

Torres Martiricos

Martiricos Towers

Belén Ballesteros Molpeceres^a, Álvaro Serrano Corral^b

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Estudio de Ingeniería (Grupo Tysa). Jefe de Proyectos. belen.ballesteros@mc2.es

^bIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Estudio de Ingeniería (Grupo Tysa). Director Técnico. alvaro.serrano@mc2.es

RESUMEN

El complejo Martiricos se compone de dos torres de 105 metros de altura sobre rasante, constituyendo un emblema para la ciudad de Málaga por su original forma exterior con plantas en forma de “Y” y “T” respectivamente, y su fachada prefabricada de hormigón coloreado. El sistema estructural principal frente a las acciones horizontales predominantes de viento y sismo es de tipo núcleo en ménsula. Frente a cargas gravitatorias, el esquema se completa con una trama de pilares rectangulares y losas macizas de canto estricto. El estudio en profundidad de la tipología estructural ha permitido determinar el coeficiente de comportamiento (q), que reduce el valor de las fuerzas sísmicas al considerar la disipación de energía.

ABSTRACT

The "Martiricos" complex consists of two towers, 105 meters high, which constitute a landmark for the city of Málaga due to their architectural exterior design with "Y" and "T" shaped floor and their prefabricated coloured concrete façade. The main structural system to withstand the predominant horizontal actions of wind and seismic forces is a core-type cantilever scheme. To support gravitational loads, the scheme is completed with a grid of rectangular columns and solid slabs with strict depth. A detailed analysis has been carried out to determine the behaviour factor (q), which reduces the value of the design seismic forces by considering the energy dissipation capacity of the system.

PALABRAS CLAVE: edificio en altura, diseño sísmico, estructura de hormigón.

KEYWORDS: high-rise building, seismic design, concrete structure.

1. Introducción

El complejo Martiricos, enclavado a orillas del río Guadalmedina en el paseo homónimo de Málaga, se compone de dos torres de 105 m de altura sobre rasante y se ha convertido en un nuevo icono para esta ciudad en fuerte desarrollo urbanístico, gracias a la cuidada imagen arquitectónica que le confiere su forma exterior y su fachada de paneles prefabricados de hormigón. El diseño arquitectónico fue desarrollado por Morph Estudio y la construcción estuvo a cargo de Avintia.

La torre denominada como “Y”, debido a su forma en planta, presenta 32 niveles sobre rasante y una superficie de 930 m² por planta,

estando destinada exclusivamente a viviendas en propiedad. Por otro lado, la torre con planta en forma de “T”, con una superficie de 1000 m² por planta, dedica sus primeros 13 niveles a uso hotelero, mientras que el resto se destina a viviendas en alquiler. Ambas torres están dotadas con piscina comunitaria en la planta cubierta y emergen sobre una gran cubierta-plaza ajardinada de 8500 m² y dos niveles de aparcamiento bajo rasante.

Debido a la altura de las torres, el empuje horizontal de las acciones de viento y sismo resulta determinante a la hora de definir el esquema estructural resistente.

A lo largo de este artículo se expondrán los planteamientos adoptados para el encaje del sistema portante vertical formado por núcleos y pilares, además de detallar la metodología seguida para el diseño sísmico según las especificaciones recogidas en el EC-8 de primera generación.

El empuje horizontal de viento, no solamente dimensionante desde un punto de vista resistente, se ha considerado a la hora de comprobar el confort por vibraciones de los

usuarios. Para su análisis se ha llevado a cabo un modelo de simulación numérica del viento mediante Dinámica Computacional de Fluidos (CFD), con el que se han obtenido las cargas estáticas equivalentes de viento ajustadas a la geometría de las torres y su entorno, así como las comprobaciones de confort en las partes altas de las torres y en la plaza. El análisis del viento mediante CFD es objeto específico de otra comunicación de este congreso.



Figura 1. Vista general del complejo

2. Descripción general de la estructura

El diseño estructural de ambas torres queda determinado por su condición de edificación en altura. La predominancia de las acciones de viento y sismo hizo necesario encajar un sistema tipo núcleo dentro de la arquitectura, al que asignar la resistencia frente a acciones horizontales.

De este modo se reduce la contribución de los forjados y los pilares a la resistencia

horizontal del conjunto, y se establece que estos últimos sean elementos fundamentales para la resistencia frente a cargas gravitatorias de peso propio, cargas muertas y sobrecargas de uso.

Dada la altura de la edificación, se busca emplear soluciones lo más ligeras posibles para resolver los numerosos niveles de forjados, y conseguir así una reducción importante en los axiles verticales que solicitan pilares y cimentaciones. Por otro lado, la estricta altura libre disponible entre plantas hizo decantarse por soluciones en losa maciza de canto estricto,

con la que se mejora también la constructividad de un sistema tan repetitivo.

Para resolver el encaje de los soportes en el ajustado programa arquitectónico asociado al uso residencial, especialmente en los niveles inferiores donde la carga vertical solicitante es máxima, se opta por secciones rectangulares con cuantías máximas de armadura pasiva y hormigón de calidad HA-50. Se minimiza el empleo de cálices de hormigonado que complican y retrasan la ejecución, gracias a la disposición de detalles confinados con cercos en el cruce de los soportes con los forjados.



Figura 2. Cercos de confinamiento en soportes

Los criterios estructurales expuestos se aplican y particularizan en la definición de los distintos elementos estructurales que componen el complejo.

2.1. Pódium bajo rasante

Las dos torres se elevan sobre una amplia plaza ajardinada de uso público, que permite el tránsito peatonal entre la calle Martiricos y la orilla del río Guadalmedina. Se trata de una parcela de 50 x 170 m, con una altura total bajo rasante de 10 m, donde se disponen dos sótanos dedicados principalmente a aparcamiento y trasteros.

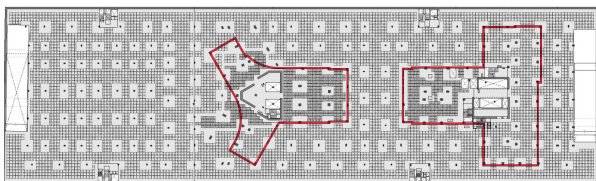


Figura 3. Huella bajo rasante

El nivel de sótano se resuelve con un forjado convencional reticular de 30+5 cm de casetón

recuperable en la zona de aparcamiento y casetón perdido en la zona de trasteros e instalaciones. El nivel ajardinado y de acceso de bomberos de la planta calle se resuelve con un forjado reticular 30+12 cm de casetón recuperable, donde el mayor espesor de la capa de compresión aporta la resistencia necesaria frente a cargas puntuales elevadas.

La contención perimetral se lleva a cabo mediante muros pantalla de 45 cm de espesor y bataches continuos con dos niveles de anclajes provisionales al terreno. La cimentación de los pilares del aparcamiento se resuelve mediante zapatas.



Figura 4. Ejecución bajo rasante

2.2. Torre Y

La torre denominada Y por su forma en planta tiene 100 m de altura soberrrasante distribuidos en un total de 32 plantas. La existencia de terrazas en los áticos de los tres últimos niveles, así como la doble altura del atrio de entrada, genera plantas con reducciones geométricas respecto al esquema tipo.

Las crujeas tipo de 6.5 x 8.0 m se resuelven con losas macizas de 25 cm de espesor,

armadura base inferior $\phi 12/0.2$ m y armadura base superior reducida $\phi 10/0.2$ m, puesto que la existencia de refuerzos de armadura en la zona de negativos sobre los pilares asegura que se cumplan los requisitos normativos de armadura mínima.

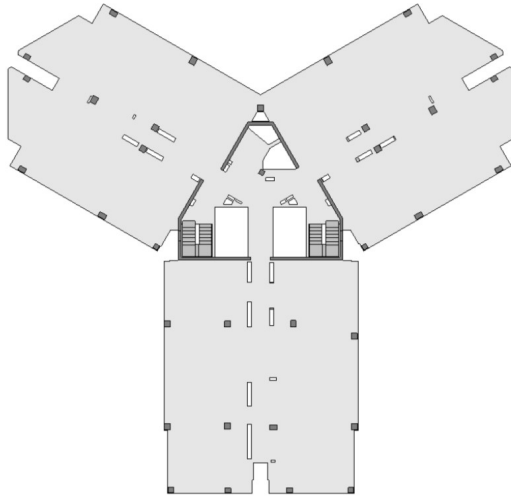


Figura 5. Planta tipo torre Y



Figura 6. Torre Y durante su construcción

2.3. Torre T

Tipológicamente similar a la torre Y, se diferencia fundamentalmente por la forma en T de la planta. Tiene 105 m de altura sobresaliente distribuidos también en un total de 32 plantas.

Las crujías tipo de 6.5×7.0 m se resuelven con losas macizas de 25 cm de espesor y armadura base superior reducida, de la misma manera que en la torre Y.

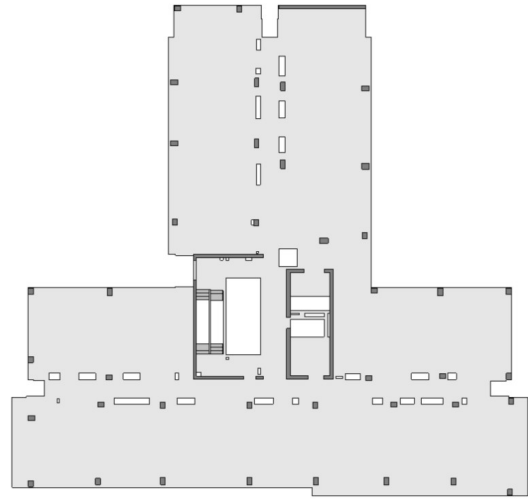


Figura 7. Planta tipo torre T

En las dos torres se utiliza una cimentación profunda con pilotes hincados de 40×40 cm para pilares y núcleos. En el caso de los pilares, los encepados van de 3 pilotes y canto 1.10 m, a encepados de 8 pilotes y 2.20 m de canto.



Figura 8. Encepado de pilares de torres

En el caso de los núcleos, la geometría y distribución de pilotes trata de alinearse con las paredes de los núcleos, utilizando encepados fuertemente armados que tienen 2.20 m de espesor.



Figura 9. Encepado de núcleo torre T

3. Encaje del sistema estructural tipo núcleo

Como ya se ha comentado anteriormente, el esquema estructural fundamental de las torres es de tipo núcleo en ménsula. Se realizó un estudio de alternativas para integrar un sistema de pantallas conectadas que, sin interferir con el programa arquitectónico, proporcionara la rigidez necesaria para un comportamiento adecuado en términos de deformaciones y frecuencias de vibración.

La situación inicial de partida, definida en el proyecto básico de arquitectura, consistía en una distribución de elementos tipo pantallas independientes repartidos en cada planta de las torres. Con el objetivo de definir un sistema tipo núcleo, se plantearon distintas alternativas geométricas para concentrar esas pantallas en la zona central de comunicaciones de cada torre y conectarlas entre sí, logrando así la rigidez suficiente del esquema tipo núcleo en ménsula sin necesidad de considerar el efecto pórtico de la solución del proyecto básico.

Debido a la estricta altura libre entre plantas no fue posible el descuelgue de vigas dintel que hubieran permitido la conexión de los distintos sistemas tipo C de núcleos y un aumento notable de la rigidez del conjunto.

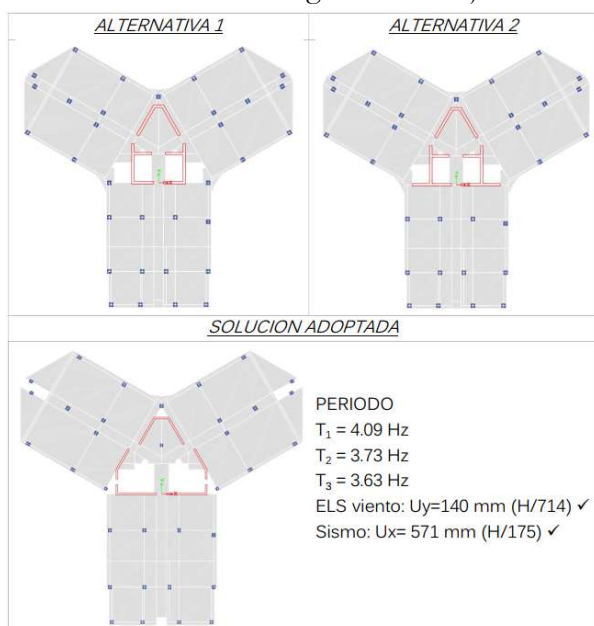


Figura 10. Estudio de alternativas núcleo torre Y

La solución final para el núcleo central de la torre Y consiste en un conjunto de tres sistemas tipo C de pantallas de hormigón armado, no conectadas entre sí por dinteles, de espesores de 50 cm hasta el nivel P02, 35 cm hasta la planta P14 y 25 cm en el resto de la altura. La calidad de hormigón empleado es HA-40 hasta el nivel P05 y HA-30 en el resto de la altura.

Para la torre T, el sistema núcleo central está formado por dos sistemas tipo C no conectados mediante dinteles y coincidentes con los dos ejes de comunicaciones distribuidos de la manera habitual a ambos lados del vestíbulo central. Cada sistema C sí dispone de potentes dinteles descolgados, aprovechando la altura libre hasta la puerta de los ascensores, lo que mejora la rigidez a torsión de cada sistema de manera independiente.

La forma asimétrica del edificio en T y la posición del núcleo central, desplazada respecto al centro de masas y al centro de integración de las cargas de viento, hace necesario disponer una pantalla exenta en el extremo de la planta que reduzca los giros producidos por las acciones horizontales.

4. Diseño sísmico

Para llevar a cabo el diseño sísmico de la estructura se ha seguido la metodología descrita en el Eurocódigo EC-8 de primera generación, vigente en el momento de desarrollo del proyecto ejecutivo.

Se ha realizado el dimensionamiento de la estructura por el procedimiento más habitual basado en fuerzas, es decir, empleando un análisis modal-espectral elástico.

4.1 Caracterización de la tipología estructural

El espectro de respuesta elástico de la estructura se ve reducido por el coeficiente de comportamiento (q), con el que se reduce el valor de las fuerzas sísmicas de diseño al

considerar la capacidad de disipación de energía del sistema estructural. Este coeficiente depende, en primer lugar, de la clase de ductilidad elegida para la estructura y sus detalles (baja, media o alta) y, por otro lado, de la tipología estructural, su modo de fallo, la regularidad en planta y alzado y la sobrerresistencia.

En el caso de las torres, se ha considerado clase de ductilidad media, para evitar los exigentes detalles de armado y condicionantes de diseño asociados a la clase de ductilidad alta.

Por otro lado, se lleva a cabo un análisis de los requisitos exigidos a cada una de las tipologías estructurales fijadas en la normativa para poder determinar la formulación del coeficiente de comportamiento a aplicar.

Para ello, en primer lugar, sobre el modelo resistente frente a sismo de cada una de las torres, se calcula la posición del centro de masas, el centro de rigidez y las rigideces a torsión y laterales en ambas direcciones al aplicar cargas unitarias al sistema estructural.

En la siguiente gráfica se muestra, como ejemplo en la torre Y, la distribución a lo largo de la altura de la rigidez a torsión y laterales X-Y.

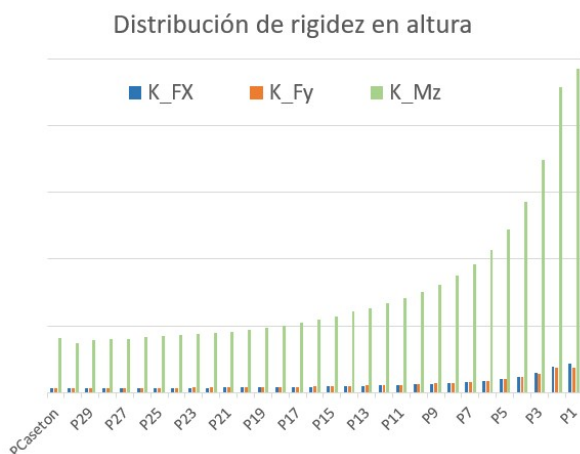


Figura 11. Distribución en altura de la rigidez a torsión y laterales X-Y. Torre Y

- Péndulo invertido: se descarta esta opción, puesto que la masa está repartida de manera homogénea en la altura y no se concentra más de la mitad en el tercio superior de la altura de cada torre.

- Sistema torsionalmente flexible: son aquellos en los que el radio de torsión, raíz cuadrada del cociente entre la rigidez a torsión y la rigidez lateral en cada dirección, es menor que el radio de giro de la masa del forjado en cada planta.

En la siguiente gráfica se muestra la relación entre el radio de torsión y el radio de giro de la masa para ambas torres. La estructura de la torre Y, con el sistema núcleo situado en el centro de la planta, es un claro ejemplo de sistema torsionalmente flexible y se obtienen ratios por debajo de la unidad. Sin embargo, la torre T, al disponer de una pantalla situada en la periferia de la planta, tiene un comportamiento más rígido a torsión y el ratio varía entre 1 y 2.

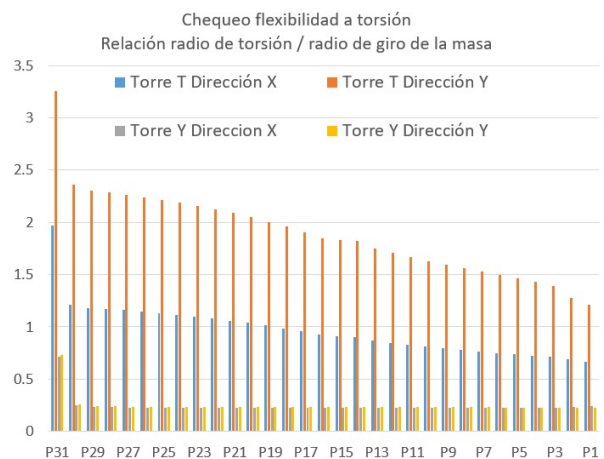


Figura 12. Comprobación de la flexibilidad torsional del sistema tipo núcleo en ambas torres.

Por otro lado, se estudia el comportamiento del sistema estructural resistente frente a una acción con una distribución similar a la acción sísmica, al aplicar un método de fuerzas equivalentes y obteniendo cortantes basales en los distintos elementos estructurales.

En la siguiente gráfica se muestra, para la torre T, el porcentaje de contribución de los sistemas *núcleos* y *soportes* frente al cortante total producido por la acción sísmica a lo largo de la altura de la torre.

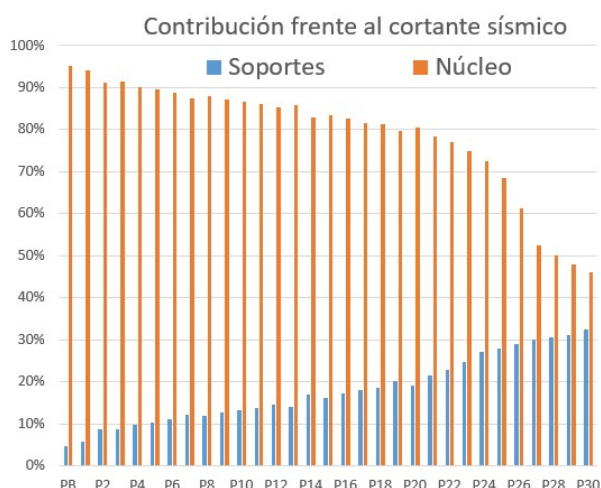


Figura 13. Contribución por planta del sistema núcleo-soportes frente a acciones sísmicas. Torre T

- Sistema pórtico/pórtico mixto: los forjados de losa maciza de canto estricto, que además se encuentran fisurados a flexión, no aportan rigidez suficiente al sistema pórtico formado por pilares y losas. De esta manera, el cortante basal integrado en el conjunto de soportes supone del orden de un 5% del total en las plantas inferiores y porcentajes que aumentan hasta el 30% en los niveles superiores, en cualquier caso, muy alejados del valor mínimo del 50% que establece la normativa para sistemas pórticos mixtos.
- Sistema muros/muros mixtos: dado que el cortante integrado que reciben los núcleos representa más de un 65% del cortante total, se trata de un sistema tipo muros no mixto.
- Sistema muros desacoplados/acoplados: las alturas libres estrictas impiden el descuelgue de vigas dintel que hagan trabajar conjuntamente los distintos sistemas tipo C de núcleos. Por lo que, frente a flexiones, la parte de momento que se transforma en axiles en los distintos núcleos gracias al efecto pórtico que generan los dinteles es

inferior del 25%, y, por tanto, se trata de un sistema de muros desacoplados.

En último lugar, se analiza la regularidad en planta y alzado, dado que la falta de ella denota flexibilidad torsional o plantas blandas y penaliza los valores de coeficiente de comportamiento que se deben adoptar, puesto que estos se han calibrado para ser más conservadores cuando exista riesgo de concentración de daño.

- Regularidad en planta: se comprueba que la distancia entre el centro de rigidez y el centro de masas de cada planta es inferior al 30% del radio de torsión, calculado previamente para las comprobaciones de sistema torsional flexible.
- Regularidad en altura: buscar determinar, de una manera más cualitativa, si los centros de masa y de rigidez están razonablemente alineados en todas las plantas y si hay cambios bruscos de rigidez.

En este sentido, dado que el sistema estructural tipo núcleo de las torres se mantiene a lo largo de toda la altura, se puede definir como un sistema regular en alzado.

4.2 Coeficiente de comportamiento

Una vez realizada la caracterización estructural, se puede determinar para cada una de las torres el coeficiente de comportamiento a considerar en el diseño siguiendo la formulación descrita en el Eurocódigo EC-8.

En la siguiente imagen se muestra para ambas torres, en función de su tipología estructural, la formulación aplicada para la obtención del coeficiente de comportamiento:

- Torre Y: coeficiente de comportamiento $q = 2$
- Torre T: coeficiente de comportamiento $q = 3$

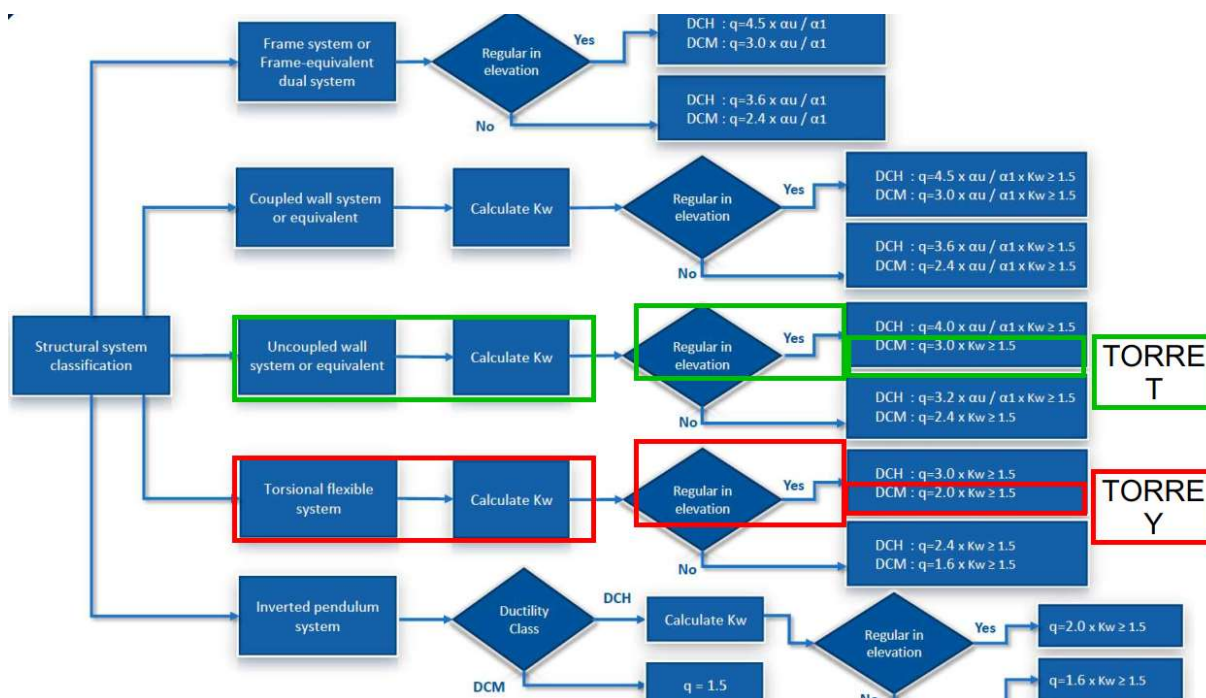


Figura 14. Diagrama de formulación del coeficiente de comportamiento. Aplicación torre T y torre Y.

4.3. Consideración de tabiquería

La rigidez de los edificios se ve alterada por la existencia de elementos arquitectónicos tipo tabiques que, aunque no son estructurales y su contribución no se considera en el diseño resistente, generan un cambio significativo en los modos fundamentales de vibración de la estructura.

En los modelos de elementos finitos 3D de cada una de las torres solo se modelan los elementos estructurales (losas, núcleos, soportes, etc.) junto con sus condiciones de contorno, introduciendo los elementos arquitectónicos de tabiquerías y acabados simplemente como carga. De esta manera, sólo se tiene en cuenta la masa de estos elementos arquitectónicos, pero no es posible tener en cuenta la rigidización que suponen en la estructura, al no querer considerar su contribución al sistema resistente.

Sin embargo, dado que la magnitud de la acción sísmica obtenida mediante un análisis modal-espectral queda determinada en función de los periodos de los modos de vibración del sistema estructural, la rigidización producida por

la existencia de tabiques, al reducir el periodo, incrementa la acción sísmica acercando el valor hacia la meseta.

Para tener en cuenta la rigidización que producen los tabiques en cada una de las torres, se define un espectro modificado de manera que, en la zona de periodos altos, por encima de la zona de meseta, los valores de aceleración se vean multiplicados por un coeficiente corrector. Este coeficiente resulta de aplicar la recomendación por la cual el análisis modal-espectral debe introducir al menos el 85% del cortante basal obtenido por el método de fuerzas equivalentes, pero estableciendo que el período con el que se define el análisis por fuerzas equivalentes incluya la rigidez de los tabiques arquitectónicos.

Obtenidos de esta manera, se adjuntan los coeficientes correctores por tabiquería obtenidos para las dos torres:

- Torre Y: coeficiente corrector = 1.15
- Torre T: coeficiente corrector = 1.21

En la siguiente gráfica se muestra, como ejemplo en la torre T, el espectro modificado por

el coeficiente corrector para tener en cuenta la tabiquería.

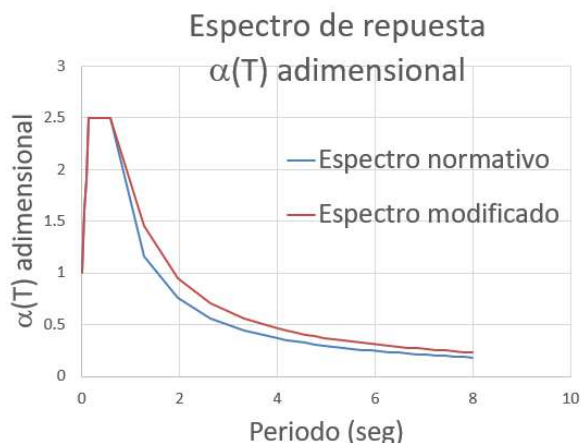


Figura 15. Espectro de respuesta modificado para considerar la tabiquería. Torre T

4.4. Estructura secundaria y primaria

El sistema estructural principal resistente de cada una de las torres es diferente frente a cargas gravitatorias y cargas horizontales de viento y sismo. Los forjados de losa maciza y los soportes en los que apoyan constituyen el esquema resistente frente a cargas verticales. Sin embargo, frente a acciones horizontales, el esquema fundamental es tipo núcleo.

De esta manera, los soportes y losas se pueden considerar como elementos secundarios, puesto que su contribución a la rigidez lateral no supera el 15% de la de los elementos sísmicos primarios.

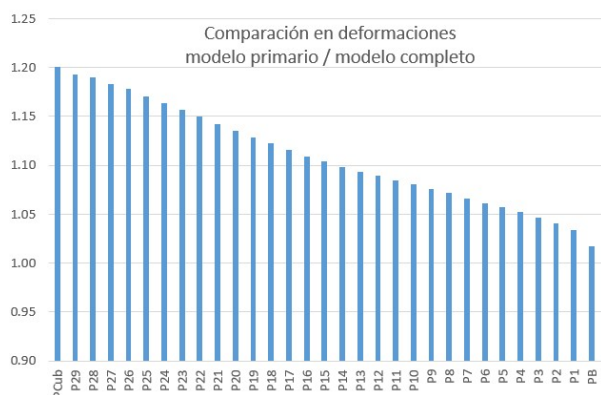


Figura 16. Comparación en deformaciones del modelo primario y el modelo completo. Torre Y

En la anterior gráfica se muestra, para la torre Y, la comparación en deformaciones, frente a la misma acción horizontal, del modelo exclusivamente con los elementos primarios y el modelo completo que incluye también los elementos secundarios.

Como ya se detectó para el reparto del cortante basal, la contribución del esquema tipo pórtico que generan los soportes en las plantas superiores, donde la rigidez del núcleo al sistema no es tan relevante, es superior que en las plantas inferiores.

4.4.1. Núcleos

El sistema de núcleos constituye la estructura primaria frente a las acciones sísmicas. Por esta razón, su dimensionamiento incluye las siguientes especificaciones fijadas en el EC-8 para elementos con clase de ductilidad media:

- Factor de modificación del cortante = 1.5, para tener en cuenta el posible incremento en el esfuerzo cortante después de la plastificación del arranque de un muro sísmico primario.
- Detalles específicos de confinamiento de los bordes.
- Axil normalizado en el núcleo < 65 % de la capacidad del núcleo sin armadura.

4.4.2. Soportes

Los soportes se consideran como estructura secundaria, y por tanto no es necesario imponer las exigentes condiciones normativas fijadas para los elementos de ductilidad media. De esta manera, en el dimensionamiento de soportes, no resulta necesario considerar los multiplicadores de las fuerzas de cortantes de diseño, ni las limitaciones para los axiles normalizados donde no se puede considerar la contribución de la armadura comprimida en la resistencia de los soportes a compresión. Tampoco es necesario imponer las ratios mínimas entre la capacidad a flexión de las vigas respecto a la de los soportes.

Sin embargo, los soportes tienen que hacer frente a las cargas verticales cuando estén

sometidos a las deformaciones sísmicas del sistema primario. Para ello, a nivel de modelo de cálculo, en las combinaciones de carga que se han empleado para el dimensionamiento de los soportes no se aplica la reducción generada por el coeficiente de comportamiento en el espectro de respuesta.

5. Proceso constructivo

La construcción de cada una de las torres se llevó a cabo mediante un sistema de cimbra auto-trepante, ejecutando tres niveles de núcleo por delante de los forjados y dejando cajas de esperas comerciales embebidas en las paredes del núcleo para su posterior conexión con los forjados.

Con un pequeño decalaje respecto a la estructura, se comenzaba el montaje de las

instalaciones y las tabiquerías, incluido el montaje de las piezas prefabricadas de hormigón de fachada, lo que permitió optimizar los plazos.



Figura 17. Montaje de fachada



Figura 18. Vista general del complejo

6. Conclusiones

Las torres de Martiricos fueron diseñadas con el objetivo de convertirse en un icono arquitectónico para la ciudad de Málaga. Un eficaz proceso de interacción y coordinación, desde las primeras fases del proyecto, entre los equipos de Arquitectura e Ingeniería permitió definir el sistema estructural más adecuado a las características geométricas de las torres sin alterar las estrictas necesidades del programa arquitectónico.

De esta manera, la solución estructural tipo núcleo proyectada permite hacer frente a las solicitaciones de viento y sismo, predominantes en edificios en altura, de manera optimizada, junto con un proceso constructivo sencillo.

La metodología empleada para llevar a cabo el diseño sísmico sigue las especificaciones del Eurocódigo EC-8 de primera generación, realizando un riguroso análisis para determinar el coeficiente de comportamiento q , con el que se reduce el valor de las fuerzas sísmicas de diseño al considerar la capacidad de disipación de energía del sistema estructural.