

Torre Espacio

Revista de Obras Públicas
nº 3.523. Año 158
Julio-Agosto 2011
ISSN: 0034-8619
ISSN electrónico: 1695-4408

Pedro Ayuso García. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Jefe del Departamento de Estructuras de OHL. Madrid (España). ayuso@ohl.es

Resumen: En la zona norte de Madrid, el solar que durante años ocupó la "Ciudad Deportiva del Real Madrid CF", lo ocupa ahora el conjunto urbano "Cuatro Torres Business Área". Actualmente están construidas las cuatro torres y en proceso de construcción el edificio destinado a Centro Internacional de Convenciones de la Ciudad de Madrid, que completará el conjunto. Por sus características, este conjunto de construcciones, cambia el perfil morfológico del norte de la ciudad y se erige en una de sus zonas más representativas y emblemáticas. Torre Espacio, edificio promovido por el Grupo Villar Mir, es la torre más al norte. En ella tienen su sede tanto Inmobiliaria Espacio como otras empresas del grupo, entre ellas OHL. En este artículo trataremos de pasar revista a sus características más importantes, aunque haciendo más hincapié en los aspectos de estructura, tanto en cuanto a su proyecto y cálculo, como a su construcción.

Palabras Clave: Edificio alto; Hormigón de alta resistencia; Función coseno; Cinturón de rigidez

Abstract: The site in the north of Madrid that for many years was home to Real Madrid's training complex, is now occupied by the "Cuatro Torres Business Area". Four tower blocks have already been erected on the site and work is currently underway on the Madrid International Conference Centre, that will complete the complex.

This group of buildings will change the skyline of the north of Madrid and are established in one of the city's most representative and symbolic areas.

Torre Espacio, the building promoted by the Villar Mir Group, is the tower furthest to the north. The tower will be the headquarters of Inmobiliaria Espacio and other group companies, including OHL.

This article outlines the most important characteristics of the building, though placing particular emphasis on structural aspects, both in terms of design and construction.

Keywords: Tall building; High-strength concrete; Cosine function; Stiffening system

1. Diseño y arquitectura

1.1. Diseño conceptual

Los edificios del conjunto "Las Cuatro Torres" en general, y Torre Espacio en particular, ocupan un emplazamiento privilegiado al norte de Madrid, en la avenida más importante de la capital. El uso principal de todas las torres es el de oficinas, y su última planta pisable se sitúa en todas ellas a la cota +220 m respecto al suelo.

La promotora de Torre Espacio (Inmobiliaria Espacio) siempre tuvo claro que además de los condicionantes urbanísticos impuestos por el Plan General de Madrid, el proyecto de la Torre debía de cumplir otras importantes condiciones:

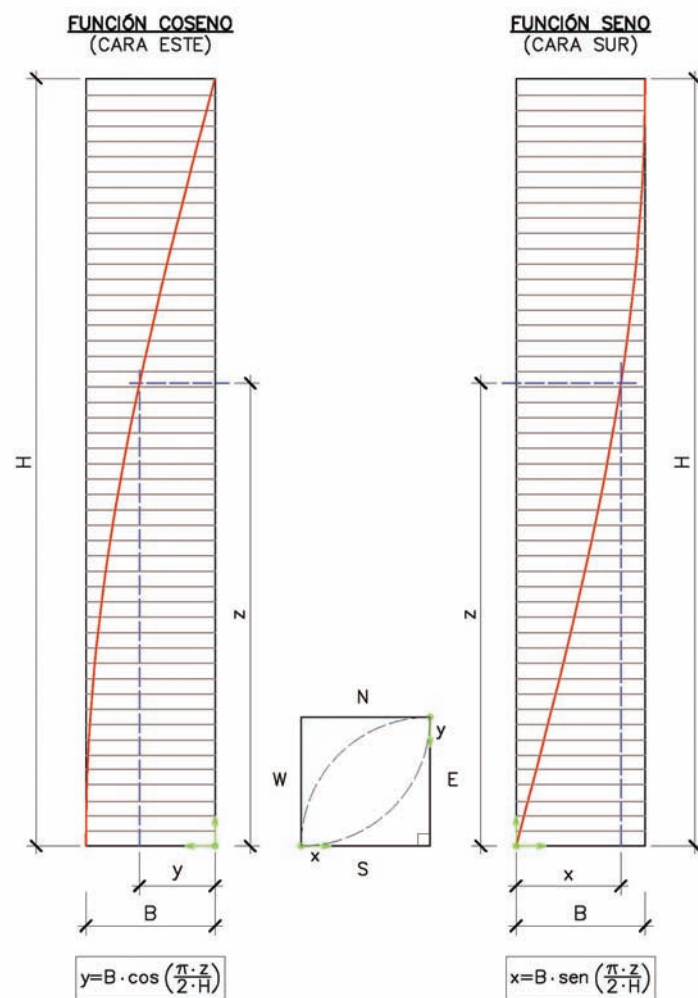
- Se debía conseguir un edificio elegante, sobrio y sobre todo seguro.
- En la tipología de su estructura, el hormigón (armado y pretensado) y sobre todo el de alta resistencia, sería el material predominante y característico.
- El proyecto debía tener una máxima eficiencia inmobiliaria.

Con estos condicionantes se convocó un concurso internacional para elegir al proyectista. Tras una cuidadosa selección de diez de los estudios de arquitectura más prestigiosos del mundo, todos expertos en edificación en altura, se invitó a cuatro de ellos a participar en un concurso privado.



Fig. 1. Torre Espacio y su entorno. A la derecha, fig. 2. "Función coseno" y "Función seno".

Para los responsables del grupo promotor, la propuesta presentada por el estudio neoyorquino "Pei Cobb Freed & Partners", que contaba en su haber con una amplísima experiencia en la construcción de edificios de gran altura en todo el mundo y de otras construcciones tan emblemáticas como la célebre pirámide del Museo de Louvre en París, era la más acertada. Su proyecto de Torre (Figura 1) combinaba la sobriedad y la elegancia clásicas con la arquitectura de vanguardia. El edificio imaginado por Pei evolucionaba a medida que ascendía, desde una planta cuadrada en su base, a un rombo formado por dos cuartas partes de un círculo en su corona. Esta forma podría ser esculpida con cierta facilidad a partir de un bloque pétreo, pero tratándose de una obra arquitectónica y no escultórica, las superficies curvas entrelazadas que la definen debían construirse a partir de multitud de paneles fabricados y ensamblados de forma individual. De



ahí surgía la necesidad de adoptar un orden geométrico que racionalizara y facilitara la transición desde un cuadrado a un huso. Después de probar varios perfiles inclinados y escalonados, los arquitectos encontraron este orden realizando la evolución deseada mediante la "función coseno" (Figura 2). Esta función trigonométrica (que resolvía incluso mejor que otras curvas analizadas la fabricación y el ensamblaje del muro de cerramiento de la Torre) cuya curvatura decrece a medida que gana en altura, generaba un volumen donde los diedros y las aristas de la fachada proyectada otorgaban a la Torre una bellísima forma orgánica desde un punto de vista escultural. El resultado es una torre esbelta, que en su gesto posee vigor y gracia a la vez.

Junto con la alta calidad arquitectónica y las singularidades formales del edificio, otro de los motivos que llevó al estudio neoyorquino a ganar el concurso fue la eficiencia inmobiliaria que encerraba la

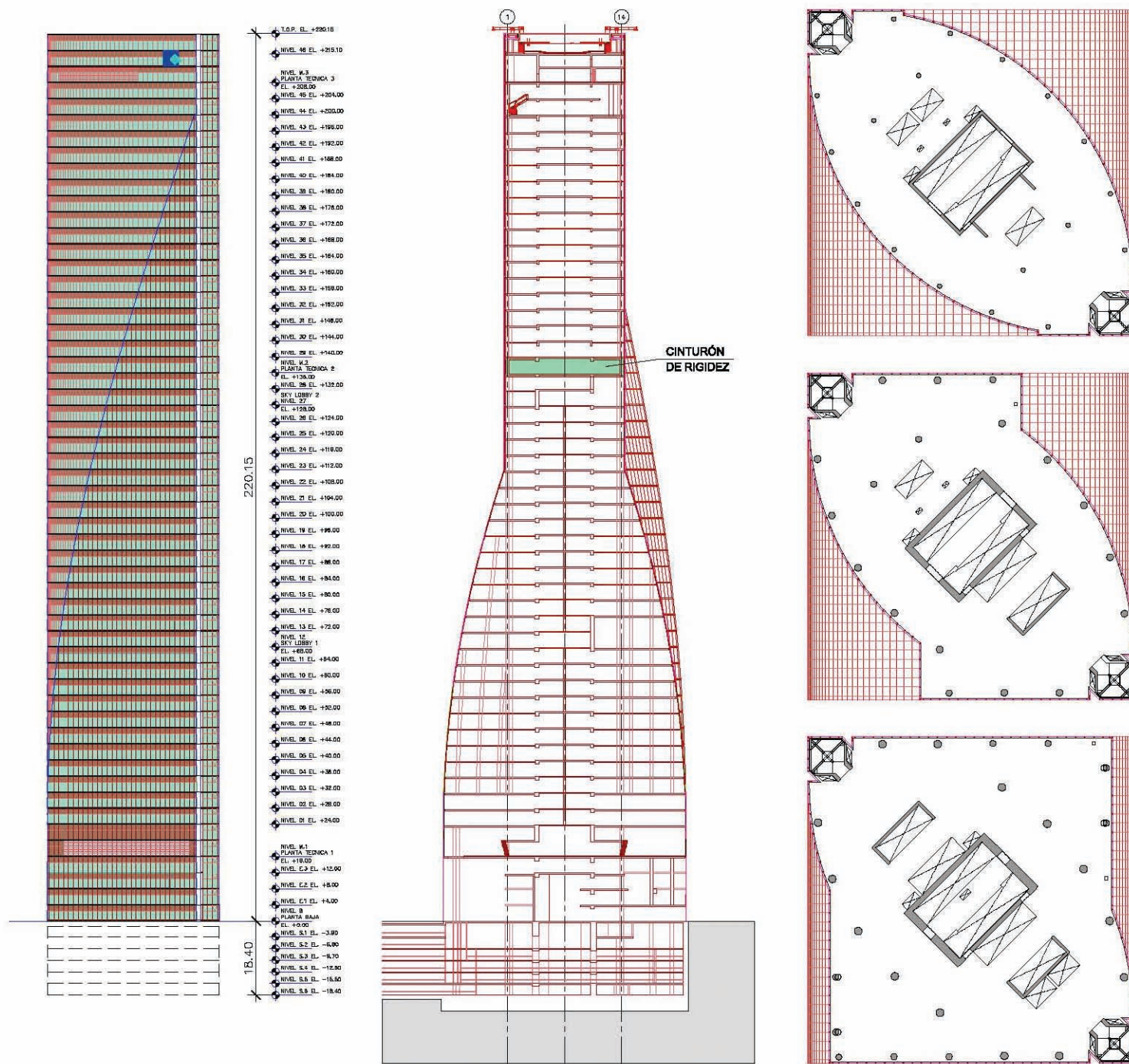


Fig. 3. Alzado, sección y plantas tipo.

concepción estética del proyecto. El hecho de que la Torre fuera perdiendo núcleos, al reducirse la superficie de las plantas según va ganando altura, hace de ella un edificio más eficiente que si su núcleo fuera de sección constante. Este diseño otorga la posibilidad de aprovechar más metros útiles en altura, al mismo tiempo que dota a cada planta de ca-

racterísticas únicas, dado que ninguna de las plantas de Torre Espacio es igual a otra (Figura 3).

1.2. Descripción funcional

Torre Espacio, se ubica en una parcela de 7.500 m². Con sus 117.913 m² de superficie total construida,

PÁGINA DE PUBLICIDAD

la Torre se eleva hasta los 230 m de altura respecto del suelo. Son 57 niveles y 74.325 m² sobre rasante; bajo rasante, con seis sótanos y 43.588 m² construidos, descendiendo hasta la cota -18,60 m.

En las plantas sótano, fuera de la huella de la Torre y hasta los límites que ocupa el solar, se desarrolla el aparcamiento general en las seis plantas: 40.000 m² de superficie, con luces tipo de 7,75 m para 1.500 plazas. En los sótanos bajo la Torre, se ubican espacios técnicos y de instalaciones.

Las plantas de la Torre sobre rasante, evolucionan desde la planta cuadrada de 1.645 m², a la final con forma de huso u "ojo abierto" de 1.240 m². Con una altura de 4,00 m cada una de ellas, se dividen en varios grupos:

- Plantas tipo oficinas que permiten la máxima flexibilidad. El módulo tipo tanto de fachada como de falso techo, es de 1,20 m. Cada planta de oficinas está dividida en dos sectores de incendio independientes.
- Plantas de uso común (Sky lobbies) en las plantas 18 y 33. Coinciden con los tercios de la torre, son de doble altura y en ellas terminan los núcleos laterales de los tercios. Tienen un uso "para descanso" de los usuarios del edificio: cafeterías y restaurantes.
- Plantas de Dirección (51 y 52) ocupadas por la Dirección General del Grupo Villar Mir; se desarrollan en doble altura.
- Plantas Técnicas. El edificio cuenta con tres plantas técnicas. La M 1, situada en la parte baja; la M 2 que aprovecha el espacio singular que deja libre la estructura del cinturón de rigidez en la zona de los dos tercios de la altura, y la M 3 que corona el edificio. En esta M 3, además de los elementos de maquinaria, se ubican espacios al aire libre protegidos por un peto en prolongación de la fachada del edificio para reducir el impacto visual de acuerdo con la normativa. De este modo se alcanza la altura total del edificio de 227,25 m, a la que se suman la altura de antenas de comunicaciones y pararrayos hasta alcanzar poco menos de 250 m.

2. Estructura

2.1. Generalidades

En la génesis de cualquier construcción, el diseño arquitectónico debe de avanzar acompañado al me-

nos de un incipiente esquema estructural. En estructuras singulares y de importancia, esta exigencia es necesidad. Por ello, el proyecto de arquitectura, que ganó el concurso y fue elegido, incluía una disposición estructural suficientemente clara para poder iniciar el cálculo de la estructura. Se establecían los iniciales criterios de interacciones funcionales y resistentes que encajaban con las propuestas arquitectónicas y funcionales del edificio.

Por otra parte, Inmobiliaria Espacio, propietaria de la Torre y cabeza del grupo de empresas Villar Mir, tenía como ya se ha señalado, una clara preferencia por el material que querían emplear básicamente en la construcción del edificio: **hormigón**. Tanto armado como pretensado y en todas sus opciones: normal o de alta resistencia, en función de la necesidad de cada elemento. Esta preferencia coincidía por otra parte con una cierta y clara tendencia mundial que ya parece consolidada: emplear estructura de hormigón para edificios de altura, como alternativa a las clásicas soluciones metálicas. Además, en la promoción y construcción de estructuras de hormigón y hormigón de alta resistencia, tanto Inmobiliaria Espacio como la constructora OHL, tienen gran experiencia.

Se trataba pues de proyectar la estructura óptima en hormigón armado, para un edificio diseñado de forma muy precisa con antelación en su vertiente arquitectónica. Además, debía permitir un proceso constructivo de máxima eficiencia y rapidez, con preferencia a sistemas más lentos y tradicionales de la edificación normal.

La estructura debía contemplar también circunstancias relativas a la interacción con el resto de los campos y funciones con los que se relaciona el edificio: características geotécnicas del terreno, normativa con las acciones a considerar, instalaciones y acabados (sobre todo fachadas y pavimentos).

También, como es normal para edificios de esta singularidad, debían tomarse en cuenta otras consideraciones relativas a circunstancias excepcionales: accidentes, explosiones, acciones terroristas, imprevistos, etc., que cada vez, y muy especialmente desde el 11-S-2001, se están endureciendo.

Con todos estos condicionantes generales y particulares para la estructura del edificio, se hicieron los planteamientos básicos para su diseño:

- Esta debía de tener la capacidad resistente necesaria para hacer frente a las diferentes accio-

nes que pueden actuar sobre la construcción: estáticas, dinámicas y excepcionales.

- Bajo la actuación de estas acciones, la estructura debe de tener una capacidad de deformación que mantenga en todo momento las condiciones de confort. Debe de permitir el correcto funcionamiento de todas las instalaciones y no producir daños en los acabados.
- La estructura proyectada debe permitir soluciones constructivas económicas en tiempo y costo.
- La estructura debe tener una cualificada adecuación al espíritu básico que el edificio propone, en orden a potenciar la calidad general de la obra.

Se diseñó un esquema estructural con los siguientes elementos:

- En planta, la estructura resistente estaba constituida por losas de hormigón armado macizas de canto uniforme. Esta tipología se adecuaba perfectamente a la permanente variación de forma de cada una de las plantas a medida que se asciende en altura.
- Elementos verticales constituidos por núcleos interiores y soportes. Los núcleos interiores, en número de tres (uno central a lo largo de toda la altura y dos laterales hasta el tercio y los dos tercios) tienen como tarea principal la de dar rigidez a la Torre frente a esfuerzos horizontales.
- Soportes, que varían mucho dependiendo de si son interiores (verticales) o exteriores de fachada (algunos inclinados). Su misión principal es la de transmitir a cimentación las cargas gravitatorias, pero actuando como estructura pórtico con las losas macizas, aportan una rigidez añadida significativa a la de los núcleos.
- Cinturón de rigidez, elemento de unión que suma las rigideces de los núcleos y los pórticos. Se sitúa en la zona donde resulta más eficaz: los dos tercios de la altura, entre dos losas de piso que se aprovechan para disponer allí una planta técnica. En el cinturón de rigidez, se generan esfuerzos muy acusados que exigen gran pretensado en las losas horizontales y en las pantallas verticales que se disponen para tal fin.
- Vigas celosía cargaderos. Para dar prestancia a la entrada del edificio, parte de los soportes de las fachadas sur y este, se eliminan en la zona

baja y nacen apeados sobre esta gran celosía metálica pretensada.

2.2. Acciones

Para las acciones gravitatorias, se partió del peso propio de todos los elementos que constituían la estructura y los acabados, más las sobrecargas que las normas (1) señalan para el uso del edificio: oficinas. Se tomó una sobrecarga de 400 kg/m^2 en general en todas las zonas.

La acción principal horizontal, se debe solo a la acción del viento, ya que Madrid no es zona sísmica (2). Con la normativa vigente, y la bibliografía existente, se pueden determinar unos coeficientes de forma aproximados, para obtener también de forma aproximada la magnitud de deformaciones y esfuerzos. Pero un edificio de esta magnitud y singularidad, exige estudios más completos. Se pensó lógicamente en hacer pruebas en túnel de viento.

La primera prueba se efectuó en el laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aero-náuticos de Madrid, el INTA. El ensayo no tuvo en cuenta la capa límite; por ello sus resultados, a pesar de ser interesantes de cara a obtener presiones para el cálculo de la estructura, resultaban claramente insuficientes para conocer la distribución localizada de estas presiones. Esta distribución es imprescindible sobre todo para diseñar y dimensionar los paneles de fachada y su sujeción a la estructura.

El segundo y definitivo ensayo aerodinámico, se llevó a cabo por el Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory de la Universidad de Ontario (Canadá), bajo la dirección del Profesor Alan G. Davenport. En él ya sí que se tuvo en cuenta la capa límite que configuraban el terreno y los edificios circundantes. Aunque se tenía el problema de que en el momento del ensayo (finales de 2002) no se conocían con suficiente precisión las características de las torres vecinas; se tuvieron que representar éstas sin detalle, con elementos cilíndricos genéricos. En este ensayo, en vez de medir las deformaciones bajo cargas estáticas, se estudió el comportamiento dinámico de la Torre para poder obtener las aceleraciones y velocidades angulares en la última planta habitable de esta. Los valores que se obtuvieron en el ensayo, para distintos periodos de retorno y coeficientes de amortiguación, resultaron siempre inferiores a los exigidos por las normas internacionales para oficinas

(0,25 m/seg²) (3). Esta limitación es la que asegura un comportamiento adecuado de la estructura bajo acciones de viento, evitando situaciones de no confort para los usuarios. Este segundo ensayo en el túnel, incrementó en un 10% los valores globales medios que se habían tomado para la acciones del viento. El incremento llegó hasta el 30% en algunas zonas locales.

Cabe señalar en este apartado que dada la naturaleza singular de este tipo de edificios en altura, se hace recomendable e incluso necesario, el estudio de la acción del viento en su entorno más cercano, así como sobre los peatones en sus áreas más próximas. La variación sobre la acción del viento que el cambio que producen las Cuatro Torres en la capa límite original, podría haber exigido la comprobación de la estabilidad de construcciones anteriores cercanas si por su tipología (amplias cubiertas muy ligeras) fueran muy sensibles a un cambio de la acción del viento sobre ellas. No fue necesario esto.

2.3. Cálculo

El cálculo de la estructura fue efectuado por el "Estudio de Ingeniería MC 2" de Julio Martínez Calzón que también participó durante la construcción en la Asistencia Técnica.

Se empleó un modelo completo, global y detallado de la Torre, para analizar la estructura mediante elementos finitos. Este modelo permitió estudiar:

- El reparto de cargas verticales entre los soportes y los núcleos centrales que ocasiona el hiperestatismo de la estructura.
- El reparto entre los distintos núcleos y los pilares, de las solicitaciones originadas por la acción del viento.
- Los esfuerzos sobre el cinturón de rigidez.
- La deformación estática del edificio bajo cargas de viento.
- Las frecuencias propias de la estructura.
- Las solicitaciones sobre las vigas cargadero de fachadas, analizando su interacción con el resto de la estructura.

Además, con otros numerosos modelos locales, se estudiaron y analizaron los elementos estructurales más significativos. Se dedicó especial interés al análisis del cinturón de rigidez, para ajustar al máxi-

mo el dimensionado de este elemento tan comprometido.

Con todos los datos obtenidos, se llevó a cabo el dimensionado final y armado de los elementos con modelos locales que permitieron fijar las armaduras pasivas y el pretensado.

2.4. Deformaciones

Así como mediante el estudio en el túnel de viento se determinaron deformaciones y aceleraciones horizontales por la acción del viento, fue necesario llevar a cabo un estudio muy detallado de las deformaciones verticales instantáneas y diferidas para evitar daños a los elementos de fachadas, pavimentos y cerramientos interiores.

La desigual distribución de tensiones permanentes entre los núcleos y los soportes, así como las diferencias relativas de rigideces entre pilares continuos y los que apean en las vigas cargaderos, da lugar a descensos diferenciales entre los distintos puntos de los forjados. El valor de estos descensos diferenciales, debe mantenerse por debajo de los valores que pudieran reducir la capacidad resistente de la estructura, o afectar a la funcionalidad del edificio. Lógicamente se tuvo en cuenta la temporalidad de la construcción de la Torre, y dentro de la horquilla de variaciones para los parámetros reológicos, se dieron las contraflechas convenientes.

3. Elementos principales de la estructura

3.1. Losa de cimentación

"Las Cuatro Torres" se ubican en un terreno constituido por sedimentos típicamente detríticos que provienen de las formaciones rocosas de la Sierra de Guadarrama, esencialmente granítica. Estos sedimentos detríticos son de composición cuarzo-feldespática, arcósicos, con proporciones decrecientes de elementos gruesos y disminución del tamaño máximo de los mismos al irse alejando de la sierra. Dicha sedimentación se ha producido desde el Mioceno inferior hasta el comienzo del Cuaternario. Estos sedimentos detríticos constituyen la denominada Facies Madrid. Corresponden a las "arenas de miga" y "toscos" del lenguaje geotécnico, los cuales se presentan como lentejones imbricados. (figura 4).

PÁGINA DE PUBLICIDAD



Fig. 4.
Excavación del solar.

Básicamente el terreno de cimentación en la zona donde se ubican las Torres, está constituido por los siguientes niveles:

- Arenas de Miga

Se trata de una unidad constituida predominantemente por masas arenosas de naturaleza cuarzo-feldespática o arcósica.

En este material puede contarse con ángulos de rozamiento elevados (35° - 36°), si bien la cohesión es prácticamente nula cuando el contenido de finos es inferior al 15%. Con contenidos del 15 al 25% es frecuente obtener una ligera cohesión.

Por otra parte estas arenas desarrollan una cohesión capilar apreciable (10 - 20 KN/m^2) en estado no saturado, la cual justifica el mantenimiento de taludes verticales de excavación con alturas de 6 u 8 m. No obstante, esta cohesión puede perderse fácilmente por soleamiento prolongado o por lluvias o saturación accidental.

Los ensayos SPT efectuados en este material suelen arrojar valores de rechazo, especialmente a profundidades superiores a los 5-10 metros. La tensión admisible neta en estos materiales de compacidad densa-muy densa suele rondar los $4,00 \text{ kp/cm}^2$.

- Arenas tosquizas y toscos arenosos

Se trata de suelos de transición correspondientes a cambios laterales o verticales en la sedimentación en una fase en que aumentaron los aportes de finos respecto a los de las arenas de miga. Estas formaciones son bastante potentes y en ellas suelen encajarse gran parte de las cimentaciones de la mitad norte de Madrid.

Para los toscos arenosos el ángulo de rozamiento interno puede oscilar típicamente entre 31° y 35° , con una cohesión efectiva de 40 a 100 KN/m^2 , mientras que para las arenas tosquizas el ángulo de rozamiento interno se encuentra en

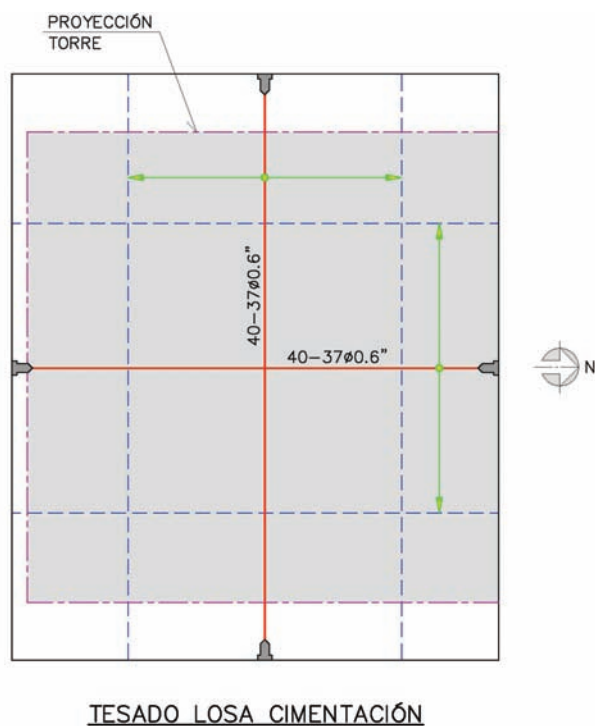


Fig. 5. Croquis losa de cimentación y su pretensado.

la gama 33-37°, con cohesiones de 10 a 50 KN/m^2 .

Los ensayos SPT efectuados en este material suelen arrojar valores de rechazo, análogamente al nivel anterior. Asimismo, la tensión admisible neta en estos materiales suele ser al menos de 4,00 kp/cm^2 .

Con estas características del terreno, el informe geotécnico fijaba, a la profundidad donde iba a apoyar la cimentación, una tensión media admisible de 7,00 kp/cm^2 , con máximos no superiores a 11,2 kp/cm^2 .

En la zona objeto de estudio únicamente se detectaron algunos niveles de agua "colgados" que circulaban a favor de los materiales más gruesos (arenas de miga) con porcentajes de finos inferiores al 10%-15%.

Respecto a las cargas que la Torre transmite, y ha de soportar este terreno, se concentran fundamentalmente en el núcleo central y en los soportes principales. La naturaleza del terreno que acabamos de describir permite poder diseñar una cimentación superficial mediante losa maciza para transmitir las cargas directamente al terreno.

La superficie de la losa tiene un área ligeramente superior a la huella de la Torre; para que el valor de las tensiones no superara los máximos establecidos y

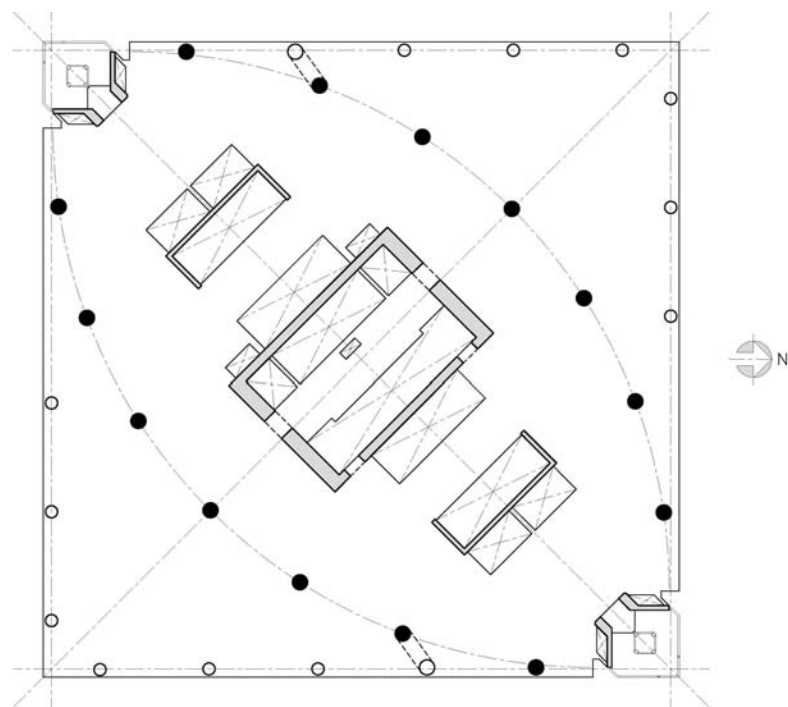


Fig. 6. Planta replanteo de la Torre.

se uniformizaran estas, hubo que dotarla de un canto de 4,00 m.

Los esfuerzos, tanto de flexión como de cortante que se producían en la transmisión de las tensiones al terreno, hicieron que se diseñara una losa armada y pretensada. El empleo de cables de pretensado permite reducir el volumen y número de capas de acero a colocar, al mismo tiempo que evita la aparición de fisuras en la cara del hormigón en contacto con el terreno, garantizándose por tanto un adecuado comportamiento a largo plazo.

Para el pretensado se utilizaron unidades potentes de 37 cables de 0,6", situadas a 0,50 m entre sí, solamente en la parte central de la losa, con los anclajes activos situados en las caras laterales (figura 5).

Hubo que disponerse también gran cantidad de armadura de cortante.

3.2. Núcleos

El núcleo central recorre la Torre en toda su altura y es el principal contribuyente a la estabilidad horizontal del conjunto (50%). Por él discurren gran parte de los sistemas de comunicación del edificio así como las instalaciones. Su forma rectangular le confiere una rigidez considerable tanto a flexión como a torsión; indispensable esta última si se tiene en cuenta la consi-

derable excentricidad de las solicitaciones de viento a causa de la forma asimétrica de la planta.

El núcleo central está constituido por muros de hormigón armado ortogonales entre sí con espesores variables de 1,50 a 0,40 m perforados para permitir el paso de personas e instalaciones. Tiene una dirección preferente de comportamiento que coincide con la del viento actuante pésimo (figura 6).

Por debajo de la cota +23,60 se emplea hormigón HA-70, que se sustituye por HA-30 en la cota +51,60, tras siete plantas de transición ejecutadas con HA-40.

Los huecos que es necesario efectuar en los muros del núcleo, determinan unos dinteles de canto muy estricto que ha sido necesario analizar mediante elementos finitos para garantizar la adecuada transmisión de rasantes entre las dos semisecciones en C, de modo que no disminuya la capacidad resistente de la pieza dimensionada como sección única.

Los núcleos laterales son más pequeños. Uno se eleva hasta el tercio de la altura y el otro hasta los dos tercios. Su contribución a la rigidez global es menor debido a sus dimensiones en planta y a su sección abierta. Por todo esto, la mayoría de los muros que conforman estos núcleos laterales son de 0,30 m. de espesor.

En el modelo de cálculo global, se pudo determinar el reparto de esfuerzos entre los núcleos. La distribución es muy sensible a las diferencias de rigideces entre los núcleos y también al trabajo de diafragma que llevan a cabo los forjados en su plano. Como ejemplo, en las zonas de acceso a la torre, donde los forjados presentan huecos muy importantes debido a zonas de doble o triple altura, los esfuerzos de torsión se concentran en el núcleo central, descargando los laterales.

3.3. Soportes

Entre los soportes, hay que distinguir de entrada dos grupos:

- Los soportes principales (verticales) que recorren el edificio en toda su altura.
- Los soportes de fachada, que van desapareciendo a medida que se reduce la superficie de la planta. Entre ellos se deben distinguir a su vez los verticales y los inclinados, en función de la fachada en la que estén ubicados y la consiguiente geometría que presenten.

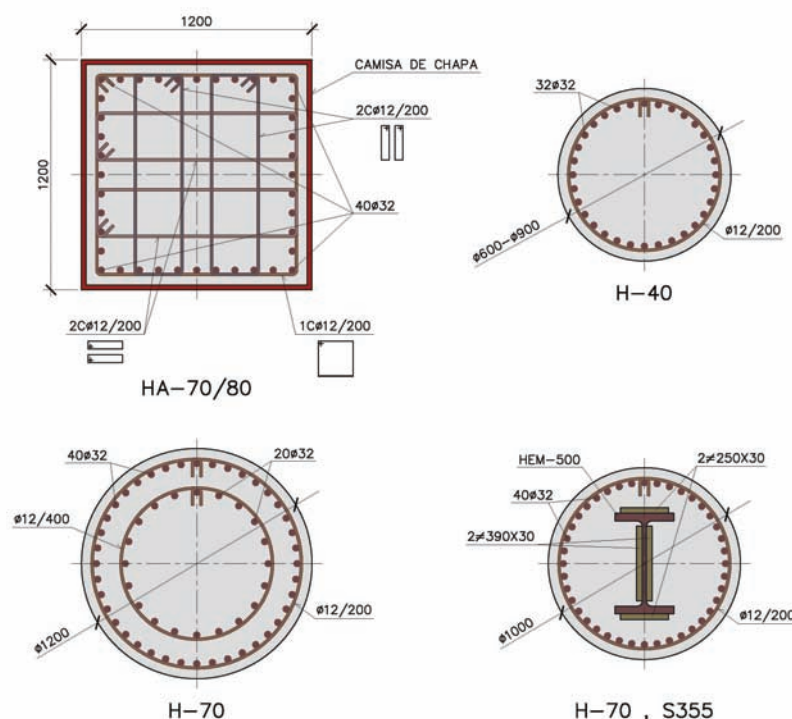


Fig. 7. Secciones tipo de soportes.

Los soportes principales, por el número de plantas que reciben y el tamaño relativo de su superficie de influencia, conducen la mayor parte de las acciones verticales del edificio. Este hecho se une a las limitaciones que para el tamaño de la sección en las plantas bajas impone la arquitectura. Para resolver la transmisión a cimentación de cargas tan elevadas, se contaba con:

- Hormigones de alta resistencia (HA-70) combinados con hormigones HA-40 y HA-30 en zonas menos solicitadas.
- Cuantías elevadas de armadura, que a veces exigen barras de $\varnothing 32$ mm en doble corona.
- Perfiles metálicos de acero S355 embebidos y a veces reforzados con chapas.

Las características de los soportes resultantes, fueron:

- Soportes bajo rasante: $\varnothing$ 1.200 mm de HA-70. Con cuantías de $A_s = 3,5\%$.
- Soportes zona baja: $\varnothing$ 1.000 mm de HA-70. Con cuantías de $A_s = 4\%$. Más perfil HEM 500+2#390x50.
- Soportes de zona media y alta: $\varnothing$ 600-1.000 mm de HA-40 ó HA-30 y cuantías de A_s entre 2 y 5%.

La mayor parte de los pilares de la Torre, son circulares (Figura 7). Solo hay dos importantes de sec-

PÁGINA DE PUBLICIDAD



Fig. 8. Pilar exento de fachada.

ción cuadrada: son los que soportan las celosías de las fachadas sur y este, donde además de una escuadría de 1.200x1.200 mm² los pilares están recubiertos por camisas de chapa de 25 mm no consideradas en el cálculo y que actúan como protección del elemento estructural (figura 8).

La inclinación de los soportes, especialmente significativa en la parte central de la Torre, no representa un problema mayor para la estructura. A causa de la simetría polar de la planta, los desvíos que se producen están equilibrados dos a dos, produciendo únicamente torsiones que el núcleo es perfectamente capaz de admitir.

Es interesante mencionar en este apartado de soportes, los desvíos que se producen en algunos de ellos en zonas bajas y de alta carga. Por necesidades de arquitectura, en estas zonas bajas algunos soportes han de pasar de las alineaciones de fachada a las radiales para adecuarse a la forma de la planta. Estos desvíos se han resuelto mediante bloques rígidos que ocupan la envolvente entre la situación inicial y desplazada. Las fuerzas que aparecen en planta para compensar estos desvíos, son equilibradas por compresiones en uno de los forjados y tracciones en el otro. Estas tracciones son transmitidas al núcleo central mediante cables de pretensado y refuerzos de armadura pasiva.

3.4. Forjados

La tipología elegida para los forjados de planta, fue el de losas macizas de hormigón armado y canto uniforme. La elección se apoyó en que:

- Eran lo más adecuado para luces muy similares a las habituales en edificación (hasta 12,00 m). La geometría compleja de las plantas y su constante variación en altura, se solucionaba bien con estos elementos hormigonados "in situ".
- Las losas son fáciles de construir en altura mediante el bombeo del hormigón y el empleo de mesas de encofrado fáciles también de desplazar de una a otra planta.
- Las losas exigen una cuantía más bien moderada de armadura pasiva y se adaptan con facilidad a la ejecución de huecos no previstos en el proyecto inicial.
- Exige detalles de conexión a soportes y núcleos en general sencillos.

Con todas estas consideraciones, se calculó y dimensionó la estructura con losas de 0,28 m de canto en todas las plantas tipo. La armadura se optimizó en base de que resultaran los mínimos kilos aun a costa de un mayor trabajo de ferrallado. Para estas losas tipo se dispuso malla básica de 5 $\varnothing$ 12 p.m.l. La cuantía de armado resultaba en cambio muy penalizada por la abundancia y dimensiones de los huecos para instalaciones que atraviesan las plantas en zonas de fuerte luz. Lógicamente la arquitectura no permitía disponer zunchos de canto superior al de la losa en los bordes de los huecos.

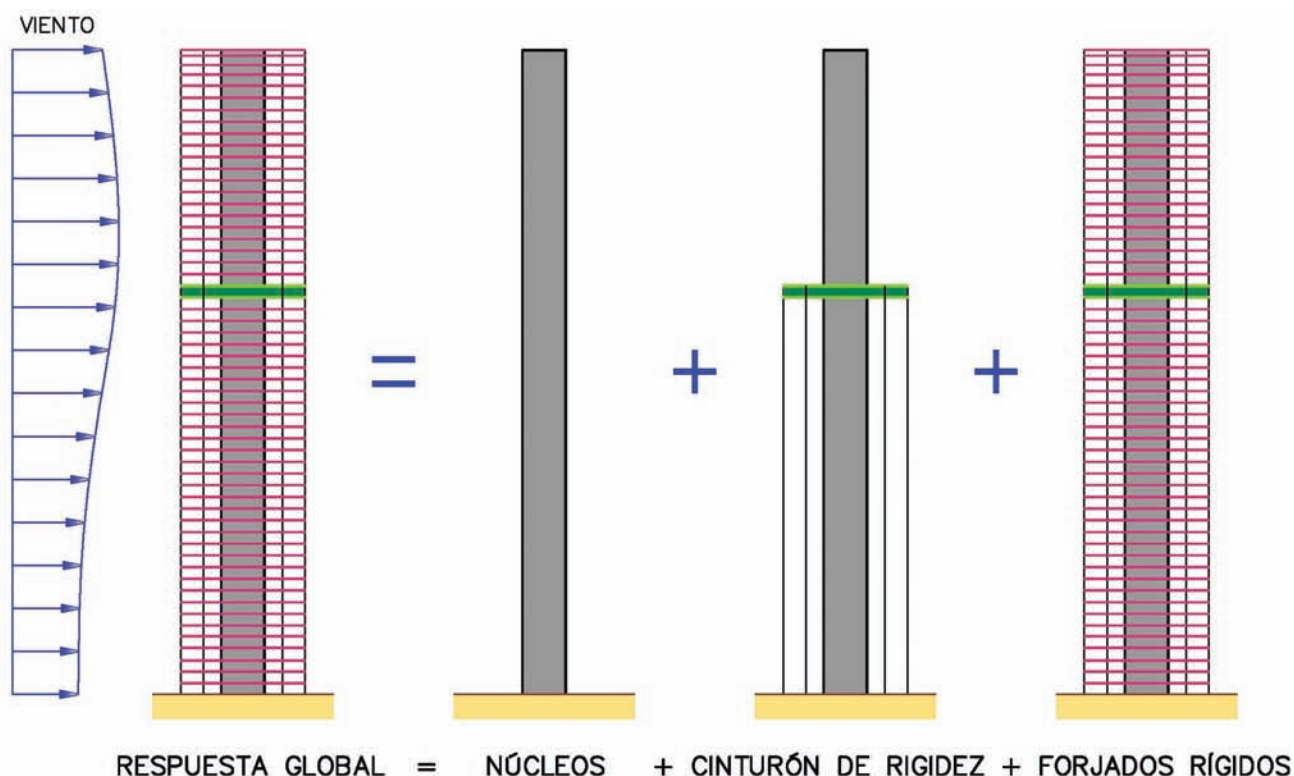
Las losas de los forjados, como ya se ha indicado, tienen otra misión importante además de recoger y transmitir a los soportes y los núcleos las cargas gravitatorias. Actúan como diafragmas para transmitir, repartir y armonizar, la rigidez de la estructura frente a esfuerzos horizontales. Esto provoca una serie de ligeros esfuerzos adicionales de flexión en las losas, sobre todo en su unión con el núcleo central. Al no ser concomitantes los valores máximos de las sollicitaciones gravitatorias y eólicas, los esfuerzos máximos no se suman y el incremento de armado por esta causa es poco significativo.

Finalmente, el canto estricto de las losas de pisos afecta en sentido negativo a la cuantía de armadura de punzonamiento, que es más elevada de lo habitual.

3.5. Vigas cargadero

Como consecuencia del diseño arquitectónico del acceso a la Torre, se eliminan en su primera altu-

Fig. 9. Esquema funcionamiento "cinturón de rigidez".



ra sobre la rasante parte de los pilares de las fachadas este y sur. Esto genera un gran pilar (dos, estructuralmente hablando) en la esquina de la Torre que conforman estas fachadas y dos grandes vigas cargadero de 27,8 m de luz, para apeaar los pilares eliminados en baja.

Estas grandes vigas cargaderos se han resuelto con celosías metálicas de 8,00 m de canto. Como en esas dos plantas se ubican zonas de instalaciones, las vigas no interfieren funcionalmente ni se perciben desde el exterior.

Las barras de las celosías tienen secciones máximas de 550x900 mm² y chapas de espesores entre 20 y 80 mm, todas ellas de acero de calidad S355 J2G3.

Para aprovechar óptimamente el rendimiento de la estructura, tanto el cordón superior como inferior de las celosías se conectan a las losas de la planta correspondiente para generar secciones mixtas.

La característica más singular de las celosías, además de su gran magnitud tanto de esfuerzos como de peso, lo marcan sus diagonales pretensadas. Este pretensado pretende reducir las dimensiones de las secciones de las diagonales, pero sobre todo poder ir compensando las deformaciones de la ce-

losía a la vez que el progreso de la Torre en altura aumenta las cargas. En cada diagonal se proyectan dos cables de 31 ó 19 Ø 0,6", con anclajes provisionales similares a los empleados en estructuras de hormigón. La puesta en carga de estos cables se contempló en cuatro etapas distribuidas uniformemente a lo largo de la construcción de la Torre, para reducir las deformaciones de los forjados apoyados en las celosías al mínimo compatible con los forjados.

3.6. Cinturón de rigidez

Como se ha comentado, la rigidez de la Torre frente a esfuerzos horizontales es proporcionada fundamentalmente por los núcleos. Pero por su tipología, los pilares principales unidos y en conjunto con las losas de forjado, proporcionan también una parte significativa de esta rigidez. Para conseguir esa suma de rigideces es preciso unir estos distintos comportamientos: ménsula - pórtico (figura 9). La unión y "obligación de trabajar juntos", genera esfuerzos muy importantes. Aproximadamente a los dos tercios de altura, se encuentra la zona idónea para colocar "el atado", el cinturón de rigidez que soporta-

rá estos elevados esfuerzos. Y para aprovechar las exigencias estructurales y hacerlas compatibles con la funcionalidad arquitectónica, en esta zona se ha situado la segunda planta técnica.

A la altura de esta planta M2, ya han desaparecido los dos núcleos laterales y también los soportes de fachada, y se puede plantear pues la unión entre el núcleo central y los pilares principales. Esta unión se materializa mediante pantallas de hormigón armado que combinadas con los forjados superior e inferior, forman un entramado de 4,00 m de canto. La gran rigidez del conjunto permite llevar a cabo la transferencia de esfuerzos entre núcleo y pilares principales.

Se proyectaron dos pantallas perimetrales que unen cinco pilares cada una, y cuatro pantallas transversales que conectan las anteriores con el núcleo central.

Las pantallas tienen espesores de entre 0,40 y 0,80 m, y las losas de las plantas superior e inferior del cinturón de rigidez, tuvieron que dimensionarse con cantos de 0,43 m, en vez de los 0,28 m del resto de plantas. Los esfuerzos de comprensión tan elevados hicieron necesario adoptar estos valores para poder alojar la gran demanda de acero pasivo y activo. Las losas tuvieron que armarse con parrillas superiores e inferiores de Ø 25 a 100 mm combinadas con cables de pretensado de 19 unidades de 0,6" que siguen la trayectoria de los esfuerzos de tracción. Las pantallas se proyectaron con armados de Ø 25 a 25 mm horizontal y dobles cercos Ø 25 a 100 mm vertical, además de barras de pretensado de 50 mm.

3.7. Aparcamiento

El aparcamiento fue diseñado totalmente en estructura de hormigón prefabricada. Sobre zapatas aisladas, apoyan los pilares prefabricados con ménsulas para recibir a las vigas pretensadas con luces tipo de 7.75 m. La estructura la completa en planta una losa formada por placas alveolares de 0,16 m de canto con capa de compresión de 8 cm.

4. Aspectos constructivos

4.1. Generalidades

La construcción de Torre Espacio suponía un gran reto para OHL. La empresa, con casi 100 años de vida

y experiencia en construcción, se enfrentaba quizás a la ejecución de su edificio más singular. Aunque con la tecnología existente en los tiempos actuales, la dificultad que ofrecía el proyecto no fuera quizás mucho mayor que la que en su tiempo supuso la construcción de "Torres Blancas" o "Torres Colón", por referirnos tan solo a estructuras de edificación singulares ejecutadas por OHL en Madrid.

Para abordar este gran reto de la construcción de la Torre, fueron determinantes dos conceptos claves: por un lado el de la anticipación (para OHL fue una gran ventaja saber que "nosotros" construiríamos la Torre, sin tener que esperar a resultados de concursos), que permitió la formación de un equipo idóneo que pudo realizar una excelente labor previa de análisis del proyecto y sobre todo de su puesta en obra. Se trató de saber siempre con antelación suficiente, los problemas que cada fase pudiera deparar. Y se hicieron muchas pruebas a escala real para perfeccionar los procesos y adiestrar al personal. El otro aspecto clave, fue el de la coordinación, labor fundamental en una obra de esta magnitud.

Aunque muchas de las actividades relacionadas con la ejecución de la Torre están presentes en la mayoría de las estructuras de edificación, su singularidad genera nuevos elementos que afectan a los rendimientos corrientes de ejecución, todo como consecuencia de la estrecha relación entre la tipología de la estructura, los materiales que la constituyen y los procesos y recursos necesarios para su transporte y colocación.

Es evidente que el principal condicionante es la elevada altura de la edificación y la carencia de experiencia en este tipo de obras en España. Los procesos, al ser muy repetitivos, hay que industrializarlos y buscar la similitud con una cadena de montaje de cualquier fábrica. Este sistema, **industrializar el proceso**, fue el que marcó más la actuación para conseguir el objetivo: **ejecutar una planta semanal**. Para ello era necesario diseñar ciclos donde primara el orden con disciplina absoluta, tratando de no dejar nada a la improvisación y que cada operario sepa lo que tiene que hacer en cada momento. Se realizaron protocolos para que cualquier eventualidad, como inclemencias meteorológicas, averías, etc., tuvieran muy poca o nula incidencia en el tiempo de ejecución.

En este tipo de obra, los medios de elevación adquieren una importancia extraordinaria por las limitaciones que entrañan las medidas reducidas de las

PÁGINA DE PUBLICIDAD



Fig. 10. Armadura de espera en losa de cimentación.

plantas, la altura de la torre y la posible interferencia de los medios. Todo esto exige una especial atención en la elección e implantación en obra de los distintos medios y un equipo específico que en cota 0, organice y priorice la elevación y distribución de los distintos materiales.

Con objeto de optimizar estos recursos, los encofrados de núcleos trepan automáticamente. Simultáneamente con los del núcleo central, trepa el brazo distribuidor de hormigón de la bomba estática. Todo ello hace posible que el trasiego de materiales de en-

Fig. 11. Vainas de pretensado en losa de cimentación.



cofrado de muros sea autónomo y no dependa de ningún otro medio de elevación.

Por otra parte, para la protección de los operarios y de cara a minimizar la sensación de altura, se ideó un anillo protector de fachada, también autotrepante.

Respecto al suministro de hormigón a las plantas, dos bombas estáticas ubicadas en planta baja abastecían al brazo distribuidor de 32 metros de pluma, mediante dos líneas alternativas ubicadas en el núcleo central. Las grúas básicamente mueven acero y encofrados de pilares; hormigón, solo en casos excepcionales.

Para el transporte vertical del resto de materiales y personal de obra, se dispusieron dos grupos de ascensores.

Los trabajos de preparación y ensayos de personal y métodos de ejecución, se efectuaron mientras otras empresas se ocupaban de la excavación y ejecución de pantallas. OHL comenzó la ejecución de la cimentación y estructura en el último trimestre de 2004.

Describiremos a continuación las características más relevantes de la construcción de cada uno de los elementos:

4.2. Ejecución de la losa de cimentación

Como ya se comentó al hablar del proyecto, la cimentación era superficial y estaba constituida por una losa de hormigón postensado de 4,00 m de canto y dimensiones en planta de 42,3X52,3 m². En total: 8.850 m³ de hormigón HP 40 a colocar.

El hormigonado de la losa de cimentación fue el proceso que más demanda de hormigón por día supuso. Se ejecutó en dos tongadas de 2,00 m de canto cada una. Se estudió el efecto sobre el hormigón del aumento de la temperatura durante el proceso de fraguado de estas grandes masas, y basándonos en experiencias de hormigonado de presas se estudió si era necesario disponer serpentines internos para refrigerar durante el proceso de fraguado. Al final no se vio la necesidad de su empleo y del análisis de los gradientes producidos (temperaturas máximas de 75° C medidas con termopares internos), se comprobó que no se habían producido en el hormigón tensiones no admisibles.

En la primera tongada se establecieron siete fases de hormigonado que se adaptaban a la situación de las bandas de acero activo. La última fase

(7ª) fue la que exigió más volumen de hormigón colocado de forma continua: 1.259 m³. Cada zona de hormigonado se limitó mediante rejillas metálicas que permitieron ejecutar juntas verticales entre las distintas fases.

La segunda tongada se hormigonó también en 7 fases, aunque en absoluto coincidentes con las de la primera. En esta segunda, todo lo gobernaba la colocación de las esperas de núcleos y pilares (figura 10). Mientras en la primera fase las juntas se disponían en X-Y, en esta segunda iban en diagonal a la losa, como la planta de la Torre.

Para la ejecución de la losa, se estudió mucho previamente la interfaz losa-terreno. Tenía una importancia vital estructuralmente hablando debido a que siendo la losa postensada, había que garantizar que la fuerza de los cables se transmitiera al hormigón. El rozamiento entre suelo y losa, no podía exceder de 0,5 según las especificaciones del proyecto. Se determinó colocar una doble lámina de polietileno de 250 µ de espesor cada una, directamente sobre el terreno. Mediante ensayos a escala sobre el estrato de suelo donde apoyaba la losa, se comprobó lo acertado de esta disposición.

La armadura activa de la losa se encuentra en la primera tongada; estaba constituida como ya se ha dicho, por 40 tendones de 740 toneladas (37 cordones de 0,6" cada uno) de acero Y1860S7 en ambas direcciones (figura 11). En total 161.000 Kg que con trazado prácticamente recto se ubicaban en franjas centrales de 24 metros de ancho. El tesado se efectuó en varias fases una vez terminada de hormigonar la primera tongada de hormigón.

La armadura pasiva pesaba 1.450.000 Kg (cuantía de 165 Kg/m³) y fue montada a una media de 40.000 Kg diarios. La primera tongada tiene armadura tanto inferior como superior; la segunda, solo superior. Toda la armadura básica de la tongada inferior se prefabricó en taller y se moduló de forma que al montarla quedaran listas las esperas de las armaduras de pilares de cortante (que a su vez servían de cosido entre las dos tongadas de hormigón absorbiendo los esfuerzos rasantes) (Figura 12). Dada la precisión necesaria para el encaje de todas las armaduras, se realizó una muestra a escala real antes de comenzar el ferrallado. Con esta metodología, sumada a una alternativa de postensado más rápido, se consiguió una reducción del plazo de ejecución de toda la losa: de 3 meses previstos, a 7 semanas.



Fig. 12.
Industrialización
ferralla de losa de
cimentación.

4.3. Soportes y núcleos

Una vez concluida la losa de cimentación, se inicia un proceso de ejecución tradicional. Con montajes de trepa en los núcleos, prefabricación de armaduras de núcleos, pilares y forjados... se trata de marcar el ciclo que comenzará a ejecutarse en planta 1ª y que se repetirá 45 veces.

La ejecución de los soportes exigió distintas técnicas y procedimientos en función de las características concretas que en cada caso se presentaron.

Los tipos de armados son múltiples. Los armados de los pilares que mueren en planta baja, o aquellos situados por encima de la planta 29, son armados tradicionales. En los dos primeros tercios de la altura, es frecuente el armado del pilar con doble corona, y en el primer tercio, con alma metálica interior adicional.

La armadura se prefabricó en taller para alturas de 5 a 14 m. Se montaron piezas de hasta 18 m, cuyo ensamblaje de armadura se realizaba antes de izarlas, y que abarcaban 4 plantas de altura (figura 13).

El empalme de armaduras se efectuó preferentemente mediante solapo. Para pilares muy armados y con barras Ø 32 mm se emplearon manguitos con tornillos de apriete (figura 14).

Para los pilares mixtos, el empalme de perfiles no era muy complicado, debido a que las uniones entre ellos se diseñaron para trabajar solo a compresión.

El encofrado de los soportes circulares se conformó mediante semimoldes metálicos convencionales.



Izquierda, fig. 13. Montaje ferralla de soportes. A la derecha, fig. 14. Empalmes de armadura con manguitos.

La colocación del encofrado para los pilares inclinados, hubo de estudiarse bien antes de comenzar su ejecución; después de fijar la metodología, resultó fácil.

Para el hormigonado de pilares con alturas de entre 6 y 12 m se implementaron tolvas prolongadas con mangueras elásticas reforzadas que se iban cambiando conforme avanzaba el hormigonado. En los soportes con altura superior a los 12 m, el hormigonado se llevó a cabo con la utilización de un sistema de tolva y tubos tipo premie de varios tramos.

En el caso de las interferencias en nudos entre soportes con hormigón de resistencia superior al de

las losas del forjado, la solución adoptada fue el zunchado del hormigón de la losa mediante la colocación de 5 cercos $\varnothing 25$ (figura 15).

El núcleo central marcó desde el inicio el ritmo del proceso de ejecución, constituyéndose en el elemento crítico del ciclo productivo de la Torre. Fue durante toda la obra el referente de crecimiento de la estructura, pues como punto de partida de las labores de topografía (altimetría), encofrado y armadura en cada nueva planta, determinaba la duración de cada unidad del ciclo. La armadura se prefabricó en taller en módulos transportables mediante camión estándar, que se montaron de modo que los repartos horizontales, colocados in situ, conectaran finalmente todos los elementos. De este modo se consiguieron los mínimos solapos horizontales, un rendimiento óptimo durante el montaje, y un proceso compensado que le daba continuidad a las labores de los equipos de ferralla.

El armado de las vigas de acople (dinteles) llegaron a la obra totalmente prefabricadas y se llevaron directamente a su emplazamiento, fijándose mediante puntos de soldadura antes del cierre del encofrado (figura 16).

El encofrado desde cimentación hasta planta baja, fue del tipo trepa convencional, y a partir de ahí se comenzó el montaje del autotrepante, diseñado especialmente para trepar conjuntamente con la estructura del brazo distribuidor a través del que se bombeaba el hormigón a cada planta.

Izquierda, fig. 15. Cercos en nudos de estructura. A la derecha, fig. 16. Montaje ferralla de núcleo.

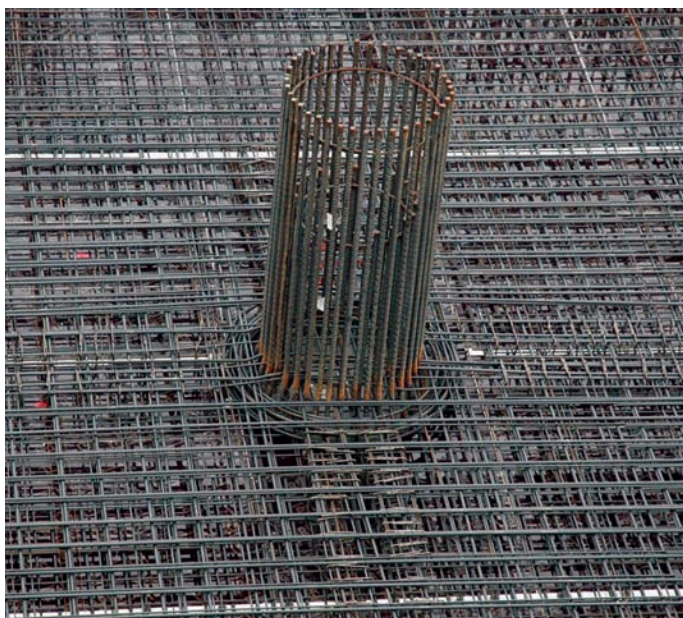




Fig. 17.
Ferrallado
planta.

4.4. Losas de forjado y ciclo constructivo

Todas las losas de forjado de los sótanos hasta la planta baja, se ejecutaron con encofrado por mesas. A partir de planta baja se empleó un sistema de encofrado modular tipo Skydeck.

En todas las plantas la armadura, orientada con los ejes principales de los núcleos, se montaba empezando por los zunchos perimetrales e interiores de borde. Colocados los refuerzos de la armadura inferior, se procedía con la colocación de las celosías que servían de soporte a la armadura superior, que se colocaba según la misma secuencia que la inferior (figura 17).

La armadura de punzonamiento se colocó en los primeros forjados con estribos tradicionales, pero posteriormente se dispusieron pernos para punzonamiento dispuestos en peines montados desde la armadura superior a la cual se ataban.

El hormigonado de cada planta se efectuaba en tres fases, y comenzaba siempre por el núcleo central. Finalizado este se hormigonaba el forjado alrededor hasta la delimitación con las zonas adyacentes, separadas entre sí mediante láminas de nervo-metal. Las fases siguientes comenzaban análogamente siempre por los núcleos laterales.

El hormigón de las losas macizas de los forjados de la Torre es HA-30 en las plantas tipo y HA-80 en plantas del cinturón de rigidez.

Los procesos de apuntalado, encofrado, ferralla-

cido en tres fases, avanzando de forma escalonada en altura.

Todas se hormigonaron mediante bombeo, sin excesivos problemas.

4.5. Fabricación y montaje de las Vigas cargadero

Las dos vigas cargadero que soportan la carga apeada de los pilares de las fachadas sur y este del edificio son elementos de una especial singularidad.

Estas vigas son de acero S355 J2G3, y pesan unos 130.000 kg cada una. La fabricación de todos los elementos (cordones, diagonales, montantes, etc.) se llevó a cabo íntegramente en los talleres Horta Coslada de Madrid. Las técnicas de soldadura empleadas fueron de arco sumergido y de hilo tubular con protección gaseosa, conformando unidades de montaje a colocar individualmente en obra con un peso máximo por pieza de 28.000 kg. Se efectuó una prueba de "montaje en blanco" de cada viga en el taller y una vez verificadas las piezas y la geometría ensamblada, se prosiguió con el envío a la obra de las unidades que la secuencia de montaje indicaba (figuras 18 y 19).

El montaje se efectuó con grúas móviles desde planta baja, controlando topográficamente con estaciones totales en varios puntos de la pieza su correcta ubicación en relación a la geometría final especificada en los planos del proyecto. Finalizado el montaje de las vigas, y una vez ejecutadas las diez primeras plantas, se procedió al tesado parcial de las diagonales exteriores. El tesado total se efectuó en cuatro fases distribuidas cada diez plantas aproximadamente. Estas fases de tesado permitieron el montaje de la fachada sin ningún problema añadido.

4.6. Hormigonado del Cinturón de Rigidez

Este importante y singular elemento resistente se ubicaba a los dos tercios de la altura de la Torre. En todos los sentidos suponía un obstáculo en la progresiva marcha "hacia arriba" del edificio. Su alta densidad de armadura tanto en losas como en pantallas (y tanto activa como pasiva), su hormigón HA-80, y demás singularidades, supusieron un reto añadido que hubo de superarse. Se tomó la decisión de no desmontar el encofrado autotrepante del núcleo central, y con este supuesto (que al final resultó un gran acierto en el ritmo de ejecución) se estudiaron y definieron todos los detalles de



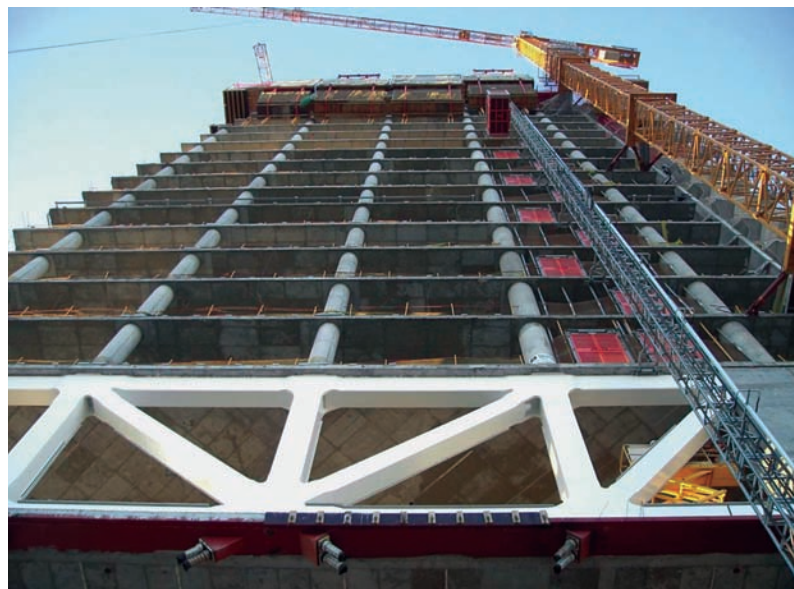
armado (y sobre todo empalmes de armadura) mediante numerosos manguitos de rosca (figura 20).

4.7. Construcción del aparcamiento

Toda la estructura del aparcamiento (40.000 m²), como ya se señaló, es prefabricada y fue fabricada y montada por Pacadar. Los pilares, de 17.00 m de altura, se colocaron de una sola pieza, anclados a la losa de cimentación o a las zapatas, mediante vainas dispuestas en las mismas de 0,95 m de profundidad, rellenas con un grout autonivelante (figura 21).

4.8. Control

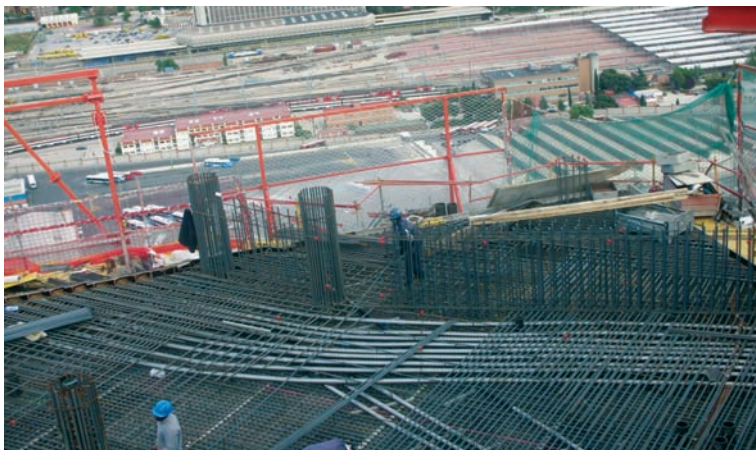
Durante la ejecución de la Torre, lógicamente se hicieron numerosos ensayos de prueba y control.



Izquierda, fig. 18.
Vigas cargaderas.
A la derecha, fig. 19.
Pretensadas vigas
cargaderas.

En la losa de cimentación, además de las pruebas de rozamiento, se controló la evolución de la temperatura del hormigón y se midieron las deformaciones por tesado. Se hizo un control topográfico de montaje y seguimiento en el tiempo de las vigas cargaderas, antes y después de las fases de tesado. Se controlaron topográficamente los asentamientos de la Torre, acortamientos diferenciales entre pilares y núcleos, evolución en el tiempo de las flechas de los forjados. Se efectuaron numerosos ensayos específicos de arrancamiento para barras ancladas con grout y resina y pruebas para empalmes mecánicos con manguitos. En general, todo era probado una y otra vez hasta estar en primer lugar seguros de su buen posterior comportamiento, y buscando también la más fácil y rápida forma de montaje.

Izquierda, fig. 20.
Ferralla planta de
cinturón de rigidez.
A la derecha, fig.
21. Pilares de
aparcamiento.



5. Hormigones

Durante el proceso constructivo no hemos hablado explícitamente del hormigón, porque pensamos que en este caso, este material, exige un apartado propio y exclusivo. El hormigón, sobre todo en su forma de HORMIGÓN ARMADO, se ha erigido en el actor principal entre los materiales de construcción desde hace ya muchas muchas décadas. Si se le perdona su a veces “exceso de peso” y se prevén correctamente sus deformaciones diferidas, se convierte en el material idóneo para un ingeniero en la mayoría de los casos. El empleo del acero activo, elimina sus pocos inconvenientes y termina de convertirle en el casi “material ideal”.

Torre Espacio se concibió desde su origen, por expreso deseo de su propietario y promotor Don Juan Miguel Villar Mir, como “un edificio de estructura de hormigón”; hormigón armado, hormigón pretensado y sobre todo hormigón de alta resistencia. Con este deseo, que situaba a la estructura de Torre Espacio en sintonía con las últimas tendencias mundiales imperantes en el diseño de “Edificios en Altura”, su promotor mostraba además su espíritu de ingeniero y constructor.

La estructura del edificio Torre Espacio está pues básicamente conformada por hormigón y acero, al igual que la gran mayoría de los grandes edificios en el mundo. Dichos materiales se encuentran en todos los elementos estructurales de la Torre, pero su aporte resistente varía según el tipo y características funcionales de cada componente; es así como están presentes en forma de *hormigón armado*, *hormigón pretensado*, *hormigón postensado*, *acero estructural*, *acero estructural postensado* y en *elementos mixtos* como combinación de acero estructural y hormigón armado.

Los requisitos del proyecto estructural especificaban hormigón de alta resistencia HA-70 en los núcleos y la mayor parte de los pilares de las primeras plantas, así como en el cinturón de rigidez. Dichos hormigones se diseñaron especialmente para la Torre, con una reserva de capacidad adicional de 10 MPa (HA-80) en función de los condicionantes de producción del fabricante y de las necesidades constructivas de la obra, que en el caso del cinturón, implicaron medios de producción, materiales y técnicas de diseño singulares, con el objeto de realizar su colocación mediante bombeo con las máximas garantías.

Todos los hormigones fueron fabricados en central para después transportarlos y bombearlos en la Torre. Especial atención se prestó al bombeo del hormigón de

Material	Kg/m ³	Porcentaje
Cemento I/52,5R Lafarge Cementos - Fca. Villaluenga	577	C
Microsilíce Ferroatlántica	28.85	5.0% C
Rheomac VMA 350	6.0	1.0% C
Premix COMPOSITES	12.75	2.1% C+A
Aditivo Glenium ACE 325 Degusa	12.12	2.0% C+A
Aditivo Glenium B 255 Degussa	1.212	0.2% C+A
Andesita 6/12	803	50%
Humedad = Coef. De absorción		
Arena silíce 0/4	751	50%
Humedad = Coef. de absorción		
Agua	164	
A/C = 0.27		
Densidad húmeda	2340	
Tiempo de trabajabilidad Temp.amb. < 20 ° C	2.25h	
Tiempo de trabajabilidad emp.amb. > 26° C	1.5 h	

Fig. 22.
Dosificación
hormigón HA- 80.

alta resistencia necesaria para el cinturón de seguridad, a unos 150 m de altura.

Los hormigones que constituyen los elementos bajo rasante se colocaron mayoritariamente con *bombas móviles*, salvo pilares y núcleos de HA-80 hasta la planta 1 (+ 23,60), que se hormigonaron mediante *cubilote-grúa*, aunque en muchas ocasiones este medio también se empleó para hormigonar pilares de HA-30/40 bajo rasante y puntualmente sobre rasante.

Para el hormigonado de la mayor parte de los elementos sobre rasante se utilizó una bomba estática SCHWING BP 5000 20R, con la cual llegó a bombearse el hormigón de alta resistencia HA-80 al Cinturón de Rigidez con cota máxima de tubería a 160m de altura, y hormigón HA-30 hasta la coronación del edificio.

Se hicieron numerosos ensayos de bombeo en obra, y con la ayuda inestimable de Gebomsa, el hormigonado se efectuó sin ninguna incidencia.

En el cuadro de la figura 22 detallamos las dosificaciones empleadas en la fabricación del hormigón HA-80.

6. Fachadas e instalaciones

6.1. Generalidades funcionales

Por motivos lógicos, que obedecen al ámbito en el que se ubica la Revista de Obras Públicas del Colegio de Ingenieros de Caminos, la atención preferente de este artículo ha estado centrada en la estructura de Torre Espacio y su construcción. Es obvio que no se regatea admiración y elogios para el diseño y ejecución de

sus complejas y completas instalaciones; no las conozco en profundidad, pero las llevo utilizando (y disfrutando) los ya tres largos años de trabajo en Torre Espacio. Funcionan a la perfección, y ello a pesar del dicho: “a diferencia de las estructuras, las instalaciones tienden a no funcionar”.

Señalemos a continuación algunas de sus características más destacadas.

6.2. Fachadas

El concepto de fachada en Torre Espacio, es una doble piel con persiana de lamas perforadas horizontales que permiten el paso de luz natural, la privacidad de los espacios interiores y la transparencia de la fachada. El proyecto de la misma se basa en la realización de un muro climático activo que permite el aprovechamiento y el ahorro de la energía de radiación. Este muro climático activo, consiste en un muro cortina de doble acristalamiento diseñado con el concepto de fachada activa. El aire interior de retorno circula por el espacio entre el cerramiento exterior y el panel acristalado interior, retornando posteriormente el aire al sistema de ventilación forzada. El aire interior del edificio circula libremente por el interior de la cavidad del doble muro, entrando por aberturas filtrantes a nivel de suelo y saliendo a través de conductos de ventilación en la parte superior. De esa forma el muro cortina ofrece gran flexibilidad modular en el control del ambiente exterior (luz natural, temperatura, humedad, viento y ruidos), para beneficio de los ocupantes del edificio al mismo tiempo que garantiza la conservación de energía.

La fachada fue diseñada por Pei y fabricada por la empresa italiana PERMASTEELISA, especializada en actividades de este tipo. Consta de 7.100 módulos, de 21 modelos diferentes, siendo el más común el rectangular de $4 \times 1,20 \text{ m}^2$ que representa aproximadamente el 60% de los instalados. La piel exterior está compuesta por un doble vidrio con cámara de aire deshidratada, de altas prestaciones sobre todo en lo referente a los factores de radiación solar. La piel interior es un vidrio de seguridad. El peso de cada módulo es de unos 250 kg. El peso total de la fachada, cuya superficie es de 35.789 m^2 , es de 1.864 tn (figura 23).

6.3. Climatización

El sistema de climatización del edificio es de tipo híbrido aire/agua con aire exterior de ventilación y pane-



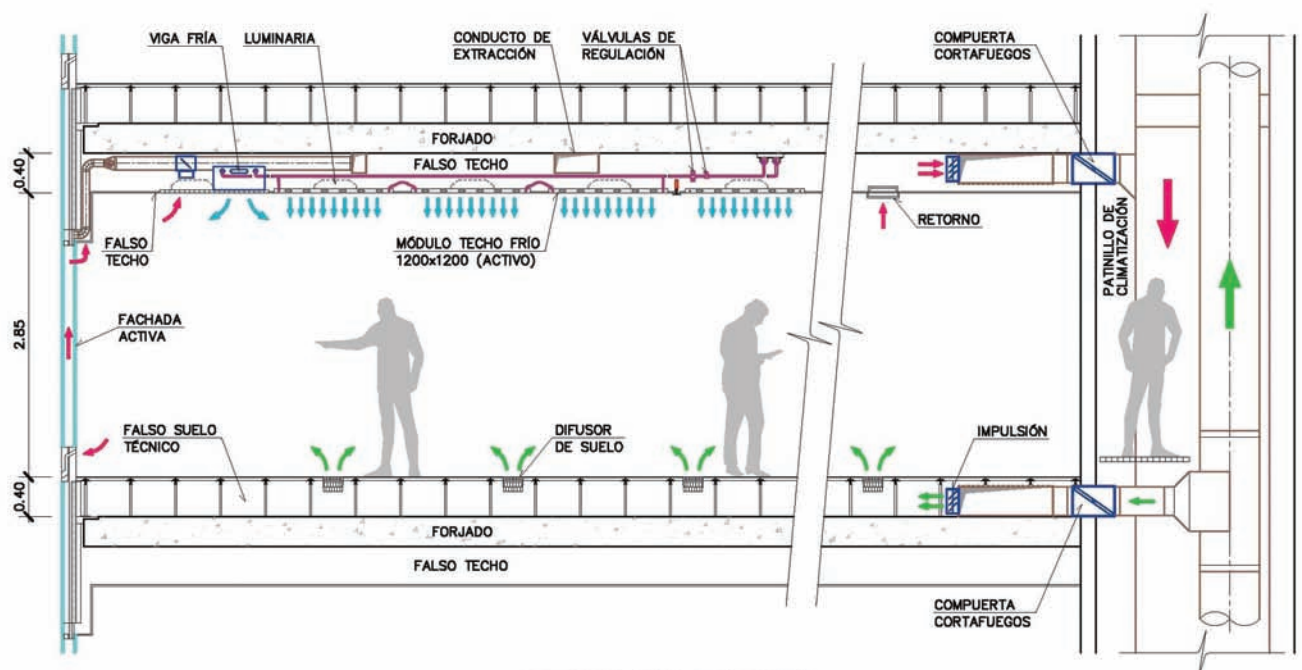
Fig. 23. Fachada de Torre Espacio.

les fríos de techo, el sistema conocido por “Techo frío”. Es un sistema innovador que se aleja de los sistemas convencionales “todo aire” o de terminales tipo “fan coil”, ya que producen ruido, asimetrías y generan un elevado costo de mantenimiento. La calidad ambiental interior es excelente al no existir elementos metálicos locales y teniendo en cuenta además, que la inyección de aire de ventilación desde el falso suelo asegura la completa inundación de la zona ocupada con aire exterior tratado y filtrado (figura 24).

6.4. Ascensores

Torre Espacio cuenta, en sus más de 230 m de altura, con un total de 27 ascensores para el movimiento vertical

Fig. 24.
Esquema de climatización.



SECCIÓN TÍPICA

de personas, dando servicio de acceso a la totalidad de las plantas y sótanos, a través de 7 baterías.

Todos los ascensores son de la marca Schindler 700 y cuentan con el sistema ID. Este sistema reconoce los requisitos exactos de cada pasajero (estos se identifican con una tarjeta que lleva sus detalles programados), los asigna una cabina de ascensor conforme a sus necesidades, y les lleva a su destino lo antes posible. Además, disponen de Schindler E-Visión, un dispositivo que entre otras funciones, mantiene una comunicación constante con las cabinas de cada ascensor y ofrece información actualizada a los pasajeros resolviendo sus dudas sobre el edificio y la ubicación de empresas en cada planta. En caso de parada, cortes de suministro o avería, la comunicación no se interrumpe y mantiene informados a los ocupantes a través de un pequeño monitor de televisión.

La batería baja da servicio desde la planta baja a la 18 (y entre estas) y consta de 6 ascensores con una ca-

pacidad unitaria de 1600 Kg y una velocidad de 2,50 m/sg. La batería media da servicio desde la planta baja hasta las plantas 18 a 33 (y entre ellas). Consta también de 6 ascensores similares, pero su velocidad aumenta a los 5,00 m/seg.

La batería alta, da servicio desde la planta baja hasta las plantas 34 a 52 (y entre éstas). Tiene otros 6 ascensores que funcionan a una velocidad de 7,50 m/seg.

Los ascensores que dan servicio a los seis sótanos, son algo más pequeños y funcionan a una velocidad de 2,00 m/seg.

Completan esta instalación: dos ascensores de emergencia, dos para acceso a entreplantas y un ascensor panorámico.

En su conjunto los ascensores de Torre Espacio sirven a 449 paradas, con una capacidad simultánea de 572 personas y 43.950 Kg de carga, con un recorrido total de 2.995 m. ♦

Referencias:

- (1) MINISTERIO DE LA VIVIENDA (España). *NBE-AE/88. Acciones en la edificación*. Madrid: Ministerio de la Vivienda, 1998.
- (2) MINISTERIO DE FOMENTO (España). *NCSE-02. Norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación*. Madrid: Ministerio de Fomento, 2002.
- (3) ISYUMOV, N. "Motion Perception, Tolerance and Mitigation". *Proceeding 5th World Congress of Council on Tall Buildings & Urban Habitat*. Amsterdam, May 1995.
- (4) MARTINEZ CALZON, J. "Hormigones de alta resistencia en la edificación de gran altura". *Hormigón y acero*, 2008, n° 228-229, p. 5-14.
- (5) BRUGUERA MASANA, J. "Torre Espacio. Proyecto arquitectónico". *Hormigón y acero*, 2008, n° 249, p. 9-17.
- (6) MARTINEZ CALZON, J.; GOMEZ NAVARRO, M. "Torre Espacio. La estructura del edificio". *Hormigón y acero*, 2008, n° 249, p. 19-43.
- (7) AGUIRRE GALLEGO, M. "Torre Espacio. Aspectos constructivos de la ejecución de la estructura". *Hormigón y acero*, 2008, n° 249, p. 45-56.
- (8) ASOCIACIÓN CIENTÍFICO-TÉCNICA DE HORMIGÓN ESTRUCTURAL (ACHE). Grupo de Trabajo GT 3/6. *Construcción de Edificios Altos*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos; ACHE, 2008. 356 p. (Estructuras y edificación; E-13). ISBN: 978-84-380-0387-9.