

ESTUDIO NUMÉRICO DE LOS EFECTOS DEL VIENTO EN EL EDIFICIO DE LA 5ª TORRE, MADRID

A Numerical Study of Wind Effects for the 5th Tower in Madrid

José Luis MARTÍNEZ MARTÍNEZ

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

INES Ingenieros

jimm@inesingenieros.com

José Antonio MARTÍN-CARO ÁLAMO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

INES Ingenieros

jmc@inesingenieros.com

RESUMEN

El artículo presenta el estudio numérico de los efectos del viento sobre el edificio alto del complejo “Torre Caleido” en Madrid. El estudio numérico es anterior al túnel aerodinámico en modelo físico y se utiliza para estimar las fuerzas sobre estructura y reacciones en cimentación y para obtener las condiciones de confort en la torre y en las zonas peatonales. Se muestra el método utilizado, algunos detalles del modelo numérico, resultados y comparación preliminar con el avance de resultados del modelo físico.

ABSTRACT

The numerical study of wind effects for the tower of the building complex “Torre Caleido” in Madrid is presented. The numerical study is previous to the aerodynamic tunnel in physical model and it is used to have an early estimate of wind forces over the structure and foundation, as well as to get an appraisal of the comfort of users into the tower and on the surrounding pedestrian areas. The general method and technical details are exposed along with results and preliminary comparisons with the initial results of the physical tunnel.

PALABRAS CLAVE: Edificios altos, efectos eólicos, CFD, Lattice Boltzmann.

KEYWORDS: Tall buildings, wind effects, CFD analysis, Lattice Boltzmann.

1. Introducción

Junto a las cuatro torres de la parte norte de la Castellana, en Madrid, se proyecta un edificio compuesto por un amplio zócalo (280×100 m) y un edificio de 160 m de altura sobre la cota de la plaza y 190 m sobre la cimentación. La torre tiene unas dimensiones en planta de 67 x 16 m, lo que arroja una esbeltez geométrica próxima a 10. La estructura, tanto los forjados como los núcleos verticales, es de hormigón por lo que el conjunto tiene una masa considerable y frecuencias propias de vibración relativamente bajas.

Estas características determinan un sistema estructural con cualidades dinámicas sensibles al viento. La cercana presencia de las poderosas cuatro torres (figura 1) es una influencia eólica sin duda significativa y muy difícilmente evaluable por medios manuales.

Por ello, el proyecto prevé un ensayo en túnel aerodinámico con capa límite del edificio y sus alrededores. No obstante, el desarrollo de los trabajos exige una estimación temprana de las acciones del viento para evaluar los esfuerzos en la estructura resistente al viento y en la cimentación.

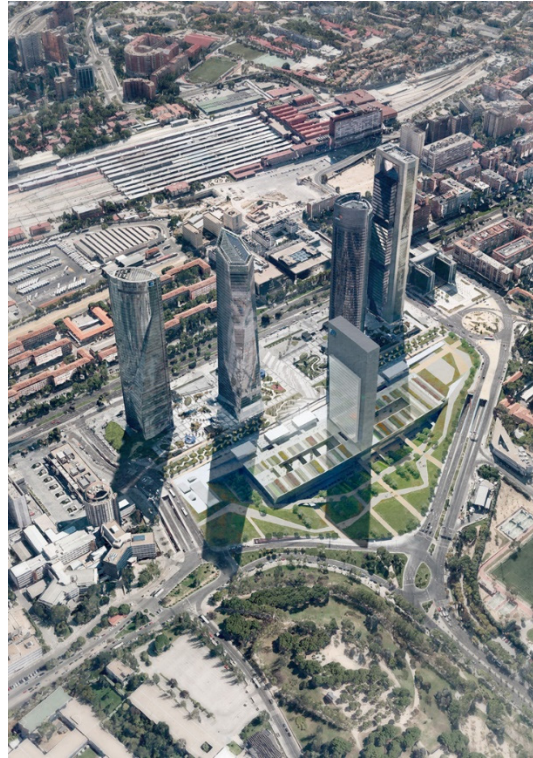


Figura 1. Vista virtual del conjunto de las cuatro torres con Torre Caleido (Fenwick Iribarren Architects)

Asimismo, el predimensionamiento estructural precisa estimar las condiciones de confort en el edificio alto calculando las aceleraciones horizontales. Finalmente, la ordenación de la plaza, se beneficia de poder conocer las zonas de mayor y menor confort peatonal para lo que es necesario calcular las velocidades frecuentes del viento al nivel del suelo. Con el fin de disponer de respuestas a estas cuestiones más afinadas que el cálculo normativo se desarrolló el estudio numérico que se presenta a continuación.

En el momento de la redacción se dispone de un avance de datos sobre el estudio en túnel aerodinámico físico. Se hacen algunas comparaciones preliminares entre estos resultados y los del estudio numérico.

2. Características dinámicas de la torre

La estructura contra esfuerzos horizontales de la torre consiste en dos núcleos de hormigón de dimensiones en la base 16x16 m. La masa total cuasipermanente es de 10^6 kN. Dada la importante esbeltez en la dirección perpendicular a las fachadas, el primer modo, de flexión tiene una frecuencia de 0.20 Hz. El modo de flexión transversal y el de torsión (figura 2) tienen frecuencias 0.30 y 0.60 Hz respectivamente.

Un objetivo del estudio es la determinación de la posible susceptibilidad de la torre frente a fenómenos transversales al viento (desprendimiento de remolinos entre otros) en las direcciones de viento paralelas a las fachadas. Los cálculos preliminares muestran números de Strouhal de entre 0.06 y 0.13 con velocidades críticas teóricas de 37 m/s.

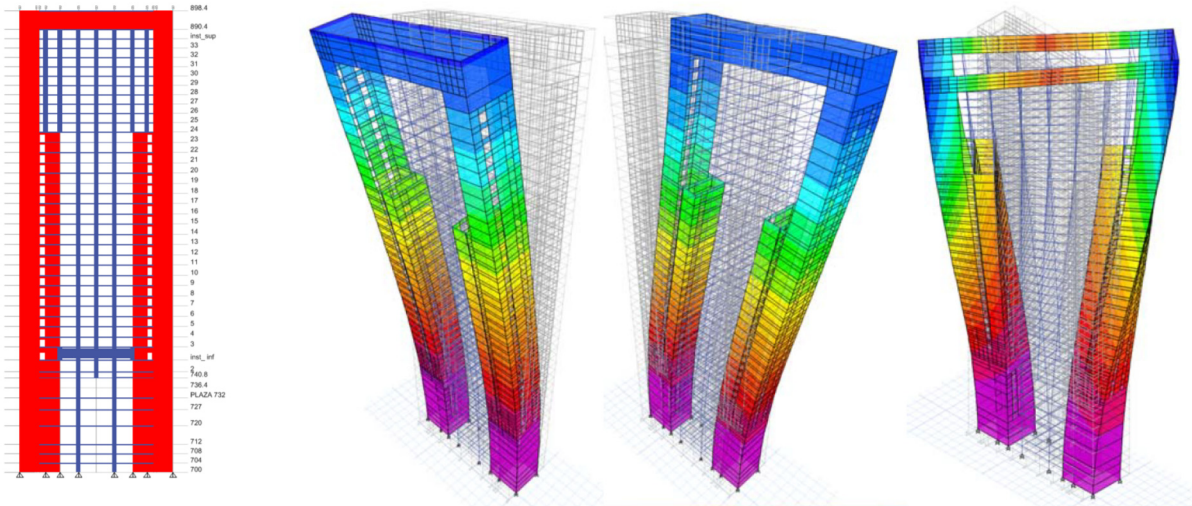


Figura 2. Alzado esquemático de la torre y tres primeros modos de vibración

3. Metodología y objetivos

Los objetivos del estudio numérico son dos:

- Obtener las fuerzas sobre la estructura y cimentación para su dimensionamiento
- Obtener los niveles de confort de usuarios de la torre (aceleraciones horizontales) y de peatones (velocidades y turbulencia del viento a nivel de calle)

Adicionalmente se obtienen resultados sobre presiones en los paramentos pero no con la resolución suficiente para el diseño de las fachadas.

El método de análisis tiene tres partes:

- Obtención de las fuerzas aerodinámicas sobre la estructura
- Resolución del problema dinámico en el que las fuerzas aerodinámicas, función del tiempo, son acciones dato
- Aplicación de la estadística de viento local para obtener los coeficientes direccionales que modulan la respuesta de la estructura del punto anterior

4. Características del modelo numérico

Se modeliza la torre, el zócalo, la topografía local y edificios significativos en un radio de 1500 m alrededor de la torre (figura 3).

Se ha utilizado el programa *XFlow* de Next Limit Technologies, un *software* basado en partículas, concretamente en la técnica denominada *Lattice Boltzmann*. Esta herramienta no utiliza mallas, sino que divide el dominio en celdas cúbicas a las que se aplica un algoritmo de integración de las ecuaciones de Boltzmann, que son una generalización de las ecuaciones de fluidos de Navier-Stokes.

La herramienta crea un túnel virtual similar a un túnel aerodinámico real en el que se sitúan los sólidos estudiados, la topografía y el entorno. El recinto tiene, como en un túnel real, paredes laterales y techo, así como una entrada de fluido con un perfil de velocidades y turbulencia impuestos y una salida que garantiza el equilibrio de masas.

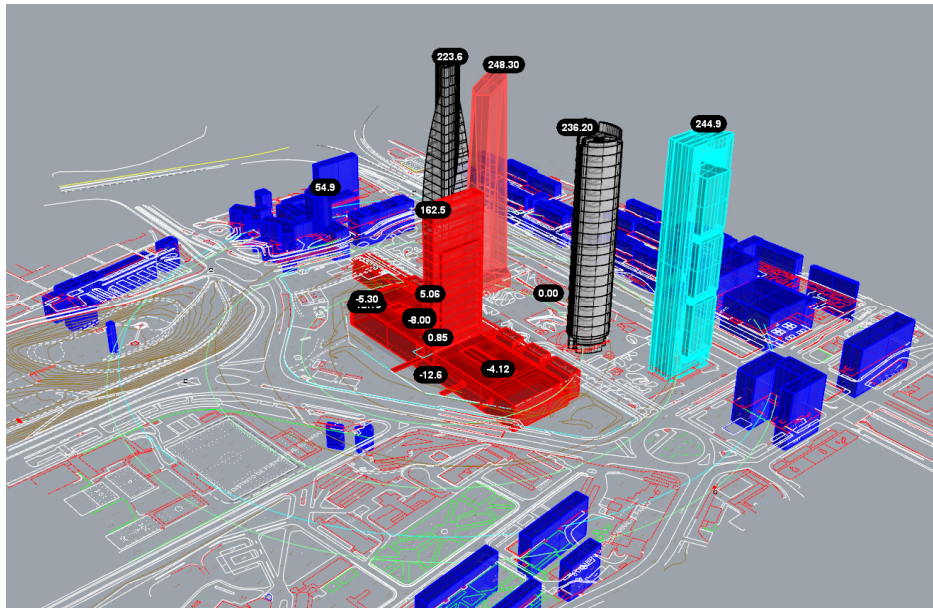


Figura 3. Perspectiva del modelo geométrico

El pre y post proceso es muy ágil; como contrapartida el número de grados de libertad es muy elevado. Esto unido a la necesaria discretización en el dominio del tiempo produce grandes tiempos de cálculo y enormes volúmenes de resultados numéricos. Las simulaciones se llevaron a cabo en *clústeres* de 32 núcleos.

La torre tiene los planos de las fachadas mayores orientados a 12° NNE. Se llevaron a cabo 16 simulaciones a intervalos iguales incluyendo las direcciones de los ejes principales de la estructura (figura 4)

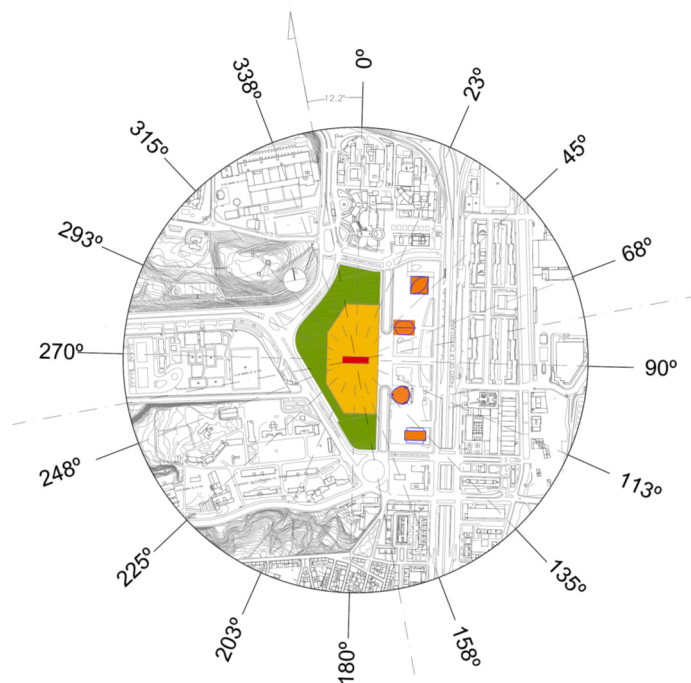


Figura 4. Planta con la posición del edificio, las cuatro torres y las direcciones del viento en las 16 simulaciones

La figura 5 muestra las dimensiones generales del túnel virtual. El recinto tiene una longitud en la dirección del viento de 2700 m, 4 alturas de la torre desde la entrada y 11 alturas de torre en la estela. La altura es de 1250 m, siete veces la altura de la torre. El ancho del recinto es de 2000 m, 8 veces el radio del conjunto de las cinco torres. De esta forma se asegura un bloqueo menor del 5%.

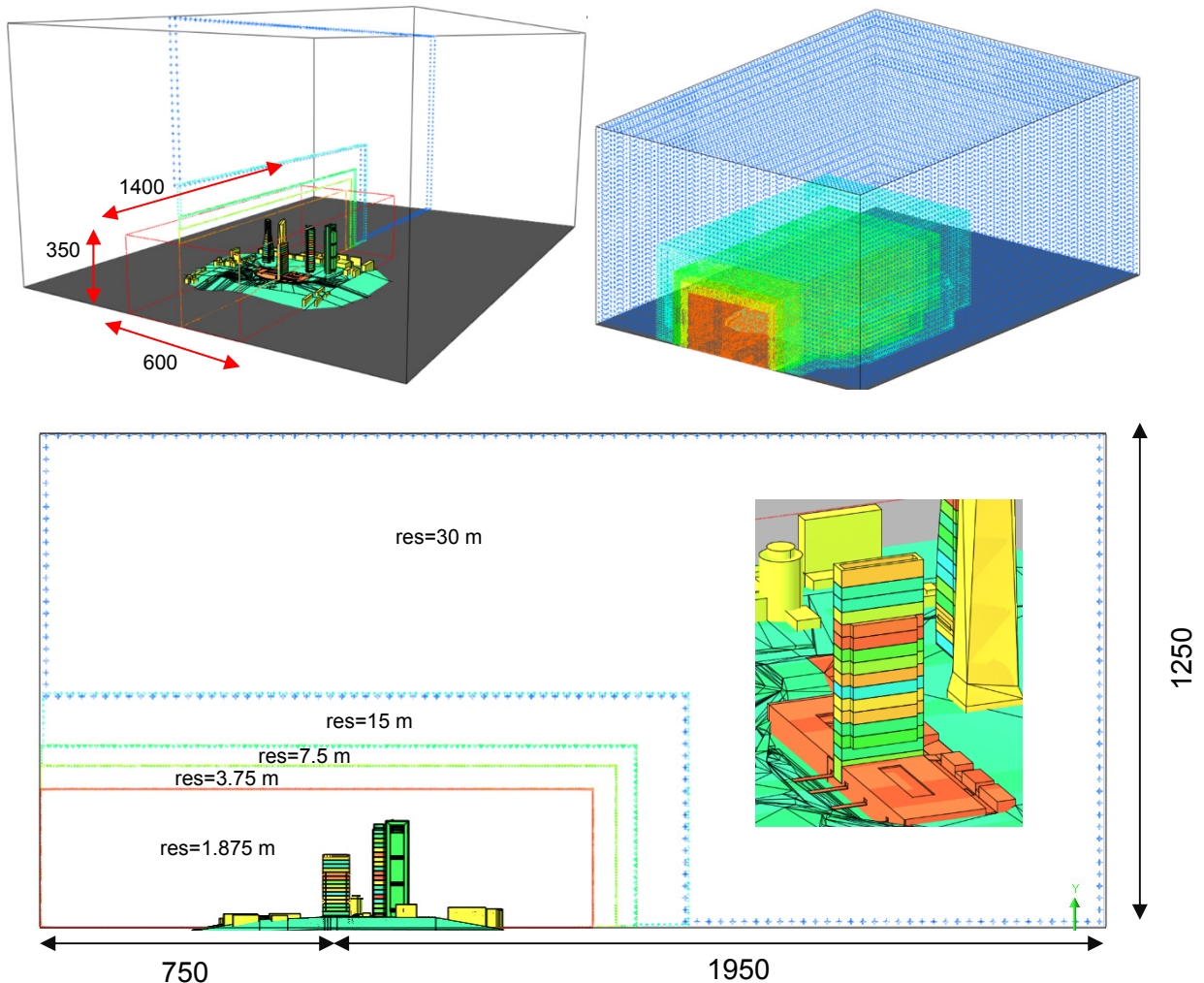


Figura 5. Dimensiones del recinto y las zonas de transición de resolución. Derecha, detalle de la subdivisión de la torre en 16 regiones para obtención de resultados

La resolución en el terreno, los edificios y la *caja* de resolución fina (de dimensiones 1400x600x350 m) es de 1.875 m. La resolución en el campo lejano es de 30 m, por lo que se establecen 3 capas de transición con resoluciones crecientes con un factor de tamaño de 2. La discretización espacial es fija (no adaptativa en función de la turbulencia calculada) por lo que la zona de resolución fina en la estela es extensa.

La torre se ha dividido en 16 regiones delimitadas por secciones horizontales. El programa proporciona esfuerzos totales (fuerzas y momentos) integrados en cada una de las regiones.

El tamaño total del modelo es de 49 millones de celdas. Cada simulación comprende 70 s, de los que se descartan los 15 primeros para evitar el transitorio espurio inicial. El paso de tiempo es adaptativo con un parámetro de Courant de 1.0.

Modelo del viento

En el modelo de XFlow se ha representado el viento natural mediante los perfiles de velocidades medias e intensidad de la turbulencia dados en Eurocódigo. Para las direcciones S a ENE se ha considerado una rugosidad del terreno tipo urbano, mientras que para las direcciones N a SSO se considera una rugosidad periurbana. La escala de la turbulencia se ha fijado en 230 m. Se han hecho cálculos previos de calibración de las características del viento realmente modelizado con la resolución empleada, de 1.875 m y el entorno. La figura 6 muestra los perfiles de velocidades e intensidad de la turbulencia obtenidos en comparación con los teóricos-objetivo.

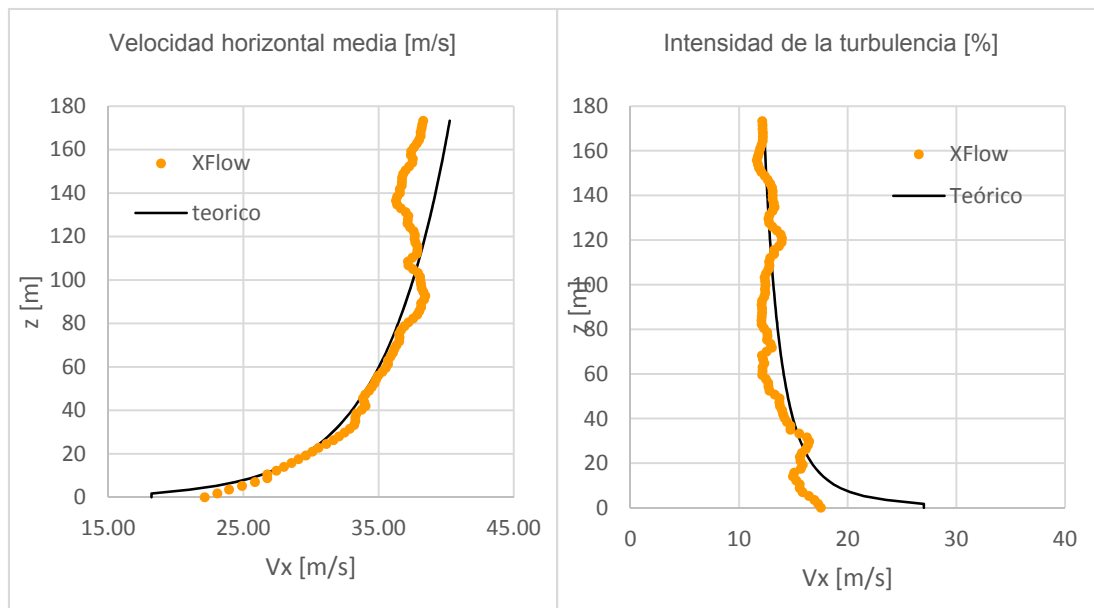


Figura 6. Comparación de perfiles de velocidades medias e intensidad media de la turbulencia teóricos y realmente modelizados

5. Integración del problema dinámico

El cálculo de fuerzas y momentos totales consiste en resolver el problema dinámico de la torre sometida a las fuerzas (y momentos) aerodinámicos. Las fuerzas aerodinámicas, calculadas en el apartado anterior, son 16 funciones del tiempo, una para cada una de las rebanadas horizontales en que se ha dividido la torre. Los efectos de cada una de ellas se superponen en un cálculo dinámico lineal único. Se ha considerado un amortiguamiento modal del 2%.

La figura 7 muestra el esquema de cálculo por superposición de las acciones aerodinámicas. Los valores máximos registrados se identifican con los valores característicos. Se han llevado a cabo simulaciones más largas (hasta 180 s) en algunas direcciones para confirmar este extremo. De hecho los máximos aparecen siempre próximos al intervalo descartado del transitorio.

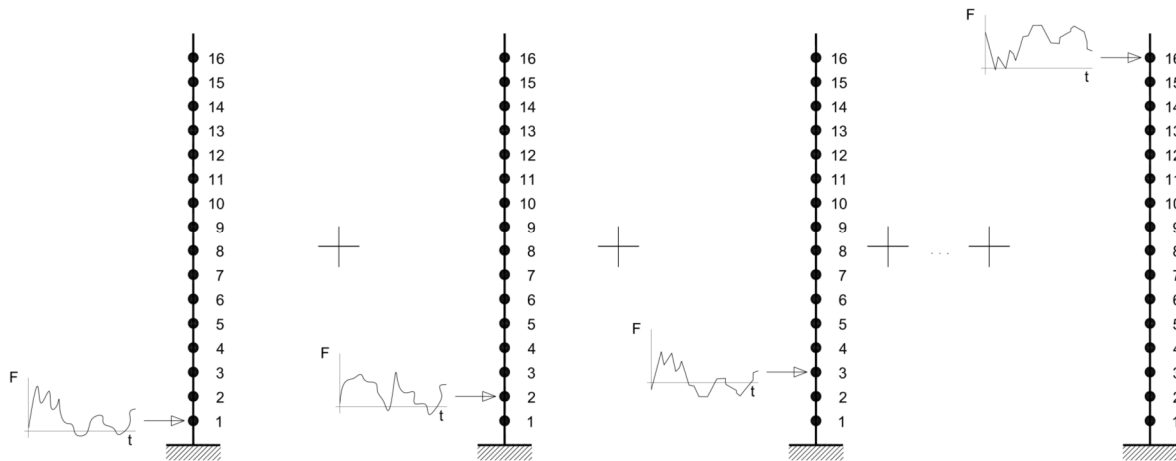


Figura 7. Esquema del cálculo dinámico de la torre con las masas concentradas en las 16 posiciones de las historias de fuerzas y momentos aerodinámicos

Pese a que el factor estructural, $c_s \cdot c_d$, de Eurocódigo resulte próximo a la unidad, los efectos dinámicos son dominantes. Como ejemplo, la figura 8 muestra para la dirección 180° los momentos en cimentación obtenidos de la integración de fuerzas y momentos aerodinámicos (sin incluir la respuesta dinámica de la torre) y los mismos momentos en cimentación obtenidos en el cálculo dinámico. La transformada de Fourier de la historia de momentos en cimentación muestra un pico acusado en la frecuencia propia de vibración de la estructura.

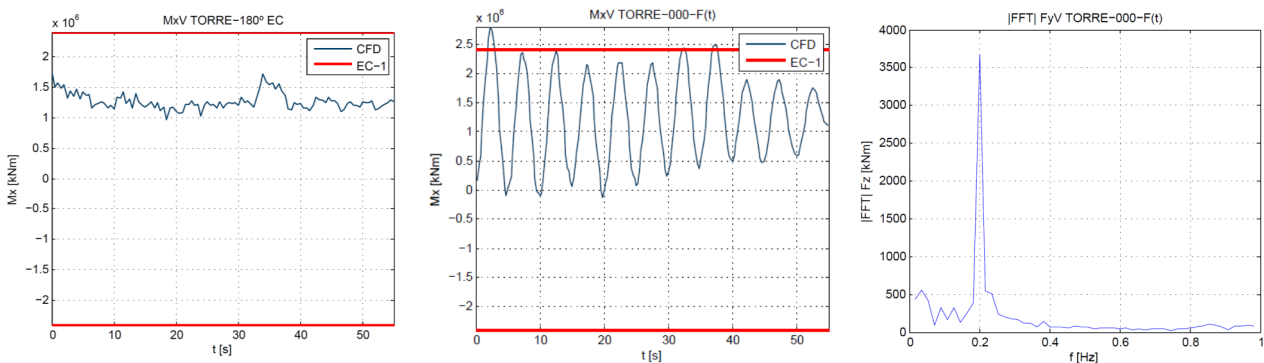


Figura 8. Momentos en cimentación para $\theta=180^\circ$, izquierda: integración de valores aerodinámicos; centro: cálculo dinámico de la estructura. A la derecha el contenido de frecuencias de la figura central.

6. Estadística del clima local de viento

Se dispone de los valores diarios (cuatro valores diarios más máximas ráfagas) de velocidad y dirección del viento en la estación meteorológica de Barajas. La serie cubre desde 1961 hasta 2015. Con estos datos se ajustan dos tipos de distribuciones estadísticas que se usan con fines diferentes:

- Para los valores normales se ajusta una distribución de Weibul de dos parámetros
- Para los valores extremos se ajusta una distribución de Gumbel

Estos ajustes se realizan para todas las direcciones de forma agregada y para cada dirección (de las 16 en que se ha dividido el plano) por separado.

En teoría, el ajuste de Weibul (figura 9), para el que se utilizan todos los valores de la serie temporal, puede proporcionar valores de la velocidad media para probabilidades tan bajas como se desee (cola de la función de distribución) pero, para tener una mayor fiabilidad en la predicción de valores extremos y un significado claro del concepto de periodo de retorno, es preferible hacer el segundo ajuste tomando solo los máximos anuales, como se ha hecho en este caso.

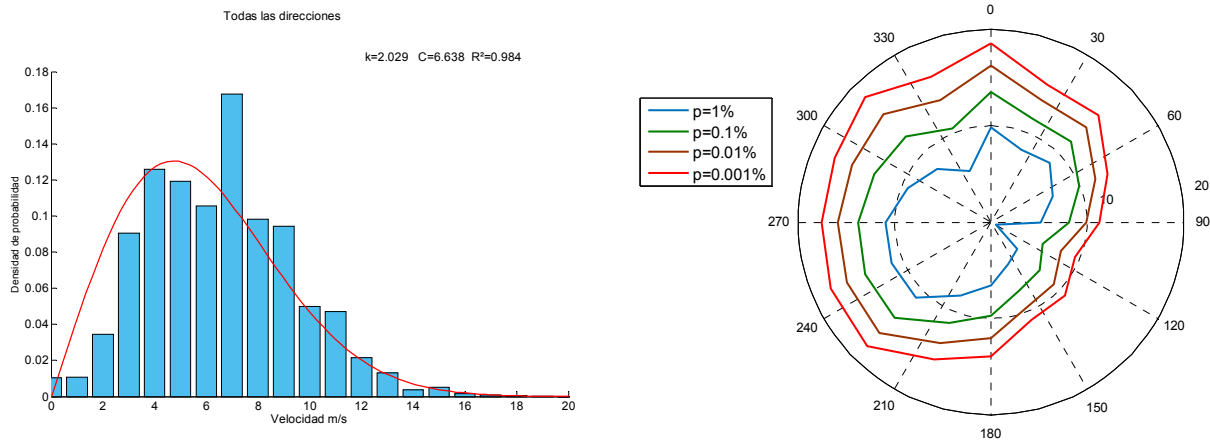


Figura 9. Función de densidad de probabilidad del ajuste de Weibul para todas las direcciones [k≈2;C=6.64] (izquierda) y rosa de vientos de para distintas probabilidades de ocurrencia (derecha) [R_{max}=20 m/s]

Los valores de las velocidades medias v_{10} para distintos periodos de retorno o probabilidad de ocurrencia que se utilizan en el estudio se resumen en la tabla 1. A efectos de cálculo de las fuerzas y momentos sobre la estructura se ha empleado de forma conservadora el valor de v_{10} dado en CTE en lugar del más favorable obtenido de la estadística.

Tabla 1. Valores estadísticos de la velocidad para distintos periodos de retorno o probabilidad

	T=1 año	T=10 años	T=50 años	Superada 5% del tiempo
V_{10} [m/s]	16.8	21.3	24.5	11.4

De igual modo, del lado de la seguridad y a efectos de cálculo de velocidades y aceleraciones para confort se emplea el método de los sectores admitiendo que en el sector en que la velocidad es máxima, esta coincide con el valor de la velocidad independiente de la dirección. Los coeficientes direccionales se definen como:

$$coef_{\theta_i,T} = v_T \frac{v_{T,\theta_i}}{max_i(v_{T,\theta_i})}$$

Donde v_T es la velocidad v_{10} para el periodo de retorno T independiente de la dirección y $v_{T,\theta}$ la misma velocidad pero condicionada a que se da en la dirección θ . Los coeficientes direccionales representan el número por el que se multiplica la velocidad representativa –para cada nivel de probabilidad– independiente de la dirección para obtener la correspondiente velocidad

condicionada a cada dirección. La figura 10 muestra los coeficientes para T=1 año.

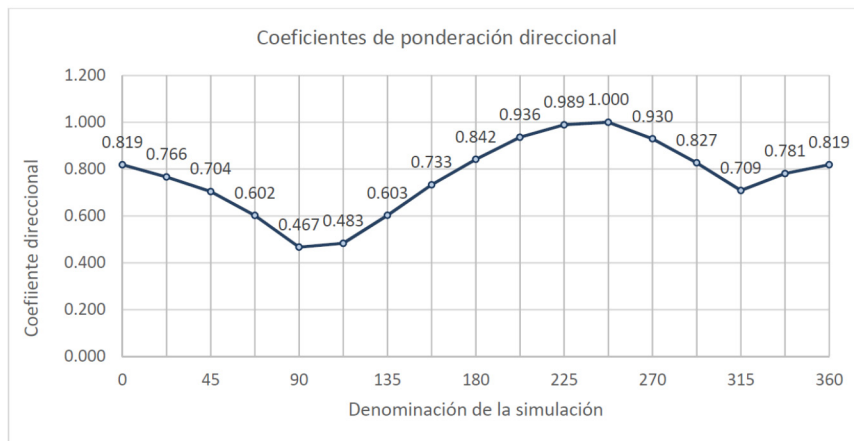


Figura 10. Coeficientes de direccionalidad para T=1 año

Resultados

6.1. Fuerzas y momentos sobre la torre y cimentación

La figura 11 muestra los resultados en términos de cortantes y momentos a lo largo de la altura. Se comparan los resultados del estudio numérico con los del cálculo según EC-1. Los resultados del CFD en términos de momentos en cimentación son un 26% inferiores.

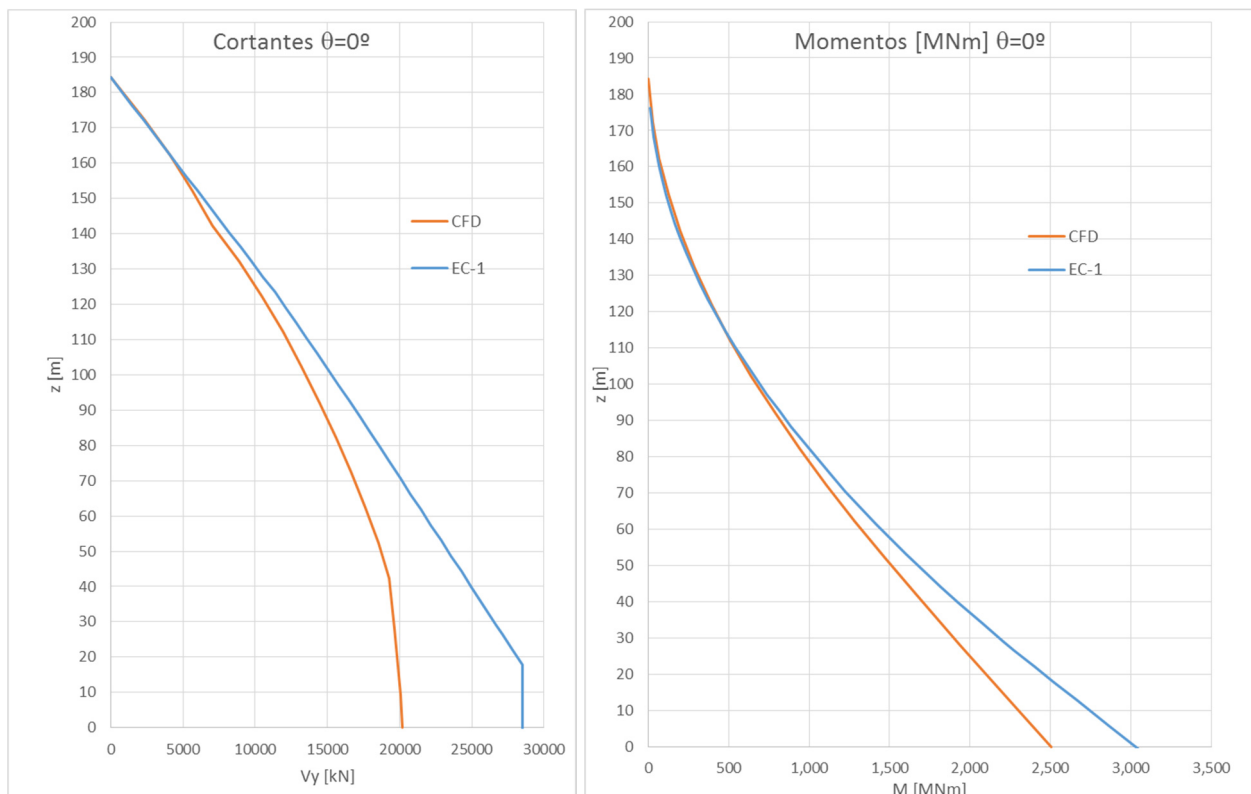


Figura 11. Cortantes y momentos según el cálculo Eurocódigo 1 y CFD XFlow para viento perpendicular a la fachada norte

Los resultados avanzados del túnel aerodinámico, llevado a cabo por Oritia & Boreas en el túnel de capa límite de Western Ontario son similares a los del CFD aunque algo más favorables. En este

momento está en estudio qué parte de esta diferencia se debe a la evaluación de cargas aerodinámicas y qué parte al tratamiento estadístico del viento, que en nuestro estudio se ha hecho, como se ha dicho bajo hipótesis conservadoras.

La figura 12 muestra los momentos en cimentación según los dos ejes principales del edificio para las 16 direcciones calculadas comparando el cálculo con XFlow con el cálculo mediante las presiones indicadas en EC-1.

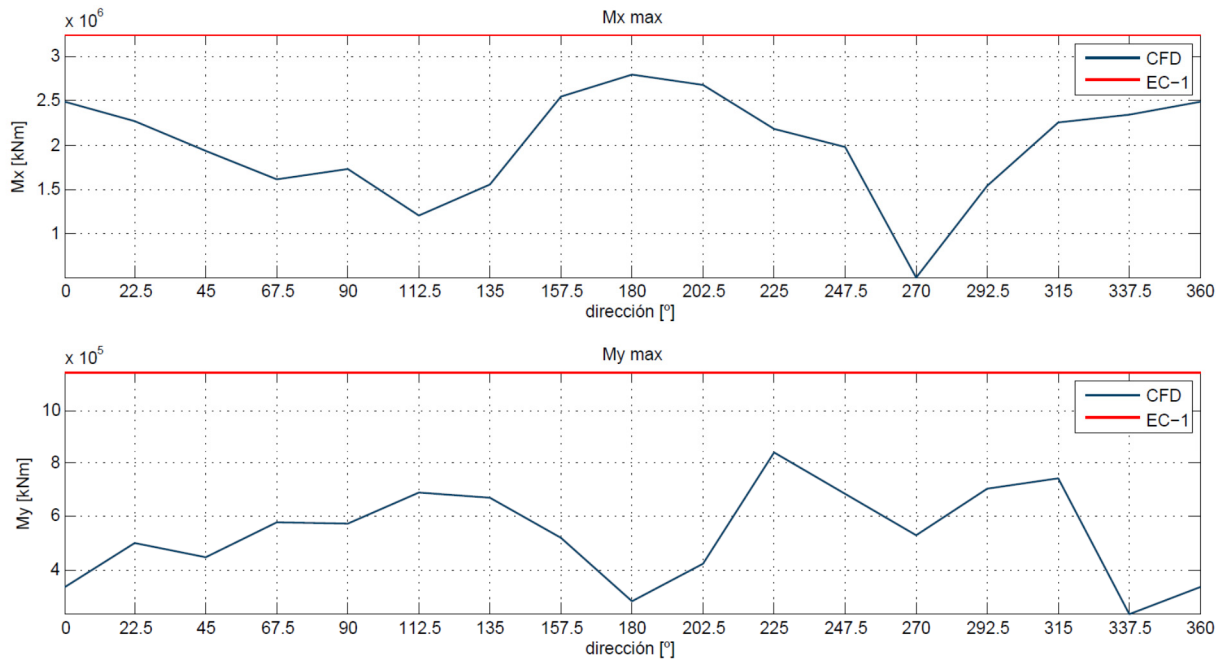


Figura 12. Momentos en valor absoluto en la cimentación para las 16 direcciones calculadas de acuerdo con CFD XFlow y EC1

6.2. Condiciones de confort en la torre

La figura 13 muestra las aceleraciones horizontales en la planta ocupada más alta de la torre para un periodo de retorno de 10 años. Las aceleraciones son inferiores a 20 mg, límite de confort admitido. Los movimientos son inferiores a 380 mm, que supone 1/500 de la altura desde cimentación.

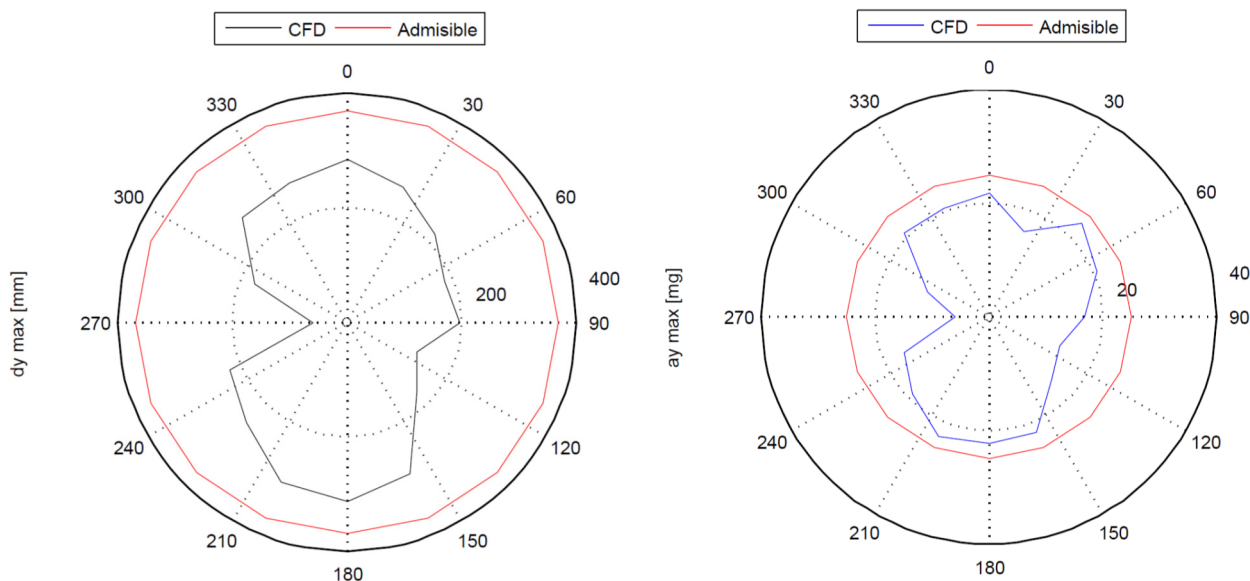


Figura 13. Movimientos y aceleraciones en la planta 32 de la torre para T=10 años

Las aceleraciones adelantadas en el estudio de túnel físico son inferiores a las de CFD, con un valor máximo de 11 mg para T=10 años. En este momento estudiamos si la mayor parte de esta diferencia se debe al diferente tratamiento de la estadística del viento. En nuestro estudio se ha utilizado el método sectorial imponiendo que la máxima velocidad en un sector sea igual a la velocidad T=10 años independiente de la velocidad, como se ha explicado más arriba.

6.3. Condiciones de confort en el entorno peatonal

El entorno es una zona elevada y localmente muy expuesta, especialmente en las direcciones SW. Se han identificado las zonas de mayor exposición y se han comparado las velocidades representativas con los límites de confort y seguridad peatonal (tabla 2). La velocidad representativa se ha evaluado como la velocidad media más 1,5 veces la desviación típica, medida a 1.50 m del suelo.

Tabla 2. Niveles de confort y seguridad peatonal

Criterio de confort	Descripción	Velocidad que se sobrepasa un 5% del tiempo	
		m/s	km/h
Nivel 1	Andar deprisa	10	36
Nivel 2	Pasear	8	29
Nivel 3	Estar de pie o sentado poco tiempo	6	22
Nivel 4	Estar de pie o sentado más tiempo	4	14

Criterio de seguridad	Zonas	Velocidad que se sobrepasa una vez al año en promedio	
		m/s	km/h
Nivel 1	Que solo se usan con buen tiempo	20	72
Nivel 2	Que se usan en todas los casos	15	54

La figura 14 muestra un mapa de velocidades representativas en el nivel de calle.

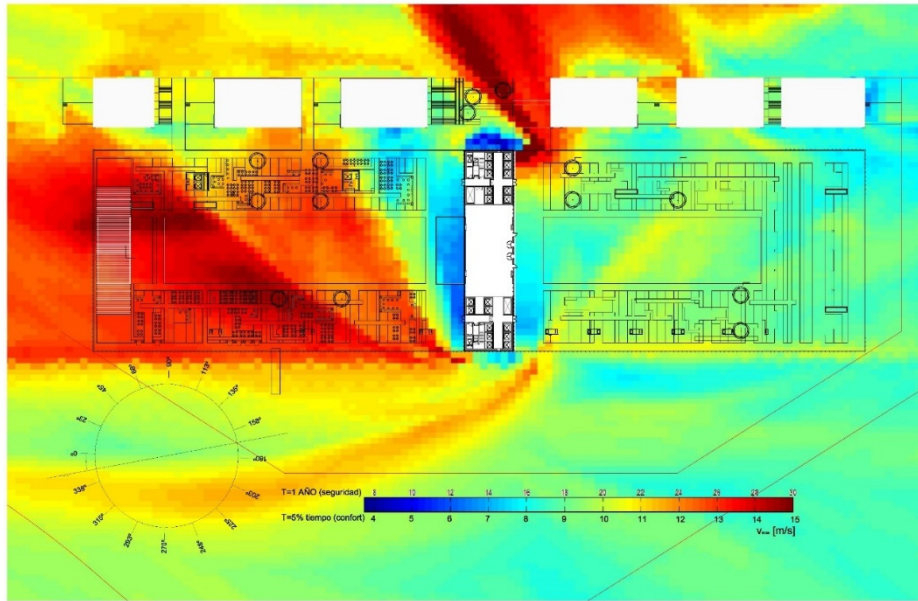


Figura 14. Velocidades representativas de confort a nivel de calle

Las zonas peatonales del lado norte y la entrada desde la plaza de las cuatro torres son las áreas de mayor incomodidad. En este momento se estudian actuaciones paisajísticas para mejorar las condiciones de velocidad en esas superficies.

Los resultados preliminares del túnel físico coinciden en la identificación de las zonas críticas, asociadas a las estelas formadas por los ángulos de la torre, y arrojan valores en general más favorables que los del estudio numérico.

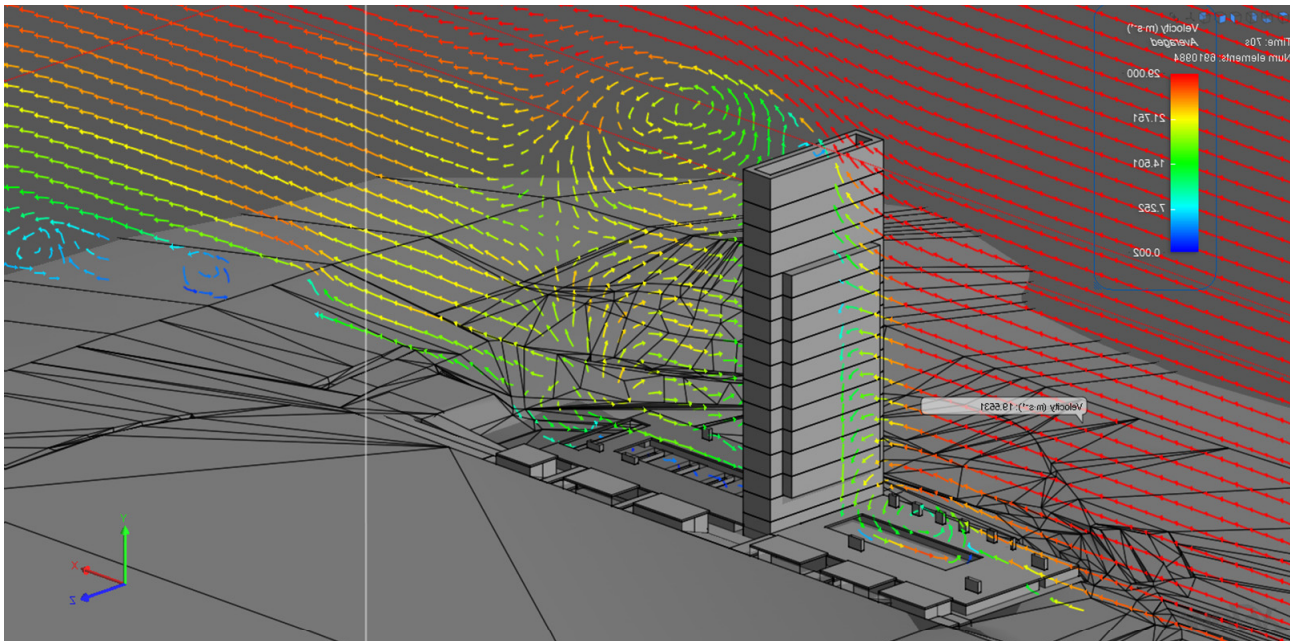


Figura 15. Mapa de vectores de velocidad donde se muestra la intensa circulación vertical paralela a las fachadas y la introducción de corrientes en las plantas inferiores abiertas del zócalo

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al Promotor, Inmobiliaria Espacio, y al equipo de arquitectos autor del proyecto, Fenwick Iribarren Architects las facilidades para la presentación de datos y material gráfico.