modelling) subsidized by the *Generalitat Valenciana*.

The *Lonja de la Seda* (of silk), also known as *Lonja de los mercaderes* (of the merchants) or *Casa de contratación* (Contract or Trading Hall) was built at the end of the 15th century under the direction of the masters Pere Compte and Joan Ivarra. The *Lonja* is considered one of the best examples of Spanish civil Gothic. It was declared a World Heritage Site in 1996. It is organized in two volumes: the *sala de contratación* (Trading Hall) or *salón columnario* (column room) and the old *Consulado del Mar* (Consulate of the Sea). Both volumes are arranged around the courtyard with a garden and are connected by a tower. Found on the ground floor and covered by a starred vault is the old chapel of *La Lonja*, dedicated to the *Immaculate conception of the Virgin*. We incorporate here the geometric analysis of the springs of this vault studied in the doctoral thesis of the author of this article.

The springs of a cross vault constitute the set of arches or ribs that meet in a same point of support, from which the vault rises. They are what Viollet-le-Duc calls *the naissance des voûtes* (the birth of the vaults). In the vault of the the *Lonja* Chapel analyzed here, the springs emerge from four corbels that rest on the corresponding attached columns. These are arranged in each of the four angles of the space covered by the vault. We incorporated here the result of the studies and analysis carried out of the different elements that are part of the *tas-de-charge*, as well as their relationship with the spatial geometry of the entire vault. It shows the geometry of the encounters of the ribs in the spring's horizontal plane and the



Fig. 1. Detail of the spring of the star vault of the *Lonja* Chapel in Valencia. You can see the corbel and the ribs that come out of it. (Source: Capilla, Esther, 2004).

way in which the ribs that rest on the corbel. It also shows the curvature of the ribs that concur in the spring, as well as the geometric characteristics of all the pieces that are part of the *tas-de-charge*. In these springs something peculiar takes place, the ribs that start from the springs, the wall ribs, diagonals and major tiercerons -we call this way those that go from the springs to the tercierons keystones- are basket arches; we will delve into this peculiarity later on. However, the rest of the ribs, liernes, *rampants* and minor tiercerons -

we call those that go from the keystone of the wall ribs to the tierceron keystones- have a single curvature. We also advance that the wall ribs are constructed with independent *voussoirs* before the tiercerons and diagonals. For this reason, the number of courses of the *tas-de-charge* is different when wall ribs, tiercerons and diagonals ribs are grouped, than when they are only tiercerons and diagonal ribs present. It also incorporates the design and execution process of those springs that would be carried out by the builders of the vault and that would allow us to relate or discard authorship of other vaults.

The methodology used for the development of the investigations has been based from the data taken *in situ*. In the vault of the *Lonja* Chapel in Valencia and that of the *Valldigna* monastery, these were mainly by direct measurement. In the other vaults mentioned here, the 3d laser scanner was also used.

Before discussing this process, it is necessary to refer to Robert Willis (1842: 1-69) and to Viollet-le-Duc (1854-1868). Willis describes the method of design and execution of springs (Fig. 2) based on archaeological observations; Rabasa (2000: 100-101) refers to him. Viollet-le-Duc defines the *tas-de-charge* as the best solution to absorb the thrust of the arches that reach the springs of a cross vault. It also describes the evolution of the springs of the vaults and the geometrical layout of the spring of two diagonal arches and an *arch doubleau* in a rectangular plan, in the term Construction of the *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*.

We include some antecedents of the subject; from the author of this paper and from others. From the Capilla (2016a, 2016b, 2018, 2019 and 2022). From other authors, we mention those who directly relate to the subject: Ruiz de la Rosa (1987, 2003), Rabasa (2000, 2007, 2013), Navarro Fajardo (2004, 2006), Palacios (2009, 2015), Pérez de los Ríos and Zaragoza (2013), Zaragoza and Pérez de los Ríos (2014). Likewise, it is necessary to make a brief mention of the treatises and books on *montea* (elevation) that speak about cross vaults in Spain and other European countries such as Germany, France or Italy. Gómez Martínez (1998: 124) reviews the different Spanish treatises of the 16th, 17th and 18th centuries that include traces of *montea* with starred cross vaults such as those by Hernán Ruiz *el Joven*, Alonso de Vandelvira, Rodrigo de Hontañón and Simón García, among

others. Gómez (1998:19) also mentions the works of Germans such as Mathieu Roriczer, Hans Schumuttenmayer or Lorenz Lechler, as well as manuscripts “focused on the design of cross vaults such as the Vienna ‘albums’ (c. 1500), Dresden (c. 1544-1567) and Frankfurt (1572), or examination books such as Jacob Stomer’s (1561). Gómez himself (1998: 16), referring to France, collects how Jean-Marie Pérouse de Montclos (1982) “had systematized the French stereotomy of the Modern Age with the fundamental support of the books of *montea* (1561-1614)”. And regarding Italy, Krufft (1985: 135) refers to the treatise by the Italian Guarino Guarini (1624-1683) published in 1737, *Architettura civile*. Gómez Martínez (1998: 54) refers to it as “the first Italian architecture treatise that dedicates a specific section to stereotomy”. In Chap. XXVI, Guarini (1737: 183-187) refers to *the vaults and the ways of making them* and in the *Fifth Observation to the Gothic vaults* (1737: 186). Authors such as Piccoli (2006) or Spallone (2019a and 2019b) study in depth the vaults collected by Guarini in his treatise. We also want to briefly mention some studies on geometric and regulatory layouts such as those by Ruiz de la Rosa (1987), García Valldecabres (2010), López González and García Valldecabres (2012), Spallone (2012) or Soler Sanz (2014).

2. GEOMETRIC ANALYSIS AND DESIGN AND EXECUTION PROCESS OF THE SPRINGS OF THE VAULT OF THE LONJA CHAPEL IN VALENCIA

Previous to the development of geometric and constructive analysis of the springs of the vault of the chapel of *La Lonja* in Valencia, a brief introduction as to the use and evolution of the *tas-de-charge* is carried out.

Viollet-le-Duc collects the definition of the *tas-de-charge* in the term “Construction” of volume IV of the *Dictionnaire raisonné* (1854-1868) and in the term “*tas-de-charge*” itself. Rabasa translates it as *mass loading* (*macizo de carga* in Spanish) in the term “Construction” (Rabasa y Huerta eds., 1996: 272), defining it as “the advance of the cutting by horizontal courses”. In the term “*tas-de-charge*”, Viollet describes it as “courses of stones with horizontal beds that are placed on a point of support, on a pillar or an angle of wall between two arches, to receive superior constructions. (...)” (Own translation). It can also be understood in the sense of “bonding” when speaking of the set

of several *salmeres* (pieces) arranged in *tas-de-charge*. Here, we refer to the *load-bearing mass* whose bonding has stone courses with cuttings that advance with completely horizontal beds.

For a more detailed description of the use and evolution of the *tas-de-charge*, we refer to Viollet-le-Duc (1854-1868), Rabasa and Huerta eds (1996) and Capilla (2018 and 2019).

2.1 DESCRIPTION OF THE SPRINGS OF THE STARRED VAULT OF THE LONJA CHAPEL

In the star vault of the chapel of the *Lonja* in Valencia, the ribs that start from the springs are basket arches. Therefore, each one of them has, two curvatures; the piece that rests on the corbels has a smaller radius of curvature than the upper pieces. In the vault, the *tas-de-charge* occurs in the smaller radius arches. In Fig. 1 we can see the spring of one of the angles of the vault.

Capilla (2016a, 2018 and 2019) gather the geometry of the springs and how the ribs arrive to the springs of the star vault of the Chapterhouse of the Santa Maria monastery, in Simat de Valldigna (Valencia, Spain). This vault was built at the end of the 15th century, as was the vault of the *Lonja* Chapel. In the vault of the *Valldigna* monastery, each one of the arches that reach the corbels has a single curvature. However, as we have seen, in the Chapel, all the ribs that reach the springs are basket arches and therefore have two curvatures each.

Prior to the geometric analysis of the springs of the vault that we are dealing with, we would like to make a brief reference to the method of design and execution of springs of Robert Willis and to the geometric method of Viollet-le-Duc to determine the separation course of the springs in some cross vaults.

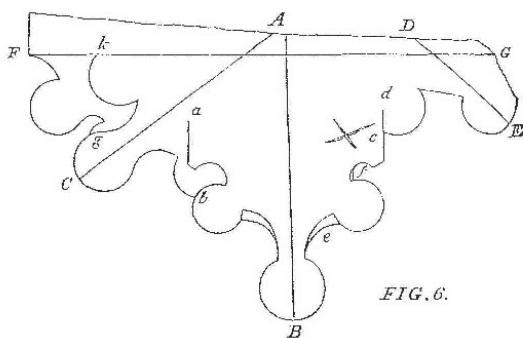


Fig. 2. Traces on the beds of a spring of the side nave of the church of St. Saviour's Church, Southwark, taken during its demolition in 1839, by Robert Willis (1842: 10).

The design and execution process of springs described by Willis (1842: 8-13) based on archaeological observations, is collected by Rabasa (2000: 100-103). We can summarize it in three steps: to carve on the surfaces of the upper and lower beds on the devastated block; to draw the contour corresponding to the horizontal section in each of those surfaces, and to link the contours drawn directly on the stone to complete the carving of the exterior surfaces seen (apparent moldings). In Willis' procedure, there would be a geometric inaccuracy due to the use of the same profile of the ribs in the horizontal and radial sections (Rabasa, 2000: 103, 2013:7). But, as Willis himself records (1842: 12), that error would be imperceptible. Rabasa would concur, and he also mentions that such imprecision would not worry the Gothic builder. In Fig. 2 we can see the traces in the beds of a spring of the lateral nave of the church of St. Saviour's Church, Southwark taken during its demolition in 1839, by Robert Willis (1842: 10).

Before proceeding to the geometric analysis of the springs of the starred vault of the *Lonja* Chapel, it is necessary to refer to Viollet's geometric method to determine the separation course of the springs in the cross vaults (Fig. 3). Viollet (1858-1868) describes the geometric layout of the spring of two diagonal arches and one *arch doubleau* in Fig. 48 bis of the *Dictionnaire raisonné* (Fig. 3 below). Previously, he made some considerations on the change of square to rectangular plan of the quadripartite vaults in the central naves, to make it so that the keystones of all the arches that conform them (diagonal ribs, wall ribs and transverse arches) arrive at a similar height. The simplest method described by Viollet used by the medieval builders to get *salmeres* with horizontal beds to where all the arches of the spring cease to intersect, consisted in giving the same radius to the *arch doubleau* or transverse arches and diagonal arches. In the aforementioned plate 48 of the term *Construction of the Dictionnaire raisonné* (Fig. 3, above) represents the way to obtain it and says that: "This is how the arches are drawn in the first Gothic vaults on a rectangular plan" (Own translation). Viollet himself makes a note on how the first vaults are quite flat compared to those of the mid-thirteenth century and their transverse arches approach the half point. However, later these vaults will seem less solid, pointing more to the diagonal arches or raising its' spring in order to lift the keystones of the transverse arches.

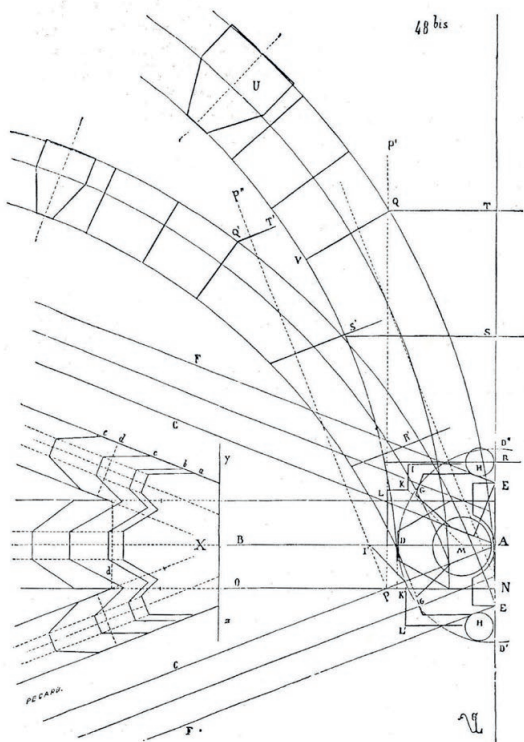
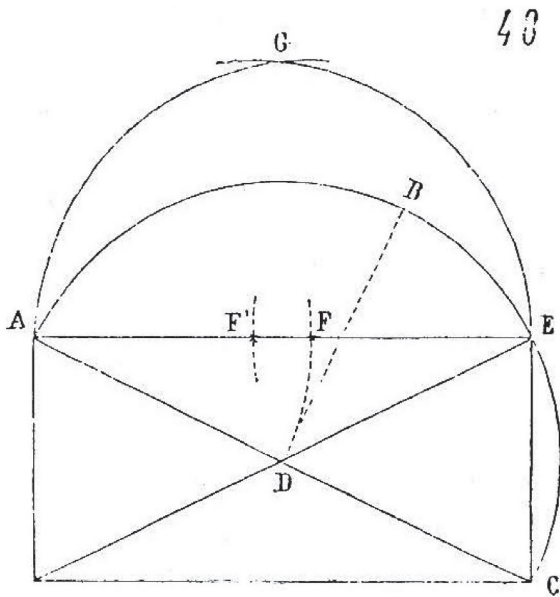


Figura 48 bis. Trazado del enjarje de dos arcos ojivos y un perpiano

Fig. 3. Above: Layout of a quadripartite vault. Below: Layout of the spring of two diagonal arches and an *arch doubleau*. Plate 48 and 48 bis, respectively, of the term *Construction* of the *Dictionnaire raisonné* of Viollet-Duc. (Source: Rabasa y Huerta, eds. 1996: 87-88).

The geometric process of the tracing of the spring of two diagonal arches and an *arch doubleau* to which we refer is taken up by Viollet (1858-1868) in the term “Construction” and represents it in *Fig. 48 bis* (Fig. 3, below) (Rabasa y Huerta, eds. 1996: 88-91). The procedure describes it for the

salmeres of cross vaults with a rectangular plan that have the same curvature in the two diagonal arches and an *arch doubleau* that we have seen previously (Fig. 3, above) and that would have, therefore, similar sections. In the example, the intrados of all those ribs in the spring’s horizontal plane is contained in a circle centered at point A located in the perimeter wall.

The vault studied here in the *Lonja* Chapel is starred. It does not have *arch doubleau*, but wall ribs, diagonals, tiercerons and liernes. Unlike the example of Viollet (Fig. 3, below) and in the star vault of the *Valldigna* monastery (Capilla, 2016a, 2018 and 2019), in the vault of the *Lonja* Chapel, the midpoints of the fillet of the intrados of the ribs in the spring’s horizontal plane located above the corbel are not contained in a circumference (Fig. 7), but there is a displacement in the intrados of each of the ribs. On the other hand, the radius of the arches that concur in the spring is different, so it cannot be a translation of the Viollet method; they are not similar sections. This comparative analysis would give us clues to give or discard authorship, although it exceeds the objectives of this paper. We refer to the Capilla 2016a, 2018 and 2019.

2.2 ANALYSIS OF THE GEOMETRY AND CONSTRUCTION OF THE SPRINGS OF THE STARRED VAULT

We show here the way in which the ribs meet the spring corbels, the intersection of them in a horizontal spring plane located above the corbels and the geometric definition of the horizontal courses of the *tas-de-charge* of the star vault of the *Lonja* Chapel.

In each of the four corners of the chapel, the ribs meet in the corbels with decoration that represents the four Evangelists. (Fig. 4)

In each angle, the *tas-de-charge* is composed of two joint courses of diagonal rib, tiercerons and wall ribs; the first course is completely horizontal in both beds and in the wall rib; the second has the lower bed in position horizontal and the upper bed, radial. From here, the wall ribs continue their curvature building with independent *voussoirs*. However, the diagonal rib and the two tiercerons continue to join one more course with a horizontal joint in the lower bed, and radial in the upper bed. The ribs do not all arrive at the same height: therefore, the diagonal rib has a small fragment



Fig. 4. Detail photograph of the spring corbel and the ribs that come out of it. (Source: Capilla, Esther, 2004).

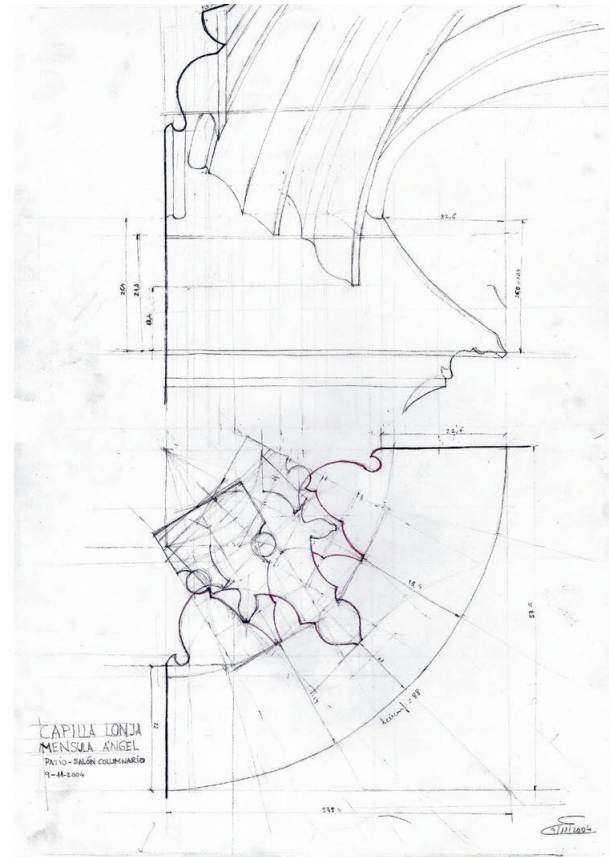


Fig. 5. Sketch of the springer of the ribs of the star vault of the *Lonja* de Valencia Chapel in the east corner. (Source: Capilla, Esther, 2004).

of *vousoir* to adapt to the shape of the corbel in the spring. For the representation and analysis of this, we have started from the data taken in situ. We incorporated here only some drawings of them (Fig. 5 and Fig. 6). In the sketch of Fig. 5 we see the encounter of the ribs in the horizontal spring plane and in Fig. 6 the courses with measurements of the intrados of a tierceron rib, as well the cutting of the *vousoirs* that compose it.

In the previously mentioned Chapterhouse vault of the *Valldigna* monastery- contemporary to the *Lonja* Chapel-, the *tas-de-charge* is developed in a larger number of courses that in the Chapel (Fig. 7). It had six completely horizontal courses, of which the seventh course had horizontal the lower joint and the upper joint is radial. From there, the wall arches continue their trajectory with independent *vousoirs* arranged in a radial way. However, the diagonal rib and the tiercerons of each spring continue to be grouped in the highest number of horizontal courses. Specifically, there are three more: two with cuttings with horizontal joints in both beds and the third with a lower horizontal bed and the upper, radial.

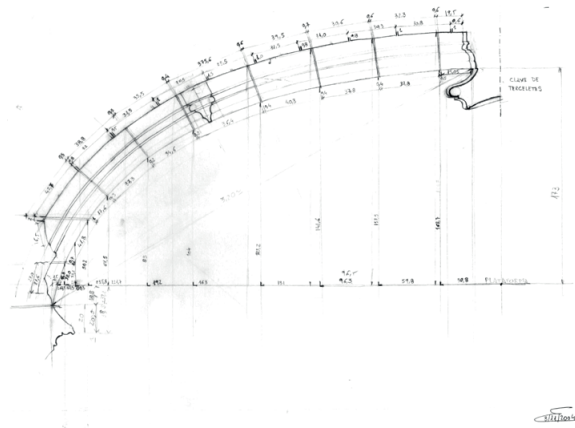


Fig. 6. Sketch of one of the tierceron ribs with the cutting of the *vousoirs*. (Capilla, Esther, 2004).

In Fig. 8 we can see the detail of scale of the encounter of the profiles in the ribs that meet in the horizontal spring plane. Using different colours each one of the ribs that coincide in the spring has been drawn: in red and in the centre, the profile of the diagonals; and on both sides of



Fig. 7. Photo of one of the springs of the starred vault of the Chapterhouse in the *Valldigna* monastery. (Source: Capilla, Esther, 1998).

these, the tiercerons in purple and the wall ribs in blue. The concealed sections of the walls arches are unknown since they are hidden behind the walls. However, relating to remains discovered in other vaults we consider giving them a hidden thickness of $\frac{1}{4}$ *Valencian palm*, but this is only a hypothetic thickness. The Valencian palm is a unit of length used in Valencian lands prior to the implementation of the decimal metric system. It is equivalent to 22.65 cm, but as the researcher Soler (2014: 77) says, “23 cm are taken, according to the equivalence tables promulgated in the reign of Isabel II between 1849 and 1852”. However, in the present investigation we will refer to the Valencian palm with its value of 22.65 cm and not to the value rounded to 23 cm, since the dimensions of the elements referenced in the present investigation coincide with multiples or sub-multiples of palms of 22.65 cm.

We can also see in the same Fig. 8 some relation to the dimension reflected in centimetres and Valencian palms of 22.65 cm. Therefore, the midpoints of the bases of all the profiles are far from the vertex of the angle of the interior wall where the two adjacent walls meet at a distance equal to half a Valencian palm. On the other hand, the point of tangency of the concave moulding of

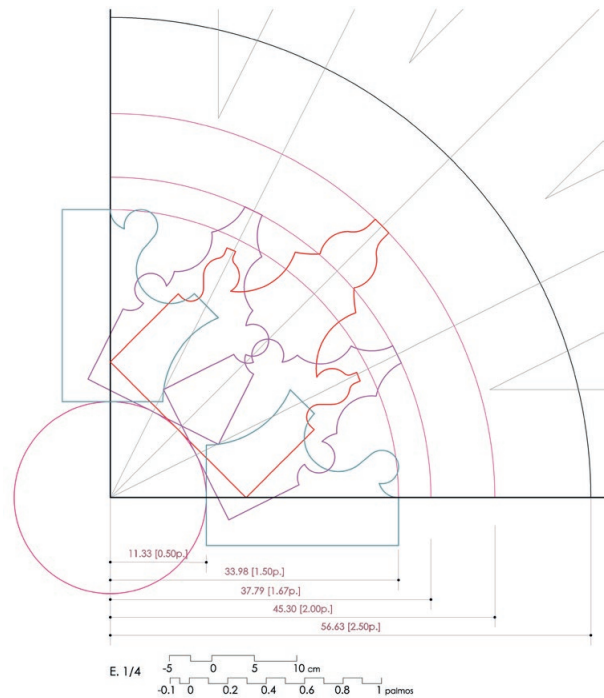


Fig. 8. Scaled detail of the profile of the encounter of the ribs in the horizontal spring plane arranged on corbel with the addition of some measures in centimeters and in Valencian palms of 22.65 cm. (Source: Capilla, Esther).

the wall arches profile in its meeting with the wall, to which its tangent is 1.5 palms from the same vertex. The extreme point of the heads of the tiercerons ribs has a distance of 1.67 Valencian palms ($1+\frac{2}{3}$ palms) of the same vertex and 2 Valencian palms of the diagonal ribs. Finally, in the point that most protrudes in the corbel where the ribs meet are at a distance of 2.5 Valencian palms from the vertex mentioned.

Fig. 9 represents the spring reflecting the contour created by the intersection of the different ribs among them. With a dotted grey line, the profile is completed with of each one that is embedded in the solid of the *tas-de-charge* according to what can be observed in Fig. 8.

In both Figs. 8 and 9, we can appreciate an important difference with the example incorporated by Viollet-de-duc (Fig. 3, below). In it, the heads of the ribs were equidistant from point A; however, at the spring of the vault of the *Lonja* Chapel, these ribs start at different levels, both horizontally and vertically. (Figs. 4, 5, 8 and 9).

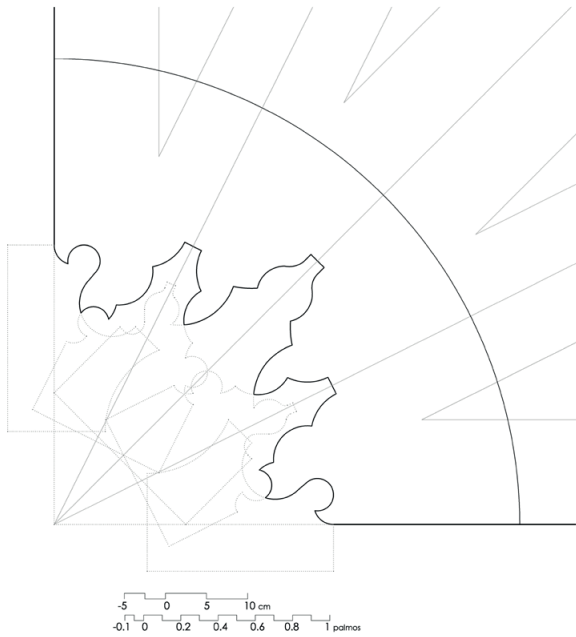


Fig. 9. Detail of the meeting of the ribs in the horizontal spring plane. With a finer grey dotted line, we can see part of the profiles that are embedded in the solid of the spring. (Source: Capilla).

The chapel has a square plan, with a span of 6.85 meters between walls. It therefore has diagonal symmetry and, as can be observed in Figs. 8 and 9, the angles of the tiercerons do not vary on either side of the cross ribs.

We have already seen the representation of the encounter of the profiles in the horizontal spring plane (Figs. 8 and 9). We now can proceed to the location of this plane in relation to the general proportions of the chapel (Figs. 10, 11 and 12), but first we will make a brief reference to the plan layout of the vault that can be seen in these figures. It is a starred vault with nine keystones: the polar or central one and eight of tiercerons. The generation of starred vaults is reflected graphically by Gómez Martínez (1998: 80-81) through two modes. Soler (2014: 93-94) shows the classic construction of dividing the sides of the square into three, four, five,... equal parts. The construction of the division into four equal parts coincides with the method of generation of the starred vault of the *Lonja* Chapel. A more detailed study of the plan traces of the vault can be found in Capilla (2016) and Capilla (2022).

We return now to expose the general proportions reflected in Figs. 10, 11 and 12. In these figures we can see that the horizontal spring plane of

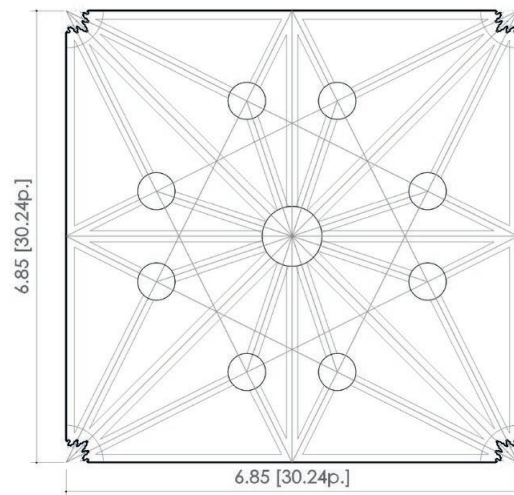
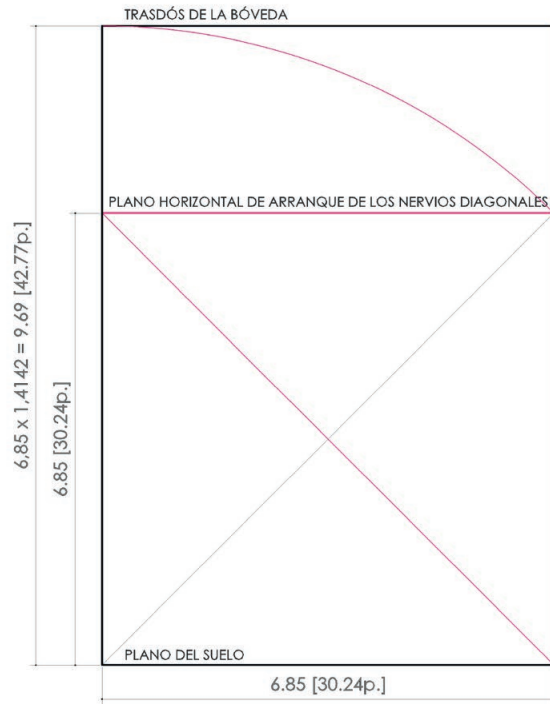


Fig. 10. Geometric relationships of the chapel and the starred vault in relation to the side of the floor plan. Location of the height of the horizontal spring plane of the diagonal ribs. (Source: Capilla, Esther).

the diagonals ribs is located 6.85 meters (30 ¼ Valencian palms of 22.65 cm) from the ground, that is, at a height equal to the side of the square of the floor plan. Spatially, then, up to that spring

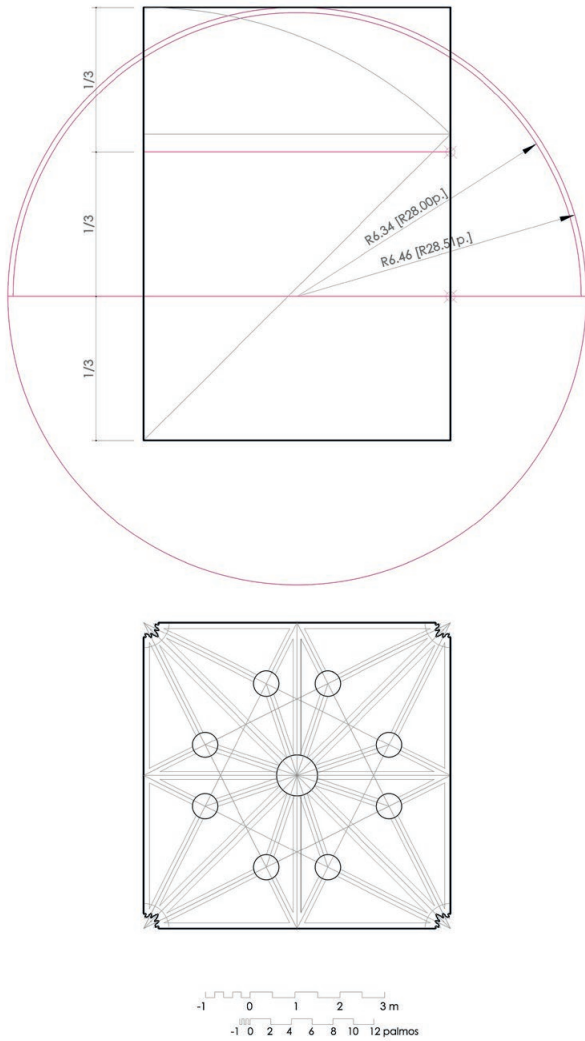


Fig. 11. Representation of the horizontal planes of the real springs and of the virtual or imaginary springs of the upper arches of the basket arches and the rest of the ribs, as well as the extrados radius of the diagonals ribs -coinciding with the *intrados* of the vault surface- and the *extrados* radius of the vault surface. (Source: Capilla, Esther).

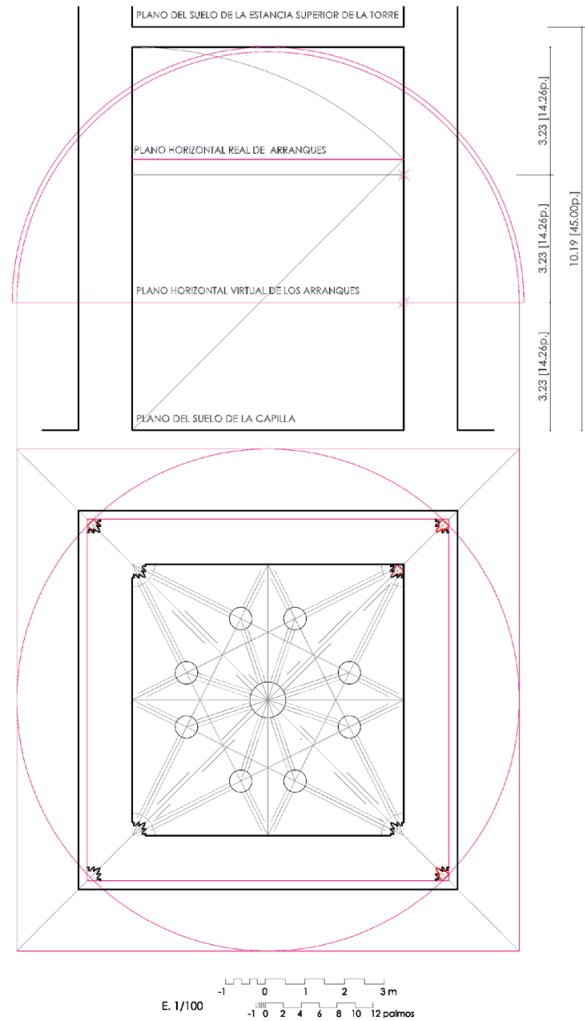


Fig. 12. Representation of the horizontal planes of the real and virtual springs of the ribs of the starred vault of the *Lonja* Chapel. In elevation, the location of both horizontal planes and the centre of the circumference that defines the curvature of the *intrados* and *extrados* of the vault. (Source: Capilla, Esther).

plane, the chapel responds to a cube with a side of 6.85 m. Likewise, from the heights taken, the height of the *extrados* of the vault has been determined: 9.69 m (42.78 Valencian spans, about $42\frac{3}{4}$ Valencian spans) from the ground. This value corresponds to the product of the side of the square of the floor plan multiplied by $\sqrt{2}$, that is, the total height of the chapel from the ground to the *extrados* of the vault is obtained from the proportion related to the diagonal of the square ($6.85\text{m} \times \sqrt{2} = 9.69\text{ m}$). This is graphically reflected in Fig. 10.

The diagonal ribs, the tiercerons that begin from the same spring (major tiercerons) and the wall ribs are basket arches of three centres and symmetrical. Each one therefore has two different curvatures. The rest of the ribs of the vault has a single curvature: which we have called minor tiercerons, liernes that go from the central keystone to that of tiercerons and the ribs that define the *rampant* of the vault. The complete development of the geometry of all of them exceeds the scope of this article.

In the geometric analysis of the vault springs –the focus of this research– the presence of two springs is verified; reals and those that differ from the *reals*, are referred to as *virtuals*. The first ones, the *reals* –whose geometry we have just seen in Figures 8 and 9– are physically present in the vault; they correspond to the springs of the lower arches of the baskets arches. The second ones, the *virtuals*, correspond to the upper arches of the basket arches and to the rest of the ribs. (Figs. 11 and 12).

The curvatures of the different ribs have been obtained through the measures taken and their representation in scale. Therefore, the curvatures of the *extrados* of the mayor diagonal ribs (mayor radius), that is, the upper arches of the diagonal three-centred arches, is a radial circumference of 6.342 meters, equivalent to 28 Valencian palms of 22.65 centimeters (Fig. 11). On the other hand, the radius of the *extrados* curvature of the mayor tiercerons is 6.154 meters. This circumference of radius 6.432m of the *extrados* of the major arches of the diagonals ribs is the radius of a sphere that defines the intrados of the surface of the vault. Starting from this, it has been proven that the radius of the curvature of the *extrados* of the mayor arches of the three-centred arches of the tiercerons correspond to the section of the sphere by a non-radial plane, the corresponding to the plane that is defined by the angle in plane of the axis line of the tiercerons. The location of the centre of this sphere is at a third of the total height of the chapel from the floor to the *extrados* of the vault (Fig. 11) This height defines the radius of the two spheres, the one belonging to intrados of the vault’s surface of radius 6.342 m (28 Valencian Palms) and its *extrados* it is evident that it includes the severies tangent to the prism of dimensions $6.85 \times 6.85 \sqrt{2}$ seen previously, whose radius is 6.46 m, equivalent to 28.5 Valencian palms.

Once we have seen the centres and the radii that define the *extrados* and the *intrados* of the vault and the height at which they are located, we now observe its position in the plan view seen in Fig. 12. Until now, only the interior space in plan view of the vault has been represented without including the thickness of the walls. In Figures 10, 11 and 12 this has been reflected as well as the location of the real and *virtual* or *imaginary* springs. The real springs are those shown in the previous figures. We now proceed with an explanation as to how we

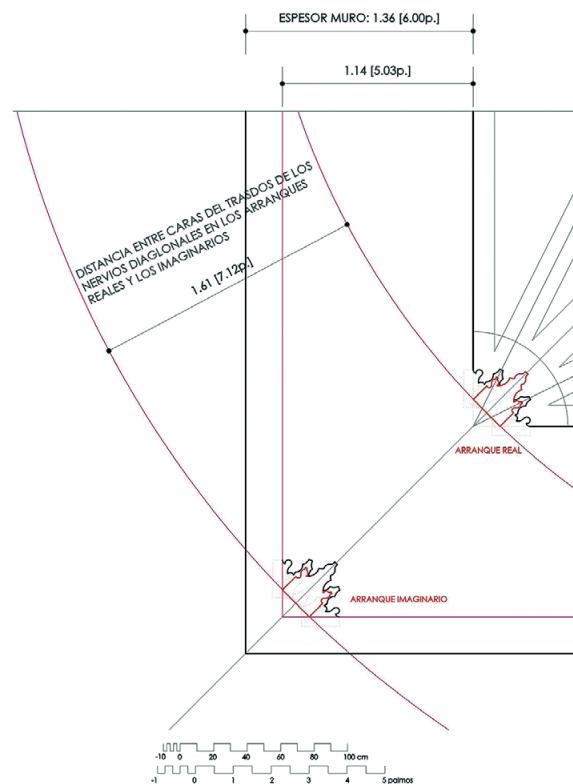
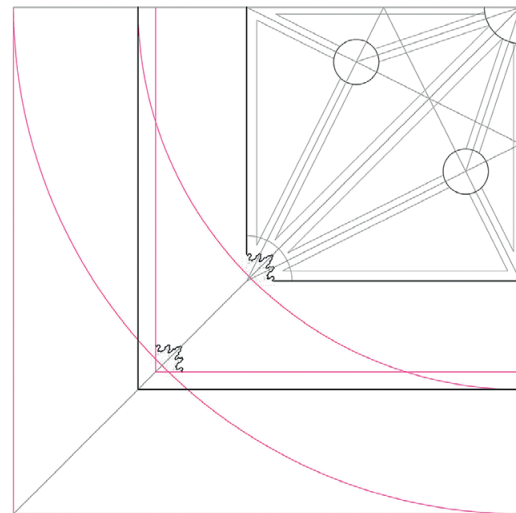


Fig. 13. Representation of the location in plan view of the real and virtual springs. (Source: Capilla, Esther).

obtained the virtual or imaginary springs. Starting from sphere radius of 6.342 m, red has been used to show the plan view of the circumference of the greater diameter of the sphere and the square in which it is inscribed (Fig. 12). If we extend the axis lines of the diagonal ribs until they cut this

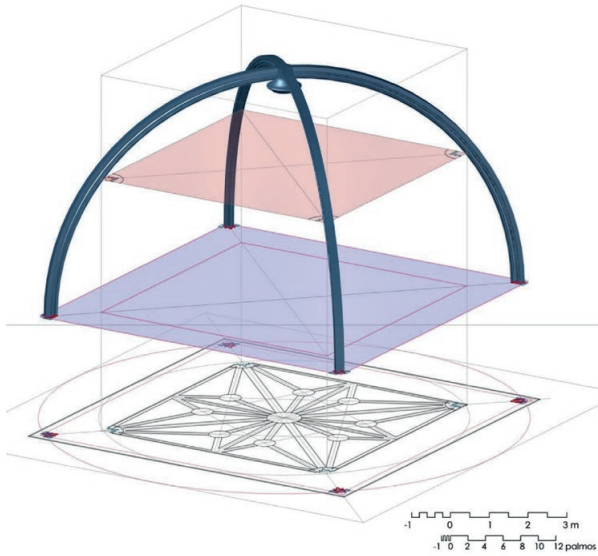


Fig. 14. Detail of the location of the real springs (upper plane in red) and the virtual (lower plane in blue). (Source: Capilla, Esther).

square, the point of cut of the circumference of radius 6.342 m with these diagonals, we place the position of the middle point of the *extrados* of the diagonal rib profile (Fig. 13).

Below are a series of three-dimensional drawings on the process of generating the springs.

In Fig. 14 the generating of the major arches of the diagonal ribs can be seen from the virtual plane of the springs, located from the floor at a height of 1/3 of the total height of the chapel volume.

Fig. 15, above, shows the generating of the diagonals and rampant ribs from the virtual springs with the generated sphere following the *extrados* of the ribs. Fig. 15, below, shows the complete star of the vault generated from the major arches of basket arches of the diagonal ribs, major tiercerons and wall ribs and the arches of single curvature corresponding to liernes, rampant ribs and minor tiercerons, as a previous step to defining the complete geometry of the ribs in the springs.

Fig. 16 represents the complete formation of the basket arches or three-centred arches of the diagonal ribs obtained from the major arches from the virtual springs and the minor arches from the real springs, both being tangent to each other. They have been reflected with two different colours to make the curvature changes and their tangencies more evident.

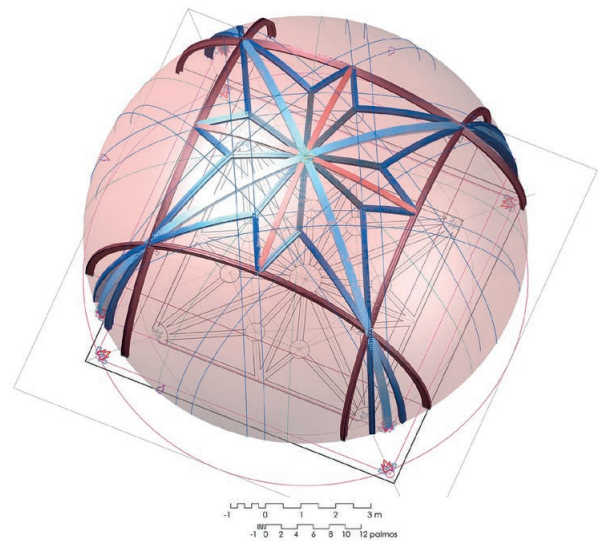
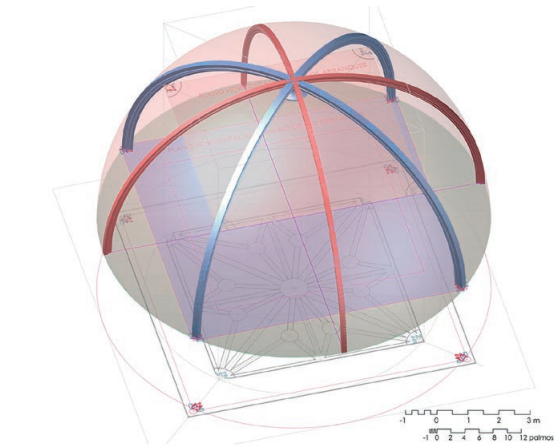


Fig. 15. Process of generating of the vault geometry prior to the definition of the real springs. Above, the rampant and diagonals ribs. Below, all the ribs generated with the virtual springs. (Source: Capilla, Esther).

Fig. 16, below, represents a half diagonal rib seen in elevation; in it you can see the tangency between the minor and major arches that make up the rib. The central drawing of Fig. 16 shows the detail of the courses of the *tas-de-charge* charge of the minor arch (in green) of the diagonal ribs. The first course of smaller dimension is not a real course but corresponds to discrepancy present in the meeting of the arch with the corbel and the horizontal spring, as seen in Fig. 4.

In Fig. 17, above, shows the detail of the generation of a wall rib from the tangency between the section of minor radius and the one with the major radius that make up the rib. Fig. 17, below, shows drawings of the formation process of the major tierceron ribs from the tangency between

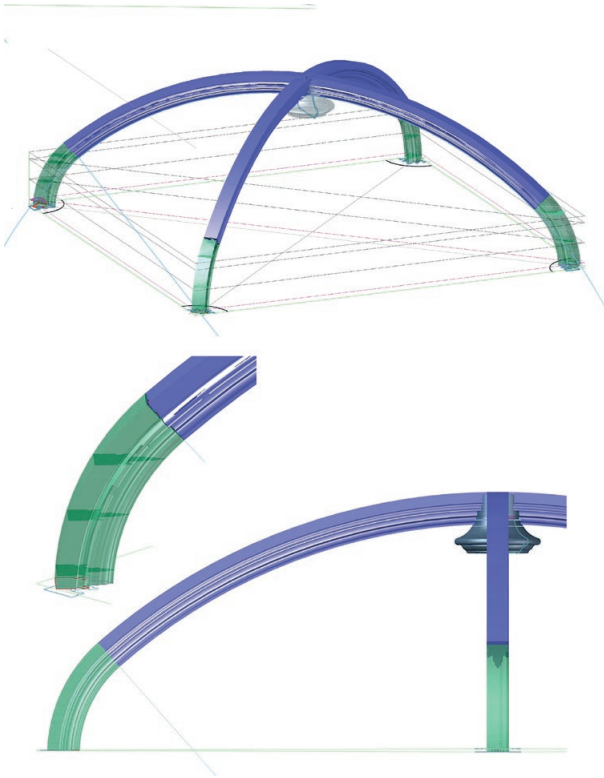


Fig. 16. Generating the three-centred arch of the diagonal ribs. Below, the diagonal rib seen in elevation whit a detail of the courses of the *tas-de-charge* in the minor arch. (Source: Capilla, Esther)

the major arches obtained from the virtual springs - whose radius of curvature coincides with that determined when sectioning the sphere as previously seen - and the minor arches obtained from the real springs. In the upper part of the figure, a detail of the tangency between the two arches can be seen, and below the meeting of the two major tiercerons that start from the same spring.

2.3 REPRESENTATION OF THE *TAS-DE-CHARGE* IN THE STARRED VAULT

Finally, we incorporate the representation of the *tas-de-charge* with all the courses (Fig. 18).

The described diagonal symmetry of the *Lonja* Chapel makes the radii of curvatures of the arches arranged on both sides of the diagonal ribs the same. In this way, in each *tas-de-charge* only three different curvatures are found: that of the diagonal ribs, that of the wall arches and that of the mayor tierceron ribs.

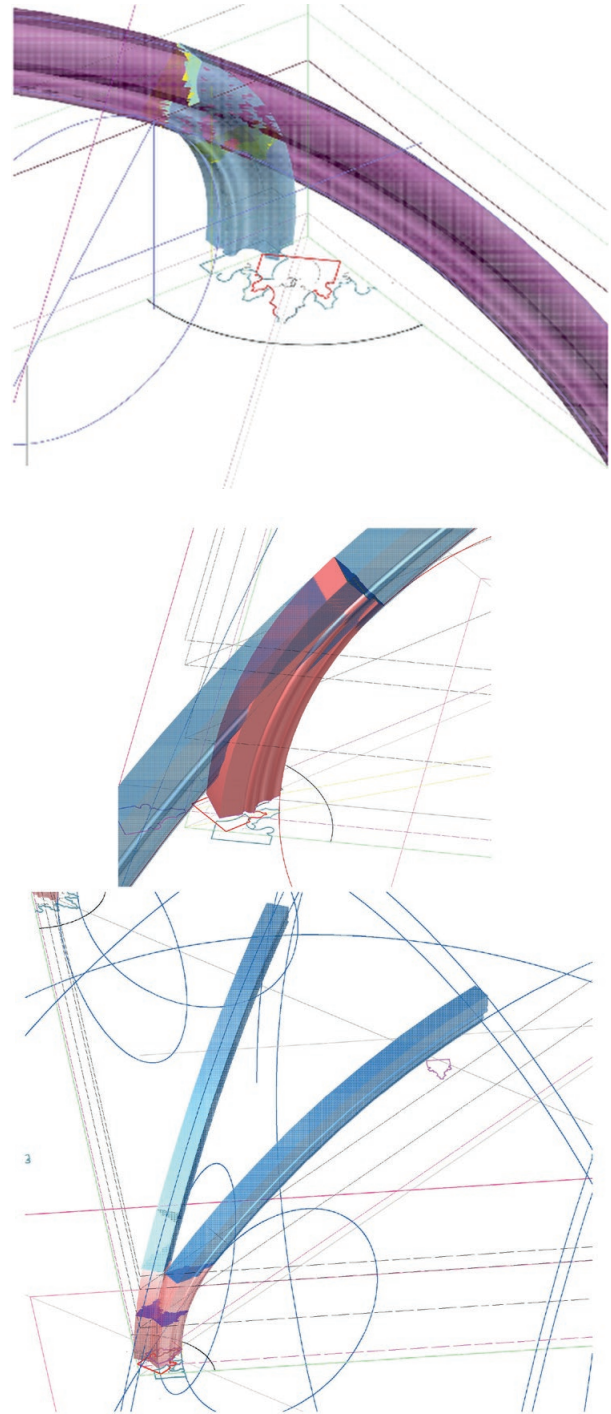


Fig. 17. Above, formation of the wall ribs with the visualization of the tangency between mayor and minor arch. Below, detail of the meeting of the two arches (major and minor) that make up the tierceron ribs. (Source: Capilla, Esther)

In addition, an image or volumetric representation is added to the *tas-de-charge* of the vault of the Chapterhouse of the *Valldigna* monastery (Capilla 2016, 2018 and 2019), contemporary to that of the *Lonja* chapel. In it, a very different arrangement

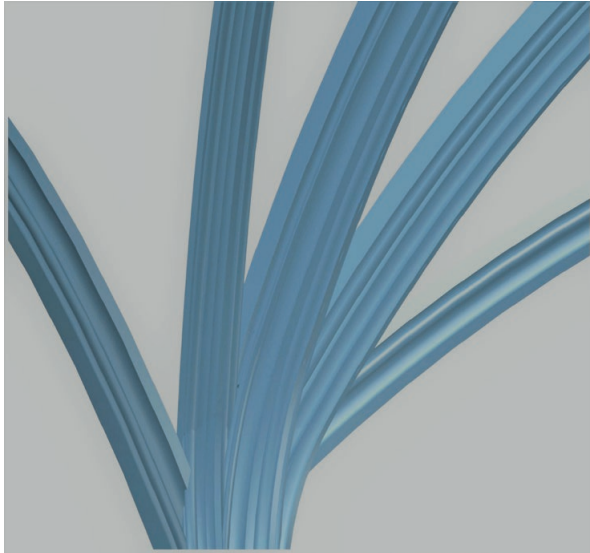


Fig. 18. Volumetric representation of the *tas-de-charge* of the vault in the *Lonja* Chapel. (Source: Capilla, Esther).

and number of courses can be seen as a result of a different spatial geometry of the vault. Also, there is no diagonal symmetry as the ground plan is slightly extended.

3. DISCUSSION. ANOTHER STUDIES AND CONSIDERATIONS

New research has been developed on the starred vaults of the church of *San Bartolomé* in *Jávea* (Alicante) built at the beginning of the 16th century. This research have been carried out for the development of the project R+D+I “*Bóvedas de crucería valencianas de los siglos XIII a XVI. Análisis espacial, geométrico, constructivo y modelización matemática*” subsidized by the *Generalitat Valenciana*.

The church-fortress of *San Bartolomé* in *Jávea*, declared a Historical-Monument in 1931, has a single nave with chapels between buttresses and has a bell tower on the Gospel side and other annexed rooms (Communion chapel, sacristy, old sacristy). The construction of the nave began in 1513 by the *mestre picapedrer* (master stonecutter) Domingo de Urteaga (Bolufer, 2010: 101). Its traces are collected in plan No. 227 preserved in the Ducal Archive of Medinaceli and are attributed to the master Urteaga (Arroyas and Zaragoza 2003, p. 176; Sánchez González 2019, p. 11 and Zaragoza 2019, p. 231). . The central nave is covered with starred vaults of 9 keystones,

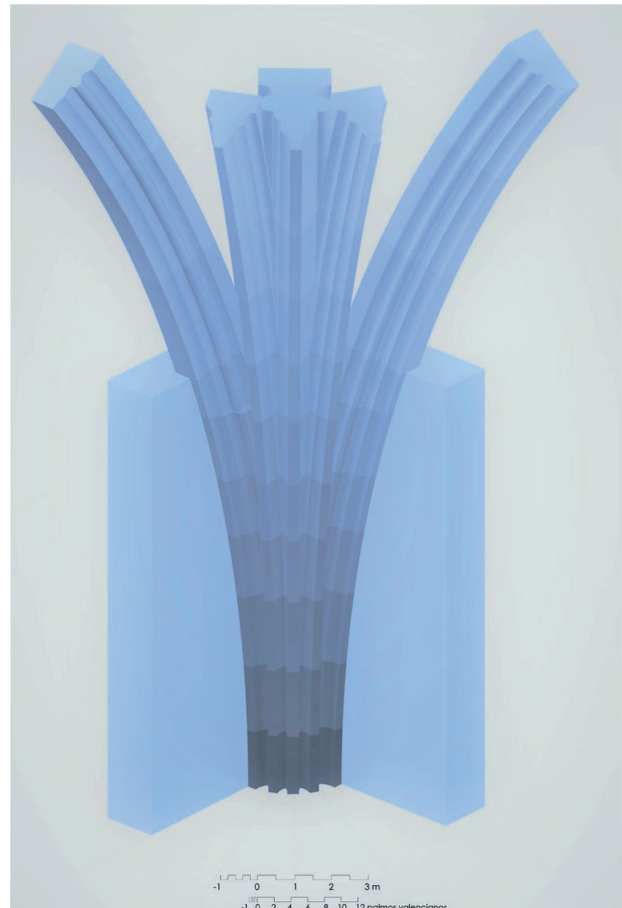


Fig. 19. Volumetric representation of the *tas-de-charge* of the vault in the Chapterhouse of the *Valldigna* monastery (Simat de Valldigna, Valencia). (Source: Capilla, Esther).

with *tercierons* and *counter-tercierons* (Fig. 20); the side chapels with simple cross vaults and the one located under the tower- with an octopartite cross vault, and the presbytery has a starred vault with 5 keystones. Some elements of this vault, as well as its geometry and the inscription that appears on the trasverse arch that separates the nave from the presbytery, “*de aquí abaxo la obra nueva*” (*hence the new work below*) confirm that it was built prior to the nave.

Added here are some images of the starred vaults of the central nave of the previously mentioned church of *San Bartolomé* (Fig. 20) as a preview of the research on these vaults. We refer here only to the *tas-de-charge* because of its relationship with the main aim of this article and specifically to highlight this *tas-de-charge*. In Fig. 20 it can be seen how it has nine horizontal rows, the tenth being where the pieces begin to be arranged individually. In the photos it can be clearly

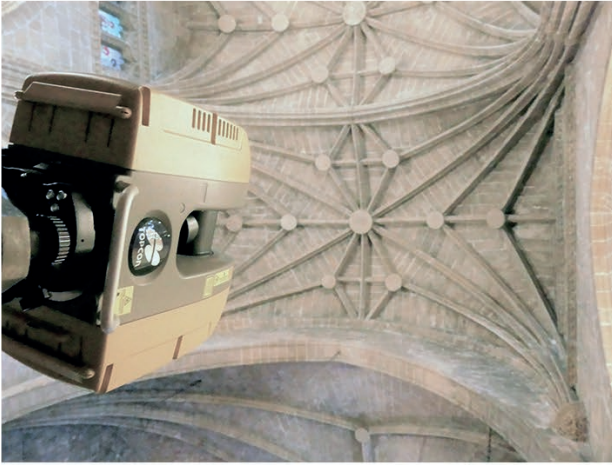


Fig. 20. View of starred vaults of the church of *San Bartolomé* in Jávea during a 3d laser scan and a detail of the *tas-de-charge* where the arrangement of the ribs can be seen. (Source: Capilla, Esther, 2021).

appreciated how the *voussoirs* of these rows have a horizontal lower bed and the upper one with a radial arrangement. In a first approximation to its geometry, there is a greater relationship between the *tas-de-charge* and the vault of the Chapterhouse of the *Valldigna* monastery than with that of the chapel of *La Lonja* in Valencia. In the latter, the presence of three-centred arches makes it so that the *tas-de-charge* has fewer courses and with a different curvature than the

upper arches. The results of the investigation of the vaults of the church in Jávea will be the subject of another publication.

4. CONCLUSIONS

After the analysis carried out of the springs of the starred vault of the *Lonja* Chapel we can conclude:

- The ribs extend below the corbels through supporting pillars attached to the walls. (Fig. 4)
- The springs of the ribs are visible at different heights. (Fig. 4)
- In the horizontal spring plane, the ribs are aligned -in horizontal projection- according to an arch of circumference through the midpoint of the extrados of the profiles. Upon reaching the keystone, both “have an agreement” due to the extrados (Figs. 8 and 9)
- Each of the ribs that start from the spring of the vault (diagonals, major tiercerons and wall ribs) are basket arches with three centres. Each arch therefore has two different curvatures.
- The ribs that originate at the angles of the vault have two different springs: a real one for the minor arches and a virtual one for the major arches of these ribs and for the rest of the ribs. (Fig. 11 to Fig. 17)
- The *tas-de-charge* is reduced to the minor arches of the diagonals ribs, tiercerons and wall arches. The first two have two courses with horizontal beds and a third transition course with a horizontal lower bed and a radial upper bed; the wall ribs only have one and one, respectively. From them, the ribs continue their curvature with independent *voussoirs*.
- The comparison of the geometry of the elements that participate in the *spring* and the way to solve it would allow to relate or to discard authorship. Thus, the comparison between the vault of the Chapterhouse of the *Valldigna* monastery and that of *La Lonja* Chapel in Valencia, would allow ruling out the same authorship. We refer to Capilla 2016a, 2018 and 2019.

Research on the springs of the vaults has been developed, in addition, on other vaults of the

Valencian territory through the aforementioned R+D+i project subsidized by the *Generalitat Valenciana*. Here a first approach to the *tas-de-charge* of the starred vaults of the church of *San Bartolomé* in Jávea (Alicante) has been incorporated.

ACKNOWLEDGEMENTS

The content of this article is linked to the studies of the vaults that have been carried out

under the R+D+i Project “*Bóvedas de crucería valencianas de los siglos XIII a XVI. Análisis especial, geométrico, constructivo y modelización matemática*” subsidized by *Conselleria de Innovación, Universidades, Ciencia y Sociedad Digital of the Generalitat Valenciana*, file GV/2020/001.

To Jacinta Harrington Flynn for her participation in the translation.

REFERENCES

- Arroyas Serrano, Magín y Zaragoza Catalán, Arturo. 2003. “El plano de la iglesia de Jávea”. In Mira González, E. y Zaragoza Catalán, A. (eds.) *Una arquitectura gótica mediterránea*. Catálogo de la exposición. Valencia: Generalitat Valenciana. Conselleria de Cultura I Educació. Subsecretaria de Promoció Cultural, volumen II, p. 175-176. ISBN 84-482-3546-0.
- Bolufer Marqués, Joaquim. 2010. “La fortaleza i església de Sant Bertomeu: Notes Documentals”. *Moros i Cristians*. July 10 to 18, 2010. Xàbia, p. 100-102.
- Capilla Tamborero, Esther. 2016a. *Geometría, arte y construcción. Las bóvedas de los siglos XIII a XVI en el entorno valenciano*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València.
- Capilla Tamborero, Esther. 2016b. “Métodos geométricos para el trazado de los perfiles de los nervios de bóvedas de crucería. La Capilla de la *Lonja* de Valencia”. In Echeverría, E., Castaño, E. eds. *Actas 16 Congreso Internacional Expresión Gráfica Arquitectónica “El arquitecto, de la tradición al siglo XXI. Docencia e investigación en expresión gráfica arquitectónica”*. Alcalá de Henares: Universidad de Alcalá, vol. 2, p. 1251-1259. <http://doi.org/10.1007/978-3-319-58856-8>.
- Capilla Tamborero, Esther. 2018. “Los enjarjes de la bóveda estrellada de la sala capitular del monasterio de Santa María (Simat de Valldigna, Valencia, España). Análisis geométrico.” In Marcos et al. eds. *Actas XVII Congreso Internacional Expresión Gráfica Arquitectónica De trazos, huellas e improntas. Arquitectura, ideación, representación y difusión*. Alicante: Dpto. Expresión Gráfica, Composición y Proyectos, Universidad de Alicante, vol. 1, p. 511-520. ISBN 978-84-16724-93-2
- Capilla Tamborero, Esther. 2019. “Graphic representation and geometric analysis of the springers of the star vault of the chapter house of Santa María monastery in Simat de Valldigna (Valencia, Spain)”. In Marcos, C., ed. *Graphic Imprints. The influence of Representation and Ideation Tools in Architecture*. Springer, vol. 2, p. 557-572. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-93749-6>.
- Capilla Tamborero, Esther. 2022. “The Plan Traces of Some Valencian Starred Cross Vaults”. The Plan Traces of Some Valencian Starred Cross Vaults. In: Ródenas-López, M.A., Calvo-López, J., Salcedo-Galera, M. (eds) *Architectural Graphics*. Springer Series in Design and Innovation, vol 22. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-04703-9_32
- García Valldecabres, Jorge Luis. 2010. *La métrica y las trazas en la iglesia de San Juan del Hospital de Valencia* (Tesis doctoral). Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/8381>
- Gómez Martínez, J. 1998. *El gótico español de la Edad Moderna. Bóvedas de crucería*. Valladolid: Secretariado de publicaciones e intercambio científico Universidad de Valladolid.
- Guarini, Guarino. 1737. *Architettura Civile*. Torino: Appresso Gianfrancesco Mairesse.

- Kruft, Hanno-Walter. 1985. *Historia de la teoría de la arquitectura. 1. Desde la Antigüedad hasta el siglo XVIII*. Ed. castellano (1990). Madrid: Alianza Editorial. ISBN 84-206-7095-2 (T. 1)
- López González, María Concepción, and García Valldecabres, Jorge Luis. 2012. "Una metodología para el análisis de los trazados reguladores clásicos de la arquitectura." *EGE Revista de Expresión Gráfica en la Edificación*, No. 7, Valencia: Universitat Politècnica de València, pp. 108–114. <https://doi.org/10.4995/ege.2012.12506>
- Navarro Fajardo, Juan Carlos. 2004. *Bóvedas valencianas de crucería de los siglos XIV al XVI. Traza y montea*. Tesis doctoral. Universitat de València
- Navarro Fajardo, Juan Carlos. 2006. *Bóvedas de la arquitectura gótica valenciana. Traza y montea*. Valencia: Publicacions Universitat de València. ISBN 978-84-370-6440-6
- Palacios Gonzalo, Juan Carlos. 2009. *La cantería medieval. La construcción de la bóveda gótica española*. Madrid: Munilla-Lería. ISBN 978-84-89159-84-3
- Palacios Gonzalo, Juan Carlos. 2015. *Taller de construcción gótica I. Workshop on building gothic methods I*. Madrid: Munilla-Lería. ISBN 978-84-942392-0-5
- Pérez de los Ríos, Carmen, and Zaragoza, Arturo. 2013. "Bóvedas de crucería con enjarjes de nervios convergentes que emergen del muro en el área valenciana, ss. XIV-XV". In Huerta, S. y López Ulloa, F. eds. *Octavo Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Madrid, 9-12 octubre 2013. Madrid: Instituto Juan de Herrera, p. 833-842. ISBN 978-84-9728-476-9
- Pérouse de Montclos, J. M. 1982. *L'Architecture à la française. XVI, XVII, XVIII siècles*. Paris: Picard.
- Piccoli, E. 2006. "Disegni di Guarini per le volte di edifici civili". In Dardanella, Giuseppe, Klaiber, Susan, Millon, Henry A. (ed.) *Guarino Guarini*. Torino: Allemandi, p. 43-49. ISBN 978-88-422-1471-7.
- Rabasa Díaz, Enrique. 2000. *Forma y construcción en piedra. De la cantería medieval a la estereotomía del siglo XIX*. Madrid: Akal. ISBN 84-460-1542-0
- Rabasa Díaz, Enrique. 2007. "Principios y construcción de las bóvedas de crucería". *Loggia. Arquitectura y Restauración*, 20, pp. 86-97. <https://doi.org/10.4995/loggia.2007.3208>
- Rabasa Díaz, Enrique. 2013. "Estereotomía: teoría y práctica, justificación y alarde. Stereotomy: theory and practice, justification and whimsicality". *Informes de la Construcción Vol. 65, N° extra-2*, p. 5-20. <https://doi.org/10.3989/ic.13.014>
- Rabasa Díaz, Enrique, and Huerta Hernández, Santiago. (eds.) 1996. *La construcción medieval*. Traducción de E. Rabasa del término "Construction" del *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*, de Viollet-leDuc (1854-1868). Madrid: Instituto Juan de Herrera. ISBN: 84-95-365-35-9.
- Ruiz de la Rosa, José Antonio. 1987. *Traza y simetría de la Arquitectura en la Antigüedad y Medioevo*. Sevilla: Servicio de publicación de la Universidad de Sevilla. ISBN 84-7405-384-6
- Ruiz de la Rosa, José Antonio. 2003. "Geometría fabrorum para la estereotomía". *EGE, Revista de Expresión Gráfica en la Edificación*, No. 3, p. 14-21. <https://doi.org/10.4995/ege.2003.12565>
- Sánchez González, Antonio. 2019. "Los mapas y planos del Archivo Ducal de Medinaceli: Una contribución cartográfica". *Revista Catalana de Geografia. Revista digital de geografia, cartografia i ciències de la Terra*, IV época, vol. XXIV, no. 59, p. Font: VIII Jornadas de la Asociación de Cartotecas Públicas Hispano-Portuguesas (IBERCARTO) <http://www.rcg.cat/articles.php?id=480>
- Soler Sanz, Felipe. 2014. *Trazados reguladores en la Arquitectura*. Valencia: Felipe Soler Monreal.

Spallone, Roberta. 2012. *Rappresentazione e progetto. La formalizzazione delle convenzioni del disegno architettonico*. Alessandria: Edizioni dell'Orso.

Spallone, Roberta. 2019a. "Geometry, Arithmetic, Architecture. Calculation Methods for Vault Surfaces in the *Modo di Misurare le Fabriche* by Guarini". In Cocchiarella, Luigi, ed. *ICGG 2018—Proceedings of the 18th International Conference on Geometry and Graphics*. Cham, Switzerland: BirkhäuserSpringer, p. 2108-2119. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95588-9_188

Spallone, Roberta. 2019b. "Geometry of Vaulted Systems in the Treatises by Guarino Guarini", *EGE Revista de Expresión Gráfica en la Edificación*, No. 11, Valencia: Universitat Politècnica de València, pp. 79-93. <https://doi.org/10.4995/ege.2019.12872>

Viollet-le-Duc, Eugène. 1854-1868. *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*, Término "Construction", tomo IV, 10 vol. Paris: Bance. 10 vol Disponible en: <https://fr.wikisource.org>.

Willis, Robert. 1842. "On the Construction of the Vaults of the Middle Ages", *Transactions of the Royal Institute of British Architects* vol. 1, p. 1-69

Zaragozá Catalán, Arturo. 2019. "Proyecto para la construcción de la iglesia de Jávea (Alicante)". In Ibáñez Fernández, J. (coord. y ed.). *Trazas, muestras y modelos de tradición gótica en la Península Ibérica entre los siglos XIII y XVI*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, p. 230-232

Zaragozá, Arturo, and Pérez de los Ríos, Carmen. 2014. "Bóvedas de crucería con enjarjes de nervios convergentes que emergen del muro en el área valenciana. Siglos XIV-XV (Y 2)". In Navarro Fajardo, J. C. ed. *Bóvedas valencianas. Arquitecturas ideales, reales y virtuales en época medieval y moderna*. Valencia: Universitat Politècnica de València, p. 34-57. ISBN 978-84-9048-188-2

How to cite this article: Capilla Tamborero, E. 2022. "The springs of the starred vault of the Chapel of the *Lonja* in Valencia and other Valencian starred vaults. Geometric analysis", *EGE Revista de Expresión Gráfica en la Edificación*, No. 16, Valencia: Universitat Politècnica de València. pp. 4-26. <https://doi.org/10.4995/ege.2022.16970>.

LOS ENJARJES DE LA BÓVEDA ESTRELLADA DE LA CAPILLA DE LA LONJA DE VALENCIA Y OTRAS BÓVEDAS ESTRELLADAS VALENCIANAS. ANÁLISIS GEOMÉTRICO

1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

La investigación muestra el análisis de la geometría y el procedimiento de diseño y ejecución de los enjarjes de la bóveda estrellada que cubre la Capilla de la *Lonja de la Seda* de la ciudad de Valencia (España). Se hace referencia también a los enjarjes de otras bóvedas estrelladas valencianas, como la que cubría la sala capitular del monasterio de la Valldigna (Simat, Valencia) o de la iglesia de San Bartolomé de Jávea, estudiadas en el proyecto I+D+i “Bóvedas de crucería valencianas de los siglos XIII a XVI. Análisis espacial, geométrico, constructivo y modelización matemática” subvencionado por la *Generalitat Valenciana*.

La *Lonja de la Seda*, también conocida como *Lonja de los Mercaderes* o *Casa de Contratación*, fue construida a finales del siglo XV bajo la dirección de los maestros Pere Compte y Joan Ivorra. La Lonja está considerada como uno de los mejores ejemplos del gótico civil español. Fue declarada Patrimonio de la Humanidad el año 1996. Se organiza en dos cuerpos: uno en el que se sitúa la sala de contratación o salón columnario y otro donde se ubica el edificio que albergaba el antiguo Consulado del Mar. Ambos cuerpos están dispuestos alrededor de un jardín y se articulan por medio de una torre. En la planta baja de la misma se ubica la que era la antigua Capilla de la *Lonja* -dedicada a la Concepción de la Virgen- cubierta por una bóveda estrellada. De dicha bóveda, estudiada en la tesis doctoral de la autora de este artículo, incorporamos el análisis geométrico de los enjarjes.

Los arranques, jarjas, jarjamentos o enjarjes de una bóveda de crucería constituyen el conjunto de arcos o nervios que se reúnen en un mismo punto de apoyo, desde el que se levanta la bóveda. Corresponden a lo que Viollet-le-Duc llama la *naissance des voûtes*.

En la bóveda de la Capilla de la Lonja que aquí analizamos, los enjarjes emergen de cuatro ménsulas que apoyan sobre las correspondientes columnas adosadas. Éstas están dispuestas en cada uno de los cuatro ángulos del espacio cubierto por la bóveda. Incorporamos aquí el resultado de los estudios y análisis realizado de los distintos elementos que forman parte de los enjarjes, así como su relación con la geometría espacial de toda la bóveda. Se muestra la geometría del encuentro de los nervios en el plano horizontal de arranque y el modo en que los nervios apoyan en la ménsula. Se refleja, asimismo, la curvatura de los nervios que concurren en el enjarje, así como las características geométricas de todas las piezas que forman parte del *tas-de-charge*. En estos enjarjes se produce una curiosa peculiaridad debida al hecho de que los nervios que parten de los arranques, formeros, diagonales y terceletes mayores -llamamos así a los que van de los arranques a las claves de terceletes- son arcos carpaneles, peculiaridad

que desarrollaremos más adelante. Sin embargo, el resto de nervios, ligaduras, rampantes y terceletes menores -llamamos así a los que van de la clave de los formeros a la clave de terceletes- tienen una única curvatura. Adelantamos también que los formeros se construyen con dovelas independientes antes que los terceletes y diagonales. Por ello, el número de hiladas del *tas-de-charge* es diferente cuando se reúnen formeros, terceletes y diagonal que cuando se agrupan sólo terceletes y diagonal. Se incorpora también el procedimiento para el diseño y ejecución de esos enjarjes que realizarían los constructores de la bóveda y que nos permitiría relacionar o descartar autorías de otras bóvedas.

La metodología empleada para el desarrollo de las investigaciones ha partido de tomas de datos llevadas a cabo *in situ*. En la bóveda de la *Lonja* de Valencia y la del monasterio de la Valldigna, éstas fueron mediante medición directa fundamentalmente. En las otras bóvedas mencionadas se utilizó además el escáner láser 3d.

Antes de exponer dicho procedimiento, es preciso referirse a Robert Willis (1842: 1-69) y a Viollet-le-Duc (1854-1868). Willis describe el método de diseño y ejecución de enjarjes (Fig. 2) basado en observaciones arqueológicas; a él se refiere Rabasa (2000: 100-101). Viollet-le-Duc define al *tas-de-charge* como la mejor solución para absorber los empujes de los arcos que llegan a los arranques de una bóveda de crucería. Asimismo describe la evolución de los arranques de las bóvedas y el trazado geométrico del enjarje de dos arcos ojivos y un perpiaño en una planta rectangular, en el término *Construction* del *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*.

Como antecedentes del tema, tanto de la autora de esta comunicación como de otros, destacamos algunos. De la autora: Capilla (2016a, 2016b, 2018, 2019 y 2022). De otros autores que han tratado el tema, hacemos mención a algunos de los más directamente relacionados: Rabasa (2000, 2007, 2013), Navarro Fajardo (2004, 2006), Palacios (2009, 2015), Pérez de los Ríos y Zaragoza (2013), Zaragoza y Pérez de los Ríos (2014). Asimismo, es preciso hacer una breve mención a los tratados y libros de monte que hablan sobre bóvedas de crucería en España y otros países europeos como Alemania, Francia o Italia. Gómez Martínez (1998: 124) hace un repaso por los diferentes tratados españoles de los siglos XVI, XVII y XVIII que recogen trazas de monte de bóvedas de crucería estrelladas como el de Hernán Ruiz el Joven, Alonso de Vandelvira, Rodrigo de Hontañón y Simón García, entre otros. También Gómez (1998:19) hace mención a las obras de alemanes como Mathieu Roriczer, Hans Schumuttenmayer o Lorenz Lechler, así como a

manuscritos “centrados en el diseño de bóvedas de crucería como los ‘álbumes’ de Viena (c. 1500), Dresde (c. 1544-1567) y Francfort (1572), o libros de examen como el de Jacob Stromer (1561). El mismo Gómez (1998: 16) refiriéndose a Francia, recoge cómo Jean-Marie Pérouse de Montclos (1982) “había sistematizado la estereotomía francesa de la Edad Moderna con la apoyatura fundamental de los libros de monte (1561-1614)”. Y con respecto a Italia, Krufft (1985: 135) hace referencia al tratado del italiano Guarino Guarini (1624-1683), que vio la luz en 1737, *Architettura civile*. A él se refiere Gómez Martínez (1998: 54) como “el primer tratado de arquitectura italiano que dedica un apartado específico a la estereotomía”. En el Cap. XXVI, Guarini (1737: 183-187) se refiere a *las bóvedas y a los modos de hacerlas* y en la *Observación quinta* a las bóvedas góticas (1737: 186). Autores como Piccoli (2006) o Spallone (2019a y 2019b) estudian en profundidad las bóvedas recogidas por Guarini en su tratado. También queremos hacer una breve mención a algunos estudios sobre trazados geométricos y reguladores como los de Ruiz de la Rosa (1987), García Valdecabres (2010), López González y García Valdecabres (2012), Spallone (2012) ó Soler Sanz (2014).

2. ANÁLISIS GEOMÉTRICO Y PROCEDIMIENTO DE DISEÑO Y EJECUCIÓN DE LOS ENJARJES DE LA BÓVEDA DE LA CAPILLA DE LA LONJA DE VALENCIA

Previamente al desarrollo del análisis geométrico y constructivo de los enjarjes de la bóveda de la Capilla de la *Lonja* de Valencia, hacemos una breve introducción al empleo y evolución del *tas-de-charge*.

Viollet-le-Duc recoge la definición de *tas-de-charge* en el término “Construction” del tomo IV del *Dictionnaire raisonné* (1854-1868) y en el término “*tas-de-charge*” propiamente dicho. Rabasa lo traduce como *macizo de carga* en la traducción del término “Construction” (Rabasa y Huerta eds. 1996: 272), definiéndolo como “el avance del despiece por hiladas horizontales”. En el término “*Tas de charge*”, Viollet lo describe como “hiladas de piedras con lechos horizontales que se sitúan sobre un punto de apoyo, sobre una pila o un ángulo de muro entre dos arcos, para recibir construcciones superiores. (...)” (traducción propia). También puede entenderse en la acepción de “corte o aparejo” cuando se habla del conjunto de varios *salmeres* (piezas) dispuestos en *tas-de-charge*. Aquí nos referimos al macizo de carga cuyo corte o aparejo tiene hiladas de piedra con despieces que avanzan con lechos completamente horizontales.

Para una descripción más detallada sobre el empleo y evolución del *tas-de-charge* nos remitimos al propio Viollet-le-Duc (1854-1868), a Rabasa y Huerta eds. (1996) y a Capilla (2018 y 2019).

2.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ENJARJES DE LA BÓVEDA ESTRELLADA DE LA CAPILLA DE LA LONJA

En la bóveda estrellada de la Capilla de la *Lonja* de Valencia, los nervios que parten de los enjarjes son arcos carpaneles. Cada uno de ellos tiene, por tanto, dos curvaturas; el tramo que apoya en las ménsulas tiene un radio de curvatura menor que el tramo superior. En la bóveda, el *tas-de-charge* se produce en los arcos de radio menor. En la Fig. 1 podemos ver el enjarje de uno de los ángulos de la bóveda.

En Capilla (2016, 2018 y 2019) se recoge la geometría de los enjarjes y el modo de llegada de los nervios a los arranques de la bóveda estrellada del aula capitular del monasterio de Santa María, en Simat de Valldigna. Dicha bóveda fue construida a finales del siglo XV, al igual que la bóveda de la Capilla de la *Lonja*. En la bóveda del monasterio de la Valldigna, cada uno de los arcos que llegan a las ménsulas de arranque tiene una única curvatura. Sin embargo, como hemos visto, en la Capilla todos los nervios que llegan a los arranques son arcos carpaneles y tienen, por tanto, dos curvaturas cada uno.

Antes de pasar a analizar detalladamente la geometría de los enjarjes de la bóveda que nos ocupa, queremos hacer una breve referencia al método de diseño y ejecución de enjarjes de Robert Willis y al método geométrico de Viollet-le-Duc para determinar la hilada de separación de los enjarjes en algunas bóvedas de crucería.

El procedimiento de diseño y ejecución de enjarjes descrito por Willis (1842: 8-13) basado en observaciones arqueológicas, lo recoge Rabasa (2000: 100-103). Podemos resumirlo en tres pasos: labra de las superficies de los lechos superior e inferior sobre el bloque devastado; dibujo del contorno correspondiente a la sección horizontal en cada una de esas superficies, y enlace de los contornos trazados directamente sobre la piedra para completar la labra de las superficies exteriores vistas (molduras aparentes). En el procedimiento de Willis habría una imprecisión geométrica debida al empleo del mismo perfil de los nervios en las secciones horizontales y en las radiales (Rabasa, 2000: 103, 2013:7). Pero, como recoge el mismo Willis (1842: 12) dicho error sería inapreciable. Lo mismo afirma Rabasa, y menciona, asimismo, que dicha imprecisión no preocuparía al constructor gótico. En la Fig. 2 podemos ver las trazas en los lechos de un enjarje de la nave lateral de la iglesia de St. Saviour’s Church, Southwark, tomadas durante su demolición en 1839, por Robert Willis (1842: 10).

Antes de proceder al análisis geométrico de los enjarjes de la bóveda estrellada de la Capilla de la *Lonja*, es preciso referirse al método geométrico de Viollet para determinar la hilada de separación de los enjarjes en las bóvedas de crucería (Fig. 3). Viollet (1858-1868) describe el trazado geométrico del enjarje de dos arcos ojivos y uno perpiño en la *Fig. 48 bis* del *Dictionnaire*

raisonné (Fig. 3 abajo) haciendo previamente unas consideraciones sobre el cambio de planta cuadrada a rectangular de las bóvedas cuatrimpartitas en las naves centrales, para conseguir que las claves de todos los arcos que las conforman (ojivos, perpiaños y formeros) lleguen a una altura similar. El método más sencillo que describe Viollet empleado por los constructores medievales para conseguir *salmeres* de lechos horizontales hasta donde todos los arcos que concurren en el arranque dejan de interseccionarse, consistía en dar el mismo radio a los arcos ojivos y a los perpiaños. En la mencionada *lámina 48* del término *Construcción* del *Dictionnaire raisonné*. (Fig. 3, arriba) representa el modo de obtenerlo y recoge que “Así se trazan los arcos en las primeras bóvedas góticas sobre planta rectangular.”

El procedimiento geométrico del trazado del enjarje de dos arcos ojivos y un perpiaño al que hacemos alusión lo recoge Viollet (1858-1868) en el término “Construction” y lo representa en la *Fig. 48 bis* (Fig. 3 abajo) (Rabasa y Huerta, eds, 1996, pp. 88-91). El procedimiento lo describe para los *salmeres* de bóvedas de crucería de planta rectangular que tengan la misma curvatura en los dos arcos ojivos y el perpiaño que hemos visto anteriormente (Fig. 3 arriba) y que tendrían, por tanto, secciones semejantes. En el ejemplo, el intradós de todos esos nervios en el plano horizontal de arranque está contenido en una circunferencia con centro en el punto A situado en el muro perimetral.

La bóveda que estudiamos aquí de la Capilla de la Lonja es estrellada. No tiene perpiaños, sino formeros, diagonales, terceletes y ligaduras. A diferencia de lo que ocurre en el ejemplo de Viollet (Fig. 3 abajo) y en la bóveda estrellada del monasterio de la Valldigna (Capilla 2016a, 2018 y 2019), en la bóveda de la Capilla de la Lonja, los puntos medios del listel del intradós de los nervios en el plano horizontal de arranque situado por encima de la ménsula no están contenidos en una circunferencia (Fig. 7), sino que hay un desplazamiento en el intradós de cada uno de los nervios. Por otro lado, el radio de los arcos que concurren en el arranque es diferente, por lo que no puede hacerse una traslación del método de Viollet, al no ser secciones semejantes. Este análisis comparativo nos daría pistas para atribuir o descartar autorías, si bien excede de los objetivos de este artículo. Nos remitimos a Capilla (2016a, 2018 y 2019).

2.2 ANÁLISIS DE LA GEOMETRÍA Y CONSTRUCCIÓN DE LOS ENJARJES DE LA BÓVEDA ESTRELLADA

Mostramos aquí el modo en que los nervios se encuentran con las ménsulas de arranque, la intersección de los mismos en un plano horizontal de arranque situado por encima de las ménsulas y la definición geométrica de las hiladas horizontales del *tas-de-charge* de la bóveda estrellada de la Capilla de la Lonja.

En cada uno de los cuatro ángulos de la Capilla, los nervios se reúnen en unas ménsulas con decoración que representa a los cuatro Evangelistas. (Fig. 4)

En cada ángulo, el *tas-de-charge* está compuesto de dos hiladas conjuntas de nervio diagonal, terceletes y formeros; la primera hilada es completamente horizontal en ambos lechos y en el formero, la segunda tiene el lecho inferior horizontal y el superior, radial. A partir de aquí, los arcos formeros continúan su curvatura construyéndose con dovelas independientes. Sin embargo, el nervio diagonal y los dos terceletes continúan unidos una hilada más con junta horizontal en el lecho inferior, y radial en el superior. Los nervios no parten todos a la misma altura; por ello, el nervio diagonal tiene un pequeño fragmento de dovela para adaptarse a la forma de la ménsula en el arranque. Para la representación y análisis de ello, se ha partido de las tomas de datos realizadas *in situ*. Incorporamos aquí sólo algunos dibujos de las mismas (Figs. 5 y 6). En el croquis de la Fig. 5 vemos el encuentro de los nervios en el plano horizontal de arranque y en la Fig. 6, las hiladas acotadas del intradós de un nervio tercelete, así como el despiece de las dovelas que lo componen.

En la bóveda de la sala capitular del monasterio de la Valldigna que hemos mencionado anteriormente – coetánea a la de la Capilla de la Lonja-, el *tas-de-charge*, se desarrolla en un mayor número de hiladas que en la Capilla (Fig. 7). Aquélla contaba con seis hiladas completamente horizontales, teniendo la séptima junta inferior horizontal y superior ya dispuesta radialmente. A partir de ella, los nervios formeros siguen su trayectoria con dovelas independientes dispuestas radialmente. Sin embargo, el nervio diagonal y los dos terceletes de cada enjarje siguen agrupados en un mayor número de hiladas horizontales. En concreto son tres más: dos con despieces con juntas horizontales en ambos lechos y la tercera con el lecho inferior horizontal y el superior, radial.

En la Fig. 8 podemos ver un detalle a escala del encuentro de los perfiles de los nervios que concurren en el plano horizontal de arranque. En colores diferentes se ha grafiado cada uno de los nervios que concurren en el arranque: en rojo y en el centro, el perfil de los diagonales; y a ambos lados del mismo, el de los terceletes en morado y el de los formeros en azul. La sección oculta de los formeros se desconoce ya que están escondidos en los muros. No obstante, relacionando con los restos hallados en otras bóvedas hemos considerado darle un espesor oculto de 1/4 de palmo valenciano, pero reiteramos que se trata de un espesor hipotético. El palmo valenciano es una unidad de longitud utilizada en tierras valencianas con anterioridad a la implantación del sistema métrico decimal. Equivale a 22,65 cm pero como recoge el investigador Soler (2014: 77) “se toman 23 cm., según las tablas de equivalencia promulgadas en el reinado de Isabel II entre 1849 y 1852”. No obstante, en la presente investigación nos referiremos al palmo

valenciano con su valor de 22,65 cm y no al valor redondeado a 23 cm, dado que las dimensiones de los elementos referenciados en la presente investigación coinciden con múltiplos o submúltiplos de palmos de 22,65 cm.

En dicha Fig. 8 podemos ver también algunas relaciones dimensionales reflejadas en centímetros y palmos valencianos de 22,65 cm. Así, los puntos medios de las bases de todos los perfiles distan del vértice del ángulo del muro interior donde concurren dos muros adyacentes una distancia igual a medio palmo valenciano. Por otro lado, el punto de tangencia de la moldura cóncava del perfil de los formeros en su encuentro con el muro, a quien es tangente dista 1,5 palmos del mismo vértice. El punto extremo de la cabeza de los terceletes dista 1,67 palmos ($1 + \frac{2}{3}$ palmos) del mismo vértice y los diagonales 2 palmos valencianos. Y, por último, el punto más sobresaliente de la ménsula donde se reúnen los nervios dista 2,5 palmos valencianos de dicho vértice.

En la Fig. 9 se ha representado el arranque reflejando el contorno producido por la intersección de los distintos nervios entre sí. Con línea gris de puntos se ha completado el perfil de cada uno de ellos que quedaría embebida en la masa del *tas-de-charge*, según se veía en la Fig. 8.

Tanto en la Fig. 8 como en la Fig. 9 podemos ver una diferencia importante con el ejemplo que hemos incorporado de Viollet-le-Duc (Fig. 3 abajo). En aquél, las cabezas de los nervios equidistaban del punto A; sin embargo, en los arranques de la bóveda de la Capilla de la Lonja, dichos nervios arrancan a diferentes niveles, tanto en horizontal, como en vertical. (Figs. 4, 5, 8 y 9).

La Capilla es de planta cuadrada, de 6,85 metros de luz entre muros. Tiene, por tanto, simetría diagonal y tal como puede observarse en la misma Fig. 8 y en la Fig. 9, los ángulos de los terceletes no varían a uno y otro lado de los nervios cruceros.

Ya hemos visto la representación del encuentro de los perfiles en el plano horizontal de arranque (Figs. 8 y 9). Pasamos a ver ahora la situación de dicho plano en relación con las proporciones generales de la Capilla (Figs. 10, 11 y 12) pero antes haremos una breve referencia al trazado en planta de la bóveda que puede verse en dichas figuras. Se trata de una bóveda estrellada con nueve claves: la polar o central y ocho de terceletes. La generación de bóvedas estrelladas la refleja gráficamente Gómez Martínez (1998: 80-81) a través de dos modos. Soler (2014: 93-94) muestra la construcción clásica de división de los lados del cuadrado en tres, cuatro, cinco,... partes iguales. La construcción de la división en cuatro partes iguales coincide con el modo de generación de la bóveda estrellada de la capilla de la Lonja. Un estudio más detallado de las trazas en planta de la bóveda puede encontrarse en Capilla (2016) y Capilla (2022).

Volviendo a las proporciones generales reflejadas en las Figs. 10, 11 y 12 podemos ver que el plano horizontal de arranque de los diagonales se sitúa a 6,85 metros ($30 + \frac{1}{4}$ palmos valencianos de 22,65 cm) desde el suelo, es decir, a una altura igual al lado del cuadrado de la planta. Espacialmente, pues, hasta ese plano de arranque, la Capilla responde a un cubo de lado 6,85 m. Asimismo, a partir de las cotas tomadas se ha determinado la altura del trasdós de la bóveda: 9,69 m (42,78 palmos valencianos, aproximadamente $42 + \frac{3}{4}$) desde el suelo. Dicho valor se corresponde con el producto del lado del cuadrado de la planta multiplicado por $\sqrt{2}$, es decir, que la altura total de la Capilla desde el suelo hasta el trasdós de la bóveda se obtiene a partir de la proporción relacionada con la diagonal del cuadrado ($6,85 \text{ m} \times \sqrt{2} = 9,69 \text{ m}$) Esta explicación puede verse reflejada gráficamente en la Fig. 10.

Los nervios diagonales, los terceletes que parten del mismo arranque (terceletes mayores) y los formeros son arcos carpaneles de tres centros y son simétricos. Cada uno tiene, por tanto, dos curvaturas distintas. El resto de nervios de la bóveda, los que hemos llamado terceletes menores (que van de la clave de los formeros a la clave de terceletes), las ligaduras que van de la clave central a la de terceletes y las ligaduras que definen la rampante de la bóveda tienen una única curvatura. El desarrollo completo de la geometría de todos ellos excede de los objetivos del presente artículo.

En el análisis de la geometría de los arranques de la bóveda que nos ocupa, constatamos la presencia de dos arranques: los reales y los que, para diferenciar de éstos, llamamos virtuales. Los primeros, los reales -cuya geometría acabamos de ver en las Figs. 8 y 9- son los que están físicamente presentes en la bóveda; corresponden a los arranques de los arcos inferiores de los carpaneles. Los segundos, los virtuales, corresponderían a los arcos superiores de los carpaneles y al resto de nervios. (Figs. 11 y 12).

Las curvaturas de los distintos nervios se han obtenido a partir de las cotas tomadas y su representación a escala. Así, la curvatura del trasdós de los nervios diagonales mayores (de radio mayor), es decir, los arcos superiores de los carpaneles diagonales, es una circunferencia de radio 6,342 metros, equivalente a 28 palmos valencianos de 22,65 cm (Fig. 11). Por otro lado, el radio de curvatura del trasdós de los terceletes mayores es de 6,154 metros. Considerando que aquella circunferencia de radio 6,342 m del trasdós de los arcos mayores de los diagonales es el radio de una esfera que define el intradós de la superficie de la bóveda, se ha comprobado que el radio de curvatura del trasdós de los arcos mayores de los carpaneles de los terceletes se corresponde con la sección de dicha esfera por un plano no radial, el correspondiente al plano que viene definido por el ángulo en planta de la línea de eje de los terceletes. El centro de dicha esfera está situado a un tercio de la altura total de la

Capilla desde el suelo hasta el trasdós de la bóveda (Fig. 11). Dicha altura define el radio de dos esferas, la del intradós de la superficie de la bóveda de radio 6,342 m (28 palmos valencianos) y la del trasdós de la misma –obvia decir que incluye plementería– tangente al prisma de proporciones $6,85 \times 6,85\sqrt{2}$ que veíamos antes, cuyo radio es 6,46 m, equivalente a 28,5 palmos.

Una vez definidos los centros y los radios que definen el trasdós y el intradós de la bóveda y la altura a la que se sitúan, pasamos a ver su posición en planta recogida en la Fig. 12. Hasta ahora únicamente habíamos representado el espacio interior de la bóveda en planta sin incluir el espesor de los muros. En la mencionada Fig. 12 y también en las Figs. 10 y 11 se ha reflejado éste, así como la ubicación de los arranques reales y los imaginarios o virtuales. Los reales son los que se han mostrado en las figuras anteriores. Pasamos ahora a explicar la obtención de los arranques virtuales o imaginarios. Partiendo de la esfera de radio 6,342 m, se ha dibujado en color rojo la planta de la circunferencia de diámetro mayor de la misma y el cuadrado en el que se inscribe (Fig. 12). Si prolongamos las líneas de eje de los nervios diagonales hasta que corten a dicho cuadrado, el punto de corte de la circunferencia de radio 6,342 m con dichas diagonales nos sitúa la posición del punto medio del trasdós del perfil de los nervios diagonales en el arranque (Fig. 13).

Mostramos a continuación una serie de dibujos en tres dimensiones sobre el proceso de generación de los arranques.

En la Fig. 14 puede verse la generación de los arcos mayores de los nervios diagonales a partir del plano virtual de arranque, situado desde el suelo a $1/3$ de la altura total del volumen de la Capilla.

En la parte superior de la Fig. 15 puede verse la generación de los diagonales y rampantes a partir de los arranques virtuales con la esfera generada siguiendo el trasdós de dichos nervios. En el dibujo inferior de la Fig. 15 aparece representada la estrella completa de la bóveda generada a partir de los arcos mayores de diagonales, terceletes mayores y carpaneles; y los arcos de curvatura única correspondientes a ligaduras, nervios rampantes y terceletes menores, como paso previo a definir la geometría completa de los nervios en los arranques.

En la Fig. 16 se puede ver la generación completa de los arcos carpaneles de los arcos diagonales obtenida a partir de los arcos mayores desde los arranques virtuales y los arcos menores desde los arranques reales, siendo ambos tangentes entre sí. Se han reflejado con dos colores diferentes para hacer más evidente los cambios de curvatura y sus tangencias.

En el dibujo inferior de la Fig. 16, se ha representado medio nervio diagonal visto en alzado; en ella se puede apreciar la tangencia entre los arcos menor y mayor que conforman el nervio. El dibujo central de la Fig. 16 representa un detalle de las hiladas del *tas-de-*

charge del arco menor (en color verde) de los nervios diagonales. La primera hilada, de menor dimensión no es una hilada real sino que corresponde al desfase que hay en el encuentro del arco con la ménsula y el arranque horizontal, según puede verse en las fotos de la Fig. 4.

En el dibujo superior de la Fig. 17 puede verse en detalle la generación de un arco formero a partir de la tangencia entre el tramo de radio menor y el de radio mayor que conforman el nervio. Los dibujos inferiores de la Fig. 17 recogen el proceso de generación de los nervios terceletes mayores a partir de la tangencia entre los arcos mayores obtenidos desde los arranques virtuales –cuyo radio de curvatura coincide con el determinado al seccionar la esfera según se ha visto anteriormente–, y los arcos menores obtenidos desde los arranques reales. En la parte superior de la figura se ha recogido un detalle de la tangencia entre ambos arcos y abajo el encuentro de los dos terceletes mayores que parten de un mismo arranque.

2.3 REPRESENTACIÓN DEL *TAS-DE-CHARGE* DE LA BÓVEDA ESTRELLADA

Incorporamos finalmente la representación del *tas-de-charge* con todas las hiladas. (Fig. 18)

La simetría diagonal descrita de la Capilla de *La Lonja* hace que los radios de curvaturas de los arcos dispuestos a ambos lados de los nervios diagonales sean los mismos. De este modo en cada *tas-de-charge* únicamente encontramos tres curvaturas diferentes: la de los nervios diagonales, la de los formeros y la de los terceletes mayores.

Incorporamos también una imagen o representación volumétrica del *tas-de-charge* de la bóveda del aula capitular del monasterio de la Valldigna (Capilla, 2016, 2018 y 2019), coetánea a la de Capilla de la *Lonja*. En aquella puede verse una disposición y número de hiladas muy distinta como resultado de una geometría espacial de la bóveda diferente. Además, en aquella no existe simetría diagonal al ser la planta ligeramente perlongada.

3. DISCUSIÓN. OTROS ESTUDIOS Y CONSIDERACIONES

Se han desarrollado nuevas investigaciones de las bóvedas estrelladas de la iglesia de San Bartolomé de Jávea (Alicante) construidas a principios del siglo XVI. Dichas investigaciones se han realizado para el desarrollo del proyecto “Bóvedas de la crucería valencianas de los siglos XIII a XVI. Análisis espacial geométrico, constructivo y modelización matemática” subvencionado por la Generalitat Valenciana.

La iglesia-fortaleza de San Bartolomé de Jávea, declarada Monumento-Histórico en 1931, es de nave única con capillas entre contrafuertes y cuenta con

torre-campanario en el lado del Evangelio y otras dependencias anexas (Capilla de la Comunión, sacristía, sacristía vieja). La construcción de la nave se inició en 1513 por el *mestre picapedrer* Domingo de Urteaga (Bolufer, 2010, p. 101). Sus trazas vienen recogidas en el plano nº 227 conservado en el Archivo Ducal de Medinaceli Medinaceli y son atribuidas al maestro Urteaga (Arroyas y Zaragoza 2003, p. 176; Sánchez González 2019, p. 11 y Zaragoza 2019, p. 231). La nave central está cubierta con bóvedas estrelladas de 9 claves, con terceletes y contraterceletes (Fig. 20); las capillas laterales con bóvedas de crucería simple y una de ellas -la situada bajo la torre- con crucería octopartita-, y el presbiterio tiene bóveda estrellada de 5 claves. Algunos elementos de esta bóveda, así como su geometría y la inscripción que aparece sobre el arco perpiño que separa la nave del presbiterio (*de aquí abaxo la obra nueva*) confirman que éste fue construido con anterioridad a la nave.

Incorporamos aquí algunas imágenes de las bóvedas estrelladas de la nave central de la mencionada iglesia de San Bartolomé (Fig. 20) como avance de la investigación sobre dichas bóvedas. Nos referimos aquí únicamente a los enjarjes por su relación con el objeto principal de este artículo y de forma específica queremos hacer mención al *tas-de-charge*. En la foto inferior de la Fig. 20 puede verse cómo éste cuenta con nueve hiladas horizontales siendo la décima donde las piezas empiezan a disponerse de forma individual. En las fotos puede apreciarse claramente cómo las dovelas de dicha hilada tienen el lecho inferior horizontal y el superior con disposición radial. En una primera aproximación a su geometría se aprecia una mayor relación del *tas-de-charge* con la bóveda del aula capitular del monasterio de la Valldigna que con el de la Lonja de Valencia. En esta última, la presencia de arcos carpaneles hace que el *tas-de-charge* tenga menos hiladas y con una curvatura diferente a los arcos superiores. Los resultados de la investigación de las bóvedas de la iglesia de Jávea serán objeto de otra publicación.

4. CONCLUSIONES

Tras el análisis realizado de los arranques de la bóveda estrellada de la Capilla de la Lonja podemos concluir:

- Los nervios se prolongan por debajo de la ménsula a través de unos pilares sustentantes adosados a los muros. (Fig. 4)
- Los nervios tienen su arranque visible a diferentes alturas. (Fig. 4)
- En el plano horizontal de arranque, los nervios se alinean según un arco de circunferencia por el punto medio del trasdós de los perfiles. Al llegar a la clave, ambos “tienen acuerdo” por el trasdós. (Figs. 8 y 9)

- Cada uno de los nervios que parten de los arranques de la bóveda (diagonales, terceletes mayores y formeros) son arcos carpaneles. Cada arco tiene, por tanto, dos curvaturas diferentes.
- Los nervios que nacen en los ángulos de la bóveda tienen dos arranques diferentes: uno real para los arcos menores y otro imaginario para los arcos mayores de estos nervios y para el resto de nervios (Figs. 11 a 17).
- El *tas-de-charge* queda reducido a los arcos menores de los diagonales, terceletes y formeros. Los dos primeros cuentan con dos hiladas con lechos horizontales y una tercera de transición con lecho inferior horizontal y lecho superior radial; los formeros sólo tienen una y una, respectivamente. A partir de ellas, los nervios continúan su curvatura con dovelas independientes.
- La comparación de la geometría de los elementos que participan en el enjarje y el modo de resolverse permite relacionar o descartar. Así, la comparación entre los arranques de la bóveda del aula capitular del monasterio de la Valldigna y el de la Capilla de la Lonja de Valencia, permitiría descartar una misma autoría. Nos remitimos a Capilla (2016a, 2018 y 2019).

La investigación sobre los enjarjes de las bóvedas se ha venido desarrollando, además, sobre otras bóvedas del territorio valenciano a través del mencionado proyecto I+D+i subvencionado por la Generalitat Valenciana. Aquí se ha incorporado una primera aproximación a los enjarjes de las bóvedas estrelladas de la iglesia de San Bartolomé de Jávea (Alicante).

AGRADECIMIENTOS

El contenido del artículo está vinculado a los estudios de bóvedas que se han venido realizando en el marco del Proyecto I+D+i “Bóvedas de crucería valencianas de los siglos XIII a XVI. Análisis especial, geométrico, constructivo y modelización matemática” subvencionado por la *Conselleria de Innovación, Universidades, Ciencia y Sociedad Digital* de la Generalitat Valenciana, expediente GV/2020/001.

A Jacinta Harrington Flynn por su participación en la traducción.