

La estructura de la Torre del Agua en la Exposición Internacional Zaragoza 2008

Una combinación interesante entre arquitectura y estructura singulares

Water Tower in the International Exhibition Zaragoza 2008

An interesting Combination between outstanding Architecture and Structural Engineering

Miguel Gómez Navarro. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
MC-2, Estudio de Ingeniería, Madrid, España. miguel.gomez@mc2.es
Julio Martínez Calzón. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
MC-2, Estudio de Ingeniería, Madrid, España. mc2@mc2.es

Resumen: Durante el verano de 2008 está teniendo lugar en Zaragoza (España) la Exposición Internacional "Agua y desarrollo sostenible". El edificio central de la muestra es la denominada Torre del Agua, un edificio de 80 m de altura y con una forma en planta que asemeja una gota. La estructura del edificio responde, de un modo muy integrado con el planteamiento arquitectónico de Enrique de Teresa, a las complejas necesidades de un edificio de esta envergadura y que tiene escasos recursos estructurales en su interior. Para ello se combinan una pareja de núcleos portantes de hormigón con una fachada en celosía metálica espacial que encierra el volumen interior fundamentalmente vacío y con una reducida superficie de forjados. El proyecto del edificio tuvo además en cuenta las necesidades de adecuación del edificio tras la Exposición Internacional, que pueden incluir, además de la construcción de varias plantas en su interior, eventualmente su ampliación en altura.

Completa el conjunto una pasarela peatonal en estructura mixta en la que los aditamentos formales con escasa función estructural, facilitan un adecuado encaje con el entorno sin incidir de un modo desmedido en el coste o las complejidades de ejecución.

Palabras Clave: Torre; Estructura mixta; Estructura metálica; Losa de cimentación; Pasarela; Exposición Internacional; Zaragoza 2008; Túnel de viento; EXPOZARAGOZA 2008

Abstract: During summer 2008, the International Exhibition "Water and Sustainable Development" is taking place in Zaragoza (Spain). The central building of the Exhibition is an 80 m high tower called "Torre del Agua" (Water Tower), whose shape in plan is similar to a drop. The structure of the building solves, well integrated with the architectural design by Enrique de Teresa, the demanding requirements a building of this size and with few structural resources inside. Two concrete cores are thus combined with a spatial steel structure that houses the inner volume mainly void and basically without floors or columns. Besides, the project took into account the refurbishment needs of the building once the International Exhibition finishes, that includes, in addition to the construction of several floors, eventually its height enlargement.

A composite structure footbridge has also been built by the Tower, in which the aesthetic additions with few structural functions, enable an appropriate fitting with the surroundings without a significant repercussion on either the cost or the construction complexity.

Keywords: Tower; Composite structure; Steel structure; Foundation mat; Footbridge; International Exhibition; Zaragoza 2008; Wind tunnel; EXPOZARAGOZA 2008

1. Introducción

Entre el 14 de Junio y el 14 de Septiembre está teniendo lugar en Zaragoza una Exposición Internacional con el tema "Agua y desarrollo sostenible". Además de algunos organismos internacionales, cien países y las diversas comunidades autónomas españolas participan en el evento (1,2). El edificio central de la

Exposición es una torre de 80 m de altura denominada "Torre del Agua" a causa de, por un lado el tema de la Exposición, y por otro, de su forma en planta. Esta forma es similar a una gota de agua, lo que da lugar a un edificio singular que se percibe de un modo muy diferente según el punto de vista.

Las muy especiales características arquitectónicas del edificio diseñado por el arquitecto Enrique de Te-

Fig. 1. Vistas generales de la Torre al final de la construcción desde diferentes puntos de vista.





resa (3), se interrelacionan con gran profundidad con los aspectos estructurales y resistentes, diseñados con el propósito de configurar un sistema muy unitario, capaz de alcanzar de manera muy consistente todos los objetivos propuestos, y en la idea de incrementar la excelencia global de la obra que aporta el alcanzar ese plus de organismo bien trabado y que será apreciado de forma subliminal cuando se contemple la Torre. En estas características arquitectónicas ha sido preciso tener en cuenta, desde la fase de concurso, las posteriores modificaciones que se prevén realizar para adaptar la Torre a la situación de utilización post-Expo como espacio cultural o representativo. En consecuencia, se previó ocupar parte del vacío interior que es necesario para el desarrollo del pabellón con nuevas plantas y salas de actos con alturas libres habituales.

El planteamiento estructural se integró con la propuesta arquitectónica desde el inicio práctico de la concepción de ésta para el concurso de ideas, lo cual permitió aprovechar y valorar todas las características

específicas de dicha arquitectura e incidir en los posibles aspectos que -sin perturbar el concepto y funcionalidades previstos para el edificio- podrían ser incorporados desde el punto de vista resistente, para favorecer la respuesta del conjunto frente a las sollicitaciones verticales y de viento, así como los aspectos constructivos, de gran importancia en las obras singulares (4).

2. Configuración del edificio

El edificio consta de dos zonas bien diferenciadas por su extensión, aspecto externo y configuración interior y funcional.

Las plantas situadas por debajo de la cota 207,80 (zócalo), ocupan la totalidad de la parcela de forma trapezoidal y se sitúan parcialmente bajo rasante. Las edificaciones circundantes se sitúan a diferentes cotas ya que se combinan los siguientes elementos (Figura 2):

Fig. 2. Vista aérea durante la construcción en la que se observa la interacción de la Torre con el canal de aguas bravas, el vial de ronda y el Palacio de Congresos.

- Una plaza a la cota 197,80 en la conexión con las zonas de aparcamiento norte
- Una zona sur situada a la cota 201,00 que sirve como conexión con el Pabellón Puente y plaza central de la Exposición
- La zona de acceso y desembarco al canal de aguas bravas, cuya lámina de agua está a la cota 194,00 y cuyo fondo a la 191,00.
- El estanque del canal de aguas bravas, con la lámina de agua situada a la cota 200,00 y el fondo a la 199,00.

Entre la cota 194,50 y la 207,80 se sitúan la solera y tres plantas del edificio. En los dos niveles inferiores se ubican el aparcamiento, las instalaciones y el acceso al canal de aguas bravas, mientras que los dos superiores albergan las zonas de acceso al pabellón y las plazas que lo comunican con el recinto de la Exposición (Figura 3).

Entre las cotas 207,80 y 275,30 se ubica la torre propiamente dicha, fácilmente distinguible por su forma en planta, y en la que se desarrolla el programa expositivo. Los dos elementos fundamentales que definen la morfología del edificio son:

- El espacio vacío interior en el que se sitúan los espacios expositivos separados por una plataforma ubicada entre las cotas +221,95 y +224,65
- El conjunto formado por las rampas interiores y los parasoles exteriores que, en la forma de dos helicoides, acompañan a la fachada y marcan el ritmo de las plataformas y plantas del edificio

Por encima de la cota 266,65 se ubican las zonas de cafetería con sus correspondientes cocinas, así como la parte de las instalaciones ubicadas en la coronación del edificio.

2. Cimentación

El edificio se cimenta mediante una losa de canto 1,5 m que ocupa toda la superficie del zócalo y que se apoya en un estrato de gravas situado a escasa profundidad (cota +192,00). Las armaduras pasivas dispuestas en la losa permiten resistir los esfuerzos de flexión y de punzonamiento que son necesarios para transmitir al terreno del modo más uniforme posible las cargas ejercidas por los soportes y

que son especialmente importantes en la zona central del edificio correspondiente a la torre. Los estudios geotécnicos que se realizaron en su momento permitieron validar esta solución que origina unas tensiones medias sobre el terreno de 100 KN/m², con picos máximos de 196 KN/m² y un asiento medio de 4 cm.

3. Zócalo

Los dos niveles inferiores, situados a las cotas 197,75 y 201,30, se resuelven mediante losas macizas de hormigón armado de carácter convencional apoyadas en una trama bastante regular de soportes circulares de hormigón armado con interejos 9,28 x 5,19 m².

Entre las plantas situadas a las cotas 201,30 y 207,55 se ubica el gran espacio de acceso al Pabellón. Con el fin de crear un espacio apropiado a esta función, se han diseñado unos soportes tronco-cónicos ejecutados en hormigón blanco que en algunos casos necesita ser de calidad HA-60.

El forjado que remata el zócalo a la cota 207,55 reproduce con un óculo en su parte central el gran espacio vacío que recorre la torre, facilitando la comprensión del edificio y permitiendo la ubicación de las escaleras y ascensores de acceso al mismo. En el perímetro del hueco, aunque ligeramente retranqueado, se materializa el apoyo de la estructura de la fachada que se describe más adelante, siguiendo por tanto una línea no directamente vinculada a la trama de soportes principales del zócalo. Este hecho, junto con los elevados valores de las cargas transmitidas por la torre, hace necesaria la ejecución de un forjado singular, que se resuelve como una losa de hormigón armado nervada con una malla triangular adaptada a la geometría de la parcela. Los nervios tienen un ancho de 0,25 m y un canto de 0,90 m, mientras que la losa superior tiene un espesor 0,25 m. No obstante, en las zonas más próximas al óculo y por tanto afectadas por la transmisión de las potentes cargas de la fachada, el canto de la losa aumenta hasta 0,70 m, disminuyendo por tanto la profundidad de los aligeramientos triangulares y el canto aparente de los nervios. De este modo se potencia el trabajo multidireccional de la losa con una mayor capacidad frente a flexiones negativas y cargas de punzonamiento, te-

Distribución de usos en la Torre

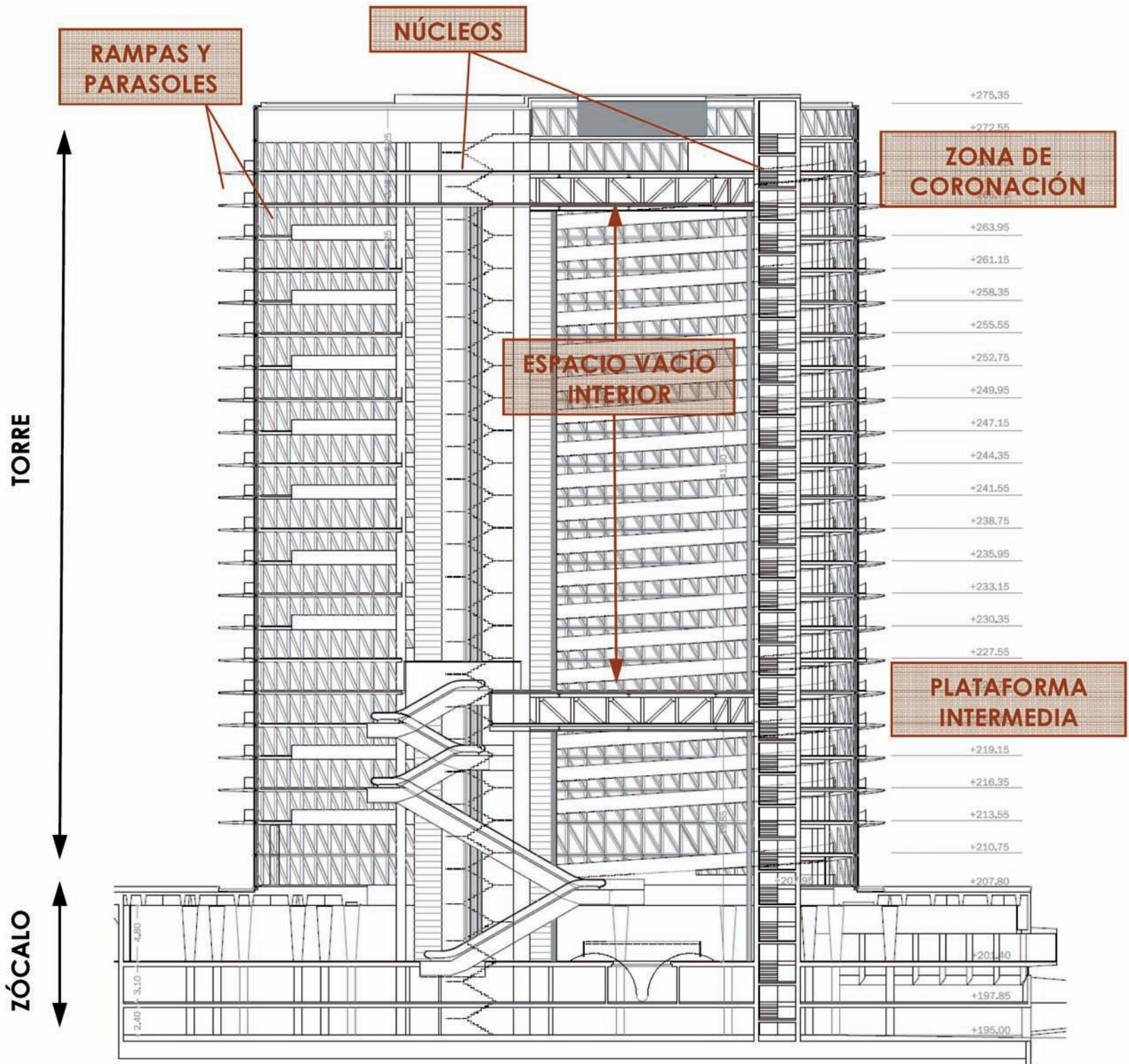


Fig. 3. Distribución de usos en la Torre.

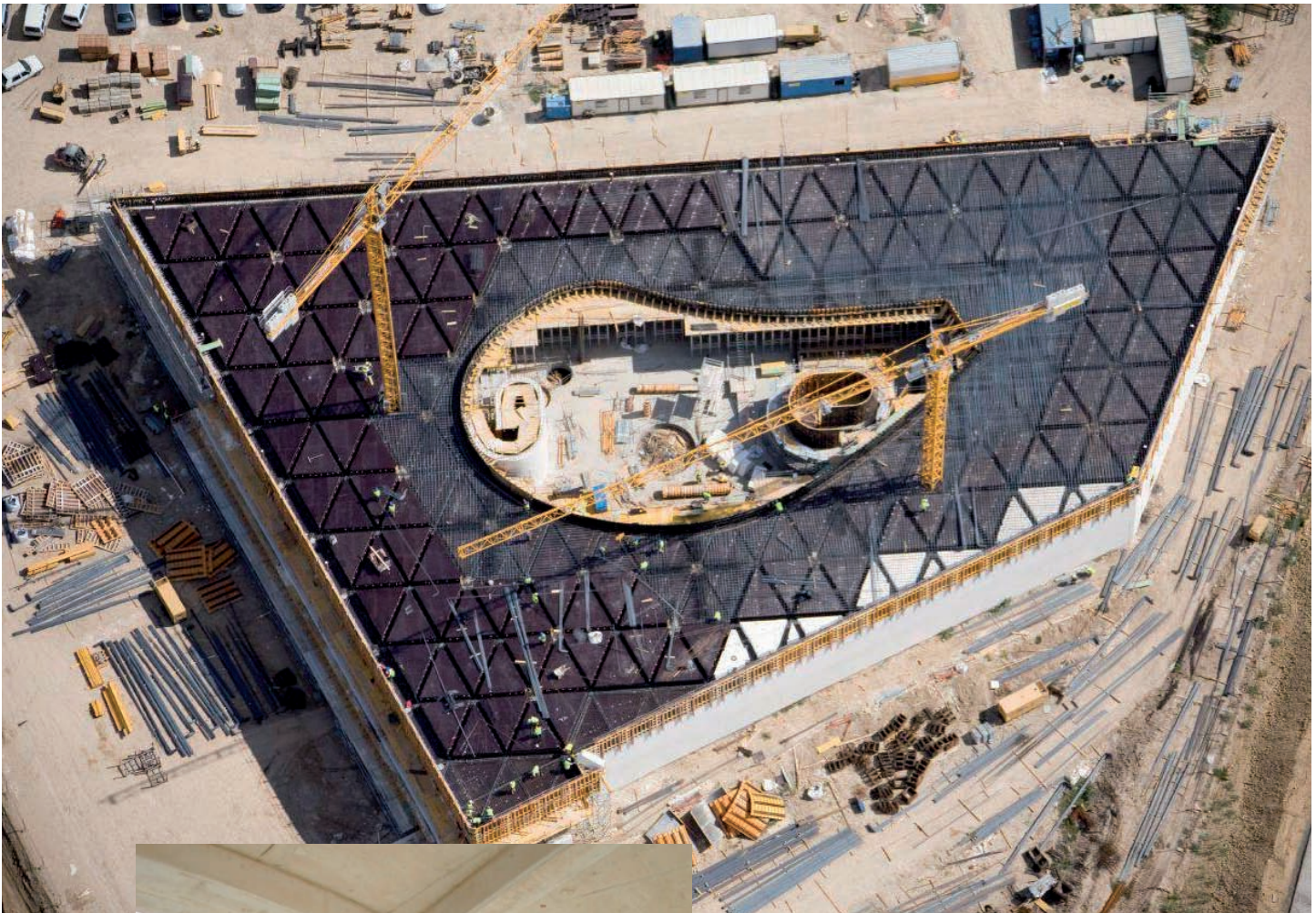


Fig. 4. Vista aérea general del forjado nervado durante su ejecución y detalle de los soportes y el remate del óculo.



niendo menor incidencia la colaboración de los nervios en esta zona (Figura 4).

Recorriendo el borde del hueco central se dispone una viga de 1,65 m de canto total que mejora la rigidez del conjunto y facilita la transmisión de las cargas entre la fachada y los soportes principales.

4. Configuración estructural de la torre

Estructuralmente hablando, la torre combina diferentes sistemas en función de las posibilidades determinadas por las formas arquitectónicas y la funcionalidad de los espacios. Básicamente, como se ha dicho la mayor parte del edificio consiste en un gran volumen vacío interior en el que se desarrolla el contenido del Pabellón temático. En consecuencia, la estructura se localiza fundamentalmente en la fachada, que debe resistir tanto las cargas verticales

CUADRO DE ZUNCHOS EN ZONAS DE LOSA MACIZA

NIVEL	ZUNCHO	DIMENSIONES	ARMADURA
Z-23-1	30x25	A	
Z-23-2	30x25	D	
Z-23-3	30x25	A	
Z-23-4	30x25	A	
Z-23-5	30x25	A	
Z-23-6	30x25	A	
Z-23-7	30x25	C	
Z-23-8	30x25	A	
Z-23-9	30x25	A	
Z-23-10	30x25	A	
Z-23-11	30x25	C	
Z-23-12	30x25	A	
Z-23-13	30x25	D	
Z-23-14	30x25	A	
Z-23-15	30x25	A	
Z-23-16	30x25	D	
Z-23-17	30x25	D	
Z-23-18	30x25	A	
Z-23-19	30x25	B	
Z-23-20	30x45	(9)	
Z-23-21	30x25	B	

CUADRO DE VIGAS METALICAS Y SOPORTES DE CONEXION CON RAMPA

NIVEL	TIPO	CONTRAFLECHA DE EJECUCION
VR-23-A	ARMADA	-
VR-23-B	ARMADA	1 cm
VR-23-E	ARMADA	1 cm
VR-23-G	-	-
VR-23-H	180,60,3	-
SM-23-J	100,40,4	-

- VIGUETAS CONTINUAS
- VIGUETA TANGENTE AL BORDE DE FORJADO. VER EN PLANOS DE ARQUITECTURA EL REPLANTEO PRECISO DEL BORDE DEL MISMO.
- LA UNION DE LOS CORDONES INFERIORES DE LA CELOSIA AL NUCLEO SE REALIZARA DE FORMA ANALOGA A LA DE LA VIGA VX-37
- LA UNION DE LAS VIGAS DE RAMPA TIPO G AL NUCLEO SE REALIZARA DE FORMA ANALOGA A LA DE LA VIGA VX-37
- EN EL TRAMO EN EL QUE SE INTERROMPE EL APOYO ESTRUCTURAL DE LA CHAPA PLEGADA EN EL NUCLEO DEBIDO AL HUECO PARA APOYO DE LA CELOSIA SE APOYARA LA CHAPA PLEGADA EN EL CORDON SUPERIOR DE CELOSIA
- LOS PERNOS SERAN Ø19 h=125mm
- SALVO JUSTIFICACION CONTRARIA EL VOLADIZO DEBERA ESTAR APUNTALADO DURANTE EL HORMIGONADO
- EN LA ZONA ADYACENTE DEL NUCLEO 2 SE PODRA SUSTITUIR LA DISPOSICION ESTRUCTURAL INDICADA EN EL PLANO POR LA PROPUESTA DE MODIFICACION VALIDADA EN LA NOTA TECNICA MC-259_nt_0703_4
- VER DETALLE DE APOYO DE VIGA VX-42 EN FORJADO DE HORMIGON ARMADO Y DEFINICION DEL ZUNCHO Z-23-20 EN PLANO E.16.40.

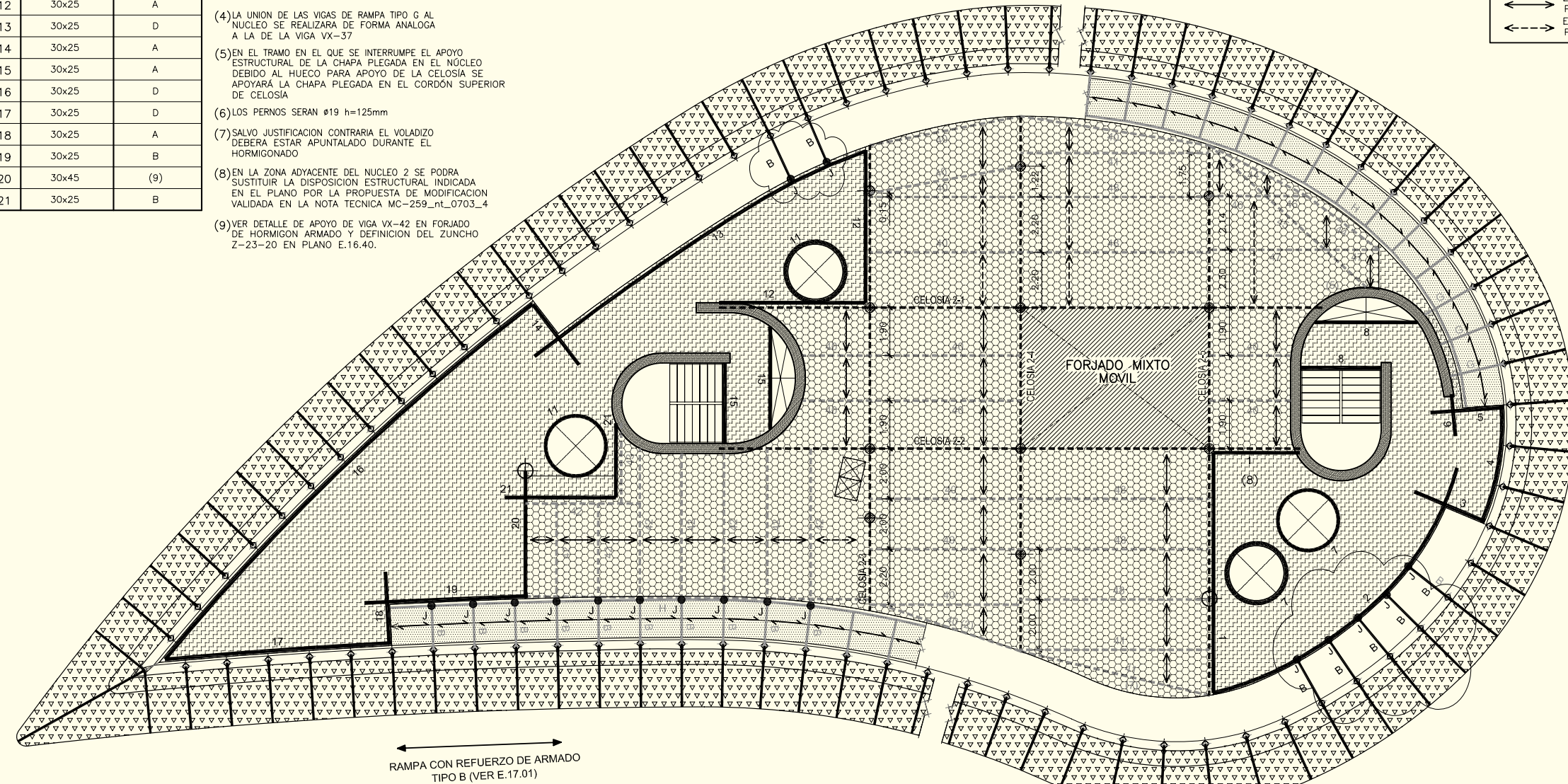
CUADRO DE VIGAS MIXTAS

NIVEL	TIPO	PERFIL	Nº PERNOS p.m.l.	Qd (kN)
VX-40	MIXTA	IPE 270	5Ø19	130
VX-41	MIXTA	IPE 300	5Ø19	160
VX-42	MIXTA	IPE 270	5Ø19	130
VX-43	MIXTA	IPE 220	5Ø19	100
VX-44	MIXTA	IPE 220	-	100
VX-45	MIXTA	HEB 320	2x5Ø19	250
VX-46 (1)	MIXTA	IPE 270	5Ø19	200
VX-47 (1)	MIXTA	IPE 270	5Ø19	400
VX-48	MIXTA	IPE 330	5Ø19	160

NOTAS:

- VER DEFINICION DE VIGAS DE RAMPA (VR) EN PLANOS E.17.01
- SALVO INDICACION CONTRARIA. VER DEFINICION DE MATERIALES, RECUBRIMIENTOS, LONGITUDES DE ANCLAJE Y SOLAPO, EN PLANO E.12.01
- EL VALOR DEFINIDO PARA LA CONTRAFLECHA CORRESPONDE AL EXTREMO DEL VOLADIZO
- VER DEFINICION DE FORJADO DE RAMPA MIXTO SOBRE CHAPA COLABORANTE EN PLANO E.17.01
- POR SIMPLICIDAD EN LA DEFINICION DE LOS ELEMENTOS METALICOS, SE HAN OMITIDO LAS LETRAS QUE INDICAN EL TIPO DE ELEMENTO DEL QUE SE TRATA Y LA PLANTA EN LA QUE SE SITUA, INCLUYENDO UNICAMENTE EL NUMERO QUE LO IDENTIFICA
- LOS TIPOS DE ZUNCHOS Z SE REPRESENTAN EN LAS TABLAS ADJUNTAS MEDIANTE SUS DIMENSIONES EN cm. (ANCHO x ALTO) Y UN CODIGO QUE DETERMINA EL TIPO DE ARMADURA
- EN TODOS LOS BORDES DE FORJADO Y HUECOS QUE NO SE INDIQUE NADA SE COLOCARA UN ZUNCHO DE DIMENSIONES 30x25 cm CON ARMADURA SUPERIOR E INFERIOR DE 3Ø12 Y CERCOS Ø8/0,20
- VER DETALLE DE TRANSICION ENTRE FORJADO Y RAMPA EN PLANO E.16.38
- LAS DIMENSIONES DE LAS VIGAS SE INDICAN EN LAS TABLAS ADJUNTAS ANCHO X DESDUEJE (COTAS EN cm) Y UNA LETRA QUE INDICA SI LA VIGA ES PERALTADA (p) O DESCOLGADA (d).
- VER DEFINICION DETALLADA DE CELOSIAS MIXTAS EN PLANOS E.18
- LA LONGITUD DE ANCLAJE DE LOS ZUNCHOS A PARTIR DE LOS BORDES DE LOS HUECOS, SE DEFINE EN EL PLANO E.12.01
- POR SIMPLICIDAD EN LA DEFINICION DE ZUNCHOS, EN LOS PLANOS SE HAN OMITIDO LAS LETRAS QUE INDICAN QUE SE TRATA DE UN ZUNCHO Y LA PLANTA EN LA QUE SE SITUA, INCLUYENDO UNICAMENTE EL NUMERO QUE LO IDENTIFICA
- VER DEFINICION DETALLADA DE TIPOS DE ZUNCHOS EN ZONAS DE LOSA MACIZA EN PLANO E.12.04
- VER DETALLE DE APOYO DE FORJADO EN FACHADA EN PLANO E.16.38
- LAS ARMADURAS DE LOS ZUNCHOS SE ANCLARAN CONVENIENTEMENTE EN LOS NUCLEOS
- VER DETALLE DE APOYO DE FORJADO EN RAMPA EN PLANO E.16.37

ESPEJOR DE CHAPA PLEGADA:
 ← ESPEJOR DE CHAPA PLEGADA 0,75mm.
 ←→ ESPEJOR DE CHAPA PLEGADA 1,00mm.



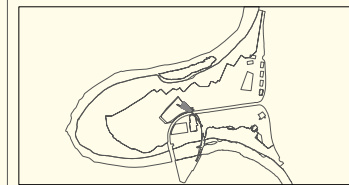
- NOTAS:
- TODAS LAS VIGUETAS SE CONSIDERARAN ARTICULADAS EN LOS EXTREMOS A EXCEPCION DE ALGUNAS INDICADAS EXPRESAMENTE.
 - VER DETALLE DE APOYO DE VIGAS VX EN NUCLEO EN PLANO E.16.38
 - EL APOYO DE LA CHAPA PLEGADA EN EL NUCLEO SE PODRA REALIZAR MEDIANTE TRAMOS RECTOS QUE SE ADAPTEN A LA FORMA DEL NUCLEO.
 - TODAS LAS VIGAS VX TIENEN SU CARA SUPERIOR EN EL MISMO PLANO QUE LA CARA SUPERIOR DE LOS PERFILES DE LAS CELOSIAS.

NOTA:
 LA POSICION DE LAS VIGAS MIXTAS QUE DEFINEN EL CONTORNO DEL FORJADO DE CHAPA PLEGADA VIENE DADA POR EL RIGIDIZADOR INTERIOR DEL ULTIMO MONTANTE DE LA CELOSIA SOBRE EL QUE SE REALIZARA LA UNION ARTICULADA DE LAS VIGAS VX CON LA CELOSIA DEBENDO ORIENTARSE DICHO RIGIDIZADOR EN LA MISMA DIRECCION QUE EL ALMA DE LA VIGA VX QUE RECIBA.

NOTAS:

- VER DEFINICION DEL REPLANTEO EN PLANOS DE ARQUITECTURA EN CASO DE DIVERGENCIA ENTRE LAS INFORMACIONES RECOGIDAS EN ESTE PLANO Y EL DE ARQUITECTURA, PREVALECE LO RECOGIDO EN ESTE ULTIMO, DEBIENDOSE INFORMAR A LA DIRECCION FACULTATIVA DE LAS DIFERENCIAS OBSERVADAS CON ANTELACION A LA EJECUCION DE LOS ELEMENTOS AFECTADOS.
- ESTRUCTURA METALICA DEL PARASOL
- RAMPAS CON FORJADO MIXTO DE CHAPA PLEGADA TIPO COFRASTRA 40 O SIMILAR (CANTO TOTAL 60+40mm) APOYADO EN VIGAS METALICAS
- LOSA MACIZA DE HORMIGON ARMADO e=0,25 m
- LOSA MACIZA DE HORMIGON ARMADO e=0,30 m
- LOSA MACIZA DE HORMIGON ARMADO e=0,50 m
- LOSA MACIZA DE HORMIGON ARMADO e=0,85 m
- LOSA MACIZA DE HORMIGON ARMADO e=0,70 m
- FORJADO MIXTO DE CHAPA PLEGADA TIPO HARCOL 59 O SIMILAR (CANTO TOTAL 120+50mm) SOBRE CELOSIAS Y VIGAS METALICAS
- SOPORTES QUE NACEN
- SOPORTES QUE ATRAVIESAN LA PLANTA
- SOPORTES QUE MUEREN EN LA PLANTA
- PANTALLAS QUE MUEREN EN LA PLANTA
- PANTALLAS QUE ATRAVIESAN LA PLANTA
- SOPORTES DE FACHADA
- SOPORTES METALICOS DE CONEXION CON RAMPA (SM)
- ZUNCHO DE BORDE (Z)
- VIGA METALICA RAMPA (VR)
- VIGA METALICA PARASOL (VP)
- CELOSIA MIXTA (CX)
- VIGA MIXTA (VX)
- TODOS LOS REFUERZOS DE PUNZONAMIENTO NO ACOTADOS TENDRAN UNA LONGITUD DE 0,75m DESDE EL BORDE DEL PILAR O DE LA PANTALLA.
- LOS REFUERZOS DE PUNZONAMIENTO SE HAN REPRESENTADO POR SU EJE.
- VER DEFINICION DE TIPOS DE REFUERZOS DE PUNZONAMIENTO Y CORTANTE EN PLANO E.12.05
- TODAS LAS VIGAS DE RAMPA (VR) NO INDICADAS SERAN DEL TIPO A
- VER DEFINICION DE VIGAS DE PARASOL (VP) EN PLANOS E.17.02 Y E.17.03

REVISION	DESCRIPCION	SUSTA	SUSTODI
R5	MODIFICACION ARQUITECTURA		
R4	AJUSTES SOPORTES Y ARMA RAMPA		
R3	AJUSTES		
R2	MODIFICACION ARQUITECTURA		



TORRE DEL AGUA

PROYECTO DE EJECUCION COD. PRO: 2202-02-C

PLANTA +269,45 (N23) Nº PLANO
 GEOMETRIA, ESTRUCTURA e.16.28.R5
 METALICA, ZUNCHOS Y REF. DE PUNZONAMIENTO FECH: 17.04.07
 ESCALA: 1/100

REDACTOR: ENRIQUE DE TERESA ARQUITECTOS ASOCIADOS
 COLABORADORES: MC-2 ESTUDIO DE INGENIERIA IGASASOCIADOS

APROBACION REVISADO APROBADO

gravitatorias como las cargas horizontales debidas al viento. Esta estructura es una celosía espacial que sigue la forma de la gota de agua y que está arriostrada por una pareja de rampas helicoidales proyectadas en estructura mixta hormigón-acero. Estas rampas recorren la totalidad de la fachada a lo largo de la altura completa de la torre, creando un paseo que permite disfrutar de la visita de la Torre y ofreciendo un punto de vista excepcional de la Exposición y la ciudad.

La estructura de la fachada se combina igualmente con una pareja de núcleos de hormigón armado cilíndricos, pero con secciones transversales abiertas para permitir el paso hacia el interior en donde se sitúan las escaleras de emergencia. Una pareja de soportes secundarios en hormigón armado completan el conjunto de sistemas estructurales que recogen la totalidad de las cargas verticales y horizontales.

Los dos sistemas estructurales principales (fachada y núcleos) se conectan entre sí por medio de un conjunto de forjados de hormigón armado de 0,25 m de espesor que ocupan únicamente una parte reducida de la superficie en planta de la torre. (Figura 5). Sin embargo, estas reducidas losas, que cumplen la función de descansillos del sistema de rampas, son capaces de garantizar la respuesta combinada de la fachada y los núcleos que es indispensable para resistir las solicitaciones horizontales debidas al viento. El análisis de la colaboración entre estos sistemas estructurales es complejo a causa de varias razones:

- la respuesta variable de la estructura metálica de la fachada en función de la dirección de ataque del viento a causa de su peculiar forma en planta
- la interacción con las losas de conexión fachada-núcleos y las rampas en función de su rigidez
- la flexibilidad de la estructura del zócalo que soporta la fachada y que interactúa con la torre de un modo claramente hiperestático; además, esta interrelación está condicionada por la conexión rígida entre el arranque de los núcleos y la losa de cimentación

Para resolver estas complejas interrelaciones se desarrolló un modelo estructural de elementos finitos global de la torre y la cubierta del zócalo (Figura 6). El principal objetivo de este modelo era evaluar la

distribución de las fuerzas horizontales de viento entre ambos sistemas. Los valores medios de este reparto son los siguientes:

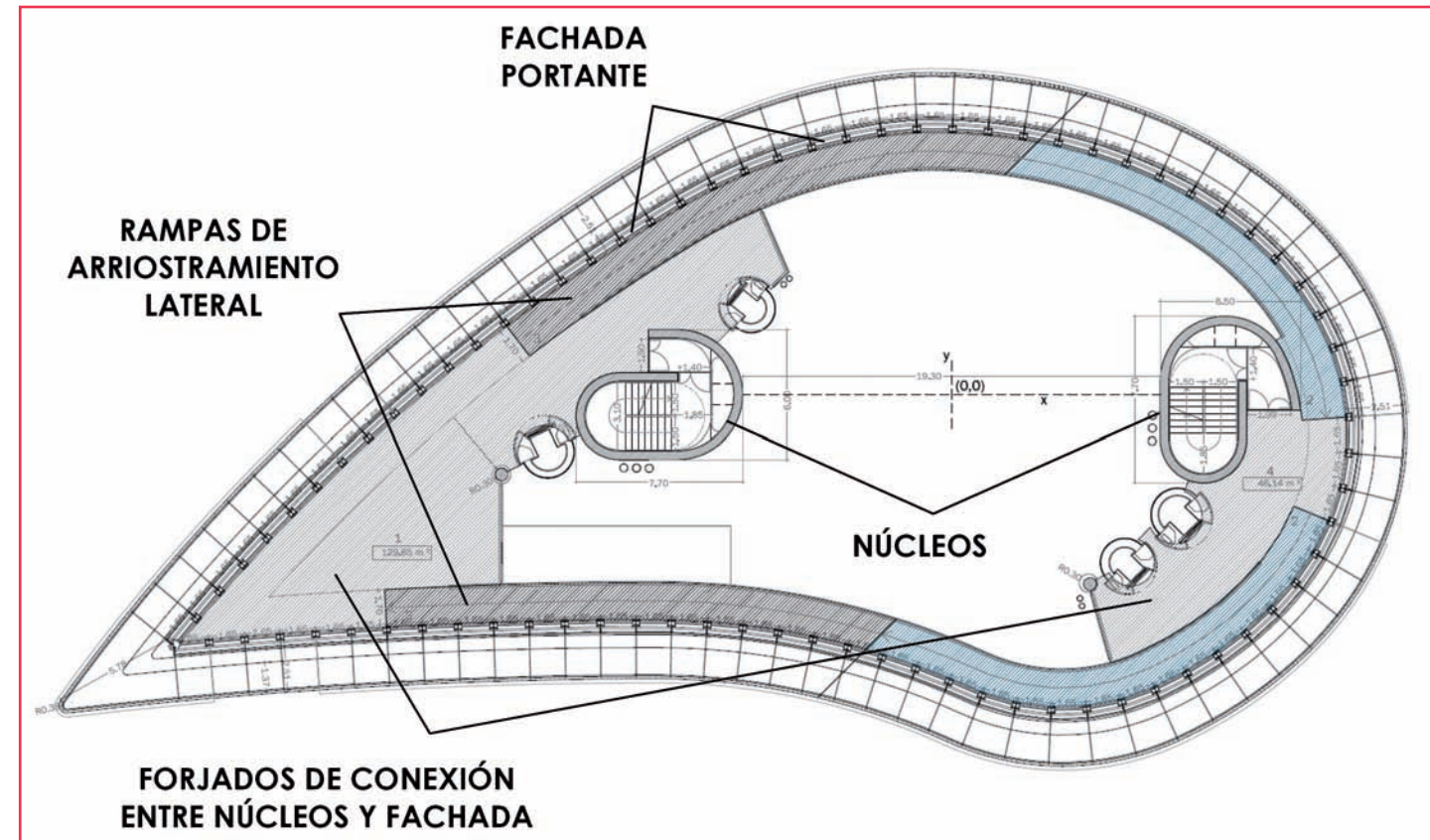
- el 45 % de las fuerzas son resistidas por la fachada
- el 55 % restante son resistidas por los núcleos, que se reparten entre sí las cargas con unos coeficientes de reparto que varían entre 1/3 y 2/3 según el viento sea paralelo u ortogonal a las direcciones de mayor rigidez de los mismos

Se llevó a cabo un estudio aerodinámico en un túnel de viento con consideración de la influencia de la capa límite en la Universidad de Ontario Oriental (*Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, University of Western Ontario*), Canadá. Los resultados de este estudio fueron muy importantes de cara al dimensionamiento de la torre a causa de su inusual forma, cuyo comportamiento no era fácil de prever utilizando la información disponible en la literatura sobre coeficientes eólicos. Además de determinar las aceleraciones en la coronación del edificio que permiten garantizar la comodidad de los usuarios de la misma, este estudio permitió obtener toda la información necesaria para diseñar los elementos secundarios que conectan los paneles de vidrio de la fachada. Igualmente se llevó a cabo un análisis de la influencia de la torre en la comodidad de los peatones en la zona de los accesos a la torre, aspecto de especial relevancia dada la incidencia del cierzo en la capital aragonesa y en particular en el entorno menos protegido de la Exposición.

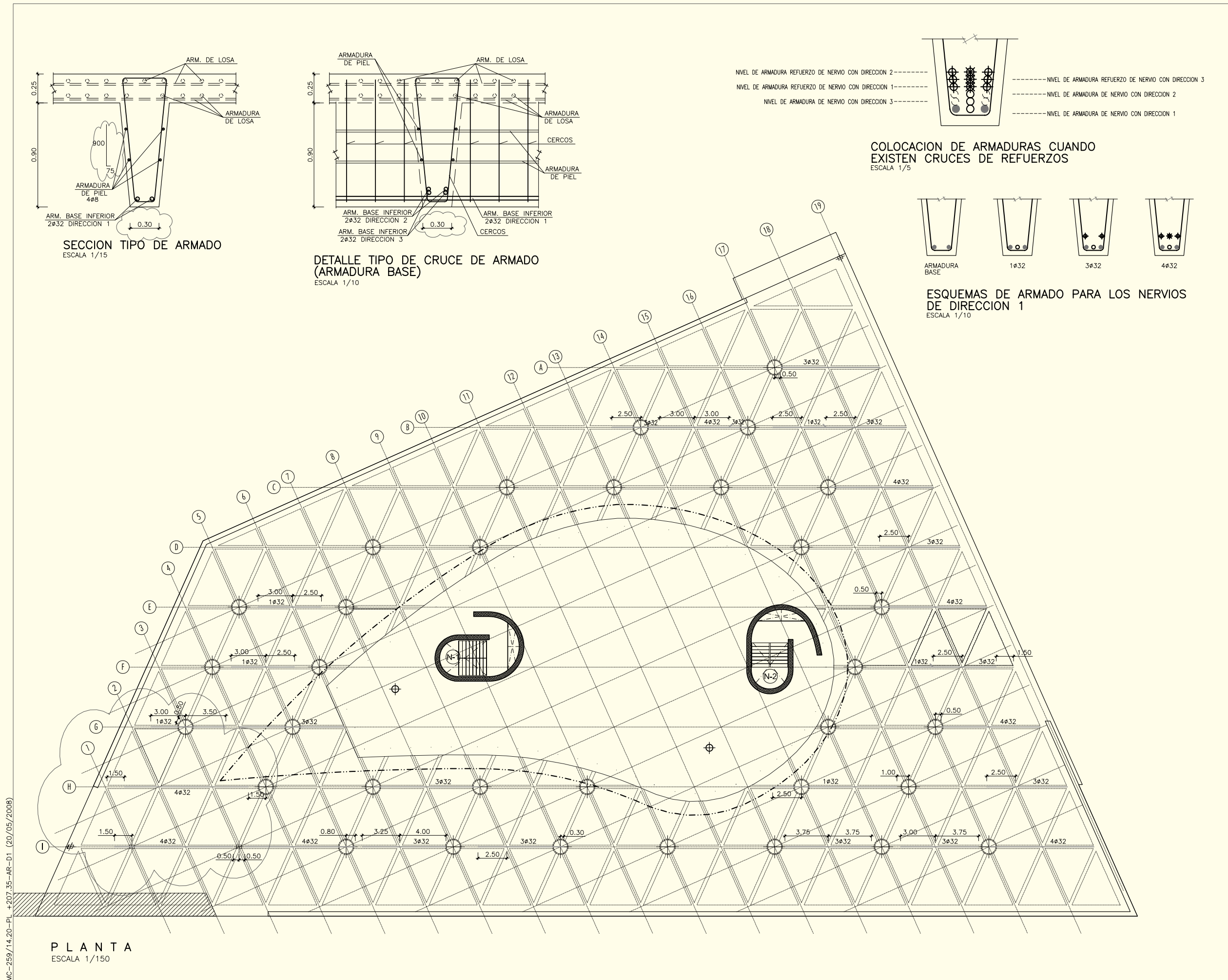
5. Fachada estructural y rampas internas

La estructura de la fachada está formada por una celosía espacial que tiene un esquema geométrico muy claro y regular. La celosía está formada por los siguientes elementos:

- Soportes verticales a 1,65 m de distancia en los vértices de la poligonal inscrita en la gota de agua
- Elementos horizontales que recorren la misma línea poligonal en planos situados cada 2,80 m, que es la distancia vertical entre niveles de planta
- Barras diagonales que, teniendo todas la misma orientación, dan lugar a que se perciban largas líneas inclinadas a lo largo de la fachada de la to-



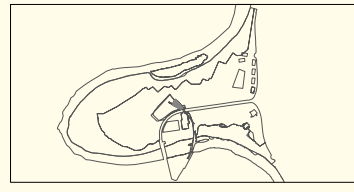
En esta página y en la siguiente (pág. 31): Fig. 5. Esquema en planta con los principales elementos estructurales de la Torre y vistas exteriores e interiores de la fachada y los núcleos durante la construcción, incluyendo las losas de conexión entre ambos.



NOTAS:

- VER DEFINICIÓN DEL REPLANTEO EN PLANOS DE ARQUITECTURA EN CASO DE DIVERGENCIA ENTRE ENTRE LAS INFORMACIONES RECOGIDAS EN ESTE PLANO Y EL DE ARQUITECTURA, PREVALECE LO RECOGIDO EN ESTE ÚLTIMO, DEBIÉNDOSE INFORMAR A LA DIRECCIÓN FACULTATIVA DE LAS DIFERENCIAS OBSERVADAS CON ANTELACION A LA EJECUCIÓN DE LOS ELEMENTOS AFECTADOS.
- SALVO INDICACIÓN CONTRARIA, VER DEFINICIÓN DE MATERIALES RECURRIMIENTOS, LONGITUDES DE ANCLAJE Y SOLAPE, EN PLANO E-12.01
- LAS ZONAS QUE DEFINEN LOS REFUERZOS YA INCLUYEN LOS TRAMOS DE ANCLAJE.
- LA ARMADURA QUE TERMINE EN BORDE DE FORJADO O DE HUECO SE ANCLARA EN EL CANTO DEL FORJADO MEDIANTE LA OPORTUNA PATILLA.
- EL SOLAPE DE LA ARMADURA NUNCA SE REALIZARA EN LOS CRUCES DE LOS NERVIOS.

REVISION	DESCRIPCION	SUSTA	SUSTPOR
R1	REVISION GENERAL		



TORRE DEL AGUA ZÓCALO

PROYECTO DE EJECUCIÓN CODPRO: 2202-02-B

Nº PLANO: **B.14.20.R1**

PLANTA +207.35 (N01)
ZONA EXTERIOR
ARMADURA DE NERVIOS
INFERIOR DIRECCION 1

FECHA: 27.07.08
ESCALA: 1:150

REDACTOR: ENRIQUE DE TERESA ARQUITECTOS ASOCIADOS
COLABORADORES: M.C. ESTUDIO DE INGENIERÍA JGASOCIADOS

APROBACIÓN	REVISADO	APROBADO
------------	----------	----------

MC-259/14.20-PL +207.35-AR-01 (20/05/2008)

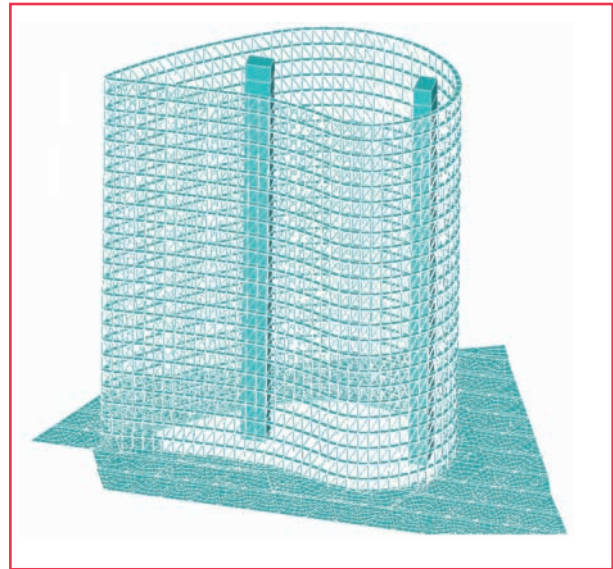


Fig.6. Modelo completo de elementos finitos de la Torre empleado para analizar las interacciones entre los núcleos y la fachada.

re que contribuyen de un modo significativo a su aspecto exterior, creando una sensación de movimiento y ligereza

Como se ha indicado previamente, la estructura de la fachada se ha diseñado teniendo en cuenta que las rampas internas tienen capacidad suficiente para arristrarla y reducir los efectos de la inestabilidad por pandeo. De este modo, la longitud de pandeo se puede reducir hasta los 2,8 m correspondientes al espacio entre rampas, excepto en la base de la torre en la que una de las dos rampas tiene que ser eliminada por razones de funcionalidad de los accesos del edificio. En estas plantas inferiores la longitud de pandeo aumenta por tanto hasta los 5,6 m, habiendo sido necesario reforzar de modo significativo los perfiles metálicos de los soportes para conseguir mantenerlos en las mismas dimensiones externas que el resto a pesar de tener, además de doble longitud de pandeo, las mayores cargas de compresión del edificio (Figura 7).

El forjado mixto de 0,10 m de espesor de las rampas combina por tanto dos funciones estructurales:

- resistir las cargas gravitatorias verticales propias apoyado cada 1,65 m en vigas metálicas en voladizo de canto variable empotradas en la estructura de la fachada
- trabajar como viga plana apoyada en los forjados de hormigón armado de los descansillos, con el fin



Fig. 7. Tramos interiores de la estructura de fachada con doble longitud de pandeo a causa de la eliminación de una de las rampas.



Fig. 8. Apoyo elástico de los forjados de descansillo en la fachada a través de las vigas metálicas de la rampa.

de reducir la longitud de pandeo de los elementos comprimidos de la fachada (barras verticales y diagonales)

- además, estas vigas planas deben transmitir también las cargas de viento desde la fachada a los forjados de hormigón armado de los descansillos, para que de este modo las fuerzas de viento puedan incorporarse al sistema estructural global formado por los núcleos y la fachada
- por último, algunas de las vigas metálicas en voladizo que soportan la rampa son apoyos elásticos para las losas de hormigón armado de los descansillos que, dada su irregular geometría, necesitan completar su sistema básico de apoyos formado por la fachada y los núcleos (Figura 8).



Fig. 9. Aplicación de la protección ignífuga de la fachada y vista final una vez colocado el revestimiento de aluminio.

El modelo global de elementos finitos permitió verificar que la rigidez en su plano de las rampas era suficiente para poder tener en cuenta los efectos de la inestabilidad por pandeo considerando la longitud de pandeo correspondiente a la distancia entre rampas. Para ello se llevaron a cabo cálculos en segundo orden geométrico, incorporándose al modelo las cargas horizontales equivalentes a las deformaciones iniciales.

Las solicitaciones que deben resistir los perfiles de la fachada se pueden dividir en tres tipos:

- fuerzas verticales de origen gravitatorio en los soportes
- axiles de tracción o compresión en todas las barras debidos al efecto global del viento
- fuerzas debidas a los efectos locales del viento
- flexiones locales debidas a los empotramientos de las vigas metálicas que sustentan las rampas

Inicialmente se proyectó una estructura metálica tubular con tubos cuadrados que tuvieran todas las mismas dimensiones externas. Estos tubos, con espesores variables, se colocaban con sus diagonales ortogonales a la fachada para reducir el impacto vi-

sual tanto desde el exterior como desde el interior. Esta orientación también era favorable para conectar la estructura de la fachada con las vigas en voladizo de las rampas descritas más arriba y con las vigas más ligeras que reciben la plataforma exterior utilizada para mantenimiento y protección frente a la incidencia directa de la luz solar. La solución de tubos cuadrados tuvo que ser finalmente abandonada por varias razones:

- La estabilidad al fuego requerida por Departamento de Bomberos del Ayuntamiento de Zaragoza, a pesar de ser un sistema exterior con muy buenas condiciones de ventilación y muy reducida carga de fuego, fue de 180 minutos, lo que implicaba un recubrimiento ignífugo proyectado en lugar de una pintura intumescente clásica. Como consecuencia se perdieron en gran parte los aspectos arquitectónicos de transparencia y ligereza buscados desde el concurso de ideas, ya que además el conjunto perfil más recubrimiento ignífugo se debía recubrir con un cajón de aluminio por razones estéticas y de mantenimiento (Figura 9).
- El plazo de suministro de la gama de tubos necesaria resultaba incompatible con las condiciones de eje-



Fig. 10. Vistas de las celosías principales y de las secundarias en voladizo desde éstas: montaje de la estructura metálica y aspecto final tras la construcción de las losas superior e inferior.

cución; no sólo por el mayor lapso en sí, sino por el ajustado plazo del proceso proyecto-control-concurso de construcción-adjudicación-pedido de materiales-realización, que aunque se separan de lo que son conceptos estructurales, resultan tan decisivos o más que los resistentes en el conjunto de un proyecto estructural sometido a una temporalidad muy estricta como lo han sido todos los vinculados con la Exposición Internacional (5).

- Un coste unitario mayor que aunque no es decisivo, es muy activo al tener esta partida una repercusión muy importante en el coste global.

La solución adoptada perfiles laminados del tipo HEM-HEB-HEA en los soportes, y HEB-HEA-IPE en los montantes y diagonales, ha configurado una disposición muy sistemática y una ejecución de carácter relativa-

mente rápida y sencilla en lo que respecta a su ensamblaje en módulos, y con mayores dificultades –pero análogas a las de la solución en tubo– para el montaje de dichos módulos en altura. Todas las barras tienen sus alas paralelas a la fachada de vidrio, y la mayoría de ellas tienen el mismo calibre (200 mm de canto). Se ha empleado tanto acero S275 JR como S355 J2 G3, y algunos de los soportes de la zona inferior tuvieron que ser reforzados con chapas para evitar el empleo de aceros de mayor calidad.

Durante la redacción del proyecto se llevó a cabo un estudio detallado para tener en cuenta la influencia de la variación continua de la orientación de las barras en el diseño de los detalles de unión en unión. Los elementos verticales son continuos, mientras que, como consecuencia de este estudio, las diagonales y las barras horizontales que les acometen tienen solo sus alas o sus almas soldadas a las barras verticales. Además se limitaron los espesores de garganta a los mínimos estrictos en función de las solicitaciones, aspecto especialmente importante de cara a reducir los tiempos de trabajo en altura de la obra. De un modo general no se consideró el empleo de uniones atornilladas a causa del impacto dimensional que habrían supuesto en una solución ya muy afectada por los condicionantes debidos al comportamiento en situación de incendio.

6. Núcleos de hormigón armado

La estructura de los núcleos es convencional, de hormigón armado, recibiendo las siguientes acciones:

- Las cargas verticales transmitidas por las losas de hormigón de los descansillos
- Las reacciones verticales transmitidas desde las celosías que se emplean para crear las grandes plataformas intermedias que ocupan la totalidad de la superficie en planta y dividen el gran volumen vacío interior
- Las fuerzas horizontales debidas al viento y los momentos flectores asociados a ellas

Las dimensiones exteriores de los núcleos permiten resistir este conjunto de acciones con unas paredes de 0,40 m de espesor ligeramente armadas. Del mismo modo que todas las estructuras de hormigón que quedan vistas, los núcleos se han realizado con hormigón blanco y encofrados de alta calidad.



Fig. 11. Celosías espaciales en voladizo para el apoyo de las escaleras mecánicas.

7. Plataformas intermedias

Dos celosías metálicas de 23,5 m de luz y 2,80 m de canto se apoyan en los núcleos para crear una plataforma localizada a un tercio de altura de la torre que divide el vacío interior. Estas celosías principales se combinan con unas celosías secundarias que se disponen en voladizo desde ellas. De este modo, el conjunto de celosías principales y transversales sólo se apoyan en los núcleos y no tienen conexión estructural con la fachada (Figura 10), permitiendo que las rampas de arriostamiento continúen sin interrupción a lo largo de toda la altura de la torre. Sobre las celosías se apoyan y suspenden una pareja de forjados mixtos de carácter convencional que, conectados con las celosías, mejoran sus condiciones de rigidez y estabilidad frente a pandeo.

En la parte alta de la torre se disponen otro conjunto de celosías similares a las inferiores y que permiten apoyar un grupo de plantas en las que se sitúan la cafetería y parte de las instalaciones. Estas plantas superiores se proyectaron como losas de hormigón armado convencional que aprovechan la posibilidad de disponer soportes apeados en las celosías generando una trama de luces en torno a 7 m.

8. Otros elementos

Entre otros elementos estructurales secundarios de menor importancia que completan la torre, es oportuno destacar como los más interesantes las celosías metálicas que se han proyectado para permitir la disposición de unas escaleras mecánicas de grandes dimensiones. Con el fin de realzar la espectacularidad del espacio interior en los accesos al edificio, estas escaleras se disponen en voladizo en la zona baja de la torre.

En consecuencia, las estructuras propias de las escaleras mecánicas no son suficientes para asegurar su sustentación y ha sido necesario disponer unas celosías espaciales que se conectan dos a dos para transformar el sistema en voladizo en un sistema de biela y tirante compatible con las condiciones estructurales de los forjados que las reciben y que permite garantizar las condiciones de deformabilidad necesarias para el funcionamiento de las escaleras. Con el fin de reducir el canto aparente del conjunto, las escaleras mecánicas se disponen en el interior de la sección transversal en U formada por las celosías laterales y la celosía inferior que las conecta (Figura 11).



Fig.12. Diferentes vistas durante la construcción de la torre, incluyendo las grúas y plataformas empleadas para el montaje de la fachada y las plataformas intermedias, y los encofrados trepantes de los núcleos.



9. Construcción

Las principales etapas de la construcción de la torre han sido las siguientes (Figura 12):

- Ejecución convencional de la estructura de hormigón de la cimentación y las plantas inferiores del zócalo.
- Remate de la construcción del zócalo con el complejo forjado nervado que transfiere las cargas desde la torre hasta la cimentación
- Inicio de la construcción mediante encofrado trepante de los núcleos de hormigón armado
- Montaje de la estructura metálica de la fachada en módulos de grandes dimensiones preparados en taller; en general estos módulos tenían las dimensiones correspondientes a cuatro plantas de altura (11,2 m) y tres soportes verticales (5,6 m)

- Construcción autoportante de los forjados mixtos de las rampas
- Ejecución convencional apeada de los forjados de hormigón que conectan la fachada con los núcleos
- Montaje con grúas de las celosías principales completas que constituyen las plataformas intermedias inferior y superior tras su premontaje en obra; montaje por los mismos medios de las celosías transversales conectadas a ellas y ejecución autoportante de los forjados mixtos
- Construcción convencional de los forjados de hormigón armado de la zona superior apoyados en la plataforma superior

Uno de los aspectos principales de la ejecución de la estructura metálica fue el posicionamiento vertical de los diferentes paneles en los que se dividió para su montaje en obra. Esta maniobra fue especialmente delicada en la zona alta de la torre a causa de no poder disponer de una plataforma horizontal suficientemente próxima en la que anclar los tirantes y los trácteles necesarios para aplomar los módulos antes de su soldeo con los ya ejecutados. A ello se unieron los efectos perniciosos de las variaciones extremas de temperatura entre la noche y el día y la influencia ocasional de las importantes ráfagas de viento.

La construcción de la estructura estuvo a cargo de la UTE OHL-Celsa, con Augescón como subcontratista encargado de la estructura metálica. Los trabajos co-

menzaron en Julio de 2006 y se terminaron en Octubre de 2007, dejando plazo suficiente para las complejas fases restantes que debían estar a tiempo para inauguración de la Exposición en Junio de 2008: fachada, instalaciones, acabados y expografía.

10. Reconversión post-expo de la Torre

Ya se ha indicado que desde el concurso de ideas se planteó la necesidad de tener en cuenta las condiciones de reconversión de la torre en un espacio de oficinas o cultural de carácter más convencional una vez terminada la Exposición. Para ello, todos los elementos estructurales afectados (cimentación, fachada, núcleos, forjado nervado) se sobredimensionaron de modo que se pudieran construir hasta ocho forjados que ocuparan parte del espacio vacío interior. Estos elementos se apoyarían o suspenderían fundamentalmente de las celosías intermedias y tendrían la función de arriostramiento de la fachada si se considerara necesario eliminar la rampa.

En el momento actual se están analizando diversas configuraciones de utilización del edificio que toman como punto de partida este planteamiento general de carácter muy abierto que permite la creación de grandes salas de exposiciones interiores en lugar de zonas oficinas. Así mismo, en la fase final de la construcción se ha planteado la posibilidad de aumentar la altura de la torre para favorecer su carácter icónico en la ciudad. Un análisis preliminar de esta posibilidad de ampliación permite garantizar su viabilidad estructural y constructiva basada en los siguientes principios:

- Minimización de la afección a la estructura de la fachada y al forjado nervado, elementos sin capacidad para recibir mayores solicitaciones
- Empleo de la celosía espacial de la fachada superior como megaestructura que recoge las cargas de los forjados de la ampliación de la torre y las transmite a un emparillado de celosías mixtas que se apoya a su vez en los núcleos. De este modo, se aprovecha de un modo óptimo el carácter espacial del conjunto y se minimiza el consumo de elementos estructurales (6).
- Toda la estructura necesaria para el recrecido se coloca por encima de la existente y es independiente de ella, simplificándose enormemente su construcción.

11. Pasarela

Como elemento complementario de la Torre del Agua necesario para el correcto y adecuado funcionamiento de la Exposición, se ha construido igualmente una pasarela sobre el vial de ronda que conecta la terraza sobre el zócalo de la Torre y la plaza central del área de exposición y sus pabellones principales. Esta pasarela forma parte del recorrido que lleva al visitante desde la entrada norte del recinto –junto al aparcamiento y el parque fluvial– hasta el espacio formado por el edificio de los Pabellones Internacionales, el Palacio de Congresos y la llegada del Pabellón Puente. Este itinerario, que contempla el acceso a la Torre del agua mediante una suave rampa, se continúa por medio de un sistema de escaleras mecánicas, escaleras convencionales y rampas, hasta alcanzar la cota 207,80, nivel del pavimento de la terraza del zócalo, punto de salida, también, del recorrido de la visita a la Torre.

La pasarela, de carácter netamente peatonal, ha sido proyectada por los autores del artículo junto con los arquitectos autores del proyecto de la Torre. La condición peatonal no excluye, sin embargo, la posibilidad del paso ocasional de vehículos, especialmente para el caso de los coches de bomberos y emergencias a los alrededores de la torre.

Los 160,988 m que constituyen la pasarela se pueden dividir en tres zonas claramente diferenciadas:

- El premier vano, comprendido entre el zócalo de la torre y la pila 1. Esta pieza fuertemente asimétrica, ha sido diseñada en hormigón armado y tiene 16,533 m de luz, recibiendo las cinco escaleras mecánicas que conectan los niveles de plaza con el tablero de la pasarela.
- Cinco vanos de 21,513 m de luz comprendidos entre la pila 1 y el estribo que han sido diseñados en estructura mixta y son la parte fundamental de la pasarela.
- El estribo de 36,890 m, ubicado junto al Palacio de Congresos, se ha proyectado en hormigón armado y tiene una geometría singular para facilitar la transición formal entre la plaza y la pasarela en un entorno netamente urbano.

La sección transversal del tramo mixto está formada por un cajón mixto abierto de geometría trapezoidal convencional al que se le añaden diversos elementos que, aunque colaboran en el comportamiento estructural



Fig. 13. Imágenes generales y de detalle de la pasarela de acceso a la Torre sobre el vial de ronda.

Foto: Arcelor Mittal - A. Sagasti.



ral de la pasarela, tienen fundamentalmente un carácter formal de cara a mejorar el aspecto exterior de la misma. Entre ellos destacan una serie de costillas esviadas con un ángulo de $24,09^\circ$ respecto al eje de la pasarela y con un intereje de 1,955 m, salientes respecto a una chapa de carenado que forma el recinto global de la sección del tablero y que se rematan en una

pieza redondeada de grandes dimensiones que configura en gran medida el ritmo y la percepción de la estructura. Este carácter rítmico se relaciona de una manera clara con los parasoles de la Torre reforzando el sentimiento de unidad del conjunto. También con carácter fundamentalmente formal se disponen un par de nervios longitudinales adosados al ala inferior del cajón.

El pavimento del tablero se materializa sobre una losa de hormigón armado que forma parte de la sección mixta global al disponerse la oportuna conexión mediante pernos entre ella y el cajón metálico. El tratamiento continuo del pavimento de hormigón cepillado empleado, hace de las barandillas y los petos los protagonistas de su imagen. Estos se disponen siguiendo la geometría esviada sobre un sistema de soportes plementados con chapa perforada, pintada en blanco como el resto de la estructura metálica (Figura 13).

Teniendo en cuenta la imposibilidad de trabajar en el interior de cajón a causa de sus reducidas dimensiones, se dispone como encofrado perdido una chapa plegada con los nervios paralelos al eje de la pasarela. Esta chapa se apoya en los diafragmas transversales que aseguran la indeformabilidad de la sección y un segundo juego de perfiles transversales intermedios dispuestos para reducir la luz de la chapa y no penalizar su espesor. Los diafragmas transversales permiten asimismo realizar el trabajo necesario para soportar el voladizo transversal de la sección.

Las pilas tienen una sección troncopiramidal de base un paralelogramo de lados paralelos al eje de la pasarela y a las costillas esviadas. La sección mayor se haya en su coronación, disponiéndose por tanto de una amplia superficie para disponer los apoyos de neopreno y de un elevado brazo para recoger las sollicitaciones torsoras. Se han construido en hormigón armado blanco, siendo necesario emplear hormigón HA-40 a causa del reducido tamaño de la sección en el arranque, necesario por motivos funcionales y arquitectónicos.

La construcción de la pasarela ha sido llevada a cabo por la empresa Comsa, siendo Talleres Plain el subcontratista responsable de la ejecución de la estructura metálica.

12. Conclusiones

La estructura de la Torre del Agua constituye un ejemplo afinado de interacción entre estructura y arquitectura singulares, ya que todas las piezas que constituyen el esqueleto estructural están intrínsecamente vinculadas a la funcionalidad arquitectónica del edificio y a su percepción formal. Esto ha sido posible gracias a la estrecha colaboración entre los arquitectos y los estructuristas autores de este artículo, tanto en la fase inicial del concurso, como en el desarrollo del proyecto y en los sucesivos ajustes que ha sido necesario llevar a cabo durante la fase de obra para adaptar lo proyectado a los condicionantes cambiantes del programa de uso y las necesidades constructivas. Se ha conseguido de este modo una estructura que resuelve las complejas exigencias que determina un edificio de una altura considerable y escasos recursos estructurales en su interior, con una solución de coste moderado y condiciones de ejecución que han permitido cumplir los plazos previstos con una holgura razonable.

Junto a esta pieza fundamental, la pasarela de acceso a la Torre se convierte en un elemento con gran presencia urbana que garantiza una transición suave y formalmente ordenada hacia los diversos elementos que confluyen en la plaza principal de la Exposición. Los aditamentos que permiten el diálogo formal de la pasarela con la Torre, permiten, a pesar de su carácter estructuralmente no esencial, mantener el conjunto dentro de costes y dificultades de ejecución fácilmente asumibles para construcciones que, como ésta, tienen una incidencia social y un emplazamiento urbano significativos. ♦

Referencias:

-(1). GISTAU GISTAU, R. "El legado de Expo Zaragoza 2008", Ingeniería y Territorio nº 77, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2007.
-(2). DE LA CAL, P.; PELLICER, F., "Expo Zaragoza 2008. Breve relato de la génesis de un proyecto de ciudad", ZARQUITECTURA, Nº 5-6, Colegio Oficial de Arquitectos de Aragón, 2007.

-(3). DE TERESA TRILLA, E., "Espesor y transparencia de una piel", ZARQUITECTURA, Nº 9-10, Colegio Oficial de Arquitectos de Aragón, 2008.
-(4). MARTÍNEZ CALZÓN, J.; GÓMEZ NAVARRO, M., "Torre del Agua", Ingeniería y Territorio nº 77, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2007.
-(5). SANCHO MARCO, T. A.; BARTOLOMÉ ÁLVAREZ, J., "Ejercicio de integrales dobles. Cómo hacer equipo en multiproyectos para alcanzar un

reto único compartido: abrir la Expo el 14 de junio de 2008", Ingeniería y Territorio nº 77, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2007.
-(6). MARTÍNEZ CALZÓN, J.; APARICIO GARCÍA, J.; BALLESTEROS MOLPECERES, B., "Torre Mare Nostrum- Compejo de edificios para sede de Gas Natural en Barcelona" Actas de CEA 2004, Congreso de la Estructura de Acero, Artecium, 2004.