

Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) en el proyecto de las Torres Martiricos

Computational Fluid Dynamics (CFD) applied on Martiricos Towers Project

Ángel Vidal Vacas^a, Manuel Castillo Carbonero^b, Álvaro Serrano Corral^c

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Estudio de Ingeniería. Jefe de proyectos. angel.vidal@mc2.es

^bIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Estudio de Ingeniería. Ingeniero. manuel.castillo@mc2.es

^cIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Estudio de Ingeniería. Director Técnico. alvaro.serrano@mc2.es

RESUMEN

Esta ponencia describe las actividades más significativas llevadas a cabo para el diseño frente a viento de las Torres Martiricos. Estos análisis se han llevado a cabo durante el proceso de desarrollo del proyecto constructivo de las torres, e incluyen tanto las actividades relativas al diseño de la estructura frente a viento como el análisis de los aspectos de confort en las terrazas y cubierta, así como en la plaza.

ABSTRACT

This paper describes the most significant activities carried out for the wind design of the Martiricos Towers. These analyses have been carried out during the development process of the construction project of the towers and include both the activities related to the wind design of the structure and the analysis of the comfort aspects in the terraces and roof as well as in the plaza.

PALABRAS CLAVE: edificio en altura, túnel de viento, dinámica computacional de fluidos (CFD), confort frente a viento.

KEYWORDS: high-rise building, wind tunnel, computational fluid dynamics (CFD), wind comfort

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.

Cada una de las torres se inscribe en un cuadrado de 40 m de lado, situándose muy próximas entre sí. El volumen es prismático en altura. La

primera torre presenta planta en forma de T (torre “T”), con uso mixto hotel y residencial, mientras que la segunda tiene huella de geometría en forma de Y (torre “Y”) y su uso es residencial.

En esta ponencia se describen los análisis efectuados frente a viento para la determinación de cargas en las torres además de los efectuados para control de las condiciones de confort frente a viento tanto en las torres como en la plaza.

La dinámica computacional de fluidos (CFD) ha sido la herramienta utilizada para el análisis preliminar de cargas sobre las torres con objeto de adelantar acciones para el inicio del

dimensionamiento estructural. Posteriormente se validarían los resultados obtenidos en túnel de viento. La misma herramienta se ha utilizado para el análisis de confort en el entorno.

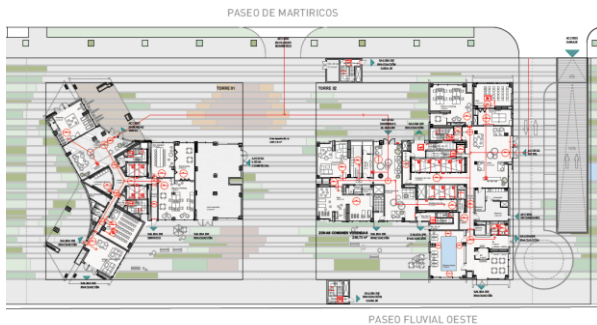


Figura 1. Esquema preliminar de la huella del zócalo con las dos torres. Morph arquitectura

2. Descripción de la estructura

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.

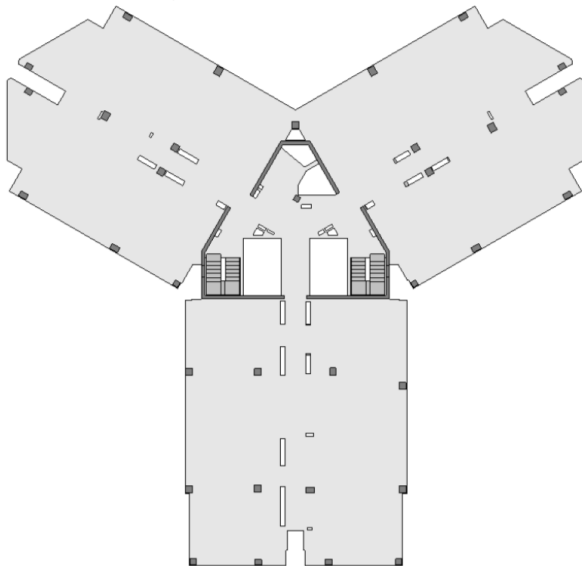


Figura 2. Planta tipo torre Y

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



Figura 3. Planta tipo torre T

3. Predimensionamiento de cargas de viento sobre las torres con simulaciones CFD y validación mediante ensayos en túnel de viento

3.1 Simulación CFD

3.1.1 Metodología

El término CFD (*Computational Fluid Dynamics*) se refiere a toda una disciplina de simulación que incluye el planteamiento de ecuaciones de comportamiento físico-químico de fluidos (a veces con puntos de partida diferentes: mecánica de medios continuo, teoría cinética de los gases de Maxwell-Boltzman), los procedimientos de resolución de las mismas mediante técnicas numéricas de las que existen una gran variedad (volúmenes finitos, diferencias finitas, elementos finitos, autómatas celulares, elementos de contorno), y las técnicas apropiadas de validación y verificación de los resultados obtenidos (ensayos físicos en túnel de viento, monitorización de estructuras reales, análisis de sensibilidad).

En el caso de la ingeniería civil de viento (aerodinámica externa), el uso de simulaciones CFD permite obtener resultados de manera más

ágil, flexible y rápida que mediante las técnicas tradicionales de túnel de viento físico, muy limitadas a un número reducido de casos de estudio debido a que cada uno exige maquetas (modelos físicos) diferentes, que son difíciles y costosos de implementar. Esto hace que las simulaciones CFD sean de gran interés en el diseño de elementos en interacción con el viento.

Sin embargo, la contrapartida es la complejidad de estos procedimientos y su gran sensibilidad a los parámetros de entrada. El uso de estas técnicas exige el manejo por técnicos altamente experimentados que puedan establecer el grado de validez de los resultados obtenidos antes de llevarlos al proyecto. Y es que los posibles mecanismos físicos, al estar determinados por un fenómeno tan complicado como es la turbulencia, son numerosos y muy variados. Dependiendo del caso y el papel de la turbulencia, los resultados podrán tener mayor validez o por el contrario necesitarán profundización antes de llevarse al proyecto.

Las simulaciones de las Torres Martiricos, se llevaron a cabo mediante el método de volúmenes finitos con el software ANSYS FLUENT®, desarrollándose los trabajos entre noviembre de 2019 y abril de 2020. Las simulaciones se realizaron en modo estacionario, en principio de alcance suficiente para evaluar preliminarmente las resultantes de fuerzas sobre la estructura. Las situaciones de servicio (vibraciones longitudinales y transversales) se evaluaron por métodos analíticos.

3.1.2 Acción de viento

Para determinar la velocidad básica de viento se consideraron CTE¹ [2], IAPF-07 [4] y ROM 04-95 [3]. Para la ciudad de Málaga CTE presenta una velocidad de referencia de 26 m/s, mientras que las dos últimas normas indican 24 m/s (comparación homogénea para terreno tipo II). El motivo se encuentra en la metodología y zonificación para la realización de los mapas,

según [5]. ROM 0.4-95 se basa en una red de datos costeros más detallados en su zonificación. IAPF-07 se apoya en ROM 0.4-95 para las zonas costeras mientras que las zonas interiores se basan en estaciones AEMET. CTE toma los datos de estaciones AEMET para todo el territorio, pero con una zonificación de áreas diferente. Para Torres Martiricos se adoptó la velocidad básica de ROM 0.4-95, por encontrarse en la costa y por lo tanto mejor estudiada que en el resto de las normas. Del mismo modo se tomaron los factores de direccionalidad de ROM 0.4-95.

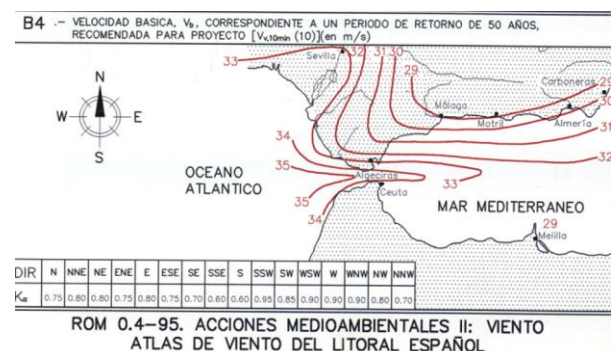


Figura 4. Mapa de viento en costa sureste. ROM 0.4-95.



Figura 5. Mapa de isotacas. IAPF-07.

Para elegir el perfil del terreno según cada dirección se consideró la descripción de EC1-1-4 [1], realizando las correspondientes equivalencias. Recuérdese que los números que etiquetan cada tipo de terreno no coinciden entre normas. En lo que sigue en esta comunicación nos referiremos, por claridad, a las etiquetas de EC1-1-4.

Se procedió al análisis de alturas de edificaciones en un radio de 1550 m en torno a

¹ El mapa de viento es idéntico al de IAP-11.

las torres. La dimensión del radio es la que sería necesaria para el desarrollo de un perfil de viento nuevo al presentarse un cambio de rugosidad. Se obtuvo una altura media edificada de 16.90 m, con una ocupación del 18% de la superficie, lo que corresponde a un terreno tipo IV. Efectivamente, la descripción del terreno IV es la que más se ajusta al entorno, también desde un punto de vista de descripción general.

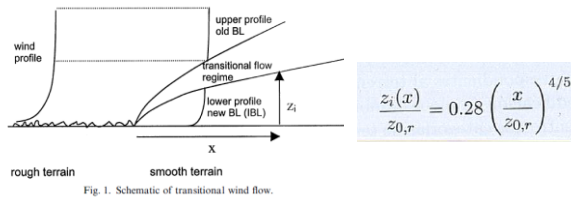


Figura 6. Expresión de Letchford utilizada para determinar el radio de influencia de la rugosidad en el entorno de las torres

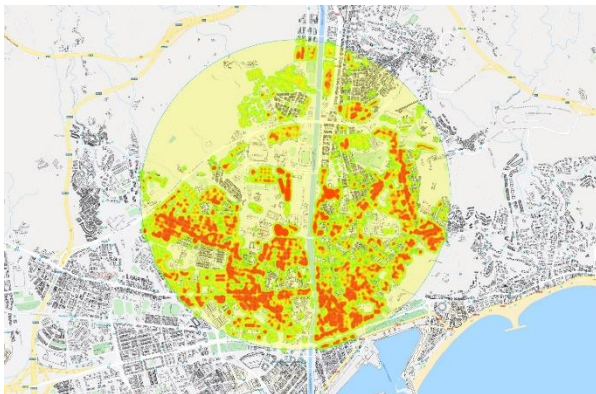


Figura 7. Estudio de ocupación y alturas. Los contornos en naranja corresponden a alturas de 5 plantas o más.

Combinando los parámetros anteriores se determinaron los perfiles de viento (diez-minutal) a aplicar según cada dirección.

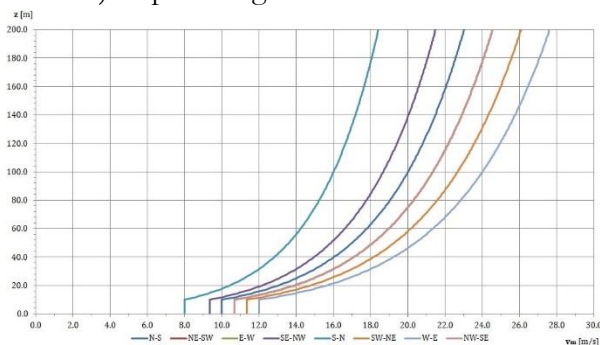


Figura 8. Perfiles de velocidad máxima de viento diez-minutal según dirección de incidencia sobre las torres.

3.1.3 Modelo computacional del entorno y las torres

El modelo geométrico del entorno se realizó a partir de la información catastral. Se modelaron los edificios en un radio de 450 m alrededor de las torres, y más allá sólo edificios de más de 15.0 m, como el estadio de la Rosaleda. El grado de resolución de detalles es de aproximadamente 1.0 m. El dominio de la simulación se dimensionó 10 veces la altura de las torres a sotavento y 6 veces a barlovento, con una altura de dominio 6 veces la altura de la torre. Estas dimensiones siguen las recomendaciones habituales y limitan holgadamente el bloqueo de la sección.

Las torres Martiricos se modelizaron a partir de los planos de arquitectura con un grado de resolución de 0.20 m. La selección de la resolución en el modelado geométrico determina la resolución del mallado y por lo tanto la resolución de la solución. Como regla práctica puede considerarse que la resolución del mallado al menos debe ser 4-5 veces mayor que la resolución geométrica para obtener resultados aceptables. Una discretización mayor hace crecer el coste computacional notablemente.

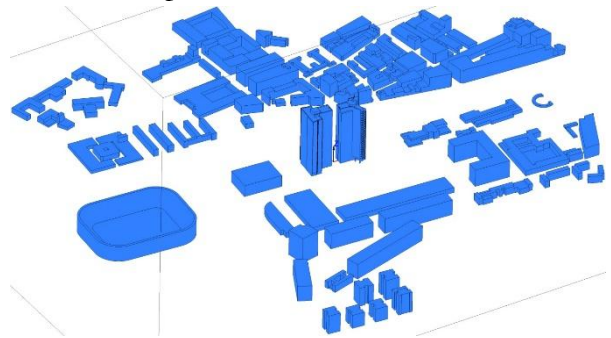


Figura 9. Modelo geométrico del entorno

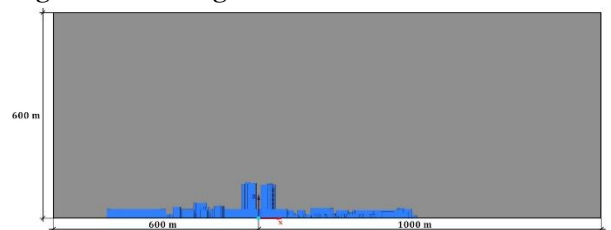


Figura 10. Dimensiones del dominio de la simulación. Alzado.

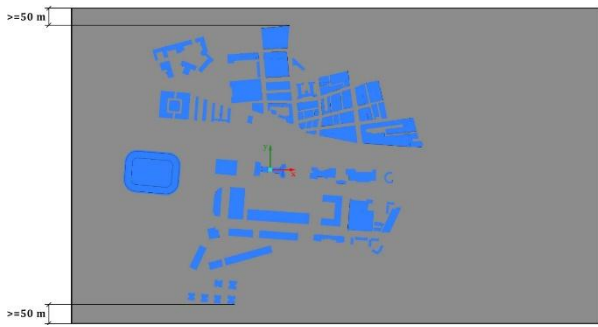


Figura 11. Dimensiones del dominio de la simulación. Planta.

En las zonas no explícitamente modeladas se ha considerado una rugosidad aerodinámica de 1.0 m, correspondiente a la rugosidad asignada por la normativa en terreno tipo IV.

En el mallado se han utilizado volúmenes hexaédricos ensamblados con la técnica “CutCell” de ANSYS FLUENT, lo que garantiza un alto nivel de ortogonalidad en las caras.

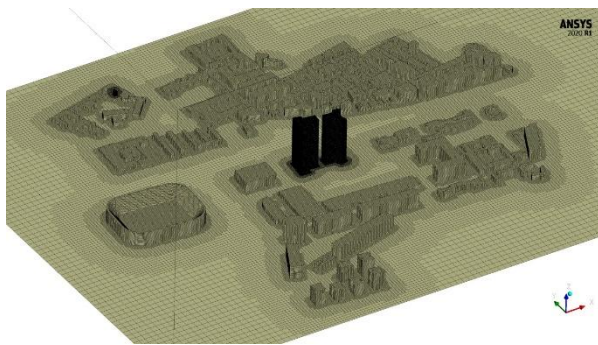


Figura 12. Mallado de la simulación. Vista global.



Figura 13. Mallado de la simulación. Detalle de las torres.

En el *inlet* del dominio se aplica el perfil de viento correspondiente a cada incidencia. Previamente se comprobó que el perfil de viento se mantenía estable a lo largo del dominio, lo que es

fundamental para obtener resultados numéricamente aceptables.

3.1.4 Resultados obtenidos

Si bien los resultados que se persiguen con la modelización son de esfuerzos globales sobre la estructura para el predimensionamiento de los núcleos y cimentaciones, es interesante repasar los resultados obtenidos en términos de presiones/succiones, por cuanto su distribución y valor suelen ser un índice del nivel de precisión obtenido en la simulación.

A modo de ejemplo de contraste, fue seleccionada la incidencia N-S sobre la torre T que presenta un frente rectangular. Este tipo de campo de presiones se encuentra recogido en numerosas publicaciones y libros clásicos como [6].

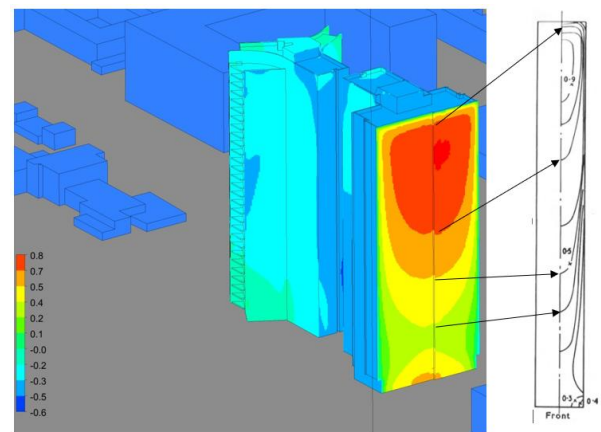


Figura 14. Presiones sobre fachada norte de la torre T. Adimensionalización de los coeficientes a la altura de gradiente

Los resultados cualitativos y cuantitativos se corresponden correctamente con el campo esperable según los ensayos. En la figura siguiente se comparan el perfil vertical de presiones en la simulación con el dado por [6] para una fachada cuadrada sobre la que incide un perfil de velocidades de viento. Se observa que la distribución cualitativa es también equivalente, por lo que puede considerarse que la simulación está recogiendo correctamente la física del movimiento del aire alrededor del obstáculo.

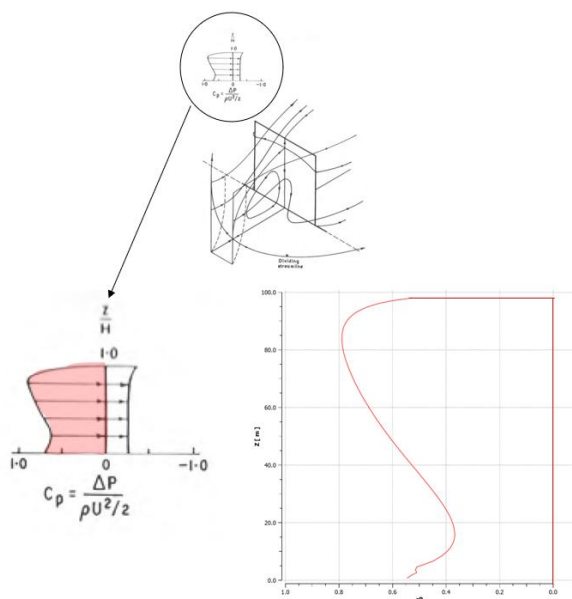


Figura 15. Distribución de presiones con la altura según [6] y según los resultados de la simulación (abajo a la derecha). Adimensionalización a la altura de gradiente.

Considerando los coeficientes de presión (o succión) adimensionalizados a la presión de velocidad a cada altura (modo de adimensionalizar que adoptan las normativas), obtenemos en la misma cara de la torre T los resultados mostrados en la figura 16. Se observa correcta correspondencia con el valor +1.0 de la normativa.

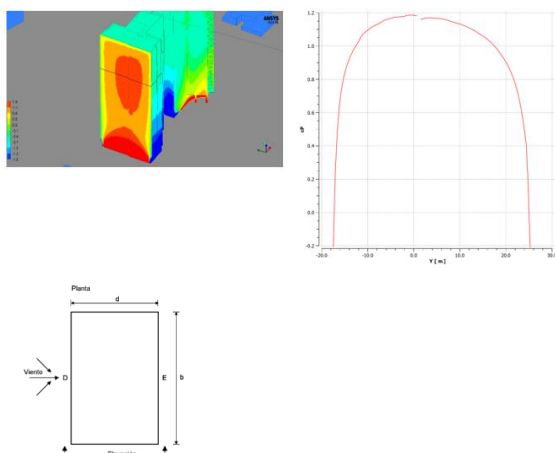


Tabla 7.1
Valores recomendados para los coeficientes de presión externa en muros verticales de edificios de planta rectangular

Zona	A		B		C		D		E	
h/d	C _{pe,10}	C _{pe,1}	C _{pe,10}	C _{pe,1}	C _{pe,10}	C _{pe,1}	C _{pe,10}	C _{pe,1}	C _{pe,10}	C _{pe,1}
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,7	
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
≤ 0,25	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

Figura 16. Distribución de presiones en la fachada norte del edificio T. Arriba línea de corte del campo de presiones. Abajo coeficientes de presión de la norma CTE [2].

Como observación cualitativa adicional hay que mencionar que se observan en los resultados sobre la parte baja de la fachada coeficientes de más alto valor que los que se tomarían de la normativa. Este hecho es habitual en edificios de altura, tal y como, al igual que en la simulación, se observa en ensayos físicos.

Dada la geometría “no canónica” e incidencia oblicua, en otros casos no es posible hacer el análisis comparativo con la literatura como el realizado en la fachada norte de la torre T. Este análisis comparativo puede considerarse una “validación” previa, si bien es precisa la realización de ensayos físicos para completar la validación.

3.2 Túnel de viento físico

Forman parte de la metodología “CFD” las actividades de verificación y validación. La primera se refiere a la cuantificación del error dado en la resolución de las ecuaciones de fluidos. Se compone fundamentalmente de análisis de sensibilidad de la malla de volúmenes finitos. La segunda trata el conjunto de actividades para garantizar que el modo en el que se han planteado las ecuaciones a través de la simulación es el adecuado para resolver el problema planteado. El procedimiento habitual de validación es la realización de ensayos en túnel de viento físico sobre modelos a escala.

En el caso de las Torres Martiricos se realizaron ensayos en el túnel de viento IDR de la Universidad Politécnica de Madrid. Los ensayos se plantearon no específicamente para validar las simulaciones CFD previamente realizadas, si no para un alcance más amplio, como ensayos completos para el proyecto de la estructura. Esto no es óbice para que sus resultados sirviesen de validación.

El laboratorio tiene una cámara que permite simular la capa límite terrestre en cuanto a variación de velocidades con la altura y perfil de turbulencia. La captación de resultados se realiza por medio de sondas de presión

dispuestas en todas las fachadas de ambos edificios. Las series temporales recogidas por cada sonda se tratan estadísticamente, obteniendo valores medios y desviaciones típicas de cada serie. A partir de ellos, mediante procedimiento estadístico, se obtienen analíticamente los valores pico [7].



Figura 17. Cámara de ensayos del túnel IDR.

Las cargas sobre la estructura se obtuvieron mediante integración a lo largo de toda la superficie de las torres.

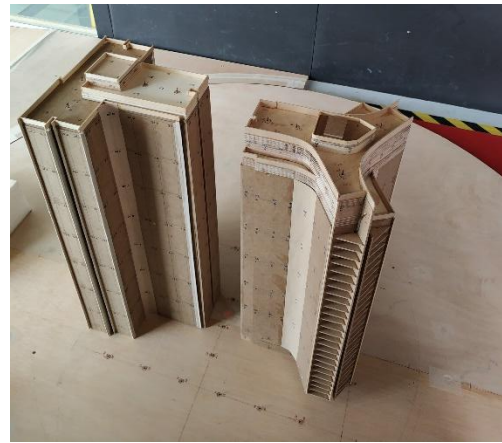
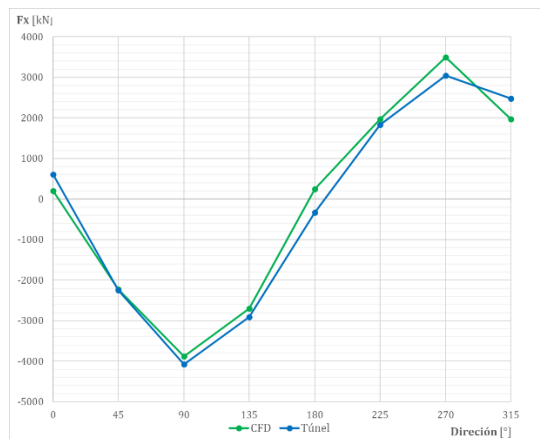
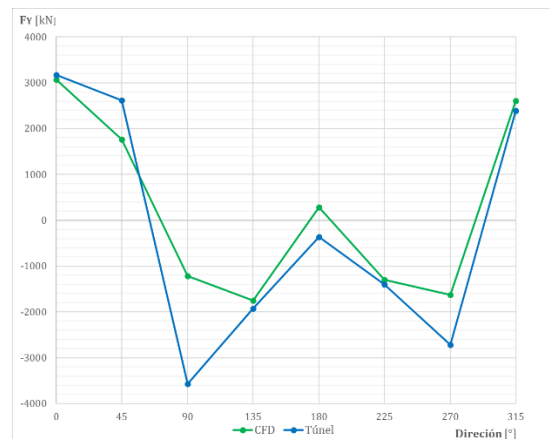


Figura 18. Maqueta de las Torres Martiricos con tomas de presión marcadas en fachada.

Es importante destacar que las metodologías del túnel físico y de la simulación CFD son diferentes, obteniéndose del primero resultados que son estimadores estadísticos. La simulación CFD es sin embargo un procedimiento determinista y estacionario. Es por ello por lo que la comparación de resultados se realizó sobre las fuerzas resultantes, ya integradas, sobre la torre, que en último término son los resultados que se utilizan en el proyecto.



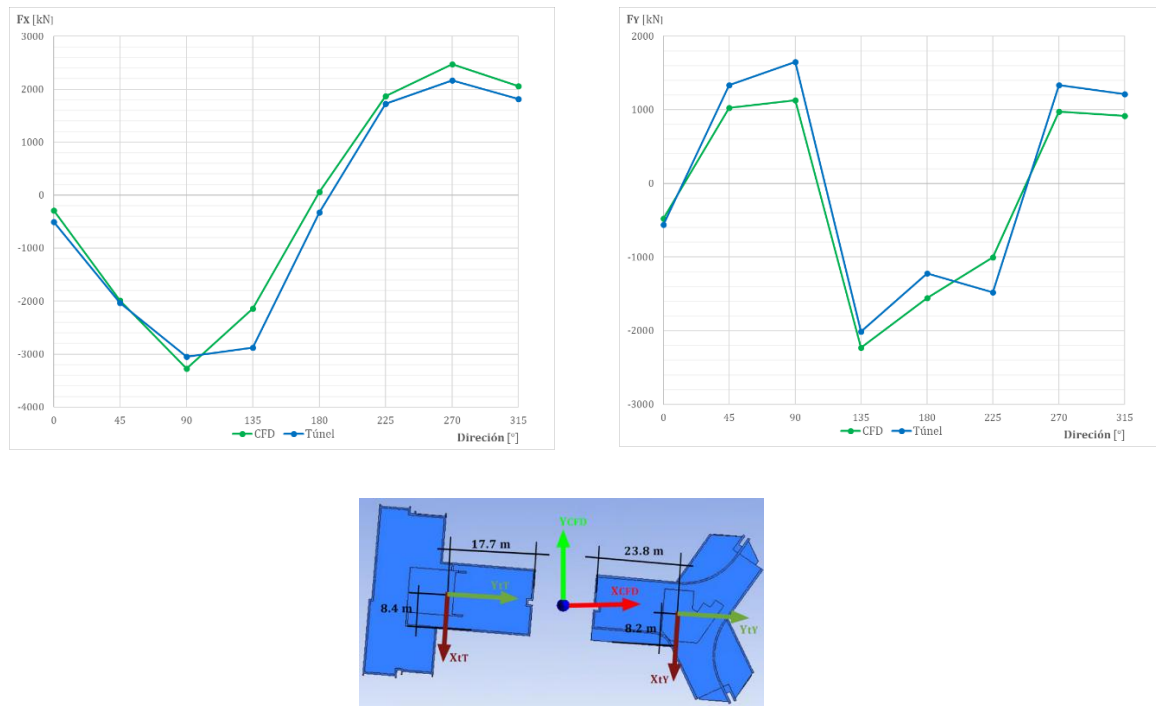


Figura 19. Comparación de fuerzas resultantes sobre las torres T (arriba) e Y (abajo) según ejes X e Y CFD.

Los resultados obtenidos muestran que las fuerzas resultantes son próximas según ambos métodos, a excepción de las direcciones E/O donde se presentan diferencias significativas en las fuerzas transversales a la dirección del viento. Estas situaciones corresponden a efectos transversales en la estela de las torres. La resolución de este tipo de efectos no estacionarios requeriría simulaciones transitorias, lo que justifica las diferencias observadas e indica la presencia de efectos de desprendimiento de vórtices para dichas incidencias.

4. Control de vibraciones y confort en las torres

El análisis frente a viento de las torres ha incluido el cálculo de vibraciones en las plantas altas y el análisis de confort por velocidad del viento en las terrazas.

Al tratarse de situaciones de servicio se considera el régimen medio de viento. Para su caracterización se utilizaron las series de datos de AEMET de la estación del aeropuerto de Málaga del periodo 1991-2012. Con los datos se ha

construido un modelo de Weibull, del cual se consideran las velocidades de viento de periodo de retorno 10 años para el control de aceleraciones en la coronación y periodo de 20 años para el control de confort por viento en terrazas y coronación.

Para la determinación de las aceleraciones que los usuarios pudieran experimentar en la coronación de las torres se ha llevado a cabo un análisis *modal-espectral* de la acción de viento sobre las mismas. Para el desarrollo de este análisis es preciso caracterizar la acción de viento sobre la torre, lo que se realiza por medio de la ley de coeficientes de fuerza y momento adimensionales que se obtiene de las simulaciones CFD. De este modo se asegura que la información referente a la influencia del entorno y de una torre sobre la otra, se vea recogida en el análisis. Las simulaciones CFD son de tipo estacionario y promediadas en el tiempo, y permiten la obtención de leyes de coeficientes de fuerza y momento para cada planta de cada una de las torres y en cada una de las ocho direcciones de incidencia. En lo que sigue se presentan los resultados de la dirección más desfavorable que es la W-E, tanto desde el punto de vista de máxima velocidad de viento

como de mayor efecto sobre cada una de las torres por falta de protección de una sobre otra.

Los criterios de control de aceleraciones adoptados han sido los siguientes:

10-year acceleration level for:	
Residential building	10-15 milli-g
Hotel	15-20 milli-g
Office building	20-25 milli-g
10-year torsion velocity	3.0 milli-rads/sec

Figura 20. Criterios de control de aceleraciones

Para la torre Y se consideró el uso residencial, mientras que para la torre T se consideró en toda ella el uso hotel, incluso en las plantas en las que el uso es de alquiler.

El amortiguamiento considerado en el cálculo de ambas torres fue del 5%, conforme con los valores habitualmente aceptados para edificios de hormigón armado y pequeña amplitud de movimientos.

Para la evaluación del confort en las terrazas y planta de piscina, se consideran, de acuerdo con la figura 21, los siguientes niveles de confort, evaluados para un periodo de retorno de 20 años, correspondiente a una probabilidad de excedencia de la velocidad media del viento del 5% en un año.

CRITERIA	DESCRIPTION	MEAN WIND SPEED EXCEEDED 5% OF THE TIME
Comfort level 1	Fast Walking	10 m/s
Comfort level 2	Leisurely Walking	8 m/s
Comfort level 3	Standing, Sitting - short exposure	6 m/s
Comfort level 4	Standing, Sitting - long exposure	4 m/s

CRITERIA	DESCRIPTION	MEAN WIND SPEED EXCEEDED ONCE PER YEAR
Safety level 1	Fair-Weather Areas	20 m/s
Safety level 2	All-Weather Areas	15 m/s

Figura 21. Criterios de control de velocidad del viento en terrazas para confort.

En el caso de la torre Y los modos de flexión y torsión se encuentran desacoplados, siendo el de torsión el de menor frecuencia. Los espectros de respuesta de giro y aceleraciones que se obtuvieron en el análisis son los de la figura 22.

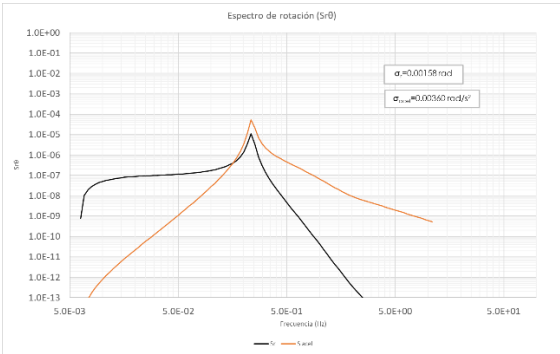


Figura 22. Espectros de respuesta de giro y aceleración angular

La velocidad angular obtenida a partir de los espectros anteriores es 2.3 mili rad-sec, inferior al límite de 3 mili rad-sec requeridos.

En cuanto a la aceleración lineal experimentada en alguno de los puntos de la planta más alejados del centro de la torre (20 m de distancia), se obtiene una aceleración lineal de 22 mili-g, ligeramente superior al límite recomendado para uso en hotel. No obstante, el resultado fue aceptado en base a la baja probabilidad de ocurrencia simultanea de la velocidad de viento máxima y la dirección de este.

En el caso de la torre T los modos sensibles presentan acoplamiento flexión-torsión. Los espectros obtenidos son los indicados en la figura 23.

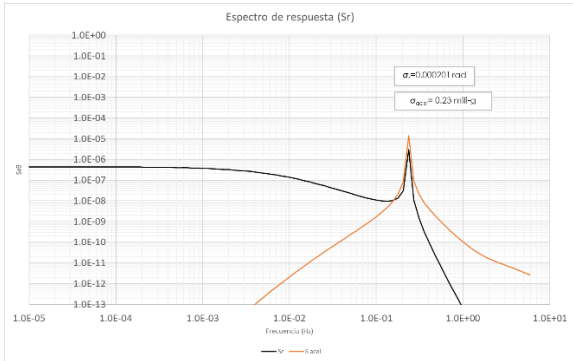


Figura 23. Espectros de respuesta de desplazamiento y de aceleraciones de un punto en la planta P29 de la torre T.

Efectivamente la flexión de la torre fue dimensionada por condiciones de sismo, claramente más desfavorables. La velocidad angular obtenida fue de 0.13 mili-rad/s y la aceleración pico máxima en un punto de la planta 0.95 mili-g, que incluye la parte debida al

giro (0.40 mili-g) y la parte debida a la flexión longitudinal (0.55 mili-g). Todos ellos resultados correctos.

El confort por viento en la coronación y terrazas se evaluó determinando el nivel de

confort (“comfort level”) en la simulación CFD, obteniendo resultados correctos para las incidencias más importantes.

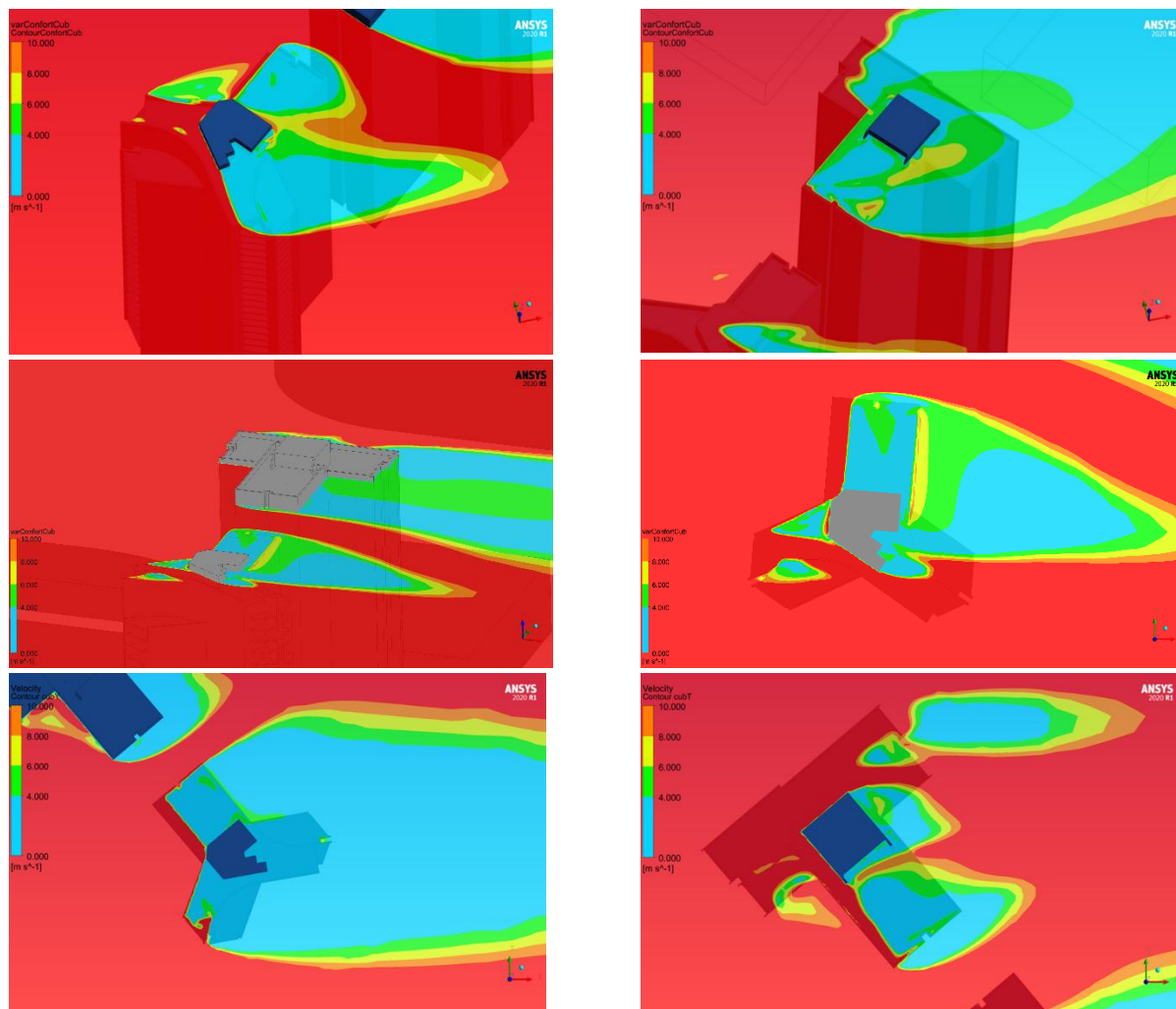


Figura 24. Niveles de confort en coronación de la torre Y y T. Incidencias SW, W y NW.

Referencias

- [1] “EN-1991-1-4. Acciones en estructuras. Parte 1-4 Acciones generales. Acciones de viento”, versión septiembre de 2007.

- [2] “Documento básico SE-AE. Seguridad estructural. Acciones en edificación”, Ministerio de Fomento, abril 2009.

- [3] “ROM 0.4-95. Acciones climáticas II. Viento”, Puertos del Estado, 1995.