

Estudio de los efectos del viento en la Torre Mohamed VI (250m) mediante la integración de ensayos de modelos integral, seccional y de balanza.

Study of the wind effects on the Mohamed VI Tower (250m) by integrating integral, sectional and balance model tests.

José M^a Terrés-Nicoli^a, Christian Mans^b, Marina Hinojosa Lucena^c, Alejandro Bernabeu^d, Javier Gómez Mateo^e, Jesús Román^f

^aDr. ICCP, Máster en Ingeniería del Viento, Prof. Universidad Granada y CEO en Oritia & Boreas: terresnicoli@oritaiyboreas.com

^bDr. Ingeniero Civil, Máster en Ingeniería del Viento. Oritia & Boreas: mans@oritaiyboreas.com

^cICCP, Máster en Energía Renovable, Ingeniero de Proyecto en Oritia & Boreas: hinojosalucena@oritaiyboreas.com

^dICCP, CEO en Bernabéu Ingenieros; abl@bernabeu.net

^eICCP, Ingeniero de Proyecto en Bernabéu Ingenieros; jgm@bernabeu.net

^fArquitecto en Rafael de la Hoz, Director de Proyecto; jroman@rafaeldelahoz.es

RESUMEN

La Torre Mohamed VI, con 250 metros de altura en Rabat, será el edificio más alto de África. El diseño de su estructura y envolvente arquitectónica requiere un estudio detallado de los efectos del viento multi-escala combinando modelos de distinta naturaleza. Se utilizaron ensayos en túnel de viento de modelos de presión integrales, seccionales y de balanza para evaluar cargas y respuestas dinámicas. Se integraron y anidaron los modelos para un diseño fiable y optimizado de la envolvente. Finalmente, un modelo numérico global ayuda a optimizar detalles y futuras modificaciones. Se presentan los detalles metodológicos de la singular integración de metodologías.

ABSTRACT

The 250-meter-high Mohamed VI Tower in Rabat will be the tallest building in Africa. The design of its structure and architectural envelope required a detailed study of multi-scale wind effects combining models of different nature. Wind tunnel tests of integral, sectional pressure and balance models were used to evaluate loads and dynamic responses. The models were integrated and nested for reliable and optimized envelope design. Finally, a global numerical model helps to optimize details and future modifications. Methodological details of the unique integration of methodologies are presented.

PALABRAS CLAVE: Torre Mohamed VI, edificación en altura, efectos de viento en edificación.

KEYWORDS: Mohamed VI Tower, high rise building, wind effects on buildings.

1. Introducción

También llamada la Torre del Banco de África o Torre Mohammed VI, la ‘O Tower’ está llamada

a ser cuando se culmine prevista para 2023, el edificio más alto de África. El desarrollo de la ‘O-

Tower' por el Banco Marroquí de Comercio Exterior (BMCE) se localiza en la ciudad de Rabat, Marruecos. Dicha torre posee 55 plantas y unos 250 metros de altura, albergando un auditorio, oficinas, zonas de reuniones, zona residencial y un hotel de lujo. La Figura 1 muestra una representación de la torre.



Figura 1. Representación de la Torre Mohamed VI [1]

El edificio ha sido diseñado por el Arquitecto Español Rafael de la Hoz junto con el Arquitecto local, Hakim Benjelloun. La estructura es diseño de Bernabeu Ingenieros.

La esbeltez de la edificación resulta en unas propiedades dinámicas de la estructura que hacen que el viento pueda ser dimensionante en relación tanto a Estados Límites Últimos como de Servicio (ELU y ELSS). Adicionalmente se hace precisa la evaluación de la estabilidad aerodinámica frente a fenómenos aeroelásticos como, por ejemplo, vibración inducida por vórtices. La particular volumetría requiere un estudio de detalle, que permita anticipar las presiones esperables, así como la respuesta estructural ante la carga de viento. La normativa existente proporciona información de carácter general, disponiendo de un alcance muy

limitado, normalmente prismáticas para este tipo de estructuras y que no se corresponde con la singular forma de la O Tower. De la misma forma, con sus 250m excede la envergadura regular contemplada por las normas y recomendaciones de estudio. Con este propósito se llevó a cabo un estudio de los efectos del viento que integró ensayos de modelos de distintas técnicas y escalas en túnel de viento de capa límite.

La envolvente arquitectónica está dotada de componentes exentos a modo de parasoles alcanzando, según la posición, envergaduras de varios metros respecto a la piel principal. Analizado en detalle, dota a la envolvente de una estructura aerodinámica que puede resultar favorable en lo relativo a la interacción dinámica (buffeting) y las correspondientes distribuciones de cargas estáticas equivalentes (CEE) de diseño. Sin embargo, la cuantificación eficiente de ese efecto así como determinación de las cargas de diseño en estos elementos es compleja. De hecho, este trabajo es objeto de desarrollos actuales en el estado del arte y objeto de revisiones normativas (cladding and components, en inglés). En este sentido las más recientes versiones de las normas más relevantes como la ASCE 7-22 o Eurocódigo 2025 o NBC 2015 [2,3,4] en lo relativo a la acción del viento comienzan a identificar la necesidad de estudio de estos cada vez más complejos elementos de fachada que representan un reto desde el punto de vista aerodinámico.

La correcta valoración de la acción del viento necesita de la adecuada modelización de la turbulencia propia de la capa límite atmosférica prevista para el sitio. Para obtener cargas de diseño estas normas ASCE o NBC contemplan la modelización física en túnel de viento de capa límite [2,4] y no la modelización numérica (CFD). La redacción de la norma es, en este sentido positiva, es decir hace referencia al detalle de la metodología recomendada (wind tunnel testing) y no a todo lo no recomendado que no es contemplado o referido. Ante las

dudas suscitadas en ocasiones, alguna de las normas más reputadas en materia de efectos de viento, [4] va más allá y reconoce la existencia y utilidad de modelos numéricos para análisis preliminares pero prohíbe su uso para obtener cargas de diseño.

La escala recomendada para la correcta modelización de la capa límite turbulenta en estas normas (ver [2] o [5] para más detalle) es del orden de 1:300 a 1:400. En ese orden se hace posible la correcta modelización de la turbulencia atmosférica en el rango completo de interés del espectro así como asegurar que las escalas integrales de la turbulencia se correspondan a la misma escala de la geometría. No es posible, no obstante, la reproducción de los parosoles de varios metros de envergadura, que como se ha referido, pueden ser determinantes en la naturaleza turbulenta de la acción sobre la estructura y sobre los mismos. Los modelos a mayor escala, tipo seccional, si bien resuelven esto último, presentan limitaciones en lo que a la modelización de la estructura turbulenta se refiere. Particularmente un desfase a baja frecuencia.

Así, se hace necesaria la integración de diferentes modelos, presiones clásico y seccional, tal y como se describe a continuación. Adicionalmente un modelo numérico calibrado a partir de estos resultados, permitió la adaptación del estudio a pequeños cambios ulteriores que no modificaban significativamente la aerodinámica. Por razones de extensión queda fuera del alcance de este artículo.

2. Metodología

A continuación, se describe la particular metodología utilizada en el estudio que integró de forma estructurada los resultados de:

- Modelo de balanza 1:350
- Modelo de presiones 1:350
- Modelo de sección 1:70

Todo el estudio se fundamenta en un modelo probabilístico de clima de viento que forma la base para una estimación direccional de los efectos del viento (ELU, ELS) en función de la intensidad o periodo de retorno.

2.1 Análisis del clima de viento

A partir de los registros de viento del Aeropuerto Internacional de Rabat-Sale se elaboró un modelo climático bivariado en la ubicación. Este modelo fue utilizado para desarrollar un análisis extremal, el cual fue alimentado con los datos de la normativa de viento para establecer una velocidad de viento de diseño. En la Figura 2 se muestra la rosa de los vientos obtenida a partir del modelo, y en la Figura 3 se representan las gráficas del análisis extremal de viento.

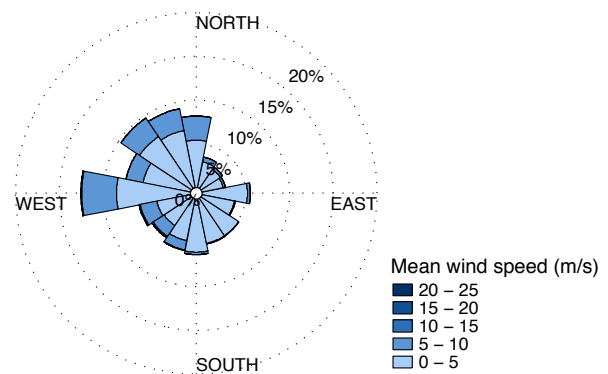


Figura 2. Rosa de vientos calculada a partir de los registros del Aeropuerto Internacional Rabat-Sale.

El modelo probabilístico se fundamentó en la combinación de un modelo meso-meteorológico (WRF) ejecutado a una resolución espacial de 5 km con splines a 1km y un periodo de 30 años adaptado a los valores de la norma [6]. El modelo se calibra a partir de coeficientes dinámicos y krigging mediante medidas del anemómetro referido, Rabat-Sale International Airport (GMME, LAT: 34o3'4"N, LON: 6o45'4"W).

Los resultados del modelo de clima fueron combinados con los ensayos en túnel de viento de capa límite para incorporar el campo de viento esperable en la ubicación en estudio.

En concreto se hizo un tratamiento con identificación de sistemas para los borrascas. A modo de referencia el modelo arrojó valores de media horaria a 10 m de 20.7 m/s para 50 años de periodo de retorno frente a los 25.7 m/s establecidos en la norma nacional [6] y 22.2 m/s, también horaria a 10m para 100 años.

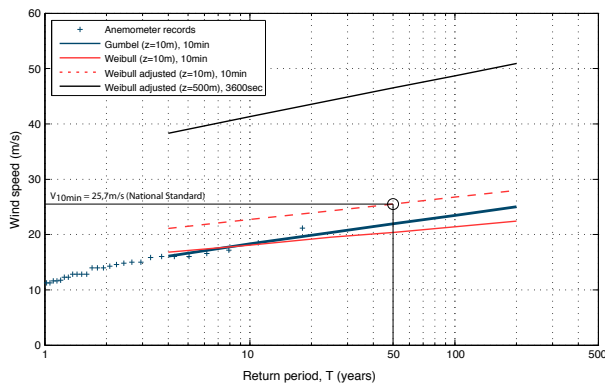


Figura 3. Análisis extremal derivado del modelo climático.

2.2 Ensayos en túnel de viento de capa límite

Las necesidades del proyecto obligaron al desarrollo a corto plazo de un modelo de balanza con el cual determinar las cargas globales en la base de la estructura y poder realizar un prediseño y comprobación conceptual de la tipología estructural. Este modelo permite obtener estimaciones conservadoras de cargas estáticas equivalentes por planta así como comprobar los estados límite de servicio de ocupación de las últimas plantas. Esta metodología, aunque más limitada resulta más eficaz en coste y plazo.

Posteriormente se desarrolló un modelo de presiones para caracterizar el campo de presiones incidente sobre la envolvente arquitectónica, y a partir del cual determinar la carga de diseño. Finalmente se elaboró un modelo de presiones de gran escala o de sección con el cual poder caracterizar con mayor precisión el campo de presiones en las zonas aerodinámicamente más complejas.

Seguidamente se describen los ensayos realizados.

2.2.1. Ensayo del modelo de balanza

Se elaboró un modelo de balanza de la torre a escala 1:350 (Figura 4), el cual se conectó en la base a una célula de carga de muy alta resolución para la medida de las fuerzas y momentos según los seis grados de libertad. El modelo se materializó con una rigidez órdenes superior a las frecuencias de la balanza y con una masa reducida con objeto de evitar componentes inerciales que pudieran contaminar su medida. De esta manera se capturó la carga dinámica resultante de la interacción del flujo de capa límite atmosférica con la envolvente del edificio.

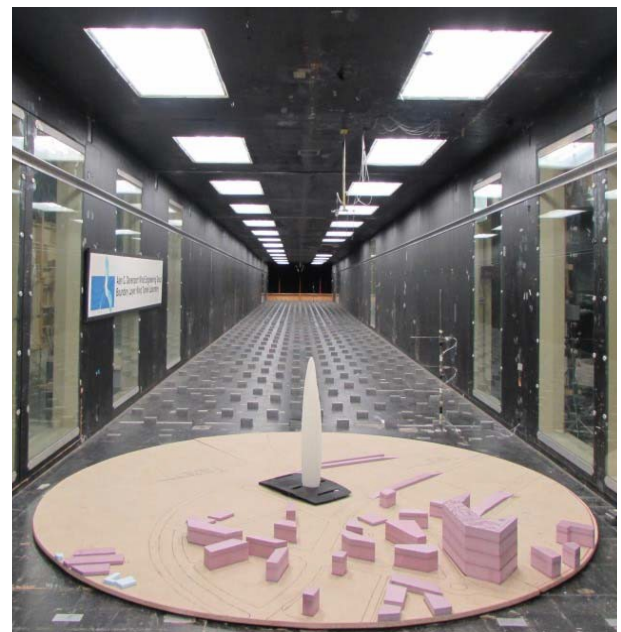


Figura 4. Ensayo del modelo de balanza de la torre en túnel de viento de capa límite.

2.2.2. Ensayo del modelo de presiones

El modelo de presiones fue construido igualmente a una escala de 1:350 e instrumentado en 628 puntos de medida en la torre y el podio (Figura 5). Los puntos se distribuyeron en la torre y en el edificio de podium. La adquisición fue realizada a una frecuencia de muestreo de 400Hz con objeto de detectar las rápidas variaciones de los picos de presiones localizadas en las aristas de la torre.

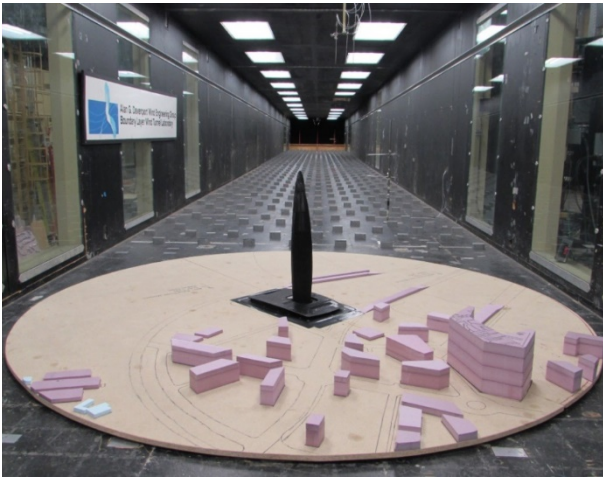


Figura 5. Ensayo del modelo de presiones de la torre en túnel de viento de capa límite.

2.2.3. Ensayo del modelo de presiones de gran escala

El modelo de presiones de gran escala fue construido a una escala de 1:70, y fue instrumentado en 467 localizaciones para la caracterización del campo de presiones.

El modelo corresponde a los 100m superiores de la torre. La Figura 6 (abajo) muestra la vista general del mismo con una disposición para asegurar la adecuada uniformidad en la base del mismo. Las condiciones de turbulencia homogénea se aproximaron, en la medida de lo posible, a los esperados a esta altura promedio. La Figura 6 (arriba) muestra el detalle de los parasoles radiales de varios metros de ala modelizados en el modelo seccional.



Figura 6. Detalle de los parasoles de 5m radiales a 250m en el modelo seccional.

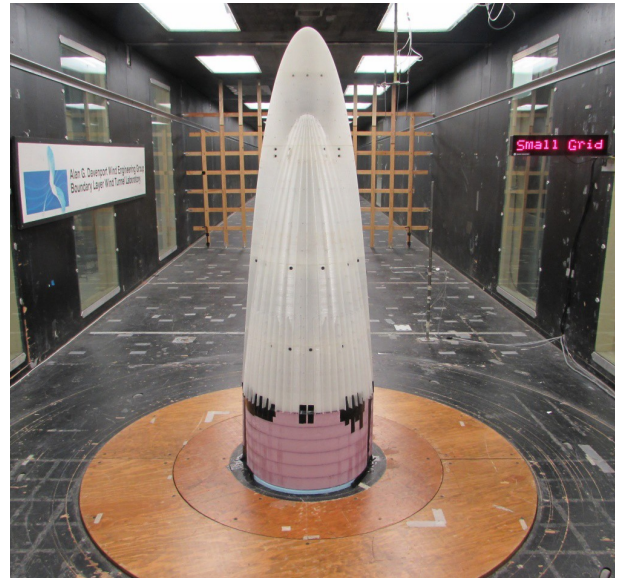


Figura 7. Ensayo del modelo de presiones de gran escala de la torre.

Las medidas realizadas se ajustan mediante un tensor de funciones de transferencia en base a los resultados obtenidos para las ubicaciones correspondientes al modelo de presiones a escala 1:350 de modo que se corrijan lo niveles de las escalas inerciales.

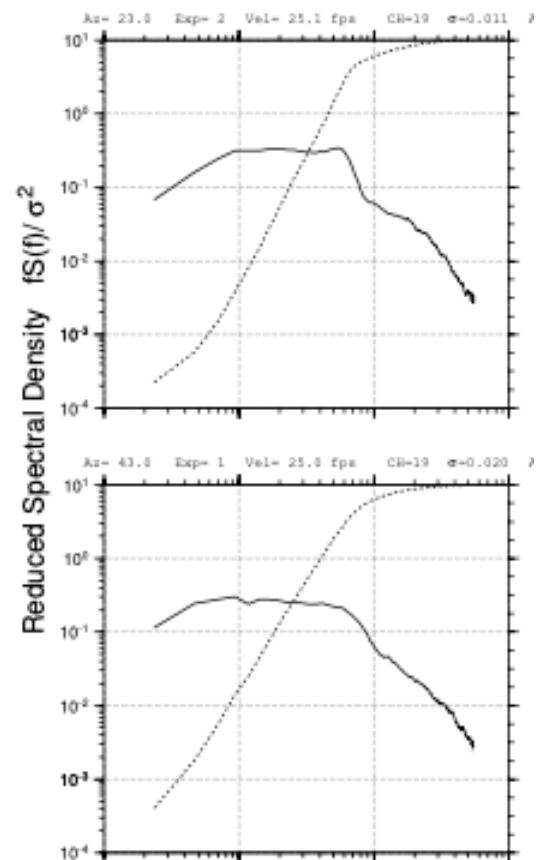


Figura 8. Muestra de espectros anidados. Arriba tras la aplicación de la transformación, abajo el raíz.

Esta metodología se ha aplicado con éxito por este mismo equipo en edificaciones como, por ejemplo, la Torre SyV (ahora PWC) a escala 1:45 en Madrid o en la Torre Triana a escala 1:65, en Sevilla, Figura 9 y 10, respectivamente.

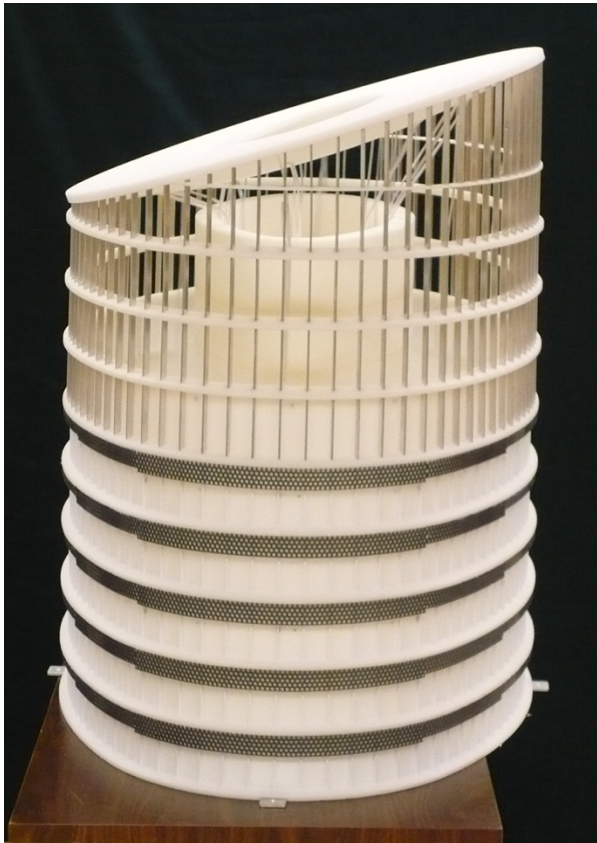


Figura 9. Modelo seccional 1:60, Torre Sevilla (Terrés Nícoli et al, 2010)

En estos estudios así como en el presente el anidamiento de las escalas de turbulencia resulta fundamental para el correcto encaje y predicción de las presiones máximas predichas. En particular mediante la técnica de descomposición parcial se escalan los espectros asegurando el encaje y los picos correspondientes. El procedimiento de anidamiento a partir de los tensores referidos se materializa en puntos comunes definidos así en ambas escalas. Así, la Figura 8 abajo muestra la función de densidad espectral a partir del modelo de escala -capa límite atmosférica-, esto es, 1:350 y arriba, para este punto de anidamiento el resultante en el modelo seccional 1:70.

Esta integración multi-escala permite, por tanto, la estimación de valores de diseño en elementos como pieles exteriores (parasoles, etc...) o superestructuras (cubiertas, petos, equipos ...). Adicionalmente permite la optimización sobre elementos ampliados en detalle mediante el modelo de escala de capa límite (1:350 en este caso). No obstante, requiere de un alcance en el programa de ensayos que incluye

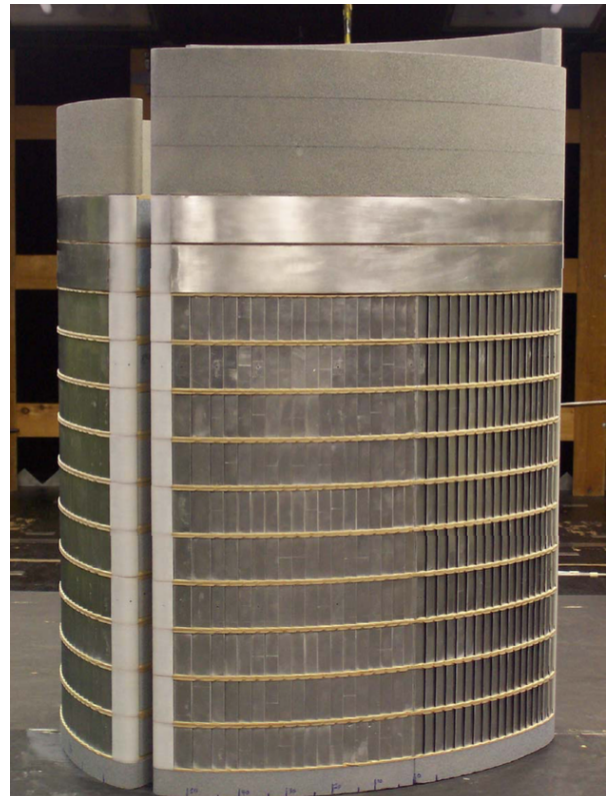


Figura 10. Modelo seccional 1:60, Torre SyV (Inculet et al, 2005)

2. Análisis de resultados

Las medidas del modelo de balanza y modelo de presiones 1:350 se combinaron con el análisis modal facilitado por Bernabeu Ingenieros con el fin de determinar cargas estáticas equivalentes de diseño por planta y cargas totales de diseño de cimentación. Se desarrollaron cálculos para niveles de amortiguamiento inherente del 1,15 y 2% para el confort de la ocupación obteniendo valores aceptables acordes al uso en todos los casos. No

obstante, para ampliar el espectro del uso se recomendó la integración de un sistema de control mediante amortiguadores. Los cálculos de cargas de diseño se realizaron para valores base conforme al modelo estructural así como para variaciones en periodo de -5, -10, -15 y -20%. Las cargas obtenidas en el dominio de la frecuencia se combinaron en un total de 24 combinaciones recomendadas de diseño. Se obtuvieron cargas horizontales en cimentación del orden de 1.5e4 kN, momentos de 1.8-2.3e6 kN·m y torsión de 3.5e4 kN·m para 100 años de periodo de retorno.

En la Tabla 1 se muestran las frecuencias y formas modales de la torre en una de las fases del proyecto.

Como consecuencia de la respuesta a la acción del viento y aun no siento comprometedor se decidió asegurar a nivel de aceptación máxima residencial el grado de confort mediante la integración de un dispositivo de disipación de masa sintonizada.

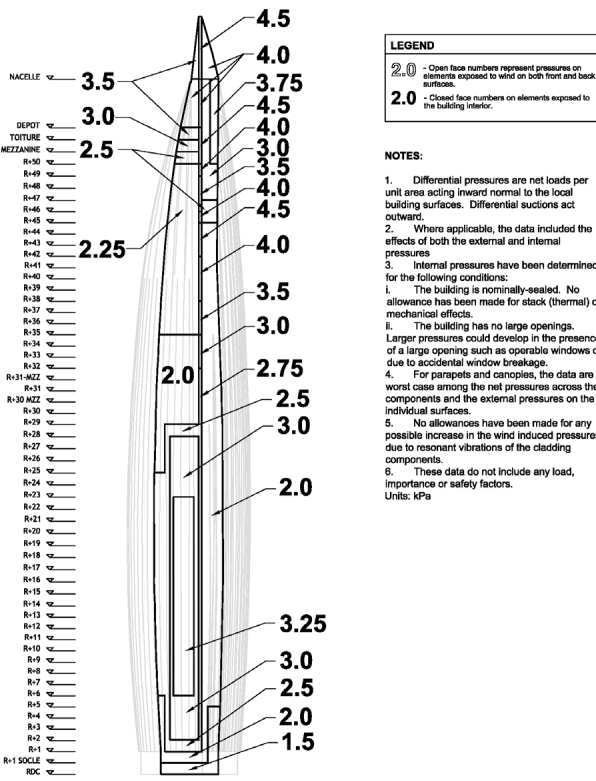


Figura 11. Diagrama de succiones pico en la envolvente arquitectónica de la torre. Elevación oeste.

La Figura 11 muestra un diagrama típico de presiones diferenciales de diseño obtenidas mediante el modelo de presiones 1:350. La forma arquitectónica y su piel dotada de notables parasoles resulta de interés para la respuesta frente a la naturaleza turbulenta de la acción del viento. No obstante la altura de la edificación y estos mismos elementos arrojan diferenciales de diseño próximos a los 5 kPa hacia las partes altas de la edificación así como hacia los cambios de curvatura, meridianos Este y Oeste. Estas notables presiones de diseño justifican la implementación de esta metodología multi-escala que no solo permitan determinar cargas de diseño para estos elementos de compleja geometría y en altura, además de la optimización de la envolvente.

En este sentido, es preciso señalar que normalmente se observa mayor grado de conservadurismo en las estimaciones a partir de la escala de capa límite (1:350) frente a las que habilita parcialmente el modelo seccional (1:70).

Tabla 1. Periodos, frecuencias y forma modales asociadas a los cinco primeros modos de vibración.

Modo de vibración	Período (s)	Frecuencia (Hz)	Forma modal
1	4.58	0.22	Flex. Y
2	3.93	0.25	Flex. X
3	1.35	0.74	2º Flex. Y
4	1.21	0.83	Torsión
5	0.95	1.05	2º Flex. X

La Figura 12 (abajo) presenta una sección tipo en la que se han medido presiones de diseño sobre los elementos exentos (parasoles). Esta sección se ubica (Figura 12, arriba) aproximadamente a unos 200m sobre la rasante. Los valores obtenidos alcanzan presiones de diseño de hasta 5kPa para los parasoles más próximos a los meridianos Este-Oeste.

3. Conclusiones

La Torre Mohamed VI, sita en Rabat, Marruecos, con 250m se ha erigido como el edificio más alto de África. La envolvente arquitectónica del edificio cuenta con un sistema de parasoles de dirección principalmente radial y varios metros de envergadura que, al margen de las cualidades arquitectónicas y de eficiencia energética, presenta un interés en la mejora de la respuesta frente a la acción turbulenta del viento. El estudio de detalle del mismo no es convencional. El edificio ha sido estudiado frente a los efectos del viento mediante una técnica híbrida de modelo seccional y completo de presiones que permite tener en cuenta el efecto de los parasoles. La combinación de ambas metodologías permitieron obtener valores de diseño para cargas distribuidas por planta, cargas en parasoles y elementos de fachada, niveles de aceleración ocupacional en últimas plantas.

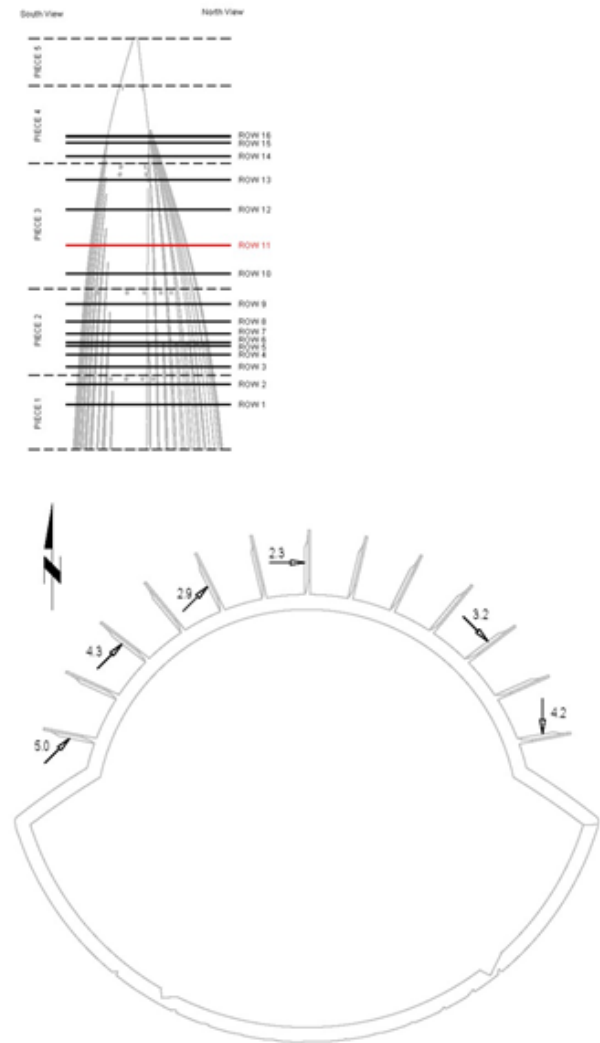


Figura 12. Presiones netas pico determinadas con el ensayo de gran escala para un período de retorno de 100 años.

La integración multi-escala se materializa mediante descomposición de escalas de la turbulencia atmosférica y la subsecuente calibración. Esta técnica, no obstante, requiere de secciones de ensayo de túnel de viento mayores para limitar el área bloqueada de la misma. Sin embargo, el mayor detalle resultante permite una estimación fiable y optimizada de cargas en la envolvente arquitectónica difícilmente derivables mediante metodologías convencionales.

Agradecimientos

Este estudio es un trabajo realizado a través de la asociación oficial permanente de la Universidad de Western Ontario (BLWTL -

UWO) y Oritia & Boreas (O & B), spin off de la Universidad de Granada.

Se agradece la atención prestada por parte de Rafael de la Hoz y Bernabeu Ingenieros en todas las fases del estudio. Se reconoce igualmente la contribución de numerosos miembros del personal de ingeniería y técnicos de O&B y BLWTL-UWO.

Referencias

- [1] Cabinet Hakim Benjelloun / Rafael de la Hoz. CTBUH. 2021.
<https://www.skyscrapercenter.com/building/bank-of-africa-tower/28087>
- [2] ASCE/SEI 7-22 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers. 2022.
- [3] UNE-EN 1991-1-4:2018. Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones de viento. 2018 /2025 (pte. de publicación)
- [4] National Building Code of Canada 2015. National Research Council.
- [5] ASCE 49-21. Wind Tunnel Testing for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers. 2021.
- [6] Ministere des Travaux Publics, Cahier des Prescriptions Communes Applicables au Calcul des Surcharges dues au Vent. Marocco.
- [7] Terrés-Nicoli, JM et al. Estudio de los efectos del viento en la Torre Puerto Triana, Sevilla, 2010.
- [8] Incullet, D. et al. Study of the wind effects on the SyV Tower, Madrid, SS38 BLWTL 2005.