

Gran Teatro de Casablanca - CasArts

Casablanca Great Theatre - CasArts

Luca CERIANI

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

MC2 Estudio de Ingeniería

Ingeniero

luca.ceriani@mc2.es

Pietro BARTALOTTA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

MC2 Estudio de Ingeniería

Ingeniero

pietro.bartalotta@mc2.es

Borja ENCINAS MALDONADO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

MC2 Estudio de Ingeniería

Ingeniero

borja.encinas@mc2.es

RESUMEN

El Gran Teatro de Casablanca, ubicado en la plaza Mohammed V de la capital económica de Marruecos, constituye un icono arquitectónico y cultural en el marco del ambicioso proyecto de desarrollo de esta pujante metrópoli. Concebido como lugar de referencia para el arte y la música, el edificio está compuesto por varios pabellones, reminiscencia de una antigua medina, algunos de los cuales se describen por su singularidad en esta ponencia: los dos teatros principales, para 1800 y 600 personas respectivamente, una galería atravesada por esbeltas pasarelas, y un pabellón de entrada con puertas monumentales, que dan acceso al complejo.

ABSTRACT

Casablanca Great Theatre, located in the Mohammed V square of the economic capital of Morocco, is an architectural and cultural icon within the ambitious development of this thriving metropolis. Conceived as a landmark for art and music, the building is made up of several pavilions, reminiscence of an ancient medina. The presentation describes some of these buildings, for their uniqueness and interest: the two main theatres, for 1800 and 600 people respectively, a gallery crossed by slender footbridges and the access pavilion with the monumental doors that constitute the entrance to the complex.

PALABRAS CLAVE: teatro, estructura volada, hormigón armado, fisuración, cercha metálica.

KEYWORDS: theatre, cantilever structure, concrete structure, cracking, steel truss.

1. El contexto de la actuación y el proyecto arquitectónico

Con el proyecto del Gran Teatro de Casablanca, CasArts, se pone de manifiesto el especial interés de la Casa Real de Marruecos por la promoción de la Cultura, considerada el fundamento de la cohesión del País y la base de su identidad.

Concebido como lugar de referencia para el arte y la música, y diseñado por el arquitecto francés Christian de Portzamparc, premio Pritzker en 1994, en colaboración con el arquitecto local Rachid Andaloussi, el edificio constituye un icono arquitectónico y urbano para la ciudad y un símbolo de su renovación cultural y artística. Situado en posición privilegiada en la vasta plaza de Mohammed V, CasArts no está pensado como un objeto arquitectónico autónomo y unívoco, sino como un

conjunto heterogéneo de diversos pabellones de diferente altura y entidad, reminiscencia de una antigua medina (Figura 1).



Figura 1. Render con vista general de CasArts

En la simple y elegante fachada blanquecina, se abre una monumental puerta de acceso que invita a penetrar en una galería pública la cual, insinuándose entre los edificios principales, proporciona un lugar sombrío e íntimo, al abrigo de la luz deslumbrante que inunda la plaza.

Y es alrededor de este escenario que se articulan los edificios, perfectamente diferenciados funcionalmente por el objeto de su uso y, arquitectónicamente, por los volúmenes que dichos edificios generan y los espacios intermedios que los mismos determinan. Asimismo, estos volúmenes son independientes estructuralmente.

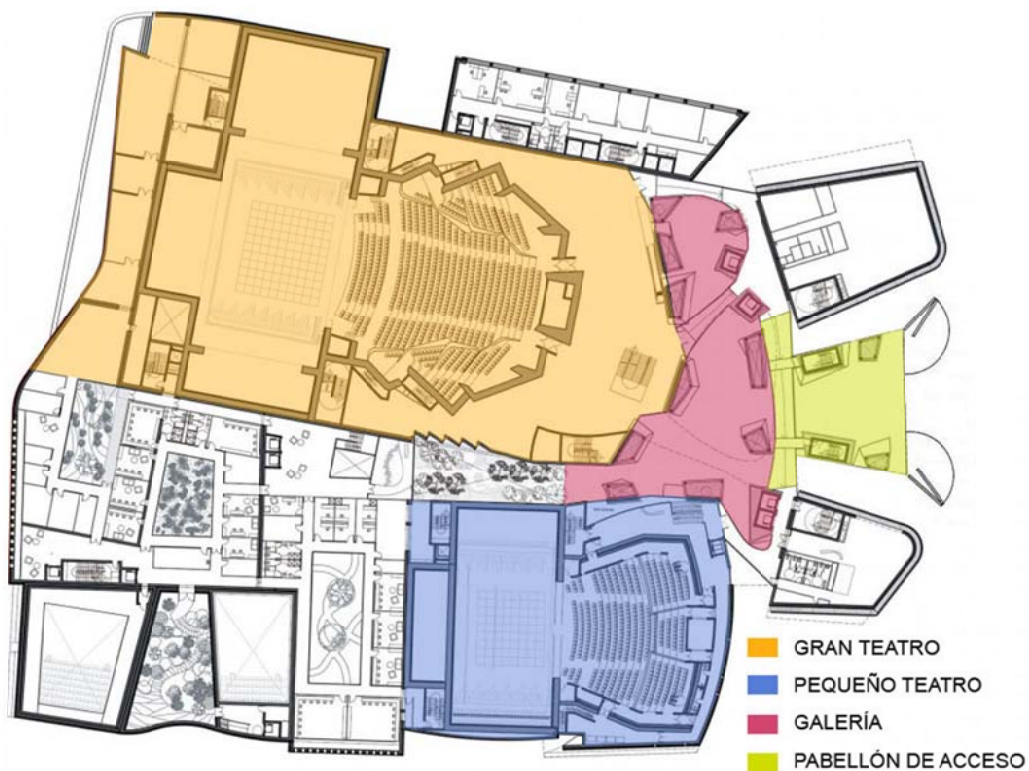


Figura 2. Esquema en planta del complejo, con la indicación de los pabellones principales

En la figura 2 se muestra un esquema en planta con los pabellones objeto de esta presentación: el Gran Teatro, para 1800 personas, el Pequeño Teatro, para 600 personas, el Pabellón de Acceso, con las puertas monumentales precedentemente citadas y la Galería o Pasadizo de la Medina. Esta última es un pabellón especialmente articulado en planta, al recorrer los espacios entre los límites irregulares de los otros edificios que constituyen el complejo de CasArts.

Según se muestra en los *render* de la figura 3, unas esbeltas pasarelas vuelan entre potentes núcleos de hormigón, llamados “*falaises*” o “*acantilados*” por el aspecto de su sinuoso revestimiento, que recuerda las paredes del rocoso cañón del Antílope en Arizona (figura 4).



Figura 3. Galería o Pasadizo de la Medina – render

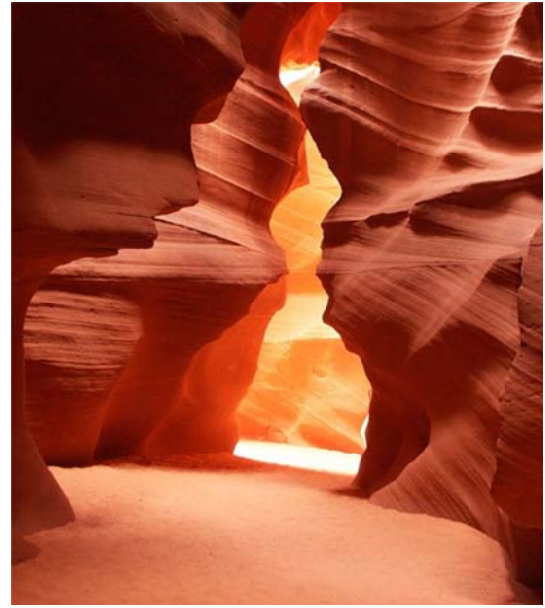


Figura 4. Cañón del Antílope en Arizona

2. El proyecto estructural

2.1. Introducción y tipologías estructurales empleadas

El proyecto arquitectónico planteado para el conjunto de edificios presenta una gran complejidad de formas que ha exigido soluciones estructurales de tipo singular en un número muy importante de casos [1].

2.2. Gran Teatro

El Gran Teatro consiste en un escenario, de 31.60 m de ancho y 19.10 m de fondo de escena, y una sala polivalente para 1800 espectadores repartidos en la platea inferior y en una serie de grandes palcos o balcones.

La estructura, en hormigón armado en su práctica totalidad, consiste en losas macizas, pantallas radiales y una pantalla circunferencial que envuelve gran parte de la caja escénica y de la sala. Esta estructura fuertemente entrelazada de losas y pantallas de hormigón armado resulta muy adecuada para resistir no solamente las cargas verticales, sino sobre todo las acciones horizontales de viento y sismo.

Lo que confiere a la estructura del Gran Teatro su carácter de singularidad es la presencia de una serie de palcos o balcones que, dispuestos en abanico y en dos niveles alrededor del patio de butacas, y empotrados en las pantallas radiales, vuelan hacia el escenario, según se muestra en la planta de la figura 5 y en el alzado de la figura 6.

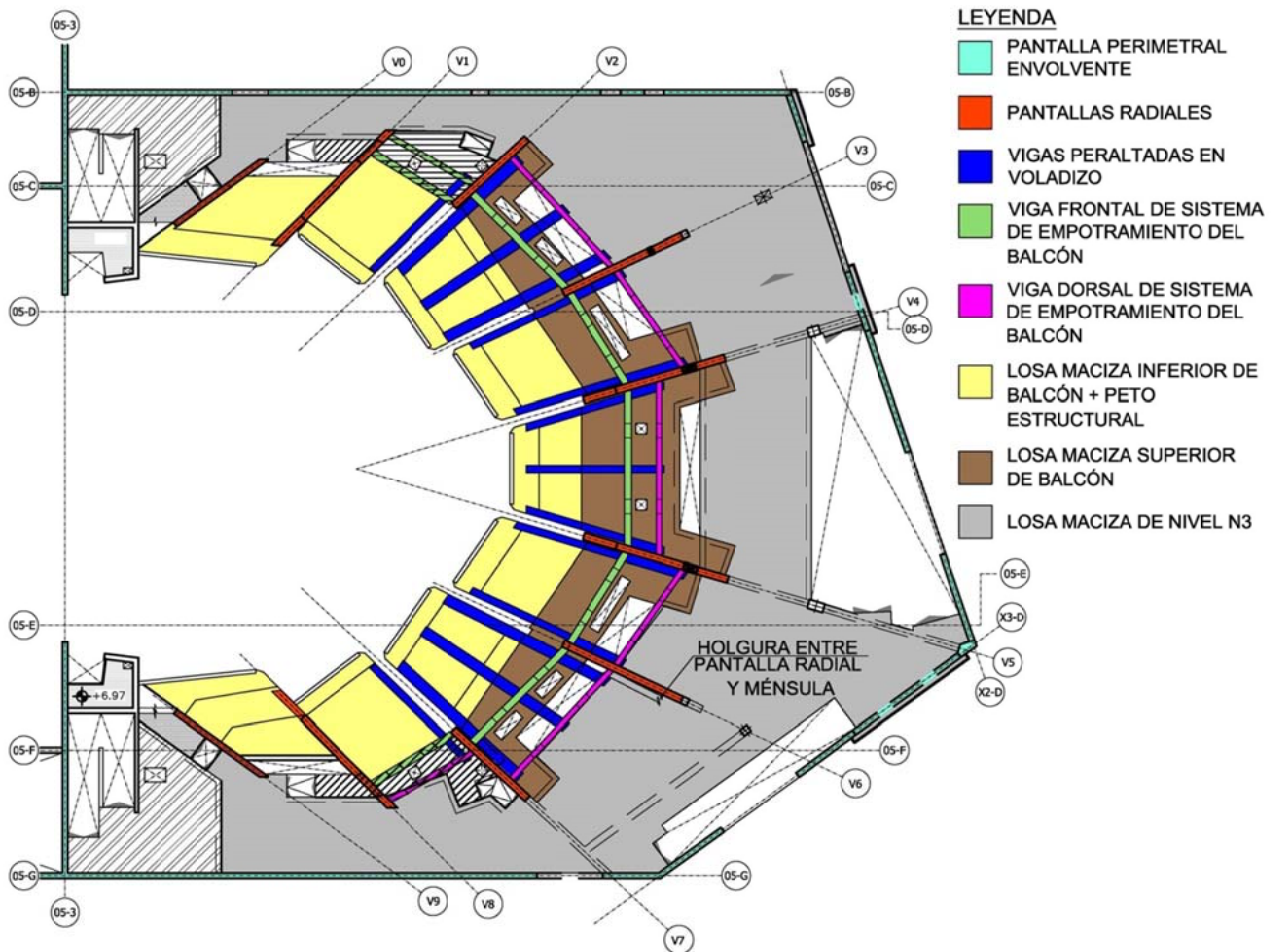


Figura 5. Gran Teatro – vista en planta del esquema estructural principal de la sala

Según se muestra en las imágenes citadas, desde la losa maciza con la que se materializa el fondo del balcón, sobresalen dos o tres vigas peraltadas por cada balcón, según su ancho y vuelo. Uno de los requerimientos arquitectónicos que más fuertemente condicionó el diseño estructural fue la decisión de mantener una holgura entre las vigas peraltadas y las pantallas radiales a ellas adyacentes. Al no poderse colocar ménsulas en continuidad con las pantallas, resultó por lo tanto necesario introducir, para cada balcón, un sistema alternativo de empotramiento elástico para las vigas peraltadas, constituido por una pareja de vigas transversales, recibiendo la viga frontal una reacción hacia abajo y la viga dorsal una reacción hacia arriba, por efecto palanca. Mediante las vigas transversales, estas reacciones se transmiten a las pantallas radiales en las que se apoyan mediante un empotramiento elástico.

Al presentar dichas pantallas un gran número de huecos para acceso de espectadores e instalaciones, se genera un mecanismo resistente que obliga a que los flujos principales de fuerzas se distribuyan rodeando los antedichos huecos. En todos los casos fue necesario comprobar que las tracciones no superaran los valores críticos que llevarían a la fisuración y a la pérdida de rigidez de la estructura pero en ningún caso fue necesario recurrir al pretensado.

En todos los casos en los que el proyecto arquitectónico no requirió mantener la holgura entre las pantallas radiales y las ménsulas, se optó por empotrar estas últimas directamente en las pantallas, eliminando la pareja de vigas transversales de empotramiento, según se muestra en el alzado de la figura 7. En este caso, la presencia de la zona de empotramiento reducía

considerablemente el vuelo del balcón y ha permitido aligerar las secciones transversales y los armados de las vigas transversales que, en este nuevo esquema estructural, constituyen elementos secundarios que rigidizan la losa de fondo del balcón.

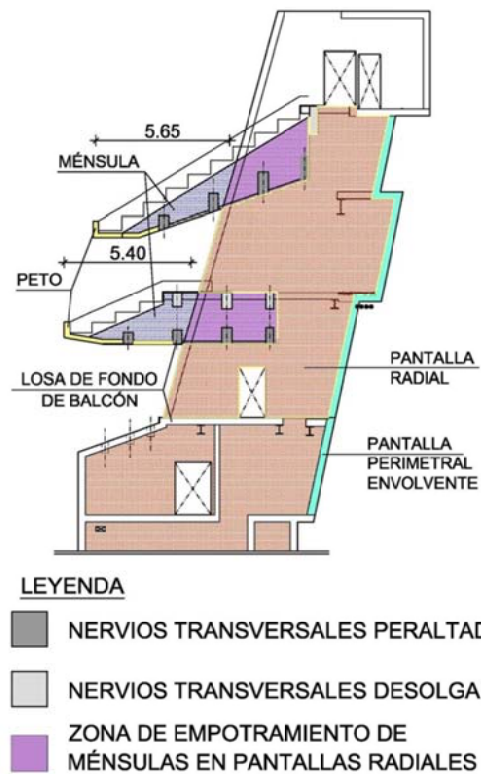
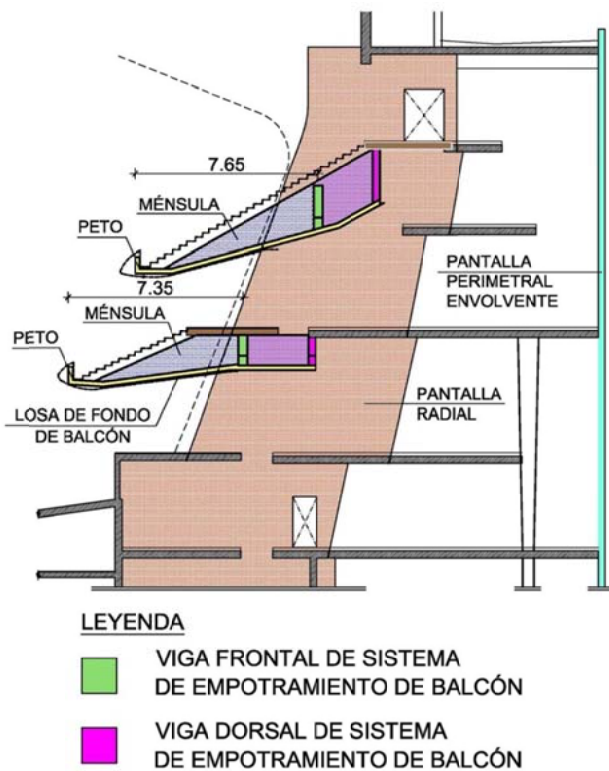


Figura 6. Gran Teatro – alzado de pantalla radial con esquema estructural de balcones tipo 1

Figura 7. Gran Teatro – alzado de pantalla radial con esquema estructural de balcones tipo 2

La especial configuración geométrica del Gran Teatro, unida a las complejas interacciones estructurales entre elementos tridimensionales, a la necesidad de monolitismo entre losas y pantallas y a las servidumbres funcionales que se imponían a estos elementos para accesos y pasos de instalaciones, obligó a modelizar el edificio con un modelo 3D global de elementos finitos (ver Figuras 8 y 9) [2]. Para estudiar la interacción con el terreno, y dimensionar el armado de la losa de cimentación, se empleó un modelo de Winkler.

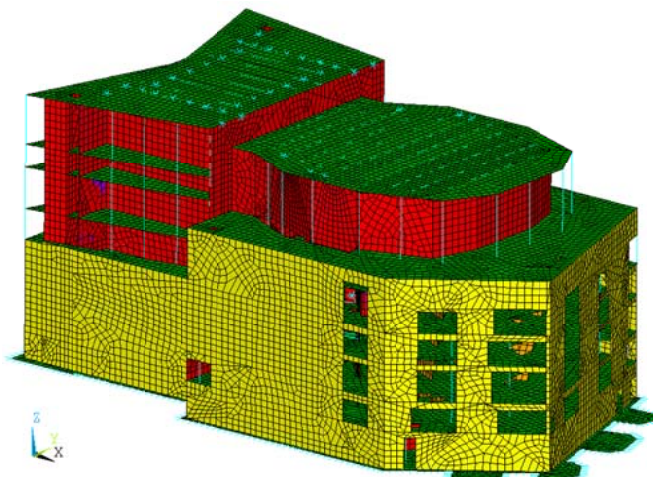


Figura 8. Gran Teatro – modelo global (I)

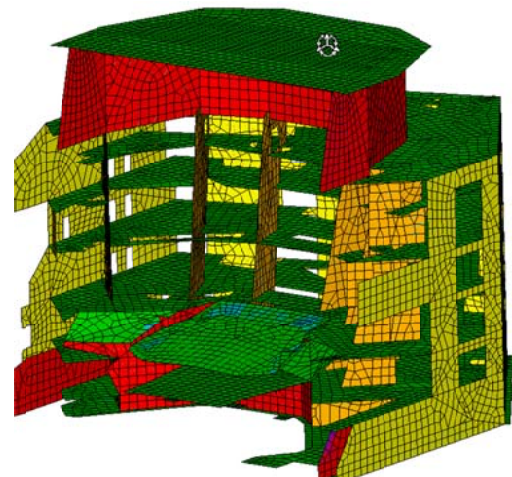


Figura 9. Gran Teatro – modelo global (II)

En cuanto a los elementos estructurales principales, pantallas y losas, un análisis de sensibilidad mostró la gran influencia que tenía el valor del módulo de elasticidad transversal del hormigón (G) sobre la rigidez global de la estructura y, por lo tanto, los desplazamientos horizontales de las pantallas y los asientos de los balcones. Dicho módulo se reduce muy rápidamente debido a la fisuración por tensiones tangenciales en el hormigón, bien sea por momentos torsores (M_{xy}), como por esfuerzos de rasante (N_{xy}) [3]. Para las losas sujetas solamente a cargas verticales, los segundos son despreciables y se tomó como módulo tangencial el valor de $G/8$, usualmente empleado por los autores de esta comunicación para este tipo de elemento.

En el caso de las losas inclinadas y de las pantallas con un claro trabajo de laja, los esfuerzos de rasante son los verdaderamente significativos pero en este caso cuantificar la reducción del módulo G es más complicado y no puede ser uniforme [4]. A partir de los criterios generalmente aceptados de inicio de la fisuración, para un hormigón de $f_{ck} = 30$ MPa se puede establecer el comienzo de la fisuración por cortante en una tensión tangencial límite de 1 MPa, lo que dará un rasante límite de 300 kN/m para una losa/pantalla de 30 cm de espesor. A partir de dicho criterio, se realiza un proceso iterativo por el cual se detectan las zonas con unos cortantes en el plano (rasantes) superiores al valor límite. En dichas zonas, se asigna un material con un módulo G relajado un escalón (de G a $G/2$; de $G/2$ a $G/4$; y así sucesivamente) hasta alcanzar un equilibrio en los esfuerzos.

La estructura del Gran Teatro se concibe independiente del resto de los edificios, con objeto de reducir los efectos de las acciones térmicas e higrométricas, muy condicionantes en el caso de haber realizado un diseño estructural integral. El trabajo monolítico de losas de planta y pantallas, radiales y circunferencial, proporciona una gran rigidez a la estructura que presenta unos desplomes horizontales máximos de apenas 9 mm, según se muestra en la figura 10.

Además de los análisis llevados a cabo en el modelo 3D global, se estudiaron los diferentes tipos de balcón mediante modelos locales 3D (ver figura 11), para poder controlar de manera rigurosa los elementos más singulares del edificio. En cada modelo, no solamente se tuvo en cuenta la fisuración de la losa de fondo del balcón sino que además se introdujeron los valores de inercia fisurada de la totalidad de las vigas peraltadas y transversales.

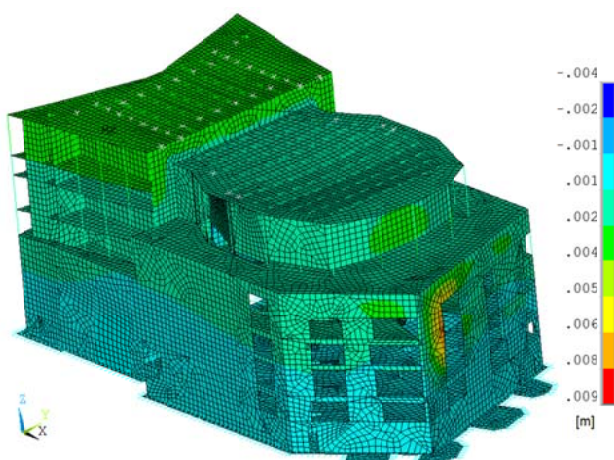


Figura 10. Gran Teatro – modelo global $u_h, k, máx$

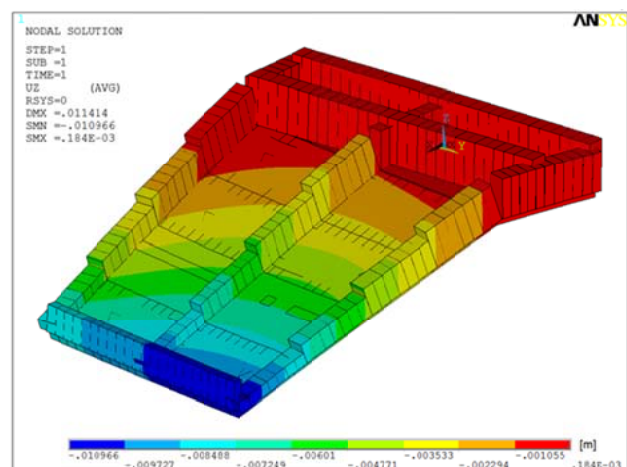


Figura 11. Gran Teatro – modelo balcón – $u_v, k, máx$

En las fotos de las figuras 12, 13, 14 y 15 se muestran algunas fases de la construcción de los balcones del Gran Teatro.



Figura 12. Gran Teatro – ejecución balcones (I)



Figura 13. Gran Teatro – ejecución balcones (II)



Figura 14. Gran Teatro – ejecución balcones (III)



Figura 15. Gran Teatro – ejecución balcones (IV)

La estructura se completa a través de cerchas mixtas autoportantes, que permiten ejecutar el cierre en cubierta sin necesidad de apeos provisionales (figura 16).



Figura 16. Gran Teatro – vistas de las cerchas mixtas de cubierta, por encima de la sala

2.3. Pequeño teatro

La estructura del Pequeño Teatro es análoga a la recién descrita, salvo por la presencia de una grada superior del anfiteatro que sustituye los balcones y se materializa a través de una losa

maciza, rigidizada en el borde mediante un peto estructural (en la figura 17 se muestra una vista general del Pequeño Teatro durante la ejecución de dicha grada, apeada provisionalmente).



Figura 17. Pequeño Teatro – vista general durante la construcción

2.4. Galería

La estructura portante del Pabellón Galería se compone de unos soportes esbeltos y unos núcleos en hormigón armado de sección trapezoidal, constante para simplificar su ejecución, que posteriormente se revisten mediante un forro soportado por una estructura metálica secundaria (figura 18).



Figura 18. Galería (I)



Figura 19. Galería (II)

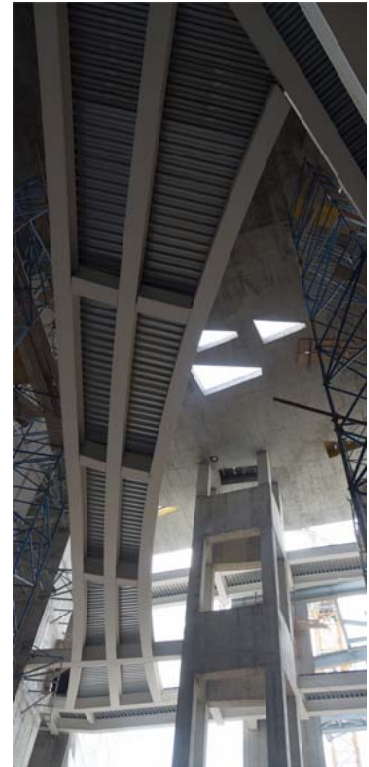


Figura 20. Galería (III)

Las pasarelas se materializan mediante unas estructuras mixtas, que permiten minimizar el canto del paquete estructural y controlar las vibraciones de estos elementos esbeltos (figuras 19 y 20).

Análogamente al caso de los otros edificios, la estructura del Pabellón Galería se concibe estructuralmente independiente del resto de los edificios y la totalidad de los apoyos, de las losas de planta y de las pasarelas de dicha Galería, en las estructuras colindantes, son por lo tanto deslizantes.

2.5. Pabellón de acceso

El pabellón de acceso está constituido básicamente por una cubierta a 16 m de altura, de forma trapezoidal en planta, apoyada en una pareja de soportes de hormigón y en otra de núcleos que recogen también los empujes horizontales de viento y sismo (ver figuras 21 y 22). Dicha cubierta se materializa mediante unas cerchas metálicas longitudinales planas, de 8 m de luz, una cercha metálica transversal espacial, de 18 m de luz, y un forjado mixto de chapa plegada colaborante sobre un emparrillado de vigas mixtas. Una parte de la cubierta vuela aproximadamente 6 m hasta el plano vertical que contiene las dos hojas de la gran puerta monumental en posición de cierre.

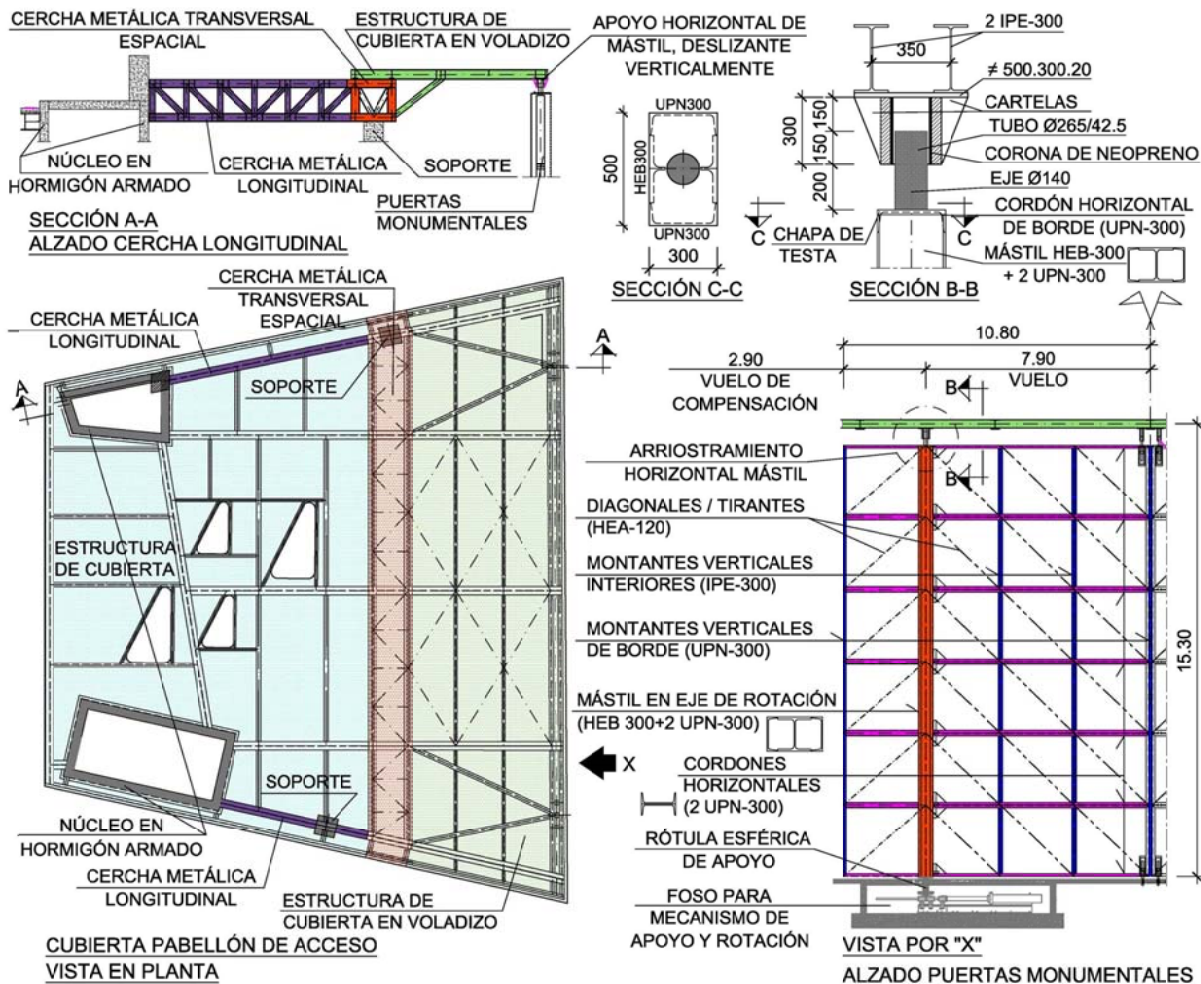


Figura 21. Pabellón de acceso – estructura de cubierta y puertas monumentales

Cada una de las dos hojas presenta un ancho de 10.80 m y una altura de 15.30 m y está constituida por un emparrillado metálico vertical compuesto por cordones horizontales (en parejas de UPN300), montantes verticales (IPE300 para los interiores y UPN300 para los de borde) y diagonales (tirantes HEA120) para recoger los vuelos de la hoja. Dicho emparrillado gira alrededor

de un mástil constituido por un HEB300 central y dos UPN300 laterales conformado un cajón cerrado, apoyado en su extremo inferior en una rótula esférica y arriostrado en su extremo superior con un detalle de apoyo deslizante verticalmente (secciones B-B y C-C de figura 21).



Figura 22. Pabellón de acceso – vista de la estructura de cubierta en construcción

3. Conclusiones

El proyecto de la estructura para el Gran Teatro de Casablanca ha requerido una metodología de trabajo especial, para optimizar el esquema resistente adaptándolo a unas formas arquitectónicas complejas. En primer lugar, la interacción con la Arquitectura ha jugado un papel de gran relevancia, al no poderse separar la forma estructural, arquitectónica y funcional y al aprovechar los volúmenes completos del edificio para el esquema resistente.

En segundo lugar, las complejas interacciones estructurales entre elementos tridimensionales y la necesidad de monolitismo entre losas y pantallas, obligaban al estudio de los sistemas estructurales mediante complejos modelos globales tridimensionales.

Y por último, el aspecto que desde las primeras fases del proyecto condicionó en mayor medida la elección de los tipos estructurales fue la necesidad de adaptarse a los sistemas constructivos empleados en el país, que a veces, sin ser de menor calidad o eficiencia, se diferenciaban ligeramente de los usualmente empleados en España.

4. Participantes

Propiedad: Casa Aménagement

Diseño arquitectónico: Christian de Portzamparc & Rachid Andaloussi

Ingeniería de proyecto: NOVEC

Proyecto de estructuras y supervisión: TYPESA y MC2 Estudio de Ingeniería (Grupo Typsa)

Proyecto de fachadas: ENAR

Ingeniería local de estructuras: Point Optimal & Inter Tridim

Construcción de estructuras: TGCC & Inter Tridim

Control de calidad: Dekra

Referencias

- [1] J. Martínez Calzón, Treatment of the form in structural engineering, 1st International Conference on Structures & Architecture, Guimarães, Portugal, 2013
- [2] J. Martínez Calzón, Á. Serrano Corral, Proyecto y construcción de la estructura de los Teatros del Canal, Centro de las Artes Escénicas de la Comunidad de Madrid, Hormigón y Acero. 251 (2009) 9-34
- [3] F. Leonhardt, E. Mönning, Estructuras de Hormigón Armado, El Ateneo, 1996
- [4] G.C. Giuliani, Costruzioni in Calcestruzzo Armato. Progetto e Verifica delle Strutture, Hoepli, Italia, 2008