

Estudio aerodinámico de la singular doble piel exterior del Museo Doctora Leila Mezian (Casablanca)

Aerodynamic study of the unique double outer skin of the Dr. Leila Mezian Museum (Casablanca)

Marina Hinojosa Lucena^a, José María Terrés-Nicoli^b Manuel Benítez Velasco^c,

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Oritia & Boreas S.L. Coordinadora de proyectos. hinojosalucena@oritiayboreas.com

^b Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Oritia & Boreas S.L. Director ejecutivo. terresnicoli@oritiayboreas.com

^c Ingeniero de Civil. Oritia & Boreas S.L. Ingeniero de proyecto. benitezvelasco@oritiayboreas.com

RESUMEN

El Museo Doctora Leila Mezian (Casablanca) dispone de una doble piel exterior singular constituida por piezas prismáticas trapezoidales de doble inclinación y orientación variable. Éstas dotan al edificio de una aerodinámica poco convencional, diferente a lo regulado en normativa, que hace necesario un estudio específico de los efectos del viento. Se desarrolló un estudio que integró ensayos en túnel de viento de todo el edificio junto al entorno urbano circundante y ensayos a gran escala. Como resultado de la combinación de ambos ensayos, se obtuvieron presiones y cargas de diseño para la piel exterior. El trabajo se completó con un estudio analítico de evaluación de la vulnerabilidad frente a fenómenos aeroelásticos.

ABSTRACT

The Doctor Leila Mezian Museum (Casablanca) has a unique double outer skin consisting of trapezoidal prismatic pieces with a double inclination and variable orientation. These provide the building unconventional aerodynamics, different from what is regulated by the standards, which made it necessary to carry out a specific study of the effects of wind. A study was developed that integrated wind tunnel tests of the entire building together with the surrounding urban environment and large-scale tests. As a result of the combination of both tests, design pressures and loads for the outer skin were obtained. The project was completed with an analytical study to assess the vulnerability to aeroelastic phenomena.

PALABRAS CLAVE: Estructuras y envolventes, fachada, porosa, VIV, vibración, viento.

KEYWORDS: Structures and envelopes, façade, porous, VIV, vibration, wind.

1. Introducción

El Museo Doctora Leila Mezian de Casablanca es un edificio singular en un entorno urbano, con una envolvente arquitectónica que presenta un notable desarrollo espacial de doble piel. La piel exterior está formada por una serie

de prismas de doble inclinación de sección trapezoidal y orientación variable. Estas piezas filtran la luz, dotando al edificio de una aerodinámica poco convencional que difiere de la establecida en normativa. Es por ello que se

llevó a cabo un estudio de los efectos del viento sobre el edificio, con especial atención a dichos elementos de la piel exterior.



Figura 1. Museo Doctora Leila Mezian (Casablanca).

De este modo, se ha desarrollado un estudio que incorpora ensayos en túnel de viento de capa límite de todo el museo y de los elementos urbanos circundantes, así como ensayos a gran escala de los elementos que constituyen la piel exterior. Los primeros permiten modelizar con precisión la turbulencia atmosférica de la capa límite incidente y la generada por el edificio y los elementos de la envolvente singular. Por otro lado, los ensayos a gran escala en flujo uniforme con baja turbulencia permiten determinar los coeficientes aerodinámicos de los elementos prismáticos de la piel exterior en su disposición aislada y agrupada para diferentes combinaciones y orientaciones representativas. Tras la combinación de ambos ensayos, se obtienen las cargas aerodinámicas de diseño para ambas pieles.

El trabajo se completa con un estudio analítico de la estabilidad aerodinámica de las lamas de la piel exterior. Este estudio evalúa la vulnerabilidad del sistema frente a los fenómenos aeroelásticos para velocidades de diseño. Más concretamente, se estudian las velocidades críticas y la estabilidad ante

vibraciones inducidas por vórtices, galloping, flutter y divergencia torsional.

2. Clima de viento

El estudio de clima de viento permitió estudiar las particularidades del emplazamiento del proyecto, estableciendo tres capas límite atmosféricas diferenciadas y obteniendo las funciones matemáticas de probabilidad bivariadas que se utilizaron en el análisis del resto del proyecto. A través del modelo climático se obtuvieron valores inferiores a los establecidos por la norma marroquí, por lo que se aplicó la recomendación normativa de velocidad del viento de ráfaga de 3 segundos de 39 m/s a 10 m de altura para el periodo de retorno de 50 años.



Figura 2. Tipos de exposición empleados.

3. Estudio de presiones de museo y entorno

3.1 Modelado del lugar y del viento

Se diseñó y construyó un modelo del museo y del entorno a la escala de 1:150.

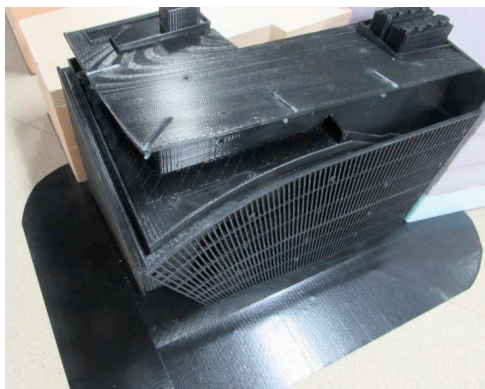


Figura 3. Modelo a escala 1:150 del museo Doctora Leila Mezian (Casablanca).

Este modelo reproduce en detalle la geometría del edificio a estudiar, con 117 puntos de medición de la presión convenientemente distribuidos.

Igualmente se elaboró un modelo de proximidad, que reproducía todos los detalles aerodinámicamente significativos en un radio de 180 m.

A su vez, en el túnel de viento se establecen modelos genéricos del terreno a barlovento, modelizados ajustando las alturas apropiadas de los bloques genéricos de rugosidad y las espiras generadoras de turbulencia para reproducir las características del viento representativas del emplazamiento del proyecto.

3.2 Ensayos en túnel de viento de capa límite

La herramienta básica utilizada para el estudio es el túnel de viento de capa límite.

El modelo se ensayó en condiciones de flujo de capa límite turbulento para 36 direcciones de viento.



Figura 4. Ensayos en túnel de viento de capa límite del museo Doctora Leila Mezian (Casablanca).

3.3 Resultados de presiones locales

Se llevaron a cabo mediciones de las presiones y succiones inducidas por el viento en el museo, para los 117 puntos de medida ubicados en el modelo rígido de presiones a escala 1:150, obteniendo de esta forma las presiones externas y presiones diferenciales sobre la envolvente.

Se obtuvieron las presiones y succiones diferenciales de diseño para un periodo de retorno de 50 años. Los resultados se proporcionaron en valores numéricos y a través de diagramas.

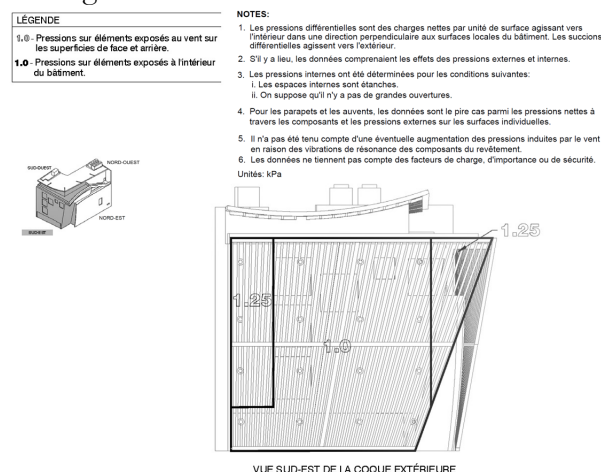


Figura 5. Ejemplo de resultados de diagrama de presiones diferenciales zonales para la fachada sureste.

La presión diferencial neta máxima (presión que actúa hacia el interior) y la succión diferencial neta máxima (presión que actúa hacia el exterior), para un periodo de retorno de 50 años, correspondieron a 1.25 kPa y 1.75 kPa,

respectivamente. La zona con mayor presión diferencial neta se encuentra en el lado suroeste del edificio, cerca del borde superior. La zona de mayor succión diferencial neta se encuentra en la esquina oriental del voladizo de la cubierta. La zona de mayor succión de la fachada corresponde a 1.5 kPa y se encuentra a lo largo del borde derecho de la vista noroeste y en varias zonas de la cubierta.

4. Estudio a gran escala

4.1 Introducción

Los ensayos a gran escala permiten evaluar la variación de la acción media del viento sobre las piezas de la piel exterior del edificio para diferentes disposiciones y ángulos de incidencia del viento, caracterizando los coeficientes de fuerza y de momento.

Los elementos longitudinales que componen la fachada porosa del edificio están formados por un tubo circular de acero al que se fijan piezas de piedra, generalmente de 3 m de longitud. Estas piezas se disponen en ángulos de 0° , 23° y -23° respecto a un plano vertical perpendicular a los muros de la fachada.

4.2 Diseño y construcción del modelo a gran escala

Para el ensayo se diseñó y construyó un modelo compuesto por siete de estas piezas, dispuestas en paralelo y separadas por una distancia de 450 mm (escala real). Se eligió una escala geométrica igual a 1:3 para obtener mediciones de las fuerzas aerodinámicas de la mayor amplitud posible, en favor de la precisión del ensayo, sin producir un bloqueo excesivo de la sección del túnel que pudiera dar lugar a una alteración del flujo. En todos los ensayos realizados, el bloqueo de la sección del túnel fue inferior al 10 %.

En cuanto a la construcción del modelo, se utilizó poliestireno extruido para la geometría

de las piezas y se comprobaron las dimensiones de las piezas acabadas. Para el armazón estructural de las piezas, se utilizaron tubos rígidos de PVC para los elementos fijados en ambos extremos y tubos de aluminio para el elemento instrumentado fijado en uno solo de sus extremos, habiéndose comprobado la robustez y rigidez de estas piezas para no excitar los modos de vibración propios del modelo durante la ejecución de los ensayos.



Figura 6. Modelo construido de las piezas que constituyen la piel exterior de la fachada.

4.3 Ensayos en túnel de viento

Los ensayos realizados se agrupan en 6 configuraciones, caracterizadas por la disposición o rotación de cada parte del modelo.

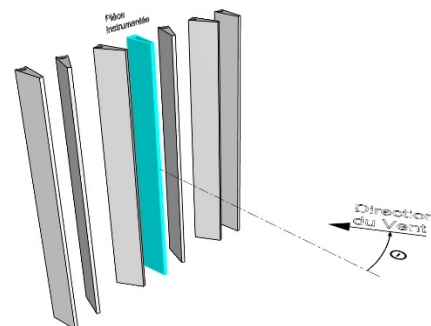


Figura 7. Ejemplo de una de las configuraciones ensayadas.

El objetivo de los ensayos era obtener los coeficientes aerodinámicos de las fuerzas (CF_x , CF_y) y momentos (CM_z) que actúan sobre la parte instrumentada del modelo. Para ello, se realizaron un total de 26 ensayos, agrupados en las 6 configuraciones mencionadas anteriormente, en los que se varió la disposición

o rotación de las partes del modelo, la velocidad del viento utilizada en el ensayo y la dirección del viento θ . Cada uno de estos ensayos se realizó en condiciones de flujo de baja turbulencia, caracterizados por una intensidad de turbulencia del 1% para las tres componentes de velocidad, durante un periodo de muestreo de 180 segundos, tiempo suficiente para garantizar la estabilidad de las medidas adquiridas por el sensor de fuerza. Este sensor, capaz de medir en los tres grados de libertad de interés, a alta frecuencia (1612.9 Hz), fue calibrado con el resto del sistema de adquisición para el rango de fuerzas y momentos previstos en los ensayos.

Durante la ejecución de los ensayos se adquieren las series temporales brutas de las fuerzas y momentos medidos por el sensor, que posteriormente se procesan para obtener los valores de fuerza y momento utilizados en el cálculo de los coeficientes asociados.

$$CF_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho U^2 LB} \quad (1)$$

$$CF_y = \frac{F_y}{\frac{1}{2}\rho U^2 LB} \quad (2)$$

$$CM_z = \frac{M_z}{\frac{1}{2}\rho U^2 LB^2} \quad (3)$$

L corresponde a 3 m (longitud a escala real), B se adopta igual a 0.12 m (anchura de referencia), ρ es igual a 1.25 kg/m³ (densidad) y U corresponde a la velocidad de referencia.

La Tabla 1 muestra los coeficientes de fuerza y momento resultantes de los ensayos.

Tabla 1. Resultados de coeficientes de fuerza y de momento.

Config.	Direc. viento (°)	CF _x	CF _y	CM _z
Der. Central 0°	0	-0.86	0.64	-0.34
Der. Central 0°	10	-0.69	-0.98	-1.41
Dif. Central 0°	0	-1.20	1.27	0.08
Boc. Central 0°	0	-1.25	0.50	-0.71
Conc. Central 0°	0	-1.50	0.76	-0.47
Conc. Central 23°	0	-2.17	8.65	11.71
Conc. Central 23°	10	-2.30	8.89	7.40
Conc. Central 23°	20	-2.06	7.43	6.32
Conc. Central 23°	40	-1.57	3.15	5.18
Conc. Central 23°	60	0.64	-4.44	-5.93
Conc. Central 23°	90	0.11	-0.26	-0.28
Ind. Central 23°	0	-1.87	6.10	7.64

La configuración Concentrador - Central 23° presenta los valores más elevados de coeficientes de fuerza y momento, lo que la convierte en una de las configuraciones más interesantes. La figura 8 muestra la variación de los coeficientes de fuerza y momento para esta configuración en función de la dirección del viento.

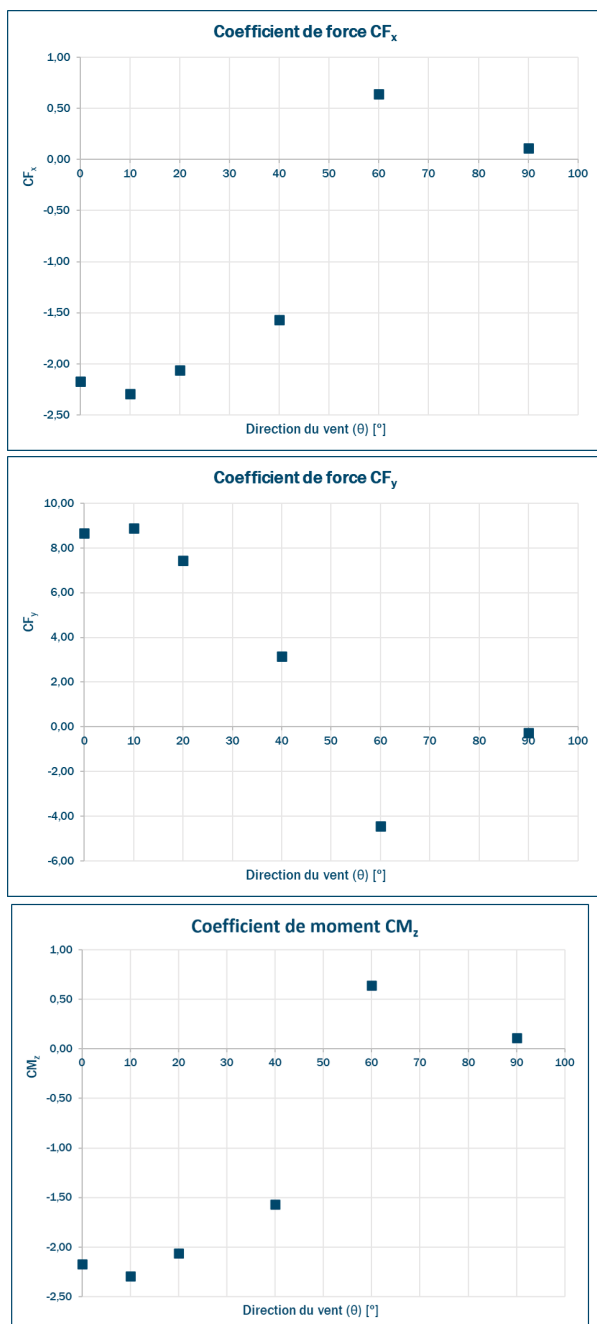


Figura 8. Variación del coeficiente CF_x , CF_y y CM_z con la dirección del viento para la configuración Concentrador-Central 23°.

5. Estudio de estabilidad aerodinámica

5.1 Introducción

Se estudió analíticamente la estabilidad aerodinámica de los elementos prismáticos que componen la piel exterior. Más concretamente, se estudió la vulnerabilidad a las vibraciones

inducidas por vórtices (VIV), galloping, flameo y divergencia torsional. El análisis se basó en bibliografía y las recomendaciones de la norma (Eurocódigo) y la experiencia especializada del equipo en este campo.

5.2 Análisis

Se llevó a cabo un análisis modal y desarrollo de un modelo estructural donde se analizaron los elementos longitudinales de la fachada. Para ello se consideraron las propiedades estructurales de los elementos.

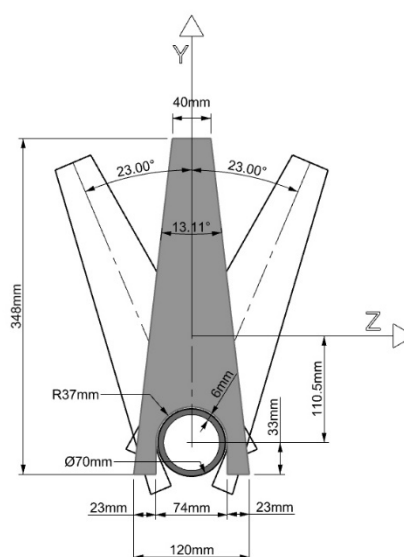


Figura 9. Sección transversal de los elementos analizados.

El número de apoyos con los que cuenta el elemento (4 ó 5) y la distancia entre ellos, caracteriza al mismo a efectos dinámicos, clasificando los elementos de fachada en tres categorías. La primera de ellas denominada como *5.5 m*, se identifica por la distancia entre los apoyos de la mayor parte de los elementos de fachada, esta categoría cuenta con 5 apoyos. La segunda, *11.0 m*, se asocia a los elementos de la fachada sudeste que presentan dicha distancia máxima entre apoyos, esta categoría cuenta con 4 apoyos. Y la tercera categoría, identificada como *Pórtico de Perfiles*, incluye los elementos ubicados en la región de la fachada próxima a la entrada principal del edificio, esta categoría cuenta con 4 apoyos.

Dada la amplia casuística que pueden manifestar los elementos de fachada, se estudiaron tres casos para cada una de las categorías de elementos de fachada. En el primer caso (original) las piezas de piedra se disponen con el sentido de giro que presenta uno de los elementos de fachada de la categoría en cuestión, elegido como representativo. Para el segundo caso (patrón) las piezas se disponen otorgándoles giros de acuerdo a la secuencia o patrón “0°, 23°, -23°, 0°, 23°...”. Finalmente, para el tercer caso (recto) las piezas de piedra se disponen sin giro alguno, es decir, todas y cada una de ellas alineadas.

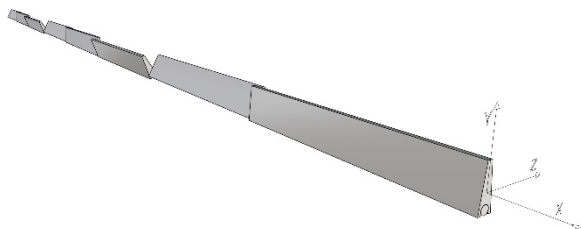


Figura 10. Ejemplo modelo estructural vista 3D y sistema de coordenadas del elemento analizado de la categoría 5.5 m (caso “patrón”).

De los resultados del análisis cabe destacar que el modo fundamental corresponde en todos los casos al primer modo de flexión predominante en la dirección “z”, presentando éste frecuencias entre 2 Hz y 3 Hz para las categorías 11.0 m y Pórtico de Perfiles, mientras que la categoría 5.5m muestra frecuencias entre los 6 y 7 Hz. Por su parte, el primer modo de torsión se manifiesta entre los 129 Hz y 255 Hz.

Se comprobó que las lamas de sección trapezoidal son estables para los fenómenos de autoexcitación (galopping, flameo y divergencia torsional) para valores muy superiores a las velocidades de diseño.

En cuanto a las vibraciones autolimitantes inducidas por los vórtices, se han identificado valores de aparición inferiores a los del diseño. Estas vibraciones no guardan relación alguna con los estados límite últimos, y el análisis de los detalles de la ubicación y la tipología estructural

conduce a estimaciones de las amplitudes de vibración y las cargas inerciales correspondientes que no comprometen el diseño.

$$v_{crit} = \frac{bf_s}{St} \quad (4)$$

b: anchura de referencia.

St: número de Strouhal.

f_s: frecuencia de desprendimiento del vórtice.

En la **Error! Reference source not found.** se presenta la velocidad crítica (velocidad media diezminutal en el elemento) para vibración inducida por desprendimiento de vórtices, asociada a un viento perpendicular a los paramentos de fachada y para el primer modo de flexión en “z”. El cálculo de estas velocidades se ha efectuado con la menor frecuencia obtenida para cada categoría y el modo en cuestión, al ser ésta la más restrictiva.

Tabla 2. Velocidades críticas para vibración transversal inducida por desprendimiento de vórtices.

Categoría	v _{crit} (m/s)
5.5m	19.5
11.0m	6.0
Pórtico de Perfiles	9.1

Se aconsejó especial cuidado con las juntas y fijaciones que favorecen la disipación absoluta de estas vibraciones, así como caracterizar la amortiguación inherente a los prototipos.

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 Omteq Ingenieuru, responsable de la estructura 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] Terrés-Nicoli JM et al. Study of the wind effects on the external façade. Musee Docteur Leila Mezian, Casablanca. OMT02. 2022. Oritia & Boreas.
- 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] Ministère des Travaux Publics, Cahier des Prescriptions Communes Applicables au Calcul des Surcharges dues au Vent. Marocco.