Estructura sobre rasante de la torre Diagonal ZeroZero

Diagonal ZeroZero Tower: structure above ground level

Julio Martínez Calzón[1], Luca Ceriani[2], Pietro Bartalotta[2]

Recibido | *Received:* 22-03-2012
Aceptado | *Accepted:* 23-06-2012

Resumen

La torre ZeroZero, de 27 plantas (24 sobre rasante), tiene una altura de 118 m (110 m sobre rasante) y un esquema estructural de tipo "tubo en tubo", constituido por la colaboración, a través de las losas de planta, de un doble sistema tubular vertical compuesto por el núcleo y la fachada. Aunque el primero representa el elemento resistente más importante para hacer frente a las acciones horizontales, resulta esencial la contribución de las fachadas, formadas por un doble conjunto de soportes interiores y elementos inclinados exteriores.

Palabras clave: edificio en altura, tubo en tubo, forjado postesado, estructura metálica, inestabilidad.

Abstract

The 27-storey high ZeroZero tower (of which 25 floors are above ground level) reaches a height of 118 m (110 m above ground level). Its basic structural arrangement corresponds to a "tube-in-tube" type system, consisting of a double vertical tube system formed by the inner core working together with the structural facade, connected through the floor slabs. Even though the core is the fundamental lateral load resisting system, the contribution of the facade, formed by a double assembly of inner vertical columns and outer sloping elements, is essential..

Keywords: *high-rise building, tube in tube, post-tensioned slab, steel structure, buckling.*

(1) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Estudio de Ingeniería, S.L. (Madrid, España).
(2) Ingeniero Civil. MC2 Estudio de Ingeniería, S.L. (Madrid, España).

Persona de contacto / *Corresponding author:* luca.ceriani@mc2.es

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

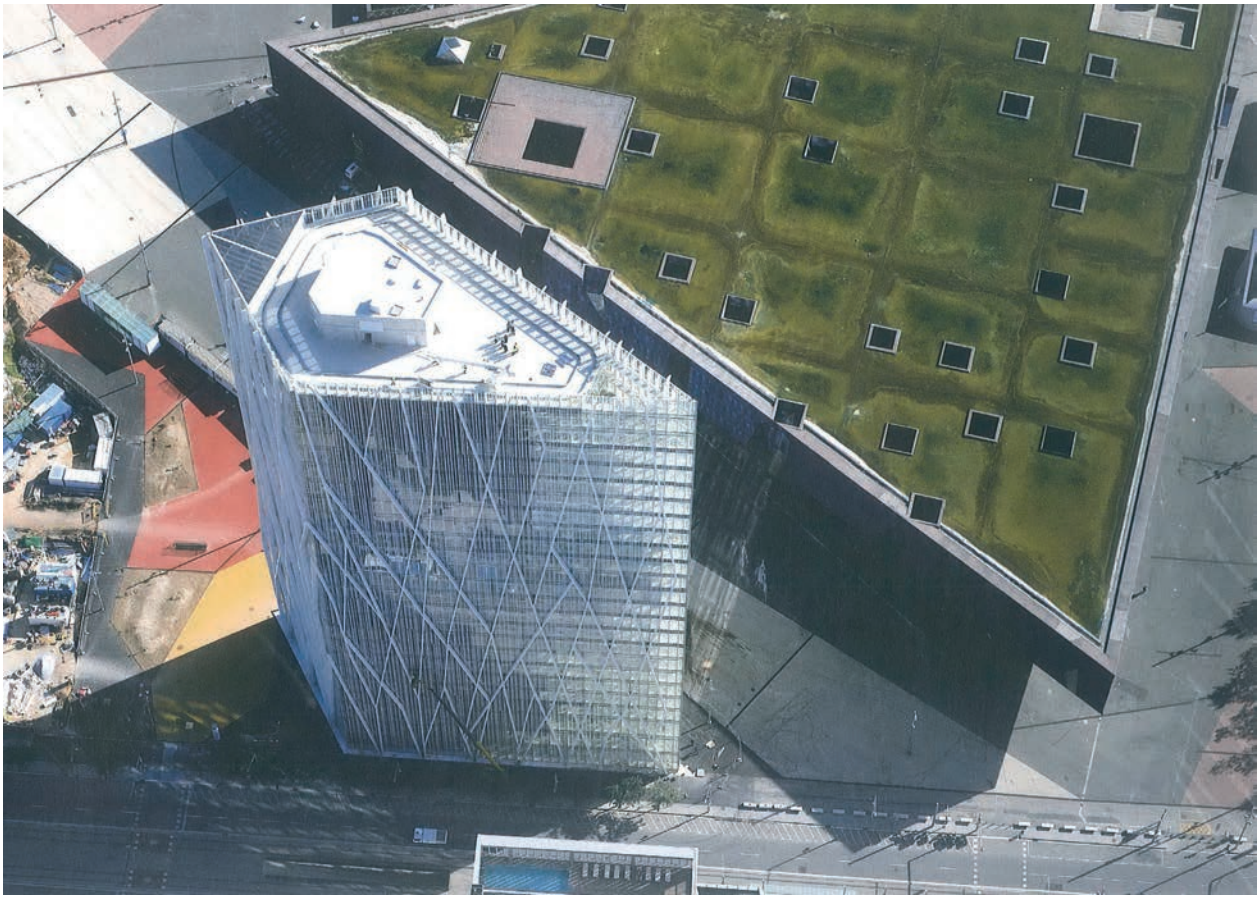

Figura 1. Vista aerea del edificio terminado
Figure 1. Aerial view of the finished building

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, una serie de nuevos edificios significativos están cambiando el perfil urbano de Barcelona. Entre ellos, destaca la Torre Diagonal ZeroZero, promovida por el Consorci de la Zona Franca, y cuyo destino es ser la nueva sede en Barcelona de la compañía Telefónica. Este edificio, de singulares características, ha requerido una estructura resistente que presenta interesantes particularidades que se exponen a continuación.

El edificio se halla en el extremo norte de la Avenida Diagonal, en una posición estratégica, muy visible desde la ciudad y la costa. Se encuentra en el límite entre el espacio urbano consolidado y las grandes áreas del Fórum, una zona todavía en desarrollo. La torre se ha convertido con sus 110 metros de altura y su perfil blanco, en un nuevo icono del *skyline* de la ciudad.

2. PROYECTO ARQUITECTÓNICO

El diseño arquitectónico de la torre ha sido realizado por el Estudio EMBA Massip-Bosch Arquitectes, con sede en Barcelona, que contó con MC2 en una intensa colaboración para el diseño de la estructura. Se trata de un edificio de oficinas de 3 plantas bajo rasante con 280 plazas de aparcamiento, la planta baja dedicada a espacios público-comerciales, y 24 plantas sobre rasante, con una disposición formal en forma de punta de flecha o de lanza (Figura 1) [1]. Construido sobre una parcela de alrededor de 4.000 m^2, el edificio alcanza unos valores de superficie construida de 8.350 m^2 y 25.300 m^2 en las plantas bajo rasante y sobre rasante respectivamente.

La torre presenta una visión muy distinta dependiendo del punto de vista debido a la geometría de las plantas, con un vértice fuertemente agudo frontal a la ciudad, y otro casi obtuso dorsal a Barcelona. Desde la Avenida Diagonal la visión es extremadamente afilada, en una especie de similitud clara, pero parcial y actualizada, con el edificio Flatiron de la neoyorquina Avenida Broadway (Figura 2 y Figura 3).

El volumen interno del edificio se divide en dos partes principales: una administrativo-directiva en los dos tercios superiores de la torre y una pública inferior (Figura 4). Los espacios administrativos están dedicados a funciones corporativas y de representación, situándose en las dos últimas plantas los despachos de Presidencia y Dirección, y la sala del Consejo, abierta a una terraza a la cota +97,65 sobre el vértice de la Avenida Diagonal.

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

1. INTRODUCTION

In recent years, a number of new emblematic buildings are changing the skyline of Barcelona, among which the Diagonal ZeroZero tower stands out. It was promoted by the Consorci de la Zona Franca, as the new Telefónica Headquarters in Cataluña. This building, of great singularity, has required a resistant structure characterised by several interesting features, described next.

The building is located at the North end of the Avenida Diagonal, in a strategic position, very visible both from the city and the seaside. It is at the border between the consolidated urban spaces and the "Forum" great areas, a still developing environment. The tower has turned into a new icon of the city skyline, with its 110 m height and white profile.

2. ARCHITECTURAL DESIGN

The architectural design of the building was carried out by the Barcelona-based office EMBA Massip-Bosch Arquitectes, who relied on MC2 for the structure design through an intense collaboration from the early stages of the project. It is an office building constituted by three floors below ground level with 280 parking spaces, the ground floor devoted to public-retail areas and 24 floors above ground level, with a shape of the floorplan similar to a spearhead (Figure 1) [1]. Built on an approximately 4 000 m^2 site, the amount of floor area is 8 350 m^2 below ground level and 25 300 m^2 above ground level.

The building presents a very different appearance depending on the point of view due to the shape of the floorplan, with a particularly sharp corner facing the Avenida Diagonal and the nearly obtuse opposite one. From the Avenida Diagonal, the view is extremely sharp, in a clear but somehow partial and updated resemblance to the Flatiron building in New York (Figures 2 and 3).

The inner space of the building is divided into two main parts: an administrative one, in the two upper thirds of the tower, and a public one in the lower part (Figure 4). The administrative areas are devoted to corporate and representative activities, with the board room open to a terrace at level +97.65 m above the Avenida Diagonal corner.

The public part, occupying the lower third of the tower, is devoted on one hand to exposition and exhibition areas, assembly hall and public cafeteria, and on the other hand to staff training areas.

Four singularities characterise the interior of the building: the main patio or lobby, 40 m high and oriented towards the Avenida Diagonal; the upper patio, 32 m high and looking at the "Forum" and the coast; the double height space at the 23rd floor devoted to the board room; and finally the double-height assembly hall at 2nd floor.

In order to guarantee the best flexibility of the administrative spaces, and taking advantage of the tube-in-tube structural system, all the floors are clear of columns and walls and not all of them occupy the whole floorplan, due to the presence of the great patios.



Figura 2. Vista del Edificio Flatiron desde la Avenida Broadway
Figure 2. Flatiron building elevation from Broadway Avenue



Figura 3. Vista de la torre Diagonal ZeroZero desde la Avenida Diagonal
Figure 3. Diagonal ZeroZero tower elevation from the Avenida Diagonal

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

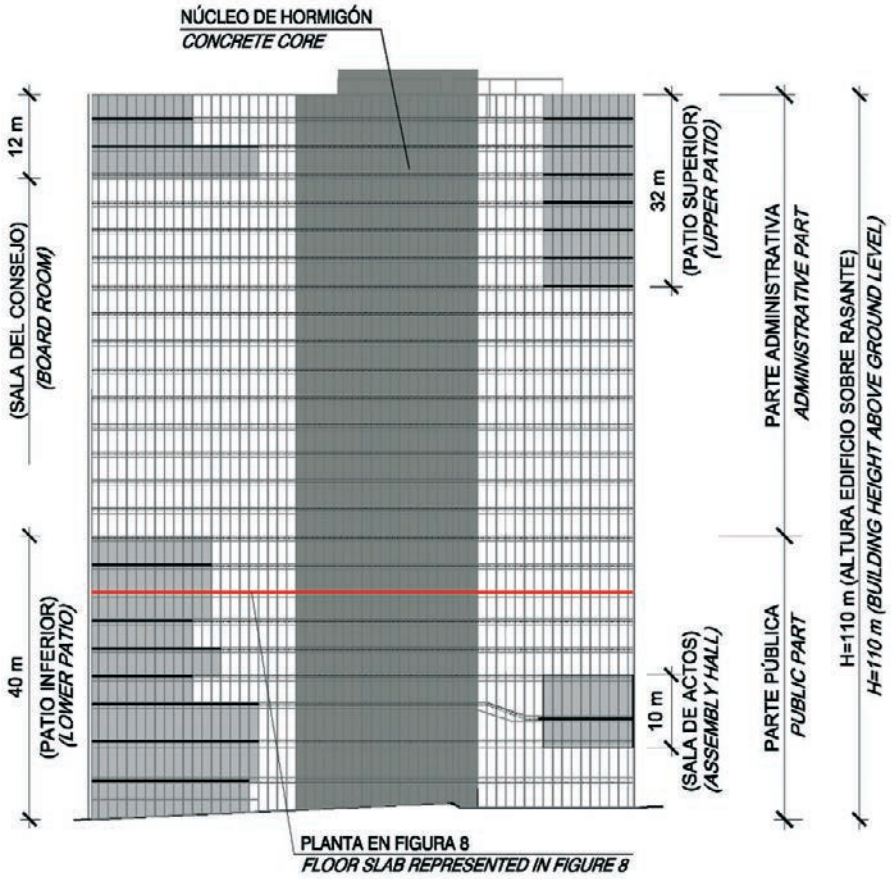

Figura 4. Distribución interna del edificio (alzado)
Figure 4. Inner distribution of the building (elevation)

La parte pública, que ocupa el tercio inferior de la Torre, está formada por un lado por áreas de exposición y demostración, sala de actos y cafetería abiertas al público; y por otro, por áreas de formación destinadas a personal de la empresa.

El conjunto se dinamiza a través de cuatro puntos singulares dentro del volumen de la torre: el gran espacio diáfano del patio principal inferior, de 40 m de altura y orientado hacia la Avenida Diagonal; el atrio superior entre la planta 17 y la coronación del edificio, de 32 m de altura y orientado hacia los espacios del Forum y la costa; el espacio de doble altura en planta 23 para la Sala del Consejo; y por último, la sala de actos, de dos alturas, en planta 2 (Figura 4).

Todas las plantas son completamente diáfanas, sin soportes intermedios, para garantizar su máxima flexibilidad funcional, y algunas no cubren la planta total del edificio debido a la presencia de los patios antedichos.

La fachada está compuesta por un muro cortina modular con perfilería de aluminio blanco y vidrio extraclaro parcialmente serigrafiado, siguiendo un patrón vertical que refuerza la esbeltez del edificio.

La Torre Diagonal ZeroZero participa en realzar la singularidad arquitectónica del frente litoral de Barcelona al inicio de la Avenida Diagonal, ya que es vecina del edificio Fórum de Herzog y De Meuron, y también lo será del futuro Edificio Espiral de Zaha Hadid (Figura 5) [2].

3. PROYECTO ESTRUCTURAL SOBRE RASANTE

3.1. Descripción general de la estructura sobre rasante

El esquema estructural base del edificio pertenece a la tipología denominada "tubo en tubo". Este esquema configura tanto la formalización diáfana de las plantas, como el esquema resistente al viento y otras acciones horizontales. En este caso el tubo interior está constituido por un núcleo de hormigón, con forma de diamante en planta prácticamente homotética con el perímetro exterior de la planta del edificio (Figura 6). Por el contrario, el tubo exterior está formado por una doble malla estructural de acero, que se configura como un sistema específico, novedoso y conformador de la imagen del edificio. El trabajo estructural conjunto de ambos tubos se produce exclusivamente a través de las losas de forjado de las diferentes plantas interconectando ambos sistemas, sin existencia de soporte interior alguno ni de sistemas especiales de rigidez situados en planta superior o intermedia (Figura 7).

En este esquema estructural de doble sistema tubular vertical, aunque el núcleo interior representa el elemen-

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

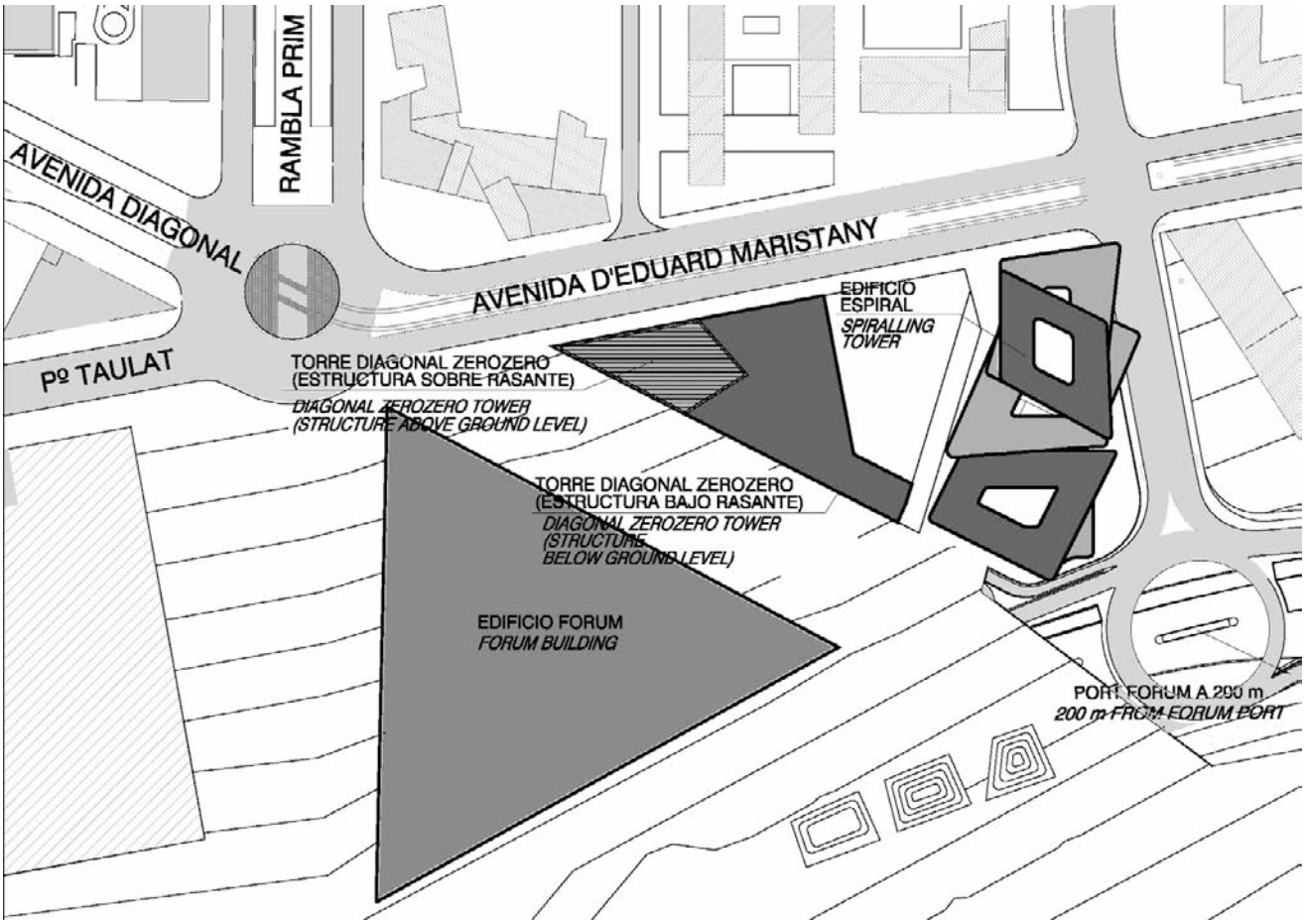

Figura 5. Plano de situación de la Torre Diagonal ZeroZero
Figure 5. Location plan of the Diagonal ZeroZero tower

The facade is composed of a modular curtain wall, with a white aluminium profile and an extremely clear glass. The printed glass design follows a vertical pattern, which emphasizes the building slenderness.

The building contributes to enhance the architectonical singularity of the coastline, since it stands between the Forum building, by Herzog & de Meuron, and the future Spiralling tower, by Zaha Hadid (Figure 5) [2].

3. DESIGN OF THE STRUCTURE ABOVE GROUND LEVEL

3.1. General description of the structure above ground level

The basic structural arrangement of the building corresponds to the tube-in-tube type system. The inner tube is constituted by the concrete core, the cross section of which

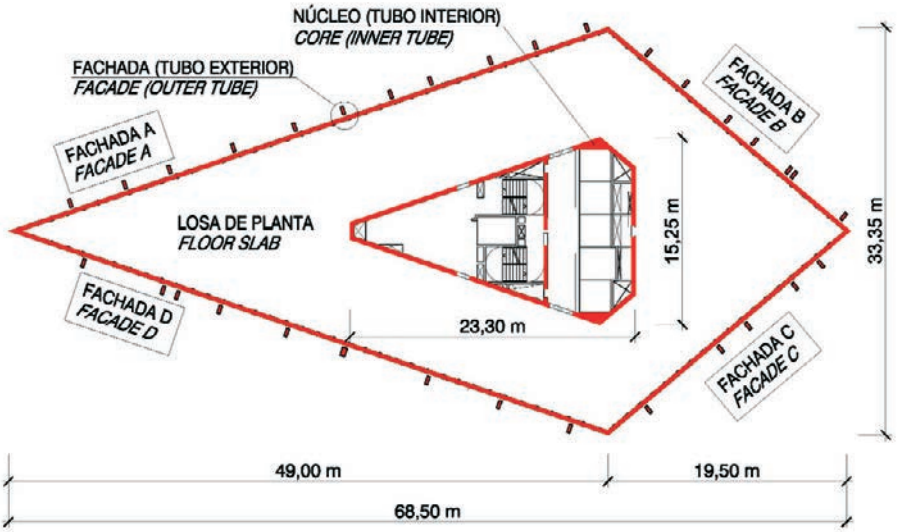

Figura 6. Esquema estructural de la tipología "tubo en tubo"
Figure 6. Structural scheme of the tube-in-tube type system

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

to resistente más importante para hacer frente a las acciones horizontales, resulta esencial la contribución de las fachadas. Éstas están formadas por un doble conjunto de soportes interiores, tupidos pero muy esbeltos, y de elementos inclinados exteriores, denominados en el proyecto "bambúes" (por su semejanza con esta planta), para su tratamiento y análisis. Para el estudio de la participación de las diferentes sub-estructuras en la rigidez horizontal global del edificio, se realizó un modelo de elementos finitos (EF) tridimensional [3].

3.2. Conceptos generales

En los siguientes apartados se describirá de manera pormenorizada la estructura del edificio, pero se considera de interés anteponer la definición de algunos aspectos conceptuales de carácter muy general, tomados como guía en el proceso operativo del proyecto desde sus primeras fases de gestación.

3.2.1. *Relación Arquitectura – Ingeniería Estructural*

La apuesta jugada en la concepción y desarrollo del proyecto de la Torre ZeroZero, aunque con una altura relativamente discreta, fue la de conseguir la más intensa y armonizada interrelación entre Arquitectura y Estructura. En esta línea, se buscó realzar por un lado los conceptos de la forma y la expresión que el arquitecto planteó en su diseño inicial y, por el otro lado, lograr una disposición estructural idónea de los elementos resistentes. De esta manera, en ningún caso se dispusieron elementos no activos, desde el punto de vista deformativo-resistente, en la presencia formal del edificio.

Esta intensa comunión y compenetración entre las formas arquitectónicas, los elementos resistentes y la funcionalidad buscada, por un lado confiere dignidad y consistencia ética al proyecto y, por otro, otorga al conjunto de la obra un intenso plus de calidad, opuesto a la mera yuxtaposición de requisitos provenientes de ambos campos – de la Arquitectura y de la Ingeniería.

3.2.2. *Canonicidad de las estructuras y concepto de tensibilidad de las formas arquitectónicas*

En la clasificación de los elementos estructurales, se puede definir como esquema canónico aquel que se ajuste al proceso resistente con una solución muy próxima a la de mínima energía interna de deformación del sistema frente a las solicitaciones globales de la estructura. Una forma puede por lo tanto considerarse como "canónica" cuando implica y engloba en su esencia dichas soluciones estructurales. La transformación que ha vivido la Arquitectura en los últimos decenios ha promovido sin embargo una génesis desenfrenada de formas arquitectónicas inéditas, formas que en su mayoría responden a lo que podríamos definir como "libres" [4].

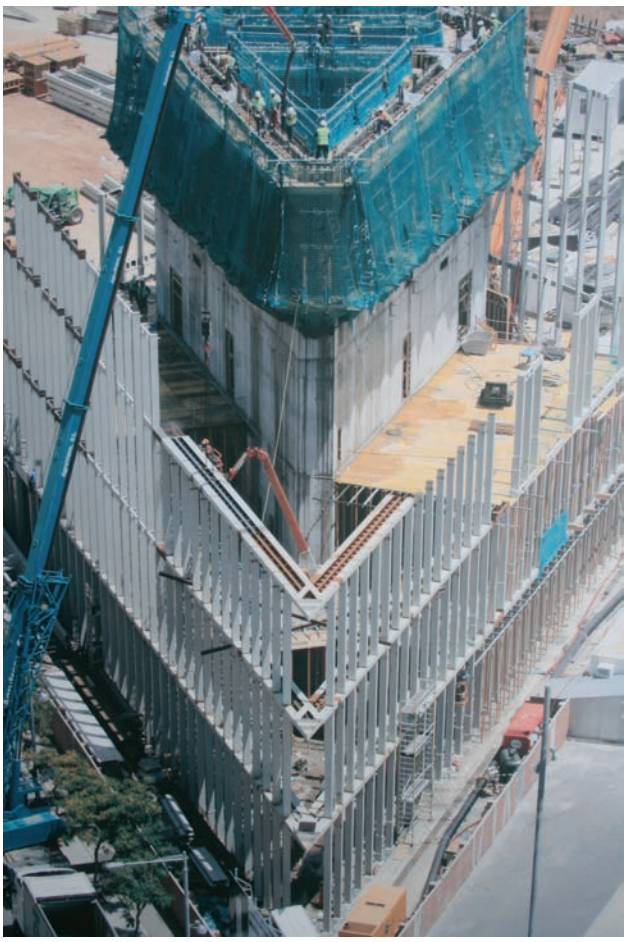

Figura 7. Avance de fachada y nucleo
Figure 7. Concrete core and steel facade under construction

En esta situación profundamente manierista y abierta, libre y en cierto modo anticanónica, se plantea el estudio y manejo del concepto de "tensibilidad", en un intento de sistematizar y resolver, de la manera más activa y brillante, las necesidades imaginativas que plantea el diseño arquitectónico. Así pues, se define el concepto de tensibilidad de la siguiente manera [5, 6, 7]:

- Capacidad de utilizar en la forma más activa posible las dimensiones máximas envolventes de la totalidad del edificio, para disponer en ese espacio un sistema estructural capaz de resolver los problemas resistentes y constructivos, sin alterar el espíritu de la forma arquitectónica propuesta. De esta manera se emplearían disposiciones de carácter fundamentalmente canónico, que optimicen la energía interna del sistema portante, consiguiendo la máxima eficacia posible y el menor coste generalizado de la estructura.

- Capacidad intrínseca que posee una disposición o tipología estructural para canalizar, de la manera más directa y activa posible, los esfuerzos provocados por las acciones actuantes sobre la misma hacia sus puntos de apoyo o descarga.

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

reminds of a diamond tip, practically homothetic to the floor perimeter (Figure 6). On the other hand the outer tube is composed of an innovative structural steel double layer, configuring the building image. The interaction between both tubes is guaranteed by means of the floor slabs, without any inner column or outrigger connecting the inner core to the outer facade at an upper or intermediate level (Figure 7).

In this structural scheme of double vertical tubular system, even though the core is the fundamental lateral load resisting system, the contribution of the facades is essential. These are composed of an assembly of inner vertical columns, dense but slender, and of outer sloping elements, with an irregular and organic layout, for which they have been called "bamboos". A 3D finite element model (FEM) has been generated to study the participation of these sub-structures to the global horizontal stiffness of the building [3].

3.2. General structural concepts

In the following paragraphs the building structure will be described in detail, but it is interesting to start with the definition of some conceptual aspects which have guided the operative process of the whole project, since the early stages.

3.2.1. Architecture – Structural Engineering relationship

One of the main bets played in the conception and development of the ZeroZero tower project was to obtain the most intense and synergic interaction between Architecture and Structural Engineering. In this spirit, the mutual work between both teams aimed at enhancing the formal concepts that the architect presented in the initial design and, on the other hand, to achieve a more suitable structural scheme for the resisting elements. This allowed the team to avoid any non active elements in the formal image of the building, from the deformative and resistant points of view.

This intense relationship between the architectural form, the resisting elements and the high functionality of the building, on one hand confers dignity and ethics to the design and, on the other hand, confers to the building an intense quality, opposed to the only juxtaposition of requirements coming from both fields – Architecture and Structural Engineering.

3.2.2. Canonicity of the structure and "tensibility" concept of the architectural forms

In the classification of structural elements, a "canonical" scheme may be defined as the one which resists the global loads and transfers them towards the foundations with the minimum increase in the strain energy of the structure. Thus a form may be considered as "canonical" when it essentially includes these structurally sound arrangements. However, the remarkable transformation that Architecture has experienced in the latest decades has promoted an unrestrained genesis of unprecedented architectural forms, forms that could be defined as "free" [4].

In this present state of clear anti-canonicity and being the structural engineers subjected to the deeply manneristic "empire of the form", it is appropriate to manage and study a concept that the author designates as "tensibility"; in an attempt to systematize and determine, in a more active and operative way, the imaginative needs stated by the architectural design. The tensibility concept may be defined as follows [5, 6, 7]:

- *The capacity to use optimally the maximum dimensions of the outline of the building in order to arrange in this form a structural system able to solve the resistance and construction problems without altering the proposed architectonical spirit. This is obtained by using chiefly canonical arrangements, which optimize the internal energy of the bearing system, hereby achieving the optimum efficiency and the least general cost of the structure.*

- *The intrinsic ability of an arrangement or structural typology to drive the forces generated by the loads acting on the structure, as actively as possible, towards the bearing points.*

Consequently, the more "tensible" the form is, the better it can include a highly resistant –and thus competitive and economically interesting– structure.

In global terms, the former architectonical proposal of the ZeroZero tower was very sound and of high tensibility and this led to a final structural concept in accordance with the initial scheme. However, significant adjustments of the former design were naturally required in order to satisfy the unavoidable structural requirements, but guaranteeing the original image of the building.

3.3. Inner core and floor slabs

The concrete core represents the vertebral column of the lateral load resisting system of the building and it incorporates all the staircases, lift shafts and most of the mechanical and electrical facilities. Its cross section reminds of a diamond tip (Figure 8) and its main structural feature is the big difference in bending moment capacity between the two main orthogonal directions. The global structure itself shares this characteristic: along the longitudinal direction the system is extremely efficient as the opposite facades provide a significant pair of forces to balance the bending moment due to wind action, on the one hand, and due to the reduced dimensions of its aerodynamic profile, on the other. On the contrary, along the transverse direction, the building surface area subjected to the wind action is much larger, the aerodynamic profile less favourable, and the pair of forces that the facades can exert, reduced.

Moreover, most of the facilities openings in the core walls have been situated, for functionality reasons, in the oppo-

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

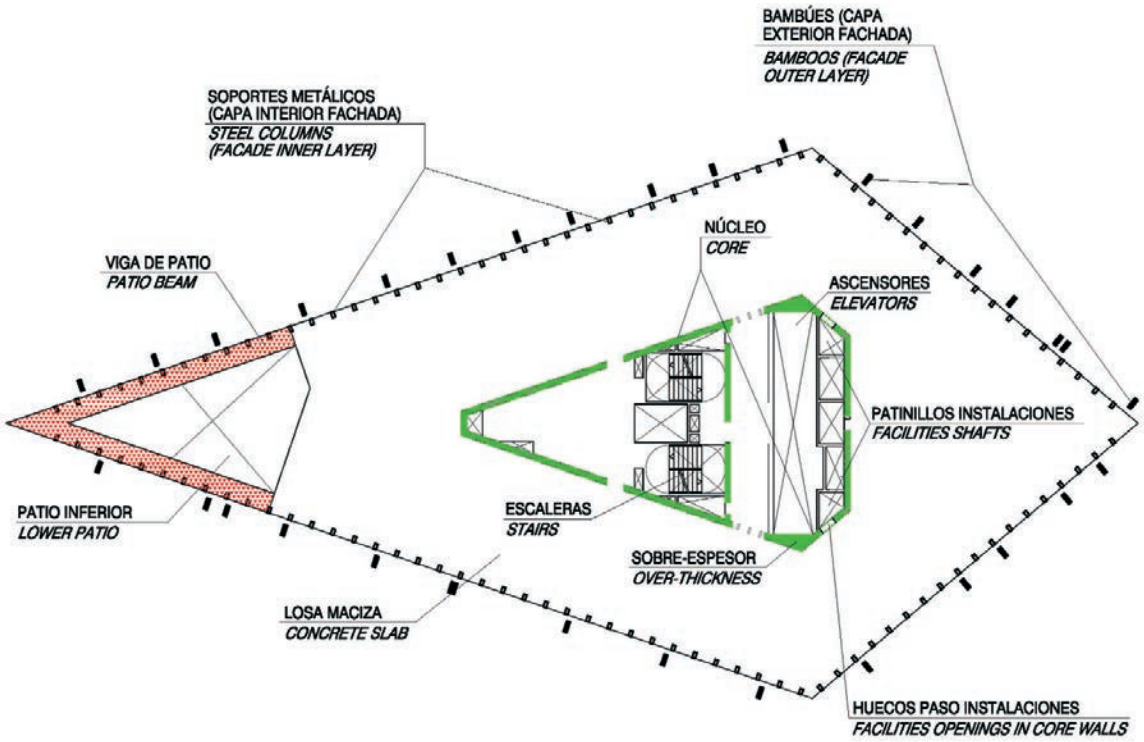

Figura 8. Planta tipo de un forjado de patio
Figure 8. Plan view of a patio floor slab

Consiguientemente, a mayor tensibilidad de una forma, mayor capacidad de poder incorporar a la misma una estructura de alta capacidad resistente y, por lo tanto, competitiva e interesante económicamente.

En términos globales puede establecerse que la propuesta arquitectónica original de la Torre ZeroZero resultó muy consistente y con alta tensibilidad, lo cual determinó una concepción estructural final muy ajustada al esquema inicial. Sin embargo se requirieron, lógicamente, apreciables adaptaciones para lograr que la obra mantuviera, sin reducción, su total fuerza exterior o de imagen y, a la vez, se alcanzaran los requerimientos estructurales ineludibles.

3.3. Núcleo interior y losas de planta

El núcleo de hormigón constituye la columna vertebral del sistema resistente del edificio, y en su interior se ubican los núcleos de comunicación –escaleras y ascensores– y gran parte de la circulación vertical de las instalaciones de la torre. Presenta una sección transversal que recuerda a una punta de diamante (Figura 8) y su característica estructural fundamental es la gran diferencia de capacidad resistente a flexión entre sus dos direcciones principales. La misma estructura global de torre comparte dicha característica: así, en dirección longitudinal el sistema es tremendamente eficaz, tanto por el hecho de presentar un gran brazo interno de sus fuerzas, como por ofrecer al viento unas dimensiones muy reducidas a causa de su afilado perfil, aerodinámicamente muy favorable. Por el contrario, en la dirección transversal, los frentes de viento son mucho mayores, el perfil aerodinámico es menos favorable y el brazo interior de fuerzas significativamente más reducido.

En el caso del núcleo, y mucho más desfavorable, resulta el hecho de que los accesos a todas la plantas y los huecos de paso de las diferentes instalaciones, se concentran, por motivos funcionales, en las esquinas opuestas de la dimensión menor de su sección transversal, es decir en las zonas de máxima exigencia resistente, influyendo sensiblemente en el comportamiento estructural de la pieza [8, 9]. Resultó por lo tanto necesario utilizar hormigones de alta resistencia (HA-50), y disponer sobreespesores locales, muy influidos por los condicionantes funcionales, y potentes refuerzos de armadura vertical, para conseguir las capacidades mínimas requeridas, no solo resistentes sino también deformacionales.

Pese a la configuración desfavorable de su sección transversal, el núcleo de hormigón participa en un 65% en la rigidez horizontal global de la torre, como tubo interior del esquema "tubo en tubo" con el cual la estructura hace frente a las acciones horizontales de viento y sismo. Y es en esta circunstancia donde la colaboración de la doble estructura de fachada resulta del mayor interés, recogiendo la misma el 35% de las componentes totales de la solicitación de viento. Esto permite mantener, bajo la condición de inercias fisuradas de las zonas de núcleo traccionadas que se producen, el desplome en coronación limitado a 1/500 de la altura de edificio, que es la regla de buena práctica comúnmente aceptada para acotar la rigidez de los sistemas de altura.

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

site corners of the smaller dimension of the core, thus reducing the effectiveness of its cross section in terms of resistance and stiffness [8, 9]. High strength concrete (f_{ck} = 50 MPa) was thus required in the first 40 m with local over-thickness and heavy vertical reinforcements.

The contribution of the concrete core to the total horizontal stiffness of the building is approximately 65%, in spite of the unfavourable configuration of its cross section. The participation of the facade double layer in the tube-in-tube structural system, of approximately 35%, becomes of great interest since it limits to H/500 the maximum horizontal displacement of the top of the building subjected to wind action, being H the building total height. This is usually considered as a rule of thumb for the predimensioning of the horizontal stiffness of a high-rise building structure to guarantee its proper functional response.

The slabs, which participate in the global structural work of tube-in-tube, are rigidly connected to the core and simply supported on the vertical columns. They make the shear loads transfer possible between the inner core and the facade, corresponding to the global bending of the structure subjected to wind action [10].

The study of the rigid connection between core and slabs was carried out by means of 3D FEM models taking into account the relative stiffness of the two structural elements. The slab reinforcements required to resist the floor gravity loads were dimensioned by analysing simple 2D models. On the other hand, the analysis of a complex model of the entire structure subjected also to horizontal loads (wind or earthquake) was necessary to increase the slab reinforcements in its connection to the core, due to the global tube-in-tube structural work. Of these horizontal loads applied to the structural model, the wind actions resulted determinant due to the low seismic hazard of Barcelona.

All the floors, clear of columns, are supported by the inner core and the perimetral facade only. This structural configuration results in long spans from 8 m, in the slab areas parallel to the core long walls, to 16 m, in the sharp corners of the rhombus (Figure 10). With a slab slenderness up to 1/50 and due to the irregular shape of the floorplan, the slabs needed to be locally postensioned, with 4ϕ0.6" or 5ϕ0.6"

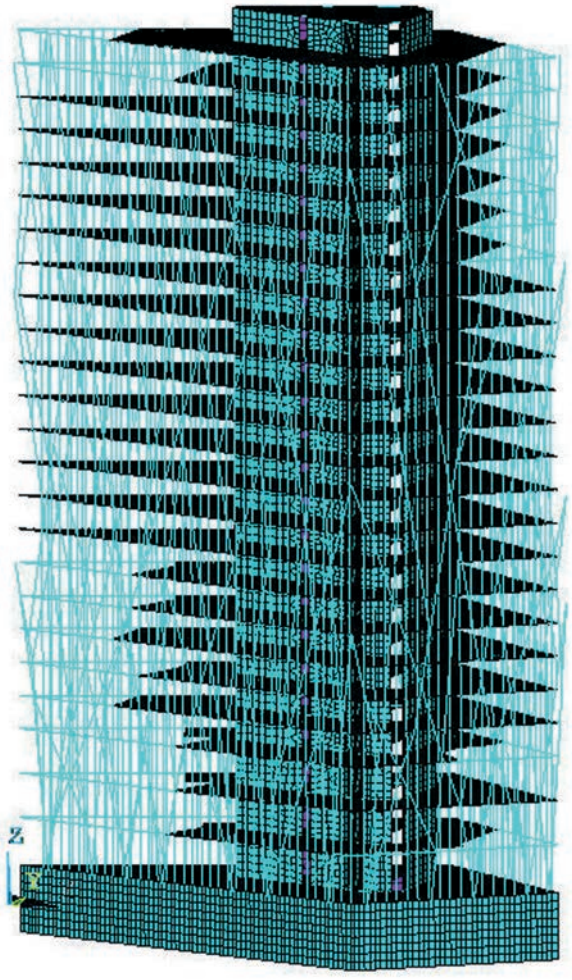

Figura 9. Modelo de EF tridimensional de la estructura global
Figure 9. 3D FEM model of the global structure

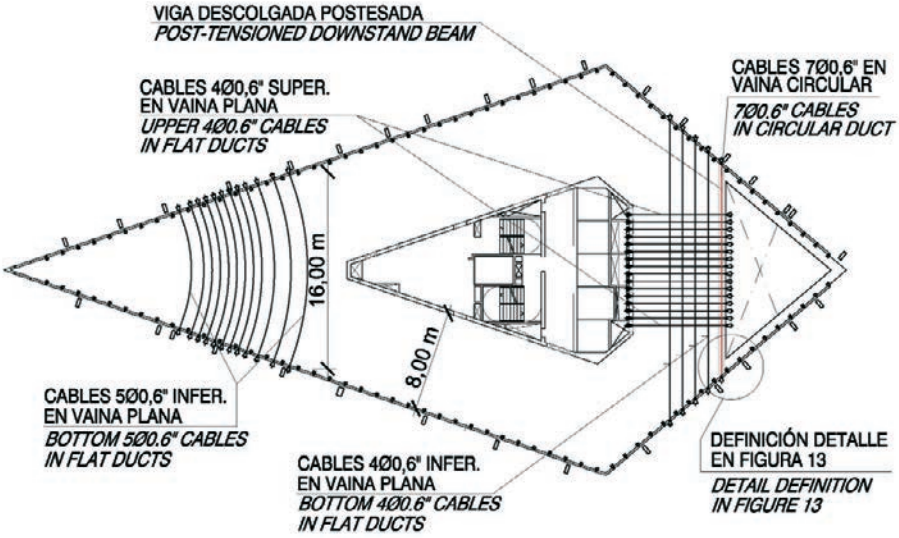

Figura 10. Cables de postesado en la 22ª planta
Figure 10. Post-tensioning cables in the 22nd floor

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

En dicho esquema estructural participan las losas de planta que, empotrándose elásticamente en las pantallas del núcleo, y apoyándose en su borde perimetral en los soportes de fachada, permiten la transferencia de los esfuerzos rasantes entre núcleo y fachada, durante una flexión global de la torre sujeta a las acciones de viento [10].

Mediante el empleo de modelos tridimensionales de EF, se llevó a cabo el estudio de la conexión entre núcleo y losas macizas, teniendo en cuenta la rigidez relativa de los dos elementos estructurales. Dichos modelos se emplearon para dimensionar las armaduras necesarias para resistir las cargas verticales de forjado. Sin embargo, para dimensionar las armaduras flexionales adicionales que resisten, en correspondencia con la conexión rígida losa-núcleo, los momentos flectores debidos al trabajo global de la estructura "tubo en tubo", se empleó un modelo complejo tridimensional de la estructura global (Figura 9). De las acciones horizontales de viento y sismo que se aplicaron al modelo de la estructura, se comprobó que éste último no resultaba determinante en ningún caso, debido a la baja peligrosidad sísmica de Barcelona.

Todas las plantas del edificio son diáfanas, apoyándose solamente en el núcleo central y en la fachada perimetral. Esto genera unas luces significativas, comprendidas entre 8 m, en las zonas paralelas a las pantallas largas del núcleo, y 16 m, en las puntas agudas del rombo (Figura 10). Las correspondientes esbelteces, de hasta 1/50 para una losa de 30 cm de espesor, junto con la forma irregular de las plantas, han requerido el postesado local de las mismas, mediante cables de 4ϕ0,6" ó 5ϕ0,6" en vainas planas. En todas las losas se han empleado vainas adherentes para incrementar el momento último de la sección y evitar la fisuración de las losas, limitando de tal manera la deformación vertical [11, 12].

Con una distancia de 75 mm entre la cara superior o inferior de la losa y el eje del cable, su trazado en alzado es recto, excepto en sus extremos en una longitud de 1,40 m, para poder colocar el anclaje a una distancia de 30 mm del eje de la losa, y asegurar de esta manera una correcta transferencia del axil de compresión al hormigón.

La mayoría de los cables anclados en el borde del forjado presentan un trazado curvo en planta, debido a la forma de la misma, con los cuatro lados inclinados respecto a los ejes principales (Figura 11). Debido a este trazado el empuje horizontal transversal al cable genera unas tensiones de tracción en la losa que, en todos los casos, están recogidas por la armadura base dispuesta, sin necesidad de refuerzos adicionales.

A lo largo del perímetro del forjado, las losas macizas se apoyan en un perfil metálico de borde con sección transversal en "C" (UPN), que conecta horizontalmente los soportes verticales de fachada, y en pernos conectadores en correspondencia con cada



Figura 11. Cables de postesado con trazado curvo en planta
Figure 11. Post-tensioning cables with curved horizontal profile

soporte (Figura 12). Debido a que el perfil UPN de borde no está ignifugado, los pernos embebidos en el hormigón de la losa tienen que resistir la reacción total bajo las cargas reducidas de la combinación accidental en caso de incendio.

El factor geométrico más desfavorable en términos de deformabilidad de planta es la presencia de los bordes de forjado en los huecos de los patios. Para suplir esta pérdida de rigidez, se han colocado unas



Figura 12. Perfil UPN de borde
Figure 12. Edge UPN profile

vigas descolgadas de sección transversal 30 x4 5 cm (Figura 10 y Figura 13), postesadas mediante cables de 5ϕ0,6" o 7ϕ0,6" en vaina circular adherente [13].

Por motivos arquitectónicos, el descuelgue de 45 cm de las vigas postesadas se reduce a 30 cm cerca de la fachada. El cable de postesado se ancla a una distancia de 20 cm del borde del forjado, para permitir la colocación de la pieza de anclaje. Además, el eje de la viga no está alineado con un soporte vertical y los pernos conectadores empleados en todo el perímetro del forjado, para el cuelgue del mismo en los soportes metálicos, no tendrían longitud suficiente para proporcionar un apoyo eficaz a la viga descolgada. Se sustituyeron por lo tanto por unos tubos metálicos embebidos de 400 mm de longitud, con secciones transversales de dimensiones 60 x 120 mm ó 80 x 120 mm (Figura 13).

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

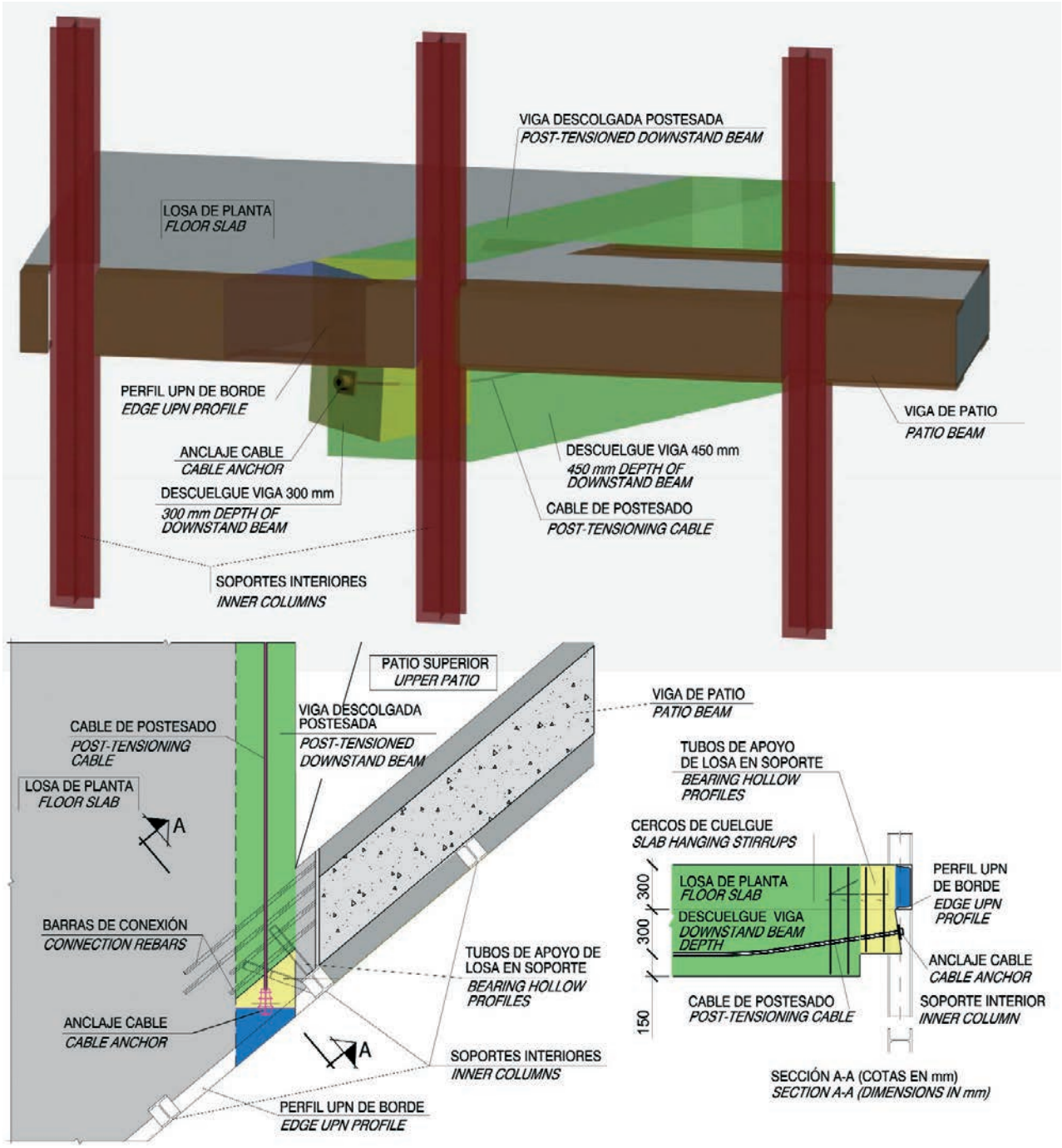

Figura 13. Detalle de apoyo de viga descolgada postesada en soporte metálico y encuentro con viga de patio
Figure 13. Support detail of post-tensioned downstand beam on steel column and intersection with patio beam

cables in flat ducts (Figure 11). For all the floor slabs, adherent ducts have been employed, which not only collaborated to the ultimate resistance, but kept the slab section uncracked, thus limiting its deformability [11, 12].

With a distance of 75 mm between the cable axis and the slab surface, the vertical profile of the cables is straight, except in its 1.40 m end parts, in order to place the cable anchor axis at a distance of 30 mm from the slab centre and assure a proper load transfer to the concrete.

Most of the cables anchored in the slab border present a curved horizontal profile due to the floor shape, with the four sides inclined with respect to the principal axis. Due to the curved tendon profile, the horizontal load generates tensile tension in the slab concrete which, in all cases, is assumed by the base reinforcement of the slab.

Along the facade perimeter, the slabs are supported by a C-shaped cross section profile (UPN), and by a number of studs at every vertical column (Figure 12). The edge UPN profile connects horizontally the vertical columns and it is not fire protected. The column studs, embedded in the slab, can withstand the total reaction under the reduced loads of the accidental fire load combination.

The floor slab openings due to the presence of the patios are the most unfavourable geometrical factor in terms of slab

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

De la misma manera se han empleado tubos de cuelgue, en lugar de pernos conectadores, para favorecer el apoyo de la losa en los soportes metálicos, cuando la presencia de cables de postesado y de potentes refuerzos de armadura dificultaba la colocación de pernos en las caras del soporte perpendiculares al borde de forjado (Figura 14).

3.4. Soportes metálicos y vigas de patio

La estructura de fachada perimetral se compone de dos capas estructurales, separadas por el muro cortina. La capa interior está formada por unos soportes metálicos muy esbeltos, separados 1,35 m, con una sección transversal de dimensiones 160x320 mm hasta la 14ª planta y 160x160 mm hasta la coronación (ver detalle de cambio de dimensiones de la sección transversal en la Figura 12). Se han utilizado perfiles laminados y armados en acero S275 JR: desde perfiles HEB-160, con las alas paralelas al borde de forjado; a parejas de HEB-160 conectados entre sí y girados 90º para facilitar la conexión y mejorar las características mecánicas del conjunto; y también perfiles armados en cajón de hasta 40 mm de espesor.

Los soportes se han protegido contra fuego mediante una capa de vermiculita de 40 mm de espesor que asegura una resistencia de 180 minutos, superior a la definida en el Código Técnico de Edificación para un edificio de oficinas de esta altura, pero requerida por el Cuerpo de Bomberos de Barcelona. El ancho total de la sección transversal resulta por lo tanto de 240 mm y se mantiene constante en toda la altura de la torre.

La contribución de la capa interior de la fachada, a la rigidez horizontal global de la estructura, es de un 17%, y consiste básicamente en la transformación de momentos de acciones horizontales en esfuerzos axiles verticales, aprovechando su mayor brazo mecánico respecto al de las pantallas del núcleo.

La gran esbeltez de los soportes metálicos, junto con la utilización de cristales blanqueados poco reflectantes, proporciona una gran transparencia de la fachada, dejando ver desde el exterior los volúmenes variados que responden a las diferentes especificidades del programa interior y que se relacionan con las diversas alturas de los edificios vecinos.

La presencia de los patios o atrios crea una serie de grandes espacios interiores diáfanos, con alturas libres comprendidas entre 2 y 8 plantas según las zonas. En tales patios la estructura interior de fachada no está arriostrada por los forjados, dando lugar a longitudes de pandeo muy elevadas de los soportes interiores. En estas circunstancias, dichos soportes requerirían unas secciones transversales de dimensiones desmesuradas para salvar libremente tales alturas sin arriostramiento, circunstancia totalmente imposible de asumir por las condiciones funcionales y formales requeridas.



Figura 14. Apoyo de losa postesada en soportes mediante tubos
Figure 14. Post-tensioned slab support on columns by means of hollow profiles

Para reducir la longitud de pandeo de los soportes prácticamente a la distancia entre forjados y mantener las mismas secciones transversales previstas, se dispusieron unas piezas transversales de dintel, de gran rigidez en el plano horizontal. Estas vigas, a las que nos referiremos como "vigas de patio", tienen que recoger las acciones ideales de pandeo y transferirlas hasta las zonas de piso constituidas por las losas macizas, actuando en cada planta como marcos en su plano (Figuras 8 y 15).

La sección transversal de la viga de patio está compuesta por dos secciones metálicas en "C", conectadas inferiormente a través de una chapa de fondo de espesor reducido, que hace el papel de alma del dintel. El

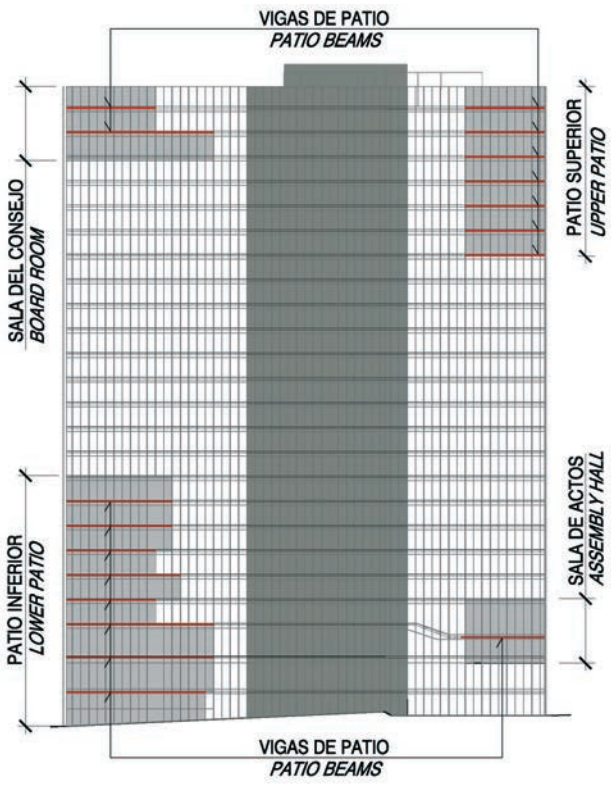

Figura 15. Esquema disposición de vigas de patio
Figure 15. Layout scheme of patio beams

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

deformability. In order to compensate the loss of stiffness, downstand beams have been placed along the floor slabs cuts, with 30x45 cm cross sections (Figures 10 and 13). These beams have been post-tensioned with 5ϕ0.6" or 7ϕ0.6" cables in circular adherent ducts [13].

For architectural reasons, the 45 cm depth of the post-tensioned beams in the patio edges is reduced to 30 cm in the proximity of the facade perimeter. The post-tensioning cable starts 20 cm from the slab edge in order to place its anchor. The beam is not aligned with a vertical column and the stud shear connectors, employed along the facade perimeter for the slab bearing support on the steel columns, would not have had enough length to provide a proper support for the downstand beam. The aforementioned studs were thus substituted by embedded hollow profiles, 400 mm long and with 60 x 120 or 80 x 20 mm cross section dimensions (Figure 13).

Similarly, hollow profiles have been employed, instead of studs, in order to improve the slab support on the steel columns, when the presence of post-tensioning cables or dense reinforcements would have made the studs placing difficult in the column sides perpendicular to the slab border (Figure 14).

3.4. Steel columns and patio beams

The structural facade consists of a double layer, separated by the glass curtain wall. The inner layer consists of slender steel columns every 1.35 m. The column cross section dimensions are 160 x 320 mm up to the 14th floor, and 160 x 160 mm to the top (see detail of change in the cross section dimensions in Figure 12). Laminated and built-up profiles of S275 steel were used: from HEB-160 profiles, with the flanges parallel to the facade; to one pair of connected HEB-160, rotated 90° in order to make their connection easier and to improve the mechanical characteristics of the whole; and also built-up box sections, up to 40 mm thick.

The columns have been equipped with a R180 fire protection, constituted by a 40 mm thick projected vermiculite coating. For an office building of these characteristics, the value of fire resistance defined in the Spanish Building Code (Código Técnico de la Edificación) would be R120, but the fire prevention requirements established by the Municipality were higher. Thus the total width of the column cross section is 240 mm and it is maintained along the entire height of the building.

The inner layer of the facade contributes to the total horizontal stiffness of the building for about 17%, principally by vertical loads, taking advantage of the higher distance between opposite facades with respect to core walls.

The great slenderness of the steel columns, together with the use of whitish and low-reflecting glass, provides a high transparency to the facade. The volumes of the interior patios are visible from the outside and they are related to the different heights of the surrounding buildings.

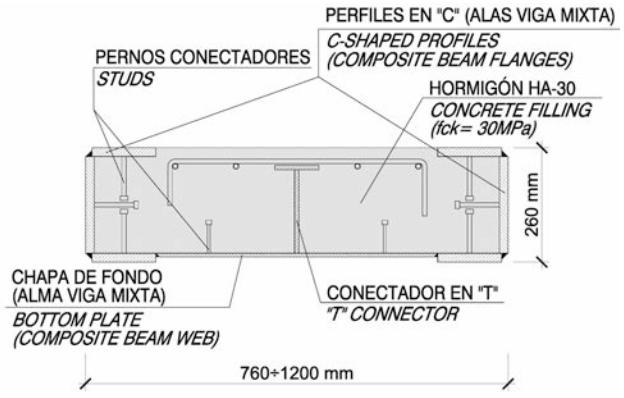

Figura 16. Sección transversal viga de patio
Figure 16. Cross section of patio beam

Within the patios, of 2 to 8 floor plan heights, the inner columns are not braced by the floor slabs. This would originate great buckling lengths of the steel columns, up to 40 m, and thus unreasonable cross sections, incompatible with the formal and functional requirements. In order to reduce the buckling length of the columns practically to the floor distance and keep the same cross section dimensions as for the rest of the structure, composite beams have been designed to brace the columns in the patios. These beams, which we will refer to as "patio beams", must resist the equivalent horizontal loads due to imperfections and other possible sway effects, and drive them to the fixed supports, constituted by the floor plans, working at each floor as horizontal diaphragms (Figures 8 and 15).

The cross section of the patio beams is composed of two C-shaped profiles, connected through a thin bottom plate, working respectively as the flanges and the web of the diaphragm. The semi-opened cross section is filled with concrete. All the processes for the assembly of the steel section and for the welding of the studs and the "T" connectors have been carried out at the workshop. The placing of a welded rebars mesh and the concrete casting have been carried out on site (Figure 16).

The patio beams belong to the inner layer of the facade, thus they have required the same fire protection as the vertical columns, in order to provide the global structure stability during 180 minutes in case of fire. The fire protection vermiculite layer of the bottom side of these beams is 40 mm thick and the cross section height has been fixed at 260 mm in order to keep a slab thickness of 30 cm. The vertical webs of the two C-shaped profiles are fire protected too, but the upper side of the beam doesn't need the fire protecting coating, thanks to the concrete protection and its favourable position without direct contact with the flames in case of fire.

The cross section width depends on the beam length and the floor, and it goes from 1 200 mm for the first floor to 760 mm for the upper ones. Figure 17 shows the bracing of the steel columns in the lower patio by means of the patio beam, prior to concreting. In the same figure the reinforcements of the downstand beam, along the slab border, are shown before the concreting and the post-tensioning operations.

For the predimensioning of the sectional properties of each patio beam, a local 2D FEM model was defined in order to

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



Figura 17. Patio inferior durante la construcción (vista desde el núcleo)
Figure 17. Lower patio under construction (view from the core)

soldeo de los pernos y de los conectadores en T a las chapas y de las mismas entre sí para formar el cajón semi-abierto se llevó a cabo en taller, dejando para su realización en obra la colocación de una malla electrosoldada como armadura y el hormigonado (Figura 16).

Las vigas de patio pertenecen a la capa interior de fachada, formando un emparrillado vertical junto con los soportes y se recubren con la misma protección ignífuga correspondiente al resto de la estructura metálica, con objeto de mantener la integridad total del sistema resistente para la estabilidad al fuego exigida R-180. La capa de protección ignífuga inferior tiene un espesor de 40 mm y la altura de la sección transversal de la viga de patio se ha fijado por lo tanto en 260 mm para mantener el espesor de forjado de 30 cm. Las almas verticales de los dos perfiles en C también se protegen contra incendio, a diferencia de la cara superior, protegida por el hormigón y en posición favorable sin el contacto directo con las llamas en caso de incendio.

El ancho de la sección transversal depende de la longitud de la viga de patio y de su planta y va desde los 1200 mm en la primera planta hasta los 760 mm en las superiores. En la Figura 17 se muestra el arriostramiento de los soportes metálicos en el patio inferior a través de las vigas de patio, antes de su hormigonado. De la misma manera, en la figura se puede observar el armado de la viga descolgada en el borde de forjado, previamente a su hormigonado y al tesado de la misma.

En la fase de predimensionamiento de las vigas de patio, y para cada una de ellas, se definió un modelo 2D de EF para estudiar su comportamiento bajo unas cargas horizontales actuando en correspondencia con los soportes. Se fijaron los valores de dichas cargas en el 1,5% de N_d, donde N_d es el axil de cada soporte en el tramo subyacente a la viga de patio en estudio. Las propiedades inerciales de las vigas de patio se definieron para limitar su desplazamiento horizontal normal a $1/20\ i_c$, donde i_c es el radio de giro de los soportes verticales. Este método aproximado resulta análogo al que se suele adoptar en el dimensionamiento orientativo de un rigidizador transversal de un cajón metálico sometido simultáneamente al 1÷1,5% de todas las fuerzas N_L transmitidas por los rigidizadores longitudinales [14].

Una vez obtenidas las características mecánicas iniciales de las vigas de patio, se llevó a cabo un análisis no-lineal del modelo 3D de EF de la estructura, que tuviera en cuenta el incremento de esfuerzos debido a grandes deformaciones. Se comprobó así que las vigas de patio efectivamente representaban un arriostramiento suficiente para los soportes metálicos y que la estructura vertical de fachada no tenía problemas de pandeo en los grandes patios.

De cara a la realización de los antedichos análisis no lineales, el Eurocódigo proporciona unos criterios de cálculo de las imperfecciones iniciales en términos de deformaciones geométricas equivalentes, para diversos tipos de estructura metálica [15]. La definición conjunta de deformaciones iniciales para las grandes superficies de fachada en zonas de patio conllevaría una gran incertidumbre a la hora de fijar los valores de imperfección geométrica para cada pieza.

Se han analizado por lo tanto módulos de fachada mediante modelos locales de barras para buscar una equivalencia, en términos de deformaciones transversales y esfuerzos en las piezas metálicas, entre dos análi-

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

study its behaviour under a set of equivalent horizontal loads acting on the joints between the beam and the columns. The values of these loads were fixed to 1.5% N_d, N_d being the axial load of the corresponding column stretch. The properties of the beam cross section were defined so as to limit its normal horizontal displacements to i_c/20, being i_c the radius of gyration of the vertical columns. It is common to adopt this preliminary method for the predimensioning, in a steel box section, of a transversal stiffener subjected simultaneously to 1÷1.5% N_L, N_L being the axial loads in the longitudinal stiffeners [14].

Once obtained the initial properties of all the patio beams, a non-linear static analysis (including large-deflection effects) of the 3D FEM global model was carried out. Thus the effectiveness of the patio beams as column bracings was checked, as well as the structural safety against global and local buckling of the columns in the great patios.

In order to carry out the aforesaid non-linear analysis, the Eurocodes provide criteria for the estimation of the initial imperfections in terms of equivalent geometrical deformations, for different typologies of steel structure [15]. The definition of the initial imperfections for each steel member constituting the whole facade structure in the large patio areas would mean great uncertainty when fixing the values of geometrical imperfection for each element. Thus a local area of the facade has been studied by means of local FEM models in order to find out the equivalence, in terms of transversal displacements and steel members stresses, between the two following analyses of the system: through the introduction of the initial deformation, or by applying a set of equivalent loads. In both cases, non-linear static analyses of the frame models have been carried out. It was assessed that the structure subjected to the aforesaid horizontal loads (of values 1.5% N_d) presented higher stress values of the steel members, compared to the same structure subjected to the initial deformation defined by the European Codes.

In the global FEM model, with the structure subjected to the floor permanent and live loads, to the horizontal loads due to wind action or earthquake, and to the set of 1.5% N_d loads, the bending moments of the patio beams have been obtained in order to design their connections to the concrete slabs. As it can be seen in Figure 18, the outer C-shaped profile does not end at the first vertical column crossing the slab, but it continues up to the following one, being connected to the slab through studs. The axial load of the inner C-shaped profile is transferred to the slab by means of a transversal steel plate, connected to the slab through rebars.

In Figure 19, the lower patio clear space may be seen with the building under construction and Figure 20 shows a view of the same patio from the inside.

3.5. Bamboos

The outer layer of the facade is made of sloping steel elements, with an irregular and tree-like layout, for which they have been called "bamboos" (Figure 21).

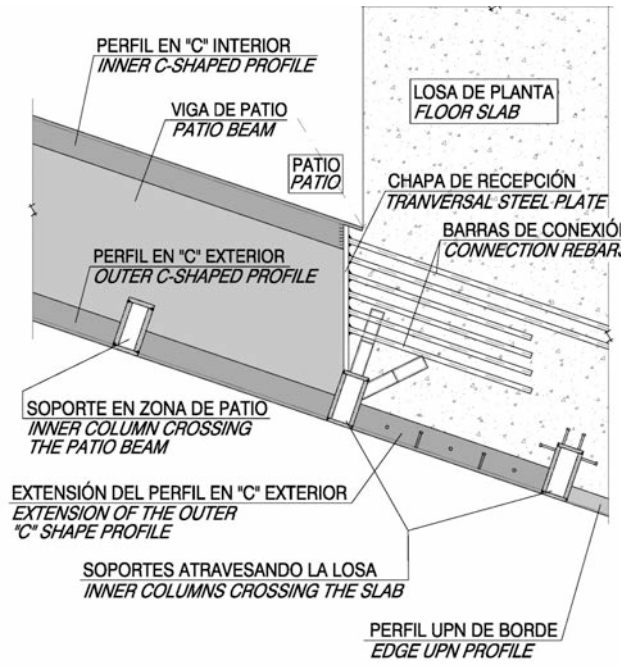

Figura 18. Planta de la continuidad entre viga de patio y losa
Figure 18. Patio beam connection to the slab (plan view)

From the very beginning of the project, the leading idea was not to limit the function of the bamboos to the aesthetic domain, producing formalisms and superficial makeup, but to produce attractive elements which at the same time could participate in the resistance and stiffness of the global structure.

With the initial dimensions of the elements given by Architectural Project, and without the collaboration of the bamboos to the global stiffness of the structure, the horizontal displacements of the building would have been unacceptable. Instead of increasing the core walls thicknesses and the inner columns cross sections, it was preferred to take advantage of the sloping steel elements in the outer layer of the facade.

An active dialog between Engineering and Architecture led on one hand to define an equilibrated bamboo cross section which best suited both teams and, on the other hand, to bring the free layout of these elements close to an adequate structural system, in a search of the tensibility of the form. In this way, the contribution of the bamboos to the global resistance of the structure thus resulted proportional to the cost increase of these elements. In the subsequent analyses of the FEM global model, apart from all the aforementioned external loads, the structure was subjected to thermal actions too, in order to take into account the thermal gradient between the inner and outer layer of the facade, separated by the isolating curtain wall. The original bamboo cross section, defined in the initial architectural project, was thus augmented from 220 mm x 240 mm up to 240 mm x 680 mm external dimensions, which provides the necessary horizontal stiffness of the global structure and at the same time offers a greater aesthetic entity to the bamboos.

Figure 22 shows the general cross section of the bamboos, made out of two inner webs, of thicknesses from 10 mm up

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

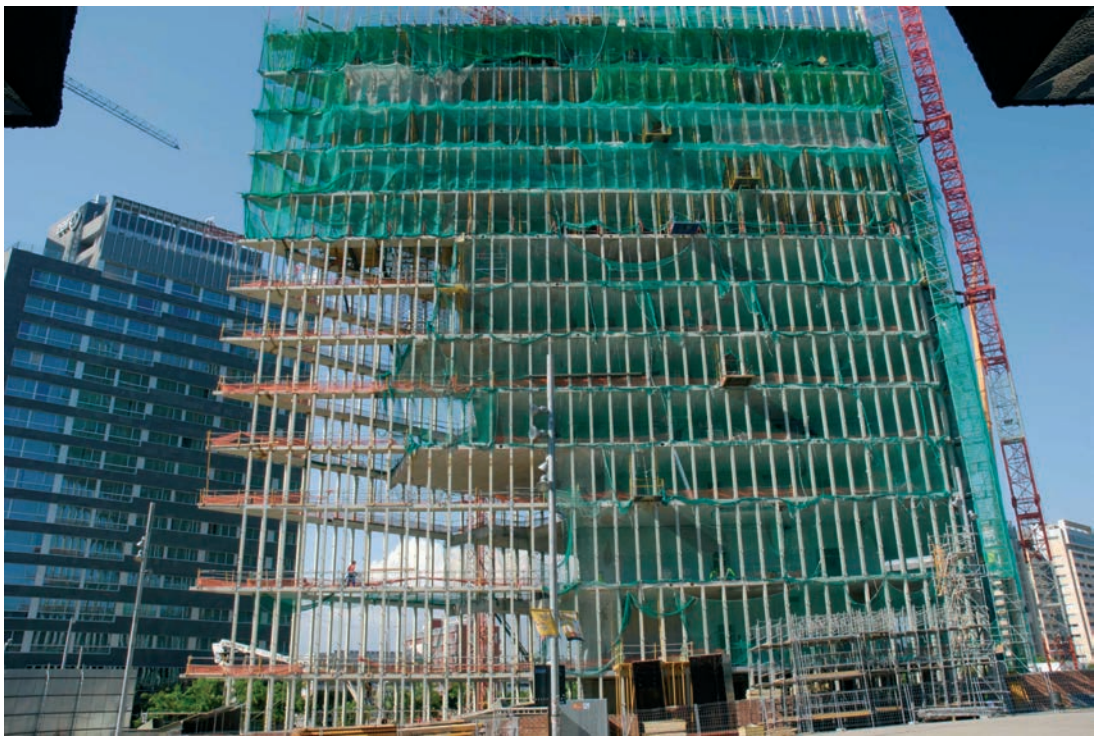

Figura 19. Patio inferior durante la construcción (vista desde el edificio Fórum)
Figure 19. Lower patio under construction (view from the Forum building)

sis posibles del sistema: mediante la introducción de una deformación inicial, o mediante la aplicación de un conjunto de fuerzas equivalentes. En ambos casos, se han estudiado los modelos de barras mediante análisis no lineales de segundo orden, observando que la aplicación simultáneas de fuerzas iguales al 1÷1,5% de los axiles N_d, en los tramos de soportes correspondientes, generaba esfuerzos mayores respecto a los correspondientes a un análisis de la misma estructura con la imperfección inicial definida por la normativa europea.

En el modelo global de EF, bajo las cargas verticales de forjado, la presión del viento y las fuerzas horizontales de 1,5% N_d, se obtuvieron los momentos flectores en las vigas de patio para el diseño del detalle de empotramiento de las mismas a las losas macizas. Como se puede observar en la Figura 18, el perfil exterior en C no se corta en correspondencia con el primer soporte que atraviesa la losa maciza, sino que continúa hasta el siguiente, conectado a la losa a través de pernos. El axil del perfil interior en C se transfiere al forjado a través de una placa de recepción transversal conectada a la losa mediante barras de armadura.

En la Figura 19 se puede apreciar el espacio diáfano del patio inferior durante la construcción del edificio y en la Figura 20 se muestra una vista del patio desde el interior.

3.5. Bambúes

La capa exterior de la fachada está compuesta por piezas metálicas inclinadas formando una distribución de carácter muy irregular y aleatorio por lo que, en base a tal formalización, han sido denominadas coloquialmente como "bambúes" (Figura 21).

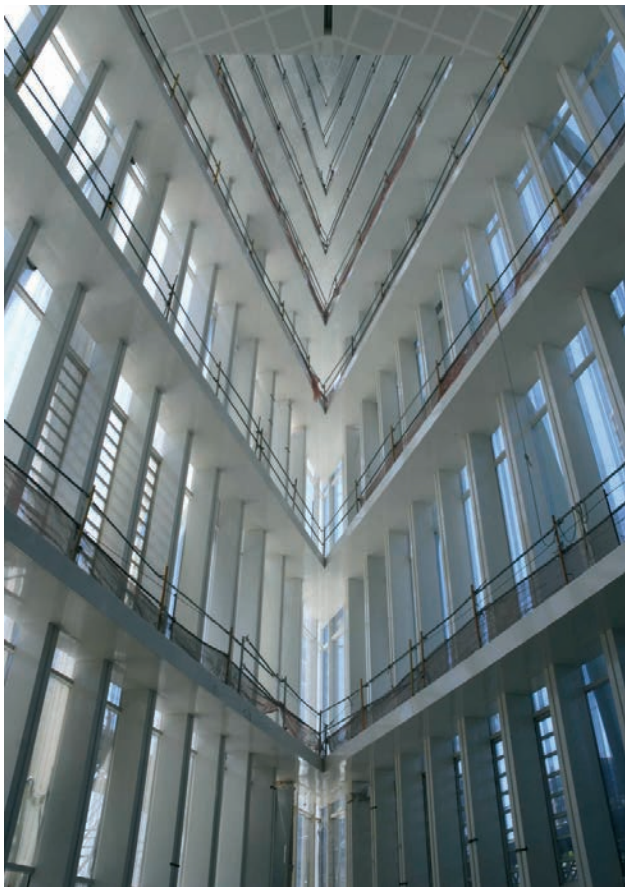

Figura 20. Patio inferior durante la construcción (vista desde el interior)
Figure 20. Lower patio under construction (view from the inside)

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

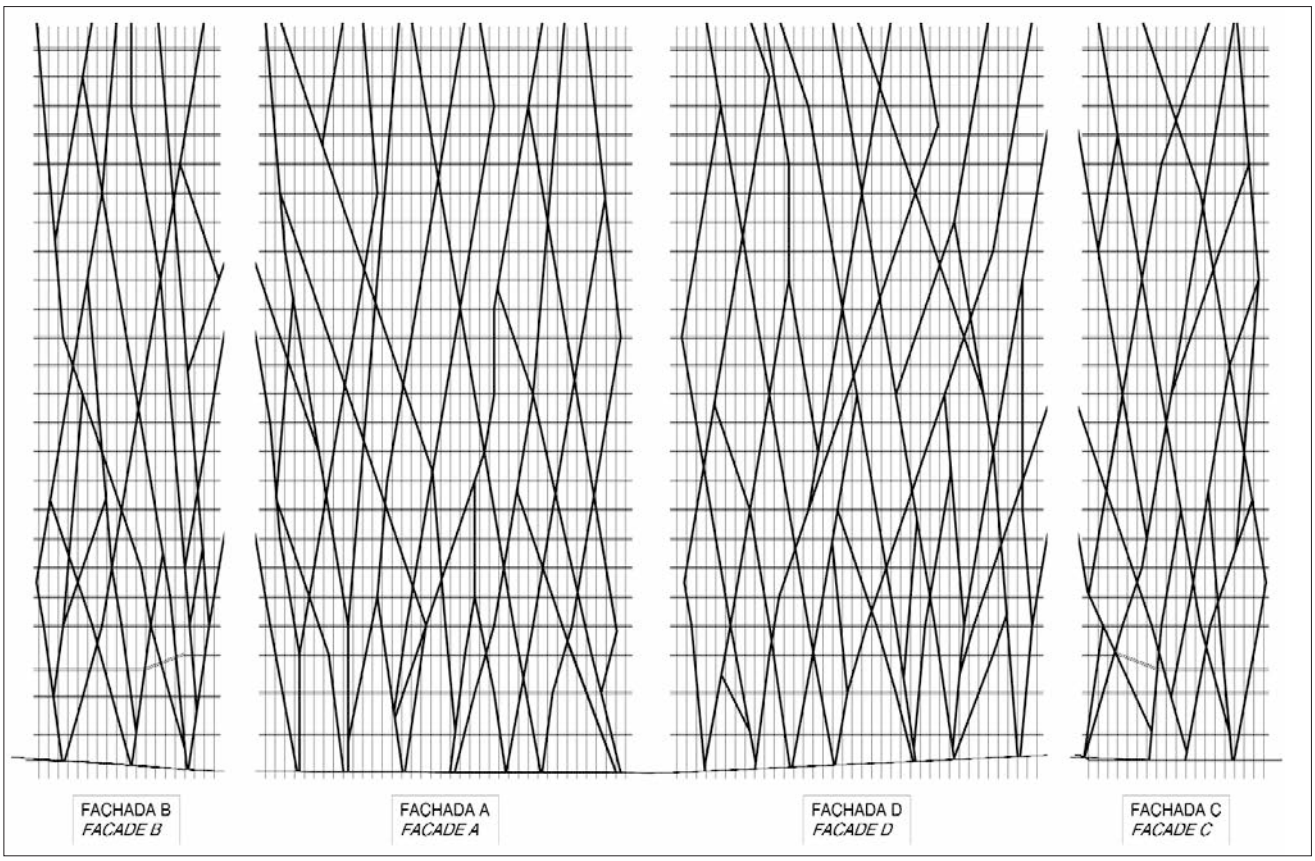

Figura 21. Capa exterior fachada (bambúes)
Figure 21. Outer layer of the facade (bamboos)

to 25 mm, and an outer box plate with a reduced thickness of 8 mm or 10 mm. The cross section corners are curved, with a curvature radius of 25 mm. Apart from contributing to the resistant cross section of the bamboo, the webs constitute longitudinal stiffeners for the longer box sides, providing a compact cross section, avoiding any tendency to local buckling phenomena.

The bamboos are separated 360 mm from the slab border and they are connected to the floor slabs or the patio beams through tubular S355 steel connections, with an outer diameter of 220 mm and thicknesses of 20 mm, 32 mm or 36 mm. These rigid connection elements, welded at the workshop to the bamboo intersection nodes, make the outer layer of the facade resist 9% of the floor loads (live loads and dead loads applied after the bamboos have been installed) and with a contribution to the global horizontal stiffness of the structure of approximately 18%.

The bamboos thus fully match the definition of the tensibility concept, as the capacity to use optimally the maximum dimensions of the outline of the building and as the intrinsic ability to drive the forces generated by the external actions working onto the structure, as actively as possible, towards its bearing points. In this case, the outer layer of the facade, taking advantage of the apparently free layout of the sloping elements, converts, by diagonalizations, the shear forces generated by the horizontal action of wind and earthquake into axial forces in the bamboos.

Between the two facade layers, the curtain wall is placed with a 250 mm diameter hole for the introduction of the bamboo connection. In the facade areas delimiting the patios, the tubular connections are welded to the web of the outer C-shaped profile of the patio beam, which is properly reinforced by means of a transversal stiffener (Figure 23).

For the rest of the facade a small steel box was embedded in the concrete slab, in order to receive the bamboo connection at the end of the construction, once the curtain wall had been placed. The steel box is composed of a back plate and two lateral plates, perpendicular to the facade and welded to the edge UPN profile.

The tubular connection was welded to the aforementioned back plate by means of complete penetration butt welds and after carrying out the concreting of the floor slab. The shear load in the most stressed connections may reach a value of 1000 kN, under the load combination for the Ultimate Limit States, with wind as dominant load.

The steel box is open in its bottom and upper sides, in order to execute the butt weld of the tubular connection along its entire perimeter. However, due to the reduced dimensions of the steel box and when the significant tubular connection thickness made the welding process difficult, radial stiffeners were placed, welded to the tubular connection and the back plate by means of fillet weld (Figure 24). Moreover, these stiffeners allow to reduce the back plate thickness, and they were welded once placed the tubular connection in its final position.

Of the total shear load the bamboo connection transfers to the inner structure, 60% is driven by the steel box directly to the inner columns through the edge UPN profile. The

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

Desde las primeras fases de proyecto, la idea fundamental fue la de no limitar la función de los bambúes al dominio estético, produciendo una solución de gratuidad o formalismo de tipo maquillaje, sino de diseñar unos elementos atractivos que pudieran participar activamente en la resistencia y rigidez de la estructura global.

Con las dimensiones iniciales de los elementos dadas por el diseño arquitectónico y sin la colaboración de los bambúes en la rigidez global de la estructura, el desplome del edificio en coronación bajo la acción del viento habría sido inaceptable. En lugar de incrementar el espesor de las pantallas del núcleo y las secciones transversales de los soportes, se prefirió aprovechar estos elementos metálicos inclinados de la capa exterior de la fachada.

Un dialogo activo entre Ingeniería Estructural y Arquitectura llevó a definir una sección transversal equilibrada, que pudiera satisfacer los requisitos de ambos equipos, y establecer una disposición dimensional y formal del entramado de tubos exteriores que lograra que la aportación resistente de sus piezas fuera apreciable y, al menos, proporcional al coste relativo de las mismas. Esta consideración, y los sucesivos análisis del sistema estructural conjunto, considerando especialmente los efectos térmicos provocados por el gradiente de soleamiento entre la fachada exterior y la interior, determinaron la necesidad de incrementar las dimensiones de la sección transversal original definida en el proyecto arquitectónico inicial. Dichas dimensiones se incrementaron desde 220 x 240 mm, previstos en el proyecto arquitectónico inicial, hasta 240 x 680 mm, proporcionando la rigidez horizontal necesaria a la estructura global y al mismo tiempo ofreciendo una mayor entidad estética a los bambúes.

En la Figura 22 se muestra la sección transversal tipo de un bambú, compuesta por dos almas interiores de espesores de 10 a 25 mm y un forro metálico exterior con espesores reducidos de 8 ó 10 mm. Las esquinas de la sección transversal tienen un radio de curvatura de 25 mm. Las almas interiores, además de contribuir en la sección total resistente del bambú, rigidizan internamente sus caras largas manteniéndolas eficaces y garantizando así secciones de carácter compacto al evitar cualquier tendencia a fenómenos de abolladura local.

Los bambúes estás separados 360 mm del borde del forjado y están conectados a las vigas de patio o a las losas de planta a través de conexiones tubulares en acero S355 con un diámetro exterior de 220 mm y espesores de 20 mm, 32 mm o 36 mm. Estos potentes elementos de conexión perpendiculares a la fachada y soldados en taller a los nudos del entramado de bambúes permiten que la capa exterior de la fachada resista el 9% de las cargas verticales de forjado (carga muerta aplicada posteriormente a la colocación de los bambúes y sobrecargas) y contribuya a la rigidez horizontal total en un 18%.

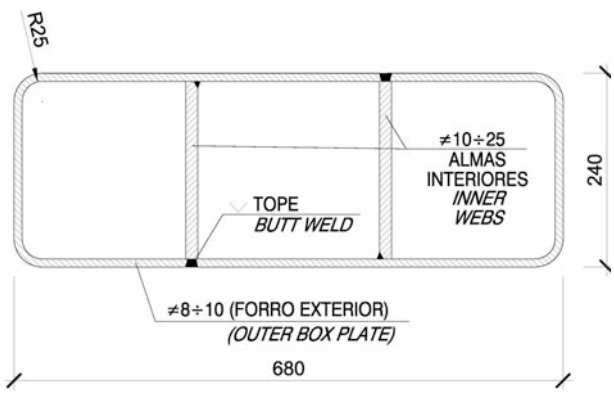

Figura 22. Sección transversal bambú (cotas en mm)
Figure 22. Bamboo cross section

Los bambúes corresponden plenamente a las dos definiciones del concepto de tensibilidad, aprovechando las dimensiones globales de la estructura y canalizando los esfuerzos provocados por las acciones horizontales de viento y sismo hacia los puntos de apoyo de una manera simple y activa, transformando por diagonalizaciones los rasantes en esfuerzos axiles.

Entre las dos capas de la fachada se ubica el muro cortina, con aberturas de 250 mm de diámetro en correspondencia con los puntos de conexión de los bambúes con las losas de planta, para permitir el paso del elemento tubular. En las zonas de fachada alrededor de un patio, las piezas de conexión se han soldado al alma vertical del perfil exterior en C de la viga de patio, oportunamente reforzada mediante un diafragma transversal (Figura 23).

Para el resto de la fachada se ha colocado un cajetín metálico, soldado al perfil de remate en borde de forjado, para la recepción de la pieza de conexión del bambú posteriormente a la colocación del muro cortina. El cajetín está constituido por una chapa dorsal, a la que se suelda la pieza de conexión tubular posteriormente al hormigonado de la planta, y por dos piezas laterales perpendiculares a la fachada soldadas al perfil en C de remate.

El elemento de conexión se suelda a la chapa dorsal del cajetín mediante una soldadura a tope con penetración total para permitir la correcta transferencia de los grandes esfuerzos cortantes, que pueden alcanzar los 1000 kN bajo la combinación de cargas mayoradas con viento dominante.

El cajetín resulta abierto en sus caras superior e inferior, para permitir el soldeo de la pieza de conexión a la chapa dorsal a lo largo de todo el perímetro del tubo. Sin embargo, debido a las dimensiones reducidas del mismo cajetín, y en los casos en los que el espesor significativo de la pieza tubular dificultaba la correcta soldadura en todo el perímetro del tubo, se suplementaba dicha unión mediante rigidizadores radiales unidos a la pieza tubular y la chapa dorsal mediante soldaduras en ángulo (Figura 24). Estos rigidizadores han permitido además reducir el espe-

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

other 40% is transferred to the concrete slab by means of several longitudinal ϕ32 rebars and dense stirrups (Figure 24). From the slab, the shear load is driven again towards the facade perimeter through slab bending and transferred to the steel columns by means of stud shear connectors or embedded tubes (see section 3.3).

A thorough study was carried out from the early stages of the project, in order to simplify the connection between the downstand beam, the patio beam and the steel box connection to the slab, making the intersection possible among all the corresponding reinforcing bars and providing a correct load transfer between all the structural sub-systems (Figure 25 and Figure 26).

Due to the great number of intersection nodes, it was decided to carry out its construction at the workshop, so as to reduce the welding process on site. Thus, it was possible to guarantee the good appearance of the elements that maybe most characterise this building and that will be visible from the inside as well as from the Forum square.

The cross intersection joints between bamboos were carried out first by welding the inner webs to the tubular connection, then by adding thin external plates until obtaining a closed box node and finally by connecting each one of the four bamboos. These cross elements were previously prepared with a proper window in order to materialise their complete connection to the cross node by means of butt welds (Figure 27). Figure 28 shows a sample cross intersection node with the required aesthetical appearance and the adequate structural behaviour.

By means of the 3D FEM model, the local buckling of a bamboo between two consecutive connections and the global stability of the facade outer layer delimiting the great patios have been taken into account. As already described for the inner columns, knowing the axial forces N_d in the sloping elements, a set of 1.5% N_d horizontal forces have been introduced in 2D simple models while pre-dimensioning the patio beam cross sections. Finally, a non-linear analysis of the 3D FEM model was carried to study the global stability of the structure.

Under the reduced loads of the accidental fire load combination, the inner core and the vertical steel columns have sufficient bearing capacity to resist the vertical loads and the wind horizontal action, without the collaboration of the bamboos and their tubular connections, which are not fire protected.

4. CONSTRUCTION PROCESS

4.1. Core climbing formwork

The long spans of the floors and its irregular geometry needed the slabs to be rigidly connected to the concrete core, and required the structural continuity of the inner and outer slab areas across the core walls. The slab ϕ12/0.15 m rebars could not resist the corresponding bending moments along the core walls, so additional reinforcement was needed. Moreover, due to the tube-in-tube structural work and under the horizontal loads (wind or earthquake), the floor slabs are subjected to a significant increase of the bending moment at the core walls. The required reinforcements, from ϕ16/0.15 m up to ϕ25/0.15 m rebars, made the use of reinforcement continuity strips impossible, thus requiring couplers.

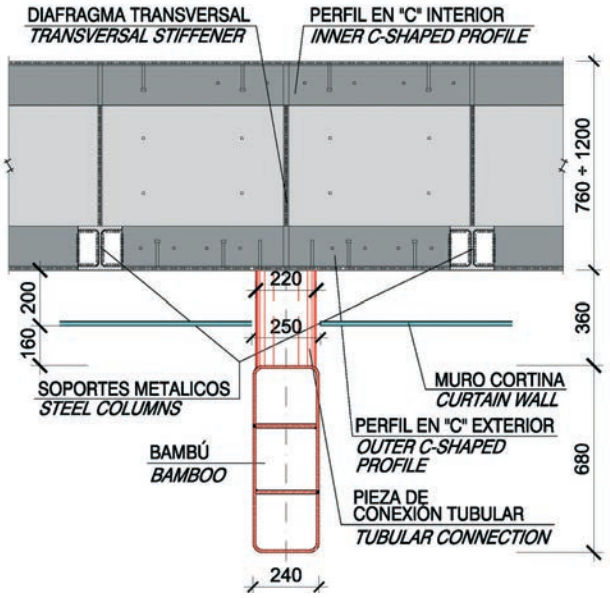

Figura 23. Planta de la conexión de los bambúes a las vigas de patio (cotas en mm)

Figure 23. Plan view of bamboo connection to a patio beam (dimensions in mm)

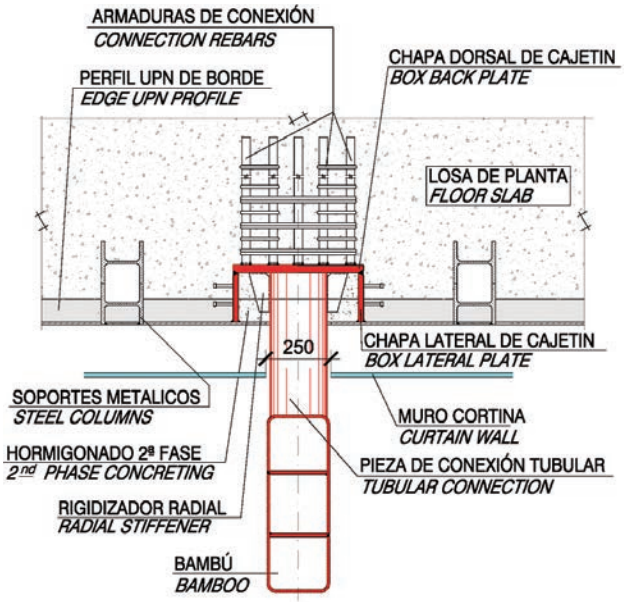

Figura 24. Planta de la conexión de los bambúes a las losas de planta (cotas en mm)

Figure 24. Plan view of bamboo connection to a floor slab (dimensions in mm)

The Construction Company decided to employ a climbing formwork in order to accelerate the rhythm of the core construction, with respect to a floor by floor core execution scheme [16]. In the core walls, a great amount of reinforcement couplers were left in order to place, later on, the aforementioned reinforcements required in the concrete slabs to guarantee its fixed connection to the core walls, and to resist the corresponding hogging bending moments.

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

sor de la chapa dorsal, y se unían a posteriori una vez colocado el tubo en su posición final.

De la carga transmitida por la pieza de conexión del bambú a la losa de planta, el cajetín transfiere el 60% directamente a los soportes metálicos mediante el perfil en C en borde de forjado, y el 40% a la losa de hormigón a través de barras longitudinales ϕ32 y cercos tupidos. La parte de carga recogida por la losa maciza se transfiere sucesivamente a los soportes metálicos mediante la flexión de la losa y gracias al sistema de conexión de los soportes con la misma (ver apartado 3.3).

Desde las primeras fases del proyecto, se estudiaron de manera rigurosa los detalles de encuentro de la viga descolgada, de la viga de patio y del cajetín de recepción de una pieza de conexión de bambú, para permitir la intersección de las armaduras correspondientes y asegurar una correcta transferencia de esfuerzos entre sub-sistemas resistentes.

El dibujo en la Figura 25 y la foto en la Figura 26 muestran un detalle de cruce entre las armaduras de la viga descolgada postesada y las armaduras de conexión de la viga de patio y del cajetín de recepción del bambú a la losa maciza.

Debido al gran número de nudos de intersección entre piezas inclinadas, se decidió llevar a cabo su construcción en taller para reducir los procesos de soldeo in situ. De esta manera se ha garantizado el aspecto adecuado de los elementos que probablemente más caracterizan este edificio y que son visibles tanto desde el interior como desde la plaza del Fórum.

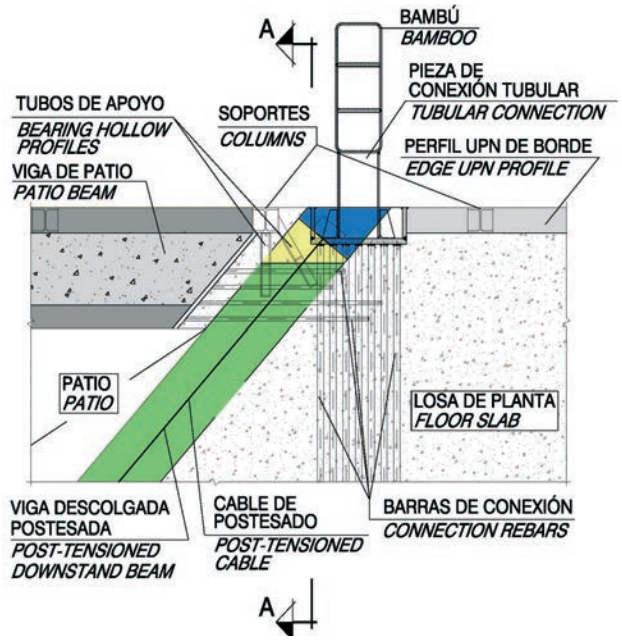

Figura 25. Detalle en planta del encuentro entre viga descolgada postesada, viga de patio y cajetín de recepción de un bambú

Figure 25. Plan view of the intersection detail among post-tensioned downstand beam, patio beam and steel box for bamboo connection

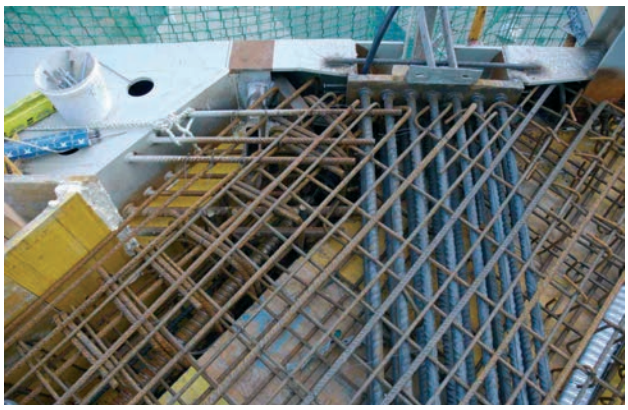

Figura 26. Detalle del encuentro entre viga descolgada postesada, viga de patio y cajetín de recepción de un bambú

Figure 26. Intersection detail among post-tensioned downstand beam, patio beam and steel box for bamboo connection

Dichos nudos se llevaron a cabo soldando primero las almas interiores a la pieza de conexión tubular, luego añadiendo las chapas de continuidad del forro exterior en el cruce hasta obtener un nudo cajón cerrado, y finalmente conectando cada uno de los cuatro brazos de bambú. Estos últimos fueros provistos de ventanas para materializar su completa conexión al nudo de cruce mediante soldaduras a tope (Figura 27). En la Figura 28 se puede ver un nudo de muestra de intersección de las piezas bambú, con el aspecto estético requerido y un adecuado comportamiento estructural.

A través del modelo de EF global de la torre, se tuvo en cuenta la inestabilidad local de los tramos de bambú entre dos piezas de conexión sucesivas y se comprobó la estabilidad global de la capa exterior de la fachada en la zona de los grandes patios. Como ya se ha descrito anteriormente para los soportes interiores, conociendo el axil N_d en los elementos inclinados, se introdujeron un grupo de fuerzas horizontales de valor 1,5% N_d en los modelos simplificados 2D para el predimensionamiento de las vigas de patio y en el modelo 3D, llevando a cabo un análisis no lineal para estudiar la estabilidad global de la estructura.

Bajo las cargas reducidas de la combinación accidental de incendio, el núcleo de hormigón y los soportes metálicos interiores constituyen el único sistema portante de la estructura. Por esta razón, mientras que los soportes interiores tienen una resistencia nominal contra incendios de 180 minutos, ni los bambúes ni sus piezas de conexión a la estructura interior están protegidos.

4. CONSTRUCCIÓN

4.1. Encofrado trepante del núcleo

Las elevadas luces de los forjados de planta han exigido un empotramiento elástico de las losas macizas en las pantallas del núcleo y la continuidad flexional entre zonas de forjado exterior e interior. Los momentos flectores de continuidad o de empotramiento elástico de la losa en el núcleo, bajo las acciones verticales

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

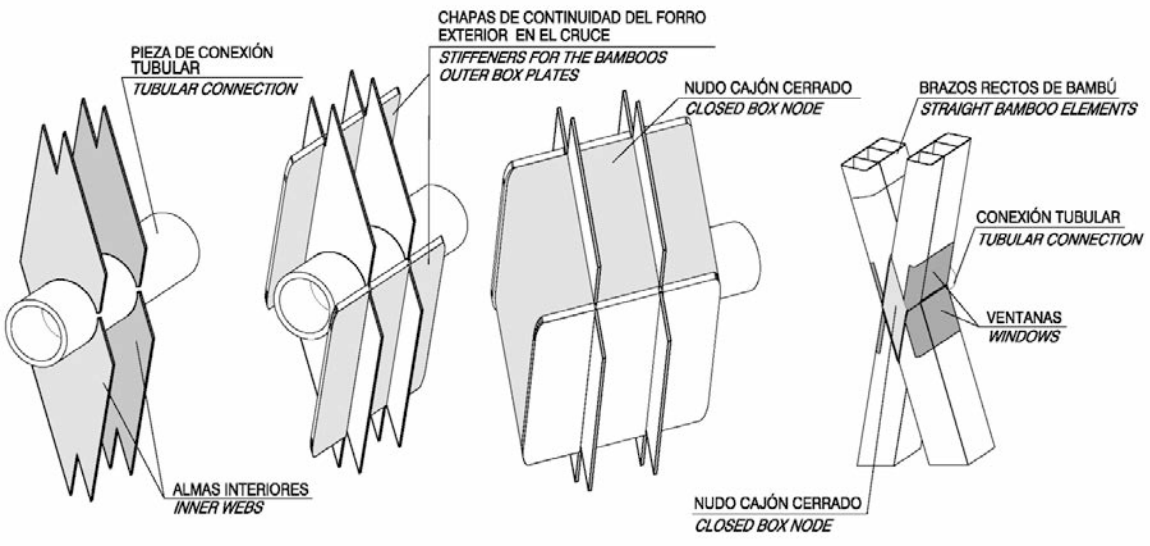

Figura 27. Secuencia constructiva nudo de cruce de bambúes
Figure 27. Construction process of a bamboo cross intersection node

4.2. Construction process of the facade inner layer

The edge UPN profile runs along the entire facade perimeter, providing a bearing support to the floor slab in the facade structure and connecting the steel columns. The inner layer of the facade was carried out by preparing sets of three-columns three-floors high at the workshop, connected to each other through the edge UPN profile, in order to reduce the number of on-site welded connections and to improve the verticality of the facade (Figure 29).

Outside the patios and during the execution of the corresponding floor slab, each column set was propped by means of provisional sloping steel elements connected to the lower level floor. Besides, the facades surrounding the clear space of a patio needed a bracing system made of crossing steel elements until all the composite beams of the lobby were completed (Figure 30).

4.3. Construction process of the facade outer layer

Once the bamboo intersection joints were executed at the workshop with the corresponding tubular connection, each steel member was elevated by means of the tower crane (Figure 31). It was driven to its final position and provisionally connected to the steel structure already executed through localised fillet welds. Then, once the tower crane jib was removed, all the complete penetration butt welds were carried out from a working platform (Figure 32).

4.4. Construction sequence: inner columns, curtain wall and bamboos

If the curtain wall had been placed, as usual, after the whole structure, the irregular layout of the bamboos would have excessively complicated its erection. Thus, the adopted construction sequence of the elements was: 1) inner columns, 2) curtain wall and 3) bamboos.



Figura 28. Nudo de muestra
Figure 28. Sample of cross intersection node

In the project, a maximum difference of 7 floor levels between the construction of the inner columns and the construction of the bamboos was considered. Prior to the beginning of the works, the Site Management and the Construction Company decided to raise the level difference up to 19 floors (Figure 33). The bamboos participate in the bearing structure work, resisting part of the dead load, applied after the bamboos have been installed, and live loads. The vertical columns constitute the only facade elements to resist the self-weight load of the building. Thus a staged analysis of the 3D FEM model was carried out, in order to take into account the axial force increase in the vertical columns, due to this construction sequence.

As the curtain wall was erected before the bamboos, the horizontal loads due to the wind action also increased the axial forces in the inner columns. Due to this, a difference

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



Figura 29. Construcción de la capa interior de fachada mediante módulos (vista desde el Hotel Diagonal Zero)
Figure 29. Facade inner layer under construction through columns sets (view from the Hotel Diagonal Zero)

de forjado, no podían ser resistidos por la armadura base, constituida por ϕ12/0,15 m. Además, debido al esquema estructural global de "tubo en tubo" y bajo las acciones horizontales de viento o sismo, los forjados están sujetos a unos incrementos no despreciables de esfuerzos en correspondencia con las pantallas del núcleo. Los refuerzos de armadura de flexión requeridos, desde ϕ16/0,15 m hasta ϕ25/0,15 m, no permitían el uso de cajas de armadura de esperas.

En la construcción se descartó el encofrado planta a planta del núcleo, poco competitivo para un edificio en altura y, para acelerar el ritmo de construcción del mismo, se utilizó un encofrado trepante [16]. Esto requirió el empleo de empalmes mecánicos para conectar a posteriori las armaduras del forjado y proporcionar su empotramiento en las pantallas del núcleo.

4.2 Proceso constructivo de la capa interior de la fachada (soportes)

A lo largo del perímetro de cada planta se ha colocado el antedicho perfil UPN para rematar el borde del forjado, proporcionar un apoyo para éste en la estructura metálica de fachada y conectar entre sí los soportes verticales. La construcción de la capa interior de la fachada se ha llevado a cabo preparando en taller módulos de soportes de tres plantas de altura conectados entre sí a través del perfil UPN, para reducir el número de soldaduras in situ y mejorar la verticalidad de la fachada (Figura 29).

En las zonas fuera de los patios y durante el hormigonado de una planta, uno de cada dos módulos se estabilizó a través de un puntal metálico provisional conectado al nivel inferior. Por otro lado, las fachadas en los patios requirieron un sistema contraviento de tipo Cruz de San Andrés hasta completar el hormigonado de las vigas de patio (Figura 30).

4.3 Proceso constructivo de la capa exterior de la fachada (bambúes)

Una vez realizados en taller los nudos de cruce entre bambúes, con el correspondiente tubo de conexión incorporado, se elevaba la pieza mediante grúa torre (Figura 31), se posicionaba en su configuración definitiva y se punteaba mediante soldadura a la estructura precedentemente ejecutada. A continuación, se retiraba la grúa y posteriormente se llevaban a cabo las soldaduras a tope completas desde una plataforma de trabajo, según se muestra en la Figura 32.



Figura 30. Arriostramiento provisional capa interior fachada en patio
Figure 30. Provisional shoring of the inner layer of the facade surrounding the lower patio

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



Figura 31. Elevación nudo mediante grúa torre
Figure 31. Elevation of a bamboo intersection node by means of the tower crane

of 6 floor levels between the erection of the curtain wall and the construction of the bamboos had not to be exceeded.

The building was inaugurated on January 2011 and it has been awarded with several prizes, such as the Leaf Prize 2011 to the best commercial building of the year.

Figures 34, 35 and 36 show some photos of the finished building.

5. CONCLUSIONS

The ZeroZero tower is a good example of synergic interaction between Engineering and Architecture. The strong combination of both has enhanced the design, providing it with a technical-structural character perfectly integrated with the architectonical-aesthetical one. This gave rise to an emblematic and monumental image, but far from formalisms and superficial makeup.

The structure of the ZeroZero tower could be placed half way between a conventional one and another of great singularity and innovative structural characteristics. The 24 floors height and the basic structural arrangement type (tube-in-tube) are clearly conventional, while the floor geometry, the presence of great lobbies and the special outer layer of the facade constitute innovative structural features.

The structural design of the ZeroZero tower can show the possibilities of application of the tensibility concept, which becomes evident in the following points:

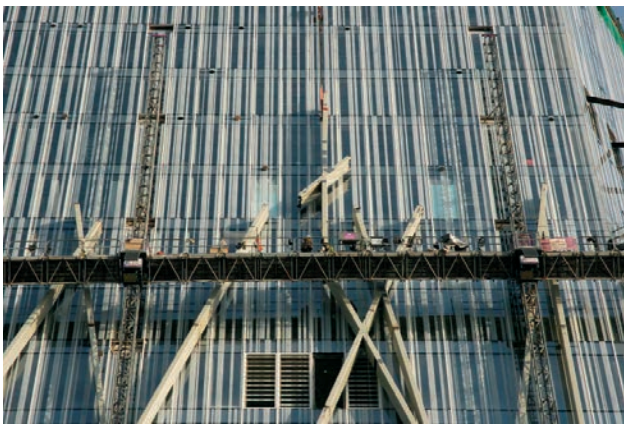

Figura 32. Colocación nudo para su soldeo desde plataforma de trabajo
Figure 32. Placing of a bamboo intersection node for its welding from a working platform



Figura 33. Vista del edificio en construcción con el importante desfase soporte-muro cortina-bambúes
Figure 33. Building under construction showing the execution sequence columns-curtain wall-bamboos

- *Interaction between structural sub-systems: slabs-core, slabs-facades.*
- *Rigorous understanding of the slenderness and the precise boundary conditions, in order to guarantee the global and local stabilities: vertical columns and patio beams.*
- *Use of "mega-structures" in order to make the best use of the maximum dimensions of the outline of the building: outer layer of the facade.*

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

4.4. Desfase de construcción de soportes interiores, muro cortina y bambúes

Si el muro cortina se hubiera colocado, como es usual, una vez acabada la estructura, la distribución irregular de los bambúes habría complicado excesivamente su construcción. Por lo tanto la secuencia de construcción adoptada fue la siguiente: 1) soportes interiores, 2) muro cortina y 3) bambúes (Figura 31 y Figura 33).

En el proyecto se consideró un desfase máximo de 7 niveles de planta, que posteriormente en obra pasó a ser de 19 niveles, entre la construcción de los soportes interiores y la de los bambúes. Los bambúes contribuyen a hacer frente a las cargas permanentes aplicadas posteriormente a su colocación y a las sobrecargas, siendo los soportes los únicos elementos que resisten el peso propio de la estructura. Fue por lo tanto necesario llevar a cabo un análisis evolutivo del modelo 3D para tener en cuenta el incremento de axil en los soportes verticales debido a dicho desfase.

Dado que el muro cortina se colocó con anterioridad a la construcción de los bambúes, también la acción horizontal del viento introducía unos axiles de compresión en los soportes verticales durante la construcción. Esto llevó a fijar un desfase máximo de 6 plantas entre la colocación del muro cortina y la de los bambúes.



Figura 34. Edificio terminado. Vista de su coronación desde la Avenida Diagonal
Figure 34. Finished building. View of its higher part from the Avenida Diagonal



Figura 35. Edificio terminado. Vista desde el edificio Fórum
Figure 35. Finished building. View from the Forum building

El edificio fue inaugurado en Enero de 2011, y ha obtenido diversos premios, como el Leaf Prize 2011, al mejor edificio de oficinas.

En las Figuras 34, 35 y 36 se muestran algunas fotos del edificio terminado.

5. CONCLUSIONES

La Torre Diagonal ZeroZero es un ejemplo significativo de interacción sinérgica entre Arquitectura y Estructura, que ha buscado desde su comienzo una potente combinación de ambos que valorara y resaltara el diseño. La integración de aspectos técnico-estructurales en otros de carácter arquitectónico-estético ha permitido lograr una imagen emblemática, pero totalmente alejada de formalismos y maquillajes superficiales.

Igualmente, presenta una estructura situada a mitad de camino entre un sistema convencional y otro de gran singularidad. La altura de 24 plantas y la tipología base estructural de "tubo en tubo" resultan claramente convencionales. Sin embargo, la disposi-

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



Figura 36. Edificio terminado. Vista desde las áreas del Fórum
Figure 36. Finished building. View from the Forum areas

ción formal de la planta en forma de punta de lanza, la presencia de grandes patios diáfanos y la especial disposición formal del entramado de tubos exteriores constituyen características estructurales novedosas.

El diseño estructural del edificio ZeroZero puede considerarse como muestra de posibilidades operativas de aplicación y alcance del concepto de tensibilidad de la forma arquitectónica, que se manifiesta en:

- Interrelación de subestructuras o sistemas: losas-núcleos, losas-fachadas.
- Entendimiento riguroso de la esbeltez y de los vínculos precisos para conseguir la estabilidad global y local: soportes verticales y vigas de patio.
- Megaestructuras para el empleo de las dimensiones totales del edificio: capa exterior de la fachada.

REFERENCIAS / *REFERENCES*

[1] MARTÍNEZ-CALZÓN, J.; CERIANI, L. "ZeroZero tower for the new Telefónica headquarters in Barcelona". *1st International Conference on Structures & Architecture (ICSA)*, Guimarães. 2010.

[2] MOLDOVEANU, M. [coordinador/ coordinator]. *Torre Telefónica Diagonal 00*. 1ª ed. Barcelona: Lunwerg S.L., 2011. 231 p.

[3] TARANATH, B. *Structural Analysis and Design of Tall Buildings*. 1ª ed. New York: McGraw-Hill, 1988. 739 p. ISBN: 9780070628786.

[4] MARTÍNEZ-CALZÓN, J. "La Ingeniería Estructural y el dominio de la Forma". *IVº Congreso de ACHE*, Valencia del 24 al 27 de noviembre de 2008. Madrid: Asociación Científico-Técnica de Hormigón Estructural (ACHE), 2008. ISBN: 978-84-89670-62-4.

[5] MARTÍNEZ-CALZÓN, J. "Treatment of the Form in Structural Engineering". *1st International Conference on Structures & Architecture*, Guimarães. 2010.

[6] MARTÍNEZ-CALZÓN, J. "Form, Structure and Energy". *Structural Engineers World Congress - SEWC*, Como. 2011.

[7] MARTÍNEZ-CALZÓN, J. "Diseño Conceptual e Innovación en la realización de Estructuras de Hormigón Estructural". *Jornadas de Hormigón Estructural - JEHE*, Universidad de Olavarría, Buenos Aires. 2011.

[8] MUTTONI, A.; SCHWARTZ, J.; THÜRLIMANN, B. *Design of Concrete Structures with Stress Fields*. 1ª ed. Basel: Birkhäuser Verlag, 1997. 143 p. ISBN-13: 978-0817654917.

[9] MUTTONI, A.; FERNÁNDEZ, M. "Dimensionamiento y verificación del hormigón estructural mediante el método de los campos de tensión". *Hormigón y Acero*, 2007, nº 243, p. 93-102.

[10] AA.VV. "Edificio Torre Espacio, Edificio Torre de Cristal, Edificio Torre Sacyr-Vallehermoso, Edificio Torre Caja Madrid". Número Monográfico. *Hormigón y Acero*. 2008, nº 249, p. 9-223.

[11] CALAVERA, J.; GARCÍA, L. *Cálculo de flechas en estructuras de hormigón armado: forjados, losas, vigas de canto, vigas planas.* 1ª ed. Madrid: Intemac, 1992. 336 p.

[12] BACHMANN, H. *Vibrations problems in structures*. 1ª ed. Basel: Birckhäuser-Verlag, 1995. 234 p.

[13] KONG, F.; EVANS, R. *Reinforced and Prestressed Concrete.* 3ª ed. Londres: E & FN Spon, 1998. 508 p. ISBN: 978-0412377600.

[14] MARTÍNEZ-CALZÓN, J.; ORTIZ, J. *Construcción mixta hormigón-acero.* 1ª ed. Madrid: Rueda, 1978. 910 p. ISBN: 84-7207-010-7.

[15] *EN 1993-1-1: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1.1: General rules and rules for buildings*. Bussels: CEN, 2005.

[16] AA. VV. *Construcción y Control de Edificios Altos.* Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Asociación Científico-Técnica de Hormigón Estructural (ACHE), 2008. 356 p. ISBN-13: 978-8438003879.

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

RELACIÓN DE PARTICIPANTES/*LIST OF PARTICIPANTS*

Propiedad/Owner: Consorci de la Zona Franca de Barcelona

Arrendatario/*Tenant*: Telefónica de España

Arquitectos/*Architects*: Estudio EMBA Massip-Bosch Arquitectes/*EMBA Massip-Bosch Arquitectes office*

Estructura/*Structural Engineers*: MC2 Estudio de Ingeniería/*MC2 Engineering Consultant Office*

Construcción/*Contractors*:

- Fase 0/*Phase 0* - excavaciones/*excavations*: DRAGADOS
- Fase 1A/*Phase 1A* - cimentaciones y obras de contención/*foundations and retention walls*: TERRATEST
- Fase 1B/*Phase 1B* - estructura bajo rasante/*structures below ground level*: G&O
- Fases 2 y 3/*Phases 2 & 3* - estructura sobre rasante/*structures above ground level (main contractor)*: FCC
  - estructura metálica y muro cortina/*steel structure and curtain wall*: MARTIFER
  - pretensado/*post-tensioning system:* BBR
  - encofrados/*formwork systems:* ULMA
- Fase 4/*Phase 4* - instalaciones/*mechanical systems:* SG
- Fase /*Phase 5* - ascensores/*elevators:* THYSSENKRUPP

Control de ejecución/*Control of construction*: Aumedesdap

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