

Diseño de una cruz sobre la Torre de Jesucristo en el templo expiatorio de la Sagrada Familia de Barcelona

Designing a cross for the top of the Tower of Jesus Christ in the expiatory temple of Barcelona's Sagrada Familia (Holy Family)

José Miguel Molines Cano

Universitat Jaume I. molines@uji.es

Ana Almerich-Chulia

Universitat Politècnica de València. analchu@mes.upv.es

Received 2022-12-07

Accepted 2023-06-08



To cite this article: Molines Cano, José Miguel, and Ana Almerich-Chulia. "Designing a cross for the top of the Tower of Jesus Christ in the expiatory temple of Barcelona's Sagrada Familia (Holy Family)." *VLC arquitectura* 10, no. 2 (October 2023): 101-120. ISSN: 2341-3050. <https://doi.org/10.4995/vlc.2023.18883>



Resumen: La Sagrada Familia es la obra maestra por excelencia de Gaudí. El proyecto de este templo contempla la construcción de 18 torres: cuatro en cada una de las tres entradas-portales, un sistema de seis torres con la torre sobre el cimborrio central dedicada a Jesús, otras cuatro alrededor de esta dedicada a los evangelistas, y la situada sobre un segundo cimborrio dedicada a la Virgen. Pero es en la existente en el cimborrio central, la llamada torre de Jesucristo, en la que se centra este trabajo. Esta torre se encuentra en fase de construcción y está previsto que en su parte superior culmine con una cruz de cuatro brazos, de una altura total de 25 metros, alcanzando los 170 m su punto superior. Un elemento de considerables dimensiones y excesivo peso para que pueda ser construido según el proyecto inicial, de acero, para poder izarlo y disponerlo, con los medios mecánicos que existen hoy en día en el mercado. En consecuencia, el presente artículo tiene la finalidad de proponer y diseñar un elemento que cumpla con las prestaciones que se le requieran, sin olvidar, dada su singularidad y simbología, la componente estética del mismo.

Palabras clave: Sagrada Familia; Gaudí; Torre de Jesucristo; cruz; estética modernista.

Abstract: Gaudí's Sagrada Familia (Holy Family) is his architectural masterpiece. The construction of 18 spires for this project were envisaged: four for each three entrance portals; and a system of six towers where the dome base of the centre tower is dedicated to Jesus Christ, a second dome base is dedicated to the Virgin Mary, and the rest to the Apostles. This study is focused on the dome base of the so called Tower of Jesus since this particular element is still under construction and, when completed, its top part must support a four armed cross (25 meters) to reach a final height of 170 meters at its highest point. The sizes and weights of this ornamental element complicate the hoisting and arrangement of any (prefabricated) construction set because neither the initial building machines (made of steel) nor the machine models available in today's market can perform such a complex task. As a result, the aim of this article consists of designing a very singular and symbolic element that meets both its aesthetic function and this complex building performance.

Keywords: Sagrada Familia; Gaudí; Tower of Jesus Christ; cross; modernist aesthetic.

INTRODUCCIÓN: ANTONI GAUDÍ

Antonio Gaudí se ha convertido, por derecho propio, en uno de los arquitectos españoles más conocidos del mundo. Su singular lenguaje, único y rompedor, además de su gran destreza para diseñar y concebir los espacios, lo han convertido en un referente de la arquitectura actual.

Gaudí, como uno de los pilares principales del "Modernismo," estilo en el que se le clasifica, se vio enormemente influenciado por Viollet Le Duc y Ruskin. No obstante, al igual que ocurre con otros grandes genios, su estética es complicada de encasillar, por lo que muchos autores lo incluyen dentro de otras corrientes artísticas. Su percepción de la arquitectura entendida como un todo, hace que su impronta se pueda apreciar no solo en el elemento arquitectónico, sino también en los interiores, en los que muestra un cuidadoso trabajo y atención en colaboración con otros artesanos.

La biografía de Gaudí está íntimamente relacionada con la familia Güell, una familia de gran prestigio dentro de los ambientes industriales y artísticos de la época de Barcelona. Para esta familia construyó una parte importante de su obra, como el "Palau Güell," "La Cripta de la Colonia Güell" y "El Parque Güell," entre otros trabajos.

También son conocidas la casa Batlló y la Milà, ambas en el Paseo de Gracia de Barcelona. Las dos tienen en su fachada un ritmo ondulante, aunque son bastante distintas. Pero, además de una amplia representación de edificios residenciales y urbanos, la labor arquitectónica de Gaudí se sublimó dentro del ámbito religioso, en que se pueden clasificar algunas de sus obras más importantes, "El Colegio de Santa Teresa" de Ganduxer, también en Barcelona, y sobre todo una de las obras cumbre de su trabajo "el templo expiatorio de la Sagrada Familia," el gran templo inacabado en el que el arquitecto trabajó hasta su muerte.¹

Comenzó a dirigir las obras cuando éstas ya se habían iniciado según un proyecto inicial de planteamiento neogótico. La parte edificada por Gaudí comprende

INTRODUCTION: ANTONI GAUDÍ

Antonio Gaudí is, on his own account, one of the most renowned Spanish architects worldwide. His unique language, as genuine as he was groundbreaking, along with a great skill in designing and conceiving spaces have made him become a top name in contemporary architecture.

Gaudí, as a key figure of Modernism – his predominant architectural style – was influenced both by Viollet-le-Duc and John Ruskin. As with all great geniuses, his aesthetic is very difficult to be pigeonholed, so that many authors and critics have included him in several artistic currents and movements. His holistic view of architecture leaves a distinctive mark both in the architectural elements as well as in the interior parts because it is there that we can find his caring work and close collaboration with other artisans.

Gaudí's biography is strongly related to the industrial and artistic circles of Barcelona at that time, being the Güell family his main link. In fact, an essential part of his work was built for this prominent family, being the "Palau Güell," "La Cripta de la Colonia Güell," and "El Parque Güell," among other things, some outstanding designs.

Casa Batlló and Casa Milà are also well-known buildings located in Paseo de Gracia in this town, having an undulating rhythm on their façades even though both constructions are quite different. But, in addition to a wide range of residential and urban style buildings, Gaudí's architectural work is being exalted by a religious sphere, where some excellent works can be categorized: "El Colegio de Santa Teresa" in Ganduxer (Barcelona) and, notably, the jewel of his authorship "El Templo Expiatorio" (Expiatory Temple) de la Sagrada Familia (Holy Family). A huge construction site where the architect worked until his death.¹

Gaudí started leading this already begun site – based on an initial Neo-Gothic project – being the crypt, the apse, and the Nativity façade part

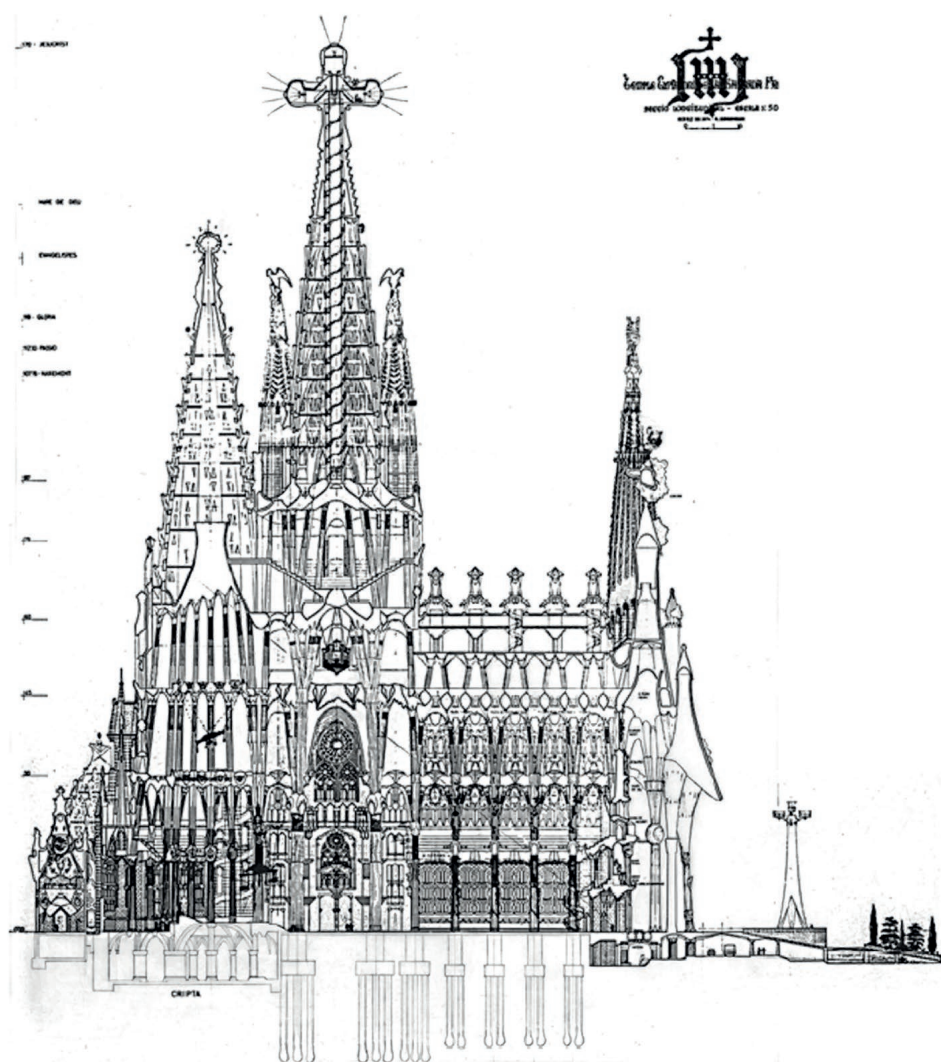


Figura 1. Sección Templo Sagrada Familia.

Figure 1. Holy Family Temple section.

la cripta, el ábside y la fachada del Nacimiento. La nueva fachada de la Pasión fue construida por sus colaboradores a partir de 1925. Dentro del proyecto se contempla la construcción de 18 torres: cuatro en cada una de las tres entradas-portales, un sistema de seis torres, con la torre sobre el cimborrio central dedicada a Jesús (Figura 1), otras cuatro alrededor de esta, dedicadas a los evangelistas, y la situada sobre un segundo cimborrio dedicada a la Virgen.²

of his contributions. His collaborators built the new Passion façade from 1925 onwards. For this project, it was also planned the construction of 18 spires as follows: four at each three entrance portals, where the dome base of the central tower is dedicated to Jesus Christ (Figure 1), a second dome base is dedicated to the Virgin Mary, and all the rest are dedicated to the Apostles.²

Pero es en la existente en el cimborrio central, la llamada Torre de Jesucristo, donde se centra este trabajo. Esta torre se encuentra en fase de construcción, y está previsto que su parte superior culmine con una cruz de cuatro brazos, de una altura total de 25 metros, alcanzando los 170 m su punto superior. Un elemento de considerables dimensiones para que pueda ser construido *in situ* según el proyecto inicial de acero, e imposible de poder construirse en el suelo, poder izarlo y disponerlo en su lugar con los medios mecánicos que existen actualmente.

En consecuencia, el presente trabajo tiene el objeto de proponer un diseño para la torre de Jesucristo, que cumpla con la propuesta original de Gaudí, y las necesidades que para ella se requieren. Todo ello, teniendo presente la viabilidad constructiva de la misma, además de otros aspectos como la durabilidad, su singularidad dentro del conjunto arquitectónico y su estética.

LA CRUZ DE CUATRO BRAZOS. SIMBOLISMO EN LA OBRA DE GAUDÍ

Todo el simbolismo propio de Gaudí que podemos encontrar en su obra se reúne en la Sagrada Familia. En este sentido, la obra se considera el auténtico foco donde el autor concentró todo su conocimiento. Dentro del templo podemos encontrar la simbología más variada que representan la fusión entre la geometría y la materia, así como espiritualidad e imaginación tan características de Gaudí.³

Al respecto, son numerosos los textos que hablan sobre la simbología de la obra de Gaudí, en parte dedicada a la Mitología, lo desconocido, pero de forma latente, a la Religión Cristiana, de la cual era fiel seguidor. Con razón comentaba el Prof. George R. Collins (1917-1993):

*A Gaudí los críticos e historiadores lo habían tildado de modernista, hiperrealista, organicista, barroco y de otras lindezas, cuando en realidad Gaudí no perteneció a ningún estilo ni movimiento artístico, aunque de todos ellos tenía trazas.*⁴

Given that we have a central dome as a key element in the so called Tower of Jesus Christ, we are going to focus our proposal on that location. This tower, currently under construction, must be adorned with a four-armed cross (25 meters) to help the building reaching a total height of 170 meters at its highest point but, as this top element has considerable dimensions and it is impossible to build it on the ground, hoisting it up to put cross in the right place by the use of current mechanical means, we must reassess the core idea for building this element *on site* using its original steel structure.

Obviously, this work explores a design for the Tower of Jesus Christ that we think to be Gaudí's original proposal and necessary, that is to say: the constructive viability of the tower as well as its durability, uniqueness and aesthetic function within the (whole) architectural set.

THE FOUR-ARMED CROSS. SYMBOLISM IN THE WORK OF GAUDÍ

Gaudí's intimal symbolism is brought together in the Sagrada Família. In this sense, we can consider this work as a genuine concern where the author concentrates all his knowledge. In fact, inside the Temple, we can find a wide range of symbolism that represent the fusion between geometry and matter, and spirituality and imagination so characteristic of Gaudí.³

In this respect, there are many texts dealing with symbolism within Gaudí's work paying a biased attention to Mythology – the unknown – but implicitly focusing on Christian Religion because he was a strong believer. So that, Juan Bassegoda, considering a previous remark by Prof. George R. Collins (1917-1993), points out that:

*Gaudí has been labelled by critics and historians as modernist, hyperrealist, organicist, baroque and many silly things because he did not belong to any specific style or artistic movement but he bore traces of all of them.*⁴

Tal y como expone Bassegoda, pone en tela de juicio que Gaudí fuese sencillamente un arquitecto modernista, dejando latente en su libro lo siguiente:

A Gaudí se le sitúa erróneamente en el Modernismo por simple comodidad cronológica, sin que su arquitectura, derivada directamente de la geometría de la Naturaleza, se despegue totalmente del encantador pero fatuo estilo modernista. Al Modernismo se le sitúa dentro de la Belle Époque mientras que, a Gaudí, por su independencia de toda escuela o estilo, debería colocársele Époque.⁵

De entre los primeros elementos simbólicos, el edificio se encuentra a la misma distancia del mar y la montaña, conviniéndose en un *omphalos*, un lugar que aglutina y centraliza el sentido más sagrado del lugar que representa. También su propio nombre, *expiatorio*, como el lugar en forma de edificio erigido para expiar, purificar y purgar los pecados de la ciudad de Barcelona.⁶

Algunos autores exponen que la configuración del templo representa una fusión entre la concepción que tiene la religión cristiana del mundo y el hombre, y el carácter más figurativo que se expresa a través de un sinnúmero de elementos icónicos en los que cualquier detalle contiene un significado simbólico, el sentido del todo. Gaudí buscaba representar a través de su obra el Cielo y la Tierra, un elemento arquitectónico de carácter divino que sintetizase la salvación de forma metafórica a través de él.⁷ Un edificio que representase una síntesis de la teología cristiana, geometría, naturaleza y espíritu: *"el sueño de la totalidad, como el Raimundo Lulio del Ars Magna, como el Dante de la Divina Comedia, o como el Tomás de Aquino de la Summa Theologica."*⁸

Otro punto interesante a considerar en el pensamiento simbolista de Gaudí es la relación de este movimiento artístico con el misticismo y el ocultismo, y con la consideración del poeta como sacerdote que pretende substituir a Dios. En este sentido, los símbolos que utiliza Gaudí en sus edificios son claros e inequívocos, y en la mayoría de los casos tan evidentes, que llegan

A shared thinking that Bassegoda calls into question after considering that:

Gaudí is wrongly placed in Modernism simply for chronological convenience, without his architecture – derived directly from the geometry of Nature – being totally detached from the charming but fatuous modernist style. Modernism is placed within the Belle Époque period, whereas Gaudí, due to his independence from any school or style, should be placed in the hors Époque.⁵

Among the first symbolic elements, the building is located an equal distance from the sea and the mountain, thus becoming an *omphalos*. A space that agglutinates and centralizes the most sacred sense of the place it represents. As its very name also indicates – *expiatory* – this space in the form of a building has emerged to purify, purging and atoning for the sins of the city of Barcelona.⁶

Some authors argue that the church configuration represents a fusion between a Christian conception of the world and man, being the most figurative character as an expressive myriad of iconic elements in which every detail contains its own symbolic significance, its *whole* sense. Gaudí aimed to represent Heaven and Earth his work, an architectural element of divine character that would synthesize salvation in a metaphorical way on its own.⁷ A building representing a synthesis of Christian theology, geometry, nature, and spirit: *"the dream of totality, like that Raymond Lully as an author of the Ars Magna, like that Dante of his Divine Comedy, or like that Thomas Aquinas of his Summa Theologica."*⁸

Another interesting point to consider in Gaudí's symbolist thinking is the relationship of this artistic movement with mysticism and occultism together with the poet as a priest who claims to substitute God. In this sense, the symbols that Gaudí uses in his buildings are so clear and unmistakable that, in most cases, such evidence can confuse

a confundir al observador. Por ello, solo es necesario revisar lo que Gaudí quería expresar con sus formas tridimensionales, para poder sintetizar los símbolos en cuatro grandes grupos: cristianos, mitológicos, patrióticos y falsos símbolos. Estos últimos, fruto de imaginaciones ajenas a Gaudí.⁹

Dentro del primero de ellos, los símbolos cristianos, es donde se incluye el elemento que nos interesa para el presente trabajo. Gaudí hizo uso de estos, extraídos de las sagradas escrituras y la propia tradición cristiana, para incluirlos en sus propios edificios. Por ello, en el Templo Expiatorio de la Sagrada Familia, llamado comúnmente por muchos autores como la Biblia de piedra por la referencia de forma explícita e ingeniosa de todas las verdades de la Religión, la cruz es uno de los elementos principales y repetidos en el edificio. En este caso, la cruz de cuatro brazos, un símbolo recurrente en el autor, usado con anterioridad en la Casa Batlló (1906), la Casa Calvet (1898), la Casa Milà (1910) y Teresianas (1889).¹⁰

En consecuencia, el universo simbólico de Gaudí ha generado, genera y generará otras fantasías para goce y disfrute de ingenuos, y para diversión de los conocedores del sentido humano, cristiano y artístico de este singular personaje de la arquitectura.

ANÁLISIS DEL OBJETO DE ESTUDIO: LA CRUZ DE JESUCRISTO

El presente estudio tiene como finalidad analizar la cruz de cuatro brazos que remata superiormente la Torre del cimborrio central dedicada a Jesús. En este caso, se piensa en el diseño de un elemento que sea compatible con la composición constructiva del templo, y a su vez sea respetuoso con la estética propia del conjunto edificado diseñado por Gaudí.

Gaudí calculó el Templo de la Sagrada Familia teniendo en cuenta los materiales que existían en aquel momento, siguiendo dos métodos de cálculo para arcos y estructuras, el método estático gráfico y el

the observer. For this reason, it is only necessary to review what Gaudí wanted to express with his three-dimensional forms to synthesize those symbols into four large groups: Christian, mythological, patriotic, and false signs. In the latter case, the fruit of Gaudí's imagination faced by others.⁹

Within the first group, the Christian symbols, is where the element under investigation for this present work is included. Gaudí used this from the Holy Scriptures and the Christian tradition to be included in his buildings. Thus, in the Expiatori Temple of the Holy Family – as referred to by many authors as the Stone Bible due to its explicit and ingenious reference to all religious truths – the cross is one of the central and most repeated element in the building. In this case, the four-armed cross, a recurring symbol for this author, was previously used in Casa Batlló (1906), Casa Calvet (1898), Casa Milà (1910), and Teresianas (1889).¹⁰

For all those reasons, the symbolic universe of Gaudí generated, generates, and will continue to plenty of fantasies for the enjoyment and pleasure of naïve as well as the amusement of those who know the human, Christian, and artistic sense of this singular figure of architecture.

ANALYSING THE OBJECT OF STUDY: THE CROSS OF JESUS CHRIST

The purpose of this study is to analyse the four-armed cross that tops the central dome tower dedicated to Jesus Christ. In this case, the idea consists of designing an element compatible with the constructive composition of the church that, at the same time, must be respectful with the aesthetics of the building ensemble designed by Gaudí.

Gaudí planned the Temple of the Holy Family by considering some materials of the period and applying two calculation methods for arches and structures: the static graphic method and the

método funicular, que resuelven correctamente, a la par que elegantemente, la transmisión de cargas desde la torre al crucero y al suelo. De forma más concreta, utilizó métodos de cálculo gráficos para analizar arcos según polígonos funiculares y métodos experimentales catenarios o funiculares, aprendidos durante su época de estudiante.¹¹ Según Gómez Serrano, el arquitecto Joan Martorell inició a Gaudí en la aplicación de métodos gráficos de cálculo, que adaptó de forma personal al sistema de cálculo de arcos del momento, convirtiéndolo en un sistema práctico de cálculo gráfico de catenarias.¹²

En base a ellos, años después de la muerte de Gaudí, han sido muchos los que han comprobado la validez de los métodos utilizados, concluyendo que desde su concepción, los elementos estructurales cumplen incluso con las exigencias de la normativa vigente. Pero no solo eso, sino que, además, los elementos inferiores de sustento, en concreto el propio que nos interesa para este estudio, la Torre de Jesucristo que soportará la Cruz, fueron concebidos teniendo presente los principales esfuerzos a los que estará solicitada, el viento, a consecuencia de su posición respecto al resto de los elementos constructivos del Templo y la ciudad.¹³

Se pensó en un elemento de acero que, posteriormente, sería revestido con la propia piedra del edificio, con un peso considerablemente elevado. Este hecho supone un problema constructivo a tomar en consideración dentro de este trabajo. Pues construir la cruz en su altura final aumenta su complejidad y construirla en el suelo para después elevarla hasta el remate de la torre de Jesucristo resulta, para el material propuesto, totalmente inviable con los medios existentes actualmente.

Sin embargo, si analizamos las distintas etapas constructivas del templo, se puede observar cómo la construcción del mismo ha ido planteando nuevas necesidades, que han sido cubiertas con el avance de la tecnología y la aparición de nuevos materiales. Primeramente el hormigón y posteriormente el acero solucionaron ciertas dificultades de las construcciones originales en piedra. De esta forma, así como el

funicular method for transmitting the loads from the tower to the transept and the ground in a correct and elegant way. That is to say, he used some graphic calculation methods learned in his student days to analyse arches according to funicular polygons and experimental catenary or funicular methods.¹¹ According to Gómez Serrano, the architect Joan Martorell trained Gaudí to apply graphic calculation methods – which was used in a personal way as a calculation system for arches during that age – and he did convert it into a practical system of graphical calculation for catenaries.¹²

On the basis of this – some years after Gaudí's death a number of people have verified the validity of these methods to conclude that, from its simple concept, the structural elements even comply with the requirements of current regulations. Besides this, not only the lower supporting elements were conceived bearing in mind the principal stresses to which it will be exposed, the wind – specifically that one of our study, the Tower of Jesus Christ that must support the Cross – but also as a result of its position with regard to other constructive elements of the Temple and the city.¹³

At first, it was considered a steel element to be covered with the building's own at a later stage but its weight seemed excessive. A fact that represents a constructive problem that will be considered in this work since building the cross at its final location increases the complexity of the task and building it on the ground to then be raised up it to the top of the Tower of Jesus Christ for the material being used, is completely unfeasible with today's means.

However, if we analyze the different construction stages of the church, we can conclude that new needs emerged for its construction that have been surpassed with the advance of technology and the appearance of new materials. Firstly, both concrete and steel solved specific difficulties of the original stone construction. In

hormigón significó una alternativa a la piedra en su momento, y a su vez el acero al hormigón, en el futuro, materiales de otra naturaleza como pueden ser los composites, puede resultar una alternativa a estos últimos.

Datos de partida

El presente apartado recoge los datos iniciales sobre los que se centra el estudio, muchos de ellos facilitados por el equipo técnico encargado de la construcción del templo. De forma concreta, el caso de estudio es la torre de Jesús, rematada por una gran Cruz de cuatro brazos de 15 m, en cuya parte central figurará un cordero, así como la inscripción de *Tu solus Sanctus, Tu solus Dominus, Tu solus Altissimus*, y las palabras Amén y Aleluya. Cada uno de los brazos de la cruz tendrá potentes haces de luz que serán visibles a grandes distancias (Figura 2).

Tal y como se puede apreciar en la Figura 3, la cruz se define por un mástil de 25 metros de altura compuesto de un cilindro de 5 m de diámetro, que arranca desde la cota de 146,28 m. Este tronco es atravesado por dos cilindros de 5 m de diámetro y 18,75 m de longitud, que conforman los 4 brazos restantes, a una altura de 15,83 m de la base del mástil, quedando el eje de entronque y simetría a una cota de 162,11 m. El elemento, la cruz, además de formar parte del templo, tiene una función definida, pues está destinada a albergar una capilla en su interior para 40 personas. Para ello, el mástil de la cruz da continuidad a la escalera que dará acceso a dicha capilla desde el interior de la catedral. Además, se piensa en situar una losa interior al elemento que suponga el forjado de la capilla, así como un banco perimetral que recorrerá a ambos lados los brazos de la cruz en toda su longitud.

Hasta ahora, la mayoría de los elementos constructivos que definen el edificio se ejecutan con hormigón armado, para posteriormente revestirlos con el acabado final que le conferirá el carácter formal y la estética buscada. Pero el enclave del elemento, cuya base se encuentra a 146,00 m del suelo, siendo la

this same way, just as concrete was an alternative to stone at the time, and steel to concrete later on, some materials of a different nature – let us think about composites – may prove to be an alternative to both of them.

Initial data

This section contains the initial data for the present study, most of them provided by the technical team in charge of the church's construction. The case study focuses, as indicated above, on the Tower of Jesus, topped by a large 15 meters cross with four arms containing, in its central part a lamb, as well as the inscription "Jesus Christ, for you alone are holy, you alone are Lord, you alone are most high, Jesus Christ." Each of these arms shall be equipped with powerful light beams which will be seen from great distances (Figure 2).

As shown in Figure 3, the cross is defined by a 25 meters high mast composed of a 5 meters diameter cylinder, starting at mark 146.28 m. This trunk is crossed by two cylinders of 5 m in diameter and 18.75 m in length, which form the four remaining arms at a height of 15.83 m from the base of the mast, with the axis of intersection and symmetry at an elevation of the mark 162.11 m. In addition to being part of the church, this element, the cross, has a defined function because it is planned to accommodate a chapel for 40 people. To this end, the core of the cross gives continuity to the staircase, providing access to the chapel from inside the cathedral. Moreover, the placement of a slab is planned inside the element that will be the forging of the chapel and a perimeter bench that will run along both sides of the arms of the cross along its entire length.

Up until now, most of the construction elements that define the building have been made of reinforced concrete as it is as the final touch that will give it the formal and aesthetic character sought later on. But the location of the element, whose mark is 146.00 m from the ground, with a maximum height of 171.50 m,

Figura 2. Fachada de la Pasión. Dibujo de Francesc Berenguer. Detalle de los haces de luz en la Cruz.

Figure 2. Façade of the Passion. Drawing by Francesc Berenguer. Detail of the beams of light on the Cross.



cota máxima de 171,50 m, hace imposible construirlo de hormigón armado, por problemas de encofrado, grúa o bombeo, para posteriormente izarlo y colocarlo en su posición, puesto que no existe maquinaria terrestre que permita elevar el peso que el elemento alcanza tras su ejecución. La distancia mínima del exterior del templo al centro de la Torre es aproximadamente de 80 m, siendo la cota máxima de la cruz de 171,50 m, y estimamos que necesitamos un mínimo de 20 m para la sujeción de la Torre y maniobrabilidad. Con los datos anteriores, suponemos que necesitaríamos una grúa con un brazo de 200 m, maquinaria no existente en la actualidad.

Con toda la información recopilada, se propone diseñar y ejecutar la cruz a base de polímeros reforzados de fibra de vidrio; ya que se podrá conseguir un elemento que soporte las acciones del peso propio de la misma, así como las debidas al viento y la carga permanente, con un espesor inferior al esperado con los otros materiales indicados de uso habitual en la construcción.

makes its construction building impossible with reinforced concrete due to problems of formwork, crane, or pumping because, in order to be able to hoist and place it in its final position, a land-based machine does not exist capable of lifting the total weight that the element reaches during its execution. The minimum distance from the outside of the church to the center of the Tower is approximately 80 m, with the maximum height of the cross being 171.50 m, so that we estimate that a minimum of 20 m to support and maneuver the Tower. Bearing in mind these data, a crane with a 200 m arm would be needed. A machine that, unfortunately, does not exist today.

With all the information gathered, we propose designing and executing this element by using fiberglass-reinforced polymers as it will be possible to achieve an element that supports the actions of its own weight – as well as those caused by the wind and its permanent load – with a lower thickness than expected in comparison with other materials in regular use in the construction sector.

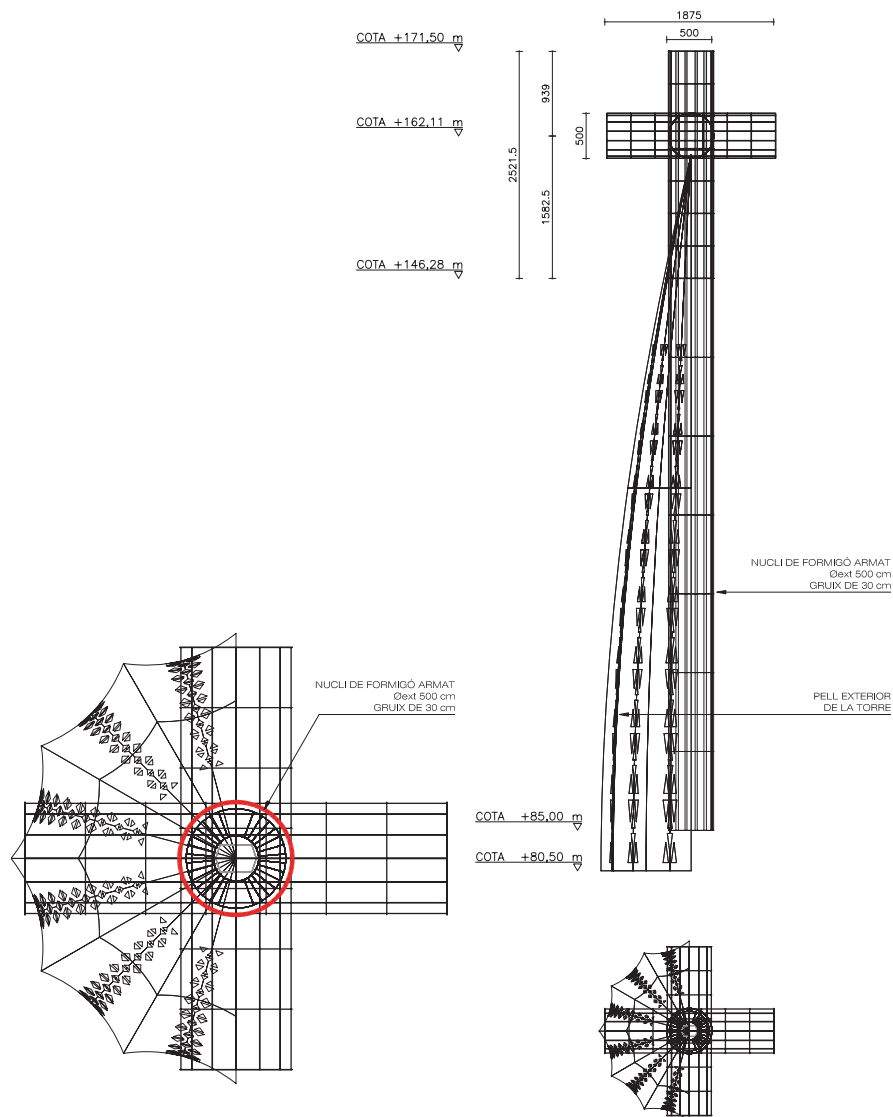


Figura 3. Planta y alzado de la Cruz de la Torre de Jesucristo.

Figure 3. Plan and elevation of the Cross of the Tower of Jesus Christ.

El material propuesto

Como material propuesto para el diseño y ejecución del objeto del presente estudio, se propone el polímero reforzado con fibra de vidrio. Se trata de un

The proposed material

Glass fiber-reinforced polymer is proposed as the ideal material for the design and execution of the object under investigation. It is a lightweight

material ligero en comparación al resto utilizados en el templo que, aprovechándose de sus características y sus posibilidades estéticas, será capaz de cumplir con las especificaciones que para él se esperan.

Las propiedades que se indican en la Figura 4, se considerarán como valores nominales a adoptar en los cálculos. En este sentido, cabe destacar que, principalmente, el material constituyente, polímero reforzado con fibra de vidrio, se fabricará mediante *filament winding* (una técnica de fabricación de molde abierto para la producción de materiales compuestos), con un ángulo de laminado de 90°, utilizando una resina viniléster tipo Derakane 441. La determinación de las características mecánicas del *filament winding* se llevaron a cabo mediante ensayos de laboratorio, siguiendo los requisitos exigidos por la normativa vigente, obteniendo como valores iniciales los siguientes según la dirección local 1 y 2:

Valores mínimos PRFV a base de tejido a 90°	
Límite de rotura (daN/cm ²) Dirección 1 y 2	4.500
Límite elástico (daN/cm ²) Dirección 1 y 2	2.500
Módulo de elasticidad (daN/cm ²) Dirección 1 y 2	200.000

Figura 4. Valores de las propiedades del PRFV a 90°.

Estudio del elemento

Después de analizar el elemento, primero de forma general en el conjunto y a continuación de forma particular, se propone modelizarlo como un elemento que asemeje su forma a la caña de bambú, compuesto por anillos rigidizados. Sin embargo, dada la excesiva rigidez del elemento, alejada del comportamiento real del mismo, se propone modelizarlo como un elemento sin rigidizaciones intermedias, rigidizando (aumentando el espesor del material) aquellas zonas concretas necesarias.

when compared to the rest in the Temple and will be able to comply with the expected specifications.

The properties shown in Figure 4 should be considered nominal values for further calculations. In this sense, it must be remarked that, primarily, the constituent material (glass fiber-reinforced polymer) will be manufactured by filament winding (an open mold manufacturing technique for the production of composite materials) with a lamination angle of 90° and by applying a vinyl ester resin type Derakane 441. The determination of the mechanical characteristics of this filament winding was conducted through laboratory tests, following the requirements demanded by current regulations, and we obtained the following initial values according to the 1 and 2 direction:

Minimum GRP values based on fabric at 90°.	
Rupture Strength (daN/cm ²) Directions 1 and 2	4,500
Yield Strength (daN/cm ²) Directions 1 and 2	2,500
Elastic Modulus (daN/cm ²) Directions 1 and 2	200,000

Figure 4. Values of GRP properties at 90°.

Study of the element

After analyzing the element –first in general within the whole, then in a particular way– it is proposed to model this as an element resembling the shape of a bamboo cane and emulating stiffened rings. However, since the excessive stiffness of the element is far from its real behavior, it is proposed to model it as an element without intermediate stiffening, that is to say, just by stiffening (increasing the thickness of the material) in those specific areas where it is necessary.

PRFV a base de tejidos a 90°	
Nombre del material en SAP 200	TEX
Mass per unit Volumen (masa) en T	0,18
Weight per unit Volume (densidad) en Kg/m ³	1.800
Modulus of elasticity (modulo de elasticidad) en N/mm ²	
Dirección 1	200.000
Dirección 2	200.000
Dirección 3	2.500
Poisson's ratio (Coeficiente de Poisson) (en las 3 direcciones)	0,3
Coeff of thermal expansion (coeficiente de dilatación térmica) en m /m	1,17*10 ⁻⁵
Shear modulus (módulo de cizalladura) en N/mm ²	
Dirección 1	76.923,08
Dirección 2	76.923,08
Dirección 3	961,54

Figura 5. Datos del PRFV a base de tejidos introducidos en el programa SAP 2000.

Para el análisis del modelo que nos ocupa, hemos utilizado el programa SAP 2000. Se trata un programa para el análisis de estructuras basado en el método de los elementos finitos, en el que las propiedades de la estructura son representadas por un número finito de elementos estructurales interconectados entre sí por un número finito de nodos, a los que se les aplican las cargas, obteniéndose desplazamientos y solicitaciones en cada elemento según los ejes de los mismos. Dentro del programa se definieron las características para el material en relación con los datos extraídos de los ensayos que se describen en la Figura 5.

Las secciones correspondientes a los elementos estructurales que forman la cruz, se han definido utilizando el elemento superficial/placa dentro del programa de cálculo empleado. Hay que destacar que el uso de distintos tipos de elementos ha permitido generar las diferentes secciones que configuran el elemento, tanto las monocapa como las multicapas.

GRP based on fabrics arranged at 90°	
Material name in SAP 2000	TEX
Mass per unit Volume (T)	0,18
Weight per unit Volume (Kg/m ³)	1.800
Modulus of elasticity (N/mm ²)	
Direction 1	200.000
Direction 2	200.000
Direction 3	2.500
Poisson's ratio (in all 3 directions)	0,3
Coeff of thermal expansion in m /m	1,17*10 ⁻³
Shear modulus (N/mm ²)	
Direction 1	76.923,08
Direction 2	76.923,08
Direction 3	961,54

Figura 5. GRP data entered in SAP 2000.

To analyze the model in question, we have used the SAP 2000 program. It is a software for analyzing those structures based on the finite element method. The properties of the structure are represented by a limited number of structural elements interconnected by a finite number of nodes to which the loads are applied, obtaining displacements and stresses in each according to their axes. Moreover, the material characteristics were defined with the data extracted from the tests described in Figure 5.

The sections corresponding to the structural elements that are going to form the cross were defined using the surface element/plate included in this program. It should be noted that using the element type generates the different (single-layer and multi-layer) sections that will set up the element. In all of them, the GRP manufactured

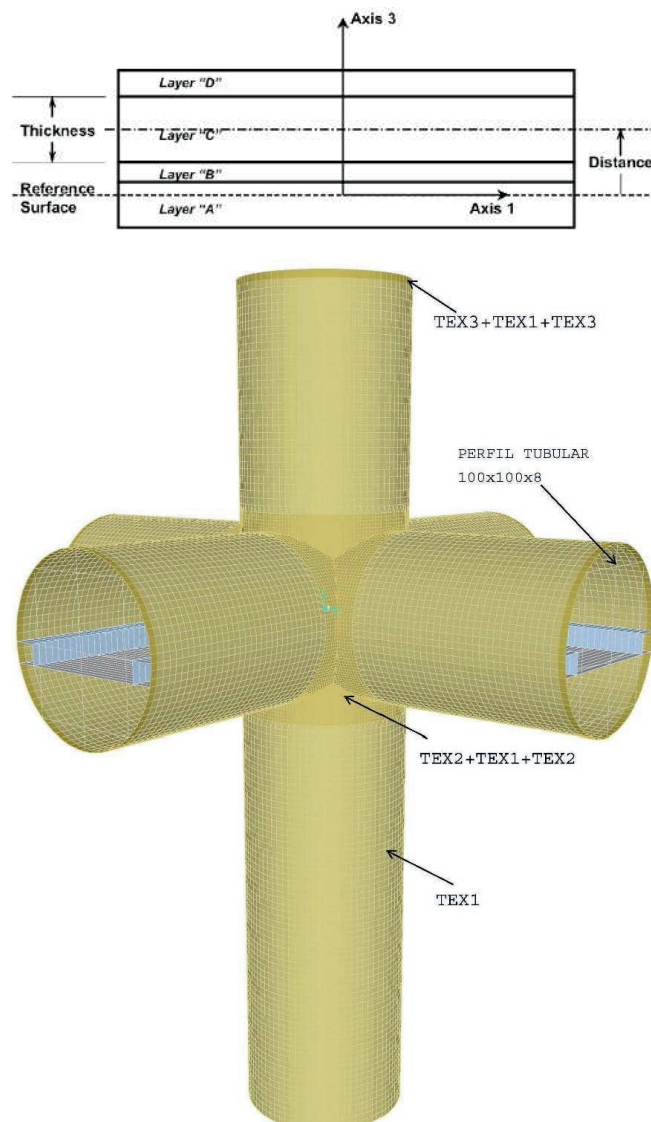


Figura 6. Arriba: Sección multicapa (Manual SAP 2000), Abajo: Elementos shells, disposición de las distintas secciones utilizadas.

Figure 6. Top: Multi-layer section (SAP Handbook 2000). Below: Shells elements, arrangement of the different sections used.

En todas ellas, se ha tomado como centro de la sección el PRFV fabricado por *filament winding*, el cual forma el cuerpo principal de la cruz de 8 mm de espesor (TEX1), añadiendo hacia la parte interior o exterior las capas

by filament winding has been taken as the center of the section, which forms the main body of the cross 8 mm thickness (TEX1), where the layers of material required to meet the strength and

de material necesarias para cubrir las necesidades resistentes y de deformación, cada una con su espesor correspondiente. En la Figura 6 se muestra la configuración de una sección multicapa genérica.

Las secciones de polímero reforzado con fibra se agrupan en función de las secciones de placa necesarias. En este sentido, la sección TEX1 (Figura 6), que configura todo el cuerpo de la Cruz, se refuerza en el punto de intersección de los brazos de la misma, en una longitud aproximada de 400 mm, con 15 TEJIDOS de 800 GR, reforzando los puntos más conflictivos de los elementos y generando la sección multicapa denominada Refuerzo Unión (TEX2+TEX1+TEX2), con unos espesores de (13+8+13 mm), y por tanto un espesor total de 34 mm. La transición entre el espesor de 8 mm y el de 34 mm se llevará a cabo en distintos escalones.

Así mismo, se refuerzan los extremos de los cuatro brazos de la cruz y la parte superior del mástil pasado el entronque, utilizando una sección multicapa de 12 TEJIDOS de 800 GR, tanto en la parte interior como exterior de la sección base, en una longitud de 200 mm, controlando el pandeo y deformaciones que generan las cargas. Esta sección multicapa se denomina Refuerzo Mástil (TEX3+TEX1+TEX3), y presenta unos espesores de (10+8+10 mm). La transición entre el espesor de 8 mm hasta obtener el espesor de 28 mm se llevará a cabo en distintos escalones.

Para el cálculo de la estructura objeto de este proyecto se consideran las acciones de acuerdo con las condiciones de uso del mismo, según el Eurocódigo 1, parte 1. Las hipótesis básicas adoptadas para el cálculo de la estructura son: Peso Propio, Concargas (losa interior de los brazos) y Viento.

Resultados Obtenidos

De forma gráfica se muestra la verificación en el modelo de los Estados Límites Últimos de la opción más desfavorable (ComboPP+VTO+CONC), mostrando la máxima tensión por Von Mises.

deformation requirements, each with a corresponding thickness, are added to the inside or outside. Figure 6 shows the configuration of a generic multi-layer section.

The fiber-reinforced polymer sections are grouped together according to the plate sections required. In this sense, the TEX1 section (Figure 6) that forms the whole body of the Cross, is being reinforced at the intersection point of its arms, with an approximate length of 400 mm, with 15 WOVEN of 800 GR, strengthening the most conflictive points of the elements, and generating a multi-layer section called Union Reinforcement (TEX2+TEX1+TEX2), with some specific thicknesses (13+8+13 mm) to generate a total thickness of 34 mm. The transition from the 8 mm to the 34 mm thickness, then, will occur in different steps.

In the same way, the ends of the four arms of the cross and the upper part of the mast are reinforced after passing the junction using a multilayer section of 12 WEAVES of 800 GR, both on the inside and outside of the base section, for a length of 200 mm, to control the buckling and deformations generated by the loads. This multilayer section is called Mast Reinforcement (TEX3+TEX1+TEX3) and has specific thicknesses (10+8+10 mm). The transition between the thickness from 8 mm to 28 mm will be conducted again in different steps.

To calculate the main structure of this project we will consider its conditions of use according to Eurocode 1, part 1. So that, the basic assumptions adopted for the calculation of the structure are: Own weight, With loads (inner slab of the arms) and Wind.

Results achieved

The verification within the model of the Ultimate Limit States shows both the most unfavorable option (ComboPP+VTO+CONC) and the maximum Von Mises stress.

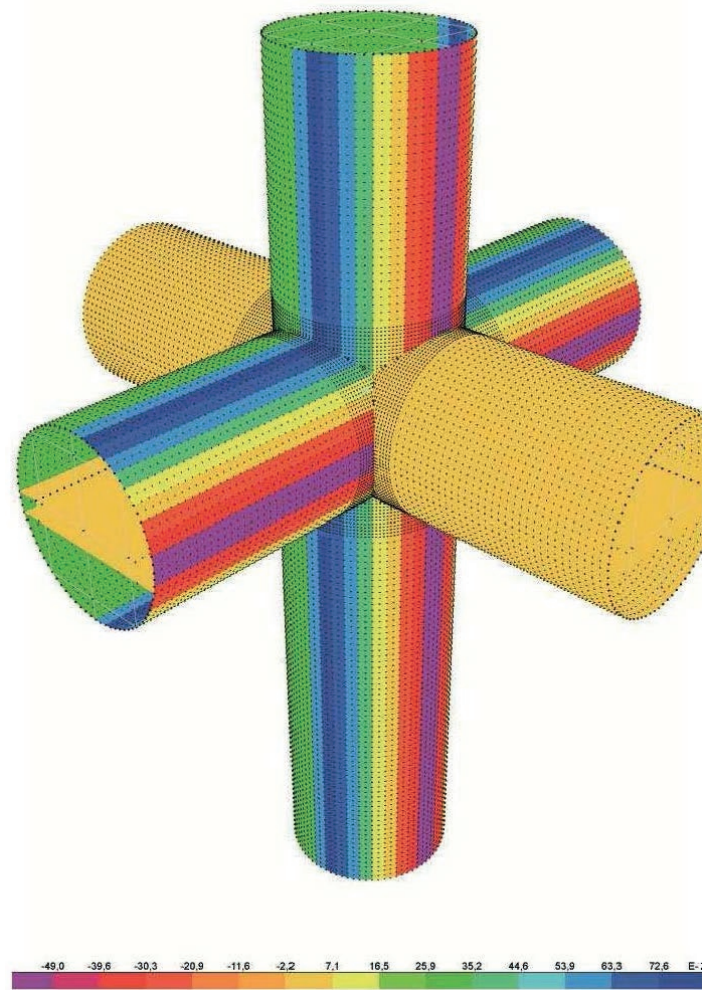
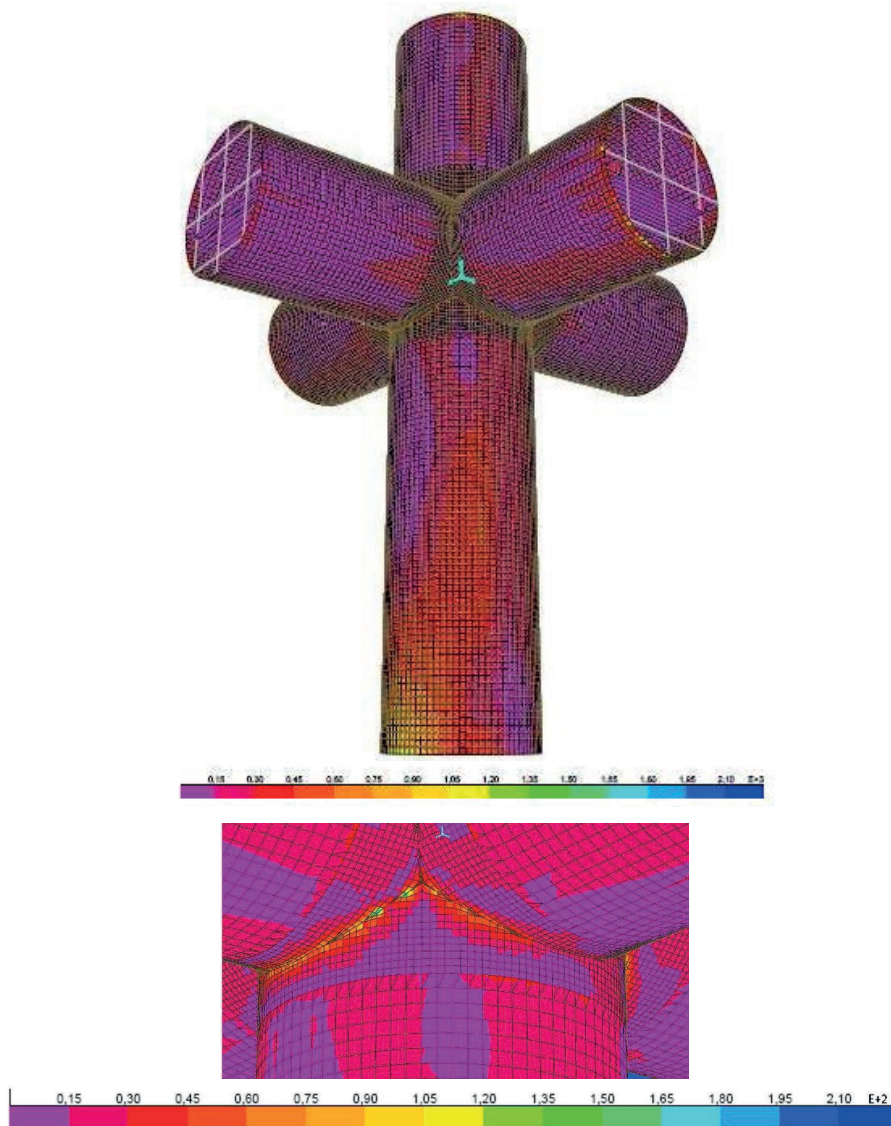


Figura 7. Distribución de presión ejercida del viento sobre la cruz MPa.

Figure 7. Distribution of wind pressure exerted on the cross MPa.

Por tanto, en vista de los resultados obtenidos, podemos apreciar cómo el elemento diseñado anteriormente está solicitado a unas tensiones inferiores a la capacidad que es capaz de resistir el material. De la misma forma se analizan los desplazamientos del elemento objeto, concretamente en los extremos de los brazos donde presenta el desplazamiento más importante. Así pues, teniendo en cuenta el Eurocódigo 1, se calcula el desplazamiento máximo que puede alcanzar

Therefore, after reviewing the results obtained, we can see how the previously designed element is exposed to stresses lower than the capacity that the material is capable of resisting. In the same way, the displacements of the object element are analyzed, specifically at the ends of the arms, as they are more significant. Having said this, and considering Eurocode 1, the maximum displacement that the cantilever can reach



Figuras 8. Distribución de las tensiones en la cruz en MPa.

Figures 8. Stress distribution in MPa at the cross.

dicho voladizo para, a continuación, poder compararlo con el modelo de estudio. En este caso, el desplazamiento máximo ha de ser menor que:

$$\frac{2 \times 700}{250} = 5,6 \text{ cm}$$

is calculated in order to compare it with the model we propose. In this case, the maximum displacement is less than:

$$\frac{2 \times 700}{250} = 5,6 \text{ cm}$$

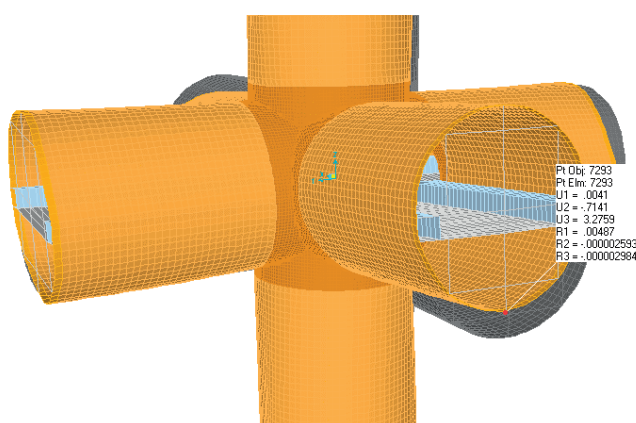


Figura 9. Desplazamiento máximo del elemento.

Figure 9. Maximum displacement of the element.

Para el caso, el elemento objeto de estudio tiene un desplazamiento máximo de 3,27 cm en el extremo de uno de los brazos, y este es inferior al permitido por el Eurocódigo 1, observándose aceptables los resultados obtenidos.

In this case, the element under study has a maximum displacement of 3.27 cm at the end of one of the arms, and this is less than what is allowed by Eurocode 1, and therefore acceptable

Pesos y comparativa con otros materiales

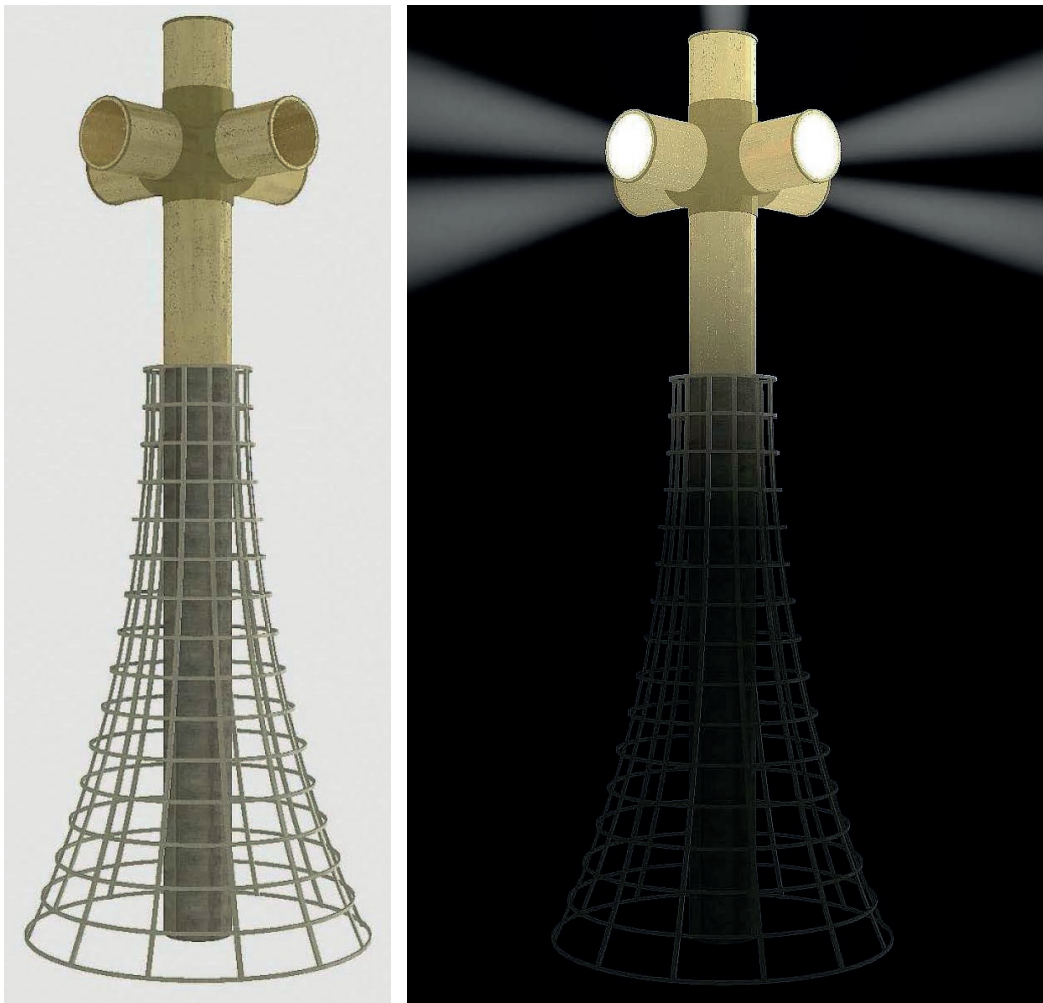
Weights and comparison with other materials

Una de las finalidades del estudio es conseguir una reducción del peso en el elemento, que posibilitara su ejecución completa en base o taller, y su posterior colocación final sobre el cimborrio. Por ello, tras el estudio del elemento a base de polímero reforzado con fibra de vidrio, se han realizado otros estudios utilizando el mismo modelo, pero con distinto material. Suponiéndolo de acero inoxidable, obtenemos un peso total de 82,13 Toneladas, frente a las 19,6 Toneladas que se obtienen al modelizar utilizando polímero reforzado con fibra de vidrio.

One of the aims of the study is to achieve a considerable reduction in the weight of the element, as this will enable its complete execution in the base or workshop, and its subsequent final placement on the dome. For this reason, after the initial study of the element using glass fiber reinforced polymer (GFRP) as a base, other studies have been conducted using the same model, but with different material. If we use stainless steel, we obtain a total weight of 82.13 tons, which is a long way from the 19.6 tons obtained by modelling it using glass fiber reinforced polymer.

Pero no únicamente la disminución en el peso es el único argumento a favor de la ejecución del elemento con polímero reforzado con fibra de vidrio, a ello habría que añadir la imposibilidad de construir el elemento con acero. Las dimensiones del elemento suponen, en primer lugar, definirlo con chapas de 2 m lineales de ancho por 16 m de largo, con la necesidad de efectuar uniones cada 2 m, con las consiguientes

However, it is not only the significant reduction in weight that is the main argument in favor of building the element with GFRP perhaps here you could say but also proving the unsustainability of building with steel. The dimensions in steel, firstly, would require the use of sheets 2 m wide and 16 m long, with the need to make joints every 2 m, with the consequent residual stresses



Figuras 10. Propuesta de modelo de la Cruz tanto de día como de noche.

Figures 10. Proposed model of the Cross by day and by night.

tensiones residuales que resultarían de la deformación de los elementos y que habría que corregir, hecho prácticamente imposible a la altura de trabajo.

CONCLUSIONES

Las consecuencias de este estudio, suponen primeramente una solución al problema planteado. Se

that would result from the deformation of the elements and which would have to be corrected, which is impossible at the working height.

CONCLUSIONS

First of all, it should be pointed out that the results of this study represent an adequate solution to the

consigue un elemento ligero con 19 toneladas de peso, el cual puede ser transportado, izado y colocado con medios existentes en este país actualmente.

De igual forma, el material compite no solo en cuanto a sus prestaciones mecánicas, sino también estéticas. El elemento, como parte singular de un todo, ofrece la posibilidad de iluminarlo por la noche con distintos tonos y colores, mostrándolo tanto de día como de noche, y ofreciendo una visión nocturna singular y ligera de la cruz dentro del conjunto de la catedral.

Por último, y tal y como se ha descrito, Gaudí tuvo desde el principio la predisposición de utilizar nuevos materiales para la construcción de la que ha sido su obra maestra. No obstante, si bien es cierto, cuando el arquitecto pensó la cruz, la definió de acero, un material innovador en el momento, pero quizá si hubiese vivido en esta época, la propuesta para el elemento hubiese sido un material compuesto, por las facilidades constructivas que aporta, por cumplir con los preceptos estéticos que tenía en mente, y por enseñar al mundo la construcción de un templo a través de los años adaptándose a la oferta del mercado y la innovación que la ingeniería aporta:

*No querría acabar la obra yo porque no convendría. Una obra así ha de ser hija de una larga época... Se ha de conservar siempre el espíritu del monumento, pero su vida ha de depender de las generaciones que se la transmiten...*¹⁴

Notas y Referencias

- ¹ Alberto T. Estévez, *Gaudí* (Madrid: Tikal, 2011), 10–15.
- ² Carles Buxadé, *La Sagrada Familia de Gaudí, principi i final* (Barcelona: Pòrtic, 2021), 12.
- ³ César García Álvarez, *Gaudí: Símbolos Del Éxtasis* (Madrid: Siruela, 2017), 191–92.
- ⁴ Joan Bassegoda i Nonell, "Símbolos y Simbolismos Ciertos y Falsos En La Obra de Antonio Gaudí," *Anales de Literatura Española*, no. 15 (2002): 231. <https://doi.org/10.14198/aleua.2002.15.15>
- ⁵ Bassegoda, "Símbolos y símbolos," 231.
- ⁶ Daniel Giralte-Miracle, *Gaudí Esencial* (Barcelona: Libros de Vanguardia, 2012), 102.
- ⁷ Isidre Puig Boada, *La Sagrada Familia Según Gaudí: Comprender Un Símbolo* (Barcelona: EL ALEPH., 2011), 47–49.
- ⁸ Puig, *La Sagrada Familia Según Gaudí: Comprender Un Símbolo*, 47–49.

problem posed. A light element with a weight of 19 tons is achieved, which is easy to build, transport, lift and place with the means and machinery currently existing in this country.

Not only does this material meet all the legal requirements but in addition, it aesthetically pleasing. The element, as a singular part of a whole, can be illuminated both day and night with different tones and colors and offering a singular and light vision of the cross within the cathedral as a whole.

Finally, as previously pointed out, Gaudí from the very outset was more than willing to use new materials for the construction of what has been his masterpiece. However, it is true that when the architect was considering the cross, he defined it in steel, an innovative material at the time. If he had lived in our time, perhaps the proposal for this element would have been a composite material, given the constructive facilities they provide, because it could have met the aesthetic precepts he had in mind and, moreover, would have taught the world how a temple can be built over the years by adapting to new technologies and materials and the innovations that engineering brings:

*I wouldn't want to finish the work myself because it wouldn't be convenient. Such a work has to be the child of a long epoch.... The spirit of the monument must always be preserved, but its life must depend on the generations who pass it on to them...*¹⁴

Notes and References

- ¹ Alberto T. Estévez, *Gaudí* (Madrid: Tikal, 2011), 10–15.
- ² Carles Buxadé, *La Sagrada Familia de Gaudí, principi i final* (Barcelona: Pòrtic, 2021), 12.
- ³ César García Álvarez, *Gaudí: Símbolos Del Éxtasis* (Madrid: Siruela, 2017), 191–92.
- ⁴ Joan Bassegoda i Nonell, "Símbolos y Simbolismos Ciertos y Falsos En La Obra de Antonio Gaudí," *Anales de Literatura Española*, no. 15 (2002): 231. <https://doi.org/10.14198/aleua.2002.15.15>
- ⁵ Bassegoda, "Símbolos y símbolos," 231.
- ⁶ Daniel Giralte-Miracle, *Gaudí Esencial* (Barcelona: Libros de Vanguardia, 2012), 102.
- ⁷ Isidre Puig Boada, *La Sagrada Familia Según Gaudí: Comprender Un Símbolo* (Barcelona: EL ALEPH., 2011), 47–49.
- ⁸ Puig Boada, *La Sagrada Familia Según Gaudí*, 47–49.

- ⁹ Joan Bassegoda i Nonell, *Gaudí: arquitectura del futur* (Barcelona: Caja de Pensiones, La Caixa: Salvat, 1984), 25.
- ¹⁰ Gabrielle Tellarini, *A. Gaudí. Architettura e Símbolo* (Roma: Luisé, 1986), 53.
- ¹¹ José vicente Gómez Serrano, *L'obrador de Gaudí* (Barcelona: Edicions U., 1986), 98.
- ¹² Serrano, *L'obrador*, 102.
- ¹³ Carles Buxadé, y Joan Margarit Consarnau, "Estructura i l'espai," en *La Recerca de La Forma*, ed. Daniel Giralt (Barcelona: Lunweg, 2002), 50.
- ¹⁴ Isidre Puig Boada, *El pensament de Gaudí* (Barcelona: Dux, 2004), 22.

- ⁹ Joan Bassegoda i Nonell, *Gaudí: arquitectura del futur* (Barcelona: Caja de Pensiones, La Caixa: Salvat, 1984), 25.
- ¹⁰ Gabrielle Tellarini, *A. Gaudí. Architettura e Símbolo* (Roma: Luisé, 1986), 53.
- ¹¹ José vicente Gómez Serrano, *L'obrador de Gaudí* (Barcelona: Edicions U., 1986), 98.
- ¹² Gómez, *L'obrador*, 102.
- ¹³ Carles Buxadé, and Joan Margarit Consarnau, "Estructura i l'espai," in *La Recerca de La Forma*, ed. Daniel Giralt (Barcelona: Lunweg, 2002), 50.
- ¹⁴ Isidre Puig Boada, *El pensament de Gaudí* (Barcelona: Dux, 2004), 22.

BIBLIOGRAPHY

- Bassegoda i Nonell, Joan, and Antoni Gaudí. *Gaudí: arquitectura del futuro*. Barcelona: Caja de Pensiones, La Caixa: Salvat, 1984.
- Bassegoda i Nonell, Joan. "Símbolos y Simbolismos Ciertos y Falsos En La Obra de Antonio Gaudí." *Anales de Literatura Española*, no. 15 (2002): 231. <https://doi.org/10.14198/aleua.2002.15.15>
- Buxadé, Carles. *La Sagrada Família de Gaudí, principi i final*. Barcelona: Pòrtic, 2021.
- Buxadé, Carles, and Joan Margarit Consarnau. "Estructura i l'espai." In *La Recerca de La Forma*, ed. Daniel Giralt. Barcelona: Lunweg, 2002.
- Estévez, Alberto T. *Gaudí*. Madrid: Tikal, 2011.
- García Álvarez, César. *Gaudí: Símbolos Del Éxtasis*. Madrid: Siruela, 2017.
- Giralt-Miracle, Daniel. *Gaudí Esencial*. Barcelona: Libros de Vanguardia, 2012.
- Gómez Serrano, José Vicente. *L'obrador de Gaudí*. Barcelona: Edicions U., 1986.
- Puig, Armand. *La Sagrada Família Según Gaudí: Comprender Un Símbolo*. Barcelona: EL ALEPH., 2011.
- Puig Boada, Isidre. *El pensament de Gaudí*. Barcelona: Dux, 2004.
- Tellarini, Gabrielle. *A. Gaudí. Architettura e Símbolo*. Roma: Luisé, 1986.

Images source

1. Archive of the Sagrada Família Temple (ATESF). 2. https://www.urbipedia.org/hoja/Bas%C3%ADlica_de_la_Sagrada_Familia (consulted 30/10/2022). 3. Data provided by the Sagrada Família technical team. 4. SAP2000 Handbook. 5, 6, 7, 8, 9, 10. By the author.