

REVISIÓN DE LA RESPUESTA Y PROPUESTA DE REFORZAMIENTO CONCEPTUAL DEL EDIFICIO DEL PODER EJECUTIVO DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA, UTILIZANDO REGISTROS DEL SISMO DE MEXICALI DEL 4 DE ABRIL DEL 2010

Joel Martínez Martínez¹, Rubén Carrillo Arvayo²

RESUMEN

El edificio del Poder Ejecutivo del Estado, en Mexicali B.C. es un edificio que fue construido e inaugurado hace más de treinta años (1978), y el CICESE contaba con un sismógrafo en la base del edificio y otro en la azotea cuando se presentó el sismo del 4 de abril del 2010. Los datos de estos registros son utilizados para analizar el edificio, comparar las respuestas, y así como proponer un método de reforzamiento que mejore su respuesta. Los resultados del análisis paso a paso muestran buena correlación con lo medido, y utilizando aisladores sísmicos se obtuvo un mejor desempeño que utilizando muros de cortante.

ABSTRACT

The building for the Baja California State government, located in Mexicali is a building that was built nearly thirty years ago (1978), and the CICESE had installed a seismograph at the building's basement and other on the roof when the 4th of April 2010 earthquake occurred. The seismic records obtained are used to analyze the building and compare the response, and to propose a retrofitting method to improve the building's performance. The results from the time history analysis show a good correlation, and the retrofitting using concrete shear walls shows a better performance than the method using seismic isolation (catalog isolators).

INTRODUCCIÓN

Las ciudades de Mexicali Baja California, Calexico y El Centro California están situadas en una zona geográfica rodeada por diversas fallas, siendo las de mayor riesgo la falla Imperial, la falla Cerro Prieto, y la falla de la laguna salada, las tres capaces de producir sismos con magnitud mayor a 7 grados (Mw). La falla Imperial fue donde se produjo el sismo de El Centro de 1940 con una magnitud de 7.1° y también fue la causante de un sismo de 6.6° en 1979. La falla de Cerro Prieto fue la causante del sismo de 7.1° en 1934, el sismo del Golfo de 1966 con magnitud de 6.3°, el sismo de Victoria de 1980 con magnitud de 6.1°, la falla de Laguna Salada se asocia con un sismo de 7.5° ocurrido en 1892 (Cruz-Castillo, 2002), y esta misma falla fue la causante del sismo ocurrido el pasado 4 de abril de 2010 con magnitud de 7.2°.

El edificio del poder ejecutivo del gobierno del estado de Baja California (figura 1), fue construido e inaugurado en 1978, por lo que ha estado sujeto a varios sismos, tales como el sismo de 6.6Ms de 1979, el de 6.6Ms de 1987, 5.9 de 2009, y el de 7.2Mw de 2010, sufriendo solo daños estructurales menores en los dichos eventos. Por otro lado este es el único edificio público en Mexicali que contaba con sismógrafos instalados y funcionando el 4 de Abril del 2010, en la Figura 2 se muestra la ubicación del edificio con respecto a la ruptura del suelo ocasionada por el sismo, donde se puede apreciar que el edificio se encuentra a una distancia perpendicular a la falla de 20 km, aproximadamente. Este edificio se encuentra a 300m aproximadamente del edificio del Hospital General, que tradicionalmente ha sido el edificio de mayor

¹ Profesor-Investigador, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez s/n, Col. Insurgentes, Mexicali, B.C. joelmartinez@uabc.edu.mx

² Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Baja California, ca_ruben@hotmail.com

atención después de los sismos. El edificio cuenta con un sismógrafo en la base (sótano), y otro en la azotea, en la Figura 3 donde se presenta la ubicación del sismógrafo en el sótano y en la azotea.



Figura 1. Fotografías del edificio del Ejecutivo del Estado de Baja California



Figura 2. Ubicación de la ruptura con respecto al edificio

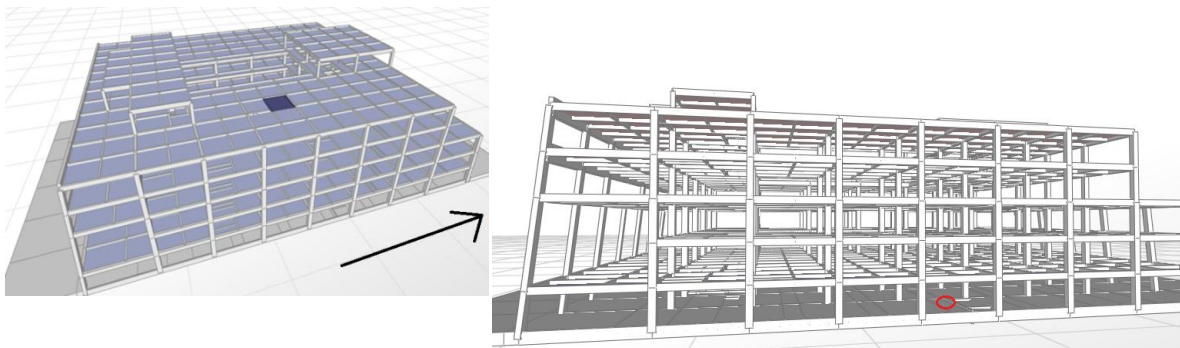


Figura 3. Ubicación de sismógrafo en la cubierta, y en el sótano, respectivamente

El objetivo de este estudio es poder contar con un modelo matemático del edificio el cual este calibrado, utilizando las aceleraciones medidas en la base y azotea del edificio, de tal forma que dicho

modelo pueda servir para revisar la condición estructural de los elementos del edificio, determinar su nivel de esfuerzos, y principalmente determinar si el desempeño del edificio es apropiado. Esto, tanto para el sismo ocurrido el 4 de abril del 2010, así como para sismos futuros, u otras contingencias. También, esta información es de gran valor para poder implementación sistemas que mejoren el desempeño del edificio, tales como aislamiento sísmico, muros de cortante, u otros.

En la Figura 4, Figura 5, y Figura 6 se presentan los acelerogramas obtenidos en la dirección norte-sur, este-oeste y vertical, respectivamente; en cada grafica se presentan las aceleraciones medidas en el sótano del edificio, así como en la azotea. Es importante mencionar que el espectro de respuesta tano del sismo del 4 de abril, así como sismos anteriores rebaso las aceleraciones máximas que contempla el espectro de diseño contenido en el Reglamento a la Ley de Edificaciones del Estado de Baja California (RLEEBEC, 1992), tal como se muestra en la Figura 7.

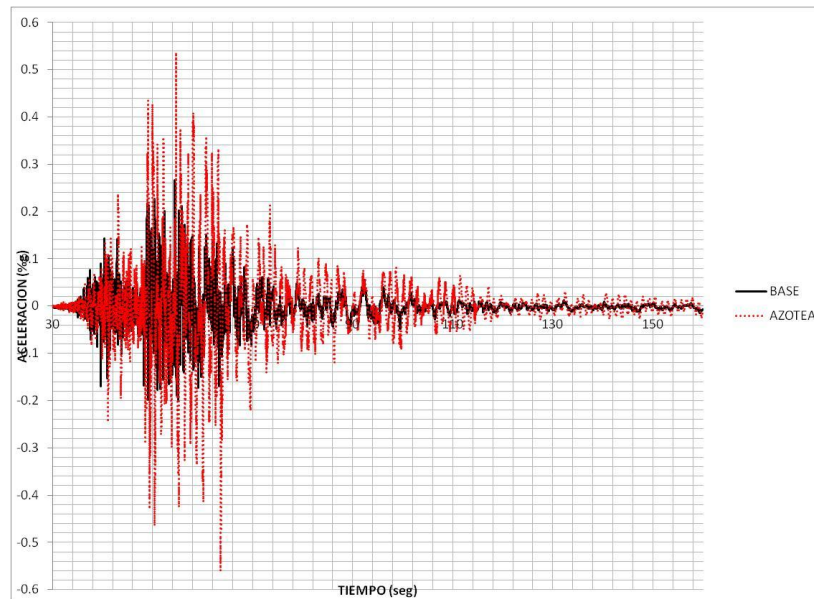


Figura 4. Acelerogramas en dirección norte-sur

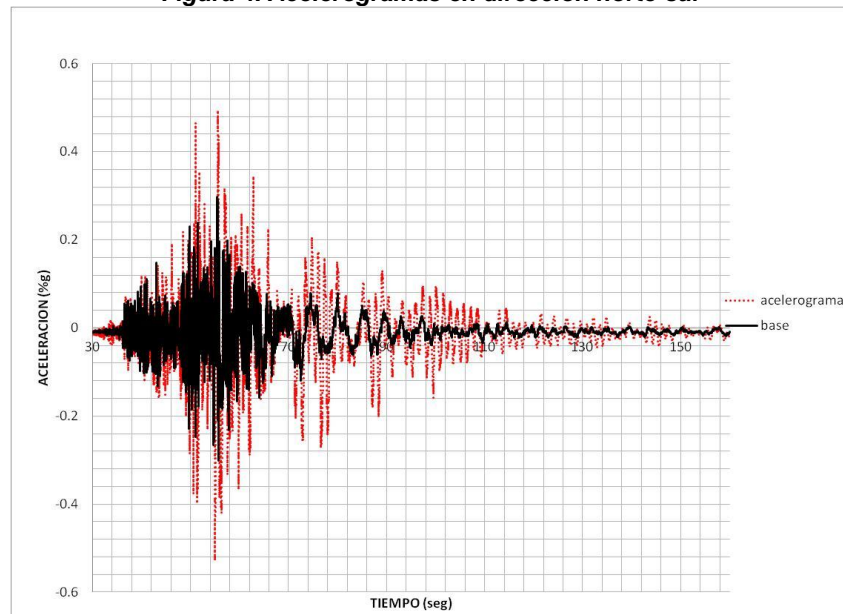


Figura 5. Acelerogramas en dirección este-oeste

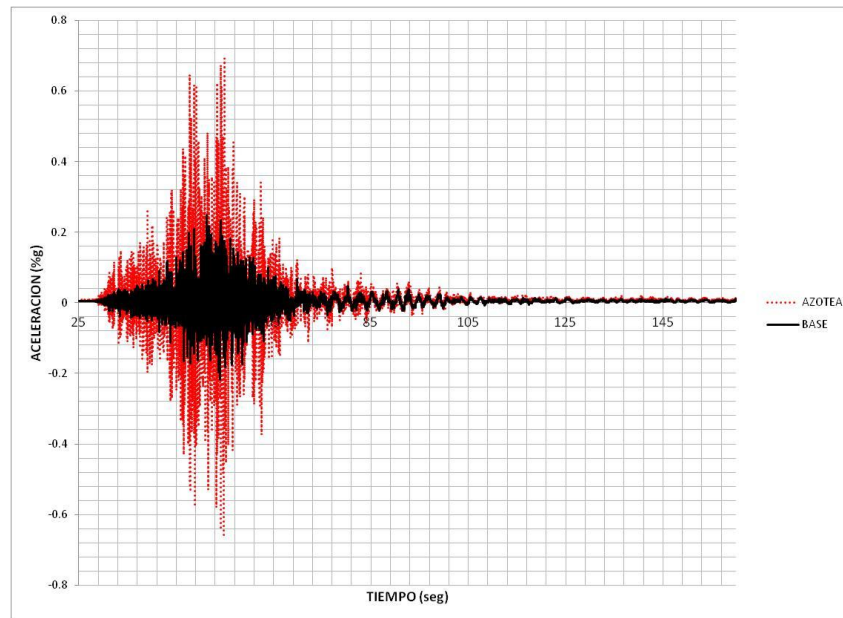


Figura 6. Acelerogramas verticales

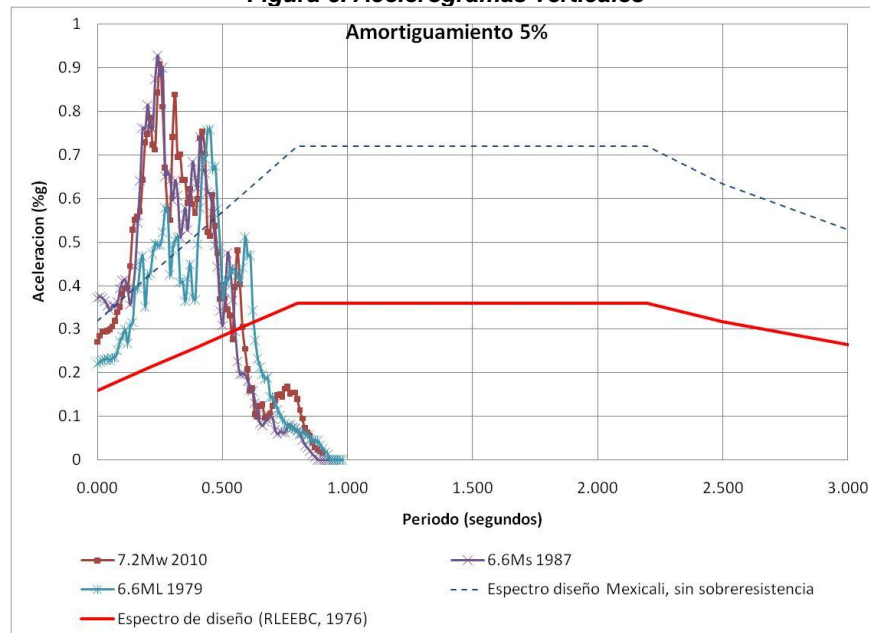


Figura 7. Comparación del espectro de respuesta de varios sismos con respecto al espectro de diseño del RLEEBC (1992)

CONSIDERACIONES PARA EL ANALISIS

El modelo fue elaborado en base a los planos originales del edificio, los cuales indican dimensiones de columnas, trabes y losas, para cada nivel. El edificio cuenta con muros interiores no estructurales que no están conectados a la estructura, por lo que estos elementos no se incluyeron en el modelo. Los apoyos de la estructura se modelaron con resortes para obtener un comportamiento más real de la estructura, al considerar la interacción suelo-estructura. Asimismo, se redujo la rigidez de los miembros del edificio, mediante la consideración de la inercia agrietada en las propiedades los miembros.

El edificio está estructurado a base de marcos rígidos (marcos portal), formados por columnas y traveses de concreto, para los entresijos se cuenta con una losa plana que está soportada por vigas de concreto secundarias que dividen las bahías en dos. En general el tamaño de las columnas es de 750mm x 750mm, las traveses principales de 350mmx750mm, y las vigas secundarias de 250mm x 750mm.

A continuación se describen las consideraciones generales en la creación del modelo tridimensional del edificio.

- Carga muerta = 2.94 kPa (300 kg/m²)
- Carga viva = 2.45 kPa (250 kg/m²)
- Carga viva por sismo = 17.65 MPa (180 kg/m²)
- Resistencia del concreto, $f'c = 20$ MPa (200kg/cm²)
- Para columnas se consideró una inercia agrietada del 70% de la inercia gruesa
- Para traveses y losas se consideró una inercia agrietada el 35% de la inercia gruesa
- Los apoyos se consideraron como resortes para tomar el efecto de la interacción suelo estructura, la rigidez se determinó mediante estudios de mecánica de suelos que se tienen de la zona, los resortes se ubicaron aproximadamente a una separación de 1000mmx1000mm, y tienen una rigidez de 12750 N/mm (13000 kg/cm).

RESULTADOS DEL ANALISIS

Para el análisis de la estructura se empleó el método paso a paso (time history), donde se consideraron las tres componentes (norte-sur, este-oeste, y vertical del sismo), mostradas en la Figura 4, Figura 5, y Figura 6. El análisis se realizó con el programa SAP2000, donde se obtuvo un periodo de vibración de 2.13seg, 2.12 seg, y 1.78 seg para los primeros tres modos de la estructura.

En las siguientes gráficas se puede apreciar como las aceleraciones medidas en la azotea del edificio, en el nodo que se muestra en la Figura 8, guardan una gran semejanza con las presentadas por el modelo en SAP2000 de dicho inmueble, dando fiabilidad que el modelo es apto para el análisis y diseño de nuevas propuestas.

Según los resultados obtenidos, existe una diferencia del 16% en la aceleración máxima obtenida en la dirección este-oeste con la modelación, con respecto a la aceleración medida con el sismógrafo, mientras que en la dirección norte-sur, la diferencia es del 4%, y para la dirección vertical la diferencia es del 31%.

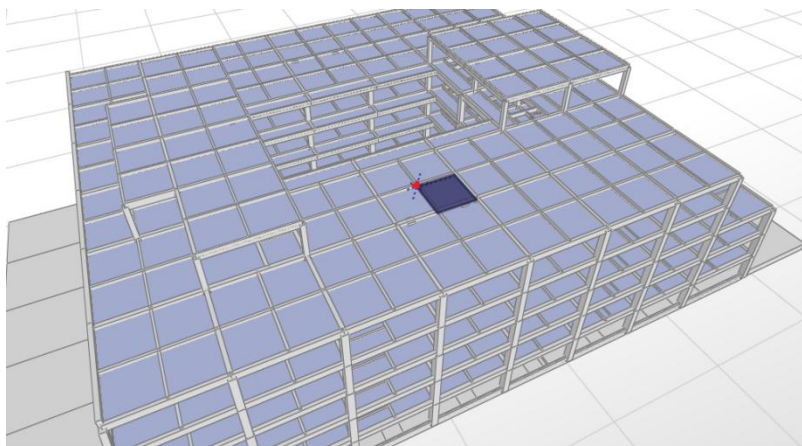


Figura 8. Nodo donde se comparan las aceleraciones

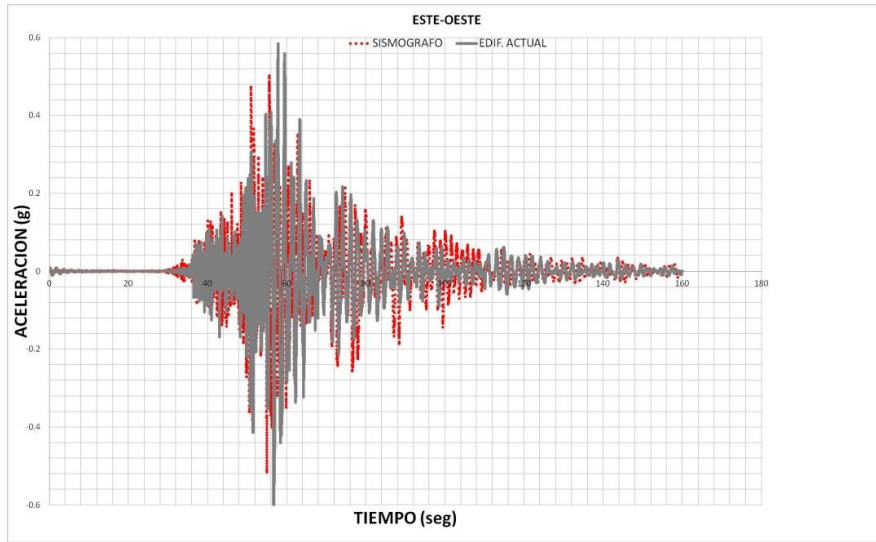


Figura 9. Comparación de aceleraciones en la azotea en la dirección este-oeste

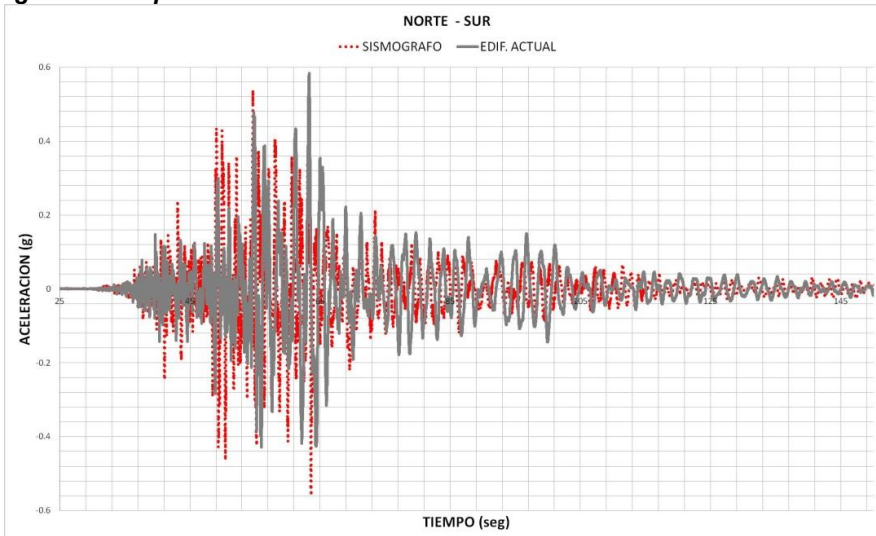


Figura 10. Comparación de aceleraciones en la azotea en la dirección norte-sur

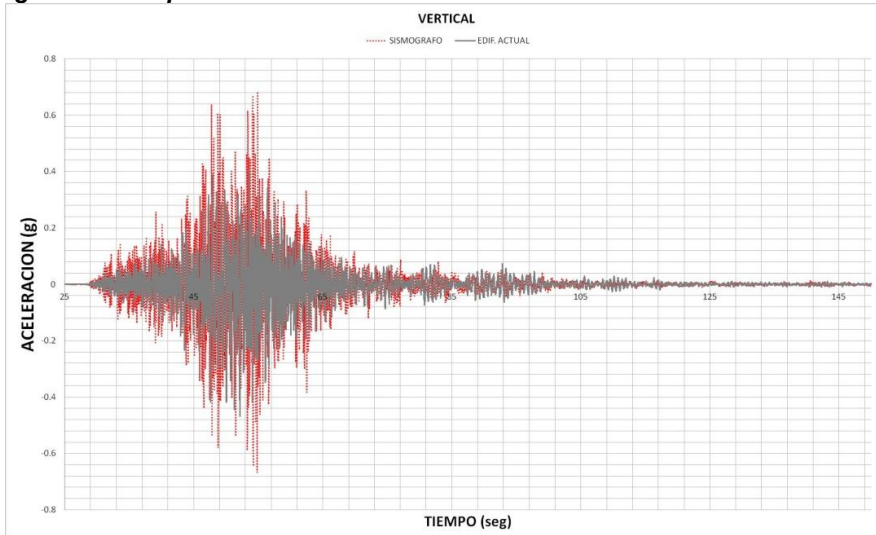


Figura 11. Comparación de aceleraciones en la azotea en la dirección vertical

La deformación máxima de la estructura debida al sismo es de 4.9mm en la dirección x (norte-sur), de 22.3mm en la dirección y (este-oeste), y de 2.9mm en la dirección vertical; la deformación fue medida en el mismo nodo donde se compara la aceleración.

PROPUESTAS DE REFORZAMIENTO DE LA ESTRUCTURA

Por tratarse de un edificio estructurado con marcos de concreto reforzado, el reforzamiento “natural” serian los muros de cortante de concreto reforzado, los cuales pueden aumentar la rigidez y resistencia lateral del edificio significativamente, y seria probablemente la opción mas económica en relación con otros métodos de reforzamiento. Sin embargo, la desventaja principal de utilizar muros de cortante, es que puede reducir la funcionalidad del edificio, y también cambia su arquitectura, ya que esto implica modificaciones en fachadas, espacios, iluminación, instalaciones, etc. Además, la construcción de muros de cortante es un procedimiento que afectaría la operación del edificio, incluso dependiendo de la ubicación y cantidad de los muros requeridos, probablemente se requeriría la interrupción de la operación del edificio.

Como método alternativo para mejorar el desempeño del edificio, se analiza la opción de utilizar un sistema de aislamiento sísmico a base de cojines elastomericos, el cual es menos invasivo, y con una buena planeación de instalación se podría evitar la interrupción de la operación del edificio. Sin embargo, la desventaja principal de este sistema seria el elevado costo comparado con la opción anterior, y otras posibles opciones.

Para la opción de refuerzo de la estructura utilizando muros de cortante se colocaron muros en las esquinas exteriores, asumiendo que esto posible y permitido arquitectónicamente, tal como se puede apreciar en la Figura 12. Los muros tienen un espesor de 350 mm, utilizando concreto $f'c= 27.45\text{MPa}$ (280 kg/cm^2). Este edificio tiene periodos de 1.68seg, 1.54seg, y 1.16seg.



Figura 12. Vista del modelo tridimensional del edificio con muros de cortante

En el caso del edificio con aisladores sísmicos se utilizan cojines elastomericos estándar, los cuales se seleccionaron del catalogo del proveedor Dynamic Isolation Systems (DIS) en base a la carga axial de las columnas del edificio. Donde los aisladores tienen las siguientes propiedades:

- Diámetro 1257.30cm (49.5 pulgadas)
- Rigidez a compresión 3678 kN/mm (21000kip/in)
- Desplazamiento máximo 914.4cm (36 pulgadas)
- Carga axial máxima 20462 kN (4600 kip)
- Amortiguamiento 10%

Para este caso no se presenta vista del modelo, ya que es la misma de la Figura 8, donde solamente cambia el tipo de apoyo. El edificio con aisladores tiene periodos de 7.21seg, 7.19seg, y 6.75seg. A continuación se presenta la respuesta del edificio reforzado con muros de cortante, y del edificio utilizando aisladores sísmicos. En ambos casos se compara la respuesta a la del edificio actual, en el mismo nodo de referencia donde se encuentra instalado el sismógrafo.

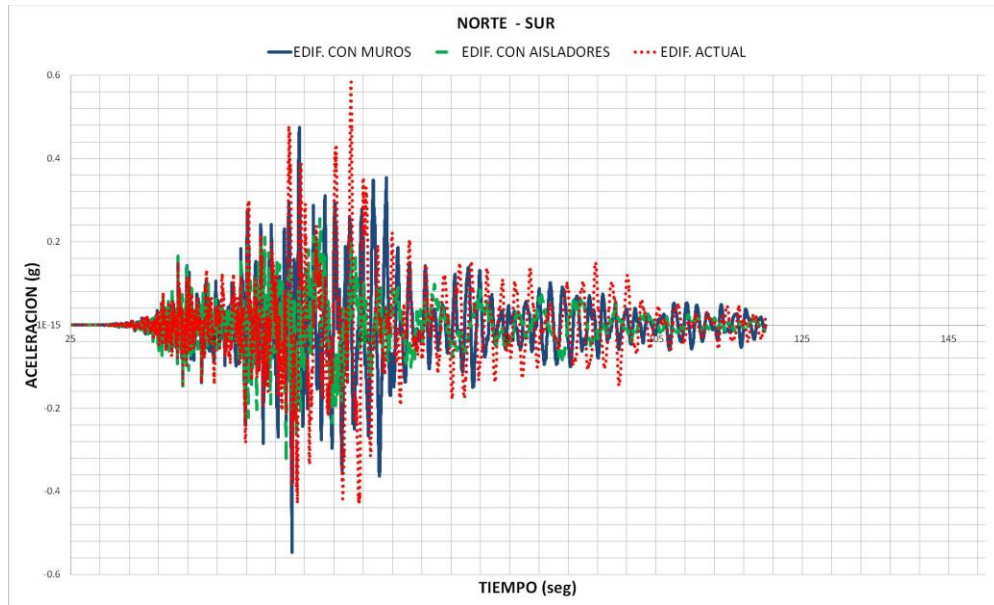


Figura 13. Comparación de aceleraciones del edificio actual en la dirección este-oeste, con las propuestas de reforzamiento

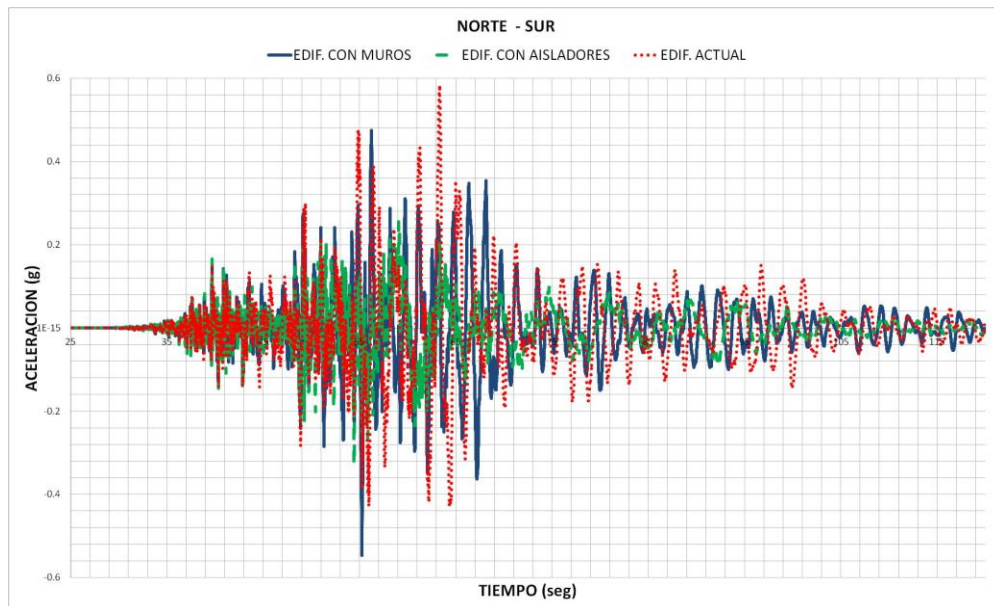


Figura 14. Comparación de aceleraciones del edificio actual en la dirección norte-sur, con las propuestas de reforzamiento

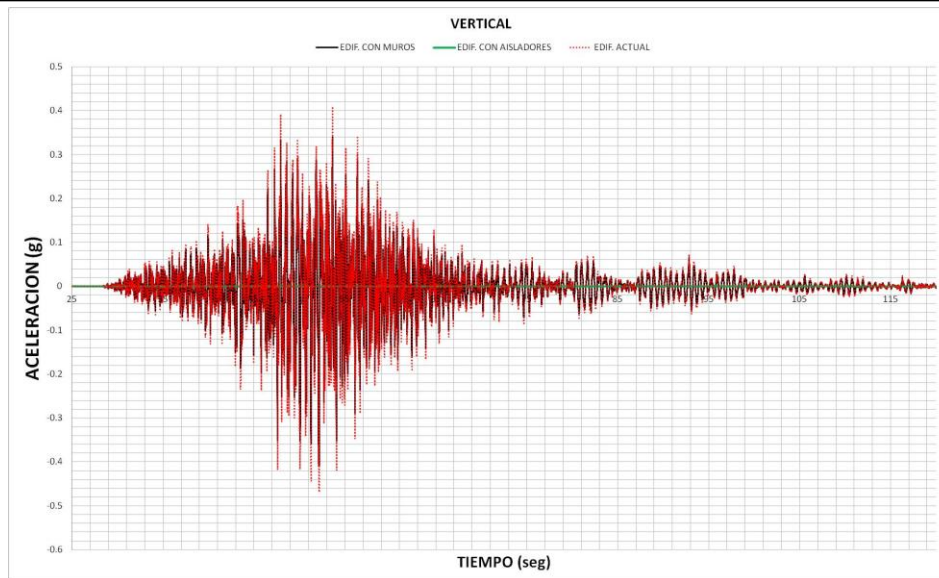


Figura 15. Comparación de aceleraciones del edificio actual en la dirección vertical, con las propuestas de reforzamiento

En el edificio reforzado con muros de cortante la aceleración máxima en el nodo de referencia en la cubierta aumento en un 18% en relación a la aceleración del edificio actual para la dirección este-oeste, bajo un 6% en la dirección norte-sur, y aumento un 46% en la dirección vertical. El desplazamiento en la dirección este-oeste se redujo en un 60%, y en la dirección norte-sur se redujo en un 45 %, mientras la deformación vertical se redujo en un 25%.

En el caso del edificio con aisladores sísmicos la aceleración máxima en el nodo de referencia en la cubierta se redujo en un 51% de la aceleración del edificio sin reforzar en la dirección este-oeste, un 44% en la dirección norte-sur, y un 99% en la dirección vertical. Sin embargo, los desplazamientos se incrementaron al doble en la dirección este-oeste, y norte-sur, pero quedaron igual en la dirección vertical.

CONCLUSIONES

Utilizando la información obtenida con el sismo ocurrido el 4 de abril del 2010 en el edificio del Ejecutivo del Estado de Baja California se realizó el modelado de la estructura, y los resultados se compararon a los registros obtenidos, lo que mostro una buena correlación en los resultados. Con esta información se validó el modelo, el cual puede utilizarse para la evaluación estructural del edificio a detalle, bajo los efectos del sismo ocurrido, así como bajo el efecto de sismos futuros y otros posibles escenarios de riesgo.

Habiendo validado el modelo, se hizo el ejercicio de revisar dos posibles opciones para mejoramiento del desempeño sísmico de la estructura, utilizando muros de cortante o aisladores sísmicos. Según los resultados obtenidos los aisladores sísmicos reducen eficazmente las aceleraciones de la estructura, sin embargo los desplazamientos de estructura se duplican, por el movimiento propio que permiten este tipo de dispositivos. Los muros de cortante reducen eficazmente los desplazamientos, pero en la dirección este-oeste se incrementan las aceleraciones de la estructura en un 18%, lo cual es consecuencia de la rigidización, por acercarse el periodo de la estructura al del suelo. Entonces, desde el punto de vista técnico sin considerar las posibles ventajas y desventajas de ambos sistemas, los aisladores sísmicos se consideran la mejor opción de reforzamiento en este caso.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al C.P. Carlos Flores Vazquez, al Ing. Guadalupe Martin Arellano, y al Ing. Jose Agustin Luis Lopez Medina de la Secretaria de Infraestructura y Desarrollo Urbano del Estado de Baja California por habernos proporcionado los registros sísmicos del 4 de abril, así como los planos estructurales del edificio del poder ejecutivo del estado de Baja California.

REFERENCIAS

Cruz-Castillo M. (2002), “Catalogo de las Fallas Regionales Activas en el Norte de Baja California, México”, GEOS, Unión Geofísica Mexicana AC. Abril, 2002. pp. 37-42.

DIS (2011), “Isolator Engineering Propierties”, Dynamic Isolation Systems, obtenido de www.dis-inc.com.

RLEEBEC (1992). Reglamento de la Ley de Edificaciones del estado de Baja California. Publicado en el periódico oficial el 30 de junio de 1992, Colegio de Ingenieros Civiles de Mexicali, A.C.

SAP2000 (2011). “Structural Analysis Program”, Computers and Structures Inc., Berkeley California.