

DISEÑO ANTISÍSMICO DE LA ESTRUCTURA DEL PALACIO DE CONGRESOS DE ORÁN

Francisco MILLANES MATO

Dr. Ingeniero de Caminos
IDEAM S.A.
Presidente
general@ideam.es

Miguel ORTEGA CORNEJO

Ingeniero de Caminos
IDEAM S.A.
Jefe de Proyectos
miguel.ortega@ideam.es

Mauricio AGUIRRE GALLEGO

Ingeniero Civil
OHL. Dirección Técnica Internacional
Jefe Departamento de Estructuras
maguirre@ohl.es

Luis MATUTE RUBIO

Ingeniero de Caminos
IDEAM S.A.
Director General
luis.matute@ideam.es

Carlos GORDO MONSÓ

Ingeniero de Caminos
IDEAM S.A.
Ingeniero Proyectista
carlos.gordo@ideam.es

RESUMEN

El nuevo Centro de Convenciones de Orán (Argelia), construido por OHL para Sonatrach, se ubica en una zona con una intensidad sísmica elevada ($a_b = 0,20 \cdot g$) con históricos antecedentes. La concepción de la estructura sismorresistente debía adecuarse, por una parte, a las complejas exigencias arquitectónicas de funcionalidad asociadas a un auditorio de 3.000 plazas, y por otra parte, al planteamiento general constructivo de la obra, que preveía la prefabricación integral de la estructura metálica en España, y su montaje en Orán mediante el uso exclusivo de uniones atornilladas.

El resultado del diseño es un planteamiento modular de toda la estructura sismorresistente a través de arriostramientos en cruz de San Andrés, formando pórticos y pantallas individuales, que se conectan a los forjados de los edificios en los que se concentra la masa oscilante.

PALABRAS CLAVE: Sismo, sistema de arriostramiento, estructura metálica, tornillos de alta resistencia, ductilidad.

1. Introducción y planteamiento general de la obra

La concepción arquitectónica del Palacio de Congresos [1], uno de los 3 edificios que componen la actuación junto con el Hotel y el Palacio de Exposiciones, planteaba un diseño estructural complejo, que debía tratar con diferentes volúmenes, alturas, y espacios diáfanos interiores que interrumpían la continuidad de los forjados de cada planta. Asimismo, los grandes ventanales previstos para las fachadas exteriores, la singular fachada colgada del auditorio y la necesaria movilidad de los usuarios en el interior del edificio, restringían aún más las posibilidades del proyecto estructural sismorresistente (Figs. 1a, y 1b).



Figura 1a. Distribución de los diferentes edificios del Palacio de Congresos.



Figura 1b. Vista del Edificio Puente y del Edificio de Oficinas y Auditorio.

El sistema de arriostramiento sísmico se concibió como un conjunto de pantallas individuales, pantallas de esquina, y 4 grandes pórticos, formados todos ellos por módulos de arriostramiento concéntricos en perfiles metálicos, ensamblados mediante uniones atornilladas pretensadas, y cimentados sobre muros de gran rigidez con zapatas continuas. Los 4 pórticos principales de arriostramiento se agrupan en torno al auditorio, formando una caja rígida que soporta las solicitaciones horizontales tanto en dirección N-S como en dirección E-O de todas las plantas, así como las de los graderíos intermedio y alto. El graderío inferior se encuentra independizado del arriostramiento general, y cuenta con su propio sistema de pantallas resistentes.

El arriostramiento sísmico de la cubierta del auditorio ($78 \times 60 \text{ m}^2$) cuenta con un doble plano de tirantes diagonales en planta que confieren a la cubierta un comportamiento de diafragma rígido. Por otra parte, esta gran cáscara metálica se apoya frente a las solicitaciones horizontales mediante topes sísmicos sobre el sistema de 4 pórticos de arriostramiento del auditorio.

2. Condicionantes sísmicos y arquitectónicos

El norte de Argelia es una región que presenta una elevada peligrosidad sísmica, resultado de la convergencia entre las placas tectónicas africana y euroasiática. El complejo sistema de fallas activas asociado a esta estructura geológica ha sido origen de diversos eventos sísmicos de importancia media a elevada, y que han dejado su huella en la historia de la zona, tales como el terremoto del 9 de Octubre de 1790, que motivó el abandono del control español de la plaza en favor del imperio Otomano, fundamentalmente debido al estado de ruina en que quedó la ciudad y a los costes previstos para financiar su reconstrucción (Fig. 2b).



Figura 2a. Ubicación del Centro de Convenciones de Orán frente a la costa.



Figura 2b. y Grabado del S.XVIII del terremoto de Orán de 1790.

La acción sísmica ha sido uno de los condicionantes más significativos que se han tenido en cuenta a la hora de proyectar la estructura del Palacio de Congresos, y que ha debido conjugarse con las formas arquitectónicas poco regulares que presentan las obras de edificación actuales de carácter más singular.

La normativa argelina de construcción sismorresistente [2] prevé para la región de Orán, y para obras de gran importancia, un valor de aceleración básica de cálculo de $a_b=0,20\cdot g$. Este valor se incrementa por un factor de 1,2 si la construcción presenta irregularidades tanto en su configuración en planta como en alzado, lo cual proporciona, para un terreno de cimentación blando, junto con la definición del espectro de la norma, una aceleración en la meseta de $0,81\cdot g$ entre los periodos de $T_A=0,15s$ y $T_B=0,50s$ (Fig. 3).

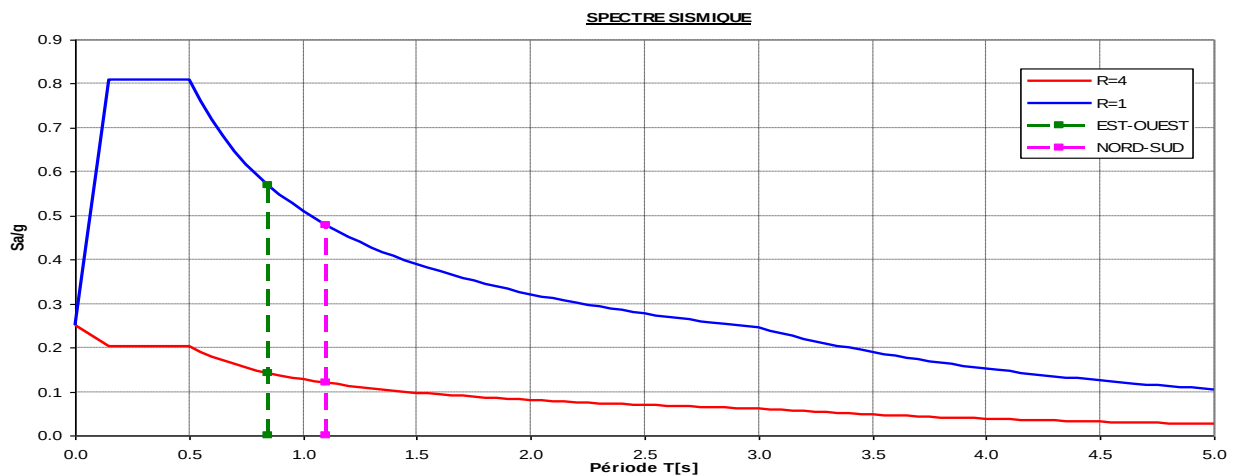


Figura 3. Espectro sísmico de diseño de la normativa argelina para un amortiguamiento de $\xi=4\%$ y valores del coeficiente de reducción de fuerza sísmica $R=1$ y $R=4$.

El otro gran condicionante de la concepción del sistema sismorresistente de los edificios fue su planteamiento arquitectónico, que preveía varios espacios diáfanos interiores de grandes dimensiones (Figs. 4a, 4b, y 4c), que interrumpían la continuidad de los forjados de las plantas intermedias que actúan como diafragmas rígidos, compatibilizando los movimientos de las pantallas de arriostramiento.

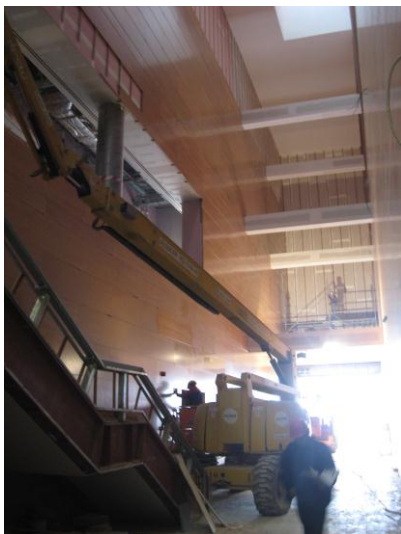


Figura 4a. Atrio de circulación entre el edificio de Oficinas y el Auditorio.



Figura 4b. Atrio de entrada y vestíbulo del Palacio de Congresos.

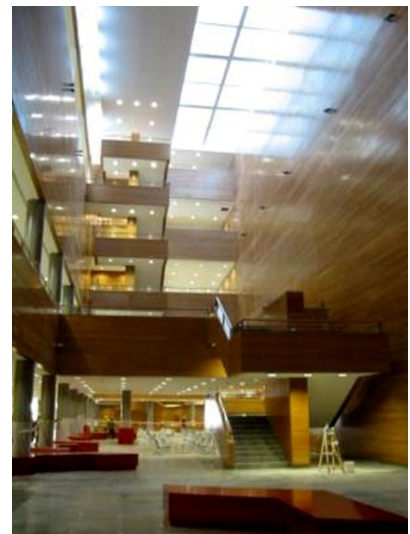


Figura 4c. Atrio de circulación entre el edificio de Jefes de Estado y el Auditorio.

3. Planteamiento general de la estructura sismorresistente

3.1. Planteamiento del edificio Restaurante

El arriostramiento sísmico de la única planta rectangular sobre rasante ($72 \times 36 \text{ m}^2$) del edificio del Restaurante ha sido resuelto mediante la disposición de 4 pantallas dobles de cruces de San Andrés (Figs. 5a y 5b); 2 pantallas en cada uno de los lados exteriores que son capaces de resistir la sollicitación sísmica así como de absorber, gracias al gran brazo que separa las pantallas en lados paralelos, las posibles excentricidades accidentales de la masa oscilante que pudieran generar sollicitaciones de torsión.



Figura 5a. Vista de la cubierta mixta del restaurante durante el montaje de la estructura metálica.



Figura 5b. arriostramientos sismorresistentes de la cubierta.

Los pilares individuales de la estructura se cimientan sobre zapatas individuales y los módulos de arriostramiento sobre zapatas corridas. Todas las cimentaciones se encuentran ligadas entre sí, a través de una losa de cimentación enrasada con la cara superior de las zapatas, que actúa como diafragma de rigidización.

3.2. Planteamiento del edificio Puente

La estructura del edificio Puente, que sirve de entrada principal al complejo, está configurada por dos grandes núcleos de hormigón, de $6,0 \times 6,0 \text{ m}^2$ y $0,30 \text{ m}$ de espesor de pared, que alojan los huecos de escaleras y ascensores (Figs. 6a y 6b).

Sobre estas pantallas se apoyan tres vigas metálicas armadas de alma llena y $3,0 \text{ m}$ de canto, de las que cuelgan las tres plantas del edificio, permitiendo obtener un nivel inferior diáfano para el acceso al recinto. Los forjados mixtos de dichas plantas, que se encuentran simplemente apoyados en los núcleos, transmiten por esfuerzo rasante la sollicitación sísmica a las pantallas.

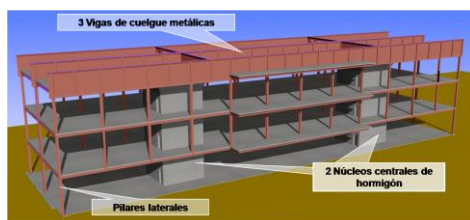


Figura 6a. Esquema estructural del Edificio Puente.



Figura 6b. Vista del Edificio Puente durante su construcción.

3.3. Planteamiento del conjunto Auditorio, edificios de Jefes de Estado y de Oficinas

La estructura del arriostramiento sísmico del conjunto formado por los edificios de Jefes de Estado y Oficinas, situados a ambos lados del Auditorio, fue proyectada como un único cuerpo, independizando sus movimientos de los edificios adyacentes mediante juntas. En el diseño de la misma se plantearon, por una parte, 4 grandes pórticos formados por módulos en cruz de San Andrés, y por otra parte varias pantallas individuales o de esquina, también modulares, en aquellas zonas en las que la transmisión de fuerzas hasta los pórticos principales resultaba más compleja. De los 4 pórticos o pantallas principales, 3 de ellos se agrupan en torno a la caja principal del Auditorio (En los ejes E-E y O-O para recoger el sismo de dirección Este-Oeste, y en el eje 26 sobre el escenario para recoger el sismo de sentido Norte-Sur), mientras que el último se encuentra en la fachada de entrada al Auditorio (Eje 39) (Figs. 7a, 7b, y 7c).

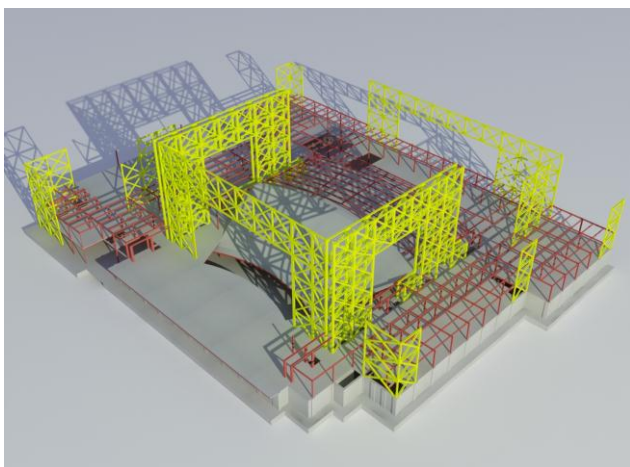


Figura 7a. Esquema de los pórticos principales de arriostramiento sísmico.



Figura 7b. Vista de los pórticos del eje O-O y del eje 26 durante la construcción.



Figuras 7c. Vista de la caja central del auditorio durante la construcción.

Los forjados de las plantas de 1ª a 6ª de los edificios de Jefes de Estado y de Oficinas transmiten las cargas horizontales debidas a la sollicitación sísmica, mediante esfuerzo rasante, a los módulos de arriostramiento a través de la conexión mixta con la losa mediante pernos conectadores colocados en los montantes horizontales.

Para los graderíos intermedio y alto, puesto que están constituidos por forjados inclinados que no permiten la conexión a rasante con el sistema de arriostramiento modular, se ha concebido un mecanismo de transmisión de fuerzas sísmicas a través de los forjados de las plantas contiguas. Así, el graderío intermedio se conecta a los forjados de 1ª y 2ª planta, y son estos los que

transmiten hasta los pórticos la solicitación sísmica; de manera similar, el graderío superior transmite la carga sísmica al forjado de planta 4ª, y este a su vez a los arriostramientos.



Figura 8a. Vista del Palacio de Congresos durante su ejecución.

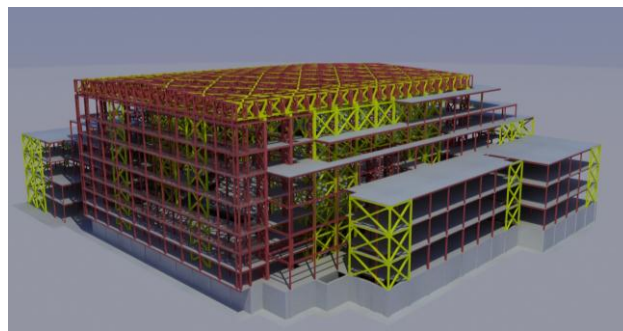


Figura 8b. Elementos sismorresistentes de la estructura.

Las pantallas de arriostramiento de los pórticos principales (Figs. 8a, y 8b) se cimientan, en el nivel de la planta 0, sobre cuatro grandes muros. La transmisión de fuerzas horizontales a los muros se realiza mediante un primer montante horizontal en cada módulo, que se conecta mediante pernos a la cabeza de los muros. La transmisión de fuerzas verticales en aquellos pilares de pórticos o pantallas que bajo la acción del sismo quedan ligeramente en tracción se realiza mediante armadura pasiva. Esta armadura se suelda en taller, en su parte superior, a las alas de los perfiles que forman los pilares, y en la parte inferior se aloja en vainas que se inyectan posteriormente con mortero de alta resistencia (Figs. 9a y 9b).

El resto de pantallas que no se apoyan sobre muros se cimientan sobre zapatas corridas en toda la longitud del módulo. Todas las zapatas, tanto de elementos sismorresistentes como de pilares individuales, se ligan entre sí mediante una losa que, enrasada con la cara superior de las zapatas, actúa como diafragma y como losa de planta 0.

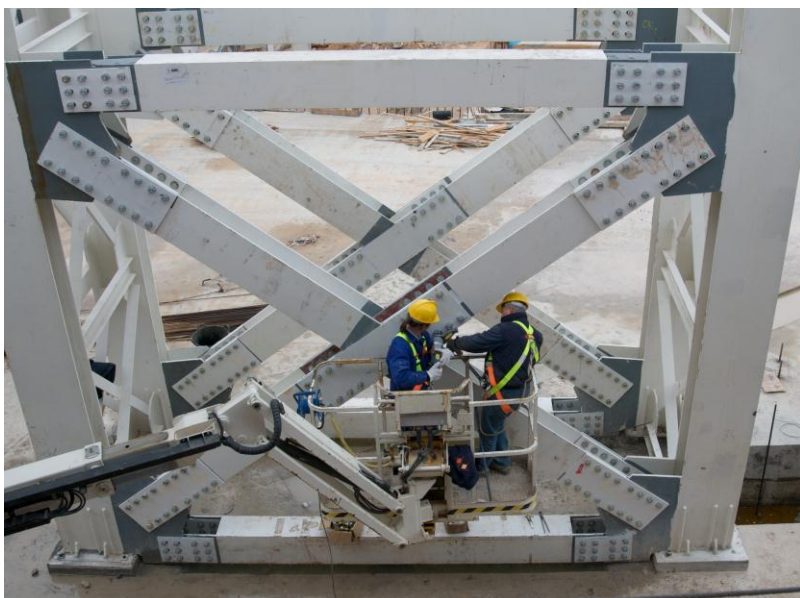


Figura 9a. Vista de un módulo de arriostramiento durante la operación de apriete de los T.A.R. pretensados.



Figura 9b. Vista del pórtico de arriostramiento del eje E-E durante su construcción.

Todos los módulos de las pantallas sismorresistentes del conjunto del Auditorio fueron diseñados para permitir su montaje in situ mediante el uso de tornillos de alta resistencia pretensados

(T.A.R.). El sistema de unión proyectado alinea, en un mismo plano, las alas de los perfiles metálicos empleados en pilares, montantes, y diagonales.

La transmisión de esfuerzos axiales entre perfiles se realiza mediante el uso de un doble cubrejuntas en cada ala del perfil, dejando el alma de los mismos sin conectar (Figs. 9a y 9b). Los pilares de los arriostramientos sísmicos quedan siempre en compresión incluso bajo la acción concomitante del sismo horizontal y vertical especificada en la normativa argelina [2], lo cual ha permitido diseñar las uniones entre diferentes tramos de pilares mediante chapas de testa, ensambladas mediante tornillos de alta resistencia pretensados en el caso de pilares de arriostramiento sísmico y sin pretensar en el caso de pilares normales.

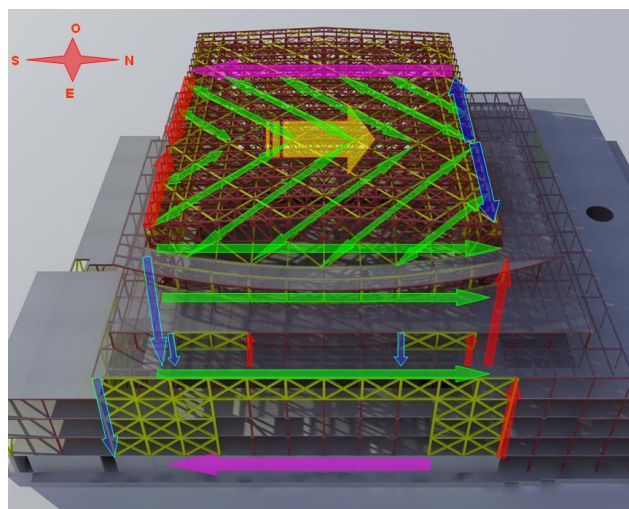
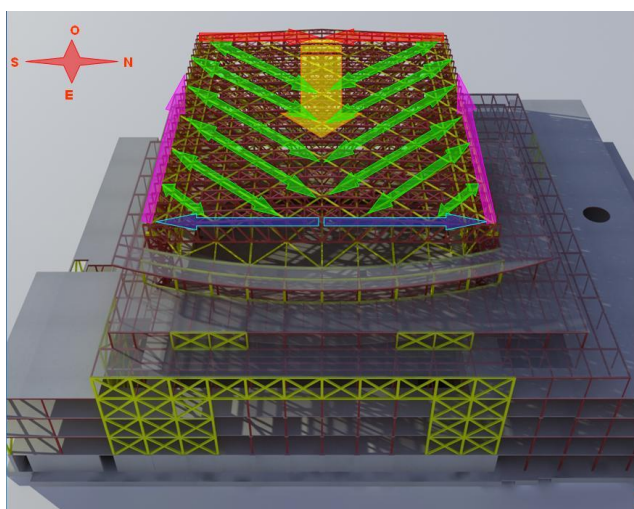


Figura 10a. Vista de la estructura del Auditorio durante su construcción.



Figura 10b. Vista del pórtico de arriostramiento del eje 26 desde el interior del Auditorio durante su construcción.

La cubierta del auditorio, formada por cerchas metálicas dobles de 60 m de luz, se proyectó para que su comportamiento, de cara a la acción sísmica, fuera el de un gran diafragma rígido que compatibilizara movimientos en las pantallas de arriostramiento sobre las que se apoya (Figs. 11a y 11b). Con este propósito se diseñó un sistema doble de celosías horizontales en el nivel del cordón inferior y en el del cordón superior de las cerchas, que permite transmitir la sollicitación sísmica hasta sus apoyos. Las cerchas cuentan con un sistema de tetones que se apoyan, mediante aparatos de neopreno zunchado, en los topes metálicos de las pantallas principales de arriostramiento de los ejes 26, E-E y O-O, y que permite una transmisión directa de fuerzas.



Figuras 11a y 11b. Esquema resistente frente a la sollicitación sísmica de la cubierta y pórticos principales de la caja del auditorio. Sismo Este-Oeste y Sismo Norte-Sur.

Para llevar la sollicitación horizontal de sismo hasta la pantalla del Eje 39, en la fachada de acceso al Auditorio (Figs. 12a, 12b, y 12c), se ha recurrido a un mecanismo de transmisión de esfuerzos en cascada; la transmisión de fuerzas horizontales se realiza de manera progresiva, desde el nivel de cubierta hasta los forjados de plantas 5ª, 4ª, y 3ª mediante módulos de arriostramiento independientes, y recogiendo el par que se produce al transmitir carga hacia un nivel inferior mediante los pilares de la estructura (Fig. 11b).

Este pórtico del eje 39 recibe asimismo gran parte de la sollicitación sísmica de dirección Norte-Sur de los forjados de las plantas de los edificios de Oficinas y Jefes de Estado. Puesto que el pórtico paralelo del eje 26, sobre el escenario (Fig. 10b), está menos conectado a dichos forjados debido a los grandes espacios diáfanos que rodean al auditorio, la excentricidad de la sollicitación sísmica con respecto al centro de rigidez de cada planta se recoge mediante un incremento de par entre las pantallas perpendiculares.



Figuras 12a, 12b, y 12c. Vista del pórtico de arriostramiento del eje 39 durante su construcción, Colocación de los paneles de fachada, y Esquema de su ubicación en el edificio.

La estructura portante de la fachada Oeste del Auditorio, volada sobre una lámina de agua y provista de un gran mural cerámico (Fig 13b), se resolvió mediante un sistema de tirantes formados por perfiles HEB-300, que cuelgan la carga de la primera cercha de la cubierta. En este nivel se desvía la carga de tracción mediante el sistema de diagonales horizontales de la cubierta, y se reinyecta como compresión en un sistema trasero de pilares que descansan sobre un muro de cimentación (Fig. 13a).

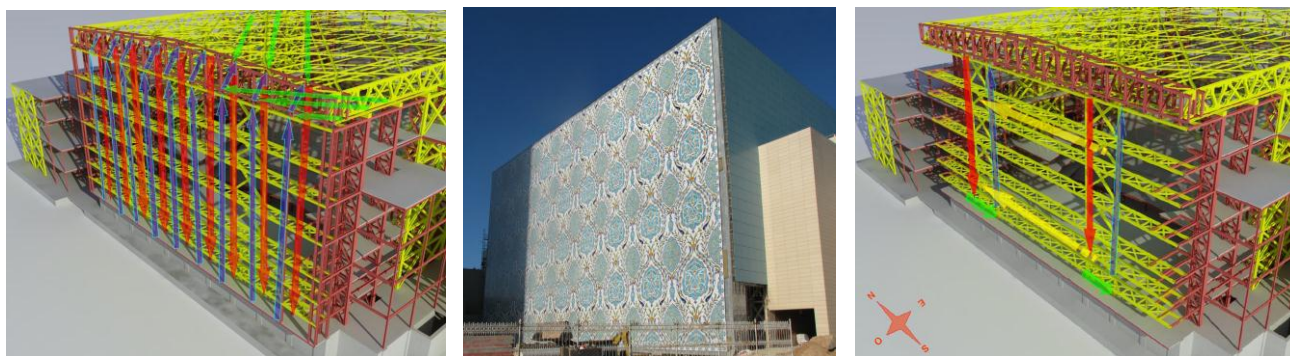


Figura 13a. Esquema resistente de la fachada Oeste del Auditorio colgada sobre la lámina de agua.

Figura 13b. Vista de la fachada con el mosaico de cerramiento.

Figura 13c. Esquema resistente de la fachada Oeste del Auditorio frente a la sollicitación sísmica Norte-Sur.

Los soportes sismorresistentes de esta fachada son, por un lado y frente al sismo de dirección Este-Oeste, 6 celosías horizontales que sirven de pasarelas de servicio del escenario y que transmiten por flexión las cargas horizontales hasta los pórticos sismorresistentes de los ejes E-E y O-O; por otro lado y frente al sismo de dirección Norte-Sur, 2 pantallas con módulos en cruz de San Andrés que se apoyan sobre el muro de cimentación del eje 23. La excentricidad en planta entre la fachada colgada y estas pantallas se resuelve haciendo trabajar a flexión a las celosías horizontales que sirven de pasarela (Fig. 13c).

La estructura portante del graderío superior adopta la forma de un doble voladizo materializado mediante 6 grandes viga de canto variable; hacia el lado del escenario recogiendo las cargas del graderío propiamente dicho, y del lado opuesto recogiendo las cargas de los forjados de las plantas 5ª y 6ª que quedan apeadas sobre este voladizo. La descompensación de cargas, debida al apeo de los forjados superiores sobre el voladizo, se resuelve pretensando mediante barras el pilar más traccionado, evitando la posible rotura frágil de los tornillos por tracción y sin modificar el detalle tipo de unión entre tramos de pilares mediante chapas de testa.

El graderío inferior del patio de butacas se ha concebido como una estructura independiente y aislada del resto del Auditorio. Su sistema de arriostramiento sísmico consiste en dos núcleos rectangulares de pantallas en cruz de San Andrés, cimentados directamente sobre las zapatas corridas del auditorio, y ubicados en aquellas posiciones donde no interfiere con las instalaciones del edificio (Fig. 14a y 14b).

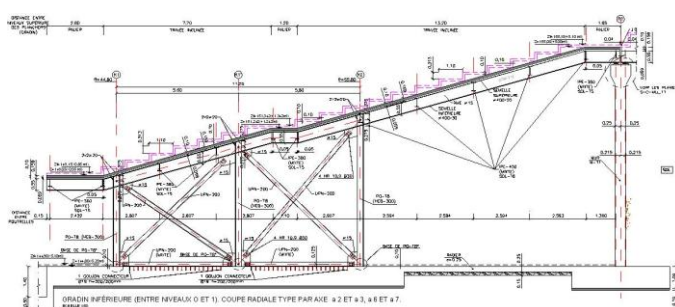


Figura 14a. Esquema de arriostramiento sismorresistente del graderío bajo.



Figura 14b. Vista del arriostramiento del graderío bajo durante su ejecución.

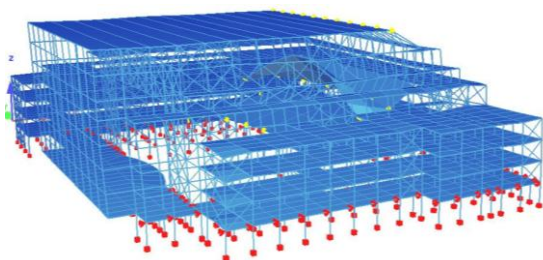
Los centros de ambos núcleos se encuentran separados entre sí una distancia de 24 m, lo cual les permite absorber los eventuales efectos de torsión por diferencia de sollicitación entre núcleos.

4. Criterios de diseño por capacidad y demanda.

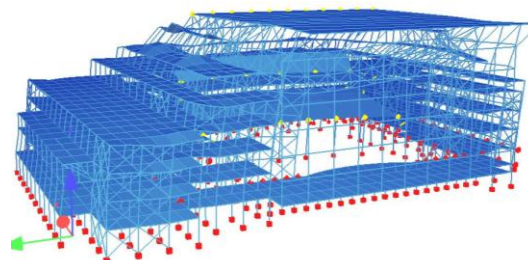
Para el diseño de los sistemas de arriostramiento sismorresistentes mediante módulos de cruz de San Andrés, se consideró un comportamiento inelástico disipativo de la estructura. De acuerdo a la normativa sísmica argelina [2] y a los criterios establecidos por el Eurocódigo 8 [3] para esta tipología de arriostramiento, se tomó un factor reductor de la fuerza sísmica de $R=4$ frente a la sollicitación correspondiente a un comportamiento puramente elástico.

La distribución uniforme de las pantallas de arriostramiento sismorresistente, permitió que la acción sísmica se concentrara principalmente en los dos primeros modos de oscilación,

correspondientes a las direcciones Este-Oeste y Norte-Sur, para los que se hallaron periodos de oscilación de $T_{E-O}=0,85s$ y $T_{N-S}=1,10s$ (Figs. 15a, y 15b).



**Figura 15a. Modo de oscilación Este-Oeste
($T=0,85s$)**



**Figura 15b. Modo de oscilación Norte-Sur
($T=1,10s$)**

El comportamiento elasto-plástico que conlleva la elección de $R=4$, y que actúa a modo de fusible limitando la inyección de fuerza sísmica en la estructura, se supuso concentrado en los elementos diagonales de los arriostramientos. En consecuencia, y siguiendo el planteamiento conceptual del diseño por capacidad, se dimensionaron los pilares para asegurar su comportamiento satisfactorio frente a una eventual sobrerresistencia de las diagonales, que entrañaría un incremento de la sollicitación a axil de los pilares, protegiendo a estos frente al comportamiento frágil que supondría su fallo por pandeo.

Un importante condicionante, que dirigió en gran medida diseño del sistema de arriostramiento, es la limitación que impone la normativa argelina [2] frente a desplazamientos horizontales relativos entre plantas, que debe ser inferior al 1% de la altura libre entre plantas bajo el sismo de rotura, a diferencia del Eurocódigo 8 [3] que exige que se cumpla este requisito bajo la acción del sismo de servicio.

5. Principales participantes en el proyecto

Propiedad: Sonatrach.

Constructora: OHL.

Dirección Técnica: Manuel Alpañés, Pedro Ayuso.

Dirección Técnica Internacional: Carlos Bosch, Mauricio Aguirre, Natacha Chernova.

Arquitectura: José María Fernández Fernández-Isla, Enrique José Martínez de Angulo

Proyecto de la Estructura y Asistencia Técnica a la Constructora: IDEAM S.A.: Francisco Millanes, Luis Matute, Miguel Ortega, Carlos Gordo, Pedro Atanasio, Juan José Laso, Fernando Ruano.

6. Referencias

- [1] MILLANES, F. MATUTE, L. ORTEGA, M. GORDO, C. AGUIRRE, M. "La Estructura del Palacio de Congresos de Orán", V Congreso ACHE. Barcelona. Oct- 2011.
- [2] Règles Parasismiques Algériennes. RPA 99/Version 2003. Ministère de l'habitat et de l'urbanisme. Centre national de recherche appliquée en génie-parasismique. Document technique réglementaire D.T.R.-B.C. 2.46.
- [3] EN-1998-1:2004. Eurocode 8 : Design of structures for earthquake resistance – Part 1 : General rules, seismic actions and rules for buildings. CEN, European Committee for Standardization. April 2004.