

Museum of World Cultures, el edificio más icónico del nuevo Royal Art Complex (Riyadh)

David Rodríguez Muñoz^a, Pietro Bartalotta^b, Belén Ballesteros Molpeceres^c

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Estudio de Ingeniería. Jefe de Proyecto. david.rodriguez@mc2.es

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Estudio de Ingeniería. Jefe de Proyecto. pietro.bartalotta@mc2.es

^c Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Estudio de Ingeniería. Jefa de Proyecto. belen.ballesteros@mc2.es

RESUMEN

La gran pirámide del Museum of World Cultures está llamada a ser el elemento más reconocible del nuevo complejo de las artes que se está edificando en los terrenos del antiguo aeropuerto de Riyadh (Arabia Saudí), gracias a sus más de 100 m de altura sobre el suelo y a su vistosa inclinación en dirección al este. El gran volumen se genera gracias a una doble piel estructural en coincidencia con cada uno de los planos, con espesor estructural suficiente para soportar las elevadas presiones de viento obtenidas en los ensayos aerodinámicos. Los forjados interiores, con luces de hasta 35 m, se encuentran dimensionados por control de vibraciones para asegurar el confort de los usuarios.

ABSTRACT

The great pyramid of the Museum of World Cultures is set to be the most recognisable element of the new arts complex being built on the site of the former Riyadh airport (Saudi Arabia), thanks to its height of more than 100 m above the ground and its striking volume sloping towards the east. The large volume is generated by a double structural skin coinciding with each of the external planes, with enough lever arm to withstand the high wind pressures obtained in aerodynamic tests. The inner floors, with spans of up to 35 m, are dimensioned by vibration control to ensure user comfort.

PALABRAS CLAVE: pirámide, desplome, acero, túnel de viento, celosía, interacción suelo-estructura

KEYWORDS: pyramid, overhanging wall, steel, wind tunnel, truss, soil-structure interaction

1. Descripción arquitectónica

El “Museum of World Cultures” es el edificio señero del “Royal Art Complex”, uno de los desarrollos urbanísticos que conforman el parque King Salman, que se está desarrollando sobre los terrenos de la antigua base aérea de Riad.

El edificio, diseñado por Ricardo Bofill Taller de Arquitectura (RBTA), se eleva en la parte más oriental del complejo, inclinándose hacia la gran zona verde de forma circular que conforma el núcleo del parque King Salman.

La forma trapezoidal en planta, de 127.5 m de longitud y un ancho variable entre los 100 m del extremo oeste y los 50 del extremo este, se va reduciendo linealmente en altura debido a la diferente inclinación de sus paramentos oeste y este. El primero, que hace de cubierta del complejo, presenta una inclinación de 30° respecto de la horizontal; el segundo, que supone la fachada oriental del edificio, está inclinado 60° respecto de la horizontal, en el mismo sentido que el occidental, generando un volumen desplomado. Ambos planos intersecan en una arista situada a 106 m de la superficie del terreno. Las fachadas norte y sur, en cambio, son planos verticales.

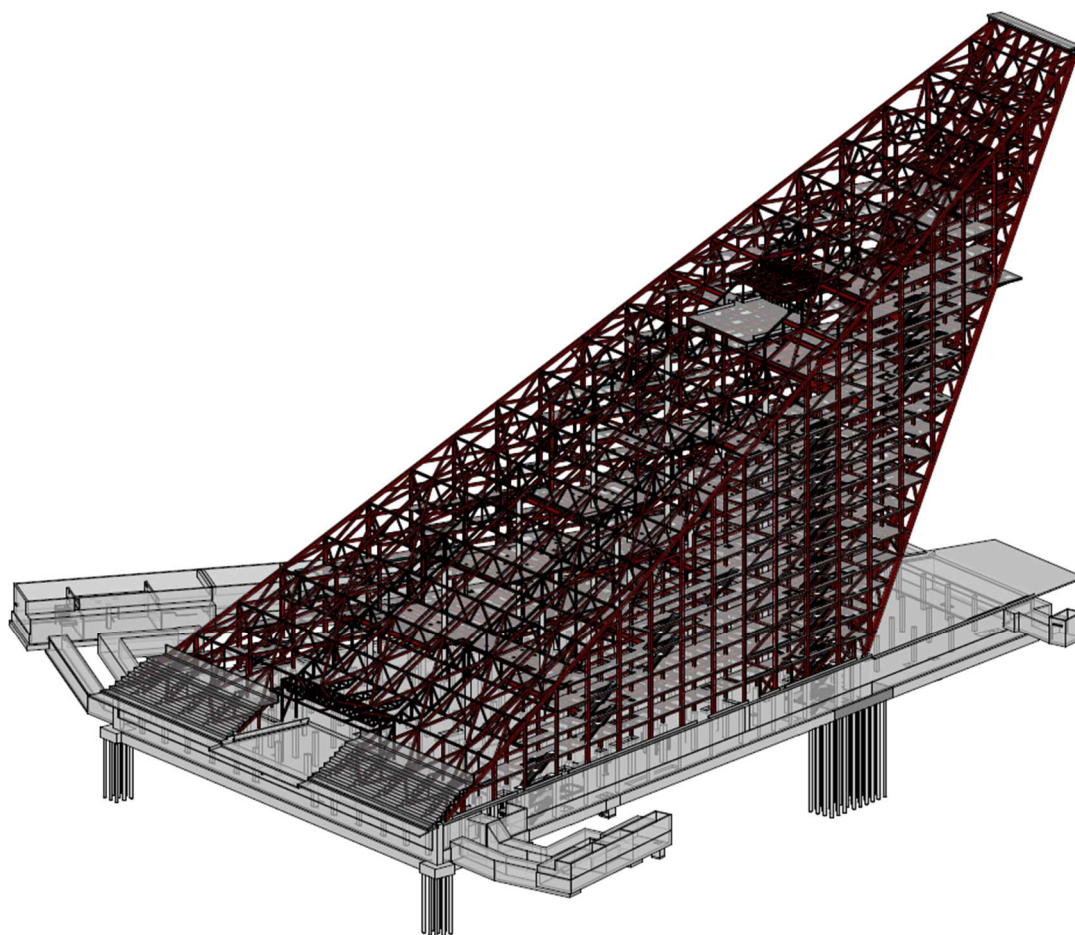


Figura 1. Esquema volumétrico del edificio

El basamento ocupa toda la huella del edificio en altura, por lo que se extiende en forma trapezoidal en una longitud de 173 m, con un ancho máximo de 100 m y un mínimo de 32 m. Adyacente a él se disponen otras estructuras enterradas donde se ubican la mayor parte de las zonas de instalaciones del edificio.

Internamente, el edificio se articula alrededor de un eje oeste-este que también es el eje de simetría de la construcción. El acceso principal se halla en el extremo occidental, dando paso a la planta baja en la que se sitúan tanto los espacios expositivos de mayor altura como diversas zonas de servicio situadas en los laterales. Desde el eje de acceso arrancan las escaleras mecánicas que conducen a las plantas superiores y, tras recorrer todo el eje, se

encuentra el núcleo inclinado de ascensores que discurre paralelo a la fachada oriental.

En altura, se pueden identificar 4 plantas expositivas (L1 a L4), además de 2 plantas orientadas a la recepción de visitantes VIP (L5 y L6), la última de las cuales da acceso a las dos grandes terrazas que se asoman respectivamente a las fachadas oeste y este. Las plantas se disponen retranqueadas en su extremo occidental, lo que genera un gran volumen vacío bajo la cubierta al que se asoman, como terrazas, las plantas expositivas.

Entre cada una de las plantas principales se disponen niveles intermedios de servicio que solo ocupan la primera crujía junto a las fachadas y donde se ubican las escaleras de emergencia.

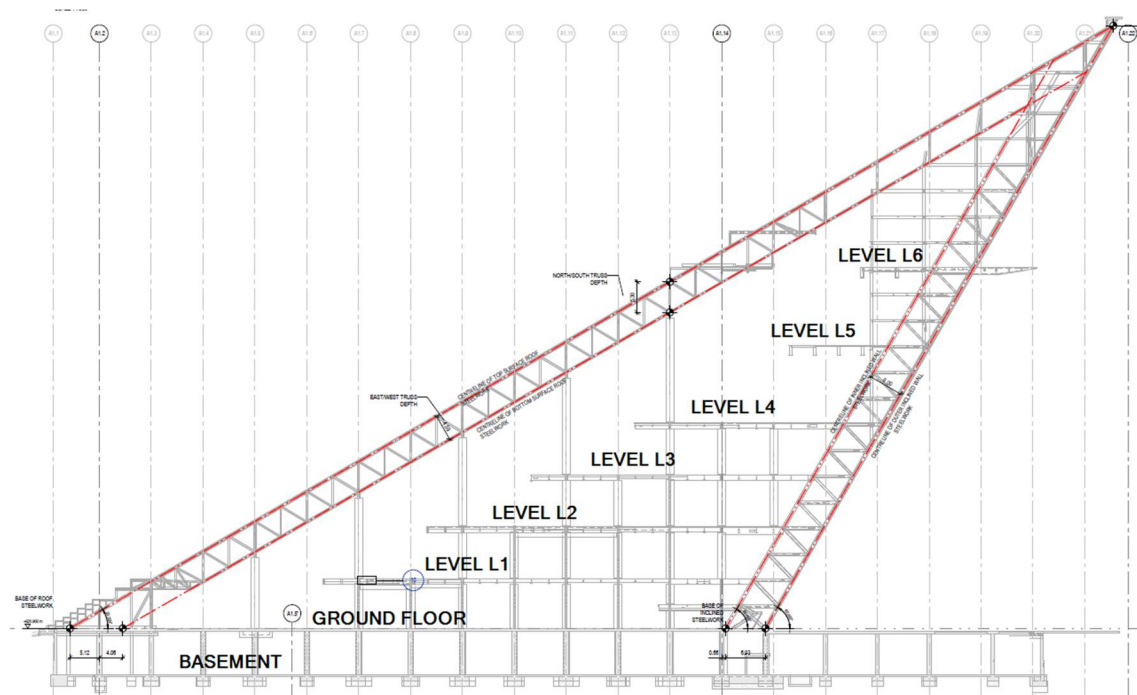


Figura 2. Sección longitudinal del edificio

2. Esquema estructural

El esquema estructural del edificio puede dividirse en 3 grandes sistemas:

- La estructura que da forma a la envolvente exterior (cubierta, fachada oriental inclinada y fachadas verticales norte y sur)
- La estructura interior, formada por los forjados de las plantas principales y las alineaciones intermedias de soportes
- El basamento inferior, formado por el forjado de planta baja, los muros perimetrales y la cimentación, además del resto de estructuras enterradas.

Se describen someramente a continuación las características de cada uno de los sistemas principales.

2.1. La envolvente exterior

El sistema estructural de la envolvente exterior da forma a los planos que determinan el volumen del edificio. Cada uno de los planos se articula como un sistema de doble piel, en la que se genera una fachada exterior y una interior. El

espacio interior entre ambas aloja una estructura en forma de celosía.

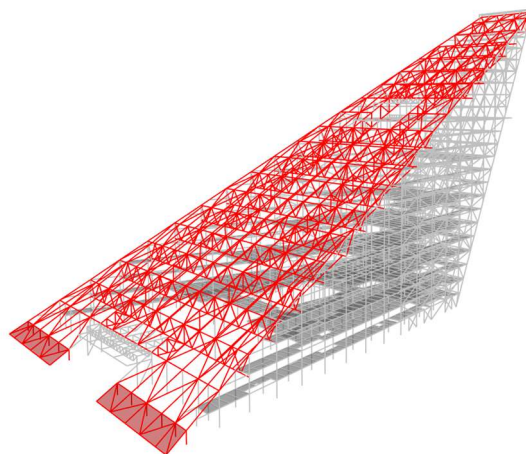


Figura 3. Estructura correspondiente a la cubierta

La cubierta está compuesta por una sucesión de celosías horizontales transversales de tipología Warren y 4.5 m de canto, dispuestas cada 9 m perpendicularmente al eje de simetría del edificio. Dado que la distancia entre fachadas laterales decrece con la altura, en la parte superior del edificio (por encima de L6), las celosías salvan la luz entre fachadas de forma isostática, en tanto que bajo dicho nivel presentan dos apoyos intermedios que determinan una luz central de 30 m siendo los vanos laterales de luz variable.

En las alineaciones situadas a 15 m del eje de simetría se disponen sendas celosías longitudinales que, con idéntico canto a las transversales, apoyan en los grandes soportes mixtos interiores, dispuestos cada 18 m y que reciben la carga de la celosía transversal intermedia, carente de apoyo directo en soporte.

Las celosías se arman con perfiles tipo UC, tanto para cordones como para diagonales y montantes, correspondiendo generalmente los primeros a los calibres 305 y 356 y los segundos a los calibres 203 y 254.

Tanto el plano superior como el inferior se completan con la disposición de correas longitudinales sobre las que apoyan ambas fachadas (externa e interna) así como una densa red de diagonales de rigidización que, en el plano superior, permiten la transmisión a la cimentación de los empujes de viento sobre las fachadas laterales.

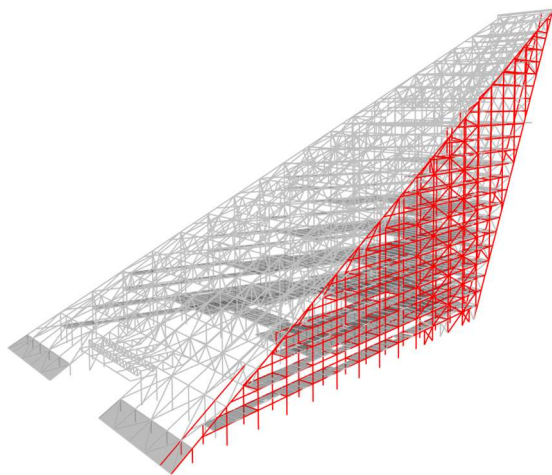


Figura 4. Estructura correspondiente a la fachada lateral sur

La estructura de las fachadas laterales se compone de una retícula exterior formada por soportes verticales y vigas horizontales, ambas de sección tubular cuadrada (SHS), y una retícula interior con soportes verticales y enfrentados a los anteriores y vigas en doble T horizontales. Ambas pieles, separadas entre sí 4.68 m entre ejes, se unen rígidamente mediante travesaños de sección hueca, situados al nivel de forjado, para generar una celosía Vierendeel que permita resistir las presiones de viento sin la necesidad de

disponer diagonales que afectarían negativamente a la circulación paralela a la fachada.

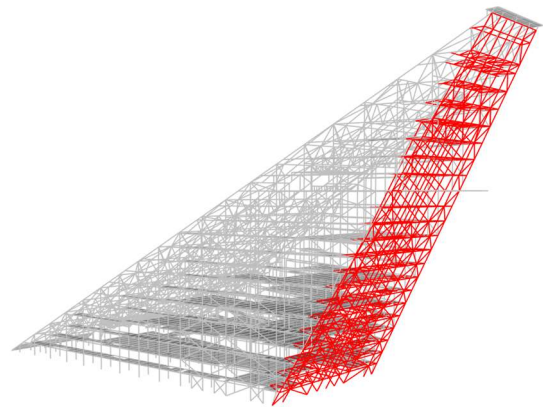


Figura 5. Estructura correspondiente a la fachada oriental

Por último, la estructura de la fachada oriental, que se encuentra desplomada 30° respecto de la vertical, es, en su cara exterior, un entramado de perfiles pseudovericales y horizontales, formados todos por secciones tubulares, que incorpora una rigidización continua mediante diagonales en los vanos exteriores y transversalmente en tres secciones diferentes del alzado.

Perpendicularmente al plano de fachada, la estructura aprovecha las particiones entre los 4 ascensores inclinados para generar 5 celosías inclinadas que permiten tanto resistir las presiones de viento ortogonales como colaborar en el control del movimiento horizontal del volumen desplomado.

Finalmente, las aristas entre los 4 planos descritos están ocupadas por perfiles tubulares de gran dimensión (800 mm de lado y hasta 80 mm de espesor). Por su posición y dimensión, estos elementos actúan bajo la acción de las acciones gravitatorias como un pórtico que resiste los esfuerzos de vuelco debidos a la inclinación del edificio, generando compresiones en las aristas de la fachada oriental y tracciones en las aristas de la cubierta.

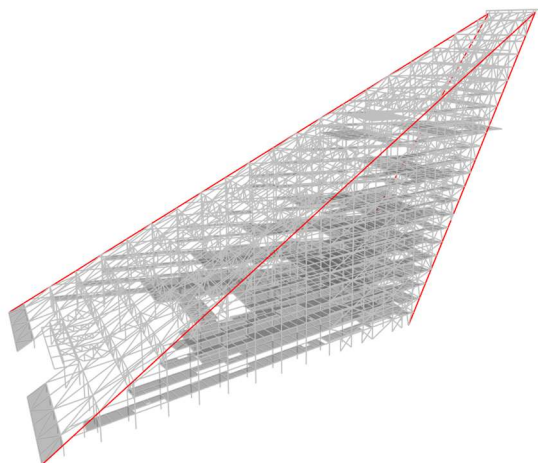


Figura 6. Aristas principales de la estructura

El control del vuelco del edificio se completa mediante la rigidización de 4 vanos entre soportes de cada una de las fachadas laterales, que corresponden a los situados más próximos al arranque de la fachada dorsal.

2.2 La estructura interior

Los forjados interiores y, singularmente, los forjados de los niveles expositivos (L1 a L4) se articulan en dos zonas principales: la zona central, con una disposición paralela y ortogonal al eje de simetría y con luces longitudinales de 9 m y transversales de hasta 18 m, y las zonas de servicio orientadas según el plano de fachada y con luces más moderadas (4.68 x 9.18 m).

El apoyo de los forjados se realiza sobre dos alineaciones de soportes situados a ambos lados del eje de simetría (4 ejes en total), las más exteriores de las cuales se prolongan hasta cubierta para sustentar las celosías de mayor luz.

La inclinación del edificio hace que los niveles de “hospitality” (L5 y L6) se encuentren fuera de la huella del edificio en planta baja, por lo que carecen de soportes intermedios y salvan, por tanto, la luz que media entre las fachadas laterales y que alcanza, en el caso de la viga de mayor luz del nivel L5, los 35 m.

Los forjados son de tipología mixta, con vigas metálicas de la serie UB y calibres que alcanzan los 1000 mm de canto y un forjado de chapa plegada de 150 mm de espesor total. En los elementos que requieren de mayor rigidez,

como los correspondientes a los forjados de L5 y L6, la terraza oriental de L6 o los grandes voladizos de los forjados inferiores hacia el atrio, se emplean secciones en cajón armadas con chapas, con cantos entre 1000 y 1800 mm.

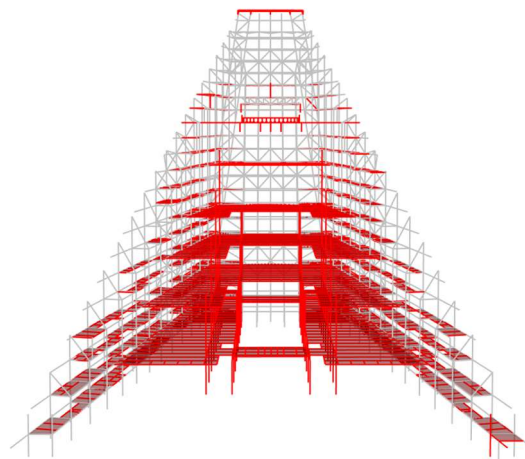


Figura 7. Estructura correspondiente a los forjados y soportes interiores

En el nivel L6 se sitúan dos grandes terrazas que suponen las únicas aberturas de la piel envolvente por encima del nivel de calle. Ambas terrazas, dispuestas sobre un eje Oeste-Este, se materializan mediante sistemas estructurales completamente diferentes. La más singular es la oriental, que se asoma al gran parque King Salman y que se encuentra completamente volada fuera del plano de la fachada oriental. Se compone de un forjado en voladizo de más de 11 m de luz, formado por vigas en sección cajón de canto variable entre 1300 mm en el encuentro con la estructura de fachada y 200 mm en el perímetro.

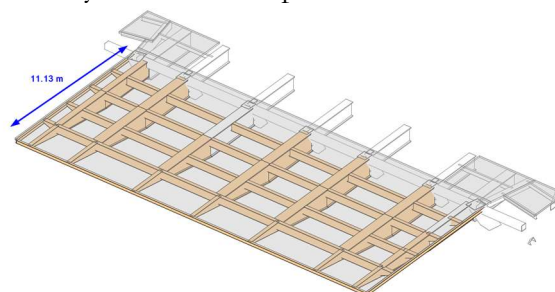


Figura 8. Estructura correspondiente a la terraza oriental del nivel L6

En los soportes interiores pueden identificarse dos tipologías principales. Aquellos situados en las alineaciones más cercanas al eje de simetría y que quedan ocultos en los

cerramientos del corredor central son puramente metálicos, de la serie UC. Los situados exteriormente a los primeros se prolongan, uno de cada dos, hasta la cubierta y adoptan una forma cuadrada girada 45° respecto de los ejes principales del edificio. Estos soportes son mixtos, con una sección exterior de 1 x 1 m y con un perfil metálico situado en la horquilla más pesada de la serie UC en su interior. Cuando dichos soportes coinciden con la viga en voladizo que sustenta la terraza de la planta expositiva, su continuidad es interrumpida por medio de la inclusión de un apoyo esférico, que libera al soporte de las flexiones que, por su rigidez, absorbería, condicionando su diseño en un bucle de hiperestatismo totalmente desaconsejable. Liberando al soporte (al menos en su tramo inferior) de las flexiones, se consigue que la mayor parte de ellas se transmitan a la viga dorsal, en un funcionamiento de viga continua mucho más eficiente.

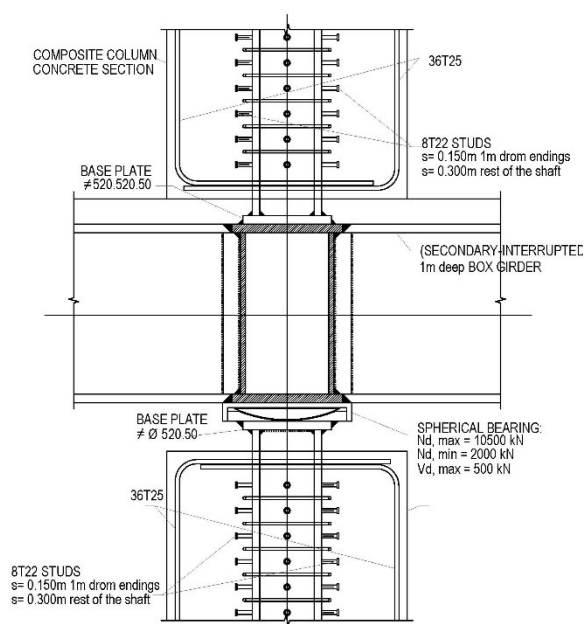


Figura 9. Soporte mixto y apoyo esférico

2.3 El basamento

El basamento del edificio se extiende bajo toda la huella del mismo (tanto la que emerge de Planta Baja como la aérea, inclinada hacia el este) y está compuesto por una única planta de sótano subterráneo de 7 metros de altura.

La losa de Planta Baja, dimensionada para una sobrecarga de 20 kN/m² en el atrio central, está compuesta por una losa maciza de 50 cm de espesor, que se reduce a 45 cm en la zona bajo la sombra de la parte volada del edificio, donde se ubica una lámina de agua.

La losa se sustenta en soportes de hormigón que dan continuidad a los soportes metálicos de la estructura sobre rasante que han sido descritos en el punto anterior, así como en varias alineaciones adicionales que reducen la luz a una malla de 9 x 9 m.

Todo el contorno del sótano está cerrado mediante muros de contención de espesor variable (625 mm en la base y 400 mm a partir de 2.5 m de altura), que se ejecutan a dos caras tras realizar el vaciado de la parcela.

La cimentación del conjunto es esencialmente superficial gracias a la elevada capacidad portante de la roca madre en la que se asienta el edificio y que permite considerar una tensión admisible de 1 MPa. Este hecho permitió sustituir la losa de cimentación inicialmente prevista por zapatas aisladas a las que se conecta rígidamente una solera armada que resiste las ocasionales fuerzas de subpresión que pueden generarse en caso de lluvias torrenciales.

La cimentación altera su esquema tipo en las zonas con grandes concentraciones de cargas, ya sean éstas ascendentes o descendentes. De manera resumida se trata de la cimentación bajo las celosías inclinadas de los ascensores, donde se genera una cimentación conjunta; de los arranques de las aristas entre las fachadas laterales y el muro dorsal, donde se concentran las principales compresiones del edificio y donde la zapata se convierte en un encepado de pilotes para incrementar su capacidad y, finalmente, bajo el arranque de las aristas de la cubierta, donde se disponen pilotes de tracción para atar la cubierta al terreno.

El basamento se completa con otras zonas de servicio, donde se ubican las instalaciones de climatización del edificio y que también se encuentran enterradas bajo la rasante. Su altura

es menor que la del basamento principal, por lo que apoyan sobre rellenos granulares, lo que implica una menor capacidad portante. En todo

caso, el esquema estructural es en todo similar al del basamento del edificio.

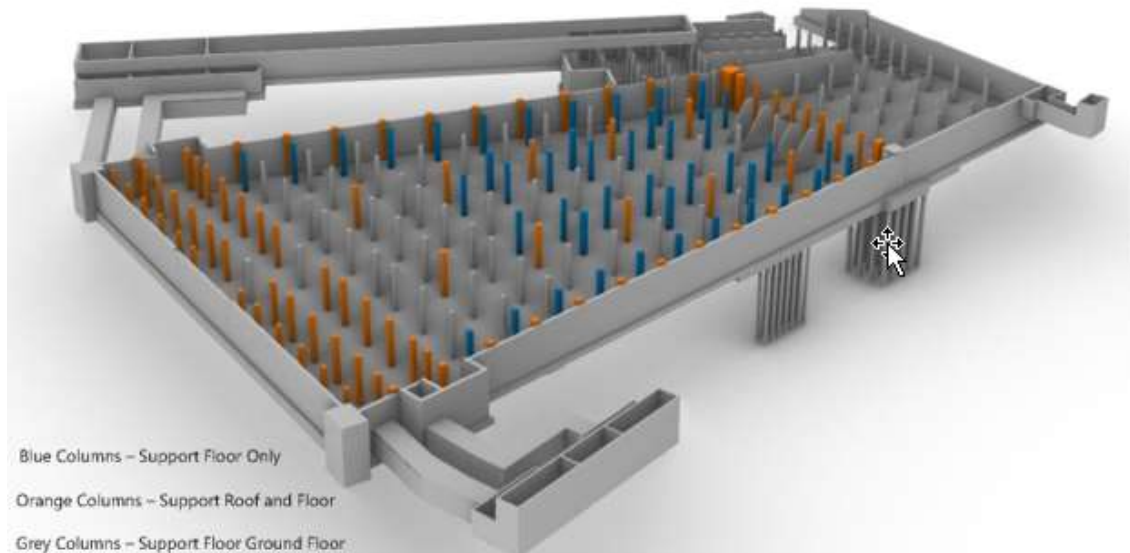


Figura 10. Esquema estructural del basamento. Tipos de soportes

3. Verificación

Las verificaciones estructurales se realizan conforme al Saudi Building Code (SBC), que transpone al código nacional la mayor parte de la normativa estructural norteamericana. En concreto, se han empleado fundamentalmente los códigos SBC-301-CR (equivalente a ASCE/SEI 07-10), SBC-304-CR (equivalente a ACI 318-19) y SBC-306-CR (equivalente a AISC 360-16)

3.1. Acciones de cálculo

La estructura se encuentra condicionada por las acciones gravitatorias debidas a las exigencias expositivas (zonas de acceso a vehículos o pública concurrencia) y por las fuertes presiones de viento del desierto.

El programa museístico requiere que las plantas donde se exhibirá la colección (niveles L1 a L4) permitan sobrecargas de 10 kN/m^2 , que se elevan hasta los 20 kN/m^2 en la zona central de la Planta Baja, accesible para vehículos

pesados. En las zonas de servicios de las plantas soberrrasante, así como en las plantas de homenaje (L5 y L6), se considera una sobrecarga de 5 kN/m^2 .

Para la obtención de las presiones de viento se realizó en primer lugar una estimación en base a la normativa vigente y posteriormente se contrastó con los resultados de un ensayo en túnel de viento. De la primera estimación, resulta llamativa la velocidad de viento, que alcanza valores de 54 m/s , del orden del doble de las que se consideran en España y correspondientes a un periodo de retorno de 1700 años. Las presiones de pico consecuentes toman valores superiores a 1.50 kN/m^2 .

Adicionalmente, se llevó a cabo un ensayo en túnel de viento orientado a la confirmación de las presiones a considerar en cada una de las fachadas del edificio y que obtuvo valores extremos de 3.1 kN/m^2 en presión y -4.3 kN/m^2 en succión.

Los resultados, obtenidos en inicialmente 22 casos de carga diferentes, producto de 8 direcciones de viento y diversas configuraciones de presión y succión sobre las diferentes

fachadas, fueron posteriormente refinados con casos de carga adicionales asociados a la dirección dominante del viento (norte).



Figura 11. Modelo para ensayo en túnel de viento

3.2. Estabilidad global

A pesar de su elevada altura, los análisis de segundo orden realizados por prescripción normativa arrojan resultados prácticamente idénticos a los de primer orden, ya que, en dirección longitudinal, la estructura ya se encuentra dimensionada para equilibrar el fuerte desplome de 30° del edificio en dirección oeste-este, por lo que los efectos de segundo orden representan un incremento de desplome marginal respecto de la geometría de partida. Tanto los vanos arriostrados de las fachadas laterales como el anclaje que genera la cubierta (y muy especialmente, sus aristas) controlan de manera eficaz el desplome longitudinal del edificio.

En dirección transversal no existe dicha geometría desplomada de partida, pero los planos que conforman la cubierta del edificio se encuentran fuertemente arriostrados para dirigir a cimentación los esfuerzos asociados al viento sobre las fachadas laterales, por lo que el edificio resulta sumamente rígido en dicha dirección.

3.3. Dimensionamiento

Aunque el edificio tiene un comportamiento global muy evidente por efecto del desplome de la fachada oriental, son relativamente pocos los elementos que se encuentran dimensionados por su colaboración en la macro-estructura: las

aristas principales, y los arriostramientos en los planos de cubierta y fachada. El resto de los elementos se encuentra determinado por el efecto local de las acciones, ya sean las cargas gravitatorias para forjados, soportes y celosías de cubierta o presiones perpendiculares de viento para las fachadas laterales.

El aspecto más significativo del dimensionamiento de los forjados es el control de vibraciones, debido a las grandes luces y relativa esbeltez de las estructuras de planta. Además de su verificación en rotura y del control de deformaciones, se ha realizado un análisis dinámico de los forjados principales (niveles L1 a L6) conforme a las recomendaciones SCI-P354, obteniendo las frecuencias principales de vibración, así como las aceleraciones bajo la acción dinámica de los usuarios, comparando los valores máximos con los umbrales de percepción y obteniendo los factores de respuesta.

Table 3.1 Design Fourier coefficients for walking activities

Harmonic h	Excitation frequency range hf_p (Hz)	Design value of coefficient α_n	Phase angle ϕ_n
1	1.8 to 2.2	$0.436/(hf_p - 0.95)$	0
2	3.6 to 4.4	$0.006/(hf_p + 12.3)$	$-\pi/2$
3	5.4 to 6.6	$0.007/(hf_p + 5.2)$	π
4	7.2 to 8.8	$0.007/(hf_p + 2.0)$	$\pi/2$

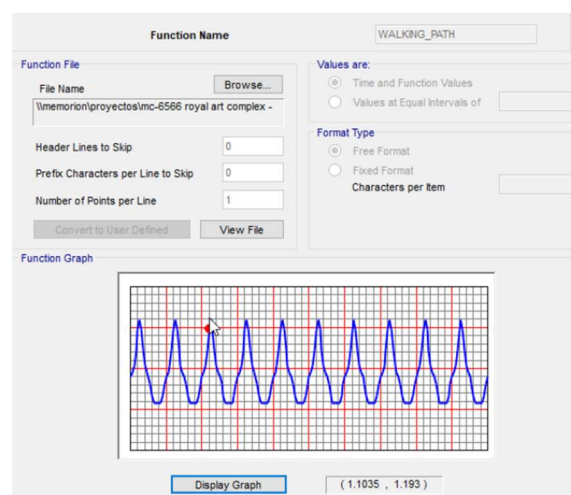


Figura 12. Función de excitación dinámica para verificación de forjados

El análisis de los esfuerzos de rasante horizontal a resistir por los forjados derivó en el empleo de diferentes cuantías de armado superficial de la losa de forjado mixto, disponiendo una malla de $\Phi 16/0.10$ en las zonas

donde los axiles de tracción en el plano del forjado eran más elevados.

El edificio tiene, tal y como se ha descrito en el apartado 3.2. Estabilidad global de estabilidad global, un adecuado comportamiento intraslacional, muy condicionado por el desplome del volumen oriental y de la necesaria estabilidad frente al viento. Ello supone que los soportes se encuentran arriostrados y apenas colaboran en la estabilidad horizontal, pudiendo ser comprobados como elementos secundarios que resisten cargas verticales. La excepción son los grandes soportes mixtos que sustentan la cubierta, que alcanzan longitudes libres de 16 metros y que se encuentran dimensionados por su resistencia al pandeo.

Tal y como se ha mencionado en el apartado 2.3 El basamento, la concepción original de una cimentación en losa fue modificada y convertida en cimentaciones superficiales aisladas, reduciendo las cimentaciones conjuntas a un número pequeño de zonas. Éstas son verificadas, en términos generales, como losas sobre un lecho elástico, salvo los puntos donde es precisa la inclusión de pilotes por un exceso de compresiones o tracciones. Para el primer caso, situado bajo el arranque de las aristas de la fachada oriental, se llevó a cabo un estudio de interacción suelo-estructura que permitiera optimizar el dimensionamiento de la losa pilotada.

Se desarrollaron en proyecto los principales tipos de uniones de estructura metálica con el objetivo de minimizar la realización de soldaduras en obra, primando el empleo de uniones atornilladas pretensadas. En general, se han planteado uniones con chapa frontal para los perfiles tubulares que componen los planos de fachada, uniones atornilladas con cubrejuntas de alma para las conexiones de las vigas de forjado, y uniones en continuidad mediante cubrejuntas de alas y almas para los perfiles tipo UC empleados en las celosías de cubierta.

4. Construcción

A pesar de su enorme volumen, el edificio presenta una secuencia constructiva relativamente convencional, donde tras la ejecución de los elementos de cimentación y basamento (pilotes, zapatas, solera y muros), se suceden las fases de ejecución de soportes y forjados.

En el caso de los forjados mixtos de las plantas superiores, el montaje de la estructura metálica se produce decalado en avance en varios niveles y posteriormente se realizan las fases de colocación de chapa plegada, ferrallado y hormigonado.

El aspecto más significativo de la ejecución es el control del avance del cuerpo volado, cuyo montaje se produce con cierto retraso con respecto a la parte situada sobre la vertical de la huella en Planta Baja, permitiendo la colocación adelantada de los arriostramientos dispuestos en las caras laterales, que aseguran la estabilidad al vuelco del resto de elementos.

5. Principales magnitudes y cuadro de participantes

5.1 Magnitudes principales

- Dimensiones en planta: 127.5 x 100 m
- Altura (de cimentación a coronación): 106 m
- Superficie construida:
 - Sobre rasante: 18 000 m²
 - Basamento: 30 000 m²
- Volumen de hormigón
 - Sobre rasante: 2500 m³
 - Basamento: 31600 m³
- Peso de acero estructural: 12 500 t
- Longitud de pilotes: 1656 m

5.2 Cuadro de participantes

- Propiedad: King Salman Park Foundation (KSPF)

- Arquitectura y paisajismo: Ricardo Bofill
Taller de Arquitectura (RBTA)
- Ingeniería de Estructuras: MC2
- Ingeniería de Instalaciones y Arquitectura local: TYP SA
- Constructora: Modern Building Leaders
- Revisor externo: Omrania



Figura 13. Estado de la construcción en septiembre de 2023



Figura 14. Estado de la construcción en enero de 2024