

# Torre de Cristal. Proyecto de estructura de un edificio de gran altura

## *Torre de Cristal. Structural desing for a high rise building*

Pedro Juan Blanco Temprano<sup>(1)</sup>, César Herrera Castilla<sup>(2)</sup>  
y José Ignacio Viñals<sup>(3)</sup>

Recibido / Received: 30/11/2007  
Aceptado / Accepted: 25/02/2008

### RESUMEN

El proyecto de estructura y dirección de Obra de una torre de 250 m de altura es una carrera de fondo, se trata de un proyecto realmente singular, no equiparable a otros proyectos de edificación u obra civil y cuya elaboración tiene sus propios condicionantes.

La coordinación entre los distintos proyectos adquiere especial importancia. La estructura tiene unos condicionantes irrenunciables a los que se debe adaptar la arquitectura, como es el núcleo central con sus dimensiones y espesores.

Asimismo los patinillos y huecos de instalaciones y los núcleos de comunicación vertical imponen unas necesidades geométricas que deben estar perfectamente coordinadas con la estructura del edificio.

El diseño estructural exige estudiar en profundidad ciertos aspectos que en edificios normales no tienen relevancia alguna; así pues, se realizan ensayos en túnel de viento, estudios dinámicos y de vibraciones, análisis de los acortamientos de los elementos verticales, tanto absolutos como diferenciales.

Por otro lado, reducir el peso de los forjados y minimizar, o eliminar como en este caso, los puntales y encofrados recuperables son importantes criterios de diseño.

Un óptimo proceso constructivo es fundamental para el éxito del diseño estructural, que incluye el estudio de los encofrados autotrepantes y de los ciclos que se repiten en cada planta a lo largo de toda la torre.

Finalmente, se debe hacer un ejercicio de imaginación para familiarizarse con el orden de magnitud de los elementos estructurales, algunas veces muy distintos de otras estructuras, como sucede en la coronación, donde las escalerillas de la cara Oeste nacen a la cota 210,70 m sobre el nivel del suelo y alcanzan una altura 36,26 m, equivalente a un edificio de 12 plantas o en los poco comunes espesores de las pantallas del núcleo.

**Palabras clave:** Torre, edificio de gran altura, edificio singular, estructura.

<sup>(1)</sup> Dr. Ingeniero Aeronáutico.

<sup>(2)</sup> Ingeniero de Caminos.

<sup>(3)</sup> Ingeniero de Caminos.

## ABSTRACT

*Structural design and site supervision for a 250-m tower are a long distance race, a truly unique project not comparable to other building or civil works endeavours, and one with its own specific conditioning factors.*

*Of particular importance in such a building is the coordination of the various designs involved. Its structure is subject to certain imperatives to which the architecture must adapt – the central core with its dimensions and thicknesses, for instance.*

*At the same time, the service shafts and openings and vertical mobility cores impose geometric needs that must be perfectly coordinated with the building structure.*

*The structural design calls for an in-depth study of certain issues that are of little or no relevance in normal buildings; hence the wind tunnel tests, dynamic and vibration studies, and the analysis of the absolute and differential shortening of vertical members.*

*In another vein, reducing floor/ceiling slab weight and minimizing, or in this case eliminating, shoring and reusable formwork are important design criteria.*

*Optimal construction procedures are essential for the success of the structural design, which includes the study of slipforms and sequences repeated on every storey in the tower.*

*Finally, some amount of imaginative projection is required to come to grips with the order of magnitude of the structural members, at times very different from the dimensions of other structures, such as the unusual thickness of the core walls, or the ladder-like structures on the west side of the crown that spring from an elevation of 210.70 m above grade and rise to a height of 32.26 m, equivalent to a 12-storey building.*

**Key word:** Tower, High rise building, structure, singular building.

## INTRODUCTION

The Torre de Cristal is located on Madrid's Paseo de la Castellana, specifically where the former Real Madrid Sports City once stood, forming part of what is now known as Cuatro Torres Business Area.

Madrid's new business centre includes three other high rise buildings, a convention centre and a ring road providing direct motor vehicle access to the towers from the second underground storey.

In this apparently rectangular prism with sides measuring 48.85 × 38.85 m, the corners bevel with height to ultimately form an irregular octagon. The 250-m total above grade height is divided into 46 office and five machine room storeys, two of which are located immediately above the main lobby, another between storeys 31 and 32 and the last two over storey 46. The building crown is located, in fact, at 982 m above sea level.

The lot itself is rectangular, measuring 100 × 75 m, with the shorter side parallel to the Paseo de la Castellana. While the tower is sited on the southeast

corner, underground, the entire lot is occupied by a car park.

## 2. TERRAIN

The terrain on which the tower stands consists of detrital Pliocene formations (Madrid facies). According to the probes performed, the underlying strata comprise varying proportions of "tosquiza" sand (compact fine sand) and sandy "tosco" clay (ranging from sandy silt clay to clayey silt sand).

Perched water tables confined by strata with a high clay content were found at different levels, where they saturated the sandiest layers. Sight must not be lost of the fact that for decades this lot was the site of the Real Madrid's training fields, which were watered daily, providing a continuous supply of moisture.

## 3. BELOW GRADE UNITS

The six-storey car park reaches a depth of 20 m below grade, where the surface footing foundations transmit loads of up to 500 kPa to the terrain.

## 1. INTRODUCCIÓN

La Torre de Cristal se encuentra situada en el paseo de la Castellana de Madrid, concretamente en la antigua Ciudad Deportiva del Real Madrid y forma parte del complejo conocido como Cuatro Torres Business Area.

El nuevo centro de negocios de Madrid está formado además por otros tres edificios de gran altura, un centro de convenciones y un anillo distribuidor a través del cual los vehículos podrán acceder desde distintos puntos de la ciudad directamente al sótano segundo de cada una de las torres.

Se trata de un edificio en forma de prisma rectangular de lados 48,85 m × 38,85 m cuyas esquinas se van achafalando según asciende, dando lugar a una sección transversal en forma de octógono irregular y que corona a 250 m de altura, a lo largo de los cuales se distribuyen 46 plantas de oficinas y 5 plantas mecánicas, situadas dos de ellas sobre el vestíbulo de acceso, otra entre las plantas 31 y 32 y finalmente dos más por encima del nivel 46. Así pues la coronación de la torre alcanza la cota de 982 m sobre el nivel del mar.

La parcela tiene forma rectangular de dimensiones 100 m × 75 m, con su lado



Figura 1. Torre. Vista general.  
 Figure 1. Tower. Overview.

menor paralelo al paseo de la Castellana. La torre se sitúa en la esquina Suroeste, mientras que el aparcamiento subterráneo para 1.200 plazas la ocupa en su totalidad.

## 2. CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO

El terreno donde se asienta la torre está constituido por formaciones pliocénicas detríticas de facies Madrid. De los sondeos realizados se obtiene una configuración estratigráfica formada por arenas tosquizas y toscos arenosos en distintas proporciones.

En cuanto al nivel freático se detectaron distintos niveles colgados que satura-



Figura 2. Excavación y muro pantalla.  
 Figure 2. Excavation and diaphragm wall.

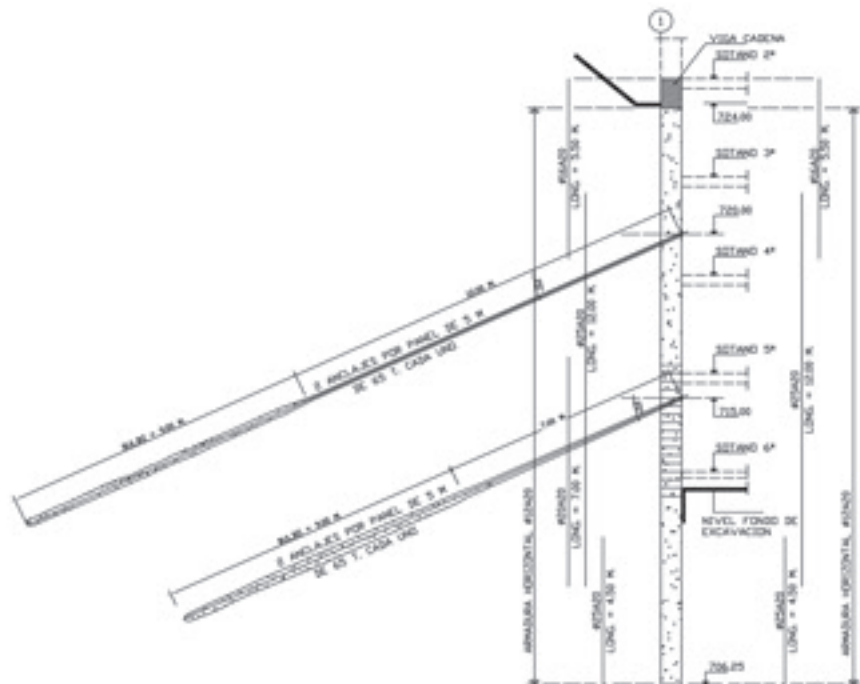


Figura 3. Sección tipo de muro pantalla.  
 Figure 3. Standard cross-section and diaphragm wall.

ban los estratos más arenosos y quedaban confinados por estratos más arcillosos. No debemos olvidar que esta parcela ha alojado durante décadas los campos de entrenamiento del Real Madrid, los cuales se regaban a diario, constituyendo un aporte continuo de agua.

## 3. CUERPOS BAJOS

El aparcamiento consta de seis sótanos y alcanza una profundidad de 20 m bajo rasante, donde se ha dispuesto una cimentación superficial mediante zapa-

*From the second basement down, the weight of the earth is retained by a 60 cm thick diaphragm wall with panels 5.0 m wide and two anchorages per panel at two different levels (see Figure 3).*

*The diaphragm wall delimits a single space for the Torre de Cristal and the Torre Espacio basements, to avoid having to build a diaphragm wall between the two properties in addition to a concrete block party wall.*

*Subsequently, the Municipal Government of Madrid Council built the ring*

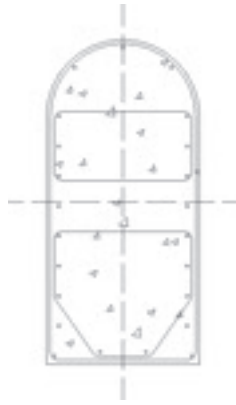


Figura 4. Pilar de Sótano.  
Figure 4. Basement column.

road along the east and west edges of the lot to provide vehicle access to the second basement.

The excavation earth was used as a fill in the areas where needed and to supply fill for other works, thereby avoiding the environmental impact caused by dumping.

The basement structure, designed and built using in situ concrete only, consists of rectangular concrete columns whose smaller dimension is never larger than 40 cm, while the larger dimension varies. At least one of the sides is semi-circular to facilitate parking and prevent scraping damage to vehicles (see Figure 4).

The horizontal structure consists in solid reinforced concrete slabs with depths of from 30 to 50 cm depending on the span as well as the loads involved, which range from 11.0 to 25.0 kN/m<sup>2</sup>.

Two expansion joints were made in the below grade corpus, one running from north to south and the other from east to west, giving rise to three areas: two below grade units and the tower.

In addition, two Mesnager type joints (Figure 5) were made at the perimeter of the tower slabs by crossing the upper and lower reinforcing bars. The dual articulation generated was designed to accommodate possible differential settlement of the underground units and the tower, a problem that did not in fact arise.

The standard basement slab depths and additional loads are 30 cm and 3.00 kN/m<sup>2</sup> in the first through the fifth storeys (the sixth is the bottom slab); the figures for the ground storey, by contrast, are 40 cm and 25.0 kN/m<sup>2</sup>, for this slab must be able to withstand the live loads generated by a fire fighting vehicle.

This posed construction stage difficulties, for the ground storey slab weighs 10.0 kN/m<sup>2</sup>, and construction loads accounted for a further 1.0 kN/m<sup>2</sup>. This meant shoring up at least three of the lower basements, where the additional loads were 3.0 kN/m<sup>2</sup>, so as not to exceed their design load.

The ground storey design load, on the contrary, afforded enormous advantages during tower erection, for it was sufficiently sturdy to be used for storing materials on site, housing workshops, accommodating mobile crane access the lower storeys, supporting construction lifts for passengers and goods, and so forth.

tas aisladas que transmiten al terreno una tensión admisible de 500 kPa.

La contención de las tierras a partir del sótano segundo se realiza mediante un muro pantalla de 60 cm de espesor y paneles de 5,0 m de ancho, soportados por 2 anclajes en 2 niveles por cada panel (ver Figura 3).

El muro pantalla define un volumen único con el sótano de Torre Espacio, evitando de esta manera realizar un muro pantalla en la medianería, para posteriormente levantar un muro de bloques de hormigón entre ambas propiedades.

Posteriormente el Ayuntamiento de Madrid ejecutó el anillo distribuidor que discurre a lo largo de los límites Este y Oeste de la parcela y permite el acceso de vehículos al sótano segundo.

Las tierras resultantes del vaciado de la parcela se utilizaron como material de relleno en aquellas zonas donde era necesario y como material de aportación en otras obras, evitando así el impacto ambiental que ocasionarían los vertidos.

La estructura de los sótanos se ha diseñado íntegramente en hormigón ejecutado "in situ" y está formada por pilares de hormigón rectangulares, cuya dimensión menor no supera nunca los 40 cm, siendo la otra dimensión variable. Al menos una de sus caras es semi-circular para facilitar las maniobras de aparcamiento y evitar rozaduras en los vehículos (ver Figura 4).

En cuanto a la estructura horizontal, está formada por losas macizas de hor-

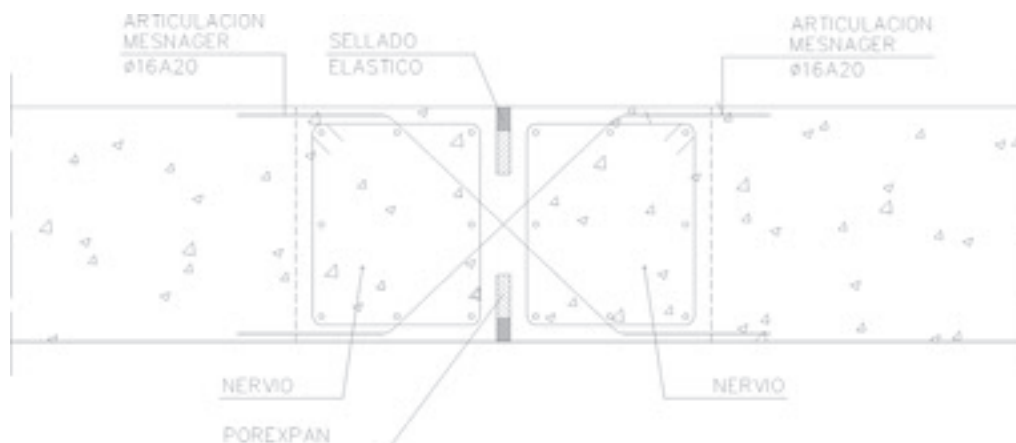


Figura 5. Junta Mesnager.  
Figure 5. Mesnager joint.

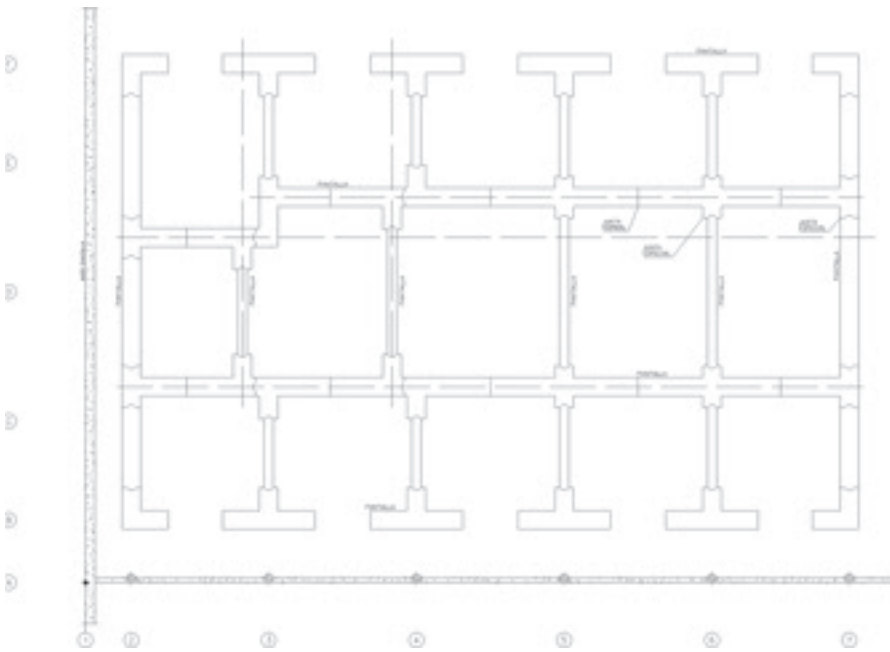


Figura 6. Plano en planta de pantallas de cimentación.  
Figure 6. Plan view of foundation walls.

migón armado de espesores comprendidos entre 30 cm y 50 cm función de las luces y de las cargas correspondientes, que pueden llegar a ser de 11,0 kN/m<sup>2</sup> y 25,0 kN/m<sup>2</sup> respectivamente.

En los cuerpos bajos se han creado dos juntas de dilatación, una en dirección Norte-Sur y otra en dirección Este-Oeste, dando lugar a tres zonas, dos formadas por los cuerpos bajos y una tercera por la torre.

Además, en el perímetro de las losas de la torre se han dispuesto 2 juntas tipo Mesnager (Figura 5), que consisten en un cruce de armaduras superior e inferior, para crear una doble articulación en previsión de posibles asentamientos diferenciales entre los cuerpos bajos y la torre, que finalmente no se han producido.

Los espesores y cargas adicionales tipo de las losas de los sótanos son de 30 cm y 3,00 kN/m<sup>2</sup> en los sótanos quinto a primero (el sexto es la solera) y 40 cm y 25,0 kN/m<sup>2</sup> en planta baja, pues debe ser capaz de soportar el paso de un camión de bomberos.

Esto supuso una dificultad de ejecución, pues la losa de planta baja pesa 10,0 kN/m<sup>2</sup> a los que se debe añadir al menos 1,0 kN/m<sup>2</sup> de sobrecarga de uso durante su construcción, por lo que fue necesario apuntalar al menos cuatro sótanos inferiores de carga adicional 3,0 kN/m<sup>2</sup> para no sobrepasar su carga de diseño.

Por otra parte, la carga de diseño de planta baja ofrece grandes ventajas durante la ejecución de la torre, pues permite el acopio de materiales, la formación de talleres, el uso de grúas móviles para acceso a las plantas inferiores, el apoyo de los ascensores y montacargas de obra, etcétera.



Figura 7. Ferralla para paneles de pantallas de cimentación.  
Figure 7. Rebar for foundation walls.

#### 4. TOWER FOUNDATIONS

The terrain proved to be highly favourable, for while it could be readily excavated with no need for special methods, its high consistency and compactness ensured low deformability.

The joint slab-bearing wall foundation system designed to support the heavy loads carried by the tower to the terrain featured a number of distinctive characteristics (Figure 6).

This deep foundation comprises bearing walls 120 cm thick and 20 m long, placed underneath the columns and the walls forming the central core. These bearing walls, interconnected by means of 60 cm thick transverse walls, transmit loads to the terrain both across the toe and by friction along the shaft (Figure 7).

Special jointing was designed to prevent slipping between excavation pits and thereby ensure that the walls would work as a whole.

These joints consisted in solid iron half-rods welded in saw tooth formation to a piece of sheet metal that was in turn attached to the reinforcing steel in the walls, generating a shear key when the next layer of concrete was poured.

The non-slip joint covered the walls up to two thirds of their height, the minimum length strictly necessary. This



Figura 8. Cimentación. Vista general.  
Figure 8. Foundations. Overview.

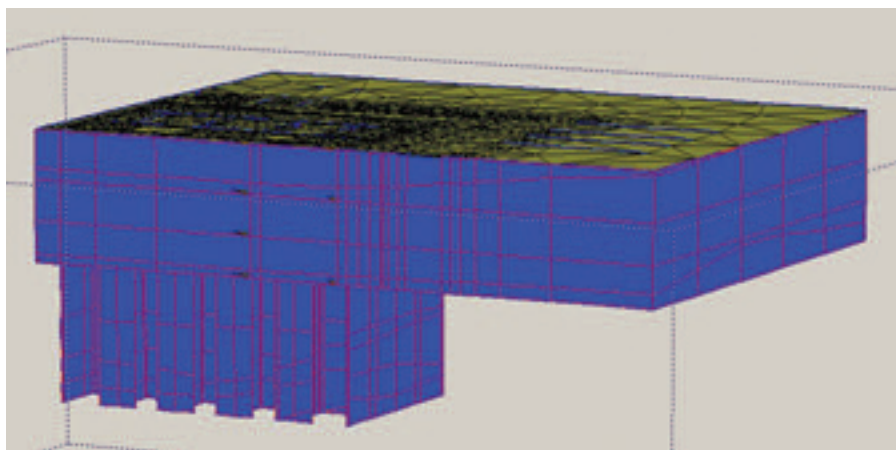


Figura 9. Modelo Estructural en Plaxis 3D.  
Figure 9. Plaxis 3D structural model.

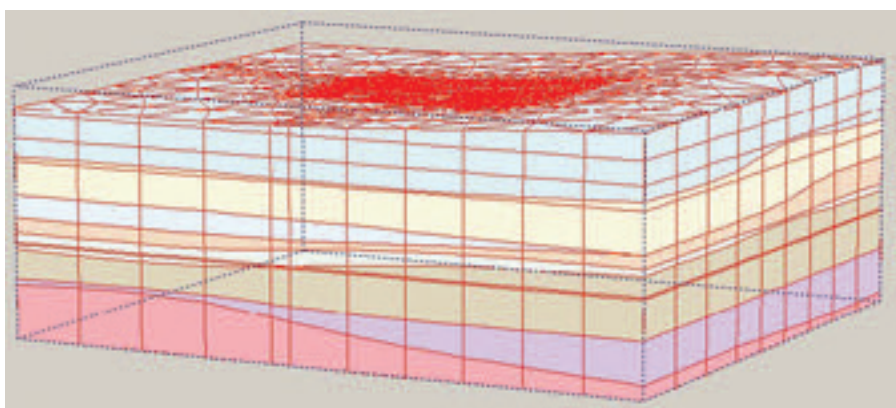


Figura 10. Modelo del Suelo en Plaxis 3D.  
Figure 10. Plaxis 3D soil model.

was because their assembly entailed certain extra difficulties due to the increased weight of the reinforcement that had to be placed in the excavation and to the shift in its centre of gravity, for the

joint was attached to one of the sides only.

The entire set of deep foundation walls work in conjunction with a foun-

#### 4. CIMENTACIÓN DE LA TORRE

Las características del terreno resultaban muy favorables, pues permitía su excavación sin necesidad de usar medios especiales y a la vez, presentaba una elevada consistencia y compacidad y reducida deformabilidad.

Para soportar las elevadas cargas que transmite la torre al terreno se diseñó una cimentación conjunta losas-paneles portantes con diversos aspectos singulares (Figura 6).

Se trata de una cimentación profunda mediante pantallas portantes de 120 cm de espesor y 20 m de longitud, situadas tanto por debajo de los pilares como de los muros que forman el núcleo central, las cuales quedan unidas entre sí mediante pantallas transversales de 60 cm de espesor, transmitiendo sus esfuerzos al terreno tanto por punta como por fuste (Figura 7).

Con el objetivo de lograr que dichos paneles se comporten de forma conjunta se diseñaron unas juntas especiales que impedían el deslizamiento entre los bataches.

Esta junta estaba formada por una chapa metálica a la que se soldaron medios cuadrillos macizos en forma de dientes de sierra, y quedaba fijada a la armadura de los módulos de pantalla, de manera que al hormigonar el siguiente módulo se crease una llave de cortante.

La junta antideslizante llegaba hasta los dos tercios de la longitud de la pantalla, que era la longitud mínima estrictamente necesaria, puesto que su montaje generaba unas dificultades añadidas debido al aumento de peso de la armadura que se debía introducir en la excavación y además desplazaba el centro de gravedad de dicha armadura al estar colocada únicamente en uno de sus extremos.

El conjunto de los paneles profundos estaban vinculados a una losa de cimentación de 150 cm de espesor, de manera que junto con la transmisión de carga al terreno a través de los paneles portantes se producía la de las cargas superficiales a través de la losa (en la Figura 8 se aprecia una foto del conjunto durante el período de ejecución).

El cálculo de la cimentación de la Torre de Cristal se realizó mediante un procedi-

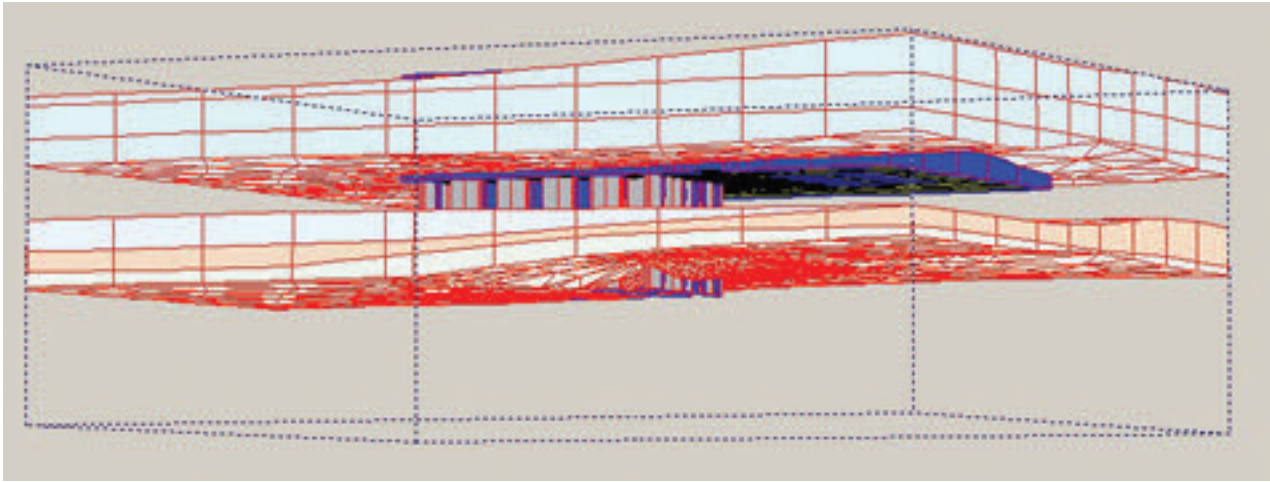


Figura 11. Modelo combinado de suelo y estructura en Plaxis 3D (algunas capas del suelo no se visualizan).  
Figure 11. Plaxis 3D combined soil and structural model (some of the soil layers are not visible)

miento innovador, que fue posible gracias a los últimos avances de la tecnología y a que la empresa Plaxis proporcionó su programa de elementos finitos para aplicaciones geotécnicas – *Plaxis 3D* – antes de su lanzamiento comercial, para que fuera utilizado en el análisis estructural de la misma (Figura 9).

Partiendo de los sondeos realizados en el estudio geotécnico, se introducen en el programa una serie de perfiles estratigráficos en distintas coordenadas X e Y, para a continuación interpolar entre ellos una serie de superficies que constituyen el límite de las diferentes capas (Figuras 10 y 11).

## 5. ESTRUCTURA VERTICAL. NÚCLEO DE HORMIGÓN

La estructura vertical de Torre de Cristal está formada por 18 pilares perimetrales y un núcleo central de hormigón armado que arrancan en cimentación.

El núcleo central de hormigón, además de soportar la mayor parte de las cargas de los forjados, es el encargado de proporcionar la estabilidad del edificio frente a las acciones horizontales, en este caso los esfuerzos producidos por el viento.

Las dimensiones de los muros que conforman el núcleo central varían entre 120 cm en el arranque y 70 cm en la coronación para los muros longitudinales y 50 cm en toda su altura en los cuatro diafragmas transversales a los anteriores.

Para ejecutar las pantallas del núcleo se ha utilizado un encofrado autotrepante (Figuras 12 y 13) que soportaba un distribuidor de hormigón que a su vez era alimentado por una bomba para la elevación del hormigón y que se producía en una central instalada a pie de obra.

El análisis del comportamiento del edificio frente a las acciones del viento se basó en dos estudios en el túnel de viento: el primero de ellos se realizó en el Instituto Universitario de Microgravedad “Ignacio Da Riva” de la Universidad Politécnica de Madrid y el segundo ensayo en el túnel de viento con capa límite de la University of Western Ontario, en Canadá.

*ation slab 150 cm thick so that, while certain loads are carried to the terrain by the bearing walls, surface loads are transmitted across the slab (the photo in Figure 8 gives an overview of the foundations during construction).*

*The Torre de Cristal foundations were engineered using an innovative procedure, possible thanks to the latest generation of technological advances and to the fact that Plaxis furnished its finite elements software for geotechnical applications – Plaxis 3D – for use in this design before it launched the product commercially (Figure 9).*

*A series of stratigraphic profiles found with the geotechnical probes per-*



Figuras 12 y 13. Encofrado Autotrepante.  
Figures 12 and 13. Slipforms.



Figuras 14 y 15. Pilares metálicos.  
Figures 14 and 15. Steel columns.

formed were entered into different X and Y coordinates, to interpolate a series of surfaces that delimit the various strata (Figures 10 and 11).

## 5. VERTICAL STRUCTURE. CONCRETE CORE

The vertical structure in the Torre de Cristal consists in 18 perimeter columns and a reinforced concrete central core, all springing from the foundations.

In addition to supporting the loads generated by the slabs, the central concrete core affords overall stability against horizontal forces, in this case wind action.

The depth of the longitudinal walls comprising the central core varies from 120 cm at the base to 70 cm at the crown, while the four transverse walls measure 50 cm throughout.

The walls forming the core were built with slipforms (Figures 12 and 13). The concrete hose attached to these forms was fed by a pump that raised the concrete manufactured at an on site plant to the necessary elevation.

Building behaviour was analyzed on the basis of two wind tunnel studies: the first was conducted at the Polytechnic

University of Madrid's Ignacio Da Riva University Institute for Microgravity.

## 6. VERTICAL STRUCTURE. COMPOSITE COLUMNS

The tower columns are circular composite members (Figures 14 and 15), measuring 95 cm in diameter at the base and tapering to 70 cm at the top. The components are 45 MPa characteristic compression strength and a longitudinally embedded S460 steel "HD" type shape.

This solution was adopted after conducting a technical-economic study of three possible alternatives: concrete, steel or composite columns.

The reinforced concrete solution was disregarded because it was poorly suited to the slab structure, called for a larger column size and generated greater rheological effects.

Moreover, unlike the pure steel solution, the composite column option required no fire protection or architectural facing or finishing, making it faster and less expensive to erect.

These columns spring from the foundation. The first length of each steel shape and the column reinforcement were shop welded to S460 steel plates

## 6. ESTRUCTURA VERTICAL. PILARES MIXTOS

Los pilares de la torre son mixtos (Figuras 14 y 15), formados por un alma metálica tipo HD de acero de calidad S460 forrado de hormigón HA-45, y de sección circular de 95 cm de diámetro en el arranque y que va disminuyendo con la altura hasta los 70 cm.

Esta solución de pilares fue adoptada después de un estudio técnico económico de tres soluciones posibles: pilares de hormigón, metálicos o mixtos.

La solución en hormigón armado fue rechazada debido a que es poco adecuada en relación a la estructura del forjado, da lugar a un pilar de mayor tamaño y produce mayores efectos reológicos.

Por otro lado, a diferencia de la solución metálica pura, la solución mixta tiene las ventajas de no necesitar protección frente al fuego ni un revestimiento arquitectónico de acabado, por lo que resulta más económica y más rápida su ejecución.

Así pues, los pilares nacen en cimentación sobre unas placas metálicas de acero de calidad S460 de 1.250 mm de diámetro y 150 mm de espesor, ancladas mediante 8 pernos Ø45 mm de diámetro; a las que se soldaron en taller el primer tramo de alma metálica y la armadura del pilar.



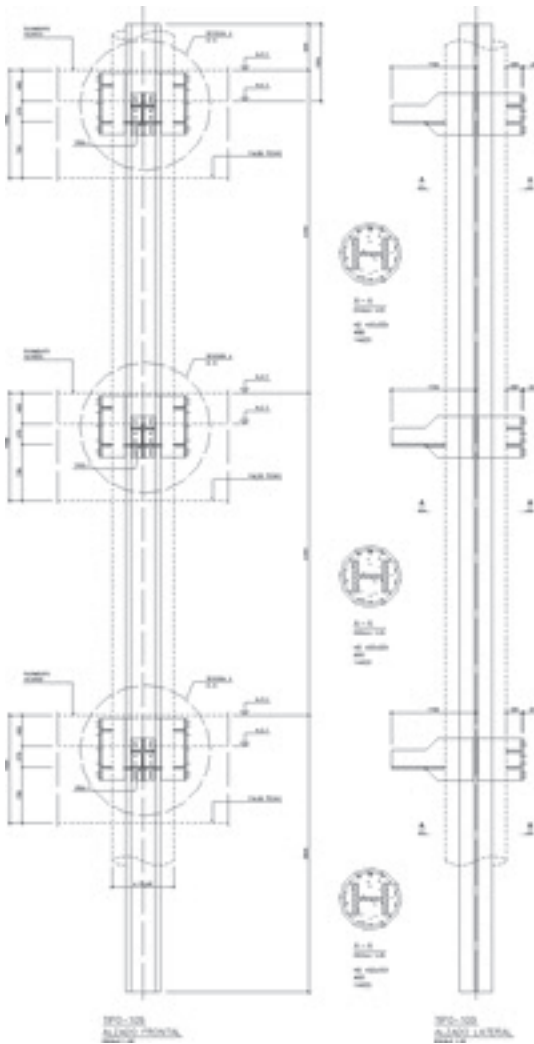


Figura 16. Alzados de un pilar tipo.  
 Figure 16. Elevation views of a standard column.

Las almas metálicas se proyectaron en tramos de 3 alturas de forjado (12,60 m) y provistas de unos muñones soldados en taller para recibir las vigas metálicas (Figuras 16 y 19), lo que facilita su ejecución y reduce las operaciones de

Debido a la geometría de la torre, muchos de los pilares se quiebran a partir de una determinada planta para poder seguir la inclinación de la fachada, lo que produce unas fuerzas de desvío que fueron

montaje. Esta tipología permite ir colocando las vigas metálicas de los forjados sin necesidad de esperar al fraguado del forro de hormigón de los pilares.

La unión entre dos tramos se produce mediante el simple apoyo de un tramo de pilar sobre el siguiente, disponiendo una chapa atornillada para asegurar la estabilidad del pilar durante el montaje.

La longitud de los pilares está incrementada en cada tramo a partir del resultado de un estudio teórico de los acortamientos previstos tanto durante la construcción de la torre como durante los primeros años de vida, de forma que los mayores acortamientos de los pilares frente al núcleo central quedan compensados y así se evita disponer elementos tipo viga cinturón, que encarecen y complican la ejecución.

1250 mm in diameter and 150 mm thick, which were then anchored to the foundations with eight  $\varnothing 45$  mm bolts.

The steel shapes were designed to a height of three storeys (12.60 m) and fitted – by shop welds – with gudgeon pins to receive the respective steel beams (Figures 16 and 19). This arrangement facilitated construction and reduced assembly operations, for the steel beams that support the floor slabs could be set into place with no need to wait for the concrete cover on the columns to set.

Lengths were joined by simply resting one on top of the other and steadying the assembly with a bolted plate.

The results of a theoretical study on estimated shortening both during tower erection and in the early years of service life were used to determine the increase in height needed in each length of column to offset the greater shortening in columns than in the central core and avoid the need for costly and complex belt beam-type members.

Due to tower geometry, many of the columns lean slightly from a given storey upward to accommodate the slant on the façade; the deviation forces generated were offset by placing active reinforcement between the respective column and the central core (Figure 17).

All the steel structures were designed to be bolted (Figure 19), with any necessary welding done primarily in the shop and on site only where indispensable, mainly for secondary members.

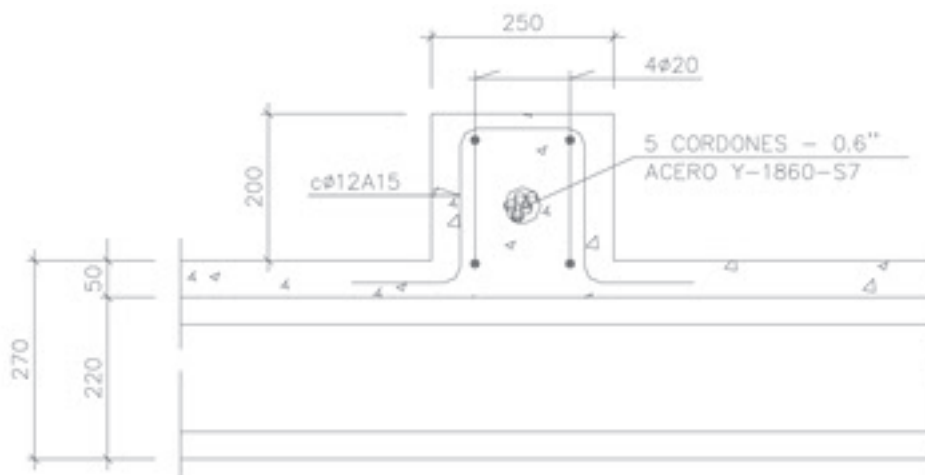


Figura 17. Detalle de armadura activa.  
 Figure 17. Active reinforcement. Detail.

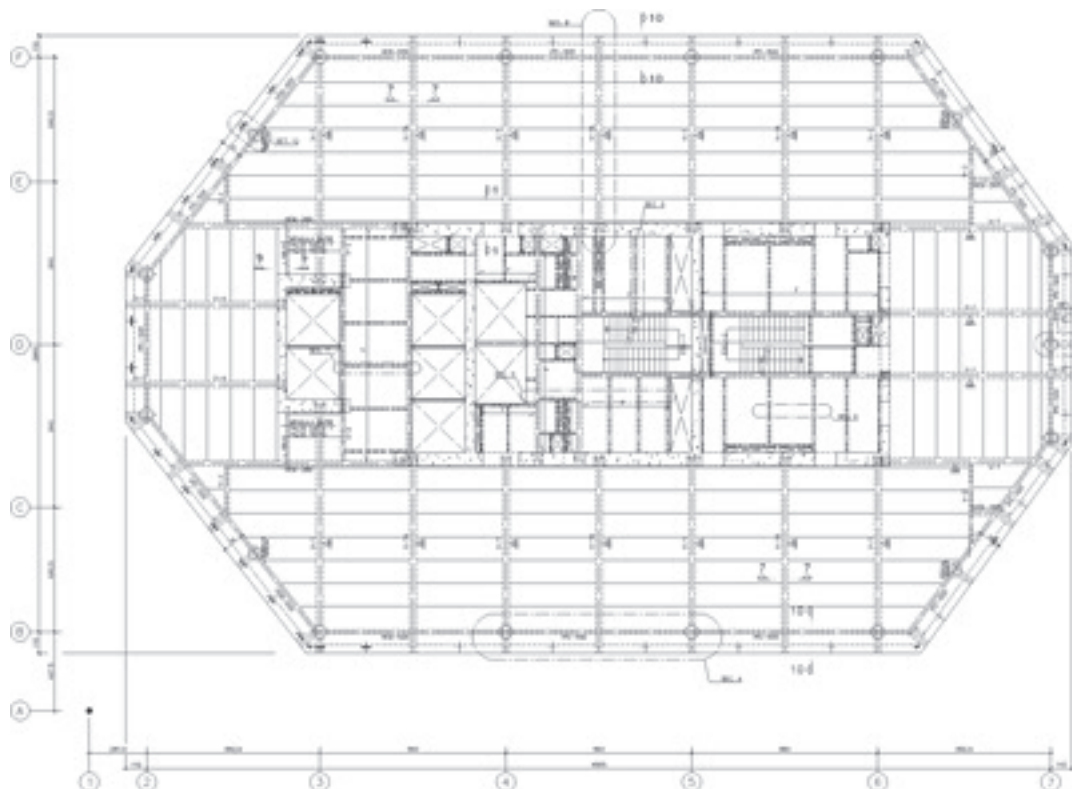


Figura 18. Planta tipo.  
 Figure 18. Standard storey.

TR22, quality 10.9 prestressed bolts fitted with direct tension indicating washers were used, for this is the only system that guarantees the proper tightening of prestressed bolts. Bolts with the same gauge were used in all joints to expedite on site work and prevent assembly errors.

**7. HORIZONTAL STRUCTURE. OUTSIDE THE CORE**

The distance between storeys is 4.20 m (Figure 18), 40 cm of which are taken up by the technical floor, 67 cm by the suspended ceiling and 27 cm by the floor/ceiling slab, in standard storeys.

compensadas con la disposición de armadura activa entre el pilar correspondiente y el núcleo central (Figura 17).

Todas las estructuras metálicas se han concebido atornilladas (Figura 19), realizándose en taller las soldaduras necesarias y en obra únicamente las imprescindibles, fundamentalmente para elementos secundarios.

Se han usado tornillos pretensados TR22 de calidad 10.9, dotados de arandelas IDT (Indicadores Directos de Tensión), por ser éste el único sistema que garantiza el correcto apriete de los tornillos pretensados. Para facilitar la ejecución y evitar errores de montaje se utilizaron tornillos del mismo calibre en todas las uniones.

**7. ESTRUCTURA HORIZONTAL. EXTERIOR DEL NÚCLEO**

La distancia entre plantas es de 4,20 m (Figura 18), de los cuales 40 cm corresponden al suelo técnico, 67 cm al falso techo y 27 cm al forjado en una planta tipo.

En lo que respecta a los forjados, debemos diferenciar entre las zonas interiores al núcleo y las zonas exteriores.

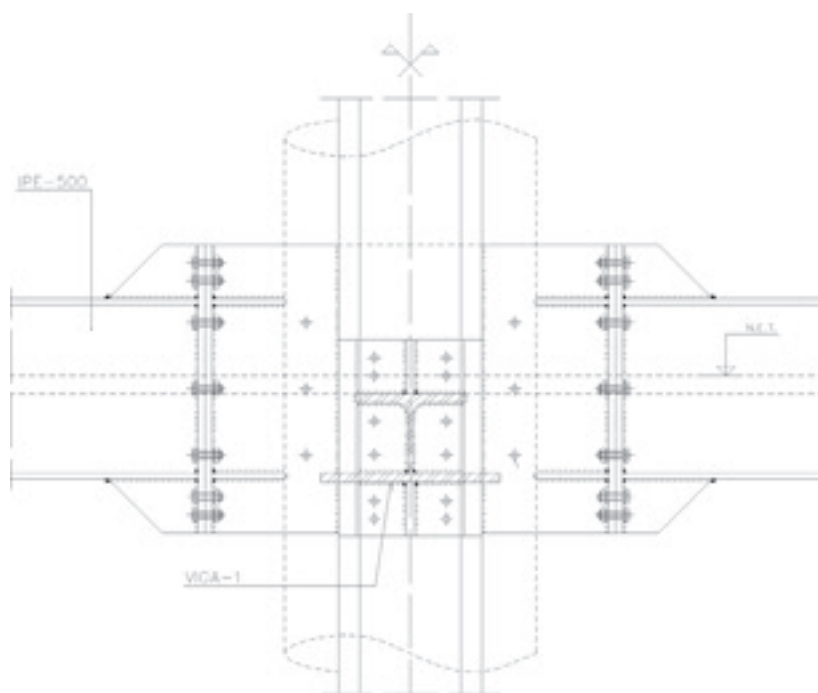


Figura 19. Nudo tipo.  
 Figure 19. Standard node.



Figura 20. Estructura Exterior del núcleo.  
Figure 20. Structure outside the core.

La estructura exterior (Figura 20) consta de una viga perimetral (Figura 22) dispuesta entre los pilares de fachada con el canto sobresaliendo por encima del forjado, típicamente un perfil IPE-500, que recibe en su punto medio una viga metálica que tiene su otro apoyo en el núcleo central mediante una caja que posteriormente se rellena con mortero sin retracción.

Las vigas perpendiculares a fachada apoyan alternativamente en un pilar de fachada y en la viga perimetral. En este último caso dispone además de un vue-

lo por fuera de dicha viga para soportar el forjado exterior, pues tanto los pilares como la viga perimetral tienen sus ejes situados a 110 cm del borde del forjado.

Estas vigas son tipo IFB, las cuales están formadas por medio perfil HEB-450 y una chapa inferior de sección 500 mm x 25 mm, así pues el ala inferior es más ancha que el ala superior para permitir con facilidad el apoyo de las placas alveolares que conforman el forjado de 22 cm + 5 cm de capa de compresión, quedando las vigas parcialmente embebidas, lo que las protege contra el fuego y

A distinction must be drawn between the floor/ceiling slabs inside and outside the core.

The outer structure (Figure 20) consists of a perimeter beam (Figure 22) positioned in between the facade columns that protrudes upward beyond the slab. The standard beam is an "IPE-500" steel shape that receives another steel beam at midpoint. The opposite end of this second beam rests on a beam pocket in the central core, subsequently filled with shrinkage-compensating cement mortar.

The beams perpendicular to the facade rest alternately on a facade column and the perimeter beam. In the second case they cantilever beyond the beam to support the outer slab, for both the columns and the perimeter beam are positioned 110 cm, centres, inward of the edge of the slab.

These "IFB" type beams, which consist of half and "HEB-450" shape, have a steel under plate with a 500 mm x 25 mm section. As a result, the bottom wing is wider than the top wing to facilitate the placement of the hollow-core slabs used to build the 22 cm slab (+ 5 cm topping). The beams are partially embedded for protection against corrosion and fire, with the exception of the lower wing, which had to be passivated and fire-proofed as shown in Figure 21.

The hollow-core slab expedites construction, for it obviates the need for bra-

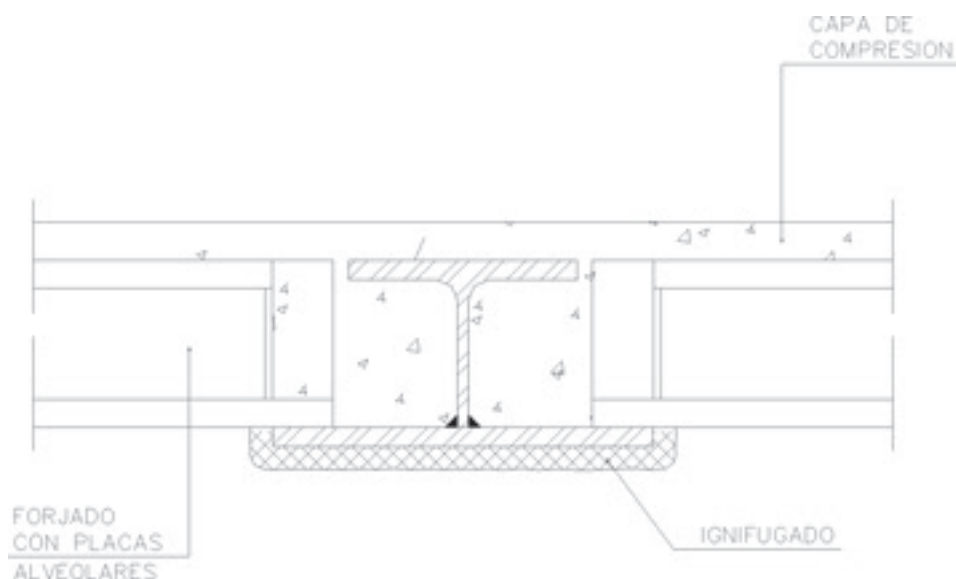


Figura 21. Sección tipo de viga exterior al núcleo.  
Figure 21. Section of standard beam outside core.

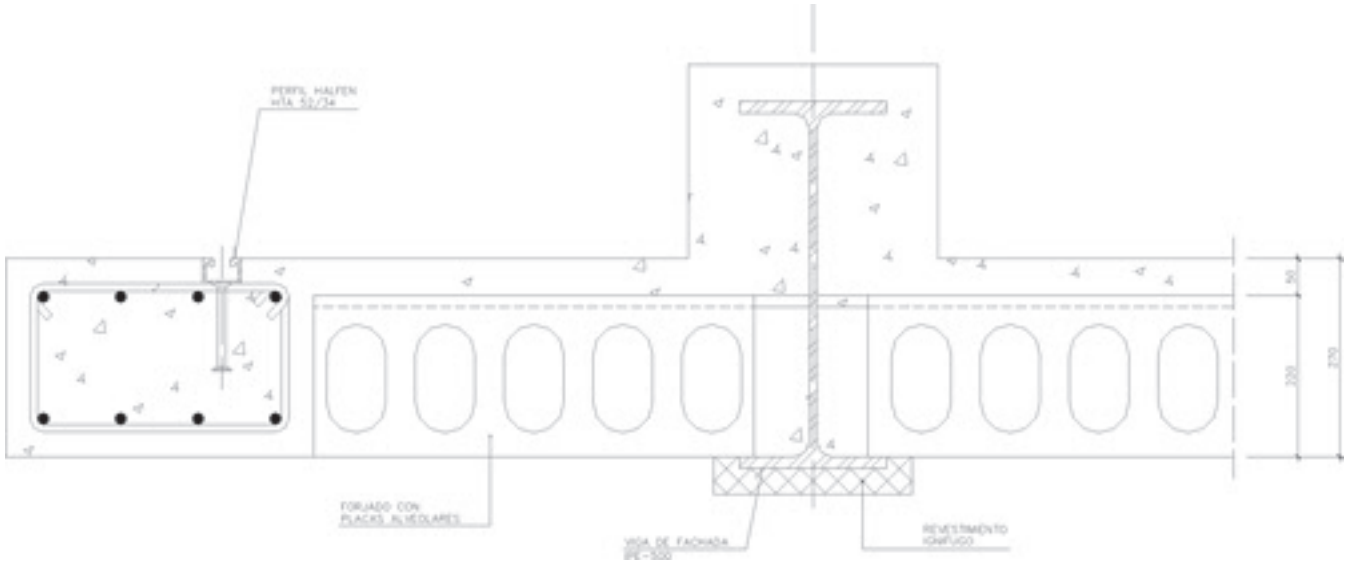


Figura 22. Sección tipo de borde de forjado.  
Figure 22. Cross-section of the edge of a standard slab.

cing and formwork and, concomitantly, form removal.

Finally, a high strength rib was built around the entire perimeter of each storey to support both the loads from the curtain wall and the self-weight of the storey, while at the same time acting as an edge beam around the slab as a whole producing a confinement effect (Figure 22).

## 8. HORIZONTAL STRUCTURE. INSIDE THE CORE

As Figure 23 shows, the core interior comprises girders partially embedded

in the slab and secondary joists on the underside; the former are attached to the concrete core by means of mortises and the latter with steel plates. The joists support a pleated sheet steel panel that acts as permanent formwork for a lightweight slab with a depth of 20 + 7 cm.

While less economical than the outer slab arrangement, this was deemed to be most suitable solution in light of the large number of penetrations in the slab.

The structural system designed avoided the need for centring and formwork, enhancing construction efficiency, as

la corrosión, salvo el ala inferior que debió ser pasivizada e ignifugada, tal como se aprecia en el esquema de la Figura 21.

El forjado de placas alveolares permite un gran ritmo de construcción, pues no es necesario el uso de puntales ni encofrados, ni secuencias de desencofrado.

Finalmente se ha dispuesto perimetralmente a toda la planta un nervio de borde con una gran capacidad mecánica, que soporta las cargas del muro cortina además de las cargas propias de su planta y que produce un efecto de zunchado perimetral del conjunto del forjado (Figura 22).

## 8. ESTRUCTURA HORIZONTAL. INTERIOR DEL NÚCLEO

El forjado del interior del núcleo, tal como se aprecia en la Figura 23, está formado por vigas principales parcialmente embebidas en el forjado y correas secundarias por debajo de éste, fijadas al núcleo de hormigón mediante cajas las primeras, y por placas metálicas las segundas. Las correas soportan una chapa metálica plegada que funciona como encofrado perdido para una losa aligerada de 20 + 7 cm de canto.

Esta solución, a pesar de ser menos económica que la solución del forjado exterior, se consideró la más apropiada debido al gran número de huecos existentes en el forjado.



Figura 23. Estructura Interior del núcleo  
Figure 23. Structure inside the core.



Figura 24. Montaje de un tramo de escalera prefabricada.  
Figure 24. Assembly of flight of precast stairs.

Así pues el sistema estructural diseñado evita la utilización de cimbras y encofrados, lo que permite obtener una gran eficiencia en el proceso constructivo, como se ha podido observar durante la ejecución de la estructura.

## 9. ESCALERAS

Las escaleras, prefabricadas de hormigón armado de 20 cm de espesor, incluyen el peldañado y un acabado visto.

Esta tipología ha resultado enormemente beneficiosa para el ritmo de construcción ya que, además de ser su ejecución sencilla y rápida (puesto que la operación de montaje consistía únicamente en su colocación, también ha servido como escalera de obra).

La forma de la escalera es tradicional, siendo normalmente de dos tramos, cada uno de ellos un módulo prefabricado, que incluye la meseta y el vestíbulo de planta.

La escalera está apoyada en un extremo en una viga principal del forjado y en el lado de la meseta en un perfil metálico soldado a una placa embebida en el núcleo.

Los tramos de escaleras prefabricadas iban provistos de unas placas metálicas o angulares que se fijaban mediante cordones discontinuos de soldadura de gargantas reducidas a los perfiles de apoyo.

## 10. CORONACIÓN

La coronación del edificio consiste en una estructura tridimensional formada por escalerillas y arriostramientos y por la cubierta, cuyas principales funciones son dar continuidad al muro cortina una vez que termina la estructura de los forjados y soportar las góndolas de mantenimiento de la fachada.

Las últimas plantas de la torre albergan las instalaciones necesarias para el funcionamiento del edificio, las góndolas para el mantenimiento de la fachada, el Jardín de Invierno, formado por un

*observed during the erection of the structure.*

## 9. STAIRWAYS

*The stairways, made of 20 cm thick precast reinforced concrete, were supplied complete with steps and an exposed concrete finish.*

*This typology contributed materially to a brisk pace of construction, for in addition to the simplicity and speed of assembly (which consisted essentially in*



Figura 25. Cubierta. Vista general.  
Figure 25. Roof. Overview.

positioning the elements in place), the resulting member was also usable as a worksite stairway.

As a rule the stairway is designed to a traditional two flight configuration, with a separate precast module, including landing and storey lobby, for each flight.

Each flight of stairs rests on the slab at one end and on a steel shape welded to a plate embedded in the core on the landing side.

The precast stairways were fitted with steel plates or angles that were welded to the supports using intermittent bead welding with a reduced throat.

## 10. CROWN

The building crown, a three-dimensional structure made of ladders, bracing elements and the roof, is designed primarily to support the curtain wall in the space above the slabs, as well as the façade maintenance gondolas.

The top storeys of the tower, all built upward of 210 m from ground level, house the building services, façade maintenance gondolas and the Winter Garden – complete with a grove of trees and a living wall.

The double pitch roof is a steel structure that slopes down from the peak at a grade of 26.50°; on the south side it sup-



Figura 26. Detalle de Cubierta.  
Figure 26. Roof detail.

ports solar panels embedded in glass plates and on the north a series of louvers.

The roof and façade never actually touch, but are spaced at a sufficient distance for the maintenance gondolas to run between them.

## 11. FORMULATION OF THE DESIGN

The structural design for the Torre de Cristal was developed over a period of

muro verde y una zona arbolada; situado todo ello a partir de 210 m de altura sobre el nivel del suelo.

La cubierta está formada por una estructura metálica a dos aguas con una inclinación de la cumbrera de 26,50° que soporta paneles solares embebidos en placas de vidrio en su cara Sur y una serie de lamas en su cara Norte.

La cubierta y la fachada no llegan a tocarse, sino que permiten un espacio entre ellas a través del cual circulan las góndolas de mantenimiento.

## 11. DESARROLLO DEL PROYECTO

El Proyecto de Estructura de Torre de Cristal fue desarrollado durante más de un año y medio en estrecha colaboración con los autores de los Proyectos de Arquitectura e Instalaciones [1].

Las tipologías estructurales de forjados y pilares que finalmente se adoptaron fueron seleccionadas después de realizar un comparativo técnico-económico entre todas las soluciones posibles.

Los principales condicionantes fueron además de su coste, la planeidad del forjado, el grado de prefabricación, la facilidad y rapidez de montaje, la ausencia de encofrados y puntales y la re-



Figura 27. Vista superior de la Cubierta.  
Figure 27. Upper view of the roof.

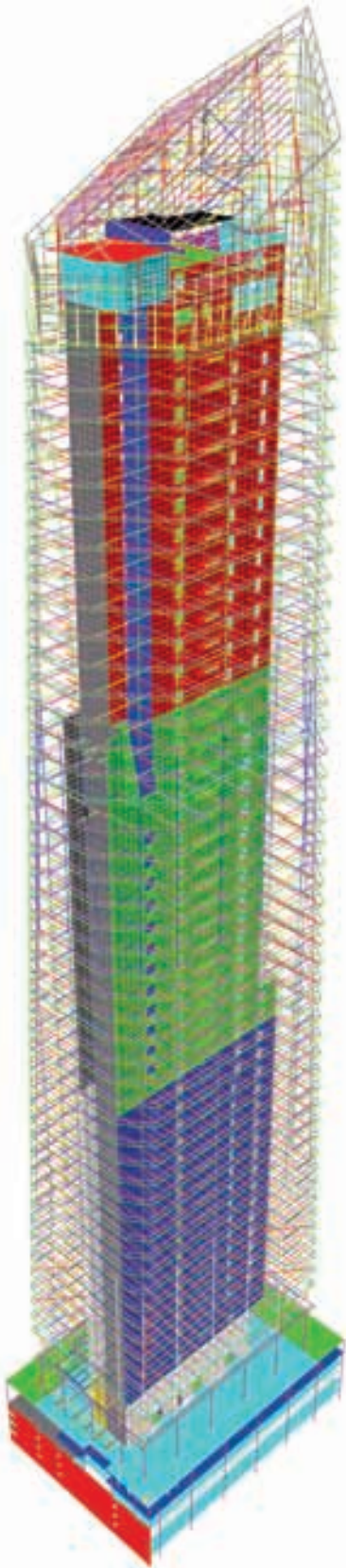


Figura 28. Modelo de cálculo de la torre.  
Figure 28. Model for tower structural engineering.

sistencia al fuego (que debía ser REI 180 en toda la estructura).

Como aspectos más complejos durante el desarrollo del proyecto podemos indicar el armado de los alzados del nú-

cleo, considerando todos los huecos existentes, y las interferencias con las cajas y las placas para apoyo de viguetas.

De especial dificultad resultó el desarrollo de la coronación del edificio, que comprende las plantas M4, M5, azotea, cubierta de casetones y cubierta, las escalerillas de fachada, las estructuras de arriostramiento, las estructuras auxiliares para las góndolas y para el muro verde.

El hecho de que todas y cada una de las plantas fueran distintas entre sí debido a la geometría de la fachada implicó un esfuerzo adicional para el equipo redactor del proyecto.

El esquema resistente consiste en un núcleo central de hormigón armado que soporta las acciones horizontales y las cargas gravitatorias y 18 pilares perimetrales en fachada que sirven de apoyo del forjado exterior del núcleo.

El dimensionado del núcleo se realizó a partir de los resultados obtenidos en el ensayo en el túnel de viento del "Instituto de Microgravedad Ignacio Da Riva" de la ETSI de Ingenieros Aeronáuticos de la UPM, antes citado.

En el laboratorio se realizó un modelo a escala 1:250 y se introdujo en el túnel de viento para obtener los coeficientes de fuerza en 7 niveles distintos para todos los rumbos en intervalos de 15°.

Además se realizó un segundo ensayo introduciendo en el túnel junto a la maqueta de la Torre de Cristal una maqueta de Torre Espacio para que produjera un efecto de apantallamiento.

A partir de los resultados obtenidos se obtuvieron los esfuerzos de viento sobre el edificio según la norma UNE-ENV 1991-2-4 [2].

Debido a la geometría del núcleo central y del edificio, la Torre resulta

more than 18 months in close cooperation with the authors of the architectural and service designs [1].

The structural typologies for the slabs and columns that were finally adopted were selected after conducting a technical-economic study of all the possible solutions.

The main conditioning factors in addition to cost were slab levelness, degree of prefabrication/precasting, ease and speed of assembly, absence of formwork and shoring, and fire rating (with the entire structure subject to a 180-minute minimum).

The most complex issues from the structural standpoint included the reinforcement of the core walls, in light of the many penetrations involved, and the interference with the mortises and plates that support the joists.

Detailing proved to be particularly difficult for the building crown, which included storeys M4, M5 and the terrace, the coffered roof and roof, the façade ladders, the bracing structure and the ancillary structure for the gondolas and vertical garden.

The fact that each and every one of the storeys was different from all the rest due to façade geometry called for additional effort on the part of the design team.



Figura 29. Vista general del arranque de la torre.  
Figure 29. Lower tower, at springing line.



Figura 30. Modelo de la estructura de coronación.  
Figure 30. Model for crown structural engineering.

The structural scheme consists in a reinforced concrete central core to support horizontal action and gravitational loads and 18 perimeter columns on the façade that support the slab outside the core.

The core was dimensioned on the grounds of the results of the wind tunnel trials conducted at the above-mentioned School of Aeronautical Engineering's Ignacio Da Riva Institute for Microgravity, an institution under the aegis of the Polytechnic University of Madrid.

A 1:250 scale model was built in the laboratory and tested in the wind tunnel to obtain the force coefficients at seven different levels and in all directions, at 15° intervals.

A second test was also conducted, in which scale models of both Torre de Cristal and Torre espacio were placed in the wind tunnel to simulate shielding.

The results obtained were used to find the wind load on the building pursuant to Spanish standard UNE-ENV 1991-2-4 [2].

Due to the geometry of the central core and the building, the Tower is much stiffer in the east-west than in the north-south direction. The ratio between the longer and shorter sides is 1.53, while

the core stiffness ratio varies from 3.70 to 4.50. Therefore, the longer side where inertia is lower receives 53% more wind than the shorter side.

Establishing the maximum allowable drift in the crown to be 50 cm, a parametric study of core thicknesses was conducted. The findings were as follows (Table 1)

The transverse wall thickness is constant throughout, at 50 cm.

The maximum vertical service load in the core, in turn, is 850,000 kN and the wind-induced bending moment values at the base are: 3,600,000 kNm in the longitudinal direction and 1,600,000 kNm in the transverse direction.

mucho más rígida en el sentido Este - Oeste que en el Norte - Sur. La relación entre los lados mayor y menor es 1,53, mientras que la relación de rigideces del núcleo varía entre 3,70 y 4,50. Así pues el lado mayor, de inercia menor, recibe un 53 % más de viento que en la dirección transversal.

Considerando un desplazamiento horizontal máximo en la coronación del núcleo de 50 cm se realizó un estudio paramétrico de los espesores del núcleo, arrojando el mismo los siguientes valores (Tabla 1).

Los diafragmas o pantallas transversales tienen un espesor constante de 50 cm en toda su altura.

En lo que se refiere a esfuerzos, la carga máxima vertical de servicio en el núcleo es de 850.000 kN y los esfuerzos de momento flector en la base debidos al viento son: 3.600.000 kNm en sentido longitudinal y 1.600.000 kNm en sentido transversal.

En cuanto a los pilares, el más cargado transmite a cimentación 45.000 kN, esfuerzo axial que se distribuye como se muestra en la Tabla 2.

Los periodos de vibración de la estructura son los indicados en la Tabla 3. La aceleración máxima que se produce es de 11,9 mg.

El cálculo de los elementos estructurales principales se realizó por duplicado mediante dos métodos distintos, de forma que se limitase al máximo la posibilidad de que existieran errores de cálculo.

Por último se resume en la Tabla 4 las distintas tipologías empleadas en el cuerpo de la torre y sus materiales asociados.

Tabla 1. Espesores del núcleo  
Table 1. Core thicknesses

Nivel Level	Espesor (cm) Thickness (cm)
Sótano-6 hasta M1 (sobre el vestíbulo) Basement-6 to M1 (above lobby)	120
M1 hasta N-18 / M1 to N-18	100
N-18 hasta N-34 / N-18 to N-34	80
A partir de N-34 / From N-34 upward	70



**Tabla 2. Distribución de carga del pilar más cargado**  
**Table 2. Load distribution in the most heavily loaded column**

Acción <i>Action</i>	Parte de la carga (%) <i>Proportion of load (%)</i>
Peso Propio del pilar / <i>Column self-weight</i>	9
Peso de los forjados / <i>Slab weight</i>	37
Carga muerta / <i>Dead load</i>	6
Sobrecarga de uso / <i>Service load</i>	23
Fachada / <i>Facade</i>	8
Estructura de coronación / <i>Crown structure</i>	17

The column with the heaviest load transmits 45,000 kN to the foundations, while the axial stress is distributed as shown in the table below (Table 2).

The periods of vibration for the structure are as shown in Table 3. The maximum acceleration is 11.9 mg.

Structural engineering for the main structural members was performed twice, using two different methods, to reduce the possibility of design error to a minimum.

Finally, Table 4 contains a summary of the typologies used in the body of the tower and the associated materials.

**Tabla 3 / Table 3**

Modo de vibración <i>Mode of vibration</i>	Período(s) <i>Period(s)</i>
Primer modo / <i>First mode:</i>	5,47
Segundo modo / <i>Second mode:</i>	2,89
Tercer modo / <i>Third mode:</i>	2,40

**Tabla 4. Cuadro resumen de materiales y tipología / Table 4. Summary of materials and typologies**

CUERPO DE LA TORRE / <i>BODY OF THE TOWER</i>	
<b>CIMENTACIÓN / <i>FOUNDATIONS</i></b>	
Cimentación profunda/ <i>Deep foundations</i>	Pantallas portantes de 60 o 120 cm de espesor / <i>60- or 120-cm bearing walls</i> Hormigón HA-30. Acero B500S / <i>30 MPa RC. B500S steel</i>
Losa encepado / <i>Capping slab</i>	Losa maciza de hormigón e=150 cm / <i>Solid concrete slab, 150 cm thick</i> Hormigón HA-30. Acero B500S / <i>30 MPa RC. B500S steel</i>
<b>ESTRUCTURA VERTICAL / <i>VERTICAL STRUCTURE</i></b>	
Pilares perimetrales / <i>Perimeter columns</i>	Hormigón HAC-45, Armadura B500S, Alma Metálica S460 <i>45 MPa SCC, B500S reinforcement, S460 steel core</i>
Pilares estructura de coronación <i>Crown columns</i>	Acero S275JR / <i>S275JR steel</i>
Núcleo central / <i>Central core</i>	Hormigón HAC-45, Armadura B500S <i>45 MPa SCC, B500S reinforcing steel</i>
<b>ESTRUCTURA HORIZONTAL / <i>HORIZONTAL STRUCTURE</i></b>	
Interior del núcleo / <i>Inside the core</i>	Vigas metálicas S275JR parcialmente embebidas en el forjado <i>S275JR steel beams partially embedded in the slab</i> Correas metálicas S275JR bajo el forjado / <i>S275JR steel joists on slab underside</i> Chapa colaborante PL 76/383 encofrado perdido / <i>PL 76/383 (permanent formwork) composite steel deck slab</i> Forjado Losa aligerada hormigón in situ 76 + 200 mm <i>In situ lightweight concrete slab, 76 + 200 mm</i>
Exterior del núcleo (plantas tipo) <i>Outside the core (standard storeys)</i>	Vigas metálicas tipo IFB acero S275JR / <i>S275JR steel "IFB" type beams</i> Forjado placa alveolar 22 + 5 mm / <i>Hollow core slab, 22 + 5 mm</i>
Exterior del núcleo (plantas mecánicas) <i>(Outside the core (machine room storeys)</i>	Vigas metálicas perfiles laminados acero S275JR / <i>S275JR rolled steel shape beams</i> Forjado de placa alveolar 22 + 5 mm / <i>Hollow core slab, 22 + 5 mm</i>

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

[1] Pelli, C., León, E. y Ortiz, I. Torre de Cristal. Arquitectura. Hormigón y Acero, Vol. 59, nº 249, 3<sup>er</sup> trimestre, 2008.  
[2] UNE-ENV 1991-2-4 EUROCÓDIGO 1: Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 2: Acciones en estructuras. Acciones del viento. Mayo, 1998.

**REFERENCES**

[1] Pelli, C., León, E. and Ortiz, I. Torre de Cristal. Architecture, Hormigón y Acero, Vl. 59, nº 249, 3<sup>o</sup> trimestre, 2008.  
[2] UNE-ENV 1991-2-4, EUROCODE 1: Basis of design and actions on structures. Part 2-4: Actions on structures. Wind actions. May, 1998.