Proyecto y construcción del cierre del ábside de la Sagrada Familia

Design and construction of the apse on the "Sagrada Familia"

Carles Buxadé[(1)], Josep Gómez-Serrano[(2)], Ramon Espel[(3)], Rosa Grima[(4)], Àgata Buxadé[(5)], Ramon Ferrando[(5)] y Antonio Aguado[6)]

Recibido | *Received:* 26-11-2009
Aceptado | *Accepted:* 08-04-2010

Resumen

El templo de la Sagrada Familia es una obra cuya construcción dura ya más de 125 años. Recientemente se ha reanudado la construcción de la fachada del ábside, desde la cota + 45,00 a la + 64,00 m, y se han iniciado los trabajos del hiperboloide central. Este elemento arranca de un plano inclinado, entre las cotas + 60,00 y + 64,00 m, y llega hasta la cota + 77,00 m en el centro del ábside.

En lo que sigue se plantean, desde una visión integral, los diferentes aspectos de proyecto, cálculo, ejecución y materiales para lograr dar respuesta a este reto incorporando las innovaciones requeridas para alcanzar una respuesta satisfactoria.

Palabras clave: Sagrada Familia, Gaudí, construcción, ábside, estructura y materiales

Abstract

The Expiatory Temple of the Holy Family has now been under construction for over 125 years. Construction on the façade enclosing the apse has recently been resumed, from elevation + 45,00 to + 64,00 m. Work has also begun on the central hyperboloid. This element springs from an inclined plane, between elevations + 60,00 and + 64,00 m, and extends upward to elevation + 77,00 m at the centre of the apse.

The pages that follow provide a comprehensive overview of a number of questions respecting the design, engineering, construction and materials involved, as well the innovations implemented, to respond adequately to this challenging endeavour.

Keywords: *Sagrada Familia, Gaudí, construction, apse, structure and materials.*

* ***Page 102 of this issue contains an extensive English language summary of this article for inclusion in databases.***

(1) Dr. Arquitecto. 2 Buxadé, Margarit y Ferrando S.L.P. (Barcelona, España)
(2) Dr. Arquitecto. Universidad Politécnica de Cataluña. E.T.S. d'Arquitectura del Vallès (Sant Cugat del Vallès, España)
(3) Arquitecto técnico. Jefe de Obra del Templo de la Sagrada Familia (Barcelona, España)
(4) Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña. E.T.S. de Caminos, Canales y Puertos (Barcelona, España)
(5) Arquitecto. 2 Buxadé, Margarit y Ferrando S.L.P. (Barcelona, España)
(6) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña. E.T.S. de Caminos, Canales y Puertos (Barcelona, España)

Translation: Margaret Clark

Persona de contacto / *Corresponding author:* rosagrimalopez@gmail.com

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

1. INTRODUCCIÓN

Antonio Gaudí y su obra y, en especial, el Templo Expiatorio de la Sagrada Familia, han sido, son y, probablemente, serán muy estudiados dada la singularidad y belleza de sus planteamientos. Los primeros documentos escritos por colaboradores suyos se publicaron a finales de los años 20 [1, 2] y, en la actualidad, diferentes profesionales (ligados o no a la construcción de la Sagrada Familia) siguen investigando sobre su obra [3].

En el caso del Templo, al tratarse de una obra en desarrollo, es interesante reflejar que los avances son acordes a los tiempos, tal como él ya preveía [4], lo que implica la incorporación de nuevos materiales y tecnologías, sin que ello signifique alejarse de su espíritu creador.

Una de las principales características del Templo (y de la obra de Gaudí al completo) son las formas geométricas empleadas en su diseño. Para Gaudí, forma y estructura están unívocamente relacionadas sin artificio:

> *"Para que un objeto sea extraordinariamente bello es necesario que su forma no tenga nada de superfluo"* (Antoni Gaudí) [5]

Gaudí trató de trasladar a sus obras las formas que observaba en la naturaleza con la intención de optimizar la disposición estructural de las construcciones sin olvidar los procesos constructivos. Esta investigación dio como resultado todo el repertorio de formas de la "geometría Gaudiniana" [5]. En la Sagrada Familia vemos la culminación de esta investigación con el empleo sistemático de superficies regladas (hiperboloides, paraboloides, elipsoides…) intersecadas y acopladas entre sí. El conjunto del Templo está formado a partir de proporciones simples que se repiten y se multiplican y por un sistema estructural basado en formas geométricas generadas por rectas.

> *"El uso de las superficies regladas es lógico por su superioridad plástica y su facilidad constructiva"* (Antoni Gaudí) [5]

La construcción del templo sigue los ritmos marcados por las aportaciones realizadas a través de las donaciones, siendo especialmente significativos los avances de los últimos años [6], con el objetivo de cerrar la nave central a finales de 2010 [7], lo que implica la necesidad de completar el ábside.

El objetivo del presente artículo es describir el proyecto y construcción del cierre del ábside del Templo Expiatorio de la Sagrada Familia, entre las cotas + 45,00 y + 64,00 m, y del hiperboloide central del mismo. Esta última figura arranca de un plano inclinado, entre las cotas + 60,00 y + 64,00 m, y llega hasta la cota + 77 m.

1. INTRODUCTION

Antonio Gaudí and his oeuvre, in particular the Templo Expiatorio de la Sagrada Familia (Expiatory Temple of the Holy Family, hereafter the temple or the "Sagrada Familia") have been, are being and in all likelihood will continue to be intensely studied, in light of the singularity of the architect's approach and the beauty of his works. While the earliest papers were published by his collaborators in the late nineteen twenties [1, 2] any number of professionals (involved or otherwise in the construction of the Sagrada Familia) continue to study his oeuvre today [3].

As construction in progress, work on the temple has remained abreast of the times, just as Gaudí predicted it would [4]. This naturally entails the use of new materials and technologies, but by no means betrays the artist's creative spirit.

One of the main characteristics of the temple (and Gaudí's work in general) is the use of geometric shapes in the design. For Gaudí, form and structure are univocally and naturally interrelated:

> "For an object to be extraordinarily beautiful, its form must not be superficial in any way" (Antoni Gaudí) [5].

In his works, Gaudí attempted to transpose the forms he observed in nature, with a view to optimizing the structural design of his creations without disregard to construction processes. The fruit of his research was the repertoire of forms that constitute "Gaudian geometry" [5]. In the Sagrada Familia, the culmination of that process, he systematically intersected and wedded ruled surfaces (hyperboloids, paraboloids, ellipsoids...). The temple as a whole consists of the repetition and multiplication of a series of simple proportions and a structural system based on geometric shapes generated by straight lines.

> "The use of ruled surfaces is logical in light of their plastic superiority and ease of construction" (Antoni Gaudí) [5].

The pace of temple construction is governed by its financing, which is based on donations. Progress in the last few years [6], intended to close the central nave by year-end 2010 [7], which in turn entails completing the apse, has been particularly significant.

The present article aims to describe the design and construction involved in closing of the temple apse between elevations + 45,00 and + 64,00 m and erecting its central hyperboloid. The latter member springs from an inclined plane at elevations + 60,00 to + 64,00 m, extending upward to + 77 m.

The paper stresses the existing conditions along with design and engineering issues, as well as the construction processes and materials deployed to respond to the demanding levels of performance required. In this regard, the innovations developed for the high strength and self-

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

Para dar respuesta a este objetivo se hace un planteamiento metodológico poliédrico, incidiendo en los condicionantes existentes y en los aspectos de proyecto y cálculo para, con posterioridad, abordar los procesos constructivos y los materiales necesarios para dar respuesta al alto nivel de las prestaciones requeridas. A este respecto se señalan los trabajos de innovación desarrollados en los hormigones de alta resistencia y autocompactantes con los que se ha trabajado, así como en la necesidad de cambiar los equipos para dar respuesta a este alto nivel de prestaciones (resistencia a compresión a 28 días superior a 60 MPa, alta trabajabilidad, alto nivel de acabados).

2. DESCRIPCIÓN

Si bien el Templo Expiatorio de la Sagrada Familia es una estructura conocida, cabe hacer un primer despiece del mismo para poder observar, no sólo lo que implica esta estructura, sino el encaje de la obra del ábside que ahora nos ocupa en todo el conjunto.

Las obras de la Sagrada Familia se iniciaron en 1882 con la construcción de la cripta del ábside bajo la dirección del arquitecto diocesano Francesc de Paula Villar. Después de la dimisión de éste, por discrepancias en los materiales de las columnas y bóvedas, la continuación de los trabajos recayó en 1884 en un joven arquitecto, Antoni Gaudí, que colaboraba con el arquitecto Joan Martorell, asesor de las obras del Templo de la Sagrada Familia.

A principios del siglo XX, la Junta del Templo recibió un importante donativo que hubiese permitido finalizar la construcción. Este hecho fue aprovechado por Gaudí, que tenía en mente un nuevo proyecto de templo de grandes dimensiones, para convencer a los promotores "Josefinos" de cambiar el proyecto inicial por una nueva obra que ni ellos mismos podrían ver realizada. La modificación que propuso preservaba, como condición de contorno, lo construido hasta ese momento.

En las décadas posteriores Gaudí diseñará progresivamente el interior desde una solución neogótica con bóvedas catenarias a una solución con bóvedas parabólicas y, definitivamente, a una solución con bóvedas hiperbólicas con enlaces parabólicos. Gaudí no realizó un proyecto completo de la Sagrada Familia, pero dedicó los últimos años de su vida al estudio del conjunto y a la construcción de la Fachada del Nacimiento, para lo que contó con varios colaboradores.

En cuanto a la planta, el planteamiento realizado por Gaudí sobre el nuevo Templo fue dar continuidad a la dirección mar-montaña planteada por Villar, si bien proponiendo una nueva modulación derivada de unos cánones que Gaudí marca en todas las dimensiones de su obra: dimensión de las naves late-

compacting concretes used are discussed, along with the need to renovate the equipment to meet those requirements (28-day compressive strength of over 60 MPa, excellent workability, high level of finish).

2. DESCRIPTION

Even though the Sagrada Familia is a well-known structure, a part-by-part description of its components may provide insight into not only what the structure itself involves, but the bearing that the construction of the apse has on the temple as a whole.

Work on the Sagrada Familia began in 1882 with the construction of the crypt below the apse under the leadership of diocesan architect Francesc de Paula Villar. After his resignation for reasons of discrepancies around the materials used in columns and vaults, Antoni Gaudí, then a young architect working with in Joan Martorell's studio, was commissioned to continue temple construction in 1884.

In the early twentieth century, the Temple Board received a donation large enough to finish the works. Gaudí, who had a new design in mind for a much larger temple, seized the opportunity to persuade the developers (a religious association devoted to St Joseph founded in Barcelona in 1866) to change the initial design for another that not they themselves would never see completed. The modification proposed assumed the conservation of what had been built to that time as a boundary condition.

In the following decades Gaudí's design for the interiors evolved gradually, from a neo-Gothic solution with catenary, then parabolic and finally hyperbolic vaults interconnected with parabolas. While the architect never drew up a complete design for the Sagrada Familia, he did devote the last few years of his life to studying the structure as a whole and to building the Nativity Façade, a project for which formed a team of construction professionals.

In his new layout for the temple, Gaudí honoured Villar's sea-mountain orientation, while re-modulating the original design to the basic dimensions that would govern the project as a whole: lateral naves, 7,5 m; central nave, 15 m; height of the lateral naves, 30 m; height of the central nave, 45 m. This would call for working around the original approach, as described below.

The Sagrada Familia has a traditional Latin cross layout with five longitudinal naves and a transept with three, an apse and a crypt under the high altar (Figure 1a which houses the Expiatory Temple of the Holy Family Archive (hereafter the ATESF, using the Spanish initials). In the future it will have three façades, two of which, the lateral façades, have now been built. In addition, six large steeples, symbolizing the evangelists, Christ and the Virgin Mary, will tower over the church from their springing at the roof

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

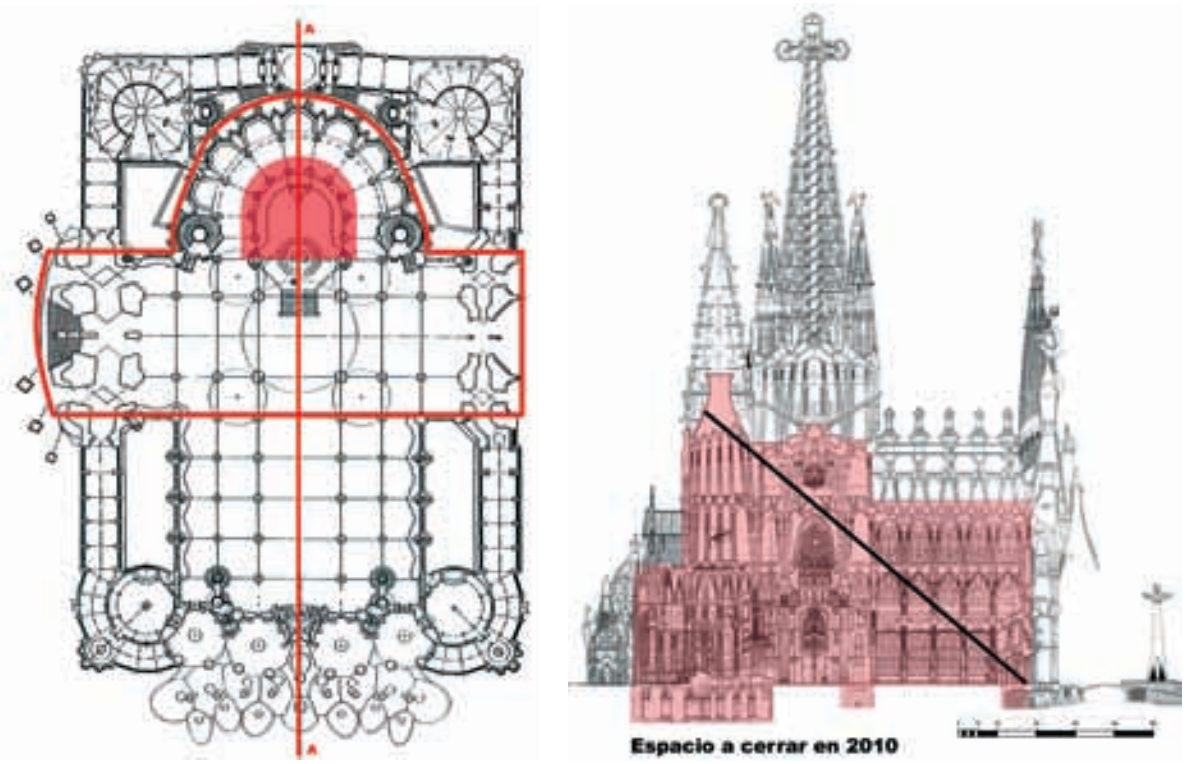


Figura 1. Templo de la Sagrada Familia: a) planta (actualización de la primera publicación de 1929) y b) sección longitudinal del Templo (AA) (ajustada a partir de la versión de 1974). Fuente: ATESF

Figure 1. Expiatory Temple of the Holy Family. a) plan view (updated from the first publication, in 1929) and b) longitudinal cross-section of the temple (AA) (adjusted from the 1974 version). Source: ATESF

rales, 7,5 m; central, 15 m; altura nave lateral, 30 m; altura nave central, 45 m. Ello requerirá de un encaje con el planteamiento inicial que se describe con posterioridad.

La Sagrada Familia tiene una planta clásica en cruz latina con cinco naves longitudinales y un crucero de tres, un ábside y una cripta bajo el altar principal (figura 1a, correspondiente al Archivo del Templo Expiatorio de la Sagrada Familia, en adelante ATESF). En el futuro tendrá tres fachadas de las cuales ya se han construido las dos laterales. Además, seis grandes torres coronarán la estructura sobre las cubiertas del crucero y el ábside dedicadas a los evangelistas, a Cristo y a la Virgen María. Estas torres pueden verse en la figura 1b, resaltándose en la misma las partes que está previsto finalizar en el año 2010 [7].

En la misma figura 1b (línea continua) puede verse que Gaudí planteaba una máxima visibilidad del ábside y del hiperboloide central del mismo para que fuese posible visualizar la figura del Pantocrátor, que estará en el interior del hiperboloide del ábside a 70 m de altura, desde la entrada de la fachada principal de la Gloria, y así lo indica y grafía en la sección publicada. Ello implica, en todo momento, un alto nivel en los aspectos estéticos con relación a la percepción de los feligreses y visitantes.

En la actualidad se trabaja en el cierre de la primera cubierta de los 4.500 m^2 que forman el interior del

of the transept and apse. These steeples are shown in Figure 1b): the parts planned for completion in 2010 are highlighted [7].

As Figure 1b shows (dashes), Gaudí sought maximum visibility for the apse and its central hyperboloid to ensure that anyone entering the temple from the main or Glory Façade would have a clear view of the Christ Pantocrator, that will be positioned at a height of 70 m inside the hyperboloid that covers the apse. The architect himself made this clear in the cross-sections published in his lifetime. This arrangement is indicative of exquisite attention to the aesthetics governing the perception of the congregation and other visitors.

At this time work is underway on the first roof over the 4 500-m2 interior of the temple. The columns in the main body and transept have now been completed and the lateral and central naves have been roofed, at heights of 30 and 45 m, respectively. See the photograph in Figure 2 for the finished appearance of the ceilings, some of which were completed in 2000.

With the roof over the transept, at a height of 60 m, now completed, work has begun on the base of the five towers that will crown this part of the temple and the enclosure of the apse. The intention is the have the entire temple roofed and enclosed by autumn 2010 (see Figure 3).

One of the innovations that has given temple construction a significant impetus is the application of computer-aided design to the study of scale model columns and vaults [8].

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026



Figura 2. Cubiertas de las naves del cuerpo principal. Fuente: ATESF
Figure 2. Roofs over the main body. Source: ATESF

Templo. En el cuerpo principal y el transepto se han terminado las columnas y cubiertas de las naves laterales (a 30 m de altura) y la nave central (a 45 m). El aspecto final que presentan estos techos puede verse en la figura 2, algunos de ellos finalizados en el año 2000.

Una vez acabada la cubierta del crucero a 60 m de altura, se trabaja asimismo en el arranque de las 5 torres que coronarán esta parte del Templo y en el cierre del ábside con el objetivo de tener cubierto el Templo en otoño de 2010 [7] (como puede verse en la figura 3).

Dentro de las innovaciones introducidas en la construcción del Templo y que han ayudado de forma significativa al desarrollo de las obras, el dibujo asistido por ordenador aplicado al estudio de las columnas y las bóvedas de las maquetas [8] es lo que ha permitido definir las ecuaciones que generan las superficies regladas del Templo y las intersecciones entre ellas, hasta llegar a la conclusión de que los

This tool has proven to be instrumental in defining the equations that generate the temple's ruled surfaces and their intersections. The conclusion drawn is that the parameters that define these surfaces are modulated to the same design as the plan layout of the temple (from the ratio between the necks of the hyperboloids of different dimensions to column diameters). Indeed, all the temple's main dimensions can be generated by applying a system of proportions in which the multipliers are multiples or factors of 12 (1/4, 1/3, 1/2, 2/3, 3/4, 1) to the base unit, a 7,5-m module (the distance between columns in the lateral naves of the main body) [9].

All these criteria were adopted and observed by Gaudi's successors. The ones who knew him personally published their explanations in writings and cross-sections produced after the Spanish Civil War. While the earliest successors were only able to build the Passion Façade and the first part of the main nave, their drawings, along with their repair and maintenance of the scale models, have enabled subsequent generations to continue Gaudí's magnum opus.

3. DESCRIPTION OF APSE GEOMETRY

The following description of the apse roofs stresses the singularity of these the form, structure and construction of these members. This part of the works is of particular



Figura 3. Vista aérea del estado de las obras del crucero (noviembre de 2009). Fuente: ATESF
Figure 3. Aerial view of the state of the works on the transept (November 2009). Source: ATESF

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

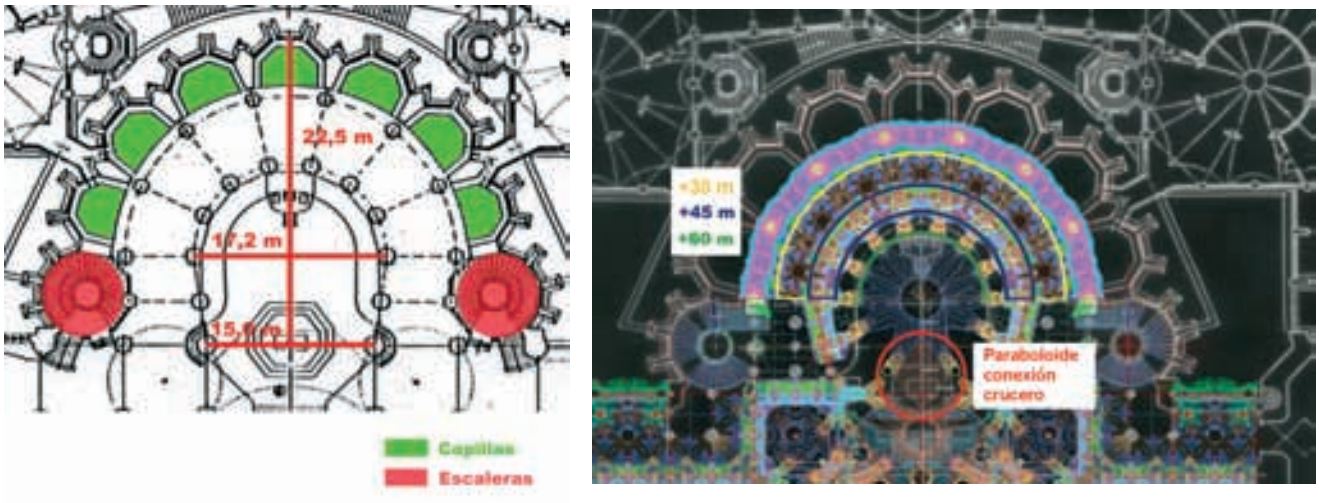


Figura 4. Planta del ábside: a) dimensiones y b) bóvedas a diferentes alturas. Fuente: ATESF
Figure 4. Apse layout: a) dimensions and b) vault at different heights. Source: ATESF

parámetros que las definen siguen la misma modulación que la planta del Templo (ya sean la relación entre los collarines de los hiperboloides o los diámetros de las columnas). A partir de un módulo de 7,5 m (que es la distancia entre columnas de la naves laterales del cuerpo principal) y un sistema de proporciones basadas en múltiplos y divisores de 12 (1/4, 1/3, 1/2, 2/3, 3/4, 1) se generan todas las demás dimensiones generales del Templo [9].

Todos estos criterios fueron llevados y continuados por los sucesores de Gaudí. Los que le conocieron personalmente publicaron sus explicaciones en diferentes escritos y las aplicaron en las secciones y planos que se realizaron después de la Guerra Civil. Aunque los primeros continuadores solamente pudieron construir la fachada de la Pasión y los inicios de la nave principal, el mantenimiento que hicieron de las maquetas, la reparación de las mismas y los planos realizados permitieron a generaciones posteriores continuar con el proyecto que Gaudí había iniciado.

3. DESCRIPCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ÁBSIDE

En lo que sigue se describen las cubiertas del ábside haciendo hincapié en la singularidad de estas estructuras tanto a nivel formal como estructural y constructivo. Esta parte de la obra es de especial relevancia por dos motivos: la parte interior de la estructura se podrá ver desde toda la nave, lo que marcará un nuevo techo del templo a 75 m de altura y, a la vez, es el comienzo y soporte de una nueva torre, por lo que es un elemento de gran importancia estructural sometido a grandes esfuerzos. Como veremos, en el ábside las formas geométricas están presentes en la mayoría de sus elementos: desde los elipsoides de los capiteles de las columnas hasta el gran hiperboloide central, lo que también hace que sea único en el proceso constructivo.

significance for two reasons. First, a new ceiling will be defined for the temple, at a height of 75 m and visible from any point in the nave. And second, it is o key structural importance, for as the base and support for a new tower it will be subjected to enormous stress. Geometric forms are present in most of the elements comprising the apse, from the ellipsoids on the column capitals to the huge central hyperboloid, resulting in a most unique construction process.

The apse, a semi-circle with a radius of 22,5 m, is divided into 7 chapels, which converge at the transept on two staircases, one to the crypt and the other to choir. This area will also house the high altar. As Figure 4a) shows, the plan layout of the apse columns is horseshoe-shaped due to the need to adapt Villar's original design (i.e., the arrangement of the crypt columns from which the apse columns spring) to Gaudí's modulation.

In Villar's initial design for the central nave, the distance between interior columns was 17,2 m, with 30 m between exterior columns. Gaudí adopted the latter dimension in his lateral columns because it concurred with his own modulation (described above), but in the central nave he set the columns 15 m apart. The solution devised to adapt this arrangement to Villar's 17,2-m between columns in the apse (see Figure 4a) was to narrow the deambulatory from the original 7,5 to 6,4 m and roof it with a series of vaults at different heights (see Figure 4b).

For the elevation view, Gaudí devoted his final years to building scale models, both of the entire temple and of details, especially 1/10 models of the main body. The cross-section of the apse, by contrast, was reflected in the general cross-sections of the temple that Gaudí published in his Sagrada Familia albums (1917, 1920, 1923, 1925). These elements were designed assuming a parabolic solution for the interior, but the form and structural strength are general and similar to the principles ultimately adopted. This was confirmed in a paper titled "El Templo de la Sagrada Familia" (1929) [2], written by Puig-Boada, who

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

El ábside está formado por un semicírculo de 22,5 m de radio dividido en 7 capillas. En la unión con el crucero, donde se ubicará en el futuro el altar principal, se encuentran dos escaleras de acceso a la cripta y al coro. Tal como puede verse en la figura 4a, la distribución en planta de las columnas del ábside sigue en la base una distribución en herradura debido a la necesidad de adaptar la modulación original de Villar (reflejada en las columnas de la cripta arranque de las del ábside) y la modulación de Gaudí.

En el proyecto de nave central inicial de Villar la distancia entre columnas interiores era de 17,2 m. mientras que la distancia total entre las columnas exteriores era de 30 m. Gaudí respetó esta última dimensión en sus columnas laterales ya que coincide con su nueva modulación (anteriormente descrita), si bien en la nave central creó una secuencia de dimensiones entre las columnas centrales de 15 m, lo que precisa de una readaptación para tener en cuenta la distancia de 17,2 m que proyectó Villar entre las columnas del ábside (ver figura 4a). Ello da lugar a un deambulatorio que recorre el altar principal con 6,4 m de ancho en lugar de 7,5 m, que se cerrará con una corona de bóvedas a diferentes alturas (ver figura 4b).

En cuanto al alzado, Gaudí plasmó el trabajo de los últimos años en la realización de maquetas de conjun-

had access to all the documentation in Gaudí's studio after the architect's death .

The modulation in the upper apse is the same as in the main nave. Its 7,5-m high perimetric chapels[10] are skirted by a deambulatory with a roof consisting of concentric semi-crowns 30, 45 and 60 m high (see Figures 4b and 5). As in the lateral naves, vault geometry is based on hyperboloids [11]. This affords the apse formal and structural consistency with the rest of the temple, for it capitalizes on the experience gained with the construction of the vaults in the main body, although adapting their geometry and proportions.

Like the Renaissance architects, Gaudí sought the most complex solution, placing the tallest towers at the centre of the transept, where they would rest on only 16 columns (see Figure 6). To brace this assembly and ensure its stability, he devised a system to connect it to the towers on the Nativity and Passion Façades, as shown in Figure 1.

The apse interior is a huge hyperboloid, the largest of all these forms in the temple. Due to the slight incline on this structure, the capitals on the circular columns in the apse, at their abutment with the central dome, progressively increase in size from the part farthest to the part nearest the altar. An enormous paraboloid will connect the last hyperboloid in the transept to the hyperboloid over the altar, providing for a transverse view of the entire temple

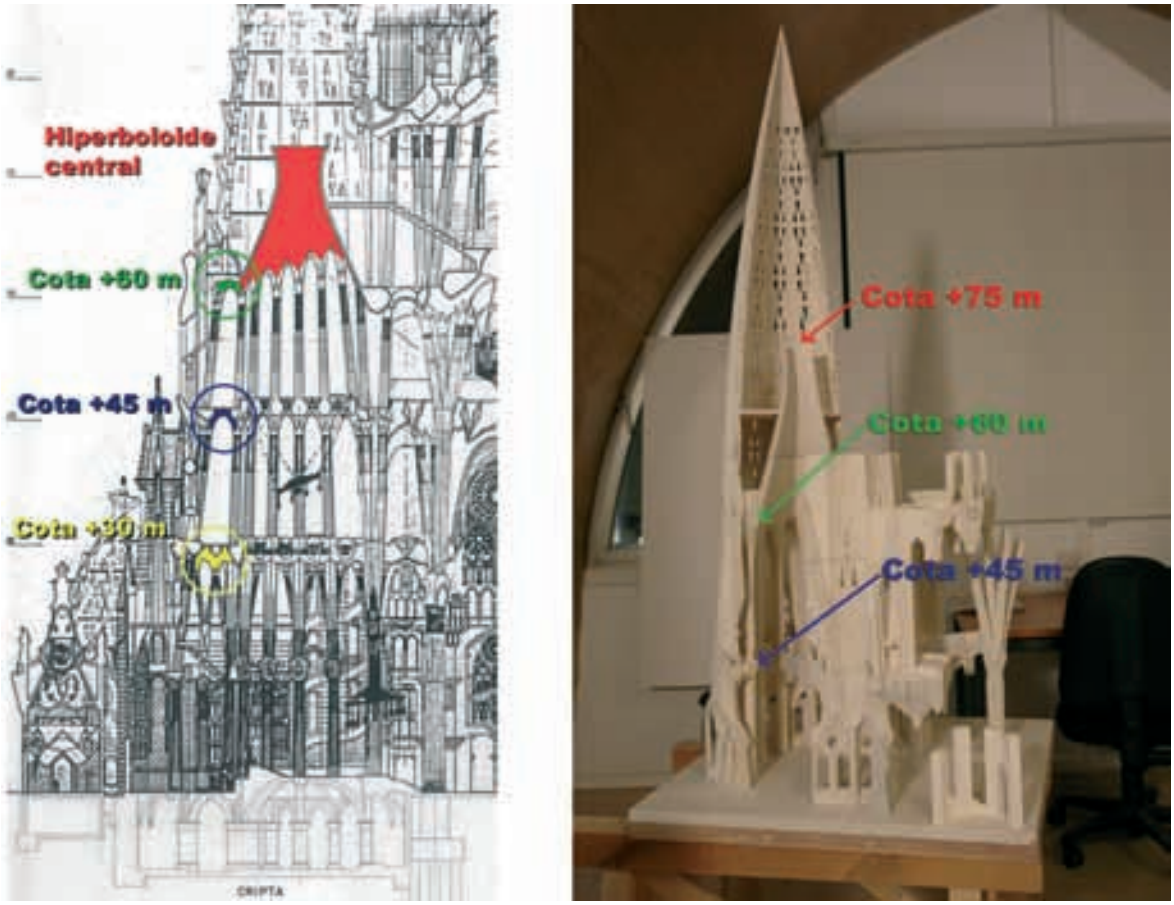


Figura 5. Alzado del ábside: a) bóvedas y b) maqueta de los pisos superiores y la torre. Fuente: ATESF
Figure 5. Elevation view of the apse. a) vaults and b) scale model of the upper storeys and the tower. Source: ATESF

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

to y de detalle, muy especialmente en las maquetas a escala 1/10 del cuerpo principal. En cambio, el interior del ábside en sección quedará reflejado en las secciones generales del Templo que Gaudí va publicando en los álbumes de la Sagrada Familia (1917, 1920, 1923, 1925). Estos elementos están dibujados sobre la solución interior parabólica, pero los conceptos formales y resistentes son generales y similares a la solución definitiva. Así lo afirma Puig-Boada cuando, después de la muerte de Gaudí y con toda la documentación de su taller, lo expone en la publicación "El Templo de la Sagrada Familia" (1929) [2].

La modulación en altura del ábside es la misma que en la nave principal. A partir de las capillas perimetrales que tienen una altura de 7,5 m [10], cuenta con un deambulatorio formado por semicoronas concéntricas a 30, 45 y 60 m de altura (ver figura 4b y 5). El aspecto de la geometría de las bóvedas es el mismo que el de las naves laterales a base de hiperboloides [11]. De esta forma, el ábside sigue una coherencia formal y estructural con el resto del Templo, dado que se ha construido a partir de la experiencia de la construcción de las bóvedas del cuerpo principal adaptando su geometría y proporciones.

Gaudí, como los arquitectos renacentistas, buscará la solución más compleja, la de situar las grandes torres en el centro del crucero. Para soportarlas dispone solamente de las 16 columnas del centro del crucero (ver figura 6). Ahora bien, para arriostrar ese conjunto y conseguir la estabilidad del mismo, plantea la conexión con los macizos de las torres de las fachadas del Nacimiento y de la Pasión, tal como se muestra en la figura 1a anteriormente presentada.

La cúpula interior del ábside es un gran hiperboloide, el mayor de todos, con una ligera inclinación que provoca que las columnas circulares del ábside formen en el encuentro con la cúpula central unos capiteles crecientes en dimensiones que desde la parte más alejada del altar aumentarán hasta la zona de crucero. Un gran paraboloide conectará el último hiperboloide del crucero con el hiperboloide del altar y permitirá la visión transversal de todo el templo tal como indicaba Gaudí en su sección original y se ha mostrado en la figura 1b.

4. ASPECTOS ESTRUCTURALES

4.1. Modelo general

Desde el punto de vista estructural las fachadas del ábside de la Sagrada Familia forman parte, tal como se ha dicho, del conjunto crucero-ábside. Este conjunto está compuesto por las cuatro torres de la fachada del Nacimiento, las cuatro torres de la fachada de la Pasión, el crucero (que soporta las cuatro torres de los Evangelistas y la torre central de Cristo, de unos 170 m de altura máxima) y el ábside del Templo.

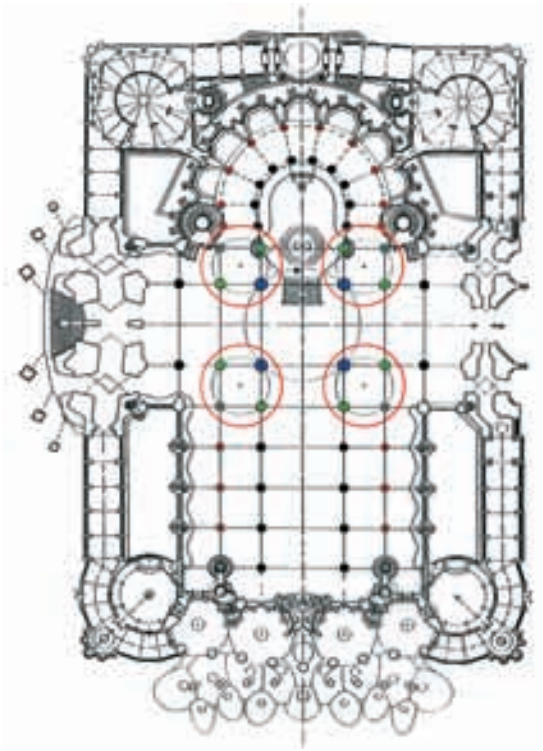


Figura 6. Planta de las columnas de la Sagrada Familia. Fuente: ATESF
Figure 6. Plan layout of columns in the Sagrada Familia. Source: ATESF

as foreseen by Gaudí in his original cross-section, shown in Figure 1b.

4. STRUCTURE

4.1. General model

Structurally speaking, the apse façades form part of the transept-apse system, as noted earlier. This system consists of the four Nativity Façade towers, the four Passion Façade towers, the transept (that bears the four evangelist and the 1709-m high central Christ tower) and the apse itself.

The structure was analyzed with a numerical model using ANSYS v10.0 finite analysis software. Except in a few very specific areas, SHELL 43 and BEAM 4 three-dimensional elements were used.

SHELL 43 is an element for modelling shells or plates (for paraboloid vaults, floor slabs or walls). The four sides of this three-dimensional shell are defined by four nodes, with two rotations and three displacements. The rotation represented by a vector perpendicular to the middle surface of the element was disregarded.

BEAM 4, an element used to model columns and beams, is a three dimensional bar defined by two nodes, one rotation (represented by a vector parallel to the bar centroid) and three displacements. The geometry of the model

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

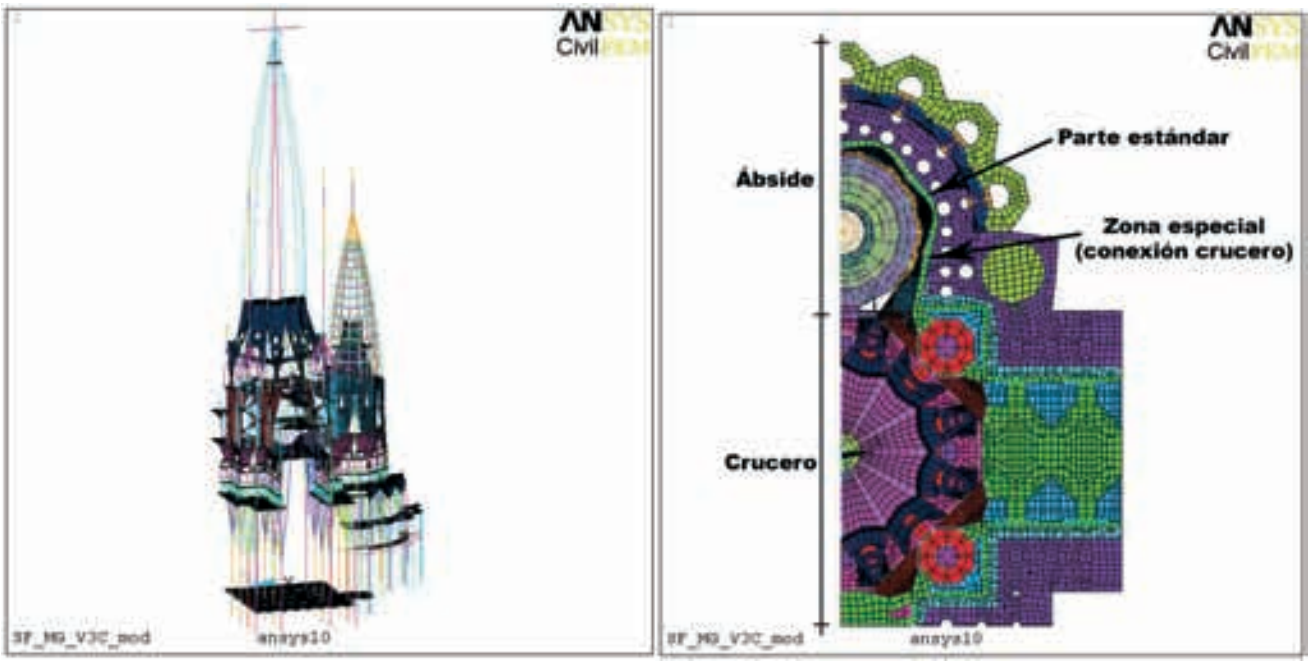


Figura 7. a) Geometría del modelo analizado y b) conjunto crucero-ábside
Figure 7. a) Geometry of the model analyzed and b) transept-apse system

La estructura se ha analizado a partir de un modelo numérico empleando el programa de cálculo de elementos finitos ANSYS v10.0, habiéndose utilizado, salvo en zonas muy concretas, los elementos en tres dimensiones SHELL 43 y BEAM 4.

El elemento SHELL 43 se emplea en la modelización de láminas o placas (ya sean bóvedas, forjados o muros en forma de paraboloides). Es una lámina en tres dimensiones de cuatro lados definidos por cuatro nodos, con dos giros y tres desplazamientos. No se considera el giro representado por un vector perpendicular a la superficie media del elemento.

El elemento BEAM 4 se emplea en la modelización de pilares y vigas. Es una barra en tres dimensiones definida por dos nodos con un giro, el representado por un vector paralelo a la directriz de la barra, y tres desplazamientos. En las figuras números 7a y 7b se puede ver la geometría del modelo analizado (SF_MG_V3C_mod.db).

Se trata de un cálculo no lineal, ya que se han considerado los efectos de segundo orden (pandeo), pero teniendo en cuenta un comportamiento elástico del material, con el módulo de elasticidad secante (E'). Posteriormente, para garantizar la seguridad del proceso, se comprueba, en las secciones críticas, que el producto E' I' (considerando sólo el acero y la sección comprimida del hormigón) es mayor que el producto E' I (considerando la sección bruta) utilizado. Este análisis tiene en cuenta, asimismo, las deformaciones debidas a los esfuerzos cortantes.

Para los elementos finitos BEAM 4 es válida la teoría general de la flexión y, por lo tanto, son aplicables las hipótesis de deformación plana de Claude-Louis Navier y Jacob Bernouille. En los elementos finitos SHELL 43 se considera la teoría de la flexión de

analyzed is illustrated in Figures 7a) and 7b) (SF_MG_V3C_mod.db).

The calculations involved were non-linear, for second order effects (buckling) were considered, but assuming elastic behaviour in the material, as per the stress-strain ratio (E'). To ensure process safety, a check was subsequently run to verify that in the critical sections, the product E' I' (considering only the steel and the compressed cross-section of the concrete) was greater than the product used, namely E' I (considering the gross cross-section). This analysis also included shear-induced deformation.

Since general bending theory is valid for BEAM 4 finite elements, Claude-Louis Navier's and Jacob Bernouille's planar deformation hypotheses could be applied. The Reissner-Mindlin bending theory used in the SHELL 43 elements was formulated for this element on the grounds of the following assumptions:

- *Plate displacements were perpendicular to the direction of its middle surface.*
- *The vectors perpendicular to the middle surface need not be perpendicular to the that surface after deformation.*

The following three load cases were considered in the structural engineering for the Sagrada Familia.

- *The first, covered the (permanent and live) vertical loads, to which a load factor of 1,8 was applied.*
- *The second included horizontal wind loads in addition to the permanent and live loads. Here the load factor was 0,9 x 1,8 = 1,62.*
- *The third case covered horizontal seismic action as well as the permanent and live loads in the first case. Here*

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

Reissner-Mindlin, que se formula, para este elemento, a partir de las hipótesis siguientes:

– Los desplazamientos de la placa se consideran en la dirección perpendicular a su superficie media.
– Los vectores perpendiculares a la superficie media no deben seguir siendo, necesariamente, perpendiculares a la superficie media una vez producida la deformación.

En el cálculo de la estructura del templo de la Sagrada Familia se han considerado las siguientes tres hipótesis:

– La primera hipótesis corresponde a las cargas verticales (cargas permanentes y sobrecargas) a las que se aplica un coeficiente de mayoración de cargas de 1,8.
– La segunda hipótesis considera, además de las cargas de la primera hipótesis, la acción horizontal del viento. En este caso el coeficiente de mayoración de cargas es igual a 0,9 x 1,8 = 1,62.
– La tercera hipótesis está compuesta por las cargas de la primera más las acciones horizontales sísmicas. El coeficiente de mayoración de cargas considera la acción sísmica sin mayorar y el resto de cargas afectado por 0,8 x 1,8 = 1,44.

La primera y la segunda hipótesis se han calculado, como ya se ha indicado, considerando los efectos de segundo orden –afectación del cambio de geometría y, en consecuencia, el pandeo-. En la tercera hipótesis se ha realizado previamente un cálculo espectral con el espectro de respuesta que especifica la norma NCSE-02 "Norma de construcción sismoresistente (parte general y edificación)". Este cálculo ha generado las acciones sísmicas que se han introducido en la tercera hipótesis, que se ha analizado de forma lineal, es decir, considerando sólo los efectos de primer orden, ya que el análisis modal y espectral sólo puede realizarse, mediante el programa ANSYS, en 1er orden. Los coeficientes de seguridad adoptados en el cálculo de la estructura del Templo de la Sagrada Familia corresponden a los prescritos en la instrucción EH-80 "Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado" y en la posterior revisión EH-91 en cuyo cuadro 31.3 se determina que el coeficiente de mayoración de las acciones, con control normal de los materiales y con daños previsibles tipo C (obras cuyo fallo pueden ocasionar pérdidas muy importantes), es de 1,80. Aunque instrucciones posteriores (EHE-98 y 08) permiten su reducción, se ha decidido mantenerlos por coherencia entre las partes de la estructura y dado el grado de incertidumbre en las zonas por construir que no están suficientemente precisadas.

Se ha realizado un modelo para cada una de estas 3 hipótesis ya que, al utilizarse un cálculo no lineal, en segundo orden, no es válido el principio de superposición.

the load factor accommodated seismic action without increasing the other loads: 0,8 x 1,8 = 1,44.

The first and second cases were calculated, as noted, taking second order effects, i.e., geometric changes and therefore buckling, into consideration. For the third load case, prior spectral calculation was conducted with the response spectrum specified in Spanish standard NCSE-02 on seismic-resistant construction to generate the seismic actions introduced. This case was analyzed linearly, i.e., considering first order effects only because these are the only effects accommodated by ANSYS software in modal and spectral analysis. The safety factors adopted in Sagrada Familia structural engineering were drawn from Spanish building code EH-80 on plain or reinforced concrete design and construction. In the revision published as EH-91 (in Table 31.3) the load factor stipulated for actions with standard materials control and type C damage (works where failure can occasion very substantial losses) is 1,80. While later codes (EHE-98 and 08) provide for reductions in this figure, it was maintained here for reasons of consistency with other parts of the structure

A separate model was developed for each of the three cases, as required in non-linear, second order calculations.

Some of the temple members could not be analyzed with the BEAM 4 and SHELL 43 elements mentioned above, for the distance spanned by plates or beams between supports, divided by their depth, is less than 2. These members, which do not conform to general bending theory, fall under the "D" regions defined in Spanish concrete code EHE-08 (Article 24, D Regions) [12]. They can be analyzed with strut and tie models, suitable for large depth structures. The calculations conducted were applied to specific models developed for each member, in which the forces and creep obtained as results of the general model described above were also applied.

4.2. Specific aspects of structural members

The following discussion addresses specific aspects of the apse façade from elevation + 45,00 to + 64,00 m, the vaults located between elevations + 60,00 and + 64,00 m and the central hyperboloid over the apse that springs from an inclined plane over the apse at + 60,00 to + 64,00 m and rises to + 77 m (see Figure 8).

The apse façade is located between elevations + 45,00 and + 60,00 m. Practically vertical, it consists of a reinforced concrete wall that varies in thickness from a minimum of 25 cm to a maximum of about 30 cm. The siding on the outside façade is 10-cm thick stone cladding, while the interior finish is fair-faced concrete.

The standard part of this façade forms a circular arc, which rotates in the special area to connect into the transept façade centroids. Strengthening ribs, which were analyzed as if they were bars embedded in the wall, are

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

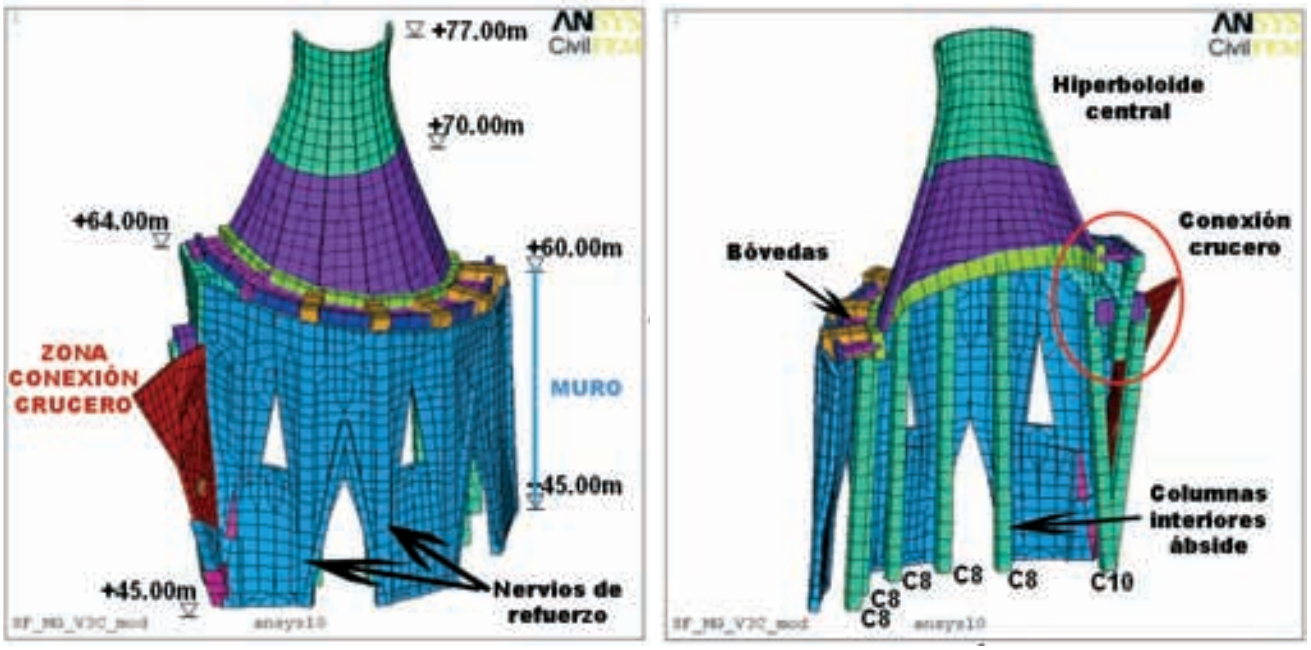


Figura 8. Vista del hiperboloide central del ábside y muro de apoyo (media sección): a) exterior y b) interior
Figure 8. View of the central hyperboloid over the apse and supporting wall (half cross-section): a) exterior and b) interior

En la estructura del Templo hay elementos que no pueden ser analizados mediante los elementos finitos indicados anteriormente (BEAM 4 y SHELL 43), ya que la luz entre soportes, de las vigas o de las placas, dividida por el canto, es inferior a 2. Se trata, pues, de elementos que no cumplen la teoría general de flexión, las regiones D definidas en la instrucción EHE-08 (artículo 24, Regiones D) [12]. El análisis de estos elementos puede realizarse por medio de modelos de bielas y tirantes, como corresponde a estructuras de gran canto. Estos cálculos se han aplicado a modelos concretos para cada uno de ellos, en los que se han aplicado las fuerzas y los corrimientos obtenidos en el modelo general anteriormente descrito.

4.2. Aspectos concretos de los elementos estructurales

En lo que sigue se reflejan los aspectos concretos que componen la fachada del ábside de la cota + 45,00 a la + 64,00 m, las bóvedas situadas entre las cotas + 60,00 y + 64,00 m y el hiperboloide central del ábside, que arranca de un plano inclinado de las cotas + 60,00 a + 64,00 m y llega hasta la cota + 77 m (ver figura 8).

La estructura de la fachada del ábside está situada entre las cotas + 45,00 y + 60,00 m. Está compuesta por un muro de hormigón armado de espesor variable, con un mínimo de 25 cm y un promedio de unos 30 cm, y es prácticamente vertical. El exterior de esta fachada estará recubierto por un paramento de piedra de unos 10 cm de espesor y el acabado interior será de hormigón visto.

La parte estándar de esta fachada forma un sector circular en planta mientras que la zona especial gira

distributed evenly along the façade at each geometric inflection in the plan layout. The triangular window openings are positioned in-between these ribs.

This system of walls and ribs, along with the columns inside the apse, carries the vertical load from the apse tower to the members at lower elevations. Figure 9 contains a digitized image of the apse façade between elevations + 45,00 and + 64,00 m.

The vault structure between elevations + 60,00 and + 64,00 m is a closed perimetric interior ring over the apse of the façade, as Figure 10a) shows. As the springing height of this set of vaults rises as it nears the transept, the ring forms a ramp with a maximum difference in elevation of around 4 m.

The ring structure consists of a 30-cm thick slab bound by two perimetric suspended beams, one on the in-and the other on the outside, along with one likewise suspended transverse beam over each interior column in the apse. In the standard part of the vaults, these transverse beams have a constant cross-section and rest on the eight-arris interior columns (C8) as well as the façade ribs.

In the special area close to the transept, by contrast, these transverse beams grow into a series of triangular gussets embedded in a huge arch beam that joins the apse to the transept. This arch is embedded in the apse façade wall and rests on a large suspended beam that joins the branches in the ten-arris column (C10). The connection between the transept and the apse rotates on this column, as depicted in the detail of the area around the arch, including the triangular gussets and the suspended beam, shown in Figure 10b).

All the columns in the temple, including the 8- and 10-arris columns and their branches in the transept and apse

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

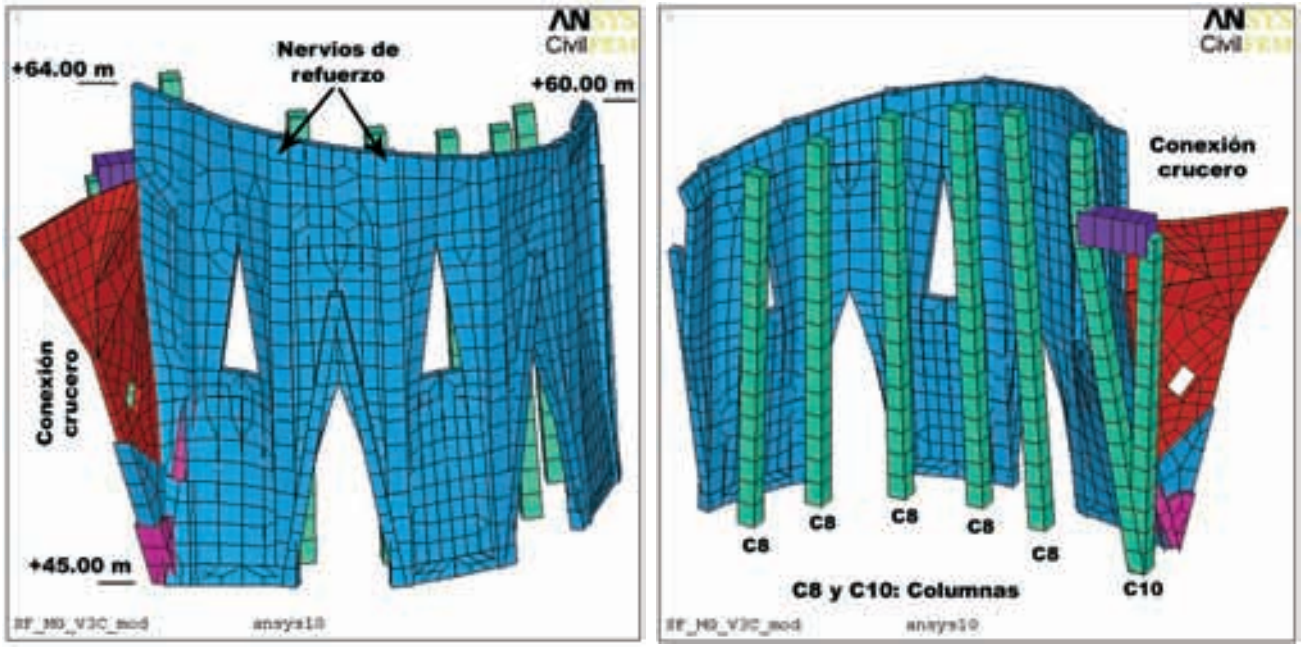


Figura 9. Muro y columnas del ábside (media sección): a) vista exterior y b) vista interior
Figure 9. Apse wall and columns (half cross-section): a) exterior and b) interior

para buscar las directrices de la fachada del transepto. Repartidos homogéneamente y situados en cada inflexión geométrica en planta, aparecen unos nervios de refuerzo que se analizan como barras embebidas en el muro. Entre estos nervios se sitúan las aperturas triangulares de los ventanales.

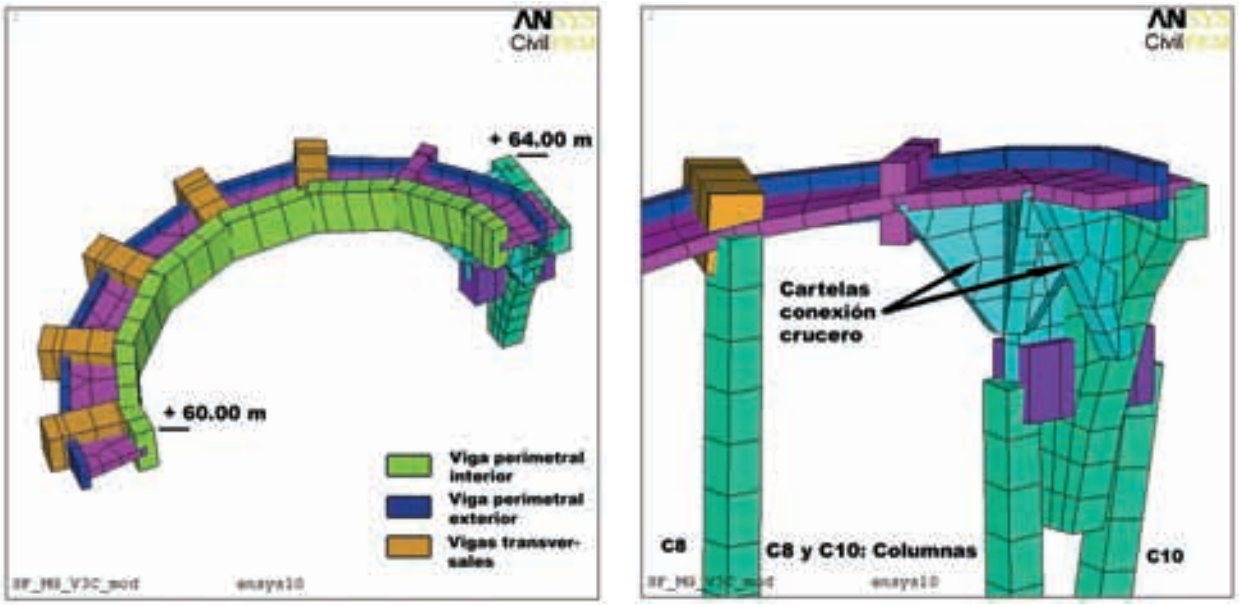
Todo este conjunto de muros y nervios, junto con las columnas interiores del ábside, son los encargados de transmitir la carga vertical de la torre del ábside hacia los elementos de las cotas inferiores, tal como puede verse en la figura 9, correspondiente a la fachada del ábside entre las cotas + 45,00 m y + 64,00 m.

La estructura de las bóvedas situadas entre las cotas + 60,00 y + 64,00 m es un anillo cerrado y perimetral

were generated with the same "double rotation" mechanism [13]. With this mechanism, illustrated in Figure 11,two helicoid surfaces rise from the same star-shaped polygon that forms the base, rotating in opposite directions. When these two helicoids intersect, they generate new arris whose number grows to ultimately form a circle.

This mechanism enabled Gaudí to build the movement described into the columns without forfeiting a good structural cross-section - bearing capacity ratio. At the same time, he attained formal continuity between the arris and surfaces of columns and branches..

The base for the 8-arris column, then, consists of two squares rotated at 45º angles and for the 10-arris column



Figuras 10. Bóvedas entre la cota 60 m y la 64 m: a) anillo de atado (media sección) y b) detalle de la transmisión a las columnas
Figure 10. Vaults between elevation 60 and 64 m: a) tie ring (half cross-section) and b) detail of load transmission to the columns

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

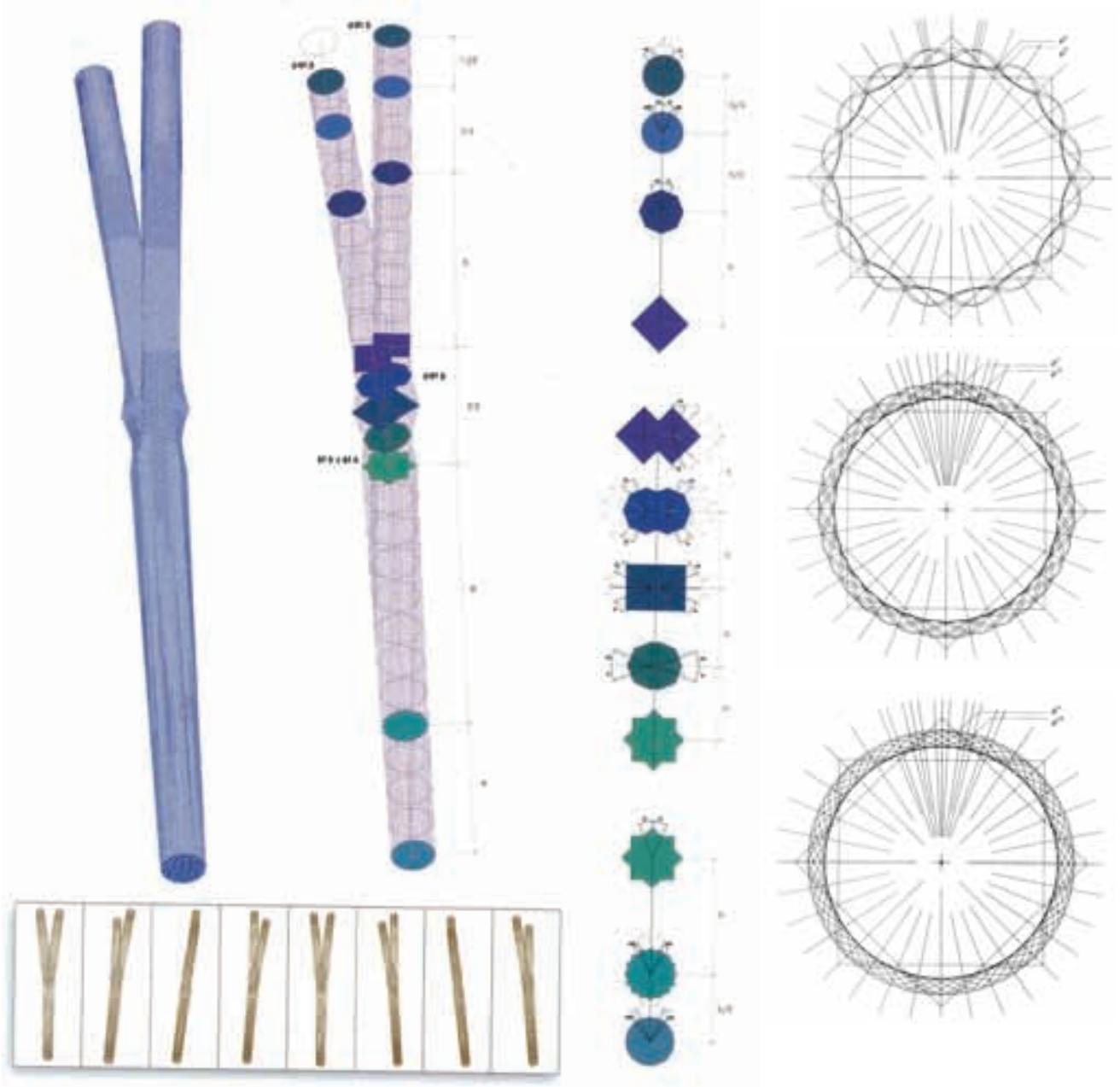


Figura 11. Mecanismo de generación de las columnas del templo, concretamente de la columna de 8 aristas, y de su bifurcación
Figure 11. Mechanism for generating temple columns, specifically the 8-arris column, and its separation into branches

en el contorno interior sobre la fachada del ábside, tal como puede verse en la figura 10a. Todo este conjunto de bóvedas gana altura a medida que se acerca a la zona del crucero, hecho que comporta que el anillo forme una rampa con un desnivel máximo de unos 4 m.

La estructura de este anillo es una losa de 30 cm de espesor limitada por dos vigas de canto perimetrales –una en el interior y otra en el exterior- y hay otra viga transversal, también de canto, en cada pilar interior del ábside. En la zona estándar de las bóvedas, estas vigas transversales son de sección constante y están soportadas por las columnas interiores de ocho aristas (C8) y por los nervios de la fachada.

En cambio, en la zona especial próxima al crucero, estas vigas transversales se transforman en un conjun-

of two pentagons rotated at 36º angles. The height and minimum diameter, and hence the slenderness ratio, of each column varies depending on its bearing capacity. The minimum diameter is the diameter of the final circle. All the columns in the Sagrada Familia, initially designed to be made of solid stone, are presently being built with reinforced concrete cores and a stone cladding used as permanent formwork. The stone, as Gaudí specified, varies with the bearing capacity of the column: the 8-arris columns are clad with granite, while the 10-arris members have a basalt finish.

The central hyperboloid inside the apse tower rises from + 60,00 to + 77,00 m. It springs from the inside beam on the vaults at elevation + 60,00 m (see Figure 12). Its axis is slightly inclined and its diameter measures 12 m at the base and 4,5 m at the neck, which is located at approximately + 75,00 m.

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

to de cartelas triangulares empotradas en una gran viga en forma de arco que cierra y une el ábside con el crucero. Este arco está empotrado en el muro de la fachada del ábside y soportado por una gran viga de canto que une las ramificaciones de la columna de diez aristas (C10) que articula el giro entre el transepto y el ábside, tal como puede verse en la figura 10b, en la que se muestra un detalle de la zona del arco con las cartelas triangulares y la viga de canto que une las ramificaciones de la columna C10.

Todas las columnas del templo y en concreto las del crucero y del ábside, las de 8 y 10 aristas y todas sus ramificaciones, tienen un mismo mecanismo de generación que puede denominarse de doble giro [13]. En la figura 11 se puede ver el mecanismo de generación de las columnas.

A partir de un mismo polígono estrellado como base, dos superficies helicoidales se elevan y giran en direcciones opuestas. La intersección de estos dos helicoides de giro inverso provoca, cuando se cortan entre sí, nuevas aristas que se van multiplicando hasta llegar al círculo, en el límite.

Este mecanismo de generación le permitió a Gaudí dotar a las columnas del mencionado movimiento, sin renunciar a una muy buena relación entre sección estructural y capacidad resistente y conseguir, a su vez, una continuidad formal entre las aristas y las superficies de las diferentes columnas y sus ramificaciones.

Así la columna de 8 aristas tiene como base dos cuadrados girados 45º y la de 10 aristas dos pentágonos girados 36º. Cada una de estas columnas tiene una altura y un diámetro mínimo, y por lo tanto una esbeltez distinta en función de su capacidad resistente. Dicho diámetro corresponde al del círculo final. Todas las columnas de la Sagrada Familia, previstas inicialmente de piedra maciza, se construyen actualmente de hormigón armado en el centro y piedra alrededor como encofrado perdido. Dicha piedra, tal y como había previsto Gaudí, varía en función de la capacidad resistente de la columna, así la de 8 aristas es de granito mientras que la de 10 aristas es de basalto.

El hiperboloide central del interior de la torre del ábside está comprendido entre las cotas + 60,00 y + 77,00 m y empieza a partir de la viga interior de las bóvedas de la cota + 60,00 m (Ver figura 12). Su eje está ligeramente inclinado, tiene un diámetro de 12 m en la base y un collarín de unos 4,50 m de diámetro, situado en la cota + 75,00 m aproximadamente.

La estructura de este hiperboloide es una losa de 30 cm de espesor, entre las cotas + 60,00 m y + 70,00 m, y de 20 cm de espesor entre las cotas + 70,00 m y + 77,00 m. En el punto donde se produce el cambio

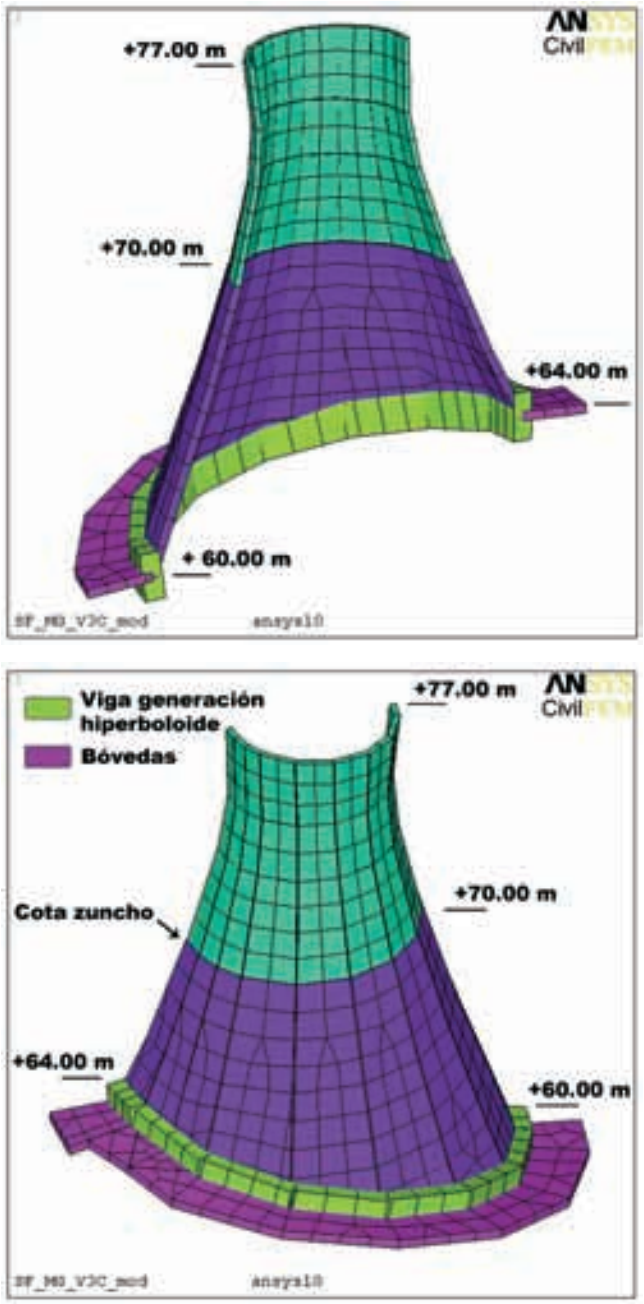


Figura 12. Vista del hiperboloide central del ábside (media sección): a) interior y b) exterior
Figure 12. View of the central hyperboloid over the apse (half cross-section): a) Interior and b) exterior

The slab constituting the hyperboloid is 30 cm thick from + 60,00 to + 70,00 m, and 20 cm thick from + 70,00 to + 77,00 m. The point where the cross-section changes is girdled by a reinforcing hoop which, in addition to accommodating the change in slab thickness, houses the anchors for the horizontal elements that brace the apse tower.

As the first closed circumferential member that bears the loads induced by the apse tower, the vault-hyperboloid system participates actively in containing the horizontal stress generated.

Due to the extreme stress to which the apse façade is subjected, high strength concrete had to be used in its

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

de sección se construye un zuncho que, aparte de asumir el cambio de espesor de la losa, es donde se anclan los elementos horizontales que arriostran la torre del ábside.

Todo el conjunto estructural bóvedas-hiperboloide central conforma el primer elemento circunferencial cerrado que soporta las cargas de la torre del ábside y, por lo tanto, participa activamente en la contención de los esfuerzos horizontales que se generan.

Debido al elevado estado tensional a que está sometida la estructura de la fachada del ábside ha sido necesario utilizar hormigón armado de altas prestaciones, con una resistencia característica a 28 días superior a 60 N/mm^2.

4.3. Resultados obtenidos en el análisis estructural realizado

En este apartado se describen los resultados del cálculo de esfuerzos a los que están sometidos los forjados y los muros de la zona analizada (fachada del ábside entre las cotas +45,00 y 64,00 m, las bóvedas situadas entre las cotas +60,00 y +64,00 m y el hiperboloide central del ábside) bajo la segunda hipótesis de carga (acciones verticales y viento). Es decir, la totalidad de la carga vertical y la acción del viento en la dirección crucero – ábside (-z). En general, la dirección X de los elementos verticales (muros) es horizontal y la dirección Y corresponde a la vertical. Las unidades de los resultados recogidos en las siguientes figuras están expresadas en el sistema internacional, es decir, en newtons y metros.

En las figuras 13a y 13b se puede ver el esfuerzo axil en las direcciones X e Y respectivamente (TX y TY). El mayor esfuerzo axil de compresión se produce en la

construction, with a 28-day characteristic strength of over 60 N/mm^2.

4.3. Structural analysis findings

This item describes the results of the calculations to find the stress to which the floor slabs and walls in the area analyzed (apse façade from + 45,00 to + 64,00 m; vaults between + 60,00 and + 64,00 m; and the central hyperboloid over the apse) are subjected under the second load case (vertical and wind action). In other words, it includes the entire vertical load and the wind action in the transept-apse direction (-z). As a rule, the X direction of vertical members (walls) is horizontal while the Y direction is vertical. The results shown in the following figures are expressed in Newtons and metres.

The axial stress in directions X and Y (TX and TY) are respectively depicted in Figures 13a) and 13b). The greatest axial compressive stress appeared in the area around the transept, with a maximum value of -0,927E7N/m (dark blue area at the lower left in Figure 13b), induced by the weight of the evangelist and Christ towers. The greatest axial tensile stress, by contrast, appeared around the two triangular windows closest to the transept (red area in Figure 13b). The maximum value was 0,327E7N/m.

Figures 14 and 15 respectively show the results for shear stress (TXY) and torsional moment (MXY) on the X-Y plane.

The greatest shear stress and torsional moments appeared in the area around the base of the apse façade closest to the transept, where the cross-section is smaller, with a maximum shear of 0,259E7N/m and a maximum torsion of 0,0462E7Nm/m. This is because the horizontal forces induced by wind action are transferred from the transept to the apse across this area, located on the lower right in both figures.

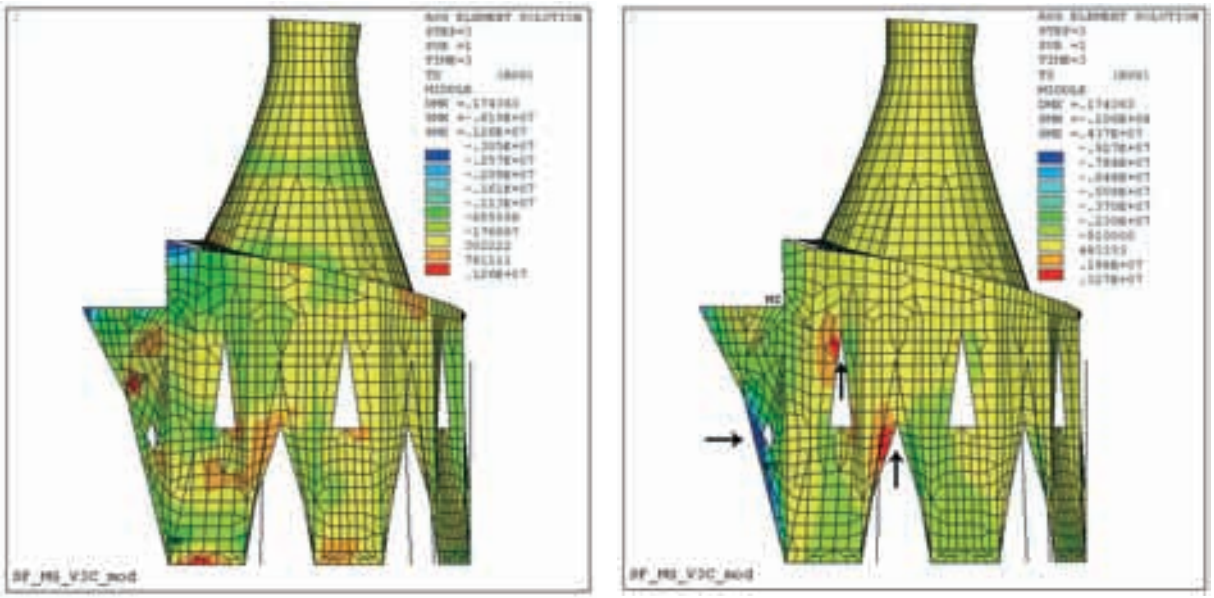


Figura 13. Esfuerzo axil en la dirección X (a) y en la dirección Y (b)
Figure 13. Axial forces in direction X (a) and Y (b)

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

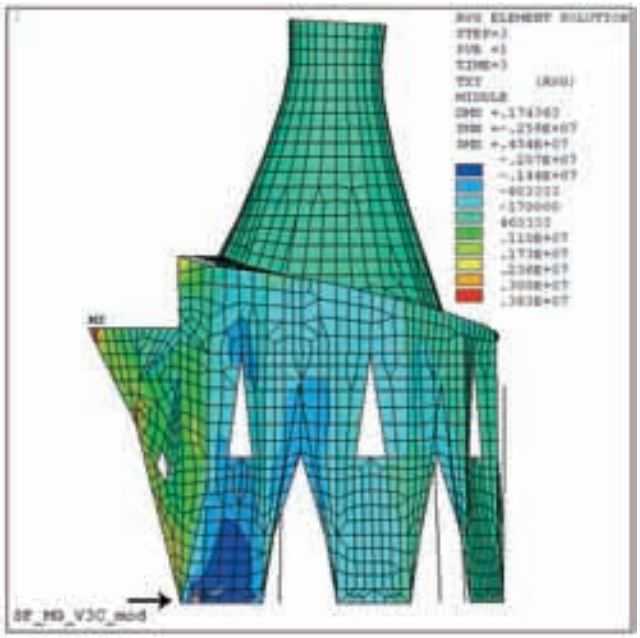


Figura 14. Esfuerzo rasante en el plano X-Y
Figure 14. Shear force in the X-Y plane

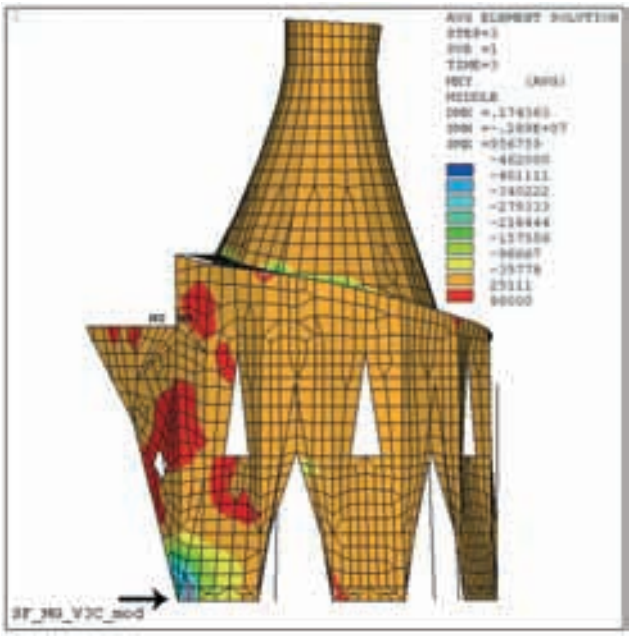


Figura 15. Momento torsor en el plano X-Y
Figure 15. Torsional moment in the X-Y plane

zona próxima al crucero, con unos valores máximos de -0,927E7N/m (de color azul oscuro en la zona inferior-izquierda de la figura 13b), y esto es debido al mayor peso de las torres de los Evangelistas y de la torre de Cristo. En cambio, los mayores esfuerzos axiales de tracción se producen alrededor de los dos ventanales triangulares más próximos al crucero (de color rojo en la figura 13b). Los valores máximos son de 0,327E7N/m.

En las figuras 14 y 15 se presentan, respectivamente, los resultados del esfuerzo rasante (TXY) y el momento torsor (MXY), esfuerzos en el plano X-Y.

Los mayores esfuerzos rasantes y momentos torsores se producen en la zona de la base de la fachada del ábside más próxima al crucero, donde la sección es menor, con un valor máximo del esfuerzo rasante de 0,259E7N/m y un valor máximo del momento torsor de 0,0462E7Nm/m. Esto es debido a que las fuerzas horizontales, producidas por la acción del viento, se transmiten del crucero al ábside a través de esta zona, situada en la parte inferior izquierda de ambas figuras.

En las figuras números 16a y 16b podemos ver los momentos flectores en las direcciones X e Y (MX y MY). La distribución de los momentos flectores, tanto en la dirección X como en la dirección Y, es más uniforme a lo largo de toda la fachada del ábside. Los mayores momentos se producen en las zonas con mayor curvatura, con valores de 24000 Nm/m en la dirección X y de 492000 Nm/m en la dirección Y.

En las figuras números 17a y 17b se pueden ver los esfuerzos cortantes en las direcciones X e Y (NX y NY) a que están sometidas las placas. Los mayores esfuerzos cortantes, tanto en la dirección X como en la dirección Y, se producen en las aristas de la fachada del ábside, con valores máximos de 0,611E7 N/m en la dirección X y de 0,436E7 N/m en la dirección Y.

Figures 16a) and 16b) show the bending moments in directions X and Y (MX and MY). The distribution of bending moments in both directions was found to be fairly uniform along the entire apse façade. The largest moments appeared in the areas with the greatest curvature, with values of 24000 Nm/m in the X and of 492000 Nm/m in the Y direction.

Figures 17a) and 17b) show the shear stress in directions X and Y (NX and NY) acting on the plates. The greatest shear appeared along the arris on the apse façade in directions X and Y both, with maximum values of 0,611E7 N/m in the X and 0,436E7 N/m in the Y direction.

These results can only be accurately interpreted against the backdrop of the most surprising characteristic of Gaudí's calculations, always characterized by their simplicity and a brilliant conception of structure from the standpoint of the stress network: the decision to disregard for the horizontal action affecting the structure.

Indeed, Gaudí calculated the temple structure with inverted funicular models that take account of gravitational loads only. He most certainly must have thought that all other actions would be of scant significance compared to the weight of a stone structure 170 m tall.

While the maximum compressive stress appeared in case 1 (gravitational loads), the other maximum stress values, primarily for bending moments, were found in cases 2 and 3, where horizontal action was taken into consideration.

Absorbing this stress not initially considered while strictly maintaining all the structural dimensions stemming from Gaudí's intensive work on temple modulation in the framework of the extraordinary geometric precision he developed when he set to work exclusively on the Sagrada Familia, has been the primary structural challenge in this

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

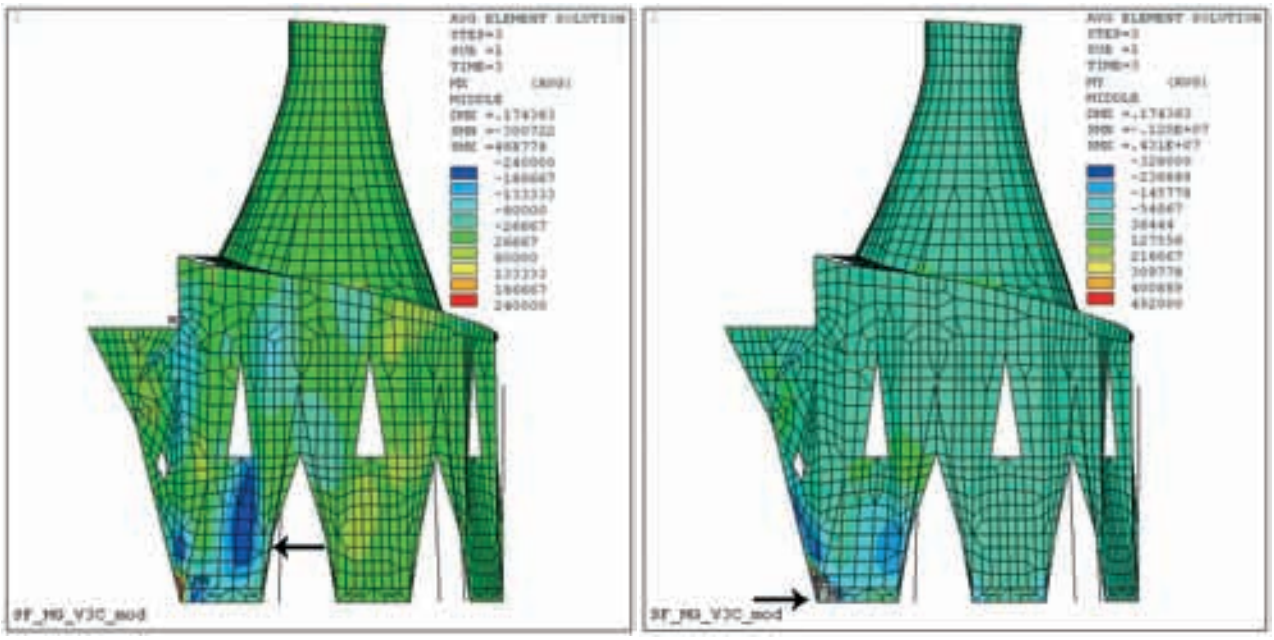


Figura 16. Momento flector en las direcciones X (a) e Y (b)
Figure 16. Bending moment in directions X (a) and Y (b)

Para interpretar este apartado de la forma más correcta es preciso tener en cuenta la característica más sorpresiva de los cálculos de Gaudí, siempre caracterizados por su sencillez y brillante concepción de la estructura en función del plexo tensorial: el olvido de las acciones horizontales que actúan en la estructura.

En efecto, Gaudí calcula la estructura del Templo con modelos antifuniculares que sólo tienen en cuenta las cargas gravitatorias. Consideraba, sin duda, que el resto de las acciones sería poco relevante frente al peso de una estructura pétrea de 170 m de altura.

Si bien es cierto que las máximas compresiones apare-

project. Its object, as a result of the author's personality, has become one of contemporary Barcelona's most prominent symbols.

5. MATERIALS

5.1. Characteristics required of concrete

Initiating the construction of a new part of the temple always raises new challenges that call for modernization not only of construction methods, but of the materials used. Enclosure of the apse was no exception.

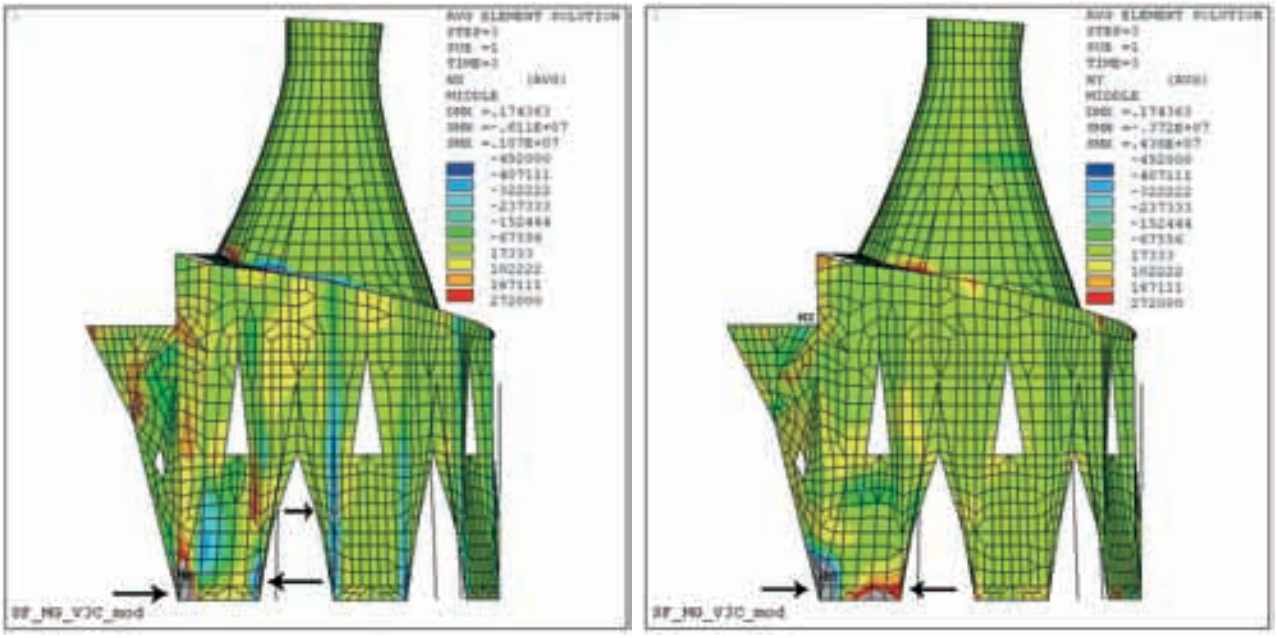


Figura 17. Esfuerzo cortante en las direcciones X (a) e Y (b)
Figure 17. Shear forces in directions X (a) and Y (b)

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

cen en la hipótesis 1 (cargas gravitatorias), los restantes esfuerzos máximos, principalmente los momentos flectores, corresponden a las hipótesis 2 y 3, cuando se tienen en cuenta las acciones horizontales.

Absorber estos esfuerzos no considerados inicialmente, manteniendo estrictamente todas las dimensiones estructurales previstas por Gaudí, obtenidas gracias a su enorme trabajo de modulación en el marco de una extraordinaria precisión geométrica que desarrolla cuando se recluye a trabajar exclusivamente en la Sagrada Familia, ha sido el gran reto del cálculo estructural en esta obra que es, gracias a la personalidad de Gaudí, uno de los símbolos señeros de la Barcelona actual.

5. MATERIALES

5.1. Características requeridas del hormigón

Al iniciar la construcción de una parte nueva del Templo aparecen nuevos retos que hacen necesaria la modernización de los métodos constructivos pero también los materiales. El caso del cierre del ábside no ha sido diferente.

En la Sagrada Familia se emplea principalmente piedra, cerámica y hormigón (ya sea en masa o armado) [14]. En el ábside están presentes todos estos materiales dado que son una continuación de los empleados en las naves principales y el crucero. Sin embargo, la geometría circular de las bóvedas y la necesidad de resistir el peso de la torre sobre el altar han condicionado los requisitos constructivos.

Desde el punto de vista de los materiales, las bóvedas ubicadas a 30 m de altura se han realizado en hormigón blanco. Por otro lado, parte del cierre a 30 y a 45 m se ha realizado con la técnica de la "volta catalana" a base de ladrillería. De forma similar, por encima de este nivel, los muros serán de hormigón armado con un recubrimiento de piedra en las ventanas y el hiperboloide central será de ladrillería.

En todos estos elementos se emplean diferentes tipos de hormigón según las necesidades de cada estructura. Como material de relleno en las partes más masivas se utiliza un hormigón en masa de 25 MPa de resistencia característica a 28 días, en los elementos sometidos a menores solicitaciones se emplea hormigón armado de 45 MPa y en las partes que deben soportar las mayores cargas se emplea, desde 1998, hormigón de alta resistencia (HAR) de 60 MPa (si se utiliza cemento gris) y de 80 MPa (si se utiliza cemento blanco) según sea visto o no [15]. Concretamente el núcleo resistente del ábside formado por columnas y bóvedas se ha realizado en HAR como ya se había empleado en el crucero [6]. A continuación se describen en detalle las características especiales del hormigón de la parte de obra en proceso de ejecución: los muros absidiales por encima de la cota 45.

The materials used in the Sagrada Familia are primarily stone, ceramics and (plain or reinforced) concrete. All these materials are present in the apse, which is a continuation of the main naves and transept. The circular geometry of the vaults, however, along with the need to bear the weight of the tower over the altar, conditioned the construction requirements.

The vaults positioned at 30 m off the ground were made with white concrete. On the one hand, part of the enclosure at 30 and 45 m was built using the brick-based "Catalonian" or timbrel vault method. The walls above that elevation will be made of reinforced concrete with stone cladding at the windows. Brick masonry will be used to build the central hyperboloid.

All these members call for different types of concrete depending on structural needs. The binder used in the most massive parts is plain concrete with a 28-day characteristic strength of 25 MPa. Forty five-MPa reinforced concrete is used in the members subjected to lower stress while since 1998 the parts that bear the greatest loads are constructed with 60-MPa (if grey) and 80-MPa (if white, for fair-face finishes) high strength concrete (HSC). More specifically, the bearing core in the apse, consisting of the columns and vaults, was built with the same HSC as used in the transept [6]. The special characteristics of the concrete used in the part of the works underway at this writing, namely the apse walls at elevations above 45 m, are described below.

As a result of the mechanical stress affecting the system explained in section 4 above, a very high compressive strength concrete was required in the apse walls (28-day fck of 60 MPa). Moreover, since this concrete will bear no other finish, only white concrete was acceptable. The walls, in turn, posed an additional difficulty: their 15-m height, dense reinforcement and vertical formwork rendered casting and particularly compaction very difficult, calling for highly workable concrete with good bonding properties.

When broaching the construction of this part of the works, the temple's Construction Board considered two approaches: using the same high strength concrete (HSC) as in other parts of the temple, or changing the mix proportions to produce self-compacting high strength concrete (SCC). A series of trials were run on the temple floor from February to June 2009 to provide grounds for opting for one or the other.

The trials to attain self-compacting concrete were designed based on two premises. Firstly, they had to be conducted under the actual worksite conditions (silo and other space constraints and so on). No laboratory tests were run for this reason and the concrete batches, with their varying proportions, were mixed at the temple's own concrete plant. Secondly, the new mix proportion was viewed as an optimization of the concretes used to date, for which reason the materials chosen were the ones available at the worksite.

While self-compacting concrete technology is fairly well known in the precasting industry in Spain, its use in situ

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

Tabla 1. Algunas de las dosificaciones estudiadas
Table 1. Examples of mix proportions studied

Dosificaciones (en Kg/m³) Mix proportions (in kg m³)	HAC 1 *SCC 1* (20/02/09)	HAC 2 SCC 2 (13/03/09)	HAC 3 *SCC 3* (26/06/09)	HAR *HSC* (06/07/09)
Grava calcárea (5-12 mm) *Calcareous gravel (5-12 mm)*	280	280	236	1100
Ojo de perdiz granítico (2-6 mm) *Granite pebbles (2-6 mm)*	420	—	—	—
Ojo de perdiz calcáreo (2-6 mm) *Calcareous pebbles (2-6 mm)*	—	410	321	—
Arena silícea (0-3 mm) *Siliceous sand (0-3 mm)*	1100	1100	1071	700
Cemento I 52,5 *Cement I 52,5*	475	475	475	475
Agua *Water*	180	144	209	150
Microsílice blanca (kg) *White microsilica (kg)*	25	25	25	30
Filler calizo *Limestone filler*	—	—	50	—
Superfluidificante GLENIUM 52 *GLENIUM 52 superplasticizer*	—	—	—	15
Fluidificante MELCRET PF 75 *MELCRET PF 75 plasticizer*	3,15	3,15	5	—
Fluidificante GLENIUM 303 SCC *GLENIUM 303 SCC plasticizer*	9	9	14	—
Humedad arena *Sand moisture*	3%	3%	4%	4%
Cono de Abrams (cm) *Slump test (cm)*	—	—	—	25-27
Extensión de flujo (cm) *Slump flow test (cm)*	> 60	48	65	—
f_{cmedia} a 28 días *28-day* f_{cmean}	56,84	64,95	60,3	65

Como consecuencia de lo explicado en el apartado 4, el hormigón empleado en los muros del ábside debe tener una resistencia a compresión alta (*fck* a 28 días de 60 MPa) debido a las solicitaciones mecánicas del conjunto; además, al ser visto, debe ser hormigón blanco. Por otro lado, el paramento vertical planteaba una nueva necesidad: los 15 m de altura, el fuerte armado y el encofrado vertical dificultaban las maniobras de puesta en obra y especialmente los trabajos de compactación, lo que hacía necesario una gran trabajabilidad presentando además una buena cohesión.

En el momento de abordar la ejecución de esta parte de la obra, desde la Junta Constructora de la Sagrada Familia, se plantearon dos posibilidades: utilizar el Hormigón de Alta Resistencia (HAR), ya empleado en el Templo, o ensayar una nueva dosificación con

is less so. Certain prominent precedents were at hand, such as Barcelona's "Ciudad de la Justicia" (courts of justice compound). Nonetheless, introduction of SCC in the Sagrada Familia constituted a challenge because 60-MPa SCC is not very common outside precasting plants.

5.2. Mix proportions studied

A number of trials were run to determine the optimal mix proportions for the conditions at hand. Table 1 contains a summary of the trials that proved to be relevant to subsequent decision-making. In the first trial, conducted on 20 February 2009, the mix was a variation on the HSC used until that date [16], in which the skeleton was modified and two admixtures were included: MELCRET PF-75 (BASF) as a multi-purpose admixture with superplasticizing proper-

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

Hormigón Autocompactante de Alta Resistencia (HAC). Para tomar la decisión se realizaron diferentes pruebas en la planta del Templo entre febrero y junio de 2009.

Las pruebas para conseguir el hormigón autocompactante se plantearon desde dos premisas diferentes. En primer lugar, debían realizarse en las condiciones reales de la posterior puesta en obra (limitación de disponibilidad de silos y espacio, etc.). Por este motivo no se han realizado ensayos de laboratorio y las diferentes dosificaciones se han amasado en la propia hormigonera del Templo. Por otro lado, la nueva dosificación se planteó como una optimización de los hormigones ya empleados y para ello se han seguido utilizando los mismos materiales disponibles en la obra.

Aunque el hormigón autocompactante es una tecnología ya bastante conocida en nuestro país, especialmente en el ámbito de la prefabricación, no lo es tanto en la construcción *in situ*. A pesar de que existen ejemplos notables, como el empleado en la Ciudad de la Justicia en Barcelona, su introducción en el Templo de la Sagrada Familia suponía un reto dado que un HAC de resistencia característica 60 MPa no es tan frecuente fuera de un entorno de empresas de prefabricación.

5.2. Dosificaciones estudiadas

En la búsqueda de la solución de dosificación, y con los condicionantes planteados, se han realizado diversas pruebas con diferentes dosificaciones. A modo de resumen sólo se presentan algunas de ellas en la tabla 1 por la significación que tienen en las decisiones posteriores. Para la primera prueba, realizada el 20 de febrero de 2009, se utilizó una variación de la dosificación empleada hasta entonces para los HAR [16] modificando el esqueleto y añadiéndole dos tipos de aditivo: MELCRET PF-75 (BASF) como aditivo polifuncional, que tiene propiedades superplastificantes en dosis elevadas, (como las propuestas) y GLENIUM 303 SCC (BASF) superplastificante y reductor de agua de alta actividad, capaz de evitar la segregación y compensar la demanda de agua. La modificación del esqueleto pretende, por un lado, tener en cuenta el sistema de puesta en obra (mediante cubilote y posterior vertido mediante trompa), buscando utilizar una mayor cantidad de áridos de menor tamaño [17] y, por otro lado, incorporar el tamaño 2-6 mm, usual en los hormigones convencionales que se usan en el Templo.

En esta 1ª prueba, aparte de las determinaciones usuales de control (resistencia a compresión) se preparó un molde en forma de caracol con armaduras, para ver cómo se distribuía el hormigón y el acabado del mismo, tal como se muestra en la figura 18. En ella puede verse que, en el momento de la colocación, la fluidez era buena sin presentar segregación y cubriendo todo el recorrido de forma satisfactoria aunque la amasada no era del todo uniforme presentando un aspecto más líquido al principio.

ties at high doses (such as proposed) and GLENIUM 303 SCC (BASF), a high-rate superplasticizer and water-reducing admixture able to prevent segregation and compensate for water demand. Given the placement system to be used (pouring concrete from a bucket into an elephant trunk), the skeleton was modified, on the one hand, with a view to using the largest possible proportion of small-size aggregate [17], and on the other to also include the 2-6-mm size commonly found in the conventional concrete used in the temple.

In this first trial, in addition to the standard control tests (compressive strength), a snail-like mould containing reinforcement was prepared to test the concrete for flow and finish, as shown in Figure 18. As the figure shows, when the concrete was cast it exhibited good flowability and no segregation, covering the entire path satisfactorily. The batch was not entirely uniform, however, for the first concrete poured first appeared to be more liquid.

The strength values obtained with this first trial were slightly lower than specified (see Table 1), while the finish showed porous imperfections in the upper part of the mould (see Figure 18d).

In light of these results, a series of modifications were introduced until the final mix proportions were defined. The findings are given in Table 1. One of the first measures, based on prior worksite experience, consisted of replacing the granite pebbles with calcareous material to raise strength. This involved changing the aggregate in the silo due to the shortage of storage space. Trials for the next mix proportion (Table 1, SCC 2) were run on 13 March 2009, after taking samples for the slump test (Spanish standard UNE 81.361) and to make specimens for subsequent compressive strength trials. While the strength results were better than with the previous mix proportions, this came at the expense of flowability, for the slump obtained was under 60 cm (see Figure 19).

Furthermore, certain flaws were detected in the 1-m^3 vertical axis concrete mixing plant that had been on site since 1998. As the paddles were badly worn, they failed to suitably mix the bottom of the drum, especially in high strength concrete, precisely the type of concrete whose manufacture must be most strictly controlled. For that reason, on the occasion of the SCC mix proportioning trials described here, the mixer was replaced with another, likewise with a vertical axis but in which the mix and mixing energy could be much more closely monitored (see Figure 20). The new mixer, a Mizar MC-1500 1,5-m^3 facility, was fitted with a rotating drum and eccentric paddles and especially designed for processes requiring heavy duty mixing and centrifuging to prevent segregation. This change also entailed replacing the IT weight control system, which in turn led to certain adjustments to the mixing process.

The third series of trials (run on 23 March 2009) with the new mixer sought to recover concrete flowability. Forty kg of limestone filler, supplied by PROMSA, were therefore added to enhance workability by increasing the fines in the batch to over 525 kg/m^3 .

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026



Figura 18. Estructura para la primera prueba del HAC realizada el 20 de febrero del 2009. Fuente propia
Figure 18. Mould for the first SCC test conducted on 20 February 2009. Source: authors

En cuanto a los resultados obtenidos, hay que señalar que desde el punto de vista resistente el valor alcanzado en esta primera prueba fue ligeramente inferior al especificado (ver tabla 1) y desde el punto de vista de acabados quedaban poros en la parte superior, tal como se observa en la figura 18d.

A la luz de esos resultados se realizaron diversas modificaciones hasta llegar a la dosificación final. Los resultados se recogen en la tabla 1. Una primera actuación, basada en la experiencia anterior de la obra, fue cambiar el árido medio (ojo de perdiz) granítico a calcáreo con el objetivo de aumentar la resistencia. Esta medida supuso cambiar el árido del silo ya que no existía tanta disponibilidad de almace-

An attempt was also made to adjust the granular skeleton by reducing the proportion of large and medium gravel and pebbles (2-6-mm) because the shape index in such types of aggregate is low. This has an adverse impact on mix workability. The results of these series were less than optimal, for the compressive strength values showed greater dispersion than usual. Although some of the specimens tested exhibited the expected flowability and strength results, further adjustment was deemed to be necessary. Other possible causes of the dispersion, such as the sampling system, were not ruled out, however.

Subsequent adjustments led to the proposal shown as SCC 3 in Table 1. The test findings showed that one of the main



Figura 19. Ensayos de extensión de flujo: a) 13/03/09 y b) 26/06/09. Fuente propia
Figure 19. Slump tests: a) 13/03/09 and b) 26/06/09. Source: authors

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

namiento. La siguiente dosificación (tabla 1, HAC 2) se probó el 13 de marzo de 2009 habiéndose tomado muestras para el ensayo de extensión de flujo (UNE 81.361) y para la determinación de la resistencia a compresión. Los resultados de la resistencia mejoraron con respecto a la dosificación anterior, si bien, se perdió algo en la fluidez, obteniéndose una extensión de flujo menor a 60 cm (ver figura 19).

Por otro lado, se detectaron ciertas deficiencias en la hormigonera de eje vertical de 1 m^3 existente en la planta desde 1998. Las palas sufrían un desgaste importante y se dejaba la parte inferior sin un adecuado amasado, especialmente cuando se trataba de hormigones de altas prestaciones, que son, por otro lado, en los que es necesario controlar al máximo el proceso de fabricación. Para ello, con motivo de las pruebas de dosificación de hormigones HAC aquí descritas, se procedió al cambio de la hormigonera, adoptándose una amasadora también de eje vertical pero que permite controlar mucho más la mezcla y la energía de amasado (ver figura 20). Se colocó una mezcladora de eje vertical marca Mizar modelo MC-1500 de 1,5 m^3 de capacidad con cuba giratoria y brazos excéntricos, especialmente indicada para procesos que necesiten grandes potencias de mezcla evitando disgregaciones y centrifugación de los diferentes materiales. Este cambio también trajo consigo la sustitución del sistema informático de control de pesadas lo que implicó cierto ajuste del proceso de amasado.

En la tercera tanda de pruebas (realizada el 23 de marzo de 2009), ya con la nueva hormigonera, se buscaba recuperar la fluidez de la amasada. Para ello se añadió al conjunto 40 kg de filler calizo proveniente de PROMSA con el objetivo de aumentar la cantidad de finos de la amasada por encima de los 525 kg/m^3 y así aportarle trabajabilidad al conjunto.

También se intentó ajustar el esqueleto granular de la dosificación reduciendo la cantidad de grava y ojo de perdiz (2-6 mm). Ello responde a que el coeficiente de forma del árido medio y grueso es bajo de manera que complica la trabajabilidad de la mezcla. En estas series los resultados no fueron los deseados ya que la resistencia a compresión presentaba una dispersión mayor a la usual y, aunque algunas de las probetas ensayadas sí dieron los resultados de fluidez y resistencia esperados, se consideró oportuno seguir profundizando en los ajustes, sin descartar otras posibles causas de estas dispersiones, tales como el sistema de la toma de muestras.

Los ajustes posteriores condujeron a la propuesta que aparece como dosificación 3 en la tabla 1. Los diferentes ensayos realizados mostraron que uno de los elementos principales a controlar era la cantidad de agua libre; la cantidad de finos de la mezcla hacía el resultado muy sensible a este componente. La excesiva humedad que en ocasiones presentaban las arenas (en alguna de las pruebas llegó a ser del 16 %) dificultaba el amasado al disponer de poca agua libre, lo que obligaba a tener que aportar más agua para lubricar, con la



Figura 20. Nueva central hormigonera ubicada dentro del recinto de la Sagrada Familia
Figure 20. New concrete mixing plant at the Sagrada Familia worksite

elements to be controlled was the amount of free water, for the large proportion of fines made the results particularly sensitive to this component. The excess moisture found in the sand on occasion (up to 16 % in some of the trials) hindered mixing due to the paucity of free water. This led to the addition of more water for lubrication, with the concomitant adverse effect on strength. The moisture in the fines therefore had to be controlled, improving the materials in such mixes by using dry sand. The important lesson learnt here was the importance of balanced process development, which involved not only improving equipment, but also monitoring the main parameters.

Finally, concrete was cast for the first section of wall from 6 to 10 July 2009, without SCC. In light of the scant confidence in the proportioning change proposed, the site management decided to use HSC. This decision was based, on the one hand, on the dispersion of strength results mentioned earlier, and on the other, on the SCC finish. Once hardened, the surface was uneven, especially after bush-hammering (see the photographs of a wall built with one of the trial batches in Figures 21a) and 21b). The excessive porosity made these concretes unsuitable for the fair-faced parts of the temple. Nonetheless, since the distance from the viewer would be many times greater than in the photo, these imperfections might be admissible in the final analysis.

The decision in any event was to use the same HSC as in previous work on the temple and facilitate casting with external compaction methods as well as internal vibrating. Some of the vibrators were forfeited during these operations, however, because of the tendency for the heads to get caught in the dense reinforcement lattice and break off.

As Table 1 shows, the HSC mix proportion had less coarse aggregate than the SCCs tested. Moreover, it contained GLENIUM 52 (BASF) as the superplasticizing admix-

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026



Figura 21. Pruebas de acabado: a y b) de HAC y c y d) HAR. Fuente propia
Figure 21. Finishing tests: a) and b) SCC finishing and c) and d) HSC finishing. Source: authors

consiguiente repercusión negativa en la resistencia. Para ello, era de gran importancia poder controlar la humedad aportada por los áridos finos, teniendo que mejorar los materiales de las últimas amasadas utilizando arena seca. Cabe reseñar como enseñanza la importancia que tiene un desarrollo equilibrado del proceso, debiéndose mejorar no sólo los equipos sino también el control de los parámetros principales.

Finalmente, entre el 6 y el 10 de julio de 2009, se hormigonó el primer tramo de muros sin utilizar HAC. La Dirección Facultativa tomó la decisión de utilizar finalmente la dosificación del HAR ante la falta de confianza en el cambio propuesto. Los motivos hay que buscarlos, por un lado, en la dispersión de resultados en cuanto a resistencia anteriormente comentada y, por otro lado, en el acabado del HAC. Una vez endurecido éste presentaba un aspecto poco uniforme, especialmente si se abujardaba, tal como puede verse en las figuras 21a y 21b, que se corresponden con un muro hormigonado con una de las dosificaciones de prueba. La porosidad excesiva de la superficie no lo hace óptimo para partes vistas del Templo. También es cierto que la distancia de observación será grande y evidentemente superior a la señalada en la foto, lo que podría permitir esa porosidad.

En cualquier caso, ante este conjunto de circunstancias, se tomó la decisión de emplear el HAR ya utilizado con anterioridad y acabar de facilitar la colocación con un compactado exterior de los encofrados y unos vibradores internos, aunque algunos de ellos se

ture, especially designed to obtain high strength and a high quality finish.

Nonetheless, a decision has been adopted to use HAC as an interior finish for the the central hyperboloid. Although the exterior is brick, in the months to come HAC with a characteristic strength of 35 MPa will be used on the inner face of this structure.

6. CONSTRUCTION PROCESS

6.1. Preliminary work

The apse is particularly representative of the evolution of the works on the temple since the cornerstone was laid in 1882. As noted earlier, Gaudí took over the project a year after work had begun, when the crypt located under the apse was already under construction (Figure 22a). While respecting the work done, Gaudí raised the height of the crypt to enhance its ventilation and illumination, proceeded to install naturalist adornments and modified the entrance to the crypt from inside the temple, replacing the central staircase with two circular stairways, one on each side.

Gaudí conceived and designed this immense structure as a whole but intended to build it outer vertical section by section, so that each generation would see part of the temple finished to its full height. With that in mind, after roofing the crypt (in 1892), he built the apse chapel walls in a neo-Gothic style with naturalist sculptures (from 1890 to 1896) (see Figure 22b) before starting the Nativity Façade.

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

perdieron en las operaciones, al arrancarse la cabeza de vibrado por quedarse enganchada en una estructura tan densamente armada como la que nos ocupa.

Como puede observase en la tabla 1, la dosificación del HAR contiene mayor cantidad de árido grueso que las ensayadas para el HAC. Por otro lado, utiliza como aditivo el superplastificante GLENIUM 52 (BASF) especialmente indicado para la obtención de altas resistencias y un acabado en superficie de calidad.

Por el contrario, se ha decidido utilizar HAC para el recubrimiento interior del hiperboloide central. Aunque el exterior es de ladrillería, en los próximos meses se empleará HAC de resistencia característica 35 MPa en la parte interior de esta estructura.

6. PROCESO CONSTRUCTIVO

6.1. Los trabajos previos

El ábside es un elemento muy representativo de la evolución de las obras del Templo desde la colocación de la primera piedra en 1882. Como ya se ha explicado, Gaudí se hizo cargo del proyecto un año más tarde del inicio de las obras, cuando la cripta situada bajo el ábside ya estaba empezada (figura 22a). Respetando lo construido, Gaudí aumenta la altura de la cripta para favorecer la ventilación y la iluminación de la misma, inicia una ornamentación naturalista y modifica la entrada a la cripta desde el interior del Templo por una escalera central para hacerlo por dos escaleras circulares laterales.

Gaudí piensa y diseña esta gran obra en su globalidad pero idea construirla por franjas verticales exteriores de manera que cada generación viera una parte en toda su altura construida. Con esta intención, después de cubierta la cripta (en 1892), construye los muros de la fachada de las capillas del ábside en un estilo neogótico con esculturas naturalistas (entre 1890 y 1895) (Ver figura 22b) antes de dedicarse a la Fachada del Nacimiento.

6.2. Los trabajos actuales

Muchos años más tarde, ya bajo la dirección del actual equipo técnico, se inició la construcción del interior del ábside. En 2002 [18] se iniciaron las columnas según los diámetros y la geometría estudiada por Gaudí y recogida años más tarde por varios de sus continuadores [1]. En 2007 se finalizaron las bóvedas del deambulatorio a 30 m de altura (cuya plataforma de construcción puede verse en la figura 23a), formadas por una corona de hiperboloides con un acabado de hormigón blanco. Para su realización se empleó la misma técnica que se utilizó en las bóvedas de las naves y el crucero. A pesar de ello, es necesario señalar que el esquema en semicírculo del ábside no permite la repetición de las formas y los encofrados [19].

Por encima de ese nivel se levantan los primeros ventanales. En la cota 45 se sitúa un triforio (galería



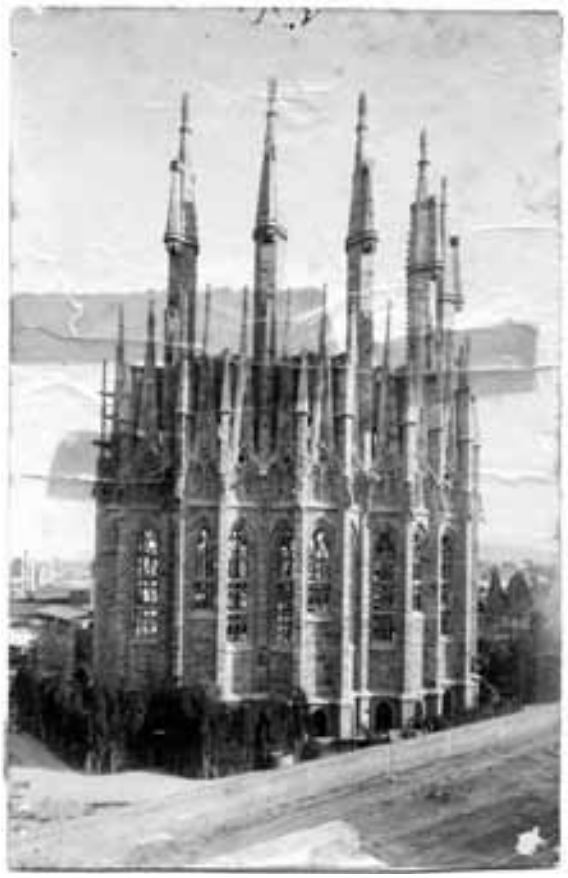


Figura 22. a) Cripta (1885) y b) Ábside (1893). Fuente: ATESF
Figure 22. a) Crypt (1885) and b) Apse (1893). Source: ATESF

6.2. Work today

Many years later, under the supervision of the present architectural and engineering team, construction was begun on the inside of the apse. The initial work on the columns began in 2002 [18], respecting the diameters and geometry studied by Gaudí and compiled years later by several of his successors [1]. The deambulatory vaults form a crown of white concrete hyperboloids 30 m high (the construction platform for which is shown in Figure 23a). Completed in 2007, they were built with the same technique as used to erect the vaults over the naves and transept. That notwithstanding, the semicircular layout of the apse ruled out the re-use of forms and formwork designs [19].

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

perimetral a las naves) de manera que sirva de unión para las columnas ramificadas dado que éstas se inician sobre el piso a 30 m y van hasta la cota + 60,00 m [20], tal como se ha visto en apartados anteriores.

En lo que sigue, se hace hincapié en la estructura por encima de los 45 m de altura actualmente en construcción, objeto del artículo, dado que se trata del elemento que más diferencia al ábside del resto de naves de Templo ya documentadas [6].

La estructura de cierre del ábside en la base de la torre está formada por un muro semicircular que va de la cota + 45,00 m a la + 60,00 m de 18,00 m de diámetro con 5 ventanas simétricas Como veremos más adelante, las paredes tanto interiores como exteriores estarán formadas por la intersección de planos triangulares y paraboloides con diferentes acabados (aplacados con baldosas coloreadas, abujardado, cañas). Sobre estos muros irá una corona de hiperboloides a 60 m de altura y el gran hiperboloide central de 18 m de diámetro a 75 m de altura (ver figura 23b).

6.2.1. Encofrado y armado

En la actualidad, uno de los mayores retos constructivos de la Sagrada Familia es la organización de la obra, ya que existe la necesidad de simultanear diferentes zonas de trabajo, a diferentes alturas, en condiciones de seguridad y a buen ritmo, en el contexto de un espacio reducido. Por ello, ya desde los inicios de la obra, fue habitual el empleo de elementos prefabricados [16], habiéndose acentuado en los últimos años, a medida que aumenta la complejidad.

En el caso de la estructura de los muros absidiales, aunque es una estructura de hormigón armado ejecutada *in situ*, se ha realizado el premontaje del encofrado y el armado. La preparación de los trabajos actuales empezó en el año 2006. Las dimensiones y la ubicación de la estructura de cierre de 15 m de altura hacen necesario un encofrado y armado costoso en tiempo y de difícil montaje. Dadas las dificultades de

The first row of windows are positioned above that height. A triforium (shallow perimetric passage around the naves) at elevation 45 serves as a connection between the branched columns that start at a height of 30 m and extend upward to 60 m [20], as described earlier.

The following discussion focuses on the object of this article, a structure presently under construction that begins at a height of 45 m, for this element distinguishes the apse from the rest of the temple naves, documented in the literature [6].

The structure that encloses the apse at the base of the tower consists of a semicircular wall 18,00 m in diameter that rises from elevation + 45,00 to + 60,00 m and has five symmetrical windows. As explained below, both the inside and outside walls will be formed by the intersection of differently finished (coloured tile, bush-hammered, fluted) triangular and paraboloid planes. A series of hyperboloids will crown these walls at a height of 60 m, topped by the huge central hyperboloid 18 m in diameter and 75 m high (see Figure 23b).

6.2.1. Formwork and reinforcement

Work organization is one of the major construction challenges in the Sagrada Familia today, for construction is underway simultaneously in different areas, at different heights, and must be conducted safely and at a steady pace, all within a limited area. For these reasons, the use of precast and prefabricated elements, which was standard





Figura 23. Construcción del ábside: a) primeros pisos y b) cimbra del hiperboloide central ya colocada
Figure 23. Apse construction: a) first storeys and b) hyperboloid formwork in place

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026



Figura 24. Diferentes tipos de encofrado utilizados en los muros del ábside. Fuente: ATESF
Figure 24. Formwork types used in the apse walls. Source: ATESF

su ejecución *in situ*, se decidió prefabricar el encofrado interior y el armado principal en un solar externo a la obra (Gaià, Barcelona). Más tarde se tuvo que dividir el semicírculo en 10 módulos, tal como puede verse en la figura 25, para hacer posible su transporte.

Teniendo en cuenta que los planos y paraboloides tienen diferentes acabados (figura 25) se hizo necesario un encofrado distinto para cada uno de ellos siguiendo la experiencia de los encofrados empleados en otras partes del Templo [15]. En este caso se distinguen los siguientes tipos de encofrado cuya ubicación puede observarse en la figura 24:

– Para los planos y partes del paraboloide menos curvadas del interior se utilizan planchas metálicas completamente lisas de 5 mm de espesor, reforzadas con tubos de 50*50 mm. Estas partes se cortaron con láser para garantizar las dimensiones y los acabados en punta.
– Para las partes más curvadas de los paraboloides, y por su semejanza con los cascos de los barcos, se utilizan tablones marinos de caña de madera de unos 2 mm de espesor colocados a tiras empastadas y pulidas para dar la forma deseada.
– Las partes que estarán cubiertas de cerámica se realizan con planchas metálicas pero retranqueadas 2 cm para poder encajar el aplacado exterior.
– Toda la parte exterior está hecha de planchas metálicas lisas, menos las zonas correspondientes al lado

practice from the very outset [16], has intensified in recent years, with rising organizational complexity.

Preparation for the present part of the works began in 2006. The apse walls are made of cast-in-place reinforced concrete but building the formwork and setting up the reinforcing steel for this 15-m high enclosure on site have been both time-consuming and troublesome. In light of these difficulties, the interior formwork was prefabricated and the main reinforcement was assembled at an off-site location (at Gaià in the province of Barcelona). The semicircular formwork was later transported to the worksite as 10 separate modules, as shown in Figure 25.

Since the straight and paraboloid sections have different finishes (Figure 25), a different type of formwork was needed for each. The optimal solutions were based on the experience acquired with the formwork used in other parts of the temple [15]. In the apse, the following types can be distinguished, positioned as shown in Figure 24:

– *For the planes and least curved parts of the interior paraboloid, completely smooth 5-mm sheet steel, reinforced with 50*50-mm tubes was used. These components were laser-cut to ensure the accuracy of dimensions and the pointed finishes for the windows.*
– *Given the similarity of the roundest parts of the paraboloid to ship hulls, 2-mm thick wooden marine planks*

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

opuesto del encofrado hecho con tablones marinos, donde las planchas adoptan el relieve en forma de costillas.

En primer lugar, se fabricó en taller cada uno de los elementos que constituyen el encofrado. Con poste-

were used, glued in strips and polished to attain the desired shape.

– *The parts that will be tiled were built with sheet steel with a 2-cm set-back to accommodate the tile.*

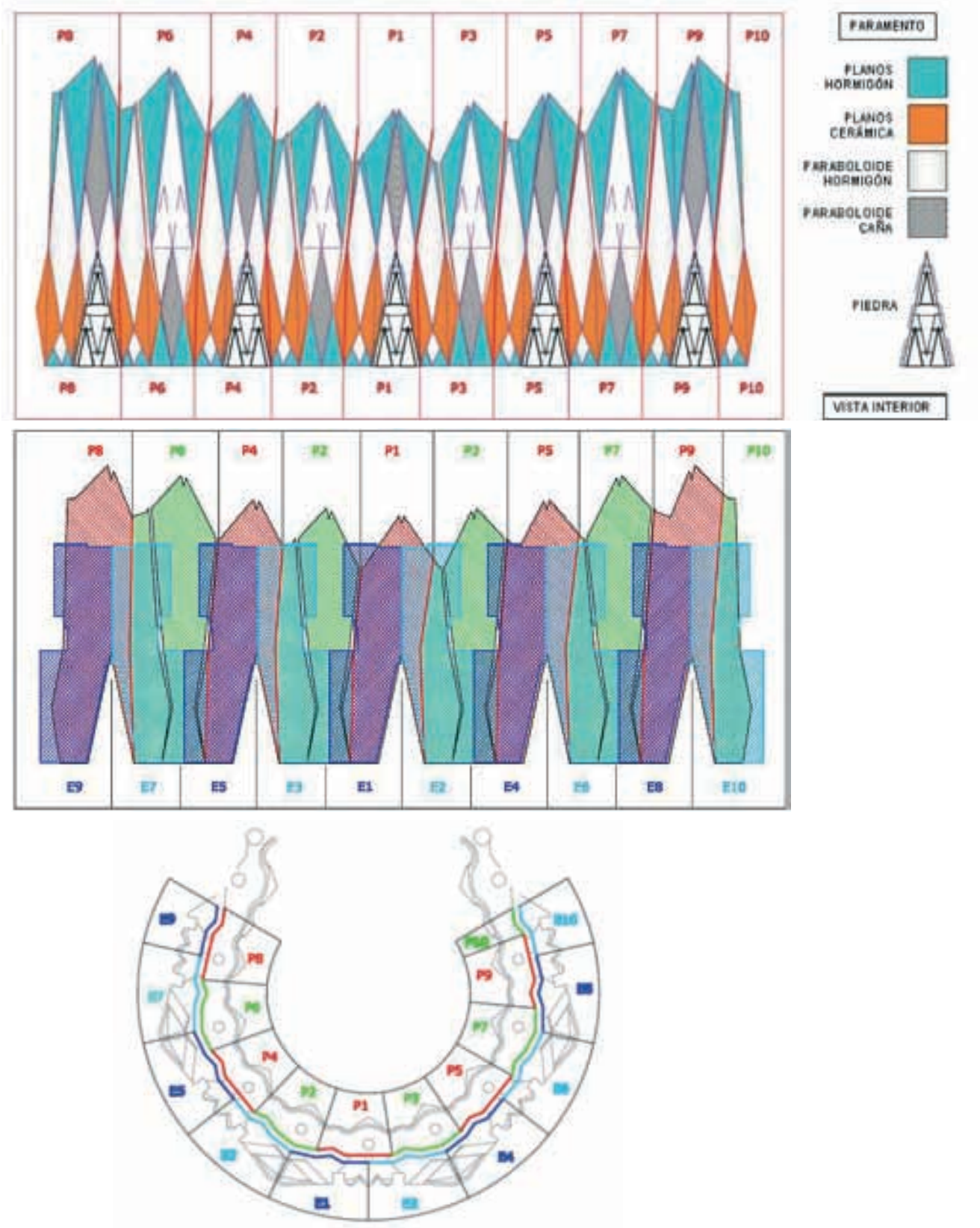


Figura 25. a) Alzado del encofrado interior, b) alzado del encofrado exterior e interior y c) planta de los encofrados. Fuente: ATESF
Figure 25. a) Elevation view of the interior formwork, b) elevation view of exterior and interior and c) plan view of the formwork. Source: ATESF

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026



Figura 26. a) Estructura auxiliar de soporte y b) colocación del armado de los muros del ábside. Fuente: ATESF
Figure 26. a) Ancillary support structure and b) placement of the reinforcement for the apse walls. Source: ATESF

rioridad, estos elementos se montaron en el citado solar todos juntos, siendo necesario preparar un andamio interior idéntico al que se ha colocado en la obra al que apuntalar cada una de las piezas (Figura 26a). Una vez ensamblado el conjunto, se cerraron las juntas con pasta y se dio en el interior una capa de imprimación con un desencofrante.

Tras el encofrado interior se colocó el armado. Como ya se ha comentado, estos muros representarán el arranque de la torre que coronará el ábside a 120 m de altura, lo que hace que sean elementos fuertemente armados. Las dimensiones del conjunto hacen necesario tomar precauciones en su montaje para evitar deformaciones y facilitar la futura colocación en obra. En primer lugar, se colocó el armado de los nervios de las vigas de la torre y de los frontones de las ventanas y, a partir de éstos, todas las mallas que se cruzarán con todas las vigas. En la figura 26b puede verse el montaje de esta estructura.

Sobre la cota + 60,00 m, el hiperboloide central tendrá condiciones diferentes. No se ejecutará en hormigón armado sino en mampostería siguiendo la técnica de la bóveda catalana. Para ello se requiere construir un encofrado a base de costillas de madera de 15 m de alto. Ya en obra se colocará una malla metálica sobre la que se apoyarán las diferentes capas de ladrillo que formarán la estructura.

La figura 27a presenta una vista digital de esa zona del ábside, mientras que la figura 27b muestra la parte superior del encofrado de los muros y la estructura de madera para el hiperboloide central ya colocadas.

En la actualidad, en el solar de Gaià se están finalizando los encofrados de la corona de hiperboloides que cubrirá el espacio entre el paramento y el hiperboloide central (a más de 60 m de altura), mientras que en la obra ya se ha empezado el hormigonado de los muros.

– *The entire outer wall is being built with smooth sheet steel, except the areas opposite the wooden marine plank formwork, where the sheets have a ribbed relief.*

Each of the formwork elements was first manufactured in the shop. All these elements were later assembled at the aforementioned off-site location. This called for scaffolding identical to the type used on the worksite for securing each formwork section (Figure 26a). Once the whole system was assembled, the joints were sealed and the interior was coated with a stripping agent.

With the formwork up, the reinforcement was set into position. As noted earlier, the 120-m tower that will crown the apse will spring from these walls which must, therefore, be densely reinforced. The dimensions of the system as a whole called for special precautions during assembly to prevent deformation and facilitate future placement on site. The reinforcement for the ribs in the tower beams and the window frontons were positioned first, followed by the mesh reinforcement for all the areas that will intersect with all the beams. Figure 28 illustrates the assembly of this structure.

The reinforcement for the hyperboloid that springs from elevation + 60,00 will be entirely different, because this structure will not be made of reinforced concrete, but of masonry using the Catalonian (or timbrel) vault technique. This system calls for wooden rib-like formwork 15 m high. The metallic screen on which the successive layers of brick will be laid will be positioned in situ.

A digital view of the apse area is depicted in Figure 27a), while Figure 27b) shows the upper wall formwork and the wood structure for the central hyperboloid.

The formwork for the series of hyperboloids that will roof the area between the wall and the central hyperboloid (at a height of over 60 m) is presently near completion at the

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

6.2.2. Transporte

Para la colocación en obra del encofrado del paramento del ábside fue necesario preparar el espacio en el Templo; sobre una plataforma de trabajo ubicada a la cota + 48,00 m se colocó un andamio idéntico al empleado durante el montaje del armado. Una vez finalizados estos trabajos, a mediados del año 2008, se procedió al transporte (mediante un transporte especial) de cada una de las piezas en las que se había dividido la estructura (ver figura 25), hasta el recinto del Templo. En la figura 28a puede verse parte de este proceso. Una vez allí se procedió a la colocación de estas piezas mediante las grúas del Templo (figura 28b) para proceder finalmente al hormigonado [21].

Aunque los trabajos de transporte especial y colocación fueron costosos y complicados, la ejecución *in situ*, sobre las plataformas de trabajo del Templo a 30, 45 y 50 m de altura, no ofrecía el espacio suficiente para trabajar eficientemente en condiciones de seguridad, sin hipotecar otras partes de la obra. El montaje de las grandes piezas transportadas era mucho más rápido por lo que finalmente se adoptó la solución descrita. Es necesario decir que la experiencia ha sido muy positiva y que en la actualidad otras partes de la obra también se están prefabricando de la misma manera.

6.2.3. Hormigonado

El hormigonado de la estructura del ábside, dadas las grandes dimensiones de la misma, se ha dividido en tres partes. En una primera parte, realizada en mayo

Gaia site, while the concrete is being cast in the walls at the actual worksite.

6.2.2. Transport

An appropriate area had to be prepared in the temple for the on-site assembly of the formwork for the apse walls. The solution found was to build scaffolding, identical to the structure used for off-site assembly, on a working platform positioned at a height of + 48,00 m. Once the platform and scaffolding were in place, in mid-2008 each of the parts into which the structure had been divided (see Figure 25) was transported to the site on special transport lorries. Part of this process is depicted in Figure 28a). Once on site, these parts were set in place with cranes (Figure 28b) and casting was begun [21].

Although special transport and on-site assembly were costly and complex, erection of the formwork at the temple on working platforms at 30, 45 and 50 m off the ground would not have provided sufficient space to work efficiently and safely without compromising other parts of the structure. As assembling large sections of formwork was a much speedier process, it was the option ultimately chosen. The experience proved to be so satisfactory that at this writing the formwork for other parts of the work is being similarly prefabricated.

6.2.3. Concrete placement

In view oaf the dimensions involved, the concrete for the apse structure was divided into three phases. In the first,

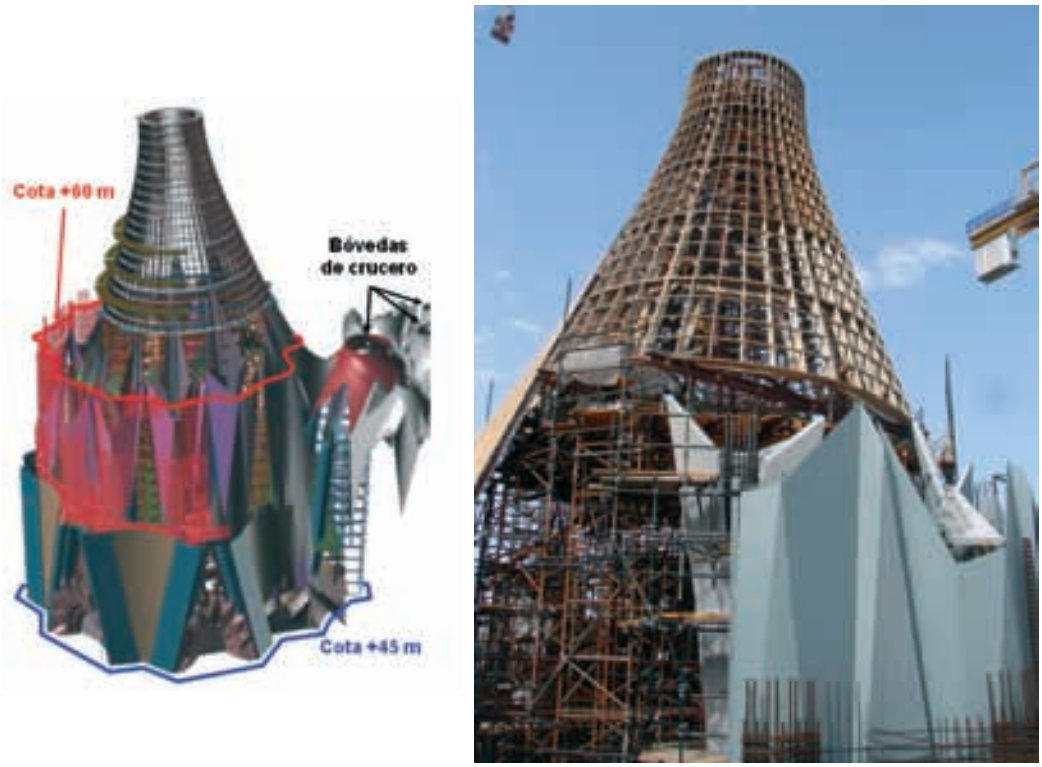


Figura 27. a) Imagen digital del ábside entre la cota 60 y la 75 y b) estado del ábside (mayo 2009). Fuente ATESF
Figure 27. a) Digital image of the apse from elevation 60 to 75 and b) apse in May 2009. Source: ATESF

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026



Figura 28. Armado y encofrado: a) transporte y b) colocación. Fuente ATESF
Figure 28. Reinforcement and formwork: a) transport and b) placement. Source: ATESF

de 2009, se hormigonó la base de los muros que los unía con las bóvedas de la cota + 45,00 m pudiéndose verter la masa directamente del cubilote. Esta parte sirvió para probar las innovaciones en los hormigones.

En la figura 29a puede verse el armado correspondiente a esta zona mientras que en la figura 29b se observa la armadura del paramento justo antes de cerrar con el encofrado exterior. En ambos casos puede observarse la elevada cuantía de armadura, lo que repercute en el hormigón a emplear, tanto en lo que se refiere al tamaño máximo del árido como con relación a precisar una alta trabajabilidad del mismo.

En la segunda etapa, realizada en los primeros días de julio de 2009, se inició el hormigonado de la primera parte de los muros hasta la cota superior de las ventanas inferiores (ver armado en la figura 29b).

carried out in May 2009, the base of the walls was cast, joining them to the vaults at + 45,00 m. Here the concrete was poured directly from a bucket. This part of the structure served as a trial for the innovations introduced in the concrete.

The reinforcement for this area is shown in Figure 29a), while the photograph in Figure 29b) shows the reinforcement for the wall immediately prior to placement of the outer formwork. Note in both the very high reinforcement ratio, which conditioned the maximum aggregate size used in the concrete and called for very high workability.

In the second stage, performed in early July 2009, concrete placement began in the first part of the walls up to the upper elevation of the lower row of windows (see reinforce-



Figura 29. Ábside: a) armado de la base y b) armado del paramento
Figure 29. Concrete placement in apse: a) base and b) wall reinforcement

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

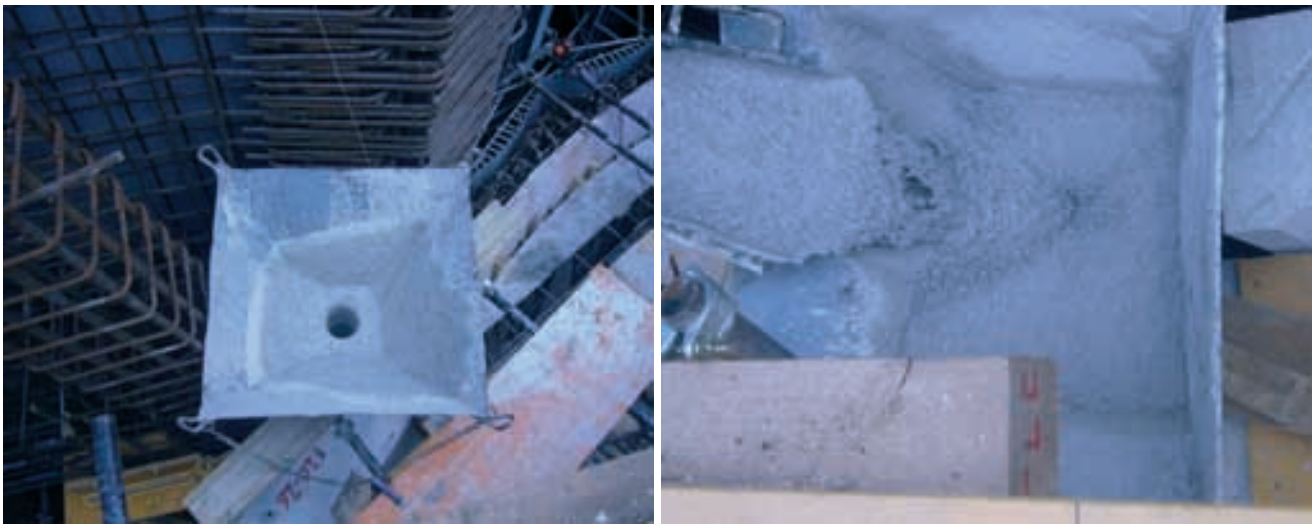


Figura 30. Hormigonado de los muros (a y b). Fuente ATESF
Figure 30. a) and b). Placement of concrete in walls. Source: ATESF

En esta ocasión, la estructura semicircular se dividió en 4 módulos que se hormigonaron en dos tandas diferentes. Dado que esos días amenazaban lluvias, se protegieron las zonas pendientes de hormigonar con unos plásticos a fin de evitar la entrada de agua.

Durante dos días se emplearon dos trompas para el hormigonado de dos módulos consecutivos alternando el llenado entre ellos. En la figura 30a puede verse el hormigonado de esta zona de la estructura, empleando para ello un receptor tronco piramidal con una trompa distribuidora. El hormigón empleado puede verse en la figura 30b.

Como tercera etapa está previsto hormigonar el nivel superior de los muros, desde las ventanas hasta la cota +64,00 m en su nivel más elevado, con el objetivo de unirlos a la corona de hiperboloides de menor tamaño ubicada en el nivel +60,00 m. Como hemos comentado, están acabando los trabajos de fabricación de los encofrados de estos pequeños hiperboloides. Una vez estén todos colocados en obra, se procederá al hormigonado conjunto con el objetivo de darle continuidad a la estructura siguiendo la misma técnica que en el nivel inferior.

Una vez finalizada esta estructura las obras seguirán avanzando con la preparación del collarín que cerrará el espacio entre los muros exteriores y el hiperboloide inclinado central del ábside que se realizará en ladrillería. En la actualidad, las costillas de madera que servirán de apoyo para el encofrado exterior sobre los que apoyará la primera capa de ladrillos ya se han colocado. En la figura 31 puede verse el aspecto general del Templo en marzo de 2009 donde se distingue el encofrado de los muros absidiales y del hiperboloide central.

7. CONCLUSIONES

En la construcción de la Sagrada Familia, el cierre de las bóvedas del ábside ha representado un reto tecnológico de la misma envergadura que la construcción de las naves principales en los años noventa.

ment in Figure 29b). Here, the semicircular structure was divided into four modules, with pouring taking place in two series. The areas where concrete had yet to be poured were covered with plastic to keep them dry in the event of possible rainfall.

Concrete was placed in the two modules with elephant trunks over a two-day period, consecutively alternating placement in each module. The elephant trunk and pyramid-shaped hopper used are depicted in Figure 30a). The concrete itself is shown in Figure 30b).

The upper part of the walls, from the windows up to the top at 64 m, will be cast in the third stage and joined to the crown of smaller hyperboloids whose base is at a elevation + 60,00. As noted, prefabrication of the formwork for these smaller hyperboloids is presently nearing completion. Once the forms have been assembled on site, the hyperboloids will be cast jointly to ensure structural continuity, following the same technique as in the walls.

When all three phases are completed, work will continue to build the neck that closes the space between the outer walls and the slanted central hyperboloid over the apse. As noted, this structure which will be made of brick. The wooden ribs that constitute the outer formwork on which the first course of bricks will be laid are now in place. The formwork for the apse walls and central hyperboloid are clearly visible in the photograph of the temple as it stood in March 2009.

7. CONCLUSIONS

Enclosing the Sagrada Familia apse constituted a technological challenge of the same order as the construction of the main naves in the nineteen nineties.

The response called for advanced engineering methods, modernization of the temple's machinery with the acqui-

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

lógico de la misma manera que en los años 90 lo fueron la construcción de las naves del cuerpo principal.

Para dar respuesta a ese reto ha sido necesario utilizar métodos avanzados de cálculo, modernizar la maquinaria del Templo con una hormigonera de última generación, avanzar en la investigación de los materiales a emplear, sondeando la viabilidad de emplear un HAC in situ de 60 MPa, y mejorar los procesos constructivos a emplear.

Cabe recordar que, gracias a la investigación sobre la geometría y las proporciones que rigen los elementos ya construidos, las partes que quedan por construir tendrán una coherencia formal y estructural con el conjunto.

Agradecimientos

Nos gustaría mostrar nuestro agradecimiento a la Junta Constructora de la Sagrada Familia desde la valoración del importante papel que desempeña como impulsora de las obras del Templo a lo largo de los más de cien años de construcción.

De la misma manera quisiéramos reconocer la labor de todos aquellos técnicos y operarios que día a día hacen posible el avance de las obras y muy especialmente a Pau Agut y Àlex Fabregat, sin los que no hubiese sido posible todo el trabajo descrito en el presente artículo.

sition of a latest generation mixer, continuing research on the materials to be used, exploring the feasibility of using 60-MPa SCC in situ and improving construction processes.

As a result of the studies conducted on the geometry and proportions of the members built, the parts that remain to be erected will be more formally and structurally consistent with the whole.

Acknowledgements

The authors wish to thank the Sagrada Familia Construction Board for its significant role as the driving force behind temple erection for over one hundred years.

They likewise wish to acknowledge the efforts of all the architects, engineers and staff who are building the Sagrada Familia day by day, and particularly Pau Agut and Àlex Fabregat, without whom the work described in the present article would not have been possible.

REFERENCES

[1] RAFOLS Ll. Antoni Gaudí. Barcelona: Ed. Canosa, 1929.



Figura 31. a) Ábside (noviembre 2009) y b) visión general del templo (Marzo 2009). Fuente ATESF
Figure 31. a) Apse (November 2009) and b) overview (March 2009). Source: ATESF

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

REFERENCIAS

[1] RAFOLS Ll. *Antoni Gaudí.* Barcelona: Ed. Canosa, 1929.

[2] PUIG BOADA I. *El Temple de la Sagrada Familia*. Col.lecció Sant Jordi. Barcelona: Ed. Barcino, 1929.

[3] FAULÍ J. *Composició i continuïtat en les columnes i voltes de les naus del temple Expiatori de la Sagrada Familia: Descripció del sistema geomètric i del procés de definició del projecte des de l'anàlisi i interpretació del projecte d'Antoni Gaudí fins a la construcció*. 3 Vol. Tesis doctoral. Barcelona: UPC, Departament d'Estructures en l'Arquitectura, 2008.

[4] BONET I ARMENGOL J. *L'últim Gaudí*. Barcelona: Editorial Pòrtic, 2000.

[5] GIRALT-MIRACLE D. [et al.] *Gaudí. La recerca de la forma. Espai, geometria, estructura i construcció*. Catàleg de l'exposició del Museu d'Història de la Ciutat. Barcelona: Institut de Cultura, Ajuntament de Barcelona-Sociedad Estatal para la Acción Cultural Exterior (SEACEX); Lunwerg editores, 2002.

[6] GRIMA R., AGUADO A., GÓMEZ-SERRANO J. "The use of concrete in Gaudí's Sagrada Familia". *International Journal of Architectural Heritage*. 2007, vol.1, nº 4, p. 366-379.

[7] EFE. "El espacio interior de la Sagrada Familia estará acabado en 2010". *Diario ABC*, 12-03-2009.

[8] GÓMEZ SERRANO J. [et al.] *La Sagrada Familia: de Gaudí al CAD.* Barcelona: Edicions UPC, 1996.

[9] ALSINA CATALÀ C. y GÓMEZ SERRANO J. "Gaudí geométricamente". *La Gaceta de la RSME*. 2002, vol. 5, nº 3, p. 523-539.

[10] FAULÍ J., ESPEL R. "Les voltes de les Capelles absidials". *El Temple*. Marzo-abril 2005, p. 5-7.

[11] COLL J. "El projecte de l'absis". *El Temple*. Julio-agosto 2002, p. 10-12.

[12] MINISTERIO DE FOMENTO. *EHE-08, Instrucción de Hormigón Estructural.* Madrid: Ministerio de Fomento, 2008.

[13] BUXADÉ C., BUXADÉ A., FERRANDO R. "The columns of Gaudí". *La Colonne: Nouvelle histoire de la construction.* Ouvrage collectif sous la direction de Roberto Gargiani**.** Laussane: Presses polytechniques et universitaires romandes. École Politechnique Fédéral de Laussane, 2007, p. 301-311.

[14] ESPEL R., GÓMEZ J., GRIMA R., AGUADO, A. "La evolución de la construcción del Templo de la Sagrada Familia". *Informes de la construcción*. 2009, vol. 61, nº 516, p. 5-20.

[15] GÓMEZ SERRANO J. "El hormigón de alta resistencia en el Templo de la Sagrada Familia de Barcelona". *Cemento Hormigón*, 2001, nº 826, p. 717-729.

[16] GRIMA R. *El hormigón en el Templo de la Sagrada Familia.* Tesina de especialidad. Barcelona: ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya, 2004.

[2] PUIG BOADA I. El Temple de la Sagrada Familia. Col.lecció Sant Jordi. Barcelona: Ed. Barcino, 1929.

[3] FAULÍ J. Composició i continuïtat en les columnes i voltes de les naus del temple Expiatori de la Sagrada Familia: Descripció del sistema geomètric i del procés de definició del projecte des de l'anàlisi i interpretació del projecte d'Antoni Gaudí fins a la construcció. 3 Vol. Doctoral thesis. Barcelona: UPC, Departament d'Estructures en l'Arquitectura, 2008.

[4] BONET I ARMENGOL J. L'últim Gaudí. Barcelona: Editorial Pòrtic, 2000.

[5] GIRALT-MIRACLE D. [et al.] Gaudí. La recerca de la forma. Espai, geometria, estructura i construcció. Catàleg de l'exposició del Museu d'Història de la Ciutat. Barcelona: Institut de Cultura, Ajuntament de Barcelona-Sociedad Estatal para la Acción Cultural Exterior (SEACEX); Lunwerg editores, 2002.

[6] GRIMA R., AGUADO A., GÓMEZ-SERRANO J. "The use of concrete in Gaudí's Sagrada Familia". International Journal of Architectural Heritage. 2007, Vol. 1, No. 4, pp. 366-379.

[7] EFE. "El espacio interior de la Sagrada Familia estará acabado en 2010". Diario ABC, 12-03-2009.

[8] GÓMEZ SERRANO J. [et al.] La Sagrada Familia: de Gaudí al CAD. Barcelona: Edicions UPC, 1996.

[9] ALSINA CATALÀ C. y GÓMEZ SERRANO J. "Gaudí geométricamente". La Gaceta de la RSME. 2002, Vol. 5, No. 3, pp. 523-539.

[10] FAULÍ J., ESPEL R. "Les voltes de les Capelles absidials". El Temple. March-April 2005, pp. 5-7.

[11] COLL J. "El projecte de l'absis". El Temple. July-August 2002, pp. 10-12.

[12] MINISTERIO DE FOMENTO. EHE-08, Instrucción de Hormigón Estructural. Madrid: Ministry of Public Works, 2008.

*[13] BUXADÉ C., BUXADÉ A., FERRANDO R. "The columns of Gaudí". La Colonne: Nouvelle histoire de la construction. Ouvrage collectif sous la direction de Roberto Gargiani**.** Laussane: Presses polytechniques et universitaires romandes. École Politechnique Fédéral de Laussane, 2007, pp. 301-311.*

[14] ESPEL R., GÓMEZ J., GRIMA R., AGUADO, A. "La evolución de la construcción del Templo de la Sagrada Familia". Informes de la construcción. 2009, Vol. 61, No. 516, pp. 5-20.

[15] GÓMEZ SERRANO J. "El hormigón de alta resistencia en el Templo de la Sagrada Familia de Barcelona". Cemento Hormigón, 2001, No. 826, pp. 717-729.

[16] GRIMA R. El hormigón en el Templo de la Sagrada Familia. Tesina de especialidad. Barcelona: ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya, 2004.

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

[17] SANTOS A.C.P. DOS, AGUADO A., AGULLÓ L. y GARCÍA T. "Criterios de diseño para el hormigón autocompactable". *IX Congreso Nacional de Materiales*. Vigo, 20 a 22 de junio de 2006. Vol. II p. 909-912.

[18] BURRY M. [et al.] *Gaudí Unseen. Completing the Sagrada Familia.* Berlín: Jovis Verlag, 2007.

[19] GÓMEZ-SERRANO J., ESPEL R., GRIMA R., BURRY M.C., AGUADO, A. "Evolution of the formwork used in the temple of the Sagrada Família". *International Journal of Architectural Heritage*. 2009, vol. , nº 2, p. 93-109.

[20] COLL J., ESPEL R. "El trifori de l'absis a 45 m". *El Temple*. Marzo-abril 2009, p. 12-16.

[21] IZKUE M., MERCADAL A. *Construcción del cierre del ábside de la Sagrada Familia.* Trabajo asignatura "Procedimientos de Construcción". Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2009.

[17] SANTOS A.C.P. DOS, AGUADO A., AGULLÓ L. y GARCÍA T. "Criterios de diseño para el hormigón autocompactable". IX Congreso Nacional de Materiales. Vigo, 20 -22 June 2006. Vol. II pp. 909-912.

[18] BURRY M. [et al.] Gaudí Unseen. Completing the Sagrada Familia. Berlin: Jovis Verlag, 2007.

[19] GÓMEZ-SERRANO J., ESPEL R., GRIMA R., BURRY M.C., AGUADO, A. "Evolution of the formwork used in the temple of the Sagrada Família". International Journal of Architectural Heritage. 2009, Vol. , No. 2, pp. 93-109.

[20] COLL J., ESPEL R. "El trifori de l'absis a 45 m". El Temple. March-April 2009, pp. 12-16.

[21] IZKUE M., MERCADAL A. Construcción del cierre del ábside de la Sagrada Familia. Trabajo asignatura "Procedimientos de Construcción". Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2009.

RELACIÓN DE PARTICIPANTES / *LIST OF PARTICIPANT*

- **Propiedad / *Owner*:** Fundación de la Junta Constructora del Templo Expiatorio de la Sagrada Familia
- **Arquitecto Director / *Resident architect:*** Jordi Bonet i Armengol
- **Arquitecto Director Adjunto / *Assistant resident architect*:** Jordi Faulí i Oller
- **Jefe de Obra / *Site supervisor:*** Ramon Espel
- **Dirección Facultativa / *Site management*:** 2Buxadé, Margarit, Ferrando S.L.P. y Josep Gómez-Serrano
- **Asesores en innovación en tecnología del hormigón**
  Concrete innovation and technology consultants: Antonio Aguado de Cea, Rosa Grima López
- **Empresa Constructora / *Builders*:** Personal propio y diversas empresas subcontratadas
- **Empresa de fabricación y premontaje del encofrado interior de los muros absidiales:**
  Manufacture and assembly of interior formwork for apse walls: CONSTRUCCIONS METÀL·LIQUES SOLER S.L.
- **Empresa encargada de los acabados cerámicos del interior de los muros absidiales**
  Tiling on apse wall interiors: CONSTRUCCIONS RAMON SERRA FIGOLS S.L.
- **Empresa de limpieza y reparación del interior de los muros absidiales**
  Cleaning and repair of apse wall interiors: REHABILIT S.L.

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026