

# Structure of Biblical Proportions

High-strength concrete as a critical component in construction of the world's tallest cathedral—the Sagrada Família

by Deborah R. Huso

**W**hen builders began construction of renowned Spanish architect Antoni Gaudí's Temple of the Sagrada Família in 1882, the primary construction material was sandstone. However, concrete has always been a component of the cathedral, which is in Barcelona, Spain. In fact, Gaudí first used what was then a novel material—reinforced concrete made from portland cement—in construction of the pinnacle of the first bell towers of the Nativity façade in 1924 and 1925 (Fig. 1).

Over the course of nearly a century and a half, construction of the Gothic and Art Nouveau basilica has been affected by wars, the influenza pandemic of 1918 and 1919, and variable funding levels. But thanks to an increase in tourism prompted by Barcelona hosting the Olympic Games in 1992 and the consecration of the basilica by Pope Benedict XVI in 2010, the cathedral has increased its construction funding stream through admission fees. A 2026 completion, in commemoration of the 100th anniversary of Gaudí's death, was scheduled.

Alas, the recent COVID-19 pandemic has pushed back the schedule yet again, and *Junta Constructora del Temple Expiatori de la Sagrada Família* architect Jordi Fauli says his team has yet to establish a new schedule. Fauli is the ninth chief architect to oversee Sagrada Família's design and construction and the only one who will likely live to see it finished.

## Building per Gaudí's Plans

As construction continues on this cathedral, the tallest of the world's churches, materials have changed dramatically. Stone remains Sagrada Família's primary building component, but concrete—high-strength concrete in particular—has become a critical construction material for the cathedral in the last two decades and also helped accelerate the basilica's erection.

"Technical advances have made it possible to overcome the challenges of the past," says Fernando Villa, Director of



**Fig. 1: The Nativity façade features two 107 m (351 ft) towers flanked by 98 m (321 ft) towers. This façade was nearly completed under the direction of Gaudí (© Fundació Junta Constructora del Temple de la Sagrada Família)**



**Fig. 2: The Passion façade features two 112 m (367 ft) bell towers flanked by two 102 m (334 ft) bell towers. Behind these, six more towers are under construction** (© Fundació Junta Constructora del Temple de la Sagrada Família)



**Fig. 3: Close-up of two pinnacles of the Passion façade spires. The towers are decorated with mosaic tiles** (© Fundació Junta Constructora del Temple de la Sagrada Família)

Building and Technology for Sagrada Família. “Even though Gaudí built only a small part [of the cathedral in his lifetime], he left the path in his studies to be followed by his successors.”

Sagrada Família features a Latin cross design with five longitudinal naves and three naves forming the transept (the arms of the cross). The Nativity façade is on the northeast end of the cross, and the Passion façade is on the southwest end of the cross.

The basilica’s most prominent architectural features are its monumental spires. Gaudí’s design included 18 spires, including 12 placed in the façades, representing Christ’s apostles. Eight of the 12 spires representing the apostles are complete (Fig. 1 to 3). Four more will be constructed with the final façade—the Glory façade at the base of the cross—and six more spires are being constructed at the center of the transept (the crossing) and on top of the apse (the head of the cross). These spires are still partially concealed behind the spires on the Nativity and the Passion façades (Fig. 1 and 2), but they will soon become prominent. When completed, the four Evangelist towers will each be 135 m tall (443 ft); the Virgin Mary tower will be 138 m tall (452 ft); and the Jesus Christ tower will be 172.5 m tall (566 ft).

According to Villa, 25% of the basilica remains to be built, including finishing the central towers, the Glory façade and its spires, and a second sacristy.

### Using Concrete to Surmount Architectural Hurdles

One of the most prominent design features of Gaudí’s famous basilica is its lack of the conventional flying buttresses present in so many of Europe’s Gothic cathedrals. Gaudí’s design supports the structure’s roof, towers, and soaring large windows via the columns of the central transept and apse. Those tree-like columns and their striking “branches” are all made with a structure of high-strength reinforced concrete encased in exterior “drums” made of stone or precast concrete.

“It was necessary to meet new building [code] requirements,” says Villa. “In fact, [high-strength concrete] was the only alternative to meet new requirements for wind load while still maintaining the width of the walls and their unusual geometry. It was also the only way to withstand the compression load while maintaining the diameter of the columns defined by Gaudí.”

According to Fauli, Gaudí formulated a system of slanted columns as trees with sloping branches supporting upper levels. “He wanted to design a church without flying buttresses and only with interior columns to support [the roof, towers, and windows],” says Fauli. The thrust of the roof and the weight of the central towers is resisted by those branching internal columns. All the columns have varying systems of proportions in diameters and in slenderness established by Gaudí. The columns of his original model of the main nave follow this system, as do the new columns of the transept and of the apse (Fig. 4).





(a)



(b)

**Fig. 4:** The interior of the cathedral is a celebration of light: (a) Tree-like columns and their “branches” line the main nave, seen here looking toward the apse. Four types of columns have been constructed: columns on each of the four corners of the crossing support the Jesus Christ tower and partially the weight of four Evangelist towers; columns that bear the main load of the four Evangelist towers; columns in the apse and naves; and columns that separate the side naves from the main nave; and (b) The longitudinal nave on the Nativity façade side of Sagrada Família features stained glass windows that gradually transition from yellow to green to deep blue (© Fundació Junta Constructora del Temple de la Sagrada Família)

The architects who have taken up Gaudí’s mantle in the nearly 100 years since his death have based construction on a 1:10 scale plaster model of the main nave the Catalan architect built while studying and perfecting his design. “He designed plaster models of everything,” says Fauli. “When we built the main nave, we tried to reproduce [his plaster model].”

All of the columns have an exterior “drum,” as Fauli calls it, shaped by a piece of stone or precast concrete. Inside the drum, workers placed high-strength concrete over reinforcing steel. Thus, the precast concrete or stone, depending on which one is used in the column’s façade, was also used as a permanent form (Fig. 5 and 6).

The 56 columns rising from the ground floor that assume the place of flying buttresses are also unique in

being grouped at different heights to provide the appearance of trees and tree branches (Fig. 4). The columns and branches transfer the weight of the vaulted structure and central towers above into the building’s foundation. These columns were built from a variety of different stone classes, according to Fauli, with reinforced concrete on the inside as previously noted. The columns of the branches were built with precast concrete drum pieces for the exterior and reinforced concrete on the inside.

Fauli says his team built the columns with stone or precast concrete pieces on the exterior and reinforced concrete inside, using high-strength concrete in the more crucial columns as well as in most of the crossing and apse. “In the main nave, we managed to construct all the columns with normal reinforced concrete inside,” Fauli says, “but in the



**Fig. 5:** Construction of the interior columns was completed inside the existing façades between 1991 and 2003 (© Fundació Junta Constructora del Temple de la Sagrada Família)



**Fig. 6: Stone or precast concrete exterior “drums” were used to form the trunks and branches with reinforced concrete cores** (© *Fundació Junta Constructora del Temple de la Sagrada Família*)

crossing, we needed to use the high-strength concrete.”

To build the branches of the transept and apse columns, workers employed precast pieces of white concrete with different colors to construct the exterior surface of the columns (“drums”) and to achieve the same look as the stone columns on the ground floor. The structural system of columns also allows openings in the vaults for the skylights that fill the interior of the cathedral with striking bands of natural light. Those skylights, designed by Gaudí in the 1920s, are in the unique shape of a hyperboloid—reportedly the first such use of this form in the history of architecture.

### Concrete Placements at Soaring Heights

Sagrada Família’s history of stops and starts in construction meant that by the time Fauli came on the job as Junior Architect in 1990, only three of the planned 56 interior columns had been built. High-strength concrete (characteristic strength of 80 MPa [11,600 psi]; 7-day compressive strength of 45 MPa [6500 psi]) was first employed in the cathedral’s construction in 1998. High-strength white concrete has also

been used to provide the base of the central dome (placed at a height of 80 m [262 ft]) as well as in construction of the central towers.

With the help of lightweight fiberglass molds coated with a wax-based form release agent, workers have been able to form many parts of the cathedral, like the lateral vaults and elements of the central dome, in-place, even at great heights. Other components have been prefabricated off-site.

Weight remains a perennial concern in construction of the basilica. The inclined columns or “tree trunks” that branch into innumerable smaller branches hold up the far heavier vaults and roofs and transfer the load to the foundation. The vaults will support the cathedral’s central towers, all of them three times taller than the vaults on which they rest. This creates mass at a great distance from the ground and would make the structure vulnerable to earthquakes. “The use of reinforced concrete in the church since 1985 has been calculated to support seismic movements,” Fauli explains. “In the central towers, for example, the big panels of stone tensioned by steel bars will resist earthquakes, and a standing structure of steel



profiles and reinforced concrete placed in the corners joins the panels and ensures resistance to seismic forces.”

In this respect, reinforced high-strength concrete has enabled simpler, lighter, and faster construction of Sagrada Família’s complex geometries while still supporting a massive compression load without having to bulk up the diameters of the tree-like and ethereal branches and columns that grace the church’s interior.

Since 2010, Germany-based Heidelberg Cement Group’s subsidiary Hanson Hispania has been the structure’s major concrete supplier when large volumes are needed, though the initial mixture for the white high-strength concrete was provided by Master Builders Solutions. Several other firms have supplied concrete as well, including PROMSA and Escofet. Normally, the concrete is fabricated in the on-site concrete production plant at the Sagrada Família.

According to Villa, the mixture proportions for the high-strength concrete components are:

- 475 kg/m<sup>3</sup> (800 lb/yd<sup>3</sup>) of cement;
- 1030 kg/m<sup>3</sup> (1736 lb/yd<sup>3</sup>) of gravel (5 to 12 mm [0.2 to 0.5 in.]);
- 800 kg/m<sup>3</sup> (1348 lb/yd<sup>3</sup>) of sand (0 to 5 mm [0 to 0.2 in.]);
- 30 kg/m<sup>3</sup> (51 lb/yd<sup>3</sup>) of microsilica (silica fume);
- 150 kg/m<sup>3</sup> (252 lb/yd<sup>3</sup>) of water; and
- 12 L/m<sup>3</sup> (2.4 gal./yd<sup>3</sup>) of high-range water-reducing admixture.

When white concrete is employed, suppliers must be careful to avoid changes in color and texture. Thus, the concrete trucks must be cleaned thoroughly before each new batch is loaded.

## Building the Basilica’s Final Pieces

The Glory façade, which will be at the base of the cathedral’s Latin cross design, will be made up mostly of stone but with elements cast in gray high-strength concrete. Sixteen vast stone hyperboloids will be supported with slanted tree-like columns of stone (the same prestressed stone used for the central towers), with vaults and arches of high-strength reinforced concrete.

Workers began constructing the six central towers in 2014. The faces of the towers consist of prestressed stone with the bars placed inside, but the structural part used to join the different stone panels together is steel and high-strength concrete. The first stone panel of the towers was placed in 2016. The main structure of the Evangelist towers, the Virgin Mary tower, and the Jesus tower will be composed of this prestressed, post-tensioned (with ultra-high-strength stainless



**Fig. 7: Construction of central towers using prestressed stone panels reinforced by stainless steel columns joined with high-strength concrete** (© Fundació Junta Constructora del Temple de la Sagrada Família)

steel rods) polychrome stone from quarries at various locations in Europe, selected to mimic the look of the original Montjuïc sandstone Gaudí employed in the cathedral’s construction during his lifetime. Nine hundred prestressed stone panels reinforced by stainless steel columns make up the six towers.

Following Gaudí’s proposals for the future, architects based the design of the towers on the dome of the sacristy (it exists in an original Gaudí model), essentially stretching its design to the great heights of the towers. The dome of the sacristy and the towers are the intersection of paraboloids that contain triangular windows. The sacristy features five floors, but current technology has allowed for their elimination in the central towers, according to Fauli. The Virgin Mary and Jesus Christ tower structures will envelop a free space of 60 m (197 ft) with no floors.

Fauli explains that the panels made of stone and steel are produced and preassembled at a staging facility outside of Barcelona. Once the panels of stone and steel are placed on-site (Fig. 7), crews place the high-strength concrete mixture that joins the panels.

High-strength white concrete partially coated by blue ceramic pieces will make up the main part of the terminal or pinnacle of the Virgin Mary tower. Villa says the team selected white concrete both for its texture and high resistance to weather phenomena. Fauli confirms the Virgin Mary tower will be completed by the end of 2021.

The 14 corners of the stone panels are composed of high-strength concrete, and portions of the tower are composed of concrete as well. “The pinnacle is shaped in three parts,” explains Fauli. “The first 6 meters [feature] a stone exterior with an internal structure of reinforced concrete,

while the next 18 meters are composed of a pinnacle of reinforced concrete partially coated by ceramic.” Lastly, at the top will be a 12-pointed star of steel and textured glass that will be prefabricated in a factory as well as on-site and then lifted into place using a crane.

The Evangelist towers will feature traditional biblical representations like the man, the lion, the bull, and the eagle, all winged, on the pinnacles. The wings of the eagle will have a span of 7 m (23 ft) and will be built with prefabricated, white high-strength concrete. The Jesus Christ tower will be the tallest and will be topped by a 17 m (56 ft) tall cross.

### A Century and a Half in the Making

The Sagrada Família was designated a UNESCO World Heritage Site in 2005. It currently occupies about 9700 m<sup>2</sup> (104,400 ft<sup>2</sup>). When fully completed, its footprint will consume an entire city block, and it will be the tallest cathedral in the world.

Fauli says the more than 140 years it has taken to build the Sagrada Família has been a blessing in disguise in many ways. “Gaudí would have had to use massive materials to build the cathedral,” he explains. “We now have the opportunity to find the best technique for each element. We are building the

central towers, for example, with prestressed stone. If we’d built them 20 years before, it would not have been possible.”

But as Fauli points out, Gaudí was always trying to take advantage of new building materials. He built one of the spires of the Nativity façade in concrete coated with color ceramic pieces. “[The Sagrada Família] was a challenge for the future,” Fauli says. “Gaudí was always thinking in the future and about new techniques that would assist construction.”

Selected for reader interest by the editors.



**Deborah R. Huso** is Creative Director and Founding Partner of WWM, Charlottesville, VA, USA. She has written for a variety of trade and consumer publications, such as *Precast Solutions*, *U.S. News and World Report*, *Concrete Construction*, and *Construction Business Owner*. She has provided website development and content strategy for several Fortune 500 companies, including Norfolk Southern and GE.

# The NEW ACI Detailing Manual

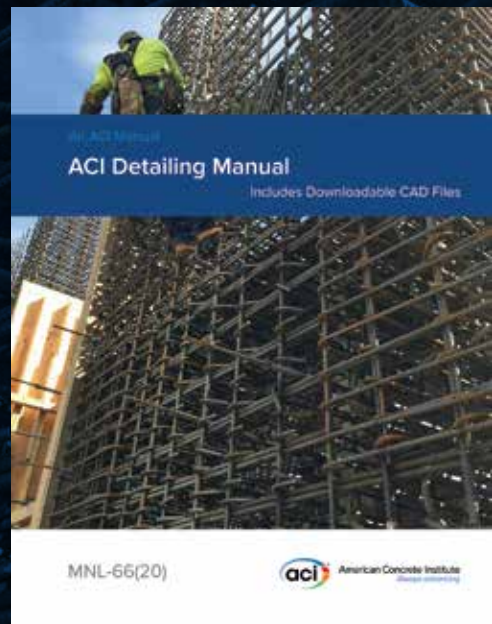
## Includes FREE Downloadable CAD Files

The 2020 edition of the *ACI Detailing Manual* includes many new updates and revisions, plus the addition of valuable downloadable CAD files.

Visit [concrete.org/store](https://concrete.org/store) for more information.



American Concrete Institute  
*Always advancing*





# Estructura de proporciones bíblicas

*Concreto de alta resistencia como componente crucial en la construcción de la catedral más alta del mundo, la Sagrada Família.*

por Deborah R. Huso

Cuando en 1882, los obreros comenzaron la construcción del renombrado Templo de la *Sagrada Família* del arquitecto español Antoni Gaudí, el principal material de construcción era la piedra arenisca. Sin embargo, el concreto siempre ha sido un componente de la catedral, ubicada en Barcelona, España. De hecho, Gaudí utilizó por primera vez lo que entonces era un material novedoso – el concreto reforzado hecho de cemento portland– en la construcción del pináculo de los primeros campanarios de la fachada del Nacimiento en 1924 y 1925 (Fig. 1).

A lo largo de casi un siglo y medio, la construcción de la basílica de estilo gótico y Art Nouveau se ha visto afectada por las guerras, la pandemia de la influenza de 1918 y 1919, y a la variabilidad del financiamiento. Pero gracias a un aumento del turismo impulsado por la celebración de los Juegos Olímpicos en 1992 y a la consagración de la basílica por el Papa Benedicto XVI en 2010, la catedral ha aumentado su flujo de financiamiento para su construcción a través de las tarifas de entrada. Se prevé su finalización en el año 2026, en la conmemoración del centenario de la muerte de Gaudí. Por desgracia, la reciente pandemia de COVID-19 ha retrasado de nuevo la programación, y el arquitecto de la *Junta Constructora del Temple Expiatori de la Sagrada Família*, Jordi Fauli, ha dicho que su equipo aún no ha establecido una nueva fecha.

Fauli es el noveno arquitecto en jefe que supervisa el diseño y la construcción de la *Sagrada Família* y el único que probablemente vivirá para verla terminada.



**Fig. 1:** La fachada del Nacimiento presenta dos torres de 107 m (351 pies) flanqueadas por torres de 98 m (321 pies). Esta fachada fue casi terminada bajo la dirección de Gaudí (© Fundació Junta Constructora del Temple de la Sagrada Família)

## Construcción según los planos de Gaudí

A medida que avanza la construcción de esta catedral, la más alta del mundo, los materiales han cambiado radicalmente. La piedra sigue siendo el principal componente de la *Sagrada Família*, pero el concreto, en particular el de alta resistencia, se ha convertido en las últimas décadas en un material de construcción fundamental de la catedral y ha contribuido a acelerar la construcción de la basílica.

“Los avances técnicos han permitido superar los retos del pasado”, dice Fernando Villa, Director de Construcción y Tecnología de la *Sagrada Família*. “Aunque Gaudí sólo construyó una pequeña parte [de la catedral en vida], dejó el camino en sus estudios para que lo siguieran sus sucesores”.

La *Sagrada Família* presenta un diseño de cruz latina con cinco naves longitudinales y tres naves que forman el transepto (los brazos de la cruz). La fachada del Nacimiento está en el extremo noreste de la cruz, y la fachada de la Pasión está en el extremo suroeste de la misma.

Las características arquitectónicas más destacadas de la basílica son sus monumentales torres y chapiteles. El diseño de Gaudí comprendía 18 chapiteles, incluyendo 12 colocados en las fachadas, representando a los apóstoles de Cristo. Ocho de los 12 chapiteles que representan a los apóstoles están completos (Fig. 1 a 3). Cuatro más se construirán con la fachada final –la fachada de la Gloria en la base de la cruz– y seis chapiteles más se están construyendo en el centro del transepto y en la parte superior del ábside (la cabeza de la cruz). Estos chapiteles siguen estando parcialmente ocultos detrás de los chapiteles de las fachadas del Nacimiento y de la Pasión (Fig. 1 y 2), pero pronto serán visibles.



**Fig. 2:** La fachada de la Pasión presenta dos campanarios de 112 m (367 pies) flanqueados por dos campanarios de 102 m (334 pies). Detrás de estos, seis torres más están en construcción (© Fundació Junta Constructora del Temple de la Sagrada Família)



**Fig. 3:** Detalle de dos pináculos de las agujas de la fachada de la Pasión. Las torres están decoradas con mosaicos (© Fundació Junta Constructora del Temple de la Sagrada Família)



Cuando estén terminadas, las cuatro torres de los Evangelistas tendrán 135 m (443 pies) de altura cada una; la torre de la Virgen María tendrá 138 m (452 pies) de altura; y la torre de Jesucristo tendrá 172.5 m (566 pies) de altura.

Según Villa, queda por construir el 25% de la basílica incluyendo el acabado de las torres centrales, la fachada de la Gloria y sus chapiteles, y una segunda sacristía.

## Uso del concreto para superar los obstáculos arquitectónicos

Una de las características de diseño más destacadas de la famosa basílica de Gaudí, es la ausencia de los arbotantes convencionales presentes en muchas catedrales góticas de Europa. El diseño de Gaudí sostiene la estructura del tejado, las torres y los altísimos ventanales a través de las columnas del transepto central y del ábside. Esas columnas en forma de árbol y sus llamativas “ramas” están todas hechas con una estructura de concreto reforzado de alta resistencia, encerrada en “tambores” exteriores de piedra o de concreto.

“Era necesario cumplir los nuevos requisitos [del código] de construcción”, dice Villa. “De hecho, [el concreto de alta resistencia] era la única alternativa para cumplir los nuevos requisitos de carga de viento y mantener la amplitud de los muros y su inusual geometría. También era la única manera de soportar la carga de compresión manteniendo el diámetro de las columnas definido por Gaudí.”

Según Fauli, Gaudí formuló un sistema de columnas inclinadas como árboles con ramas en pendiente que sostienen los niveles superiores. “Quería diseñar una iglesia sin arbotantes y sólo con columnas interiores para sostener [el tejado, las torres y las ventanas]”, dice Fauli. El empuje del techo y el peso de las torres centrales es soportado por esas columnas interiores ramificadas. Todas las columnas tienen diferentes sistemas de proporciones de diámetros y de esbeltez establecidos

por Gaudí. Las columnas de su modelo original de la nave principal siguen este sistema, al igual que las nuevas columnas del transepto y del ábside (Fig. 4).

Los arquitectos que han retomado el manto de Gaudí en los casi 100 años desde su muerte han basado la construcción en un modelo de yeso a escala 1:10 de la nave principal que el arquitecto catalán construyó mientras estudiaba y perfeccionaba su diseño. “Diseñaba modelos de yeso de todo”, dice Fauli. “Cuando construimos la nave principal, intentamos reproducir [su modelo de yeso]”.

Todas las columnas tienen un “tambor” exterior, como lo llama Fauli, formado por una pieza de piedra o de concreto prefabricado. En el interior del tambor, los trabajadores colocaron concreto de alta resistencia sobre el acero de refuerzo. Así, el concreto prefabricado o la piedra, según el que se utilice en la fachada de la columna, se utilizó también como un encofrado permanente (Fig. 5 y 6).

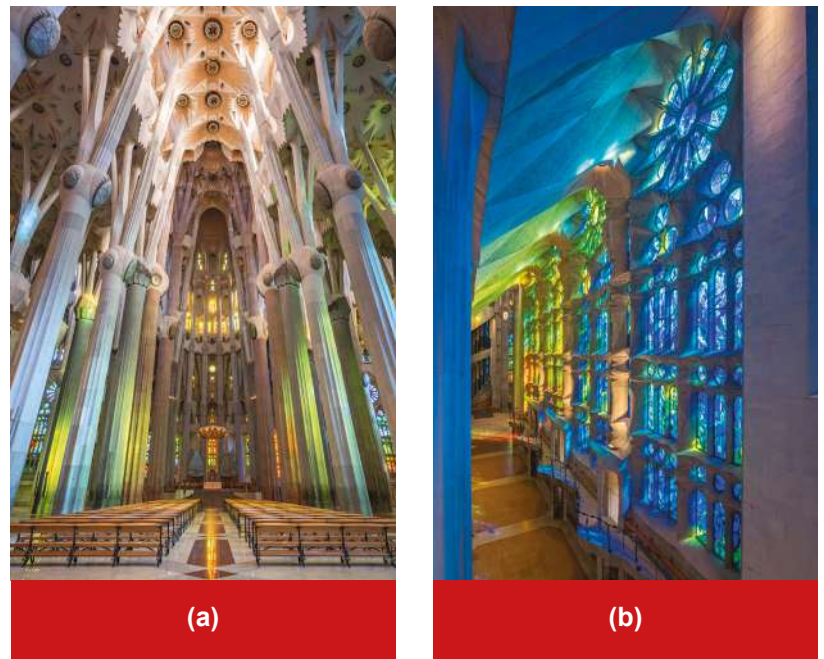


Fig. 4: El interior de la catedral es una celebración a la luz: (a) Las columnas en forma de árbol y sus “ramas” bordean la nave principal, vista aquí mirando hacia el ábside. Se han construido cuatro tipos de columnas: las columnas en cada una de las cuatro esquinas del travesaño que soportan la torre de Jesucristo y parcialmente el peso de las cuatro torres de los Evangelistas; las columnas del ábside y de las naves; y las columnas que separan las naves laterales de la nave principal. (b) La nave longitudinal del lado de la fachada del Nacimiento de la *Sagrada Família* presenta vitrales que pasan gradualmente del amarillo al verde y al azul intenso. (© Fundació Junta Constructora del Temple de la Sagrada Família)

Las 56 columnas que se elevan desde la planta baja y que ocupan el lugar de los arbotantes son también únicas al estar agrupadas a diferentes alturas con el fin de dar la apariencia de árboles y sus ramas (Fig. 4). Las columnas y las ramas transfieren el peso de la estructura abovedada y las torres centrales superiores a los cimientos del edificio. Estas columnas se construyeron con diversas clases de piedra, según Fauli, con concreto reforzado en el interior, como ya se ha señalado anteriormente. Las columnas de las ramas se construyeron con piezas de concreto prefabricado para el exterior y de concreto reforzado en el interior.

Fauli dice que su equipo construyó las columnas con piezas de piedra o de concreto prefabricado en exterior y con concreto reforzado en el interior, utilizando concreto de alta resistencia en las columnas más importantes, así como en la mayor parte del transepto y del ábside. “En la nave principal, conseguimos construir todas las columnas con concreto reforzado normal en el interior”, dice Fauli, “pero en el travesaño, necesitábamos usar el concreto de alta resistencia”.

Para la construcción de las ramas de las columnas del transepto y del ábside, los trabajadores emplearon piezas prefabricadas de concreto blanco con diferentes colores para construir la superficie exterior de las columnas (“tambores”) y lograr el mismo aspecto que las columnas de piedra en la planta baja. El sistema estructural de las columnas también permite que se abran las bóvedas para los tragaluces que llenan el interior de la catedral con llamativas bandas de luz natural. Estos tragaluces, diseñados por Gaudí en la década de 1920, tienen la singular forma de un hiperboloide, según se dice, fue la primera vez que se usó esta forma en la historia de la arquitectura.



**Fig. 5:** La construcción de las columnas interiores se completó por dentro de las fachadas existentes entre 1991 y 2003 (© Fundació Junta Constructora del Temple de la Sagrada Família)



**Fig. 6:** Se utilizaron “tambores” exteriores de piedra o de concreto prefabricado para formar los troncos y las ramas con núcleos de concreto reforzado (© Fundació Junta Constructora del Temple de la Sagrada Família)





## Colocación de concreto a enormes alturas

La historia de las interrupciones y reinicios en la construcción de la *Sagrada Família* significó que, cuando en 1990 Fauli se incorporó al trabajo como arquitecto junior, sólo se habían construido tres de las 56 columnas interiores planeadas. En 1998, por primera vez se utilizó concreto de alta resistencia (resistencia característica de 80 MPa [11.600 psi]; con resistencia a la compresión a los 7 días de 45 MPa [6500 psi]) en la construcción de la catedral. También se ha utilizado concreto blanco de alta resistencia para la base de la bóveda central (colocada a una altura de altura de 80 m [262 pies]), así como en la construcción de las torres centrales.

Con la ayuda de moldes ligeros de fibra de vidrio recubiertos con un agente desmoldante a base de cera, los trabajadores han podido moldear in situ muchas partes de la catedral, como las bóvedas laterales y los elementos de la cúpula central, incluso a grandes alturas. Otros componentes se han prefabricado fuera de la obra.

El peso sigue siendo una preocupación constante en la construcción de la basílica. Las columnas inclinadas o “truncos de árbol” que se ramifican en innumerables ramas más pequeñas, sostienen las bóvedas y los techos, mucho más pesados,

y transfieren la carga a los cimientos. Las bóvedas soportarán las torres centrales de la catedral, todas ellas tres veces más altas que las bóvedas sobre las que descansan. Esto crea una masa a una gran distancia del suelo y haría que la estructura sea vulnerable a los terremotos. “Desde 1985, la utilización de concreto reforzado en la iglesia se ha calculado para soportar los movimientos sísmicos”, explica Fauli. “En las torres centrales, por ejemplo, los grandes paneles de piedra tensados por barras de acero resistirán los terremotos, y una estructura vertical de perfiles de acero y concreto reforzado colocada en las esquinas une los paneles y asegura la resistencia a las fuerzas sísmicas”.



Fig. 7: Construcción de las torres centrales usando paneles de piedra pretensados reforzados mediante columnas de acero inoxidable unidas con concreto de alta resistencia © Fundació Junta Constructora del Temple de la Sagrada Família

En este sentido, el concreto armado de alta resistencia ha permitido una construcción más sencilla, ligera y rápida de las complejas geometrías de la *Sagrada Família*, al mismo tiempo que soporta una enorme carga de compresión sin tener que aumentar los diámetros de las ramas y columnas arbóreas y etéreas que adornan el interior de la iglesia.

Desde 2010, la filial del Heidelberg Cement Group con sede en Alemania, Hanson Hispania, ha sido el principal proveedor de concreto de la estructura cuando se necesitan grandes volúmenes, aunque la mezcla inicial para el concreto blanco de alta resistencia fue suministrada por Master Builders Solutions. Algunas otras compañías también han suministrado concreto, entre ellas PROMSA y Escofet. Generalmente, el concreto se fabrica en la planta de producción in situ de la *Sagrada Família*.

Según Villa, los proporcionamientos de mezcla para los componentes del concreto de alta resistencia son:

- 475 kg/m<sup>3</sup> (800 lb/yd<sup>3</sup>) de cemento;
- 1030 kg/m<sup>3</sup> (1736 lb/yd<sup>3</sup>) de grava (5 a 12 mm [0,2 a 0,5 pulg.]);
- 800 kg/m<sup>3</sup> (1348 lb/yd<sup>3</sup>) de arena (0 a 5 mm [0 a 0.2 in.]);
- 30 kg/m<sup>3</sup> (51 lb/yd<sup>3</sup>) de microsílíce (humo de sílice);
- 150 kg/m<sup>3</sup> (252 lb/yd<sup>3</sup>) de agua; y
- 12 L/m<sup>3</sup> (2.4 gal./yd<sup>3</sup>) de aditivo reductor de agua de alto rango.

Cuando se emplea concreto blanco, los proveedores deben tener cuidado para evitar cambios de color y textura. Así, los camiones de concreto deben limpiarse a fondo antes de cargar cada nuevo lote.

## Construcción de las últimas piezas de la Basílica

La fachada de la Gloria, que estará al pie del diseño de la cruz latina de la catedral, será hecha en su mayor parte de piedra, pero con elementos colados de concreto gris de alta resistencia. Dieciséis grandes hiperboloides de piedra se apoyarán en columnas inclinadas en forma de árbol (la misma piedra pretensada usada para las torres centrales), con bóvedas y arcos de concreto reforzado de alta resistencia. Los trabajadores comenzaron a construir las seis torres centrales en 2014. Las caras de las torres consisten en piedra pretensada con las barras colocadas en el interior, pero la parte estructural utilizada para unir los diferentes paneles de piedra es de acero y concreto de alta resistencia. El primer panel de piedra de las torres se colocó en 2016. La estructura principal de las torres de los Evangelistas, la torre de la Virgen María y la torre de Jesús se compondrá de esta piedra policromada pre y postensada (con varillas de acero inoxidable de ultra

alta resistencia) procedente de canteras de diversas locaciones en Europa, seleccionada para imitar el aspecto de la piedra arenisca original de Montjuic que Gaudí empleó en la construcción de la catedral durante su vida. Las seis torres están conformadas por 900 paneles de piedra pretensada reforzados por columnas de acero inoxidable.

Siguiendo las propuestas de Gaudí para el futuro, los arquitectos basaron el diseño de las torres en la bóveda de la sacristía (que existe en una maqueta original de Gaudí), extendiendo esencialmente su diseño a las grandes alturas de las torres. La bóveda de la sacristía y las torres son la intersección de paraboloides que contienen ventanas triangulares. En la sacristía hay cinco pisos, pero la tecnología actual ha permitido eliminarlas en las torres centrales, según Fauli. Las estructuras de las torres de la Virgen María y de Jesucristo abarcarán un espacio libre de 60 m (197 pies) sin pisos.

Fauli explica que los paneles de piedra y acero son producidos y preensamblados en una instalación de montaje a las afueras de Barcelona. Una vez instalados los paneles de piedra y acero (Fig. 7), los equipos colocan el concreto de alta resistencia que une los paneles.

El concreto blanco de alta resistencia, parcialmente recubierto por piezas cerámicas azules conformarán la parte principal de la terminal o pináculo de la torre de la Virgen María. Villa dice que el equipo seleccionó el concreto blanco tanto por su textura como por su alta resistencia a los fenómenos meteorológicos. Fauli confirma que la torre de la Virgen María estará terminada a finales de 2021.

Las 14 esquinas de los paneles de piedra están compuestas por concreto de alta resistencia, y algunas partes de la torre están compuestas también de concreto. “El pináculo está conformado en tres partes”, explica Fauli. “Los primeros 6 metros [presentan] un exterior de piedra con una estructura interna de concreto reforzado, mientras que los siguientes 18 metros se componen de un pináculo de concreto reforzado parcialmente recubierto de cerámica”. Por último, en la estrella de 12 puntas de acero y vidrio texturizado que será prefabricada en una planta y en la propia obra, y que luego será colocada con una grúa.

Los pináculos en las torres de los Evangelistas contarán con representaciones bíblicas tradicionales, como el hombre, el león, el toro y el águila, todos con alas. Las alas del águila tendrán una envergadura de 7 m y se construirán con concreto blanco de alta resistencia prefabricado. La torre de Jesucristo será la más alta y estará coronada por una cruz de 17 m (56 pies) de altura.



## Un siglo y medio de historia

La *Sagrada Familia* fue declarada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en 2005. Actualmente ocupa unos 9700 m<sup>2</sup> (104,400 pies<sup>2</sup>). Cuando esté completamente terminada, su superficie ocupará una manzana completa de la ciudad y será la catedral más alta del mundo.

Fauli dice que los más de 140 años que ha tomado la construcción de la *Sagrada Familia* ha sido una bendición en muchos sentidos. “Gaudí habría tenido que utilizar materiales masivos para construir la catedral”, explica. “Ahora tenemos la oportunidad de encontrar la mejor técnica para cada elemento. Estamos construyendo las torres centrales, por ejemplo, con piedra pretensada. Si hubiéramos construido 20 años antes, esto no habría sido posible”.

Pero, como señala Fauli, Gaudí siempre intentaba aprovechar los nuevos materiales de construcción. Construyó una de las agujas de la fachada del Nacimiento en concreto revestido con piezas de cerámica de colores. “[La *Sagrada Familia*] fue un reto para el futuro”, dice Fauli. “Gaudí siempre pensaba en el futuro y en las nuevas técnicas que ayudarían a la construcción”.



**Deborah R. Huso**, es Directora Creativa y socia fundadora de WWM, Charlottesville VA, EUA. Ha escrito para diversas publicaciones de negocios y de consumo, como publicaciones comerciales y de consumo, como Precast Solutions, U.S. News and World World Report, Concrete Construction, y Construction Business Owner. Ella ha creado sitios web y estrategias de contenido para varias empresas de la lista Fortune 500, incluyendo Norfolk Southern y GE.

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo Noreste de México

*Título: Estructura de proporciones bíblicas*



*Traductor:*  
Lic. Iliana Garza Gutiérrez



*Revisor Técnico:*  
Ing. Elissa Narro Aguirre