

# Influencia sismo-geotécnica en el diseño y la construcción de hospitales en México

## *Seismic and geotechnical influence on the design and construction of Hospital buildings in Mexico*

Fco. Javier Rodríguez Ortiz <sup>a</sup>, Ruben Alonso Alonso <sup>b</sup>, Angel Sánchez de Dios <sup>c</sup>

<sup>a</sup>Ingeniero de Caminos, CC. y PP. Ingeniero de Estructuras, dpto. de edificación. Sacyr Ingeniería. [fjrodriguez@sacyr.com](mailto:fjrodriguez@sacyr.com)

<sup>b</sup>Ingeniero Mecánico, Máster Ingeniera sísmica. Ingeniero de Estructuras, dpto. de edificación. Sacyr Ingeniería. [raalonso@sacyr.com](mailto:raalonso@sacyr.com)

<sup>c</sup>Ingeniero de Caminos, CC. y PP. Ingeniero de Estructuras, dpto. de edificación. Sacyr Ingeniería. [asanchezd@sacyr.com](mailto:asanchezd@sacyr.com)

### RESUMEN

El presente artículo analiza la influencia del tipo de suelo y su comportamiento geotécnico, tanto desde el punto de vista estático como del dinámico, en la elección de una tipología estructural concreta para el desarrollo de la construcción hospitalaria en México. Se describen, para dos hospitales construidos: las características geotécnicas del terreno, los requerimientos principales de las normas sísmicas vigentes en el momento de la construcción, así como el grado de protección prescrito por el pliego del concurso, y las tipologías estructurales empleadas en el diseño y cómo se llegó a su desarrollo.

### ABSTRACT

Current paper describes the influence of the kind of soil and its geotechnical behaviour, static as well as dynamic, on the selection of the specific structural typology for two hospital buildings in Mexico. It is described, for two already finished hospitals: the geotechnical characteristics of the soil, main seismic code requirements within construction time, as well as protection degree demanded within specs, and structural typologies selected within the design, together with main characteristics of them, and the process to select that typologies.

**PALABRAS CLAVE:** México, hospital, sismo, geotecnia, aislación, muros de corte

**KEYWORDS:** Mexico, hospital, earthquake, geotechnics, isolator, shear walls.

## 1. Hospital “El Marqués”. Querétaro.

### 1.1. Descripción.

El hospital “El Marqués” de Querétaro fue un concurso de diseño y construcción adjudicado a Sacyr en 2015. Se trata de un hospital de 260 camas, con una superficie construida en el entorno de los 35000 m<sup>2</sup>, siendo el edificio principal en planta baja y tres niveles sobre rasante.





Figura 2. Perspectiva texturizada del modelo informático del edificio.

### 1.2. Prescripciones del pliego de concurso.

El pliego de concurso, en relación con la estructura del edificio, presentaba un proyecto referencial y unos requerimientos técnicos asociados, pero el diseño resultaba a cargo del adjudicatario, satisfaciendo los requerimientos del pliego. Cabe destacar la clasificación del hospital como Rojo, de acuerdo con la clasificación de emergencias, por lo que el hospital debe poder seguir atendiendo pacientes de forma inmediata.

Nivel	Color	Significado	Tiempo máximo de atención	Tipo de urgencia	Adaptación de GPC
Nivel I	Rojo	Reanimación inmediata	Inmediato	Real	Rojo
Nivel II	Anaranjado	Emergencia	Menor a 10 minutos	Real	Rojo
Nivel III	Amarillo	Urgencia	Menor a 30 minutos	Real o sentida	Amarillo
Nivel IV	Verde	Poco urgente	Menos de 60 minutos	Sentida	Verde
Nivel V	Azul	Sin urgencia	Menor de 240 minutos	Sentida	Verde

Figura 3. Clasificación de tipos de urgencia.

### 1.3. Normativa de aplicación.

La normativa vigente recogida por el pliego de concurso de aplicación a la estructura fue:

- Manual de diseño de obras civiles de la C.F.E.
- Normas Técnicas Complementarias para el Proyecto Arquitectónico del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (2004).
- Reglamento de Construcciones de la localidad y sus Normas Técnicas Complementarias respectivas o supletoriamente el del D.F.
- Reglamentos propios del IMSS.

### 1.4. Descripción geotécnica del suelo.

Durante la fase de licitación del concurso, se realizó un estudio geotécnico para conocer la naturaleza del terreno. Además de los ensayos de campo habituales, se hizo geofísica empleando sísmica de refracción, con objeto de obtener un espectro de sitio.

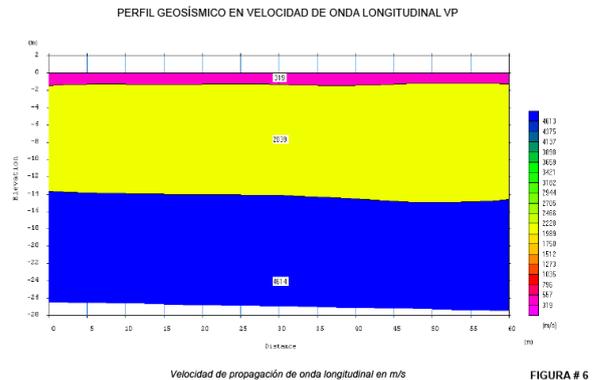


Figura 4. Perfil geosísmico del terreno.

El resultado de la investigación geotécnica fue que en la parcela se localizaban dos tipos de terreno, un nivel superior de terreno flojo, en general terreno vegetal y aglomerado volcánico, de potencia variable entre 1.00 a 3.00 m. Debajo de este nivel aparece un nivel de roca andesítica, de buena compacidad.

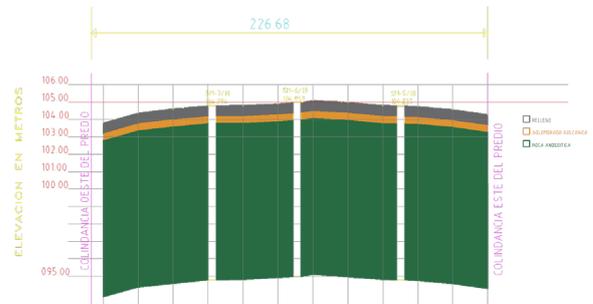


Figura 5. Sección estratigráfica del predio.

La aparición de la roca basáltica proporciona un espectro de terreno relativamente favorable, al no presentarse terrenos blandos que puedan causar amplificación dinámica, lo cual posibilita el empleo de estructuras sismorresistentes convencionales.

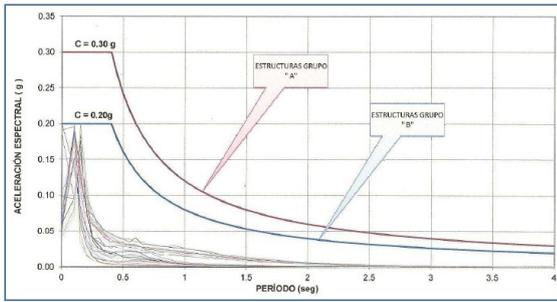


Figura 6. Espectro elástico de respuesta del terreno. Espectro de Sitio.

Del análisis del espectro local de sitio, se aprecia una relativa concordancia con los espectros sísmicos descritos en las normas de aplicación, siendo ligeramente más desfavorable la meseta del espectro en el espectro local, por lo que se emplea el espectro local como espectro de diseño, escalado para construcciones del tipo A.

### 1.5. Tipología estructural proyectada.

A la vista de los requerimientos de la norma sísmica, y el espectro de sitio obtenido, se decidió realizar una estructura de muros de cortante como estructura sismorresistente principal, y marcos intermedios en la estructura de cargas gravitatorias, cimentada sobre la roca basáltica con zapatas aisladas arriostradas donde la cara inferior de zapata contacta con el basalto, o bien se transfiere la carga al basalto a través de una mejora de terreno con pozos de hormigón en masa.

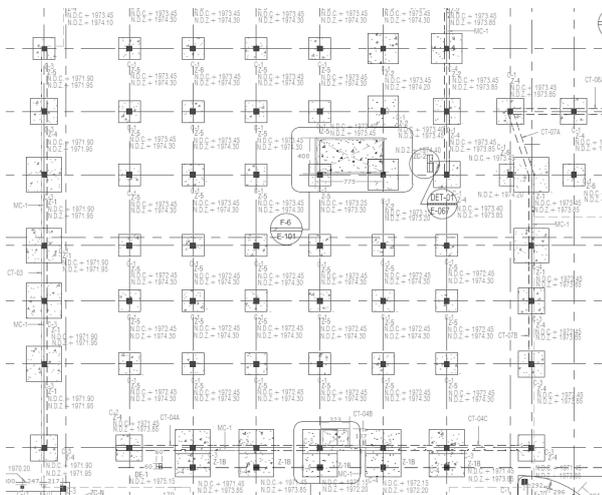


Figura 7. Planta de Cimentación. Reproducción parcial.

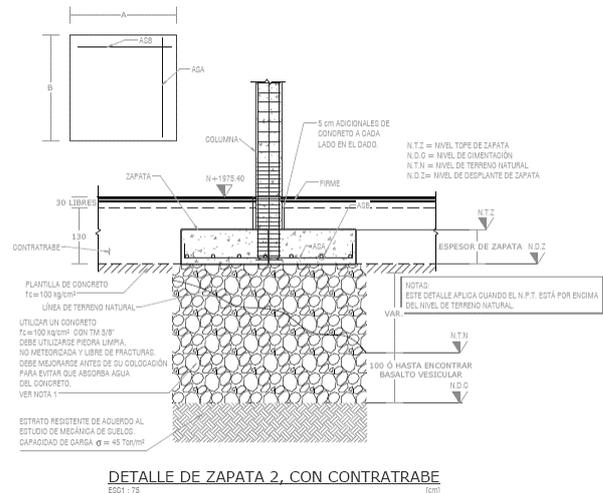


Figura 8. Detalle de mejora con hormigón pobre.

El piso se materializa mediante traveses secundarios que parten la luz de las principales y que recogen una losa esbelta de 0.12 a 0.15m de canto. La solución estructural mediante muros de corte y marcos intermedios, más vigas parteluces y losa esbelta como piso, es una solución habitual en este tipo de construcción en México.

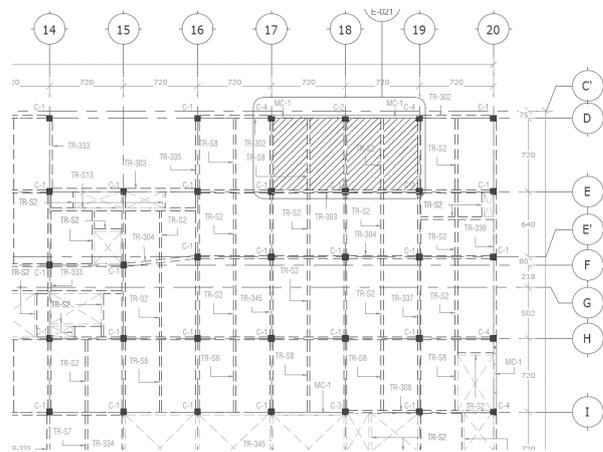
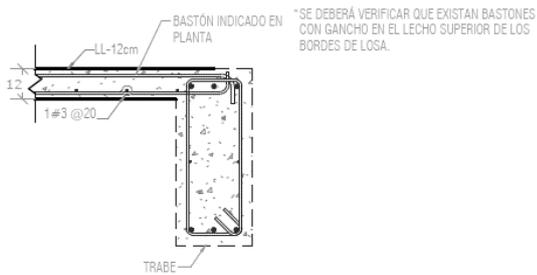


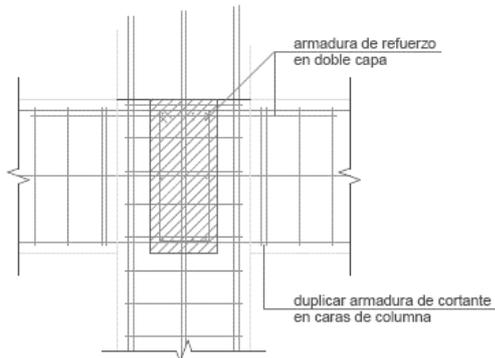
Figura 9. Planta típica de estructura. Reproducción parcial

Se reproducen plantas y detalles típicos del proyecto de construcción, para mayor claridad.

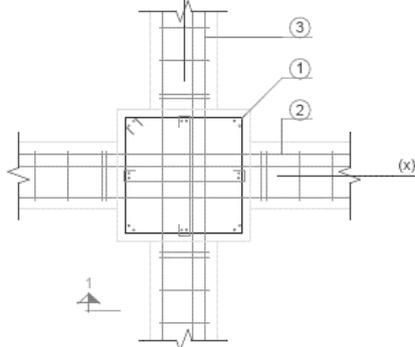


**DET-01 DETALLE DE BORDE DE LOSA**  
ESC 1 : 20 [cm]

**Figura 10. Detalle típico de losa y trabe**



SECCION por 1 (y)

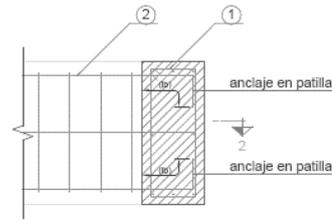


Vista en PLANTA

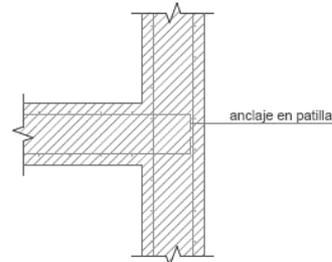
**ARMADO EN CONEXION COLUMNA ↔ TRABE**  
Escala 1:30

- ①- COLUMNA incluso JAULA DE ARMADURA.
- ②- TRABE PRINCIPAL (x) incluso JAULA DE ARMADURA.
- ③- TRABE PRINCIPAL (y) incluso JAULA DE ARMADURA.

**Figura 11. Encuentro traveses-columna**



Vista en ALZADO SECCIONADO



SECCION por 2

**EMBROCHALAMIENTO TRABE SECUNDARIA ↔ TRABE PRINCIPAL**

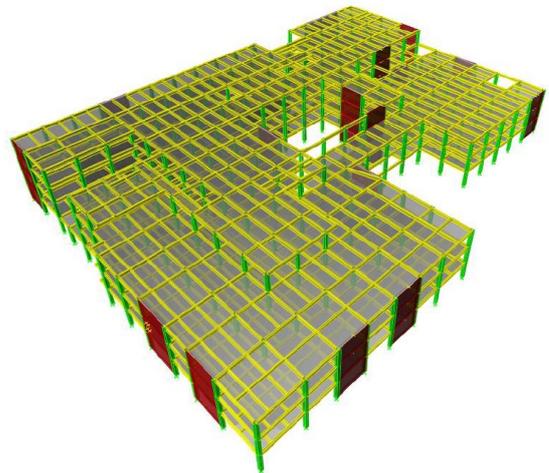
Escala 1:30

(lb)= longitud de anclaje de la armadura

- ①- TRABE PRINCIPAL incluso JAULA DE ARMADURA.
- ②- TRABE SECUNDARIA incluso JAULA DE ARMADURA.

**Figura 12. Encuentro trabe secundaria-principal**

La estructura así proyectada presenta unos períodos fundamentales en X e Y de 0.49 y 0.55s, respectivamente.



**Figura 13. Modelo numérico del edificio principal**

No obstante, al aplicar los factores correctores al espectro que prevén las NTC del DF, se obtienen unos espectros de diseño bastante inferiores al elástico, lo cual posibilita disponer de una fuerza sísmica asumible por los muros de cortante.

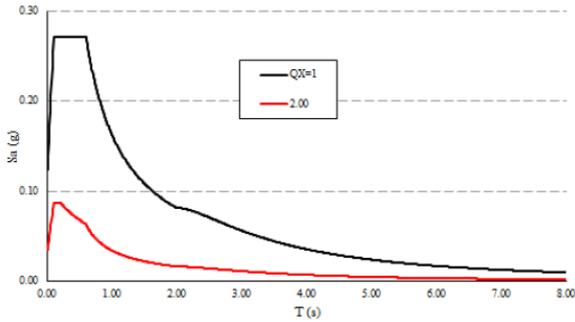


Figura 14. Espectro corregido. Dir. X

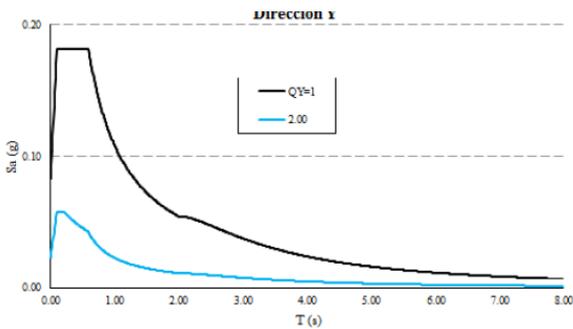


Figura 15. Espectro corregido. Dir. Y

### 1.6. Tipología estructural construida.

La tipología proyectada y ofertada fue la finalmente construida. Se reproducen imágenes de la fase de construcción de estructura, donde pueden apreciarse los elementos estructurales.



Figura 16. Excavación del predio y vista de la roca basáltica.



Figura 17. Vista del avance de estructura. Muros de Cortante y marcos.



Figura 18. Vista inferior de forjados. Trabes principales, secundarias y losa de piso.



Figura 19. Estructura finalizada, y comienzo de fachada.

## 2. Hospital de Tláhuac.

### 2.1. Descripción.

El hospital de Tláhuac, en el D.F. fue un concurso de diseño y construcción adjudicado a Sacyr en 2016. Se trata de un hospital de 250 camas, con una superficie construida en el entorno de los 33000 m<sup>2</sup>, siendo el edificio principal en planta baja y tres niveles sobre rasante.

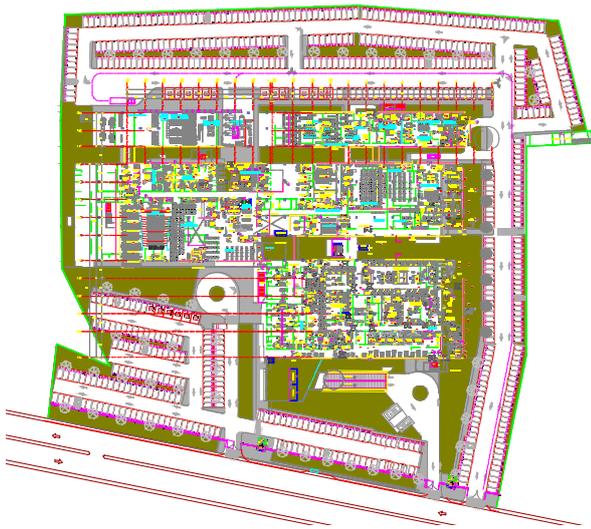


Figura 20. Planta del modelo informático del edificio.



Figura 21. Perspectiva texturizada del modelo informático del edificio.

## 2.2. Prescripciones del pliego de concurso.

En relación con la estructura del edificio, el pliego de concurso no presentaba en este caso proyecto referencial, tan sólo unos requerimientos técnicos asociados, con diseño resultaba a cargo del adjudicatario. La clasificación del hospital respecto al sistema de clasificación de emergencias es de Rojo, al igual que el de Querétaro.

## 2.2. Normativa Vigente en el concurso.

La normativa vigente recogida por el pliego de concurso de aplicación a la estructura fue:

- Manual de diseño de obras civiles de la C.F.E.
- Normas Técnicas Complementarias para el Proyecto Arquitectónico del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (2004).

- Reglamentos propios del IMSS.
- Especificaciones Generales de Construcción del Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado ISSSTE.

## 2.4. Descripción geotécnica del suelo.

El estudio geotécnico existente en la documentación de referencia para la licitación resultó muy preliminar, por lo que Sacyr realizó una ampliación de este, para disponer de una descripción inicial del suelo, y poder fijar la cimentación a licitar. Del resultado de la investigación realizada, se obtiene una secuencia estratigráfica formada por una primera capa de rellenos seguida de una costra de arcilla endurecida, bajo la cual aparece una alternancia de terrenos arcillosos y arcillo-arenosos de baja consistencia interrumpidos sin continuidad por lentejones areno-arcillosos de diferente potencia y mayor compacidad.

En relación con la caracterización sísmica del terreno, el suelo se caracteriza como de tipo II. La recomendación de cimentación establecida en el estudio geotécnico es la de una losa parcialmente compensada, apoyada sobre una mejora del terreno.

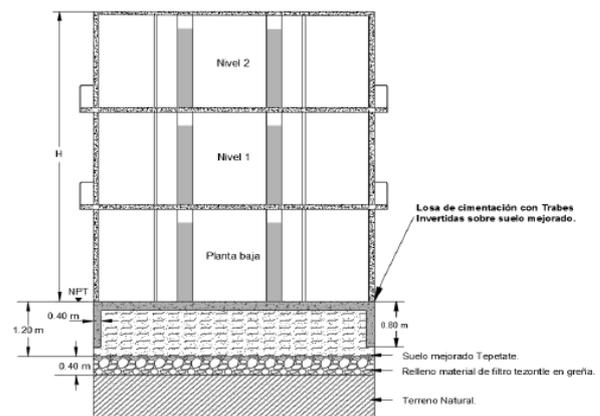


Figura 22. Propuesta de losa de cimentación con traves invertidas en corte longitudinal del edificio.

Figura 22. Recomendación de cimentación del E.G.

## 2.5. Tipología estructural proyectada y licitada.

Para la licitación, se procedió a proyectar una estructura de muros de cortante como estructura sismorresistente principal, y marcos intermedios

en la estructura de cargas gravitatorias, cimentada mediante cimentación con losa sobre una mejora, siguiendo las recomendaciones del E.G. El piso se materializa mediante traveses secundarios que parten la luz de las principales y que recogen una losa esbelta de 0.12 a 0.15m de canto.

## 2.6. Modificación de los requerimientos del pliego.

Sin embargo, dos circunstancias obligaron a modificar la tipología estructural licitada, y realizar un proyecto modificado sobre el desarrollado inicialmente.

1.- La solicitud de adecuación del proyecto licitado a la nueva normativa sísmica del D.F., editada en 2017, que aumentaba considerablemente la acción sísmica (ver figura) en el tipo de terreno existente en el predio, en relación con la descrita en esa zona por la norma anterior, vigente durante el anterior proceso de licitación y diseño.

2.- El interés demostrado por el ISSTE, a la vista del sismo en el DF del año 2017, en mejorar la seguridad y funcionalidad del edificio frente a sismo.

## 2.7. Ampliación del E.G. y obtención de espectro de sitio.

Ambas circunstancias obligaron a Sacyr a realizar un nuevo estudio de soluciones para satisfacer las necesidades del cliente, resultando en un proyecto modificado. Para ello, previamente, se realizó un nuevo estudio geotécnico con el objetivo de la obtención de un espectro de sitio, a la vista de la modificación del espectro según las diferentes versiones de las NTC del DF, para el terreno descrito. Del estudio geotécnico adicional se desprende la siguiente sección estratigráfica.

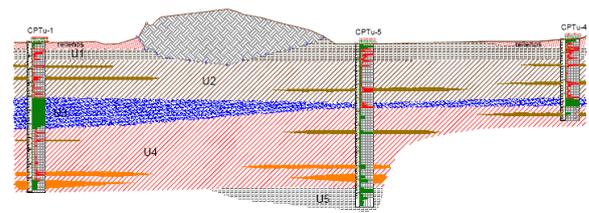


Figura 8. Sección estratigráfica del SE-1 al SE-4.

Figura 23. Sección geotécnica.

Que resulta consistente con los estudios geotécnicos anteriores.

El espectro de sitio obtenido resulta en la línea de lo descrito en la NTC-2017 para periodos largos tal y como se observa en la figura. Sin embargo, se detectan diferencias en la meseta ya que en el espectro de sitio los valores de aceleración son menores, aunque en contrapartida, es una meseta más larga prolongándose hasta periodos más largos.

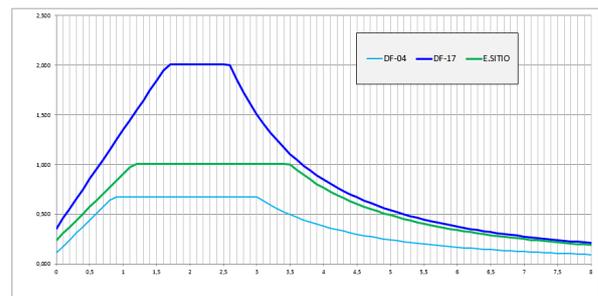
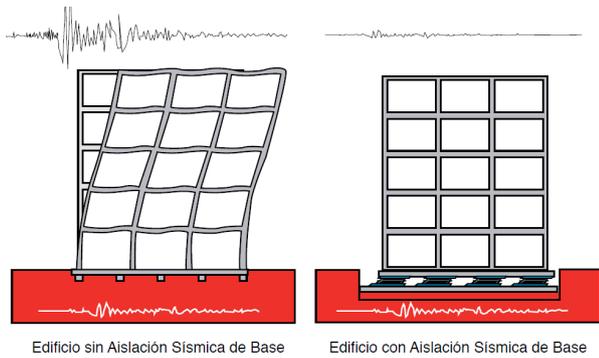


Figura 24. Espectro de sitio. Comparativa entre DC-04 vs DC-17 vs Espectro de sitio.

## 2.8. Proyecto modificado.

Una vez evaluado el espectro de sitio en relación con lo descrito por la normativa del DF, de acuerdo con la solicitud del ISSTE, y una vez realizado un estudio previo técnico-económico de soluciones (muros de cortante, aislación de base, aislación con amortiguamiento), se decide desarrollar un proyecto modificado de estructuras con aislación de base alojada en el cajón de cimentación, como medio de limitación del daño. Uno de los grandes beneficios de esta solución es que toda la disipación de energía, o la mayor parte de ella, se concentra en la planta de aislamiento.



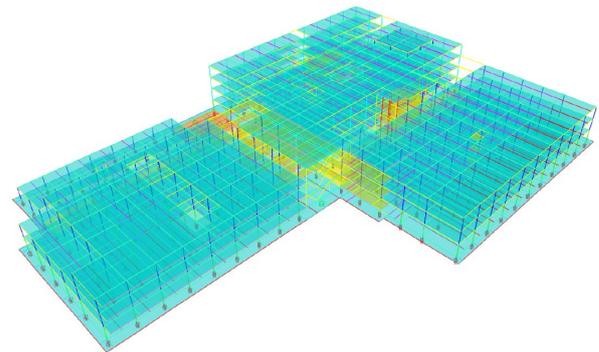
Edificio sin Aislación Sísmica de Base      Edificio con Aislación Sísmica de Base  
**Figura 25. Aisladores de base. Influencia sobre las aceleraciones absolutas en plantas.**

La superestructura, entendiéndose como tal la parte de estructura situada sobre el sistema de aislación, se comportará como un sólido rígido al tener esta una rigidez notablemente superior a la de los aisladores no sufriendo daños y comportándose fundamentalmente en rango elástico. Mediante esta técnica se consigue además una reducción significativa en las aceleraciones absolutas en las plantas del edificio disminuyendo en consecuencia los esfuerzos a los que están sometidos los elementos no estructurales pudiendo así mitigarse el daño en ellos.

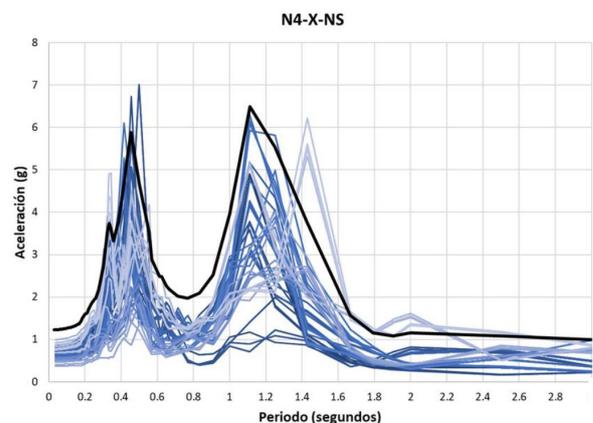
Esta tipología no es habitual en edificios de este tipo en el D.F. Todo lo anterior lleva a las siguientes modificaciones del proyecto de estructuras inicial:

- Ampliación del canto de losa cajón de cimentación, para alojar el sistema de aislación.
- Modificación de la cota de desplante de cimentación, haciéndola más profunda, para no incrementar la altura del edificio.
- Ampliación adicional del estudio geotécnico con las nuevas cotas, para evaluar la idoneidad de la solución proyectada, y los asientos esperables por subducción del suelo arcilloso, y su posible afección a la interacción del hospital con su entorno.
- Consideración de los marcos intermedios de la solución inicial como marcos especiales, con las implicaciones correspondientes relativas al armado necesario por ductilidad.
- Consideración de la vulnerabilidad sísmica de los elementos no estructurales, y diseño y

ejecución de subestructuras de estabilización para los mismos.

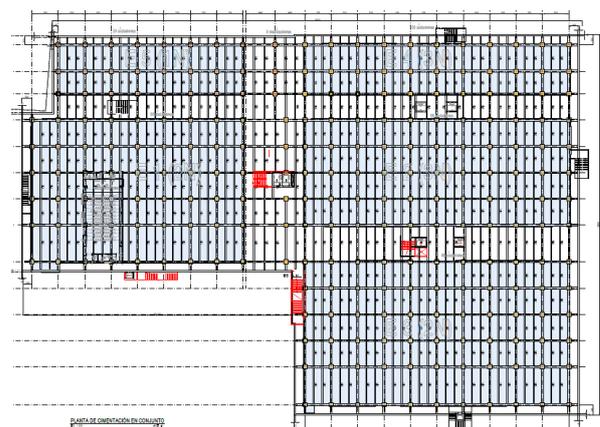


**Figura 26. Modelo de cálculo global**



**Figura 27. Espectro análisis de contenidos**

Se diseñó una placa de aislación única para todos los edificios para evitar juntas complicadas en este nivel.



**Figura 28. Planta de aislación**

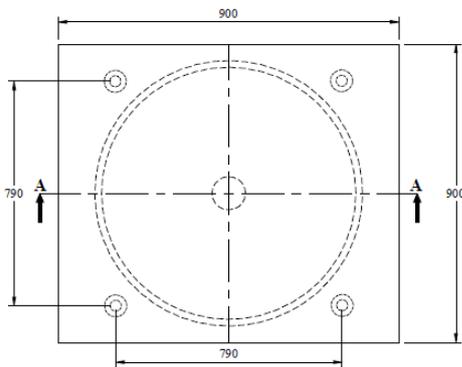
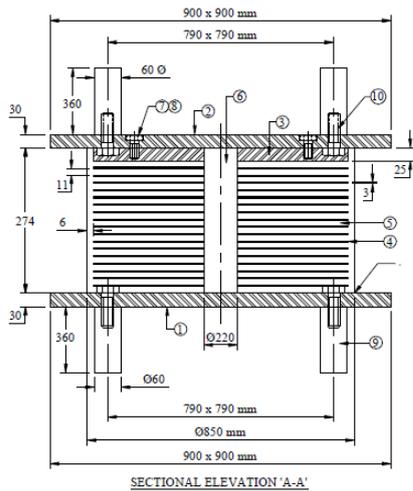


Figura 29. Detalle de los aisladores

La estructura está diseñada con pilares de 70x70 vigas principales de 40x80 secundarias de 25x60 y losas de canto 0,10 m, las luces tipo de edificio son de 7,50x7,50.

### 2.9. Proyecto construido.

El proyecto construido se corresponde con el proyecto modificado, tal y como recogen las siguientes figuras, que reflejan detalle de los aisladores y los elementos principales de la estructura.



Figura 30. Imagen de los aisladores

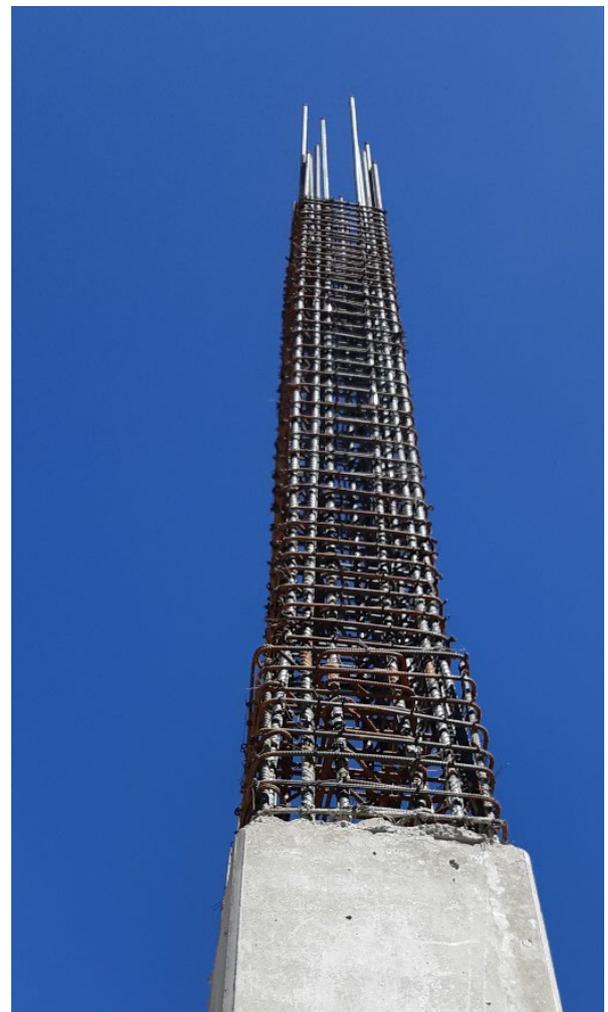


Figura 31. Detalle de armado de pilares



Figura 32. Vista de sistema de marcos



Figura 33. Vista general de la obra

### 3. CONCLUSIONES

La influencia de los condicionantes geotécnicos en zonas de alta sismicidad resulta fundamental en la elección de la tipología sismorresistente a desarrollar en la construcción hospitalaria en un país como México.

Como ha podido apreciarse, en el primero de los casos descritos, el hospital de Querétaro, la existencia de roca como cimentación ha posibilitado el desarrollo y construcción de una tipología estructural convencional de costo acotado, al resultar las acciones sísmicas, representadas por el espectro reducido, en rangos relativamente bajos para los posibles en el país, y, por tanto, poder recogerse el sismo mediante un sistema estructural rígido (muros de cortante).

Sin embargo, en el segundo caso, el hospital de Tláhuac, la presencia de un espectro de respuesta del terreno de meseta notablemente más elevada,

corroborada por la realización de un espectro de sitio que incluso la alarga, junto con la voluntad de la propiedad de realizar un hospital más seguro de cara a sismo con capacidad para mantenerse operativo durante y después de un terremoto, a la vista de los resultados catastróficos del sismo registrado en el DF en 2017, ha hecho necesario el desarrollo de una solución con aislamiento de base, toda vez que una solución de rigidez no garantizaba los requerimiento de control del daño, y una solución amortiguada incrementaba en gran medida el coste de la estructura y los desplazamientos en el entorno del período objetivo, quedaban por encima de los valores de intervalo habitual.

### 4. REFERENCIAS

- [1] Normas Técnicas Complementarias para el Proyecto Arquitectónico del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, México D.F., 2004.
- [2] Normas Técnicas Complementarias para el Proyecto Arquitectónico del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, México D.F., 2017.
- [3] Especificaciones Generales de Construcción del Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado ISSSTE, México.
- [4] Especificaciones Generales de Construcción del Instituto Mexicano del Seguro Social IMSS, México.