

Expansión del Hospital CUF Descobertas

Seguridad Estructural en la Salud

Expansion of CUF Descobertas Hospital—Structural Safety in Health

Pedro Serpa Viegas^a, Romina González Hierro^b, Carlos Castañón Jiménez^c

^aIngeniero Civil, Especialista Estructural. IDOM Consulting, Engineering, Architecture. Director de Proyectos (Lisboa).

^bIngeniera Industrial. IDOM Consulting, Engineering, Architecture. Ingeniera de Proyectos (Madrid).

^cIngeniero de Caminos Canales y Puertos. Director de Estructuras. IDOM Consulting, Engineering, Architecture (Madrid).

RESUMEN

Este artículo hace referencia a la estructura del nuevo Hospital CUF Descobertas, ubicado en Lisboa, Portugal. La arquitectura definió un edificio con cinco pisos bajo rasante y cinco pisos sobre rasante, con un área total de 23 000 m². El edificio está ubicado en una zona de alta sismicidad, por lo que los requisitos de diseño son altos, impuestos por el Anejo Nacional del Eurocódigo 8 y Especificaciones Técnicas de ACSS del Ministerio de Salud de Portugal. Se verificaron los requisitos de no-colapso y limitación de daños. Debido al uso hospitalario, la acción sísmica se vio agravada por el correspondiente coeficiente de importancia.

ABSTRACT

This article refers to the structure of the new CUF Descobertas Hospital, located in Lisbon, Portugal. The architecture defined a building with five floors below ground and five floors above ground, with a total area of 23 000 m². The building is in a high seismicity zone, so the design had high requirements, imposed by the National Annex of Eurocode 8 and Technical Specifications of ACSS of the Ministry of Health of Portugal. The non-collapse and damage limitation requirements were verified. Due to hospital use, the seismic action was aggravated by the corresponding importance coefficient.

PALABRAS CLAVE: hospital, sismo, requisitos de desempeño, sostenibilidad, activación térmica, TABS

KEYWORDS: hospital, seismic, performance requirements, sustainability, thermal activation, TABS

1. Introducción

El proyecto para el edificio de ampliación del Hospital CUF Descobertas se desarrolló entre 2015 y 2016 y su ejecución se llevó a cabo entre noviembre de 2016 y 2018. IDOM fue el autor del proyecto de arquitectura general y

especialidades cuyo equipo lo lideró el arquitecto Rui Maia.

El Hospital CUF Descobertas está ubicado en el Parque das Nações, en Lisboa -

Portugal, en la unidad del Grupo José de Mello - Saúde (Figura 1).



Figura 1. Fotografía general del edificio acabado.

El edificio consta de cinco plantas bajas - para estacionamiento y áreas técnicas - cuya superficie corresponde con un rectángulo de 75 m x 41 m, y cinco plantas altas - para uso hospitalario -, con dimensiones de 75 m x 23 m.

Se crearon áreas técnicas protegidas en la cubierta del edificio y una cafetería en el piso 0.

En cuanto a superficie, esta se reparte en 11.800 m² en niveles enterrados destinados a estacionamiento y 11.200 m² en los niveles superiores del hospital, sumando un área bruta total de 23.000 m².

2. Condicionamientos

El diseño de las cimentaciones y las estructuras ha tenido algunos condicionantes y limitaciones de carácter arquitectónico, compatibilidad con otras especialidades y orden geológico y geotécnico.

2.1 Condicionamientos arquitectónicos

La estructura se dimensionó respetando el proyecto de arquitectura y sus condicionantes de diseño. Asimismo, hubo algunos ajustes iniciales que fueron necesarios para conseguir la compatibilidad entre ambas disciplinas: en términos de la disposición de pilares y sus dimensiones, ésta vino determinada por la distancia correspondiente a tres plazas de estacionamiento en los niveles bajo rasante,

mientras que en los niveles superiores estos debían interferir lo menos posible con el uso hospitalario.

La estructura diseñada tiene una dimensión de 75 m de largo sin juntas de dilatación. (Figura 2)

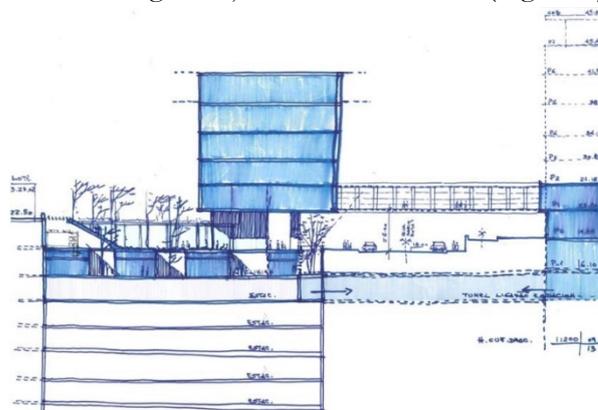


Figura 2. Sección transversal esquemática.

2.2 Condicionamientos con otras especialidades

Debido a los requisitos y recomendaciones para que la cara inferior de las losas fuese plana, se optó por una solución de losa maciza de hormigón armado con espesor constante. Dicha solución debía cumplir tanto para los estados límite de ELU y ELS, como en particular para la verificación a punzonamiento.

Debido a las grandes luces y elevadas cargas, fue necesario aumentar la clase resistente del hormigón a C35/40, especialmente en los elementos verticales, así como aumentar el espesor de las losas en 0.05 m adicionales en el perímetro crítico de las columnas.

Un condicionante importante fue la inclusión del sistema TABS (*Thermally Activated Building System*) dentro de las losas sobre rasante, para la comodidad térmica de los pisos de uso hospitalario y eficiencia energética del edificio.

Fue necesario hacer coincidir el posicionamiento de las tuberías de este sistema en la sección de la losa para (i) evitar reducir las resistencias de la losa y (ii) no interferir con las armaduras de refuerzo, asegurando siempre que tanto la tubería como el refuerzo estuviesen completamente embebidos en el hormigón. (Figura 3).



Figura 3. Sistema TABS.

En términos de acondicionamiento acústico, se impuso que las losas de pisos elevados tuviesen un espesor mínimo de 0.30 m.

2.3 Condicionamientos geológicos y geotécnicos

El estudio geológico y geotécnico reveló la configuración geológica relacionado con el sitio y que generalmente involucra la presencia de facies sedimentarias marinas, atribuidas a la unidad del mioceno llamada "Areolas de Cabo Ruivo" (M_{CR}), cubierta por un relleno sanitario (A_1), de génesis reciente. Los depósitos en vertederos tienen geometría irregular en espesores entre 2 m y 10 m. Incluyen materiales relacionados con el trabajo de regularización llevado a cabo en el "Parque das Nações", dentro del alcance de la Exposición Mundial de 1998 (Expo 98) y que experimentaron valores N_{SPT} entre 2 y 31 golpes, lo que atestiguó su pobre comportamiento geotécnico.

Los terrenos cuentan con una aptitud geotécnica muy condicionada, con baja resistencia y alta deformabilidad, sin aptitud de cimentación de elementos estructurales. Sin embargo, debido a la cantidad de sótanos y la consecuente profundidad de la excavación, la base del edificio se colocó debajo de estos depósitos. Es a esta profundidad donde se encuentran las capas más resistentes, entre los 18 m a 25 m, que varían según el sitio de perforación de los suelos de mioceno. Alta

resistencia, con valores entre $53 \leq N_{SPT} \leq 60$ golpes.

Se prestó especial atención entre los 18 m y 25 m de profundidad, donde se observaron lenticulas lénticas y de arena gruesa con espesores del orden de 1 a 2 m. La presencia de estos elementos indica la existencia de un acuífero cautivo con artesianismo repulsivo, verificando el aumento del nivel piezométrico a la superficie del suelo y caudales entre 2 y 3 m^3/h durante la perforación S1 y S7, cuando se trataba de niveles arenosos a unos 22 m de profundidad.

En julio de 2015 se realizó un estudio complementario para estimar la altura del agua con el fin de verificar la losa de cimentación, de acuerdo con lo considerado en el diseño de la contención periférica.

El análisis de los resultados de las pruebas de laboratorio revela una clase de exposición ambiental XA1, correspondiente a un ambiente ligeramente agresivo. En consecuencia, el tipo de hormigón fue seleccionado para una vida útil de diseño de 50 años.

3. Soluciones estructurales

2.1 Contención periférica

Dadas las principales limitaciones, la solución de diseño consistió en la contención periférica, utilizando tecnología de ejecución de cortina de pilotes cuando era necesario, intercalada con columnas de inyección de lechada (jet grouting) o forrada a través de un muro de hormigón armado en todo el edificio perímetro del sitio de excavación.

Las columnas de inyección de lechada actuarán como un elemento de tratamiento para el relleno sanitario y los materiales granulares, aumentando su resistencia y, sobre todo, limitando su permeabilidad. En áreas donde no se van a construir columnas de inyección de lechada, el suelo entre pilotes debe estar revestido con hormigón proyectado o un muro de hormigón artesonado. Dicha cortina se

cerrará en varios niveles mediante anclajes y apuntalamientos provisionales.

Se consideró que este tipo de solución sería la más adecuada, debido a su versatilidad y adaptabilidad que permite durante la etapa de construcción, basados en experiencias en terrenos con características similares, y para no introducir vibraciones en el edificio vecino durante la ejecución.

Por decisión del promotor, se ejecutó una propuesta variante con una solución de muros pantalla (paredes moldeadas).

2.2 Cimentaciones

Sobre la base de las restricciones geológicas y geotécnicas, el tamaño del edificio, la presencia de agua y la tensión admisible, se diseñó una solución de losa de cimentación de 1,00 m de espesor, con capiteles invertidos bajo los pilares centrales los cuales tiene una carga axial mayor.

Esta losa está diseñada para recibir y transmitir al terreno las cargas de las columnas, núcleos y paredes de la estructura. Su peso propio, unido al de los forjados de las plantas superiores compensa la subpresión en fase final.

En la fase de ejecución, tal y como lo especifica el proyecto de IDOM, el contratista se encargó de mantener el nivel freático a una altura tal que se compensase el peso propio de la losa de cimentación, asegurando que no ocurriera elevación ni deformación asociada con las subpresiones. Este bombeo se mantuvo hasta alcanzar las plantas sobre rasante.

2.3 Estructuras

Se concibió una estructura de hormigón armado cuyo esquema resistente consta de núcleos y pilares sobre los que se apoyan las losas, los cuales conforman un sistema de pórticos perimetrales unidos mediante vigas de borde. Este sistema proporciona una mayor resistencia frente a acciones horizontales y conduce a una menor deformabilidad local y global. Las vigas

envolventes también resuelven las fuerzas excéntricas y evitan el fenómeno *pancake collapse*.

Las escaleras, ascensores y montacargas también son de hormigón armado que constituyen núcleos verticales rígidos que soportan y transfieren las fuerzas resultantes de los sismos.

La losa de planta sobre rasante es maciza y tiene un canto de 0.30 m en general, mientras que en el resto de las plantas bajo rasante se han aligerado para reducir su propio peso y la consecuente economía a través de las losas aligerada Cobiax, que se descargan en las vigas de distribución, en los muros pantalla, pilares y núcleos.

Estas losas de plantas bajo rasante se han optimizado con dos espesores: (i) 0.30 m en la zona central, donde la losa experimenta luces de 7.80 m y (ii) 0.40 m en los tramos finales de 10.40 m.

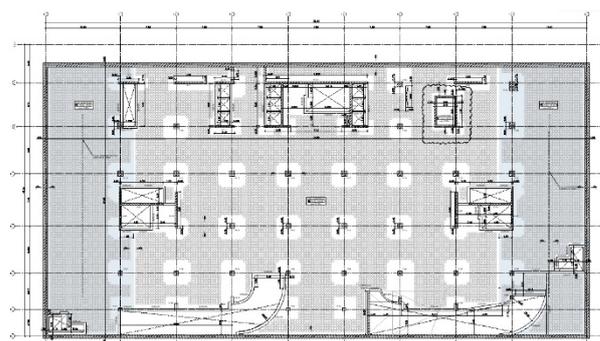


Figura 4. Geometría de losa de la planta -3.

El sistema Cobiax se basa en principios de racionalización económica y ambiental que permiten la ejecución de losas de comportamiento bidireccionales aligeradas, similares a una losa maciza tradicional. La introducción de un vacío esférico en área donde el concreto no es esencial en términos del comportamiento general, permite la optimización del canto de la losa, un mejor comportamiento y una mayor eficiencia de los recursos.

En un mundo donde la sostenibilidad de los recursos naturales es cada vez más importante, el uso de materiales reciclados para

la formación de huecos y la reducción de las necesidades de hormigón permiten que el sistema tenga un menor impacto ambiental y una reducción significativa de las emisiones de CO₂.

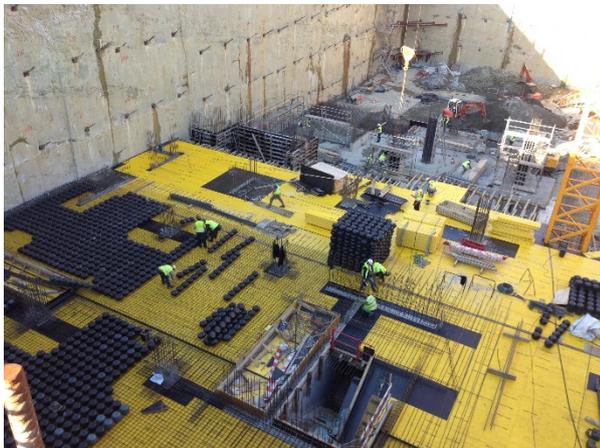


Figura 5. Ejecución de una losa aligerada Cobiax.

Como se mencionó anteriormente y condicionado por la especialidad acústica, los forjados de las plantas sobre rasante se diseñaron con losas macizas de 0.30 m de canto, incrementando su espesor en 0,05 m a modo de capitel en el área del pilar, a excepción de los tramos extremos de 10.40 m donde se adoptó una losa aligerada con un canto de 0.40 m.

Se estudió una solución de losa aligerada Cobiax con un espesor constante e igual de 0.35 m, pero esto requería la inclusión de materiales absorbentes y provocaba restricciones en el sistema TABS proyectado. Dichos motivos hicieron que se abandonara la propuesta en reuniones con la Propiedad, a pesar de tener ventajas como la reducción de alta masa sísmica.

Debido a los 75 m de longitud de la losa sin juntas de dilatación, se tomaron medidas especiales durante el curado del hormigón: la mezcla de hormigón de las losas debía incluir las fibras "SIKAfiber M-12" a una dosis de 0.6 kg/m³ y cera de pulverización "SIBcuring".

Para conectar el edificio existente con el nuevo edificio dispuesto perpendicularmente al eje del camino de la calle Mário Botas, la arquitectura abogó por una pasarela elevada peatonal. Esta estructura se diseñó como una celosía metálica tridimensional en sección cajón.

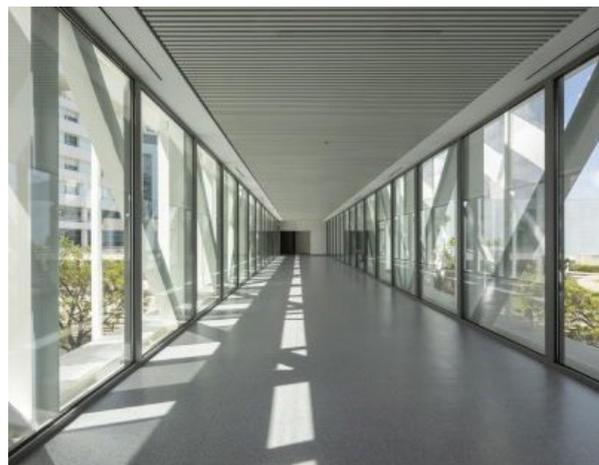


Figura 6. Vista interior de la pasarela metálica.

Las triangulaciones de los planos verticales funcionan por tracción-compresión para las acciones verticales, trabajando las diagonales de los planos horizontales como puntos de arriostamiento. Los planos horizontales se triangulan sobre todo para bloquear las verticales, pero también para resistir el viento y el impacto en el puente, causado por una fuerza accidental de un vehículo más alto que la altura permitida.

La construcción de la pasarela involucra dos etapas de excavación: (a) terreno actualmente en el nivel 19.50 y (b) en el futuro cercano, cuando debido a la construcción de una galería adyacente al hospital y una escalera de acceso externa, el terreno sea excavado hasta aproximadamente el nivel 12.75. Para cumplir con la segunda etapa se diseñó una solución de pilar-pilote, ejecutándose inicialmente desde la cota 19.50 a una profundidad variable (mínimo 12 m) hasta el nivel de roca portante. Los pilotes tienen un diámetro de 0,80 m., al igual que la sección circular del pilar de la pasarela. Se da por lo tanto una continuidad de sección a lo largo de toda la altura. En la segunda fase, donde se excavaría el suelo hasta el nivel 12.75, se debe disponer una viga de cimentación que conecte los dos elementos pilar-pilote en este nivel.

En el nivel de la planta rasante existe una cubierta compuesta por 3 pórticos principales de 4,66 m y 7,80 m de luz, sobre los que apoyan las

correas IPE 300 formando la estructura metálica de la cafetería.

La cubierta del edificio se concibió como una estructura metálica cerrada, que consta de 10 pórticos principales espaciados a 7.80 m los vanos interiores y 8.00 m./ 8.35 m. los dos vanos extremos, donde el espacio aumenta para proteger el área técnica.

En la entrada del edificio se diseñó una escalera de acceso vertical en estructura mixta, apoyada únicamente en las losas de hormigón de los pisos (Figura 7).



Figura 7. Escalera interior de acero.

3. Seguridad y acciones

La verificación de seguridad se ha realizado en términos de esfuerzos, asegurando que los actuantes no excedan los resistentes. La resistencia de los elementos de hormigón armado se verificó mediante Eurocódigo 2 [1] y REBAP [2], mientras que los elementos de acero se verificaron mediante Eurocódigo 3 [3].

Las vigas fueron dimensionadas frente a los estados límites de flexión y cortante, mientras que los pilares fueron verificados para la flexión compuesta desviada con compresión y se adoptó el método de curvatura nominal y las excentricidades mínimas exigidas por normativa.

Desde el punto de vista de los detalles constructivos de los diversos elementos estructurales, se verificaron los criterios de ductilidad mejorada recomendados en REBAP [2] y los criterios de ductilidad media (DCM) establecidos en el Eurocódigo 8 [4] para mejorar la respuesta y el comportamiento estructural. También se cumplió con los requisitos de la Norma ET 05/2007 [5].

El estado de limitación de daños está asociado con el requisito de limitación de daños del Eurocódigo 8. Este requisito garantiza la plena operatividad y la contención de daños no estructurales al edificio del hospital contra la acción de un sismo con un período de retorno promedio menor que el período promedio de retorno del sismo correspondiente al estado límite último.

La acción sísmica considerada para el requisito de limitación de daños corresponde a un período de retorno promedio de 120 años (probabilidad de exceder el 34% en 50 años).

Las comprobaciones de seguridad buscan limitar el desplazamiento horizontal relativo entre los niveles, la deriva, asegurando que el daño a las paredes de mampostería sea muy limitado al garantizar indirectamente que se mantengan los elementos no estructurales, las instalaciones básicas y los equipos considerados sensibles a la deriva.

4. Modelación y análisis estructural

En el modelado se utilizó el método de elementos finitos, asociando columnas y vigas a elementos lineales y losas y muros a elementos finitos planos, con propiedades relacionadas con sus dimensiones. Se emplearon los programas de cálculo estructural SAP2000 y ETABS de la compañía CSI Computers & Structures, analizando la respuesta elástica a las acciones solicitantes. (Figura 8)

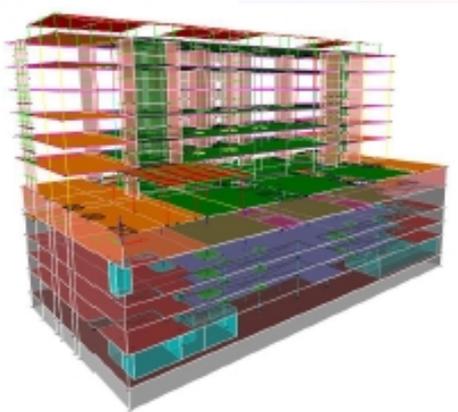


Figura 8. Modelo 3D del edificio en ETABS.

Se realizó un análisis dinámico lineal de la estructura considerando las masas reguladoras correspondientes al valor promedio de las cargas permanentes y el valor cuasi-permanente de las cargas variables ($G+\psi_2\cdot Q$) que actúan sobre la estructura. Las relaciones de participación de masa acumulada excedieron el 90% para los 50 modos de vibración analizados, cumpliendo con el criterio del Eurocódigo 8. Los desplazamientos obtenidos se utilizaron para controlar la deformación general, así como para verificar las deformaciones máximas relativas entre niveles. Para el control del modelo fueron analizadas las frecuencias y configuraciones de los modos de vibración y los porcentajes de masa asociados con cada modo, así como su valor acumulado. (Tablas 1 y 2)

Tabla 1. Frecuencias modales

| Mode | f (Hz) | U _x | U _y | U _z |
|------|--------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 1.17 | 0.002 | 0.256 | 0.000 |
| 3 | 1.70 | 0.254 | 0.000 | 0.000 |
| 10 | 4.83 | 0.000 | 0.000 | 0.173 |
| 50 | 62.50 | 0.096 | 0.002 | 0.000 |

Tabla 2. Participación modal

| Mode | ΣU_x | ΣU_y | ΣU_z |
|------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | 0.002 | 0.256 | 0.000 |
| 3 | 0.287 | 0.271 | 0.000 |
| 10 | 0.288 | 0.281 | 0.213 |
| 50 | 0.953 | 0.952 | 0.959 |

La respuesta máxima de la estructura debida a cada componente se obtuvo mediante la combinación cuadrática completa (CQC) de las respuestas máximas de cada modo de vibración. La combinación direccional adoptada fue la raíz cuadrada de la suma de cuadrados (SRSS).

Se aceptó la clase de ductilidad media (DCM), de forma que la rigidez a flexión y las propiedades de resistencia al corte de los elementos de hormigón se vieron afectados por el coeficiente correspondiente que establece el Eurocódigo 8 [4] para esta clase de ductilidad.

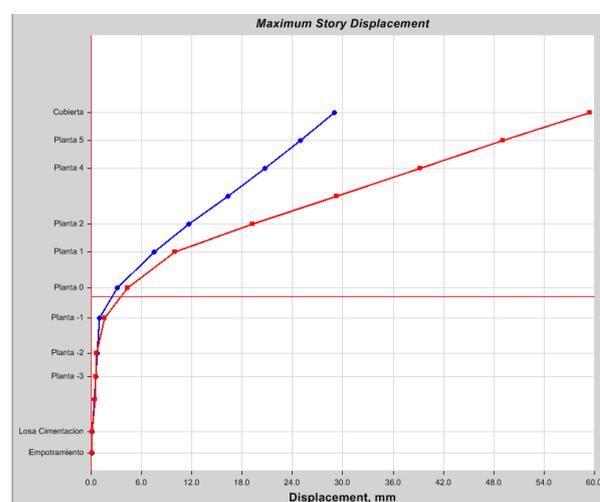


Figura 9. Maxium Story Displacement (sismo 1)

La losa de cimentación fue modelada con elementos finitos planos, con características geométricas y mecánicas que simulan su comportamiento. La interacción con el suelo se simuló a través de muelles de área con una rigidez de 40000 kPa/m según el informe geológico y geotécnico. Este establece una tensión admisible de 300 kPa bajo la losa de la cimentación.

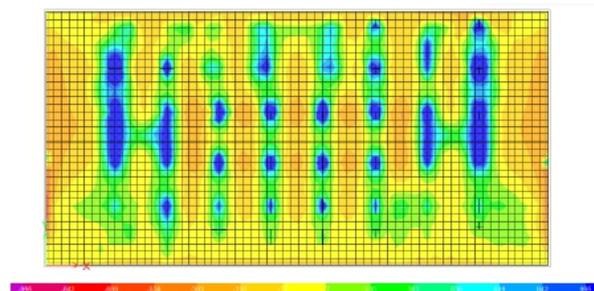


Figura 10. $m_{11sd,max}$ losa cimentación [kN·m/m].

Las columnas, vigas y celosías se modelaron con elementos finitos tipo barra y los dispositivos de soporte mediante *links* que reflejan el comportamiento deseado: soportes fijos en el nuevo edificio y soportes móviles unidireccionales en el elemento pila-pilote, permitiendo el desplazamiento a lo largo del eje de la pasarela. (Fig. 11)



Figura 11. Apoyo de celosía sobre pilas-pilote.

Se realizó un análisis de pandeo en SAP2000 para calibrar las longitudes de flexión (pandeo) de elemento pilar-pilote para las dos fases de excavación indicadas.



Figura 12. Modelo 3D de la pasarela en SAP2000.

5. Conclusiones

El proyecto se elaboró en base a la legislación en vigor en Portugal, en los Eurocódigos Estructurales y las Especificaciones Técnicas para el Comportamiento de Edificios Hospitalarios Resistente a los Sismos (ET 05/2007, v2010) de ACCS del Ministerio de Salud de Portugal, que contiene requisitos

adicionales y específicos para este tipo de edificios.

El aislamiento sísmico fue una opción considerada, pero que por decisión del Propietario no se aplicó, optando por un cálculo sísmico tradicional. Esto hubiera supuesto un costo reducido del sistema, diluido en el costo total del trabajo, que se habría transmitido con ventajas obvias en el comportamiento y la respuesta sísmica de la estructura.

La contención periférica, las cimentaciones y las estructuras presentaron desafíos y demandas interesantes, que se resolvieron para garantizar la seguridad adecuada para este tipo de instalación de salud, junto con un estricto control de costos por parte de la Propiedad.



Figura 13. Vista nocturna del hospital

Referencias

- [1] NP EN 1992. Eurocódigo 2 – Proyecto de estructuras de betão. IPQ, 2010.
- [2] REBAP – Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado, Decreto-Lei n.º 349-C/83.
- [3] NP EN 1993. Eurocódigo 3 – Proyecto de estructuras de aço. IPQ, 2010.
- [4] NP EN 1998. Eurocódigo 8 – Proyecto de estructuras para resistência aos sismos. IPQ, 2010.
- [5] ET05/2007 v.2010. Especificações Técnicas para o comportamento sísmo-resistente de edifícios hospitalares. ACCS, Ministério da Saúde de Portugal.