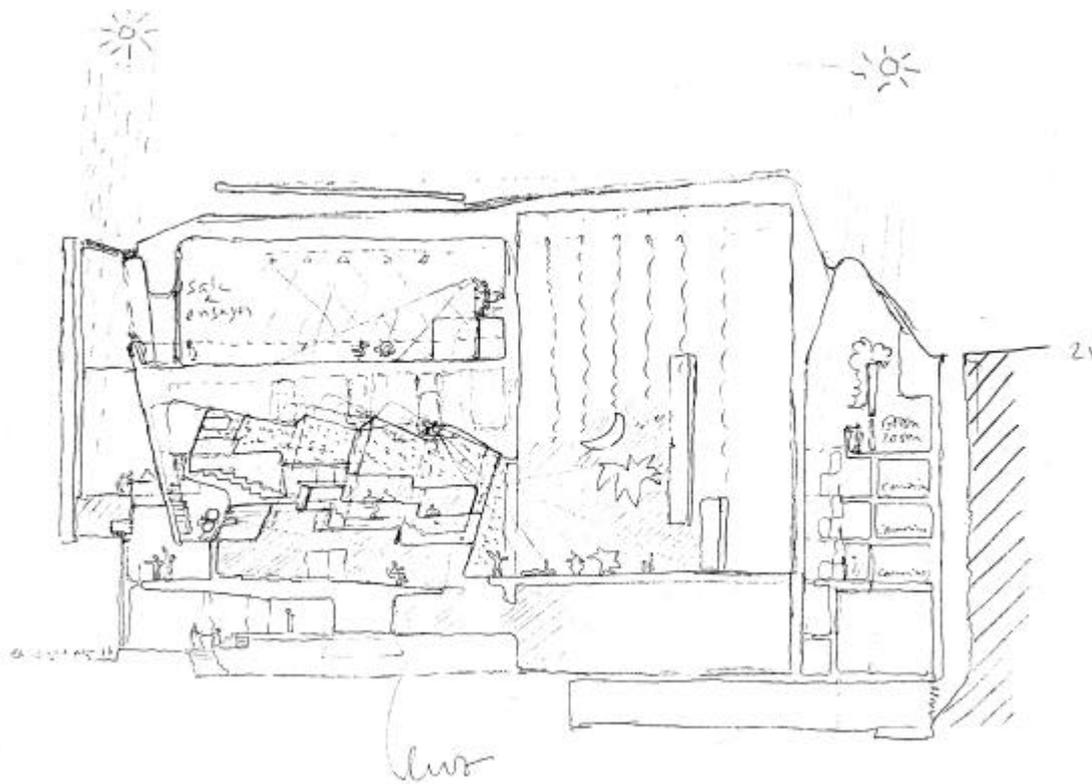


II CONGRESO ACEHE DE PUENTES Y ESTRUCTURAS

Realizaciones, Edificación



LOS NUEVOS TEATROS DEL CANAL EN MADRID

Miguel Gómez Navarro

Julio Martínez Calzón

Dres. Ingenieros de Caminos

MC-2 Estudio de Ingeniería

Víctor de la Serna 21, 28016 Madrid

miguel.gomez@mc2.es

1 INTRODUCCIÓN

En el verano de 2001 la Comunidad de Madrid convocó un concurso restringido de arquitectura para la realización del proyecto del Centro de las Artes Escénicas de la Comunidad de Madrid, Teatros del Canal. Se presentaron cinco proyectos de los cuales el ganador resultó ser el del arquitecto santanderino Juan Navarro Baldeweg. El proyecto ganador prevé la construcción en una parcela de 8750 m² sita en la confluencia de las calles de Cea Bermúdez y Bravo Murillo de un complejo cultural que albergue dos salas de teatro y una escuela de danza [Arquitectura 2001]. Una de las salas es convencional y tiene capacidad para 900 espectadores; la otra, más pequeña, es configurable y permite que la disposición del escenario y de los espectadores se adapte a las necesidades del espectáculo.

En el momento de redactar esta comunicación (marzo 2002) el proyecto está en sus fases finales de licitación y contratación, y previsiblemente en la fecha de la realización del Congreso (noviembre 2002) la construcción de la estructura estará en una avanzada fase de desarrollo.

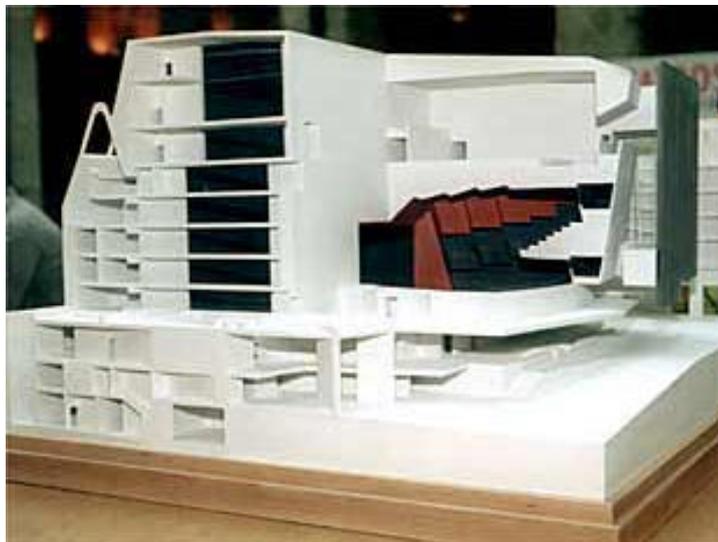


Figura 1 – Maqueta del edificio mostrando una sección por la sala del Teatro grande

2 ESQUEMA ESTRUCTURAL

El conjunto de la estructura del edificio se divide en tres zonas bien diferenciadas correspondientes a los tres cuerpos de que consta el Centro de las Artes Escénicas: el Teatro Pequeño (TP) o sala configurable; el Teatro Grande (TG) o teatro frontal y la Escuela de Danza (D) (Figura 2). Estas zonas están netamente separadas por dos juntas de dilatación transversales al conjunto, en orden a reducir al mínimo posible las incidencias parásitas de las sollicitaciones reológicas y térmicas.

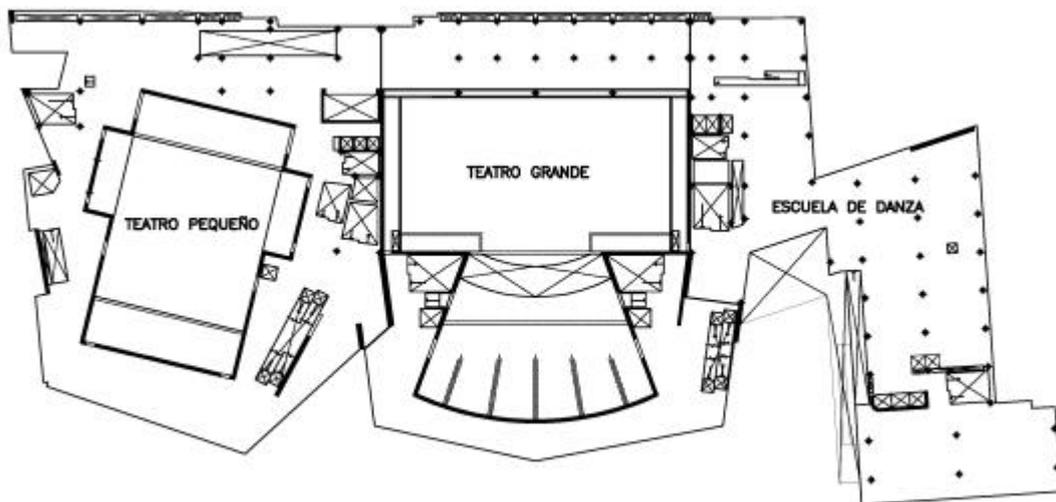


Figura 2 – Planta del edificio a la cota +5.90 y división del mismo en los tres cuerpos que lo constituyen: Teatro pequeño, Teatro grande y Escuela de Danza

Los dos primeros cuerpos citados (TP y TG), aún siendo de dimensiones sustancialmente diferentes, responden a una tipología estructural común. Se emplean en ellos soluciones de hormigón armado muy potentes, constituidas por grandes pantallas estructurales verticales de hormigón armado conectadas monolíticamente con losas de piso macizas. Este sistema estructural se completa con soportes que son de hormigón armado o metálicos según el espacio disponible. Asimismo, en los vanos con luces grandes y especialmente en los situados a gran altura, se prevé también el empleo de soluciones mixtas con vigas metálicas autoportantes, de alma llena o de celosía. Estas soluciones se podrán combinar en obra con pretensados o atirantamientos de carácter provisional y/o definitivo, que permitan la ejecución sin emplear cimbras de gran altura, agilizando notablemente la ejecución de la obra.

En ambos edificios se han dispuesto sistemas de grandes muros-pantalla de tipo pescante con una zona inferior de anchura mucho menor que las zonas superiores. De este modo existen áreas asimétricas en voladizo o en “bandera”, que surgen hacia afuera en grandes dimensiones y ponen en flexión las zonas verticales inferiores antes señaladas. Estos grandes voladizos reciben las cargas funcionales directamente o a través de otras pantallas transversales que recogen las cargas del resto de los graderíos y forjados de plantas. Asimismo, estos grandes voladizos recogen las grandes fachadas inclinadas que se suspenden en su parte alta a través de grandes dinteles en forma de piezas rectas o en balcón.

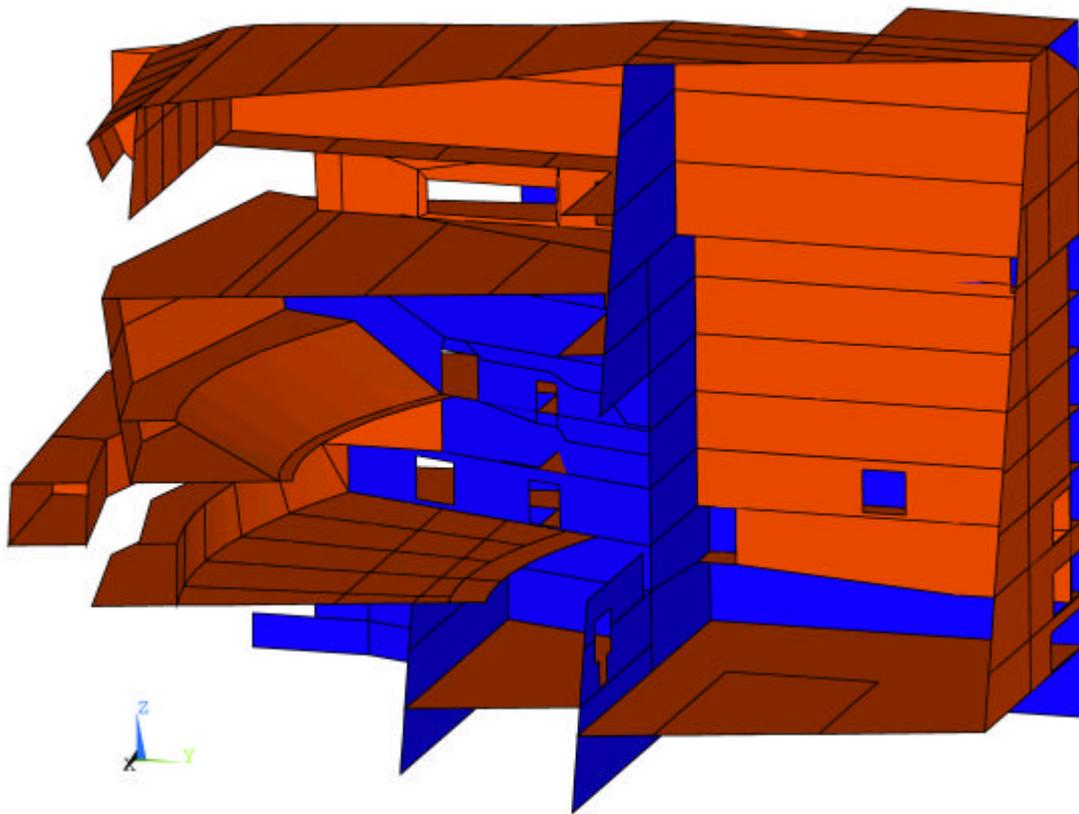


Figura 3 – Sección en perspectiva del modelo del Teatro grande en la que se percibe el sistema de losas en voladizo de la zona frontal de los graderíos y el conjunto de pantallas transversales en pescante que transmiten las cargas a la zona dorsal

En ambos teatros la distribución de pantallas y losas interconectadas da lugar, como se ha dicho, a un sistema de gran monolitismo que permite hacer frente de manera muy favorable a cualquier tipo de sollicitación horizontal: viento, pequeños sismos, empujes, etc., y no tener que contar prácticamente con elementos estructurales específicos para este tipo de acciones.

La magnitud de las acciones y de algunos de los voladizos ha hecho necesario disponer de cables de pretensado que compensen las elevadas cargas permanentes y aseguren un comportamiento favorable tanto en estado límite de servicio como en rotura en las dos pantallas transversales principales y en una de las losas de forjado.

De un modo general y dada la elevada hiperestaticidad de la estructura se ha dispuesto una elevada cantidad de armadura mínima en pantallas y losas. De este modo se reduce la incidencia de la fisuración provocada por acciones y comportamientos estructurales difíciles de prever en el cálculo. Estas cuantías mínimas se estiman en los siguientes valores por cara y dirección:

- losas: en caras comprimidas 2 ‰ y en caras traccionadas 3 ‰,
- pantallas: en caras que no presentan tracciones apreciables debidas a flexiones combinadas con la compresión, 1.5 ‰, y en caras que pueden presentar acciones de tracción por flexión combinada con la compresión general, 2.5 ‰.

Por tanto, las armaduras mínimas totales por cada dirección oscilan entre el 5 ‰ y el 6 ‰ en las losas y entre el 4 ‰ y el 5 ‰ en las pantallas. Además, las losas de piso se protegerán inmediatamente después de su hormigonado con barnices antievaporación para reducir la deshidratación superficial.

En el cuerpo correspondiente a la Escuela de Danza se utiliza un esquema similar al de los teatros sólo en las plantas inferiores correspondientes a almacenes y aparcamientos. En el resto de este cuerpo del edificio se plantea la utilización de una estructura doblemente mixta formada por:

- una losa maciza de hormigón armado que constituirá la superficie portante de la planta, de gran capacidad y cualidad respecto al incendio,
- vigas mixtas parcialmente recubiertas constituidas por perfiles laminados con hormigón en los huecos entre alas; las armaduras que se incluyen en estos huecos permiten, sin necesidad de pinturas ignífugas, alcanzar los tiempos requeridos para la seguridad frente al incendio,
- soportes mixtos parcialmente recubiertos y con análogas condiciones a las descritas para las vigas.

Esta tipología estructural permite mantener vista la estructura en las zonas correspondientes a las áreas de aulas y salas de danza, tal y como el planteamiento arquitectónico solicitaba, y a la vez, dar cumplidas condiciones de capacidad portante ante un eventual incendio.

Otro elemento singular de esta parte del edificio son las dos rampas exentas que con importantes voladizos conectan las diferentes plantas en lugar de unas escaleras convencionales (Figura 4). Estos dos elementos se apoyan en las vigas de los forjados mediante ménsulas de hasta 4 m. El trabajo espacial de bielas y tirantes de los diferentes tramos de las rampas que se conectan mediante los macizados dispuestos en los planos verticales, permite reducir los espesores de las losas y aumentan la liviandad de la estructura tal y como la arquitectura requería.

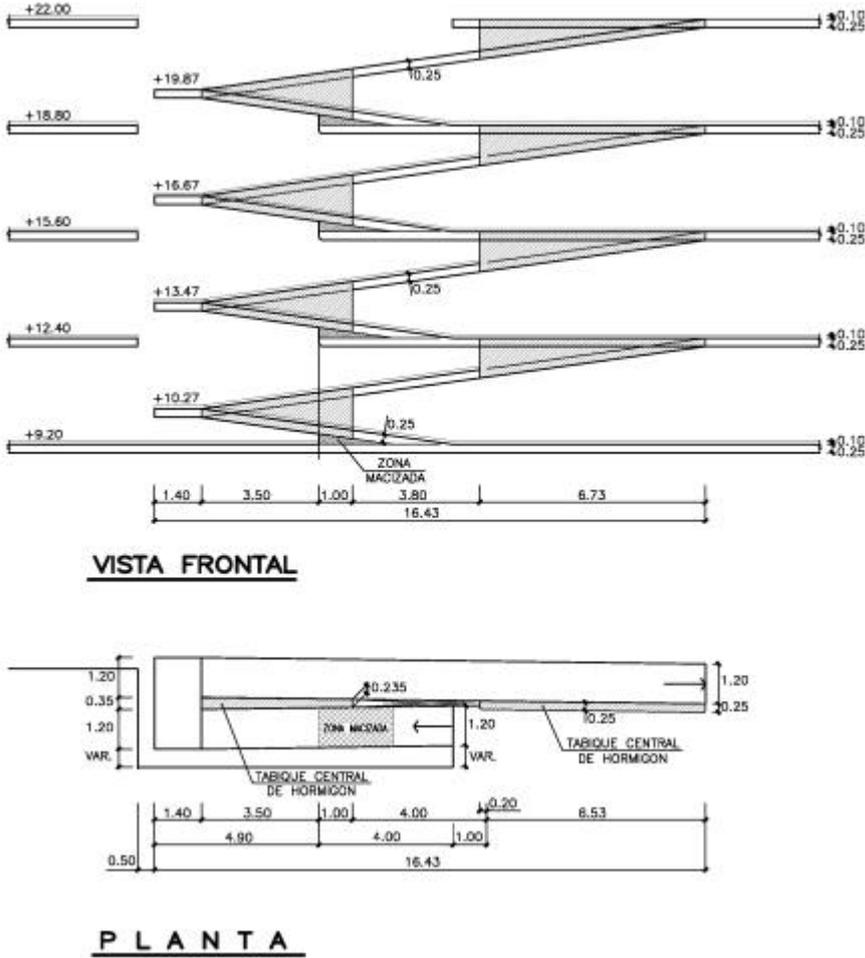


Figura 4 – Rampas de conexión entre plantas en la Escuela de Danza

3 CIMENTACIONES

La cimentación se ha resuelto mediante un sistema de pantallas ejecutadas por bataches que prolongan los muros-pantallas estructurales. Este sistema permite una ejecución rápida y sistemática que se prevé más sencilla que la alternativa de zapatas de grandes dimensiones que hubieran sido necesarias para transmitir al terreno las cargas de los grandes muros-pantallas transversales. Para reducir las consecuencias de la retracción en la posible fisuración de los muros-pantalla se ha previsto incluir en las juntas entre los bataches de estas pantallas de cimentación una pieza de goma (neopreno blando, caucho, etc.) de unos 2 cm de espesor. De este modo se reduce la rigidez longitudinal de los sistemas de cimentación responsables de la retención frente a los desplazamientos impuestos a los edificios por la retracción o las variaciones térmicas.

Este conjunto de pantallas internas de cimentación se completa mediante la ejecución de un muro pantalla perimetral y las zapatas convencionales necesarias para el apoyo de los pilares de la estructura.

4 DIMENSIONAMIENTO

El dimensionamiento de una estructura tan compleja requiere herramientas potentes para poder evaluar de un modo preciso las inciertas interacciones entre las diferentes partes del mismo. En particular:

- el reparto de solicitaciones en la cimentación,
- la transmisión de las cargas de los grandes voladizos frontales a los cuerpos dorsales de los edificios,
- la combinación entre solicitaciones de flexión y axiles en pantallas y losas.

Estas interacciones se pueden estimar mediante sencillos modelos de bielas y tirantes en estructuras bidimensionales o en estructuras tridimensionales con menos elementos que interactúen. Por ello, para obtener los esfuerzos de dimensionamiento se desarrollaron dos modelos de elementos finitos (uno para cada teatro) que incluían la totalidad de los sistemas estructurales de los mismos mediante barras y placas. El número aproximado de elementos de los modelos era 28100 en el caso del Teatro pequeño y 36800 en el del Teatro grande. Para

facilitar el procesado de los resultados se desarrollaron procedimientos informáticos *ad-hoc* que permitan resolver automáticamente:

- la obtención de gráficos de esfuerzos flectores, axiales, y cortantes por plantas y pantallas,
- la combinación de esfuerzos de flexión y torsión, así como los axiales y cortantes en el plano de la placa,
- las envolventes de esfuerzos pésimas debidas a las combinaciones de las diferentes acciones,
- la obtención automática de mapas de refuerzos de armadura necesarios en función de unos tipos definidos previamente por el usuario.

En la Figura 5 se muestra un ejemplo de los mapas de refuerzos obtenidos para una de las pantallas transversales. El código 0 representa la armadura base dispuesta para reducir la fisuración por condiciones de retracción e hiperestaticidad de la estructura (ver apartado 2). Cuando el refuerzo máximo definido previamente no es suficiente para resistir los esfuerzos obtenidos, el programa lo indica mediante el color rojo (código 10), debiéndose modificar el espesor del elemento o evaluar si se trata únicamente de una punta muy localizada que no debe ser considerada en el armado. En cualquier caso, se han dispuesto armaduras de refuerzo en los bordes de los huecos tanto de losas como de pantallas para absorber este tipo de esfuerzos localizados.

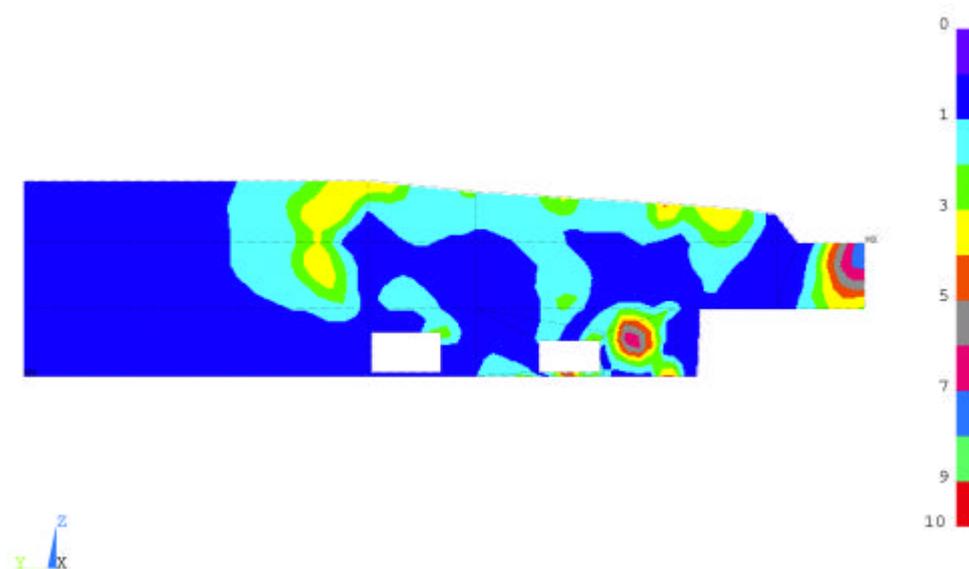


Figura 5 – Ejemplo de mapa de refuerzo de armaduras obtenido automáticamente a partir del cálculo por elementos finitos: Pantalla 167, armadura horizontal

5 CONCLUSIONES

La compleja geometría y los estrictos requerimientos arquitectónicos de los Teatros del Canal hacen necesaria una estructura que combine diferentes sistemas que incluyen losas macizas y muros-pantalla de hormigón armado o pretensado, forjados con vigas mixtas parcialmente embebidas, soportes mixtos, celosías mixtas, pantallas de cimentación, etc.

La complejidad del cálculo ha sido resuelta mediante modelos globales de elementos finitos de placas y barras a los que se ha complementado con procedimientos desarrollados *ad-hoc* para posprocesar los resultados de los cálculos y obtener con facilidad diagramas de armado. De este modo se agiliza el procedimiento y se reducen las incertidumbres asociadas al empleo de un modelo de grandes dimensiones que, no obstante, es indispensable para evaluar las complejas interacciones entre los diversos elementos de la estructura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

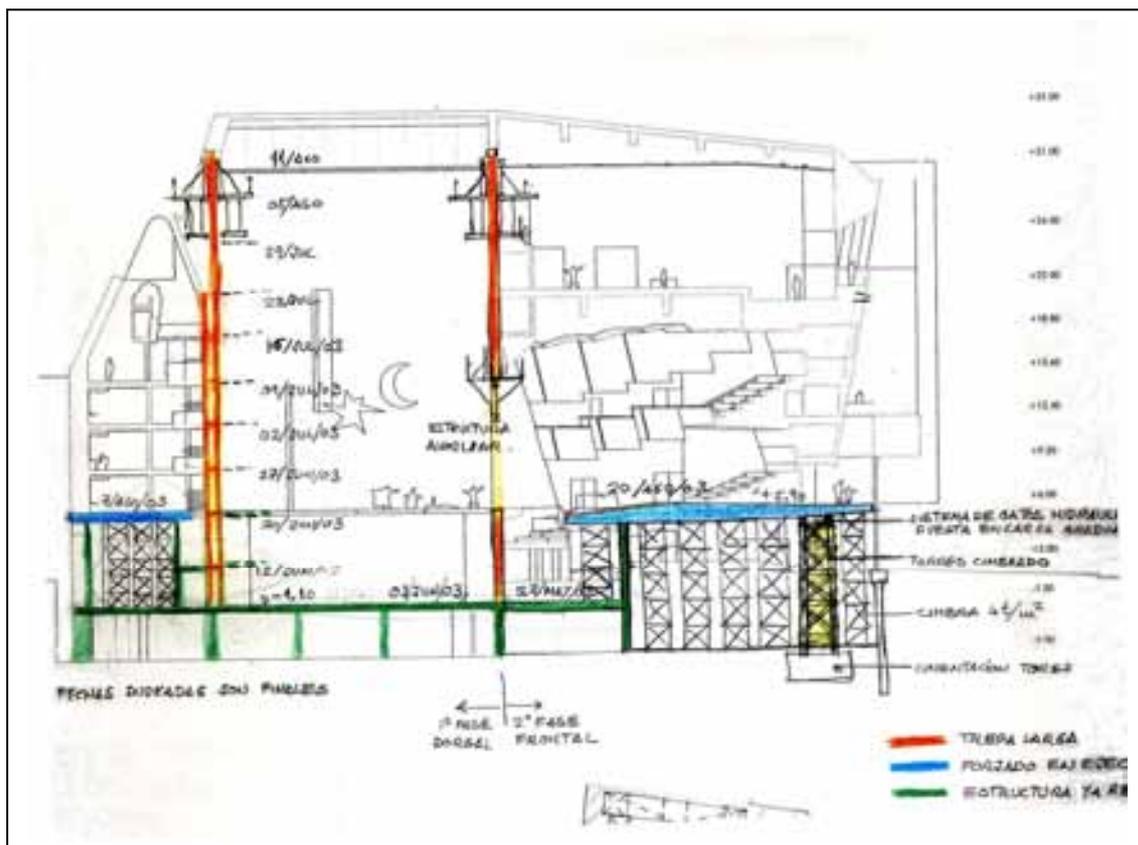
[Arquitectura 2001] Arquitectura, *Teatros de Canal – Proyecto definitivo para el Centro de las Artes Escénicas de la Comunidad de Madrid*, Arquitectura Nº 326, pp.. 86-93, Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 2001.

III CONGRESO DE ACHE DE PUENTES Y ESTRUCTURAS

LAS ESTRUCTURAS DEL SIGLO XXI
Sostenibilidad, innovación y retos del futuro



Realizaciones



PROCESO CONSTRUCTIVO DEL TEATRO DEL CANAL CENTRO DE LAS ARTES ESCENICAS DE LA COMUNIDAD DE MADRID

Antonio **TABERA GARCIA**¹, M^a Mercedes **MADRID RAMOS**², Antonio **TABERA ATIENZA**³

¹ Ingeniero de Caminos. Dirección Técnica de DRAGADOS

² Ingeniero de Caminos. Dirección Técnica de DRAGADOS

³ Arquitecto. Jefe de la Oficina Técnica de la UTE DRAGADOS-OHL

RESUMEN

Como complemento de la exposición de MC2 describiendo el Centro de las Artes Escénicas de la Comunidad de Madrid, el proyecto de la estructura y la metodología de cálculo, se presentan a continuación los aspectos más singulares de la construcción, realizada por la UTE DRAGADOS-OHL.

Se describen, en primer lugar, los condicionantes del emplazamiento y los aspectos generales de la construcción, caracterizados por procesos de ejecución convencionales. La parte central de la exposición se refiere a la realización de los cuerpos destinados a Teatro Principal y Teatro Configurable, como parte de la obra con mayor interés técnico, dada la especificidad de los métodos y procesos constructivos aplicados. Finalmente, se hace una breve referencia a la ejecución del Centro Coreográfico.

1. EMPLAZAMIENTO

El edificio se encuentra en el centro de Madrid, barrio de Chamberí, limitando dos de sus lados con calles fundamentales del sistema viario de la capital y siendo los otros dos medianeros con edificios de viviendas. La construcción ocupa casi el 90% del solar, dejando muy poco espacio disponible para la implantación de casetas y medios auxiliares, zonas de acopios, etc., lo que unido a una reducida accesibilidad ha obligado a continuas variaciones estratégicas durante la ejecución.

La intensidad del tráfico en las calles colindantes ha supuesto muchas limitaciones para la obtención de permisos de ocupación de aceras y calzada y para el movimiento de vehículos y maquinaria, éstas circunstancias han obligado a la frecuente realización de trabajos durante las horas nocturnas.

Por otra parte, la existencia de edificios de viviendas en el entorno ha impuesto la necesidad de un estricto control del ruido, limitando los trabajos que se podían desarrollar durante el horario nocturno. A lo anterior hay que añadir que, algunas de las construcciones, con más de 50 años de antigüedad y en mal estado de conservación, han obligado a extremar el cuidado durante la fase de

contención y vaciado, haciendo necesaria la implantación de rigurosos y continuos controles topográficos de asentamientos y verticalidad de las medianerías.



Figura 1. Imagen del emplazamiento

2. CONTENCIÓN DEL TERRENO Y CIMENTACIÓN

Previo al inicio de la obra, se realizó un estudio complementario al proyecto para comprobar la tipología y estado de la cimentación de los edificios medianeros, mediante una serie de catas, y una inspección de los inmuebles, para comprobar su estado de conservación.

El resultado del análisis aconsejó realizar el muro de contención, adyacente a las medianerías, mediante una pantalla de pilotes, casi tangentes y perforados en secuencia de uno cada tres, para evitar posibles interferencias entre ellos. Este sistema se consideró como el más adecuado al estado de las medianerías y el más flexible para adaptarse a las alineaciones quebradas en planta y a las distintas profundidades de las cimentaciones. La pantalla de pilotes ha sido, también, el sistema de contención utilizado en el resto del perímetro del edificio para proteger las aceras adyacentes y para poder optimizar las superficies aprovechables para las instalaciones de obra.

Las buenas características resistentes del terreno al nivel de apoyo del edificio han permitido realizar una cimentación mediante grandes zapatas-losas bajo los elementos portantes principales y zapatas normales bajo los pilares.

3. ESTRUCTURA DE LOS TEATROS

La estructura de los teatros es la que presenta un mayor interés constructivo, se encuentra fuertemente condicionada por su estrecha relación con una arquitectura de geometría compleja y por la interacción entre los diferentes elementos resistentes (pantallas, vigas peraltadas, losas).

Aunque los Teatros Principal y Configurable ofrecen una funcionalidad marcadamente diferente, ambas piezas presentan grandes coincidencias y similitudes en su organización estructural, en los dos pueden diferenciarse: la caja escénica, el cuerpo frontal y el cuerpo dorsal.

Las cajas escénicas son los cuerpos de mayor altura, están caracterizados por la verticalidad de las pantallas que configuran su volumen y por encontrarse prácticamente huecos en su interior. Los cuerpos frontales están constituidos por pantallas y losas de geometría variable en cada una de las plantas que, a medida que van ganando altura, incrementan su vuelo sobre los niveles inferiores, dando lugar a unos elementos volados con marcada diafanidad en el nivel de acceso. Los cuerpos dorsales tienen una organización más convencional aunque no les faltan determinados elementos estructurales de cierto interés constructivo.

El proceso constructivo de los teatros ha estado condicionado por una exigencia del proyecto de estructura:

“... a partir de la realización del forjado de la planta 0 (+5.90), las zonas voladas de los dos teatros, no deberán ejecutarse en tanto no estén al menos terminadas dos plantas de las zonas dorsales de los cuerpos de los escenarios, de manera que dichas zonas de vuelos están debidamente compensadas por las zonas dorsales. Este desfase de al menos dos plantas deberá ya mantenerse a lo largo de todo el proceso de ejecución hasta rematar las zonas de cubierta de los escenarios dispuestos a la cota +35.00”

3.1. Cajas escénicas

Partiendo del condicionante anterior y de una geometría verticalmente homogénea se decidió adelantar la construcción de las cajas escénicas,

utilizando un encofrado trepante a dos caras para la ejecución de las pantallas principales, arrancando en la planta -1 del Teatro Principal y en la planta 0 del Teatro Configurable. La ejecución de las losas y pantallas del interior de las cajas, así como de las conexiones con las losas y pantallas de los cuerpos frontales y dorsales quedaban temporalmente desfasadas.

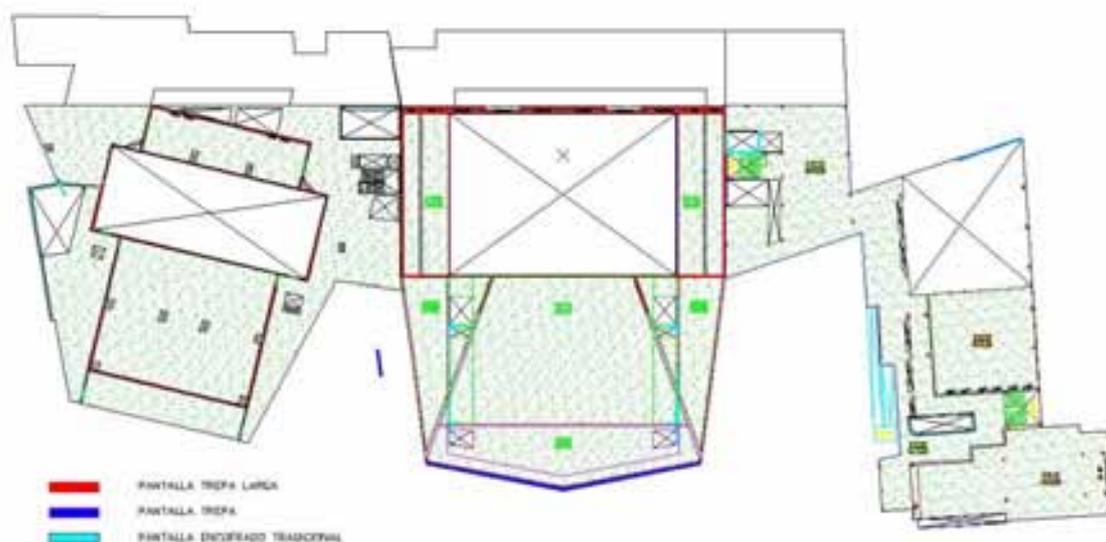


Figura 2. Ejecución pantallas

Este sistema constructivo, que cumplía con el requisito de compensar con la masa de las cajas escénicas el efecto de vuelco provocado por las zonas voladas frontales, ha permitido mejorar el rendimiento de la construcción, haciendo posible el trabajo simultáneo en las cajas escénicas y en los cuerpos frontales, acortando plazos y mejorando la seguridad de los operarios, al crear un único nivel de trabajo en las trepas.

La trepa de las pantallas ha planteado algunas exigencias técnicas que ha sido necesario resolver, como han sido la necesidad de asegurar la estabilidad provisional de los elementos trepados y la de resolver las conexiones monolíticas con otras losas y pantallas, especialmente la de alojar los anclajes de pretensado de las grandes losas frontales dentro de las pantallas.

Las importantes dimensiones de las cajas escénicas y su provisional exposición a las acciones eólicas han obligado a realizar análisis locales sobre la estabilidad temporal de sus elementos más comprometidos y a incorporar

refuerzos internos y elementos metálicos de acodamiento provisional. Por otra parte, las pantallas trepadas presentaban algunos huecos de grandes dimensiones (accesos a la escena para decorados, embocaduras,...) que han obligado a la utilización de estructuras auxiliares de hormigón (también trepadas y posteriormente eliminadas mediante corte) y/o metálicas (torres de cimbra para las trepas iniciadas en altura).



Figura 3. Tropa de una de las cajas

Aunque las pantallas trepadas presentaban cierta independencia del resto del edificio, en numerosas secciones ha sido necesaria su conexión con otras pantallas y losas, interiores y exteriores a las cajas escénicas. Para asegurar el monolitismo de las uniones se ha recurrido a diversas medidas adecuadas a las exigencias de cada elemento. La solución más frecuente ha sido dotar a las armaduras en espera, alojadas en las pantallas, con manguitos roscados, aunque en otros casos se han dispuesto armaduras provisionalmente dobladas o placas metálicas embebidas. Se ha completado la conexión con un picado superficial del hormigón de la pantalla al nivel de las losas.

Para resolver las interferencias ocasionadas por el pretensado, principalmente el alojamiento de los anclajes en los tramos trepados de las pantallas, ha sido necesario, en algunos casos, aumentar el espesor de la pantalla o reducir las dimensiones de las trompetas, sustituyendo los cables inicialmente previstos

por un número mayor con menor fuerza unitaria de tesado y transformando todos los anclajes alojados en las pantallas trepadas por anclajes pasivos.

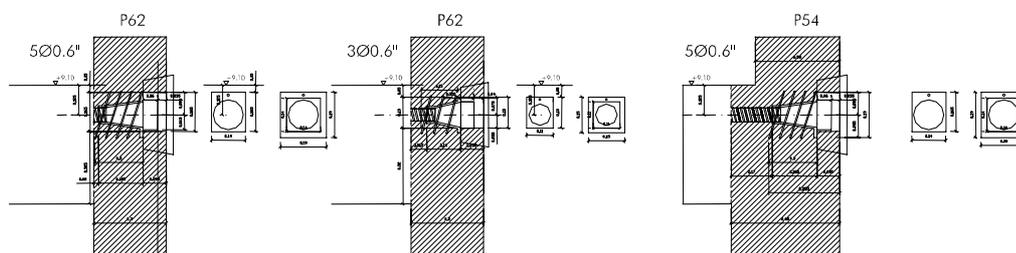


Figura 4. Detalle de las cabezas de anclaje en las pantallas trepadas

Las cajas escénicas se han completado, una vez terminada la trepa, con losas y pantallas interiores a diferentes alturas; para su ejecución han sido necesarias cimbras y torres de apeo provisionales.

La cubierta de las cajas escénicas, situada sobre un vacío de más de 35 metros de altura, está resuelta mediante celosías mixtas autoportantes y losas de hormigón, que se han encofrado sobre chapa metálica no colaborante. Esta estructura de cubierta servirá en un futuro próximo para suspender de ella el peine y el equipamiento escénico.

3.2. Cuerpos frontales

Los cuerpos frontales de los teatros están formados por una superposición de ámbitos para usos diferentes: accesos, salas de público, deambulatorios a varios niveles, anfiteatro y sala de ensayo (T. Principal), cubiertas con alojamiento de los grandes equipos de climatización, ..., y grandes vigas perimetrales en coronación para cuelgue de las fachadas. Este conjunto está organizado estructuralmente mediante una compleja imbricación de grandes pantallas laterales (crecientes hacia el frente a medida que se elevan), pantallas frontales (una vez salvado el gran hall del acceso) y losas macizas, suspendidas de las pantallas que nacen sobre ellas.

Las losas de piso de las salas principales de ambos teatros se encuentran a una altura de unos 6 metros sobre la calle y se hormigonaron sobre cimbra apoyada en el terreno. La sustentación definitiva de estas losas se produce

mediante cuelgue desde las pantallas que nacen sobre ellas, aunque provisionalmente estas pantallas gravitan sobre las losas de arranque. Por otra parte, las pantallas tienen una serie de huecos de paso que desplazan la secciones resistentes a las zonas altas de las mismas, lo que creaba una fuerte acumulación de cargas sobre las losas. Para soportar temporalmente estas cargas se dispusieron un conjunto de torres de apeo de gran capacidad portante situadas en la vertical de las pantallas resistentes, lo que permitió retirar la cimbra y liberar espacio para seguir ejecutando la obra permitiendo el paso por debajo de las grandes losas.

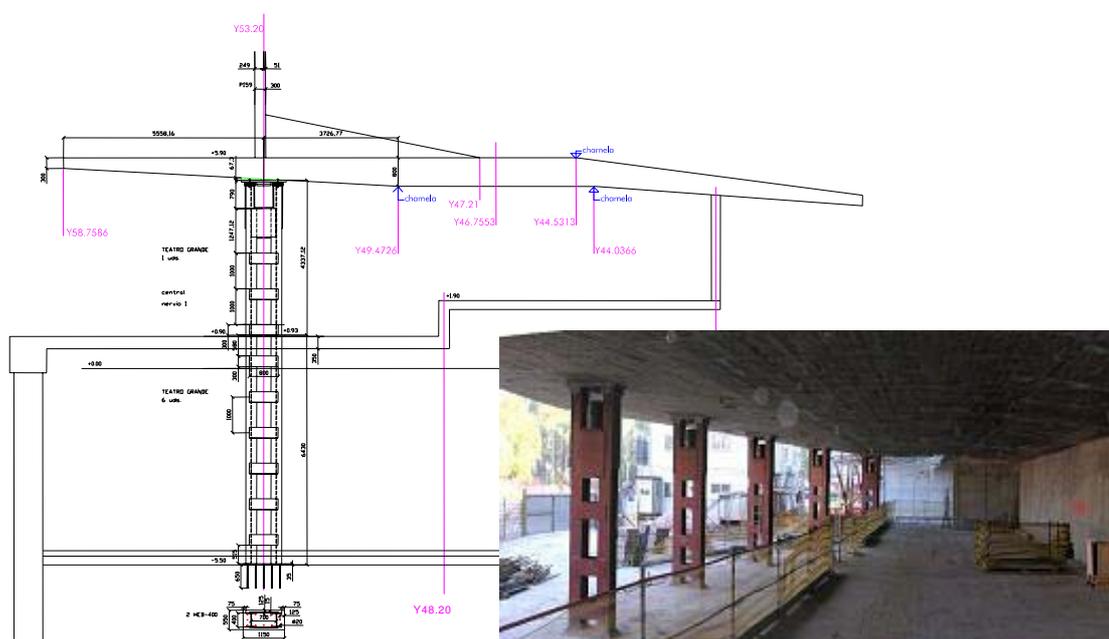


Figura 5. Teatro Principal. Torres de apeo provisionales

Una vez que la estructura superior hubo alcanzado un nivel suficiente de desarrollo se procedió a su puesta en carga retirando los apeos provisionales de forma controlada. Para proceder a la retirada del apuntalamiento provisional se dispusieron unos gatos hidráulicos cilíndricos en cada torre de apeo (7 gatos en el Teatro Principal y 5 en el Configurable), con una capacidad de carga máxima de 6500 kN, cada uno. Estaban conectados con una sola central y mediante un programa informático se podía conocer en tiempo real la fuerza actuante y el desplazamiento de cada uno de los cilindros, con la posibilidad de actuar y controlar los gatos de manera individual o por grupos. El sistema de control de la operación se completaba con flexímetros en el contacto entre las

torres y la estructura y mediante topografía de precisión. El proceso de desapeo se realizó siguiendo un protocolo en cuatro fases, comprobando en todo momento que los parámetros medidos (cargas, desplazamientos) se mantenían dentro del rango estimado por la modelización de la estructura.



Figura 6. Teatro Principal. Retirada de apeos provisionales

En la primera fase se realizó el pesaje de la reacción actuante sobre cada torre de apeo, para ello, de forma individualizada para cada gato, se iba aplicando carga escalonadamente y anotando las fuerzas y desplazamientos (lecturas de los flexímetros) de cada gato hasta el momento del despegue, momento en el que se producía la transferencia de carga de la estructura a través del gato correspondiente y que venía marcada por un brusco cambio de la pendiente de la recta carga-desplazamiento del flexímetro.

Una vez conocida la carga real sobre cada una de las torres se pasó a la segunda fase, poniendo simultáneamente en carga todos los gatos, de forma también escalonada y hasta los valores del pesaje medidos, logrando el despegue completo de la estructura con respecto a las torres. Se continuó aplicando carga hasta alcanzar una elevación de unos 5 mm en el apoyo menos elevado.

En la tercera fase, después de haber retirado de la cabeza de las torres de apeo una serie de galgas de seguridad, que permitían limitar el descenso, se hizo descender la estructura a la posición de partida. Posteriormente, se

siguieron bajando los gatos controlando la carga de los mismos y eliminando las galgas necesarias de los apeos, hasta descargarlos totalmente (cuarta fase). En ese momento se llegó al final del proceso, que se completó con la retirada de los gatos y el desmontaje de los apeos provisionales.

Para la construcción de las pantallas laterales y frontales de estos cuerpos también se ha recurrido a la trepa cuando su altura era superior a la de una puesta de encofrado. Los tramos de pantallas que se encontraban en vuelo respecto a las plantas inferiores han precisado apeos temporales que en algunas ocasiones han llegado a ser importantes torres apoyadas en el terreno al nivel de la calle. Algunas pantallas, que por su ubicación o geometría presentaban unas mayores complicaciones de ejecución (altura, inclinadas, en el vacío), cuando las exigencias arquitectónicas y estructurales lo permitían, han sido resueltas con celosías o vigas cajón metálicas. En estos casos ha sido necesario recurrir a grúas móviles de elevada capacidad de carga y alcance para el montaje.

Sobre la sala de público del Teatro Principal se ha construido un anfiteatro, organizado estructuralmente como un gran cajón monocelular de trazado curvo y sección trapezoidal, delimitado por losas y por la gran pantalla frontal del edificio, que apoya en las pantallas laterales de la sala. Las losas se han ejecutado sobre cimbras que ha sido necesario mantener hasta que la totalidad del conjunto ha adquirido capacidad resistente.



Figura 7. Teatro Principal. Anfiteatro

En el Teatro Principal, sobre la sala de público y el anfiteatro se encuentra la Sala de Ensayos, ocupando la totalidad de la superficie. La estructura de esta gran sala está organizada a base de grandes vigas armadas, tanto a nivel del piso como de la cubierta; ambas familias de vigas apoyan en las pantallas laterales, son autoportantes y trabajan como secciones mixtas con las losas macizas de hormigón armado que van entre ellas.

Las grandes piezas metálicas, debido a sus dimensiones y pesos, han tenido que ser transportadas y montadas por tramos con la ayuda de torres de apeo provisionales, aunque son autoportantes. A pesar de la gran capacidad de carga de las grúas torre instaladas, en determinados casos ha sido necesaria la utilización de grúas móviles que operaban desde la zona frontal del edificio, ocupando la acera y la calzada cuando las dimensiones superaban las pequeñas zonas libres del solar.

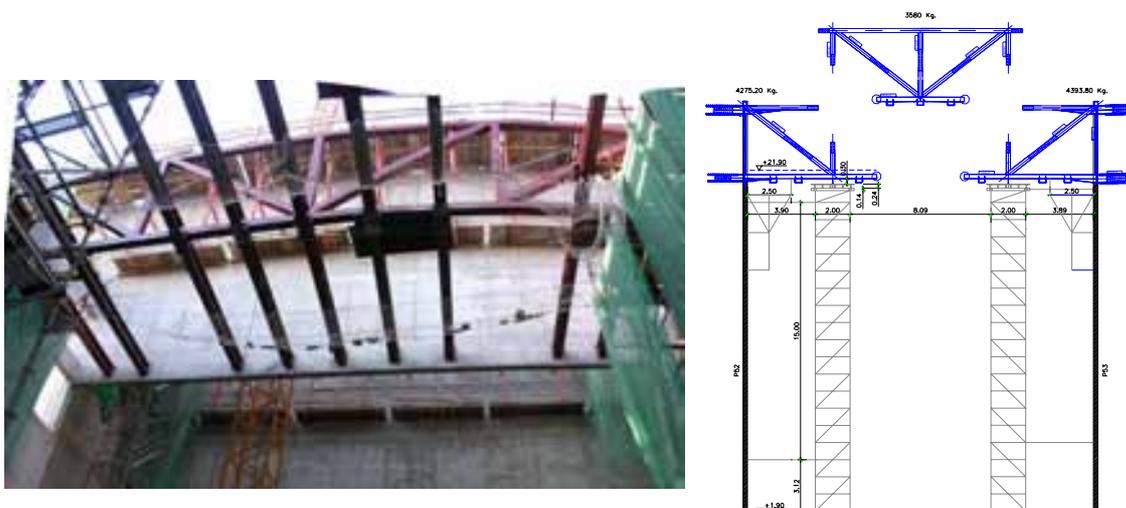


Figura 8. Teatro Configurable. Cubierta de Sala

Para la ejecución de las losas a gran altura y en sustitución de cimbras, la estructura metálica principal se ha complementado con un sistema de vigería metálica secundaria y chapas grecadas conformando el encofrado perdido de las losas de hormigón; el carácter de encofrado perdido ha hecho innecesario el tener que ignifugar la estructura metálica secundaria y la chapa.

En la parte superior de los teatros existen una serie de pantallas voladas en bandera que han precisado de grandes torres de apeo, arriostradas a la parte inferior de la estructura; la estabilización transversal ante la acción del viento, durante la fase de ejecución, ha obligado a incorporar diversas estructuras auxiliares.



Figura 10. Conjunto con estructura terminada

3.3. Cuerpos dorsales

La estructura de los cuerpos dorsales es de tipo convencional, formada por pilares de hormigón o metálicos y losas macizas de hormigón apoyadas en los pilares y en las pantallas de las torres escénicas.

4. ESTRUCTURA DEL CENTRO COREOGRÁFICO

Finalmente, la tercera pieza del Centro es el edificio destinado a danza con una estructura de pilares y vigas metálicos y losas de hormigón, también dentro de una organización y proceso constructivo convencionales.

III CONGRESO DE ACHE DE PUENTES Y ESTRUCTURAS

LAS ESTRUCTURAS DEL SIGLO XXI
Sostenibilidad, innovación y retos del futuro



Realizaciones



TEATRO DEL CANAL CENTRO DE LAS ARTES ESCÉNICAS DE LA COMUNIDAD DE MADRID

Julio **MARTÍNEZ CALZÓN**¹, Álvaro **SERRANO CORRAL**²

¹ Dr. Ingeniero de Caminos. MC2 Estudio de Ingeniería

² Ingeniero de Caminos. MC2 Estudio de Ingeniería

RESUMEN

Se presenta a continuación el proyecto y construcción de la estructura del Centro de Artes Escénicas de la Comunidad de Madrid, Teatro del Canal, del arquitecto Juan Navarro Baldeweg. Esta estructura se compone de tres edificios: dos teatros y un centro coreográfico con estructuras de hormigón armado y pretensado, metálicas y mixtas. Los edificios se caracterizan por tener una estructura colgada de las zonas superiores mediante pantallas y losas en voladizo de hormigón pretensado de hasta 18 m. El proyecto de una estructura evolutiva de esta magnitud lleva aparejados la utilización de avanzados sistemas de análisis que, igualmente, se describen a continuación.

PALABRAS CLAVE

Teatro, hormigón pretensado, pantallas, estructura colgada, postproceso.

1. INTRODUCCIÓN

Madrid hasta la actualidad, no contaba con ningún espacio moderno y funcional para acoger la actividad teatral propia de su posición, teniendo que acudir en la mayoría de las ocasiones a teatros de origen decimonónico, que por sus raíces, poseen una gran belleza artística, pero que no cuentan con la comodidad, funcionalidad, visibilidad, acústica, ni situación adecuada para las más exigentes producciones teatrales actuales y futuras.

Para solucionar esta carencia y buscando un espacio cómodo, moderno y funcional, en junio del año 2000 la Comunidad de Madrid, con el patrocinio del Canal de Isabel II, convocó un concurso restringido para el proyecto del Centro de Artes Escénicas de la Comunidad, Teatro del Canal, del que resultó ganadora, por unanimidad, la propuesta del arquitecto Juan Navarro Baldeweg, que contaría con MC2 Estudio de Ingeniería para llevar a cabo el audaz proyecto estructural necesario para desarrollar su diseño arquitectónico.

En el año 2002, las obras fueron adjudicadas a la UTE formada por las empresas Dragados (entonces ACS) y OHL.

2. DESCRIPCIÓN GENERAL

Situado en un solar de 8.750 m², el edificio se compone de tres piezas bien diferenciadas funcionalmente por el objeto de su uso, y arquitectónicamente por los volúmenes que generan y los espacios intermedios que determinan. La superficie construida es de 35.200 m² de los que son útiles 29.400 m².



Figura 1. Imagen virtual de los edificios terminados: Teatro Configurable, Teatro Principal y Centro Coreográfico (de izquierda a derecha)

El Teatro Principal constituye la pieza central del edificio. Consiste en una sala para 928 espectadores situados en dos niveles, con un escenario de 40 m de ancho y 20 m de fondo de escena. El foso de orquesta, usualmente cerrado, dispone de una plataforma móvil que permite, en caso necesario, emplear a una orquesta de hasta 83 músicos. Sobre esta sala principal, el teatro cuenta con una amplia zona de ensayos de 28 x 25 m² completamente diáfana.

Complementariamente, se ha construido una segunda sala de carácter polivalente, libremente configurable en función del espectáculo que se represente en cada momento. Dispone de techo y suelo técnicos, que permiten situar el escenario en el centro de la sala o en posición frontal y distribuir a los espectadores en la forma que más convenga al espectáculo mediante el uso de gradas telescópicas. Su aforo puede variar entre 450 y 694 personas.



Figuras 2. Plantas esquemáticas de los Teatros Configurable (izq) y Principal (der)

La tercera componente del edificio consiste en un Centro Coreográfico, dedicado al desarrollo y promoción de la danza como expresión artística, con salas de baile, aulas, estudios, camerinos, salas de entrenamiento, una unidad de documentación y una oficina para la promoción y difusión de la danza.

Estas tres zonas están unidas en su parte dorsal por una zona común de servicios, que permite la utilización de las salas de forma individual o conjunta.

Exteriormente el edificio está rodeado por una piel de cristal colgada de las zonas superiores de la construcción. Igualmente, la zona dorsal de servicios cuenta con un lucernario que proporciona luz natural a dicha zona y da una mayor dignidad a estos espacios interiores alejados del público.

3. TIPOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN ESTRUCTURAL

Por su tipología estructural se puede separar la parte correspondiente a los teatros y la correspondiente al Centro Coreográfico.

Ambos teatros se han diseñado con una solución estructural común consistente en grandes pantallas y losas macizas de hormigón armado en general, y pretensado en los grandes voladizos del frente del edificio. La estructura se completa con pilares de hormigón armado (en las plantas inferiores), metálicos (en las superiores), y vigas, celosías y entramados mixtos autoportantes que permiten cubrir los grandes espacios de las cajas escénicas y las salas sin

necesidad de apeos durante su construcción, que se realizan a gran altura; así mismo de ellos cuelga toda la maquinaria escénica de los teatros.

Los edificios, a nivel de calle pretende ser una prolongación del espacio público exterior, por lo que, a la transparencia de su piel de cristal, se une la necesidad de una completa ausencia de soportes en la zona frontal de ese nivel (cotas -1.00 y +1.00), estando la entrada a las salas unos 6 metros por encima de la calle (cota +6.00), facilitándose el acceso mediante escaleras mecánicas.

3.1. Teatro Principal

En el teatro principal, lo anterior implica que el conjunto de pantallas verticales de hormigón que salen de las que forman la caja escénica tienen menor longitud en el nivel inferior que en los superiores, dando una configuración general en forma de “pescante” o “en bandera”, y esto lleva a que, estructuralmente, tanto el patio de butacas, el anfiteatro y las zonas exteriores de entrada a la sala surgen hacia fuera como grandes voladizos y están colgadas de la parte trasera de las pantallas, que a su vez, están unidas y estabilizadas por las pantallas que sirven de cierre a la caja escénica.



Figura 3. Esquema e imagen de la estructura colgada del Teatro Principal

La entrada a la sala consiste en una gran losa pretensada con 18.20 m en voladizo aparente, observable desde la planta inferior, lo que unido su acabado previsto, con zonas en hormigón visto, da a esta estancia una espectacularidad

singular. Sin embargo, dado que esta losa está colgada de la estructura superior del teatro, el voladizo de la losa del forjado es de únicamente 6.00 m.



Figura 4. Vista inferior de la gran losa volada del Teatro Principal

La grada superior en anfiteatro se resuelve estructuralmente como una gran viga de sección cajón, en la que el ala superior, que corresponde a la zona donde se sitúa el público, se inclina hasta converger con el ala inferior horizontal, que es el techo de la zona trasera del patio de butacas, permitiendo dejar libre toda la zona inferior, salvando una luz de 34 m y apoyándose en las pantallas laterales, de las que cuelga la losa mencionada anteriormente.

Las pantallas principales están pretensadas puntualmente, debido a las fuertes tracciones que provocan las zonas colgadas frontales.



Figura 5. Vista inferior del sistema estructural que conforma el anfiteatro

Sobre la zona de público del teatro principal, se sitúa una sala de ensayos que está soportada por vigas armadas mixtas, a construir a gran altura sin apeos, de luz variable hasta un máximo de 31 m, y de las que, además, cuelga la

concha acústica del teatro y las pasarelas de acceso a las instalaciones situadas en el techo de la sala.

En la parte superior del edificio, recorriendo todo su perímetro, se dispone una viga balcón de hormigón o metálica, según las zonas, que sirve de cierre formal del frente del edificio, y de la que cuelga la fachada de cristal apoyada en grandes perfiles metálicos. Esta fachada de cristal en algunos casos se separa del cuerpo del edificio, y cuelga desde una serie de costillas metálicas en voladizo de hasta 5 m, que surgen de la viga perimetral nombrada anteriormente.

Finalmente, el edificio se cubre mediante un sistema de vigas mixtas con losa maciza superior en la zona de la sala de ensayos, y una celosía mixta en la zona de la caja escénica, que además soporta el peine escénico y toda su maquinaria. Ambas son autoportantes y se construyen sin necesidad de apeos.



Figura 6. Celosías mixtas de cubierta. Anclajes de pretensado de pantallas

3.2. Teatro Configurable

El Teatro Configurable comparte tipología y concepto estructural con el Principal, pero se diferencia del anterior en que el público se sitúa dentro del recinto correspondiente a la caja escénica, que tiene forma de cruz latina. Esto no evita que una parte de esta caja cuelgue “en bandera” de la parte dorsal de la misma, dejando libre el espacio inferior, como en el Teatro Principal.

Otra peculiaridad del Teatro Configurable son los importantes voladizos de complicada geometría, que salen de la caja escénica, alcanzando en algún caso hasta 15 m. Estos voladizos se han resuelto mediante losas macizas pretensadas de canto variable. La configuración geométrica de estos voladizos

con un trabajo de flexión marcadamente bidireccional, pero en el que no predomina ninguna dirección principal de forma constante en toda la losa, impide que se puedan realizar aligeramientos eficaces para todas las hipótesis de carga, que hubieran resultado muy beneficiosos por la reducción de peso que implican.



Figura 7. Interior de la caja escénica del Teatro Configurable. Estructuras mixtas.

Los cierres superiores de la caja escénica se realizan, al igual que en el Teatro Principal, con vigas y entramados de tipo mixto, que soportan la cubierta y una zona de instalaciones. De la misma manera las vigas balcón que soportaban la fachada de cristal en el teatro principal, se continúan en esta parte del edificio.

3.3. Centro Coreográfico y Zona Dorsal

El Centro Coreográfico tiene unas necesidades funcionales muy diferentes a las de los teatros, lo que se refleja en su tipología estructural, que en este caso es de soportes, pórticos y losas, de hormigón en las plantas inferiores, bajo rasante; y metálicos o mixtos en las plantas superiores. Aparentemente es de tipología más convencional, pero igualmente complicada por las características geométricas de esta parte del edificio, con numerosos cambios de nivel, dobles alturas, diferentes espesores de pavimentos y la gran cantidad de instalaciones que soporta. Las acciones horizontales se recogen mediante pantallas y núcleos de ascensores, considerando los forjados como diafragmas rígidos.

Destacan en el edificio las aulas y salas dedicadas a la danza que se caracterizan por ser espacios de doble altura y gran amplitud, sin soportes intermedios.

Otro punto a destacar es la gran rampa de carácter escultórico que surge doblemente en voladizo hacia la plaza creada entre el Centro Coreográfico y el Teatro Principal. Doblemente en voladizo, porque se sostiene en el aire mediante vigas en ménsula de 4.50 m que salen desde los pórticos principales del Centro Coreográfico, y a su vez los tramos de rampa están también volados con respecto a la parte central, de forma que la rampa queda completamente exenta. Esta rampa se puede ver aparentemente suspendida en el aire desde el exterior del edificio a través de la fachada acristalada transparente que se ha dispuesto en las plazas que se crean entre las tres piezas del edificio, y que están colgadas mediante costillas metálicas de su parte superior.



Figura 8. Rampa volada del Centro Coreográfico y lucernario de la zona dorsal

La zona dorsal de los teatros, que sirve de comunicación entre las tres piezas del edificio se resuelve con estructura de soportes de hormigón en las plantas inferiores y metálicos en plantas superiores, y losas macizas de hormigón armado. Finalmente la zona dorsal se cubre con un gran lucernario acristalado con un esqueleto metálico.

Las escaleras y rampas de los edificios son de hormigón o bien metálicas ligeras en función del uso que se les vaya a dar.

3.4. Cimentación y subestructura

La presencia en los límites del solar de edificios de viviendas, unido a la necesidad de construir sótanos, obligaba a realizar una excavación por debajo de las cimentaciones de los edificios colindantes, lo que llevó a construir una pantalla de contención realizada con pilotes de diámetro 800 mm, con separaciones y longitudes variables, dependiendo de la zona que se tratara.

La cimentación es de tipo superficial, consistente en grandes losas de hormigón, de formas complejas, en las que se apoyan las pantallas verticales; y en zapatas para los pilares y pantallas exentas menores. Su canto es de 1.30 m para el Teatro Principal y de 1.30 ó 1.60, según zonas, en el Teatro Configurable. La cota de cimentación varía según zonas, la más profunda a la cota -6.50, en las zonas dorsales, donde se aceptaban tensiones medias de hasta 0.45 N/mm^2 y la más superficial, en la cota -3.00, donde la tensión admisible considerada es de 0.30 N/mm^2 .

4. ASPECTOS DE PROYECTO Y CÁLCULO ESTRUCTURAL

El planteamiento del proyecto de una estructura tan singular como la de los teatros, exigía igualmente, una metodología también singular. La compleja configuración geométrica y arquitectónica, unida al carácter evolutivo de la estructura, las servidumbres funcionales que se le imponían y las complejas interacciones estructurales entre elementos, invalidaban una buena parte de los métodos de trabajo y de cálculo aplicados en edificios más convencionales.

Entre cada una de las partes del conjunto se dispuso una junta de dilatación, para minimizar los efectos de las acciones térmicas e higrométricas; esto, además, permitía abordar el cálculo de cada uno de los edificios por separado.

Se decidió representar la estructura de cada uno de los teatros con sendos modelos de elementos finitos que representaban las pantallas, losas, pilares y vigas y entramados metálicos que componían cada edificio. Esto permitía aplicarle directamente las distintas hipótesis de carga adoptadas, y además, tenía la ventaja de que el modelo se podía segregar fácilmente en partes para hacer el estudio del proceso constructivo. En dicho modelo se incluyó la cimentación para tener en cuenta la interacción de la estructura con el terreno.

A partir de los resultados de esfuerzos en los elementos se realizó la envolvente de cálculo y de servicio de las estructuras. Con esta envolvente se realizó un postproceso automático tanto numérico como gráfico, que permitía obtener directamente las armaduras necesarias en las losas y pantallas teniendo en cuenta las interacciones entre esfuerzos de flexión y torsión, y de axil y rasante. De la misma forma se dimensionaron los pilares y vigas convencionales. De ciertas zonas singulares de la estructura, como pueden ser las principales losas en voladizo de los teatros, se realizaron también, modelos locales más detallados, para comprobar la bondad de los resultados del modelo general, que resultó ser extraordinaria.

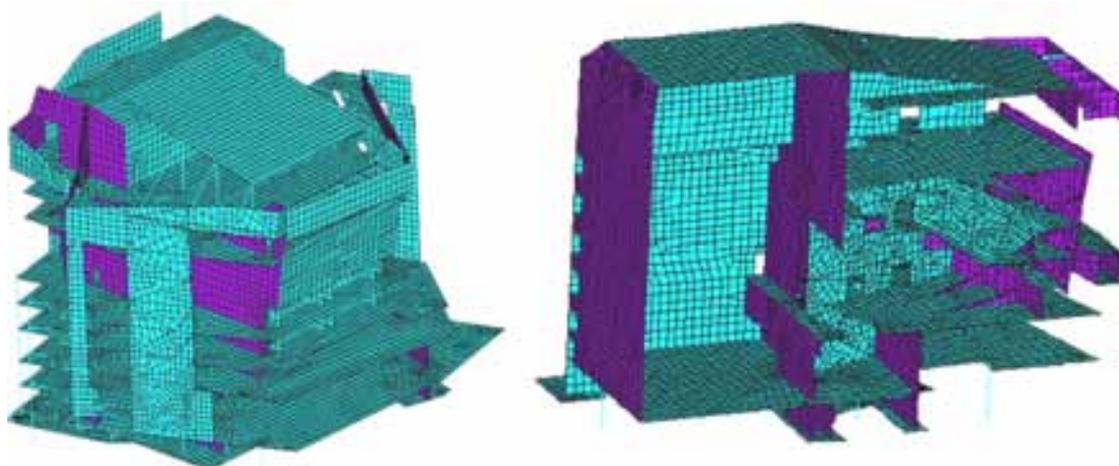


Figura 9. Modelos de elementos finitos del Teatro configurable (izq) y Principal (der)

Las vigas, celosías y entramados mixtos de las zonas altas de los teatros, de carácter evolutivo, se calcularon mediante modelos locales, cuyos resultados se contrastaron con los obtenidos en los modelos generales.

6. PROCESO CONSTRUCTIVO

En el caso de los teatros, y dado el carácter evolutivo de la estructura, y la presencia de grandes voladizos y de zonas colgadas, que son soportadas por la estructura que está sobre ellas, se ha realizado un completo estudio de las principales fases del proceso constructivo final con el objeto de estimar reacciones en apeos, contraflechas reales de construcción, y finalmente los movimientos esperados en las fases de desapeo, para el dimensionamiento de la carrera de los gatos hidráulicos necesarios para el mismo.

El proceso constructivo de los dos teatros es semejante y se basaría fundamentalmente en las siguientes fases:

- Construcción de la cimentación, y de las primeras pantallas estructurales y losas por procedimientos convencionales.
- Elevación hasta la cota de cubierta de las pantallas que conforman la caja escénica, mediante encofrado trepante.
- Construcción mediante apeos provisionales de la estructura colgada consistente en losas voladas y pantallas, hasta la cota en la que alcanzan la capacidad resistente suficiente para ser autoportantes.
- Desapeo controlado de la estructura construida hasta ese momento.
- Ejecución del resto de pantallas y losas sobre la estructura existente.
- Cierre de las cubiertas mediante estructuras metálicas y mixtas.
- Construcción de la estructura de fachadas acristaladas.

Uno de los puntos singulares del proceso constructivo, fue el desapeo de la estructura de los teatros, realizada mediante el empleo de 7 gatos hidráulicos de 6500 kN de capacidad máxima en el caso del Teatro Principal, y de 4 unidades similares para el Teatro Configurable. Esta operación resulta de gran complejidad, ya que debido a la gran hiperestaticidad de la estructura a desapear, la operación en uno cualquiera de los gatos, modifica de forma muy importante las cargas actuantes sobre el resto. Para estas maniobras se diseñó un procedimiento de desapeo por fases con control simultáneo de cargas y movimientos, a partir de los valores obtenidos en los análisis evolutivos.

Las maniobras se realizaron con éxito, y, pese a ser una estructura de hormigón sumamente compleja e hiperestática, con un excelente ajuste con las cargas y movimientos esperados en el caso del Teatro Principal, y algo menos precisa, pero del lado favorable en el caso del Teatro Configurable.

Igualmente, del estudio del proceso constructivo, considerando el momento de construcción de cada parte de la estructura y su fluencia, se obtuvieron los movimientos reales en los voladizos, para definir las contraflechas necesarias.