

Diseño de estructuras singulares frente a viento. El Pabellón de España en la Expo de Dubái 2020

Wind design of singular structures. Spain Pavilion for Dubai Expo. 2020

Antonio Manuel Bueno Bleda ^a, Juan Rey-Rey ^b, Jacinto Ruiz Carmona ^c y Flavia Proverbio ^d

^aArquitecto. Máster Estructuras de Edificación. Mecanismo Ingeniería. Jefe de equipo. antonio.bueno@mecanismo.es

^bDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Mecanismo Ingeniería. Director. juan.rey@mecanismo.es

Universidad de A Coruña. Prof. Asociado.

^cDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Mecanismo Ingeniería. Director Técnico. jacinto.ruiz@mecanismo.es

Universidad Politécnica de Madrid. Prof. Asociado.

^dIngeniero Civil. Mecanismo Ingeniería. Jefe de equipo. flavia.proverbio@mecanismo.es

RESUMEN

Este trabajo presenta la metodología llevada a cabo para el análisis frente a viento de la cubierta principal del edificio que albergó el Pabellón de España en la Exposición Universal de Dubái 2020, construida entre 2022 y 2023. La singularidad fundamental del proyecto es la geometría de cubierta y la interacción de las telas tensadas frente a cargas de viento con la estructura espacial de las cubiertas.

ABSTRACT

This work presents the methodology carried out for the wind analysis of the main roof of the Spain Pavilion at the Dubai 2020 World Expo, conducted between 2022 and 2023. The fundamental uniqueness of the project lies in the roof geometry and the interaction of tensile fabrics with its spatial structure under wind loads.

PALABRAS CLAVE: Estructuras singulares, análisis a viento, túnel de viento, telas tensadas

KEYWORDS: Singular structures, wind analysis, wind tunnel, tensile fabrics

1. Introducción

Entre 2018 y 2022, Mecanismo Ingeniería tuvo la oportunidad de participar en el proyecto para el Pabellón de España para la Exposición Universal de Dubái como consultores de estructuras del estudio de arquitectura Temperaturas Extremas Arquitectos [1].

El Pabellón de España para la Exposición Universal de Dubái se configura mediante una plaza abierta en sombra, coronada por una cubierta de conos de diferentes alturas, que permiten protegerla del sol y regular su temperatura interior.



Figura 1. Vista exterior Pabellón (Fuente: Archdaily)

El presente artículo se focaliza en el proceso de análisis de las cargas de viento aplicadas sobre la envolvente del edificio y el comportamiento de la estructura frente a éstas, debido a la singularidad geométrica de su cubierta, formada por un conjunto de conos de hasta 20 m de altura.

El viento es, junto al sismo, la carga ambiental dominante para el diseño de estructuras, por lo que su análisis y entendimiento es clave en el desarrollo de proyectos de edificación [2][3].

La normativa actual prevé una serie de casos de aplicación de cargas de viento sobre estructuras con geometrías convencionales, por lo que para estructuras singulares es necesario recurrir a metodologías y análisis alternativos que permitan determinar el comportamiento a viento de los elementos y su interacción con el entorno.

En este caso, el desarrollo llevado a cabo ha supuesto una secuencia de diferentes etapas de aproximación al diseño de la estructura, permitiendo ir acotando la solución del problema y la verificación por contraste entre resultados experimentales y modelos.

El proceso de análisis realizado frente a las cargas de viento se compone de las siguientes fases:

- 1 – Análisis de viento simplificado mediante áreas proyectadas
- 2 – Análisis de viento mediante herramientas CFD integradas en el software de análisis estructural
- 3 – Análisis de viento mediante realización de ensayo de túnel de viento
- 4 – Coordinación de resultados entre las diferentes disciplinas
- 5 – Dimensionado de estructura

El diseño estructural de los conos considera cuestiones como:

- El funcionamiento de las telas tensadas de cubierta, con comportamiento no lineal tipo vela con despegues a succión en situación de viento.

- Sistemas triangulados basados en las teorías de cúpulas de August Föppl para focalizar la estabilidad isostática de los conos frente a cargas laterales asimétricas.

2. Concepto estructural de los conos de cubierta

La cubierta del edificio se caracteriza por la presencia de 14 conos estructurales, apoyados sobre un conjunto de soportes inclinados libremente distribuidos a lo largo de la planta principal y adecuados a los flujos de movimiento de esta.

Para la estructura de los conos se plantea una red triangulada de barras de acero con parejas impares de diagonales:

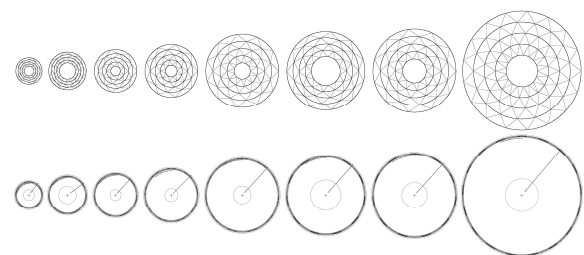


Figura 2. Tamaños y tipologías de estructuras de conos

2.1 Criterios aplicados frente a la pseudo-estabilidad

Se adopta en todos los casos un número impar de lados en el polígono base generador de cada cono, basado en los criterios de cúpulas reticuladas de August Föppl [4].

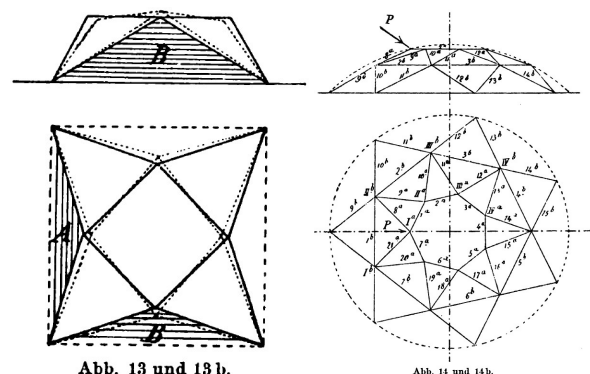


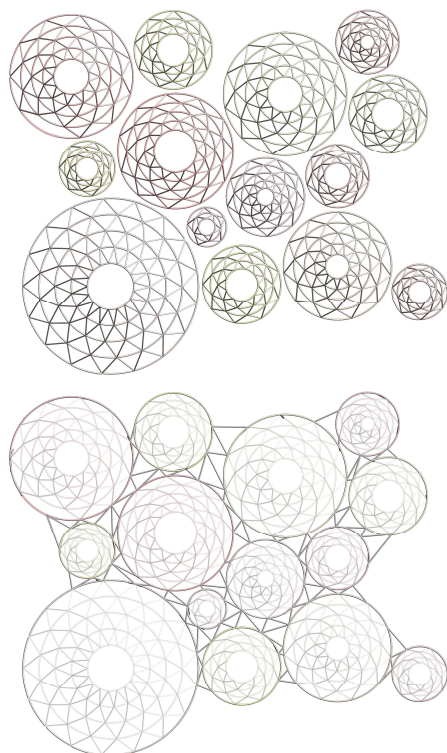
Figura 3. Esquema estructuras pseudo-estables

Su análisis se centra en el estudio de cúpulas inestables: con ciertos patrones de carga aplicados en cúpulas trianguladas regulares de lados pares y barras articuladas, puede generarse inestabilidad estructural debido a torsiones en los triángulos que conforman el conjunto. En cambio, para otros patrones de carga, como una carga vertical distribuida en el anillo superior, la estructura teóricamente presenta un comportamiento estructural satisfactorio. Por lo tanto, se concluye que estas estructuras serían pseudo-estables.

En el caso de cúpulas de múltiples niveles, ocurre el mismo efecto.

2.2 Esquema estructural definido

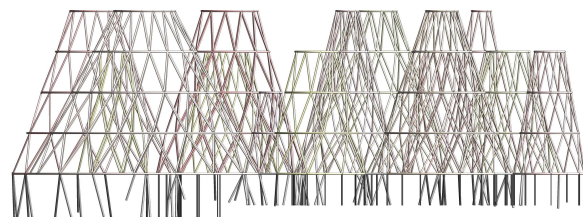
De este modo, la estructura de los conos se resuelve mediante barras de sección circular hueca con un rango de diámetros entre 48 y 193 mm, proyectados como un sistema regular de cúpulas trianguladas de lados impares:



Figuras 4 y 5. Estructura de conos y diafragma inferior de equilibrado de fuerzas

La estructura de cubierta se apoya sobre un conjunto de soportes dispuestos libremente en posiciones adaptadas a los flujos de

movimiento de la plaza situada en la planta baja del edificio.



Figuras 6. Alzado de estructura de cubierta

Esta configuración de apoyos genera disequilibrios en la estructura superior, para lo que se implementa un sistema de diafragma mediante barras trianguladas que recorre los intersticios entre los 14 conos.

3. Análisis a viento preliminar

Los conos se diseñan con una estructura ligera de acero envuelta exteriormente por un sistema de telas tensadas que configura su fachada e, internamente, por una serie de cúpulas ligeras.

Debido a la ligereza del sistema, las cargas permanentes y cargas sísmicas reducen su incidencia e importancia en el comportamiento de la estructura. En cambio, las cargas de viento se vuelven predominantes y gobiernan principalmente su comportamiento.

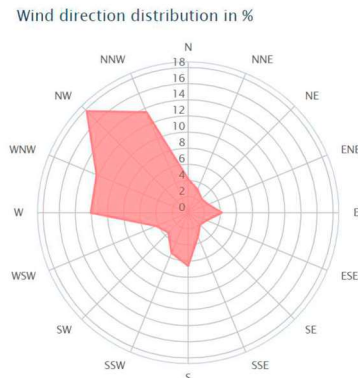
El edificio se localiza en el recinto de la Exposición Universal 2020 de Dubái, situado a una distancia de aproximadamente 10 km del Mar Árabe, en el Golfo Pérsico.

La Normativa que define las cargas de viento es Dubai Wind Code 2013 [5], con una velocidad básica de 30 m/s en referencia a una velocidad media del viento a lo largo de un periodo de 10 min.

Junto al diseño de viento en base al Dubai Wind Code, se analizó la rosa de los vientos del lugar para determinar las direcciones principales a analizar en el modelo de cálculo.

La rosa de los vientos de Dubái muestra que la dirección predominante del viento es el noroeste. Por lo tanto, las direcciones principales de viento que se tomaron en cuenta para el análisis del viento del modelo de estructura son

la noroeste, noreste, sureste y suroeste, coincidentes con las direcciones principales del edificio.



Figuras 7. Rosa de los vientos. Aeropuerto de Dubái

3.1 Estimación de cargas de viento con metodologías convencionales

Los primeros análisis de viento se realizaron en base a las metodologías convencionales recogidas en Dubai Wind Code 2013, basadas en Eurocódigo, así como las recogidas en ASCE 07-16.

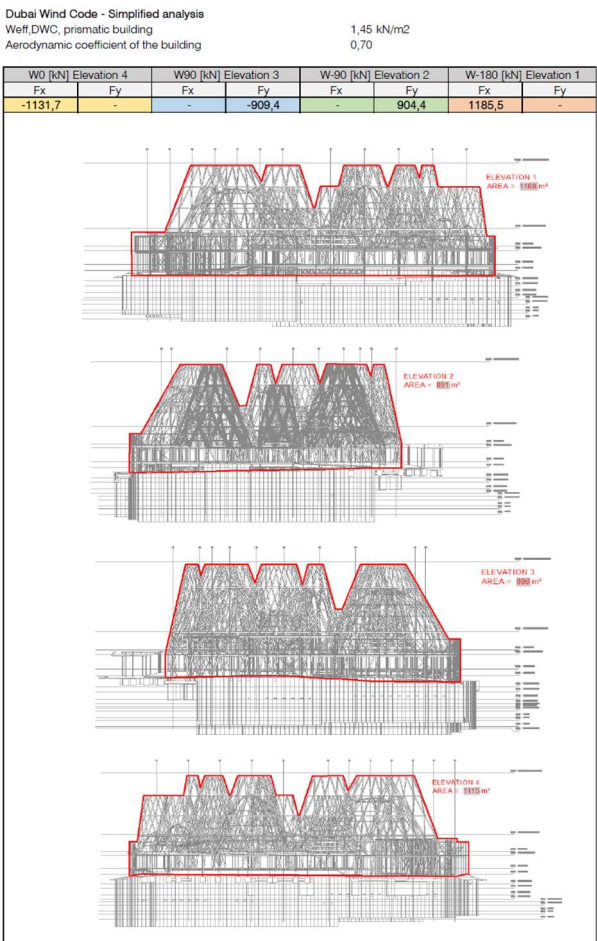


Figura 8. Cortante basal de viento según EC

Dada la complejidad geométrica de la cubierta, se adoptó una metodología de superficies proyectadas, sobre las que se aplica la carga de viento simplificada (1,45 kN/m2) y un coeficiente aerodinámico para considerar la forma de la cubierta (0,70). Se obtuvieron valores de cortante basal de viento de entre 905 kN y 1186 kN.

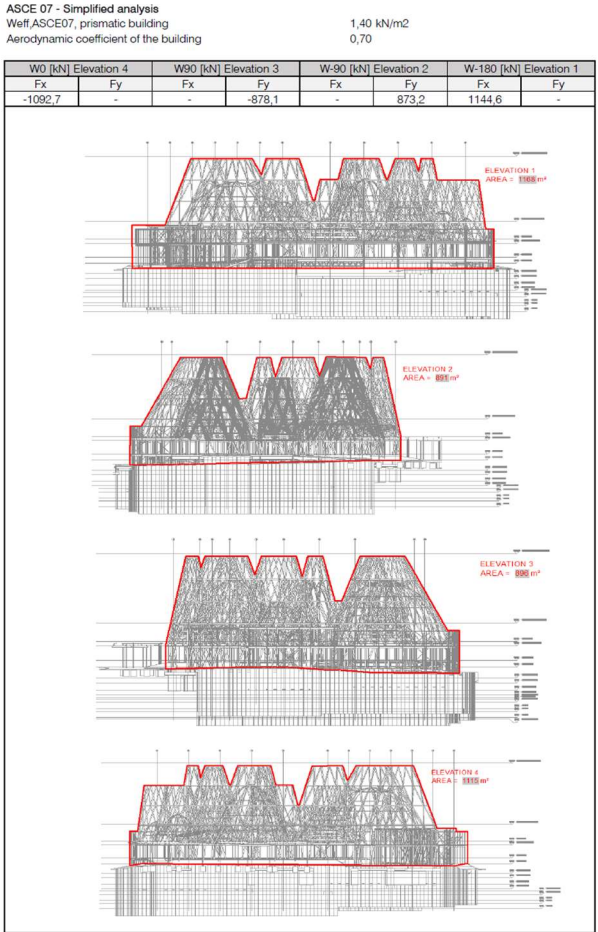


Figura 9. Cortante basal de viento según ASCE 07

Para las condiciones específicas del edificio, se obtienen resultados similares entre ambas metodologías, con un desvío aproximado del 3,5%.

3.2 Modelos de análisis de viento con herramientas CFD

Dada la complejidad de la geometría de cubierta, se desarrolla un análisis de viento preliminar a través de herramientas CFD (Computational Fluid Dynamics) de viento. En este caso, se opta por utilizar la herramienta de análisis CFD implementada en el programa Autodesk Robot

Structural Analysis, software en el que se desarrolló el modelo de cálculo general de la estructura del edificio [6].

Se modelaron las telas como cerramientos no estructurales y se analizó el viento en 8 direcciones con rotación de 45° entre ellas:

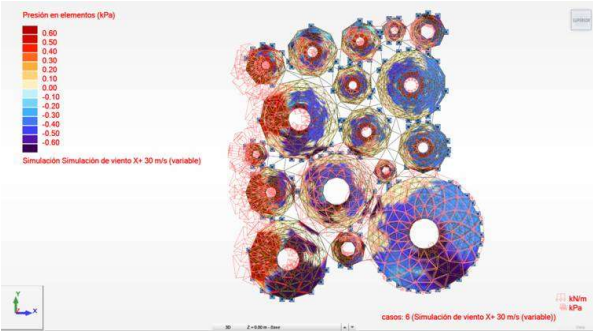


Figura 10. Hipótesis de viento de componente oeste

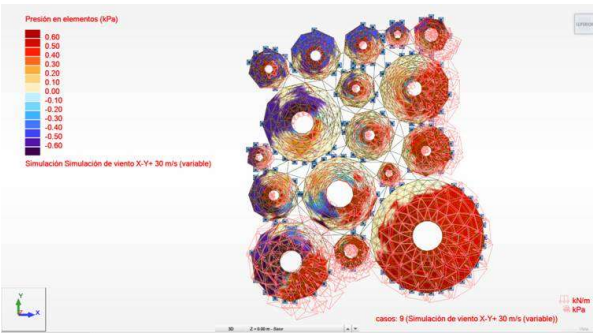


Figura 11. Hipótesis de viento de componente sureste

El modelo de viento CFD realizado generó unos cortantes basales de viento de entre 1007 kN y 1586 kN, hasta un 34% superior al cálculo simplificado realizado inicialmente:

Robot 3D Model - CFD Loads applied - Global base reactions

W0 [kN]		W90 [kN]		W-90 [kN]		W-180 [kN]	
Fx	Fy	Fx	Fy	Fx	Fy	Fx	Fy
-1007.0	-148.7	55.2	-1334.8	-74.8	1585.4	1041.5	-172.4

Figura 12. Cortante basal de viento según CFD Robot

4. Análisis de viento para diseño avanzado de la fachada y de la estructura

4.1 Análisis mediante túnel de viento

Posteriormente, en la fase de Proyecto de Ejecución, se desarrolló un análisis de túnel de

viento a través de una maqueta física, para simular con precisión las presiones y succiones que se genera en la superficie de los conos, valorando su posición relativa y turbulencias. Esta simulación se utiliza para contrastar y validar los resultados del modelo CFD [7].



Figura 13. Modelo real para análisis de túnel de viento (Fuente: UPM)

El análisis fue desarrollado por el Instituto Universitario de Microgravedad “Ignacio Da Riva” IDR de la Universidad Politécnica de Madrid, mediante una maqueta a escala 1:75 [8].

Para garantizar una alta similitud del comportamiento del viento, de su intensidad y de sus turbulencias, se desarrolló una maqueta con la geometría del edificio. Además, se estableció una capa límite mediante la disposición de elementos que simulaban la rugosidad del entorno tras el edificio en el túnel de viento.



Figura 14. Preparación del túnel de viento (Fuente: UPM)

Se instalaron 521 tomas de presión en la superficie de los conos para medir la presión por subdivisión de áreas.

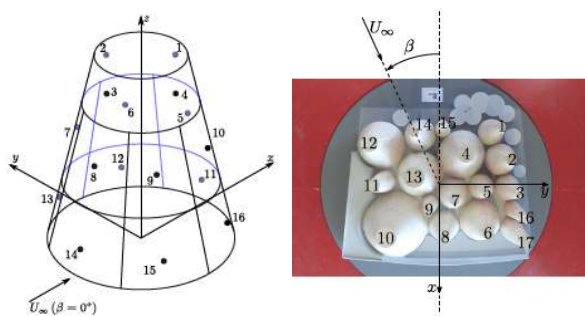


Figura 15. Configuración de puntos de medición
(Fuente: UPM)

El análisis se desarrolló en 36 direcciones de viento, separadas entre sí 10° desde -180° a 170° , obteniendo un conjunto de aproximadamente 35.000 valores de presión para cada uno de los 521 puntos de medición.

Tras este proceso, se desarrollaron modelos de sintetización de datos a través de Grasshopper3D para clasificar los datos y poder aplicarlos en los modelos de cálculo de fachadas de tela tensada y, posteriormente, en el modelo de cálculo de la fachada y de la estructura [9].

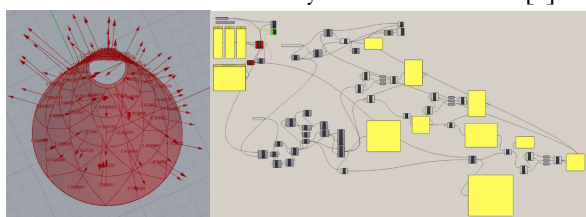


Figura 16. Programa de sintetización de datos

4.2 Modelo de cálculo de fachadas de telas tensadas

Estos resultados obtenidos en el túnel de viento se aplicaron, en primera instancia, sobre los modelos de cálculo de telas tensadas que generan la envolvente de los conos de cubierta.

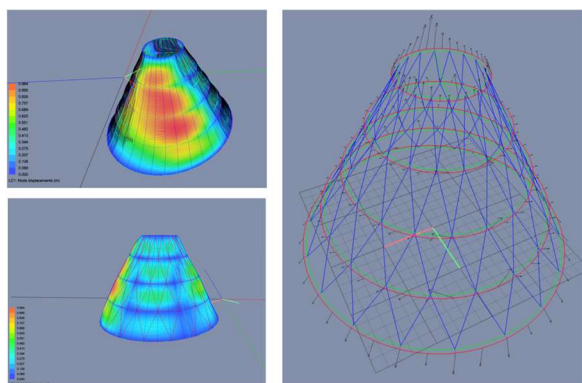


Figura 17. Modelos de cálculo de fachada (Fuente: Lastra&Zorrilla)

Estos modelos se desarrollaron por parte de Lastra&Zorrilla, a través del software IXCube, mediante un procedimiento de cálculo no-lineal que permitió analizar las telas considerando el pretensado inicial, cargas de viento y los posibles despegues de la tela en situación de succión, que favorecería la concentración de tensiones en la base y coronación de los conos, y en su zona a barlovento.

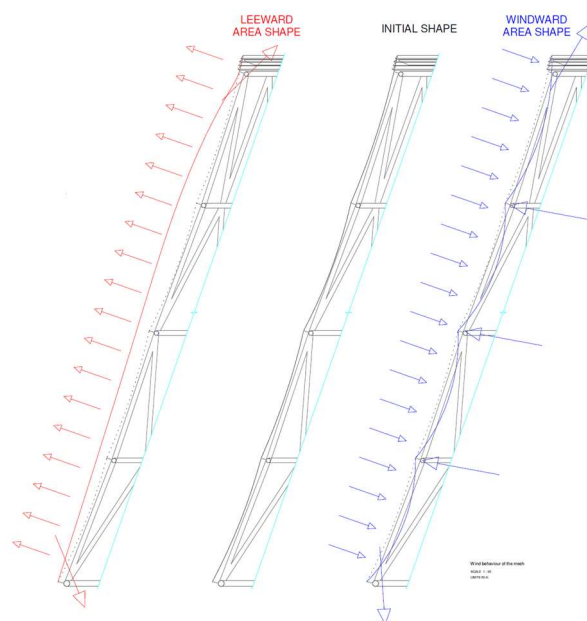


Figura 18. Esquema de cargas de fachada de telas tensadas

4.3 Coordinación de cargas de fachadas de telas tensadas

Las cargas de viento aplicadas por la fachada de tela tensada sobre la estructura se coordinaron a través de un proceso de conexión entre IXCube y Robot Structural Analysis, mediante la edición de los códigos de exportación. Este proceso permitió aplicar las reacciones del modelo de fachada, a través de sus componentes (X, Y, Z) en los nodos de conexión de los anillos exteriores de los conos, con una metodología similar a la expuesta en la referencia [10].

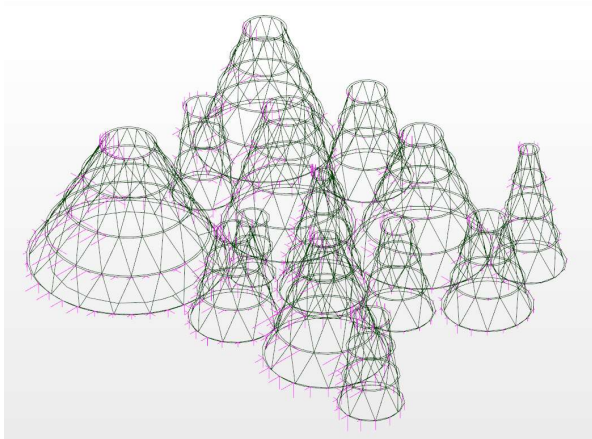


Figura 19. Patrones de cargas de viento en el modelo de cálculo de la estructura

Estos patrones de cargas de viento permitieron un análisis preciso de las presiones y succiones aplicadas por la acción del viento a los conos de la cubierta del edificio, permitiendo el análisis de los esfuerzos y deformaciones para verificar la estabilidad, la resistencia y rigidez del conjunto estructural.

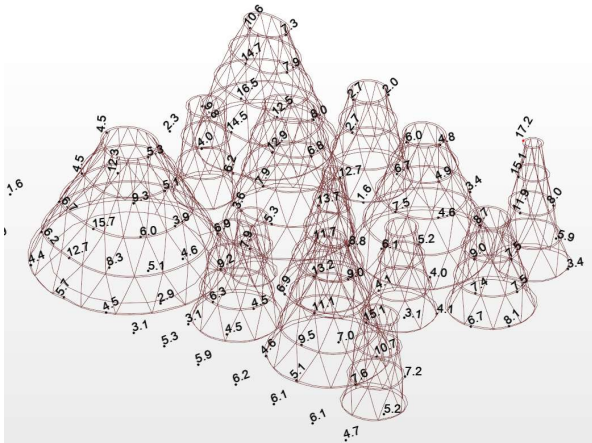


Figura 20. Deformaciones obtenidas de las estructuras espaciales de los conos para una de las direcciones de viento

El modelo de viento a través de los resultados obtenidos en el túnel de viento realizado generó unos cortantes basales de viento de entre 985 kN y 1516 kN, hasta un 28% superior al cálculo simplificado realizado inicialmente:

GLOBAL HORIZONTAL BASE REACTIONS - WIND LOAD VALUES

Robot 3D Model - Wind Tunnel Loads applied - Updated geometry- Global base reactions

W0 [kN]		W90 [kN]		W-90 [kN]		W-180 [kN]	
Fx	Fy	Fx	Fy	Fx	Fy	Fx	Fy
-1008,3	-2,0	34,1	-1515,7	-63,4	984,5	1395,9	-54,4

Figura 22. Cortante basal de viento según CFD Robot

Con estos resultados de comprobación realizados por contraste de las cargas obtenidas del túnel de viento con el cálculo convencional simplificado y el elaborado a través de herramientas CFD digitales, se dio por válida la magnitud de cargas de viento aplicadas a la estructura del edificio.

4.4 Coordinación de cargas de viento en el modelo general de cálculo de la estructura

Finalmente, el modelo de cálculo incluyó todos los elementos de la estructura principal y cargas aplicadas a ésta, lo que permitió el análisis conjunto de todos los aspectos singulares presentes en ella.

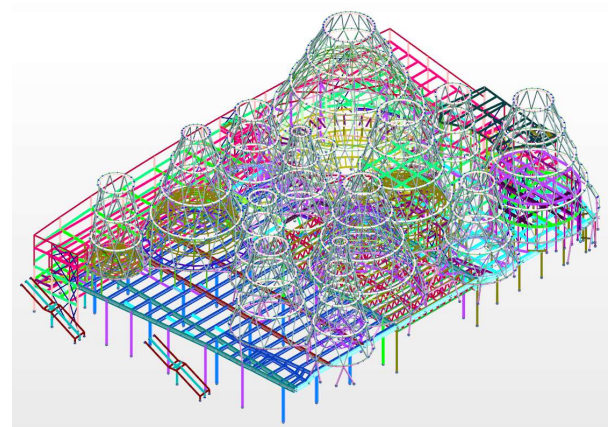


Figura 23. Modelo de cálculo general de la estructura integrando el análisis de viento

5. Modelo BIM de estructura y proceso de construcción

La definición de la estructura se realizó a través de un modelo BIM integrado con el modelo de cálculo, que permitió modelar la estructura espacialmente, a la vez que la elaboración de todos los planos de estructura y mediciones.

Este proceso, basado en el desarrollo tridimensional de la estructura, facilitó de forma muy importante la coordinación entre proyecto y construcción. Permitió que la empresa constructora pudiera disponer de un modelo preciso del que partir para la preparación de su propio modelo de fabricación y montaje.

Conos, diafragma y soportes de apoyo

Cúpulas interiores

Estructura plaza, restaurante y oficinas

Pérgolas de acceso

Estructura de sótano y cimentación

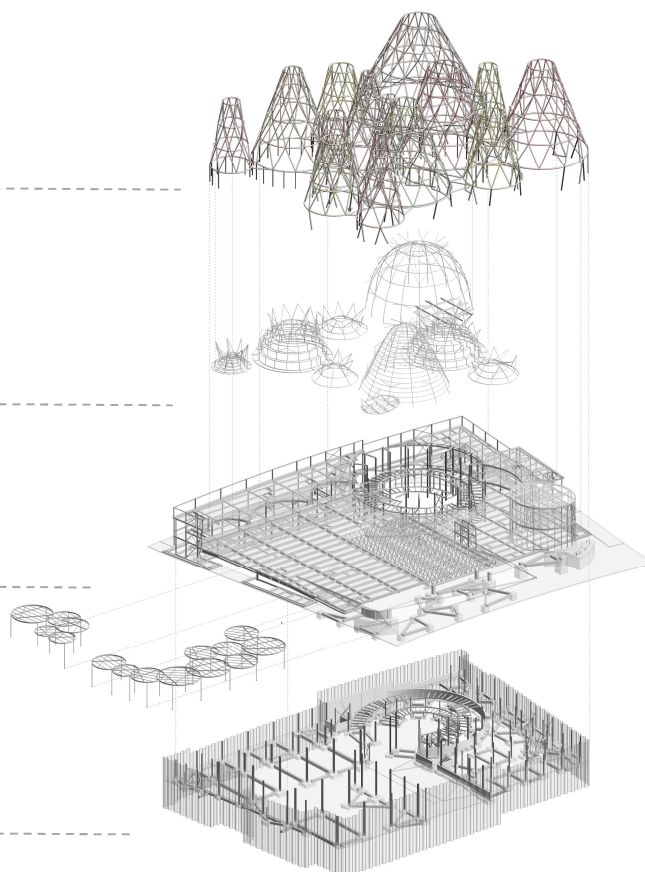


Figura 24. Modelo BIM para el desarrollo de proyecto y proceso de construcción

5.1 Desarrollo de estructura en fase de obra

La estructura de los conos de cubierta se premontó de forma completa en el taller donde se elaboró la estructura metálica, dividiéndola en partes a través de uniones atornilladas para su posterior transporte a obra.

A pie de obra se completó de nuevo el montaje de los conos de menor tamaño para poder montarlos de una vez, mientras que para los conos de mayor tamaño se realizó un montaje por fases en 2 y 3 niveles.

A través de autogruas y sistemas de eslingas se fueron posicionando los conos sobre el diafragma de equilibrado inferior.



Figura 25. Fotografía montaje conos sobre diafragma

La coordinación general de la estructura junto a la de las cúpulas interiores permitió la fabricación integral del conjunto. Del mismo modo, la subdivisión de la estructura para transporte contempló esta integración, lo que permitió reducir considerablemente los tiempos de montaje en obra.



Figura 26. Fotografía montaje cúpula principal

La ligereza y la simetría de las piezas facilitó en gran medida su montaje, pudiendo dirigir su posición y giro a través de un número reducido de cuerdas y medios humanos.



Figura 27. Vista cenital de estructura cono principal



Figura 28. Fotografía montaje cúpula principal

Finalmente, la superposición de la geometría propia de la estructura, de los domos y los acabados de ambos, permitió crear una variedad de ambientes diferentes en cada uno de los conos de una gran calidad estética, como se puede ver en las siguientes imágenes:

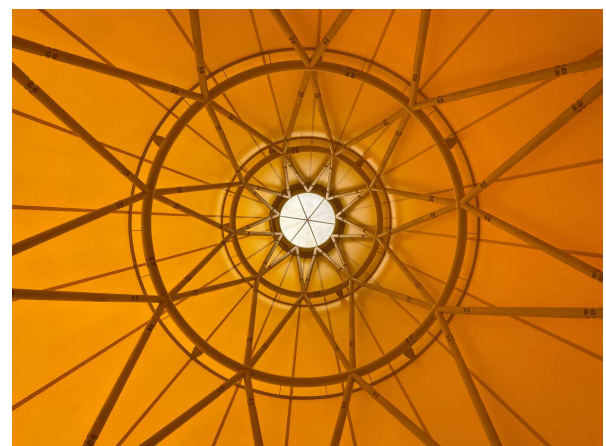
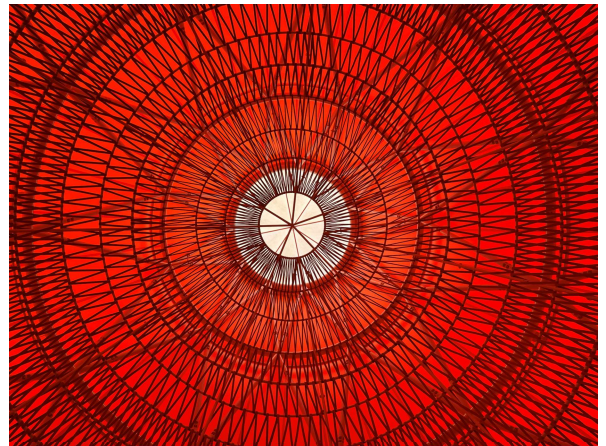


Figura 29 y 30. Vista cenital de dos de los conos

6. Conclusiones

El proceso de diseño estructural de edificios singulares puede conducir a situaciones de carga de viento complejas difícil de abordar desde el cálculo simplificado recogido en las diferentes normativas.

Frente a ello, existen metodologías alternativas de análisis de viento digitales (CFD) y físicas (túnel de viento) que permiten aproximar de manera directa y más precisa los efectos de presión y succión sobre la estructura.

Uno de los aspectos fundamentales de cualquier metodología alternativa que pueda adoptarse, es la calibración de los modelos de cálculo. Para ello, la comparación relativa de los cortantes basales generales de viento es una herramienta muy eficaz para confirmar el orden de magnitud de las cargas aplicadas a la estructura.

La elección de la metodología deberá además basarse en la experiencia previa sobre tipologías geométricas similares, de forma que el análisis CFD mediante herramientas digitales pueda ser contrastado y así se puedan precisar sus resultados.

Agradecimientos

Los autores del artículo deseamos agradecer al equipo técnico que participó a lo largo de todo el proyecto y la obra, con mención especial al estudio de arquitectura de Temperaturas Extremas Arquitectos, por su visión creativa y compromiso con el diseño arquitectónico y el diseño estructural, y al Estudio Lastra & Zorrilla por su colaboración estrecha en el diseño de las fachadas de tela tensada y su interacción con la estructura.

Referencias

[1] Amann, Cánovas & Maruri. Pabellón de España, Expo Dubái 2020. Arquitectura Viva (2021) 239 pp. 36-39.

[2] John Holmes. Wind Loading Structures, 2nd Edition (2007)

[3] Emil Simiu, DongHun Yeo. Wind Effects on Structures, modern structural design for wind, 4th Edition (2019)

[4] Föppl, August. Das Fachwerk im raume. 1894.

[5] Dubai Wind Code 2013, Dubai Municipality

[6] Validation brief for the Robot Structural Analysis Professional wind simulation tool. Autodesk Robot. (2015)

[7] Phillips D. A.Soligo M. J. Will CFD ever replace wind tunnels for building wind simulations? International Journal of High-Rise Buildings (2019)

[8] Instituto Universitario de Microgravedad "Ignacio Da Riva" IDR/UPM, Universidad Politécnica de Madrid E.T.S.I.Aeronáutica y del Espacio, E-28040 Madrid. <http://www.idr.upm.es/>

[9] Estrado E., Turrin M., and Eigenraam P. Optimization of complex-geometry high-rise buildings based on wind load analysis (2023)

[10] Ortega Cornejo, M.; Lacoma Aller, L. M. Análisis de las acciones de viento en edificios singulares. Aplicación al Hotel Vela de Barcelona. Hormigón y Acero. (2009) 60, 251