

ASPECTS TO CONSIDER IN THE DESIGN OF SEISMIC ISOLATED STRUCTURES IN FIRM AND SOFT SOILS

Arturo Tena Colunga ⁽¹⁾

⁽¹⁾Profesor, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Edificio P4, 3er Piso, Av. San Pablo # 180, 02200 Ciudad de México.
Correo electrónico: atc@correo.azc.uam.mx.

Received: February 2020. Accepted: April 2020
Published: July 1, 2020

ABSTRACT

The main objective of seismic isolation is to uncouple the dynamic response of the structure from the ground motions by using special devices, commonly known as base isolators. Base isolators are commonly used between the foundation and the superstructure for buildings and between piles and the superstructure in the case of bridges. During an earthquake, the superstructure above the isolation system should move almost like a perfect rigid body following the movement of the isolation system which should accommodate the ground displacements. Seismic isolation is very attractive to use in firm soils and rock as several advantages are obtained and a 100% resilient seismic design could be achieved, but there are also fine aspects to consider, particularly in projects near active faults. In contrast, the application of base isolation in soft soils does not offer great advantages and it is required to conduct detailed studies for the specific site and soil-structure interaction should be considered, as otherwise its application can be very dangerous. Therefore, some important aspects to consider for the potential application of base isolation in soft soils are discussed, as there are great risk and important challenges to overcome in order to warrant a responsible, ethical and resilient earthquake-resistant design.

Keywords: firm soils, soft soils, dynamic uncoupling, near-fault effects, soil-structure interaction, rocking, tilting, dynamic instability

ASPECTOS A CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS CON AISLAMIENTO SÍSMICO EN SUELOS FIRMES Y BLANDOS

RESUMEN

El objetivo fundamental del aislamiento sísmico es desacoplar la respuesta dinámica de la estructura de los movimientos del terreno mediante la introducción de dispositivos especiales, conocidos como aisladores, que se ubican generalmente entre la cimentación y la superestructura en el caso de edificios y de la calzada y las pilas en el caso de puentes, de manera que durante un sismo, la

superestructura montada sobre los aisladores se comporte esencialmente como un cuerpo rígido y siga su movimiento, mientras los aisladores absorben los desplazamientos que les demanda el movimiento del terreno de desplante. El aislamiento sísmico ofrece grandes ventajas en el diseño sismorresistente de estructuras desplantadas en terreno firme y roca, donde generalmente se pueden obtener diseños 100% resilientes, pero se deben tomar en cuenta aspectos finos cuando los proyectos se encuentran cercanos a fallas activas. En contraste, la aplicación del aislamiento sísmico en terrenos blandos no ofrece grandes ventajas y puede ser contraproducente si se hace sin estudios detallados del sitio, y si además no se considera la interacción suelo-estructura. Por ello, se presentan sucintamente aspectos a considerar para su aplicación en suelos blandos, donde existen enormes riesgos y retos para garantizar un diseño sismorresistente responsable, ético y resiliente.

Palabras clave: suelos firmes, suelos blandos, desacoplamiento dinámico, efectos de fuente cercana, interacción suelo-estructura, cabeceo, desplomo, inestabilidad dinámica

1 INTRODUCCIÓN

El objetivo fundamental del aislamiento sísmico es desacoplar los movimientos del terreno de la estructura mediante la introducción de dispositivos especiales generalmente ubicados entre la cimentación y la superestructura, nombrados comúnmente como aisladores, de manera que durante un sismo la estructura montada sobre los aisladores se comporte esencialmente como un cuerpo rígido y siga el movimiento del sistema de aislamiento. A diferencia de una estructura convencional, la cual sobrevive la acción de los sismos en función de su deformación lateral, y por lo cual es propensa a experimentar daño en sus elementos estructurales y no estructurales (Figura 1a), una estructura aislada sísmicamente permanece esencialmente sin deformarse, desplazándose casi como un cuerpo rígido perfecto montado sobre el sistema de aislamiento (Figura 1b), por lo que sus elementos estructurales y no estructurales sobrevivirán el sismo sin daño alguno.

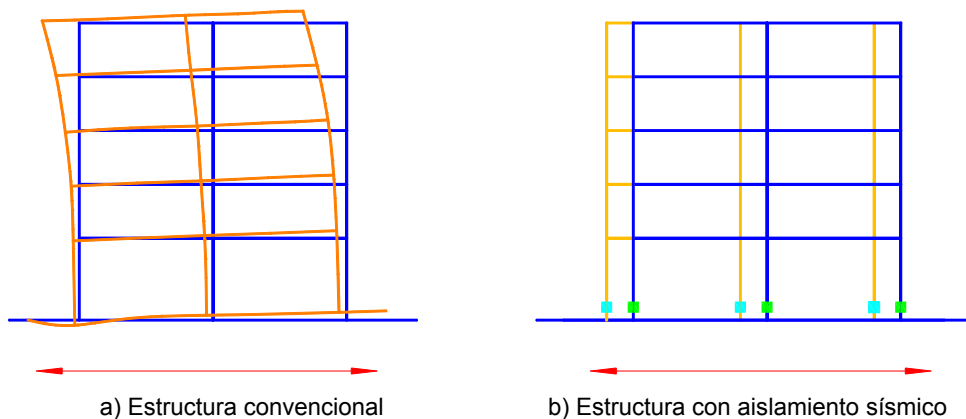


Figura 1 Comparación conceptual de la respuesta ante sismos de una estructura convencional y una estructura con aislamiento sísmico

Cabe señalar que el desacoplamiento perfecto entre los movimientos del terreno y la estructura aislada sísmicamente es utópico y prácticamente imposible hoy en día. Sin embargo, el diseño de cualquier sistema de aislamiento tiene como principio fundamental concentrar en él los desplazamientos impuestos por los movimientos del terreno durante un sismo, filtrando de manera considerable el movimiento que se transmite a la estructura por encima del plano de aislamiento, de manera que ésta se mueva principalmente como un cuerpo rígido.

2 AISLAMIENTO SÍSMICO EN TERRENOS FIRMES O ROCA

Es un hecho ampliamente reconocido en la literatura que el aislamiento sísmico ofrece grandes ventajas en roca y después en terrenos muy firmes, dado que se tienen periodos dominantes del terreno donde las máximas ordenadas de aceleración se presentan en un intervalo de periodos cortos y éstas disminuyen notablemente a medida que se incrementa el periodo, como se ilustra en la Figura 2a. En contraste, los desplazamientos esencialmente aumentan a medida que el periodo aumenta; sin embargo, convergen asintóticamente hacia el desplazamiento máximo del terreno para periodos muy largos (Figura 2b).

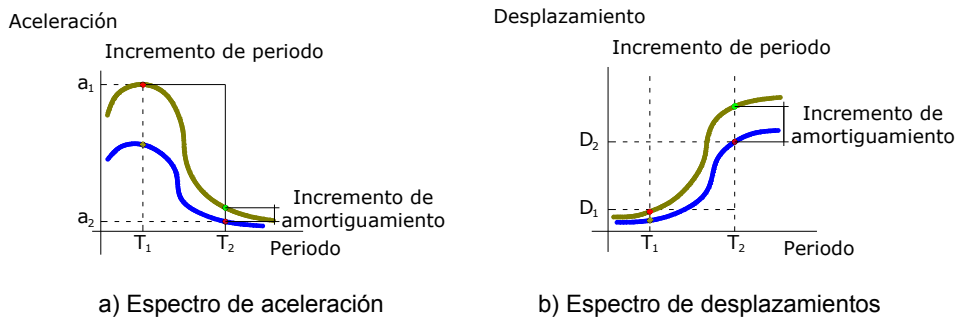


Figura 2 Esquematación de espectros típicos de suelo firme o roca y su relación con el aislamiento sísmico

Los sistemas de aislamiento sísmico proporcionan una flexibilidad lateral adicional al sistema que, en esencia, alarga su periodo fundamental, por lo que a una estructura con periodo natural de vibración relativamente corto desplantada en terreno firme, con periodo fundamental en base rígida T_1 , se le puede trasladar a desarrollar un periodo fundamental efectivo de estructura aislada sísmicamente, T_2 . Por lo tanto, desde el punto de vista del diseño de la estructura por encima del sistema de aislamiento, esto es ventajoso, dado que, como se observa en la Figura 2a, al incrementar el periodo efectivo de la estructura sísmicamente aislada, se le lleva a una zona del espectro donde las aceleraciones son menores, por lo que las fuerzas de inercia que actúan en la estructura por encima del sistema de aislamiento se reducen notablemente y, por ello, el impacto de las cargas por sismo es mucho menor. Si el sistema de aislamiento además proporciona amortiguamiento adicional, entonces las ordenadas espectrales se reducen más, por lo cual las aceleraciones horizontales en la estructura son aún menores. Para que lo anterior sea posible, se requiere que el sistema de aislamiento sea capaz de acomodar de manera estable desplazamientos notablemente mayores asociados al incremento del periodo (Figura 2b), los cuales se pueden reducir en

caso que el sistema de aislamiento sea capaz de proporcionar amortiguamiento adicional.

La aplicación del aislamiento sísmico en roca y terrenos firmes resulta más económica para la mayoría de los sistemas de aislamiento disponibles hoy en día en el mercado en un intervalo de periodos entre 1.5 segundos y tres segundos ($1.5s \leq T_{as} \leq 3s$), y es por ello que los principales reglamentos del mundo que disponen de lineamientos de diseño para el aislamiento sísmico establecen el periodo $T_{as}=3s$ como el límite superior para emplear los métodos de diseño estático y el modal espectral (UBC-97 1997, FEMA-368 2001, NCh2745 2003, ASCE-7 2010), y eso incluye al capítulo desarrollado por un servidor para el Manual de Obras Civiles de CFE (Tena-Colunga 2013, Tena 2016).

Para ilustrar más claramente las ventajas que el aislamiento sísmico ofrece en los terrenos firmes y roca de las zonas sísmicas de México, en las Figuras 3 y 4 se presentan algunos de los registros de aceleración más importantes en roca y suelos firmes capturados en territorio mexicano antes de los sismos de 2017, mostrando sus respectivos espectros de pseudoaceleración (S_a) y de desplazamiento (D) para niveles de amortiguamiento viscoso equivalente (ζ) de 5, 10 y 15 por ciento, y marcando con líneas verticales discontinuas el intervalo de periodos $1.5s \leq T_{as} \leq 3s$, que es el comúnmente más empleado para aislar estructuras de manera económica. Como se aprecia, cualquier estructura razonablemente rígida, cuyo periodo en base rígida sea $T_E \leq 0.6s$, se verá notablemente beneficiada en el diseño de su superestructura al alargar su periodo al intervalo indicado, ya que las pseudoaceleraciones se reducen notablemente (y, por ende, las fuerzas de inercia). Si además, y como se discute más adelante, se logra un desacoplamiento importante (en función del cociente T_{as}/T_E), se puede garantizar un diseño resiliente.

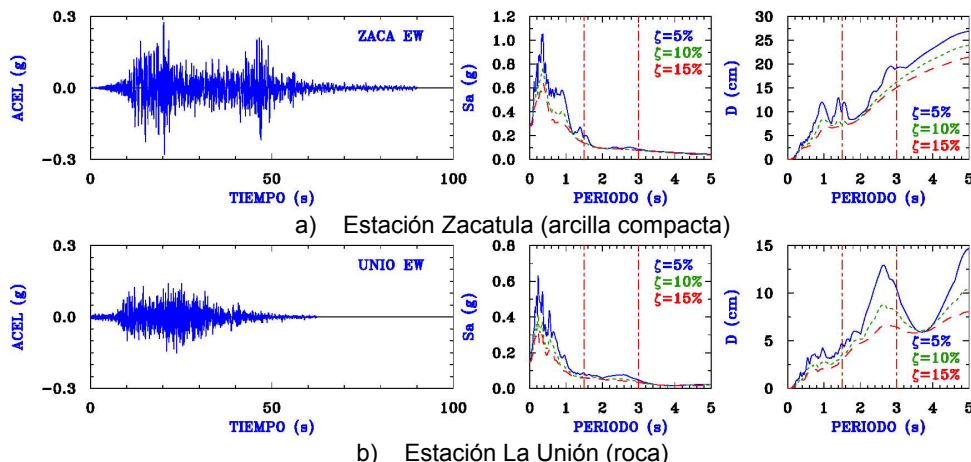


Figura 3 Registros de aceleración en suelos firmes y roca capturados en el estado de Guerrero durante el sismo del 19 de septiembre de 1985 ($M_s=8.1$)

Sin embargo, no es suficiente garantía el disponer de terrenos firmes y roca para aplicar con éxito el aislamiento sísmico, sino que es muy importante saber dónde están ubicados estos sitios (qué tan distantes están) con respecto a las potenciales fallas activas que puedan generar un sismo importante, de

magnitudes superiores a 6.0. Esto se ilustra con el registro de aceleración de la estación San Marcos durante el sismo del 25 de abril de 1989 ($M_s=6.9$), el que se muestra en la Figura 5. Aunque es un sitio de roca, la estación está ubicada a una distancia muy cercana al epicentro de ese sismo, por lo que se conoce como un registro de fuente cercana o “epicentral”. Como es característico en los registros de fuente cercana, se aprecia en el acelerograma un pulso de velocidad importante alrededor de los ocho segundos de iniciado el movimiento, el cual es el responsable de que se disponga de una energía importante para periodos intermedios, incluyendo aceleraciones espectrales no despreciables en el intervalo $1.5s \leq T_{as} \leq 3s$. Si esto no fuera suficientemente malo para fines de aislamiento sísmico, también se observa que en ese mismo intervalo de periodos se obtienen desplazamientos comparables o aún mayores que los calculados para estaciones en roca para sismos de considerable mayor magnitud (comparar con La Unión, Figura 3b) y mayores aceleraciones del terreno, espectrales y duraciones del movimiento. Además, cercano a la fuente o epicentro es donde se presentan las mayores demandas de aceleraciones verticales, que también deben tomarse en cuenta en el diseño de cualquier estructura.

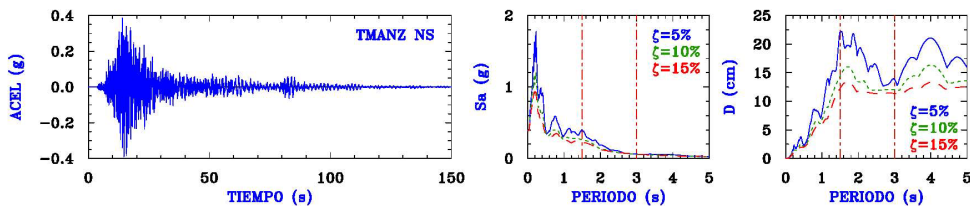


Figura 4 Registro de aceleración capturado en la Termoeléctrica de Manzanillo (terreno firme) durante el sismo del 9 de octubre de 1995 ($M_w=8.0$)

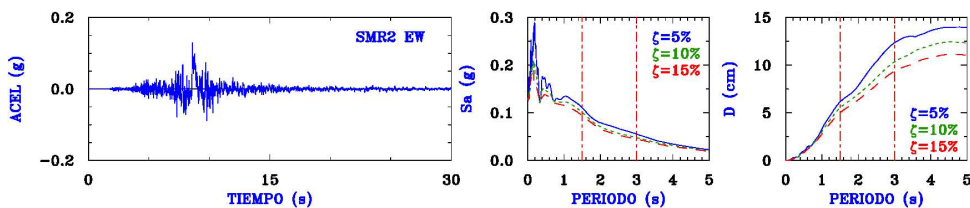


Figura 5 Registro de aceleración capturado en la estación San Marcos (roca), Guerrero durante el sismo del 25 de abril de 1989 ($M_s=6.9$)

Por ello, para aplicar aislamiento sísmico es muy importante tomar en cuenta los efectos de fuente cercana (por ejemplo, Tena-Colunga y Gómez-Soberón 2002, Tena-Colunga y Zambrana-Rojas 2006, Tena-Colunga y Escamilla Cruz 2007, Özdemir *et al.* 2011, Özdemir y Akyuz 2012, Panchal y Jangid 2012, Pant y Wijeyewickrema 2014, Fallahian *et al.* 2015, Alhan *et al.* 2016, Alhan y Öncü-Davas 2016, Tajammolian *et al.* 2016a/b, Bhagat y Wijeyewickrema 2017, Mazza 2017 y 2018, Mehr *et al.* 2017, Tajammolian y Khoshnoudian 2018, Gazi y Alhan 2019, Wang *et al.* 2019, Zheng *et al.* 2019), los cuales se atenúan con la distancia con respecto a los planos de las fallas activas de interés. De manera práctica y razonable, los efectos de fuente cercana se pueden despreciar cuando el sitio de interés está ubicado a más de 50 km de la falla activa más cercana con potencial de generar sismos de $M_s \geq 6.0$. Sin embargo, para distancias menores, se debe tomar en cuenta los efectos de fuente cercana en el diseño preliminar y confirmarlo rigurosamente con análisis dinámicos paso a paso no lineales ante

registros de aceleración típicos de fuente cercana (tres componentes, dos horizontales y la vertical), ya sean registrados o simulados.

Con los registros de aceleración de sismos fuertes disponibles antes de 2017, se apreciaba que las aceleraciones máximas en terreno firme o roca asociadas a sismos de subducción de la costa mexicana del Pacífico con magnitudes de 8.0 o ligeramente mayores estaban alrededor de 0.4g (Figura 4), con pseudoaceleraciones máximas $S_a \approx 1.8g$ (Figura 4) y desplazamientos máximos del terreno ligeramente menores a 30 cm (Figuras 3a y 4).

Dado que el sismo de Tehuantepec del pasado 7 de septiembre de 2017 tuvo una magnitud $M_w=8.2$ y es el más intenso donde se hayan obtenido registros de aceleración, vale la pena revisar estos parámetros en terrenos firmes y roca, principalmente los desplazamientos, que son los que rigen el diseño de los sistemas de aislamiento sísmico. Así, en la Figura 6 se presentan los principales registros de terreno firme y roca registrados en el estado de Oaxaca durante el sismo del 7 de septiembre de 2017, con sus respectivos espectros de respuesta de pseudoaceleración y de desplazamiento.

De todos estos registros, los más intensos son sin lugar a dudas los de Nilitpec (Figuras 6a y 6b), en el corazón del Istmo de Tehuantepec, donde la aceleración máxima del terreno del registro filtrado y corregido por línea base fue $a_{max}=0.506g$, y la pseudoaceleración máxima fue $S_a=2.47g$ en el rumbo N90E (Figura 6b). A pesar de ello, los desplazamientos máximos espectrales fueron inferiores a 25 cm (Figuras 3a y 3b). Los registros más intensos en la costa corresponden a Salina Cruz (Figura 6c) y San Pedro Huamemula (Figura 6d), ubicado a 50 km de Salina Cruz rumbo a Huatulco, donde los desplazamientos espectrales fueron inferiores a 20 cm, a pesar que las aceleraciones espectrales máximas fueron altas. Finalmente, en la ciudad de Oaxaca, el registro más intenso en suelo firme corresponde a la Ciudad Universitaria de la Universidad Autónoma Benito Juárez (Figura 6e), donde los desplazamientos espectrales máximos son menores a 8 cm. Así, aunque se puede concluir que en los registros de terreno firme y roca del sismo de Tehuantepec ($M_w=8.2$) se observaron aceleraciones máximas del terreno y pseudoaceleraciones espectrales máximas notablemente mayores a las registradas para el sismo del 19 de septiembre de 1985 ($M_s=8.1$, Figura 3) y del 9 de octubre de 1995 ($M_w=8.0$, Figura 4), las buenas noticias, sobre todo desde el punto de aislamiento sísmico, es que los desplazamientos espectrales máximos no rebasaron los ya considerados en el Manual de Diseño de Obras Civiles de CFE (MOC-2008, 2009, MOC-2015 2015), que son los que se han tomado en cuenta para la norma de aislamiento sísmico de ese mismo manual desarrollada por un servidor (Tena 2016).

Esta revisión no estaría completa si no se incluyeran a los movimientos más importantes registrados en roca durante el sismo de falla normal de Puebla-Morelos del 19 de septiembre de 2017 ($M_w=7.1$), que se muestran en la Figura 7. Se aprecia que a pesar de haberse experimentado aceleraciones máximas del terreno cercanas a 0.28g (Figura 7a), con pseudoaceleraciones espectrales máximas cercanas a 1g, los desplazamientos espectrales máximos no superaron los 15 cm (Figura 7a).

Finalmente, en la Figura 8 se compara el espectro elástico de diseño para desplazamientos del Manual de Obras Civiles de CFE (MOC-2008, 2009, MOC-2015 2015) para un sitio típico de roca (Factor de sitio, $F_s=1.0$), correspondiente a lo que se denominaba como la zona D-I en versiones anterior del MOC (por ejemplo, la versión de 1993), con los espectros de respuesta de desplazamientos elásticos correspondientes a los registros de aceleración más demandantes de los sismos de gran magnitud en discusión: a) el registro ZACA EW del sismo del 19 de septiembre de 1985 ($M_w=8.1$), b) el registro TMANZ NS del sismo del 9 de octubre de 1995 ($M_w=8.0$), c) los registros NILT EW y NILT NS del sismo del 7 de septiembre de 2017 ($M_w=8.2$) y, d) el registro PB02 del sismo del 19 de septiembre de 2017 ($M_w=7.1$).

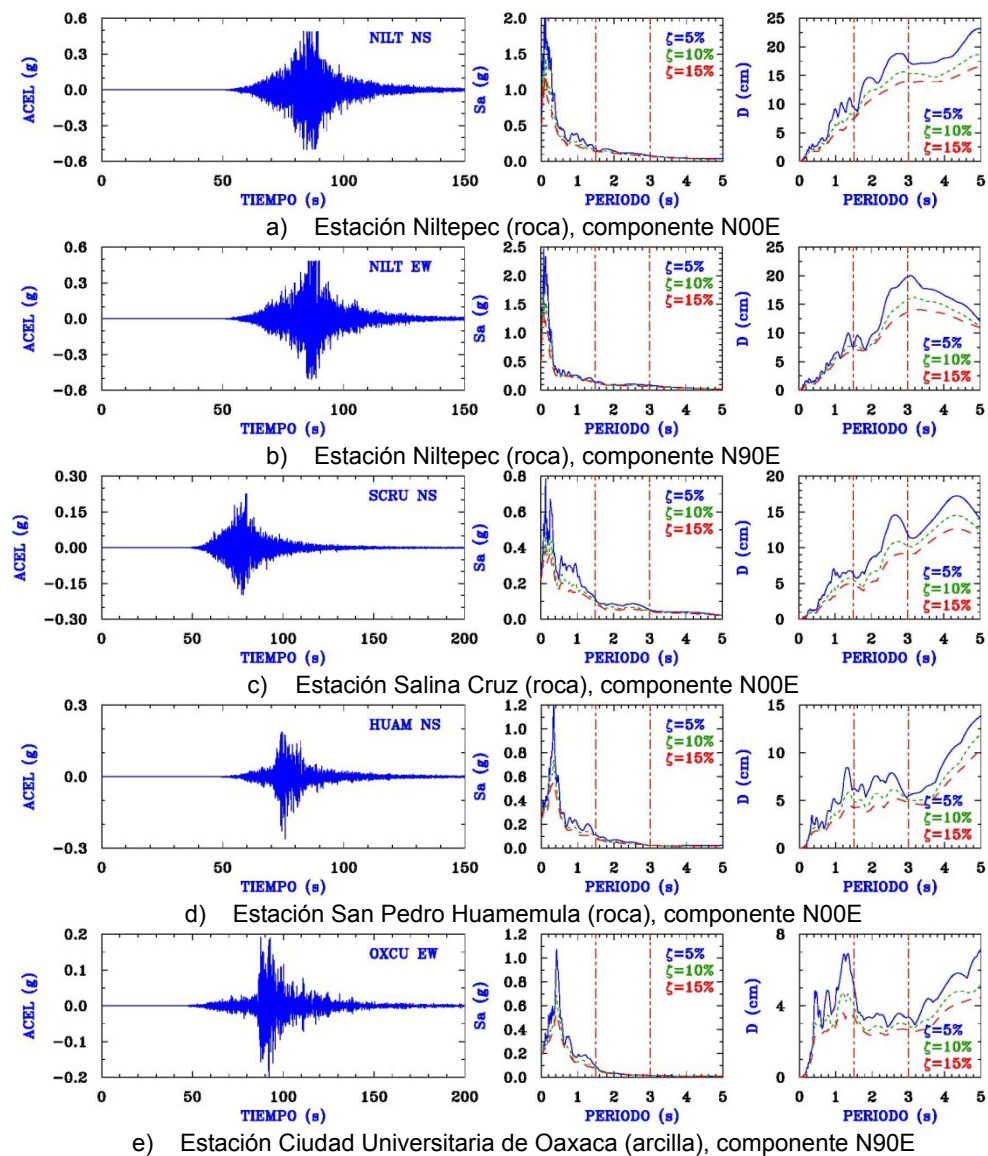


Figura 6 Registros de aceleración capturados en roca y terrenos firmes de poblaciones del estado de Oaxaca durante el sismo de Tehuantepec del 7 de septiembre de 2017

($M_w=8.2$). Todas las estaciones son operadas por el Instituto de Ingeniería de la UNAM

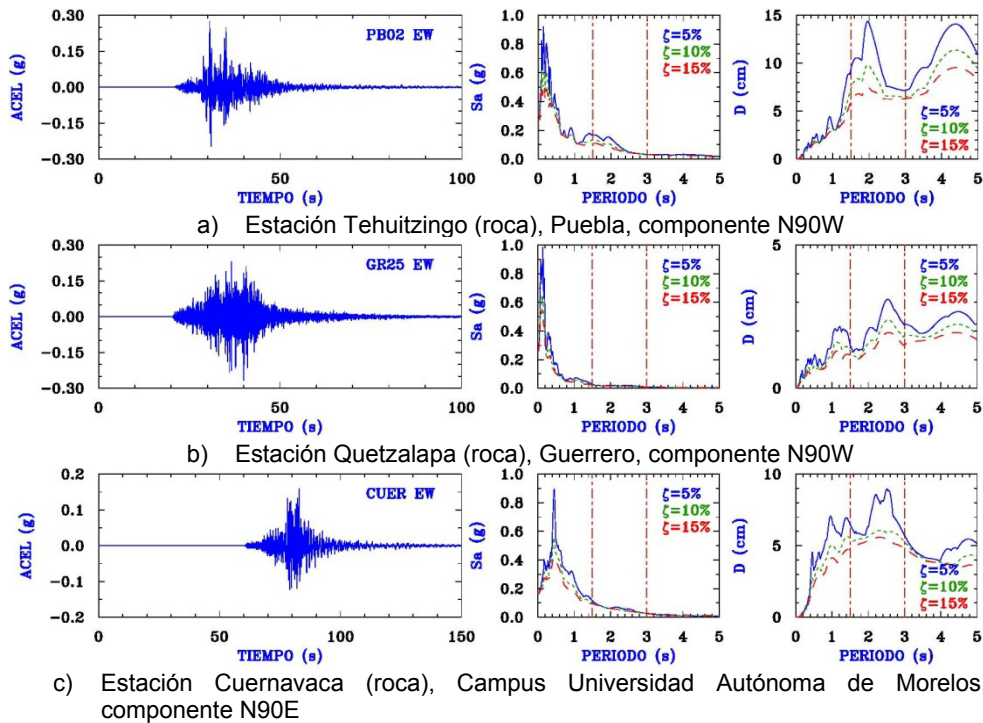


Figura 7 Registros de aceleración capturados en roca de poblaciones de los estados de Puebla, Morelos y Guerrero durante el sismo de Puebla-Morelos del 19 de septiembre de 2017 ($M_w=7.1$). Las estaciones mostradas son operadas por el CIRES y el Cenapred

Como se aprecia, con el espectro de diseño elástico por desplazamientos del Manual de Obras Civiles de CFE se cubre muy razonablemente las demandas máximas de desplazamiento de los sismos de subducción y de falla normal en discusión en el intervalo de periodos de mayor aplicación del aislamiento sísmico ($1.5s \leq T_{as} \leq 3s$), y lo sigue cubriendo para periodos mayores.

Se puede concluir entonces que, para movimientos típicos de roca o terrenos muy firmes, que se ubiquen razonablemente alejados (50 km o más) de fallas activas con potencial de generar un sismo importante ($M_s \geq 6.0$), y donde se garantice que el sistema de aislamiento se dispone sobre un plano perfectamente horizontal, que el aislamiento sísmico ofrece enormes ventajas, pues en el intervalo de periodos de mayor aplicación ($1.5s \leq T_{as} \leq 3s$), se reducen notablemente las demandas de aceleración en la superestructura (a partir de las ordenadas del espectro de pseudoaceleraciones, S_a), siempre y cuando el sistema pueda acomodar de forma estable y segura los desplazamientos demandados. En caso de que el sitio de interés esté cercano a una falla activa con potencial destructivo, se deben tomar en cuenta los efectos de fuente cercana en el diseño preliminar, y confirmarlo rigurosamente mediante análisis dinámicos paso a paso no lineales ante registros de aceleración típicos de fuente cercana (las tres componentes), ya sean registrados o simulados.

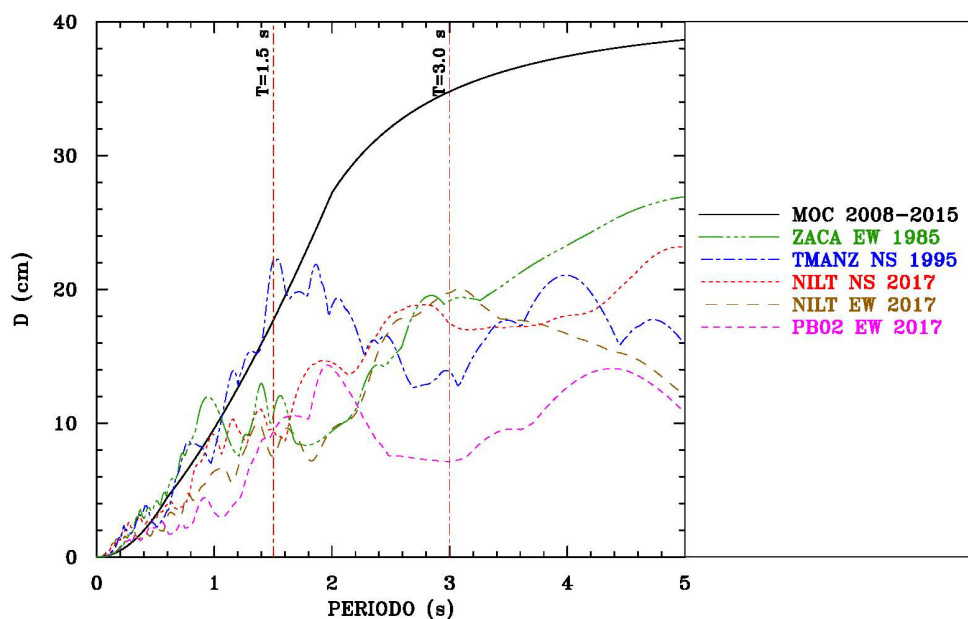


Figura 8 Comparación del espectro de diseño elástico por desplazamientos del Manual de Obras Civiles de CFE para un sitio en roca ($F_s=1.0$, $T_s=0.5s$) correspondiente con la zona D-I y para $\zeta=5\%$, con los espectros elásticos de desplazamientos para los registros de aceleración más demandantes en desplazamientos capturados en terreno firme y roca de cuatro de los sismos más intensos experimentados en México desde 1985

2.1 Efectos de sitio

En ocasiones, en algunos sitios se dispone de suelos que, aunque aparentemente son relativamente firmes, realmente se trata de: a) depósitos sedimentarios, b) arenas relativamente sueltas, c) disponen de algunos estratos con suelos blandos en su estratigrafía y, d) son esencialmente suelos de relleno. En ocasiones, estos sitios se encuentran cercanos a playas, a márgenes de ríos, lagos, lagunas, etc., y por ello no componen suelos totalmente firmes. En el peor de los casos, los ingenieros civiles se han visto demasiado “inteligentes”, y entonces se trata de suelos muy blandos que antes formaban parte de los cauces de ríos, o pertenecían a lagos, lagunas, estuarios, manglares, o han sido “ganados” al mar. Todas estas condiciones en los suelos, frecuentemente referidos en la literatura como “efectos de sitio”, amplifican notablemente las demandas de aceleración y de desplazamientos, sobre todo en el intervalo de periodos de mayor aplicación en los sistemas de aislamiento y, por ello, se deben tomar muy en cuenta.

En el caso particular de la Ciudad de México, se disponen de suelos muy blandos por las monumentales obras civiles aplicadas desde la época colonial (a partir de 1607 aproximadamente), cuando se inició el proceso de drenar y secar

una cuenca cerrada que contenía a cinco grandes lagos, para resolver un problema de inundaciones sobre el islote conquistado y de paso, aprovechar para ganar esos terrenos para la construcción urbana. Esta decisión, que resultó 100% ecocida ante los parámetros de evaluación social actuales, merece tratarse aparte secciones más adelante, pues son muchas las problemáticas a resolver si se pretende aplicar de manera ética, responsable y segura el aislamiento sísmico.

En esta sección sólo mostraremos cómo en suelos relativamente firmes, los efectos de sitio afectan notablemente las demandas máximas de aceleración y desplazamiento. En la Figura 9 se presenta el registro de aceleración de la estación San Alejandro, en Puebla. De acuerdo con la información disponible, la estación se encuentra sobre depósitos lacustres. Se aprecia a partir del espectro de su pseudoaceleraciones para la componente N00E (NS) que, a pesar de disponer de depósitos blandos, su respuesta es dominada por condiciones relativamente firmes, dado que su máxima aceleración espectral se obtiene para un periodo $T=0.56s$. Esto se confirma por medio de un espectro de amplitud de Fourier (no mostrado), donde se obtuvo que el periodo del sitio aparente, a partir de este registro, es $T_s=0.525s$. No obstante, se aprecia también del espectro de pseudoaceleraciones que el movimiento tiene energía no despreciable en un intervalo de periodos intermedios comprendido entre 1.4s y 2.6s, lo que se confirma en el espectro de desplazamientos, donde se aprecia claramente que es en este intervalo donde se presentan las mayores demandas de desplazamiento, llegando a ser el máximo aproximadamente de 30 cm, mayores a los que se obtienen para roca (Figura 8).

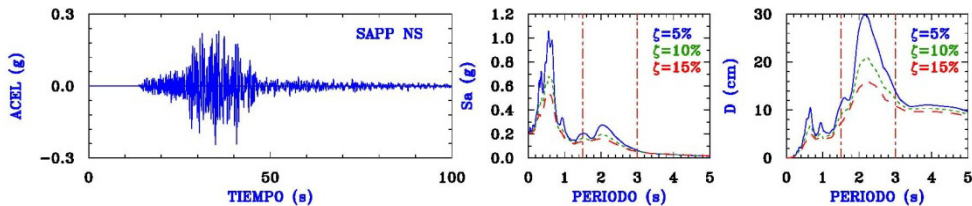


Figura 9 Registro de aceleración capturados en depósitos lacustres en la ciudad de Puebla (estación San Alejandro) durante el sismo de Puebla-Morelos del 19 de septiembre de 2017 ($M_w=7.1$). La estación es operada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM

A pesar de ello, se aprecia de los espectros de pseudoaceleraciones y de desplazamiento que sería factible emplear de manera eficaz el aislamiento sísmico, si: a) muy importante, se garantiza, mediante un estudio de geotecnia riguroso, que en dicho suelo no se desarrollan hundimientos diferenciales de importancia a través del tiempo, de manera que se garantice que el plano perfectamente horizontal que requiere el sistema de aislamiento a través del tiempo se mantenga, b) también se garantiza que, durante un sismo intenso, el suelo no es candidato a desarrollar hundimientos súbitos o tiene potencial de licuación importante y, c) el periodo de aislamiento objetivo es mayor a 3s, para asegurar que tanto el desplazamiento que debe acomodar el sistema de aislamiento, como las aceleraciones máximas que se desarrollen en la superestructura sean razonables y así, el aislamiento sísmico sea eficaz. Es por ello muy importante que, antes de aplicar y proyectar un sistema de aislamiento sísmico, se realice un estudio de geotecnia para saber si el suelo de desplante de interés es roca, firme o tiene algunos depósitos que provoquen efectos de sitio.

También cabe señalar que en la definición de los espectros elásticos de diseño del Manual de Obras Civiles de CFE se pueden tomar adecuadamente los efectos de sitio de distintas maneras y, así poder obtener un espectro de diseño por desplazamientos elásticos confiables. Por ello, en la Figura 10 se presenta los espectros elásticos de diseño por desplazamientos para un sitio similar a San Alejandro ($T_s=0.5s$), considerando distintas rigideces en función del factor de sitio (MOC-2008 2009), siendo $F_s=1.0$ el que identifica a un suelo totalmente firme o rígido y $F_s=1.5$ a un terreno con varios depósitos blandos. Como es de esperarse, los espectros de desplazamiento de diseño aumentan a medida que aumenta el factor de sitio F_s y, comparando estos espectros de diseño de la Figura 10 con respecto al espectro de desplazamientos calculado a partir del registro del sitio San Alejandro, se aprecia que también sería razonablemente cubierto, aún cuando se calculara un $F_s=1.1$.

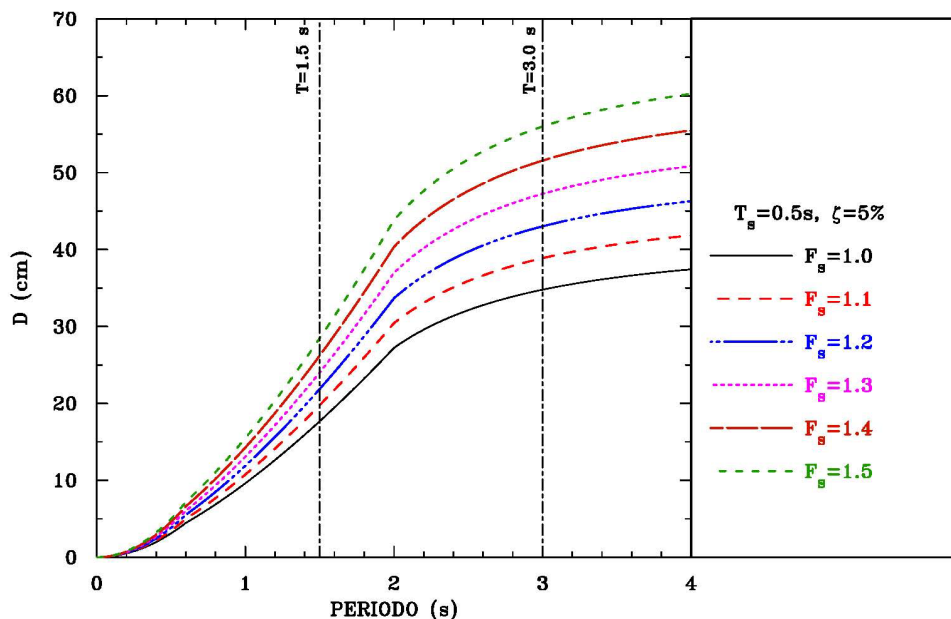


Figura 10 Comparación de espectros de diseño elásticos por desplazamientos del Manual de Obras Civiles de CFE para un sitio de periodo corto ($T_s=0.5s$) y $\zeta=5\%$, considerando distintos factores de sitio, desde uno muy rígido ($F_s=1.0$) a uno con claros efectos de sitio ($F_s=1.5$)

3 AISLAMIENTO SÍSMICO EN SUELOS BLANDOS

Dadas las características dinámicas de los suelos blandos ante sismos intensos, particularmente los muy blandos como los de la denominada “zona del lago” de la Ciudad de México, donde los periodos dominantes del terreno varían entre uno y cinco segundos (Figura 11), resulta muy poco atractivo el uso de la mayoría de los sistemas de aislamiento de base comerciales de manera que sea segura, responsable y eficaz, e ingenierilmente se puede afirmar que resultaría muy poco inteligente y muy poco ético sin estudios detallados de por medio.

Para ilustrarlo de manera clara apoyándonos en los movimientos horizontales típicos de la zona del lago de la Ciudad de México, en la Figura 12 se presentan algunos registros representativos del sismo de subducción del 19 de septiembre de 1985, donde con líneas verticales se indica en sus espectros de pseudoaceleraciones y de desplazamiento el intervalo de periodos comúnmente de mayor aplicación del aislamiento sísmico ($1.5s \leq T_{as} \leq 3s$).

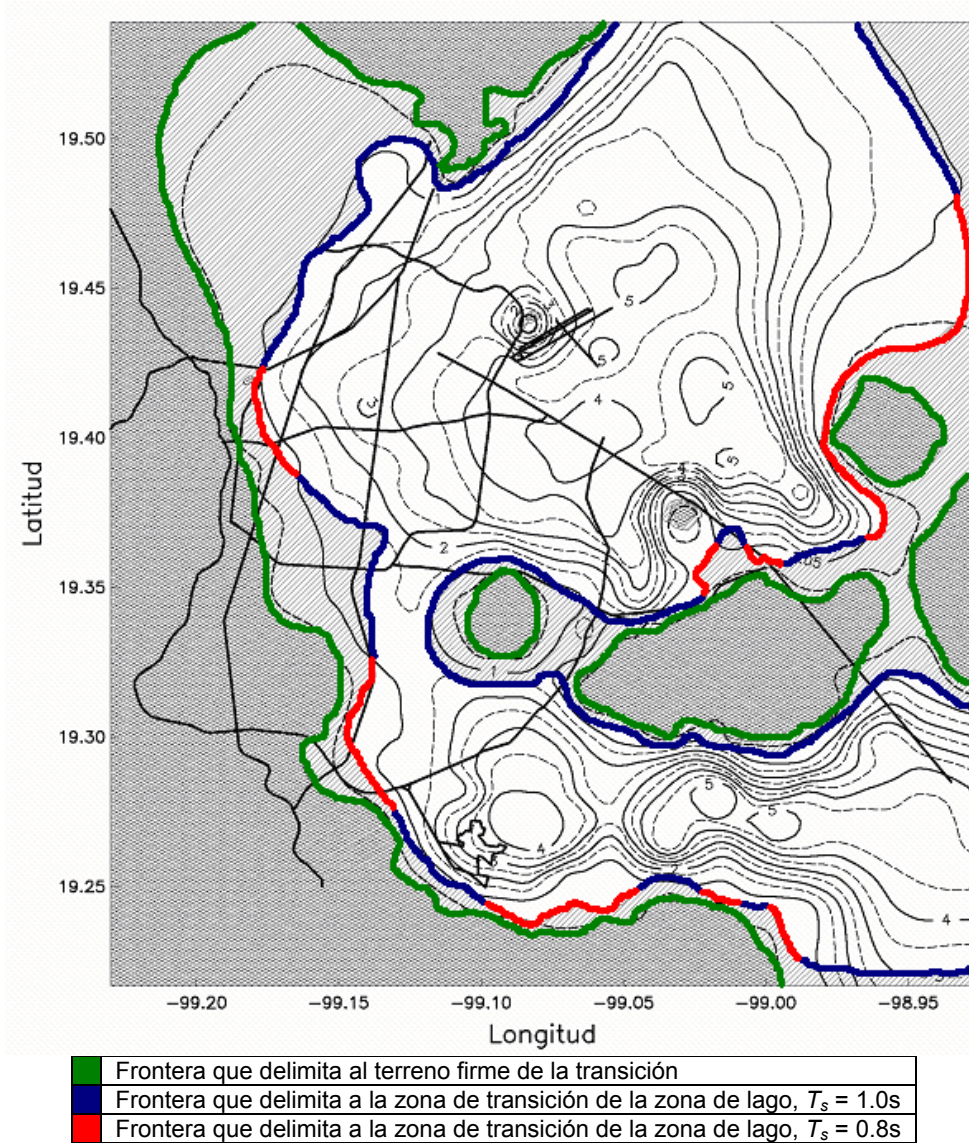


Figura 11 Mapas de isoperiodos en la zona de suelos blandos (zona de lago) y definición de fronteras de terreno firme y transición de la Ciudad de México y su zona metropolitana. Cortesía de Luis Eduardo Pérez Rocha y Eber Godínez (Godínez *et al.* 2005)

Se aprecia de todos los espectros de pseudoaceleración que trasladar a las estructuras al intervalo de periodos antes mencionado empleando aislamiento sísmico no ofrece ninguna ventaja y si constituiría un riesgo o mala decisión, pues se llevaría a la estructura aislada a responder en la franja resonante y la superestructura sería objeto de enormes demandas de aceleración, por lo que un daño severo ante la acción de un sismo estaría más que garantizado. Además, de los espectros de desplazamientos correspondientes se observa que, además, los sistemas de aislamiento deberían ser capaces de acomodar de manera estable y segura desplazamientos muy grandes, siendo los máximos del orden de 100 cm (Figura 12c) a 140 cm (Figura 12b), lo que además de ser enormemente difícil para muchos sistemas de aislamiento comerciales, no podría hacerse de manera económica para muchos sistemas. Atendiendo exclusivamente a los espectros de desplazamientos y aceleración, en algunos sitios de terrenos tan blandos, sólo sería factible a periodos muy largos (mayores a 5 segundos, Figuras 12a y 12c), pero no se podría utilizar cualquier sistema y la solución no sería barata. Existen algunos sitios, como Tláhuac, donde simplemente el aislamiento sísmico no parece ser solución, aún para periodos efectivos de aislamiento muy grandes (Figura 12b).

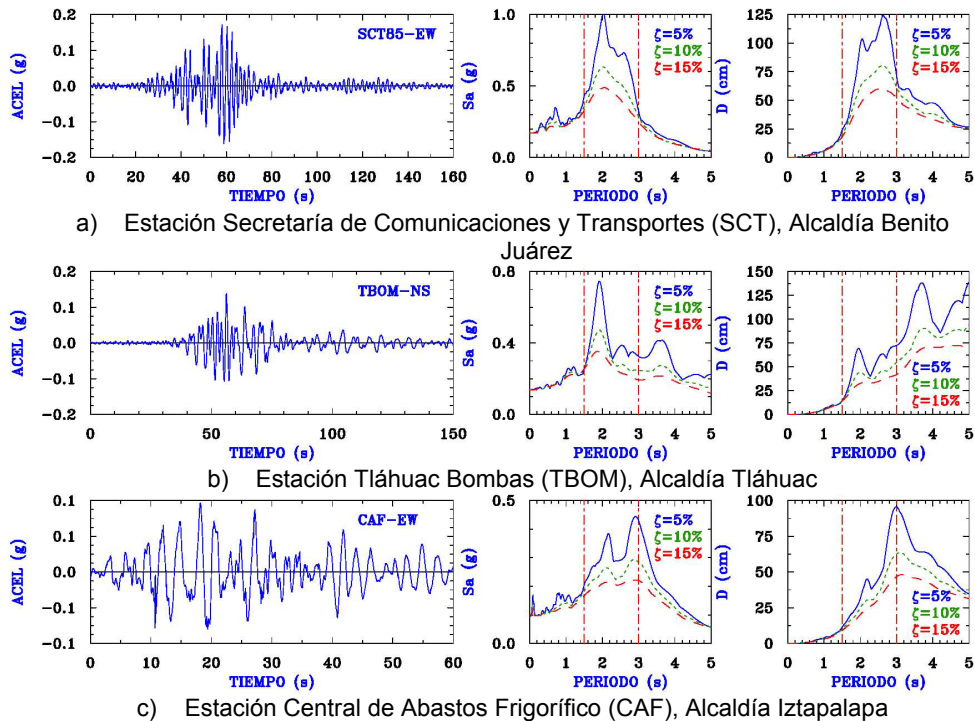


Figura 12 Registros de aceleración capturados en terrenos blandos de la denominada “zona del lago” de la Ciudad de México durante el sismo del 19 de septiembre de 1985 ($M_s=8.1$)

Si además se observan los mapas de demandas de desplazamientos en el Valle de México para estructuras con periodos fundamentales de vibrar $T_E=2s$ (Figura 13) definidos para un sismo de subducción de $M_s=8.1$ similar al escenario del sismo del 19 de septiembre de 1985 (Godínez 2005, Godínez *et al.* 2005), se aprecia que los desplazamientos esperados, sólo para este periodo estructural

dentro del valle y en la zona del lago, son muy grandes y serían difíciles de acomodar, salvo en la zona de terreno firme y algunos sitios de la zona de transición, donde podrían estar por debajo de 20 cm.

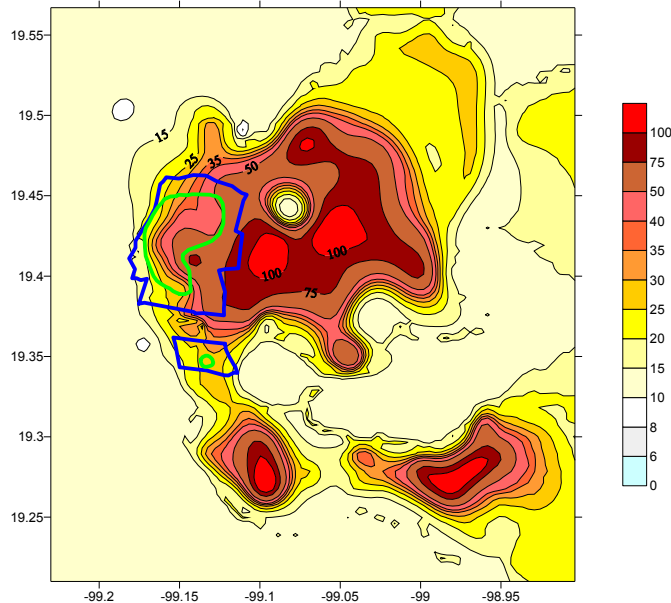


Figura 13 Mapa de isodemandas de desplazamiento (cm) en el Valle de México para estructuras con $T_E=2s$ sujetas a un sismo de subducción de $M_s=8.1$ similar al sismo del 19 de septiembre de 1985 (Godínez 2005, Godínez *et al.* 2005)

Con este valioso mapa (Figura 13) se soporta la observación ingenieril que emplear aislamiento sísmico en suelos muy blandos del Valle de México no es una buena idea o solución técnica, pero podría emplearse en sus suelos firmes y, en algunos casos, en suelos de transición, que es donde están las aplicaciones pioneras en la Ciudad de México (Sosa y Ruiz 1992, Tena-Colunga 2007).

De manera análoga a lo que se hizo para terreno firme, en la Figura 14 se presentan algunos registros representativos del sismo de falla normal del 19 de septiembre de 2017, donde con líneas verticales se indica en sus espectros de pseudoaceleraciones y de desplazamiento el intervalo de periodos comúnmente de mayor aplicación del aislamiento sísmico ($1.5s \leq T_{as} \leq 3s$). De la observación de los espectros de pseudoaceleración y de desplazamiento de todas estas figuras para distintas Alcaldías (ordenadas del norte hacia el sur de la ciudad), se concluye esencialmente lo mismo que para los registros asociados al gran sismo de subducción: el aislamiento sísmico no ofrece ventajas para el diseño de la estructura por encima del sistema de aislamiento y, además, las demandas de desplazamiento son muy grandes y, por ende, difícil de acomodar de manera estable, segura y razonablemente económica por la mayoría de los sistemas de aislamiento sísmico comerciales, por lo que conceptualmente no ofrece ningún tipo de ventajas su empleo en suelos muy blandos, como lo son la mayoría de los disponibles en la zona del lago de la Ciudad de México, con periodos dominantes de sitio entre 1.5s y 5s (Figura 11).

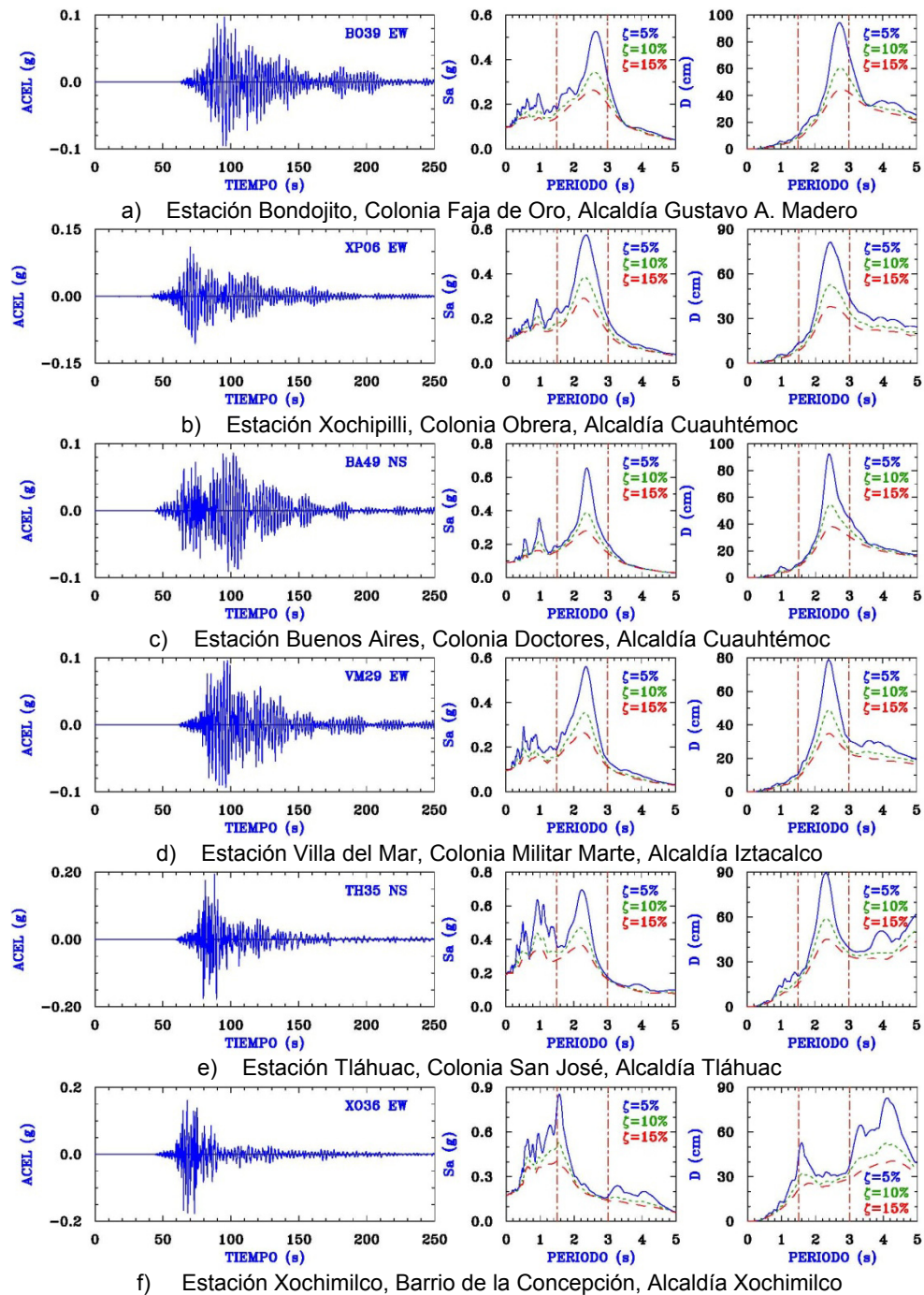


Figura 14 Registros de aceleración capturados en terrenos blandos de la denominada “zona del lago” de la Ciudad de México durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 ($M_w=7.1$). Las estaciones son operadas por el CIRES

Si todo lo explicado anteriormente no fuera suficientemente para entender lo complejo que es aterrizar con éxito un proyecto de aislamiento sísmico en los

suelos muy blandos y altamente deformables de la zona del lago de la Ciudad de México, cabe señalar, como se mencionó previamente, que para que el aislamiento sísmico funcione adecuadamente, se debe garantizar un plano perfectamente horizontal para el sistema de aislamiento a la hora que actúe el sismo.

Como debería ser bien sabido por todos los ingenieros familiares con los terrenos blandos de la Ciudad de México, debido a los hundimientos diferenciales fruto de la consolidación de los suelos y al fenómeno de subsidencia por extracción del agua de los mantos acuíferos, no se puede garantizar un plano perfectamente horizontal en una enorme región de la zona del lago si no se dispone de una cimentación perfectamente competente y muy profesionalmente diseñada, construida, supervisada y con mantenimiento adecuado, y en el caso de proyectos de aislamiento sísmico, sería altamente recomendable que ésta se apoyara sobre la capa dura o estrato resistente, y se tomaran las medidas pertinentes para minimizar cualquier problema relacionado con los hundimientos que experimenta esta vasta región de la ciudad por los asentamientos diferenciales regionales exacerbados por la extracción del agua del subsuelo.

Cuando no se puede garantizar un plano perfectamente horizontal y estable ante la acción de un sismo intenso, los efectos de interacción suelo-estructura y las enormes demandas de cabeceo de la cimentación pueden liderar a que ésta falle y, entre otras cosas, la estructura termine con enormes desplomes, como se ha observado y documentado ampliamente en la Ciudad de México para el sismo del 19 de septiembre de 1985, y se sigue presentando, como durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 (Figura 15).



Figura 15 Edificio ubicado en los suelos blandos consolidados de la colonia Roma Norte y que, entre otras cosas, experimentó un enorme desplome durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 ($M_w=7.1$). Además de los problemas del diseño de su cimentación, son evidentes los hundimientos diferenciales a través del tiempo, comparando su nivel con la casa ubicada a su derecha. Fotos tomadas por el autor

Si una estructura con aislamiento sísmico sufre un problema en la cimentación que la conduzca a cabeceos y desplomes de la magnitud mostrada en la Figura 15, irremediablemente el sistema de aislamiento perdería completamente su estabilidad y muy seguramente conduciría a la estructura por encima de él a su colapso, puesto que la estabilidad dinámica del sistema de aislamiento para tomar la carga vertical ante las demandas máximas de desplazamiento se vería muy seriamente comprometida.

Además, el sistema de aislamiento no debe ser afectado por hundimientos súbitos producidos por el sismo (o licuación, en el caso de suelos con arenas sueltas). Esto es algo que definitivamente no se puede garantizar en una vasta región de la Ciudad de México, incluyendo los suelos muy consolidados de la zona centro, por ejemplo, de las alcaldías Cuauhtémoc, Benito Juárez o Venustiano Carranza, o los suelos más vírgenes y menos consolidados, como por ejemplo, los de las alcaldías Iztapalapa, Xochimilco y Tláhuac, donde se presentan hundimientos diferenciales y grietas de enormes proporciones (Figura 16).



<https://news.culturacolectiva.com/mexico/el-hundimiento-del-suelo-es-un-riesgo-geologico-amenaza-mexico/>

<https://www.reporteindigo.com/wp-content/uploads/2017/09/z26.jpeg>

Figura 16 Grietas de tensión en el suelo ocasionados por enormes hundimientos diferenciales súbitos que se presentaron en la colonia del Mar, en la Alcaldía Tláhuac, durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 ($M_w=7.1$). Fotos tomadas de internet

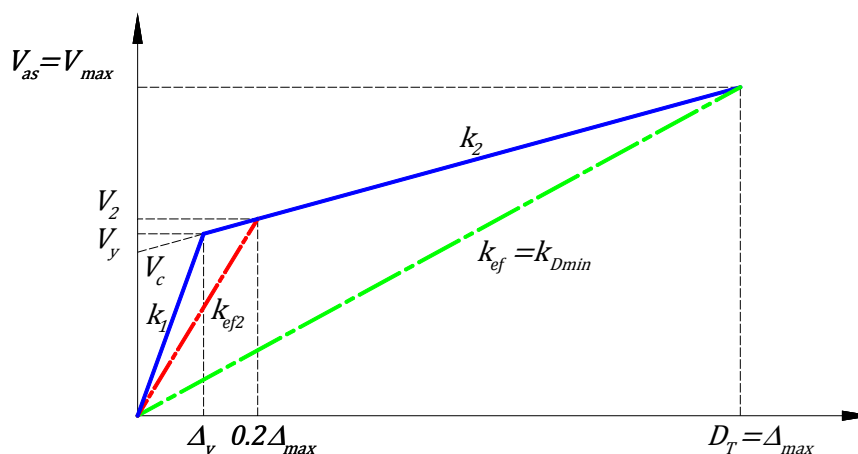


Figura 17 Curva primaria de un sistema de aislamiento con comportamiento bilineal que satisface las restricciones mecánicas impuestas por lineamientos de diseño nacionales e internacionales

Por todo lo expuesto anteriormente, la utilización de sistemas de aislamiento sísmico en estructuras localizadas en suelos blandos no es recomendable sin estudios muy detallados y rigurosos que justifiquen su aplicación. Esto es especialmente más importante en sistemas de aislamiento con franco comportamiento bilineal (Figura 17), como los elastómeros con corazón de plomo, donde la rigidez elástica inicial (k_1 , Figura 17) es muy distinta a la rigidez secante efectiva al desplazamiento de diseño (k_{ef} , Figura 17), que es el procedimiento equivalente más empleado y propuesto en reglamentaciones y recomendaciones de aislamiento sísmico a nivel mundial (por ejemplo, UBC-97 1997, ASCE-7 2010, Tena-Colunga 2013, Tena 2016). Esto se debe a la potencial respuesta resonante de la estructura aislada sísmicamente como consecuencia del alargamiento de su periodo fundamental de vibrar, como ya se ha demostrado analíticamente con estudios muy rigurosos hace ya más de 20 años (González y Noguez 1994, Tena-Colunga 1996).

3.1 Investigaciones previas sobre el uso de aislamiento sísmico en suelos blandos de Ciudad de México

En la Ciudad de México existen aplicaciones pioneras de aislamiento sísmico desde principios de los años setentas, de las cuales la más conocida es la Escuela Secundaria pública ubicada en la Calzada Legaría, pero cabe señalar que está ubicada en suelos de transición (Sosa y Ruiz 1992, Tena-Colunga 2007), al igual que la prensa del Periódico Reforma a mediados de los años noventa, también en suelos de transición (Tena-Colunga 2007).

Aunque no han sido muchas, también desde inicios de los años noventa se han realizado estudios sobre la potencial aplicación de aislamiento sísmico en terrenos blandos de la Ciudad de México correspondientes a terrenos ganados a los lagos, que genéricamente refieren los ingenieros mexicanos como “zona del lago”. A continuación sintetizaremos estos trabajos pioneros, que son importantes para entender el por qué en terrenos blandos, la potencial aplicación del aislamiento sísmico no es tarea sencilla y se requieren tomar en cuenta muchos aspectos para valorar si en realidad es factible o conveniente llevarlo a cabo.

González y Noguez (1994) estudiaron la respuesta hipotética de un edificio existente de nueve pisos aislado con elastómeros con corazón de plomo y sujeto a la acción de: a) el registro de aceleración El-Centro 1940 N-S, representativo de terrenos firmes, b) el registro de aceleración SCT85-EW del sismo del 19 de septiembre de 1985 (por ejemplo, Figura 12a), representativo de suelos blandos y, c) un registro artificial, Ebro (colonia Cuauhtémoc), también representativo de suelos blandos. La planta del edificio y su modelado tridimensional con el programa ETABS se presenta en la Figura 18. El edificio está estructurado con base en marcos no dúctiles de concreto reforzado y losa plana reticular, y su cimentación es típica de edificios construidos a fines de los años sesenta y principios de los años setenta: losa de cimentación rígida apoyada en pilotes de punta. En el estudio se despreció y se consideró la interacción suelo-estructura, empleando propiedades típicas de suelos blandos de la Ciudad de México.

El periodo fundamental del inmueble medido experimentalmente fue $T_{exp}=1.14s$. Dado que se consideraron elastómeros con corazón de plomo, el

Con base en los resultados obtenidos, González y Noguez (1994) concluyeron de su estudio lo siguiente: a) el aislamiento sísmico con elastómeros con corazón de plomo es eficiente para movimientos del terreno representativos de terreno firme (por los resultados obtenidos con El Centro, no mostrados), aun cuando se incluyen los efectos de la interacción suelo-estructura, b) el aislamiento sísmico con elastómeros con corazón de plomo no fue eficiente para movimientos del terreno típicos de suelos blandos de la Ciudad de México, incluyendo o despreciando la interacción suelo-estructura, dado que las respuestas muy amplificadas o resonantes se encuentran en un intervalo de periodos mediano a largo, que es dónde normalmente se intenta aislar sísmicamente estructuras con este sistema de aislamiento.

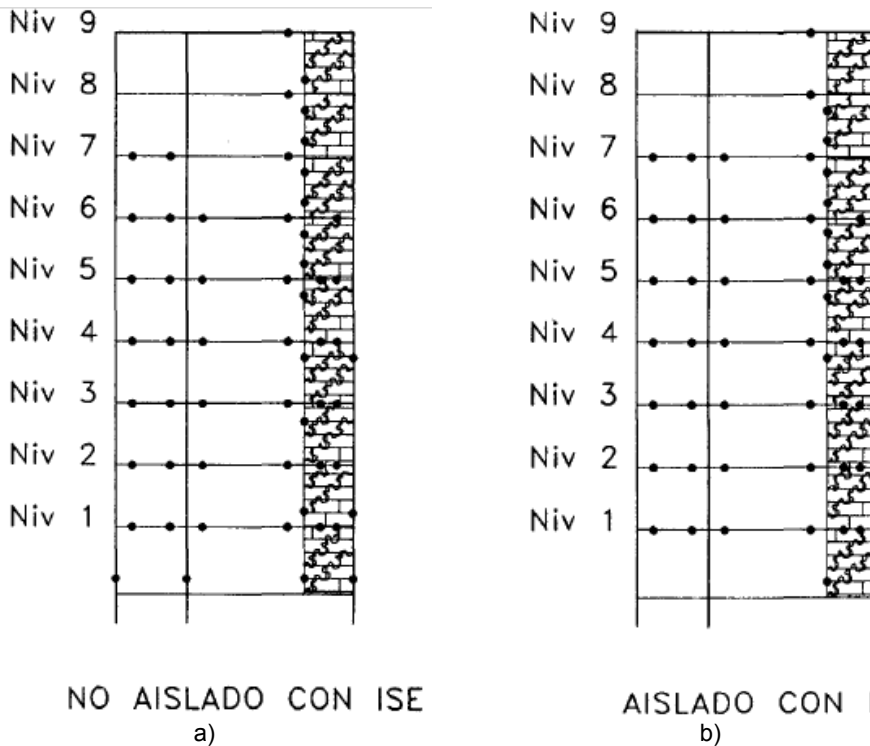


Figura 19 Mapeo de fluencias inelásticas en la losa plana aligerada (modeladas como vigas equivalentes) y de agrietamiento en muros de mampostería para el edificio existente de nueve niveles estudiado por González y Noguez ante la acción del registro SCT85-EW. Adaptado de González y Noguez (1994)

En Tena-Colunga (1996) se presenta un estudio exploratorio para la aplicación del aislamiento sísmico, como proyecto de reestructuración, en edificios de escuelas típicas del CAPFCE de los años 60s y 70s, considerando tanto movimientos de terreno firme y roca de la costa de Guerrero (por ejemplo, Figuras 3 a 5), como registros de la zona de transición y de suelo blando de la Ciudad de México, principalmente registrados durante el sismo del 19 de septiembre de 1985 (por ejemplo, Figuras 12a y b). En la Figura 20 se presenta una de estas escuelas en estudio, la denominada como EP2, que corresponde a un modelo del CAPCE típico de escuela de cuatro pisos del inicio de los años 70s, y donde la propuesta

de aislamiento sísmico en planta con elastómeros con corazón de plomo se muestra esquemáticamente en la Figura 21.

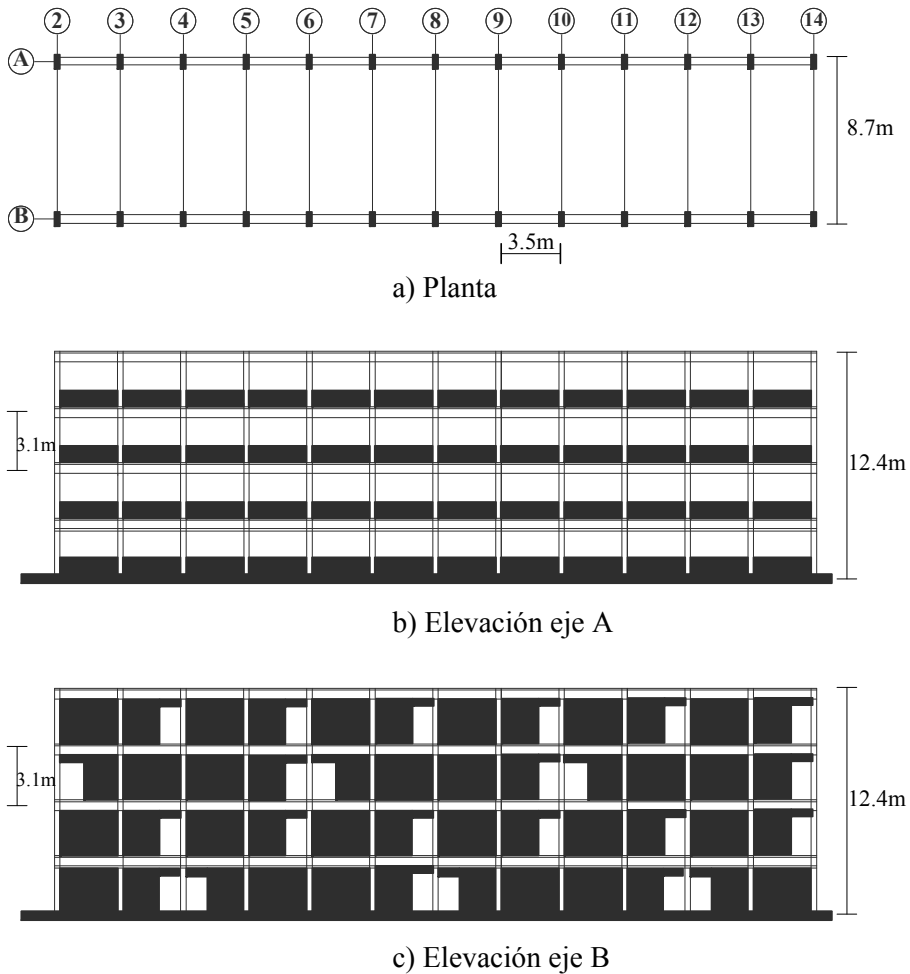


Figura 20 Planta y elevaciones de la escuela pública EP2. Cortesía de José Luis Álvarez Ruiz

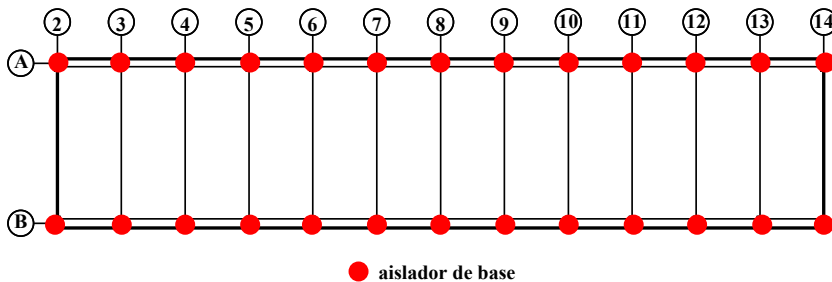


Figura 21 Croquis de ubicación de los aisladores propuestos para la escuela pública EP2

En el proyecto de aislamiento sísmico, que se diseñó para resistir los movimientos de terreno firme más intensos registrados en las costas de Guerrero

(Figura 3) y de Colima (Figura 4) asociados a sismo de magnitudes cercanas a 8.0, se consideró que el cortante de fluencia del sistema de aislamiento era 10% del peso de la estructura ($V_f/W=0.10$), y que la pendiente posterior a la fluencia del sistema de aislamiento sería 10% de su rigidez elástica ($k_2/k_1=0.10$, Figura 17).

De esta manera, en el diseño se consideraron 26 aisladores con corazón de plomo de sección cilíndrica, uno debajo de cada línea de columnas (Figura 21) cuyas dimensiones fueron las siguientes: 45 cm de diámetro, 40 cm de altura con un corazón de plomo de 8 cm de diámetro. Con estas características, el desplazamiento máximo que el sistema podría acomodar de manera estable era $D_{max}=15$ cm en cualquier dirección, y el periodo efectivo de aislamiento a la rigidez secante objetivo k_{ef} (Figura 17) fue $T_{as}=1.71$ s en ambas direcciones. Sin embargo, el periodo inicial de la estructura con este sistema de aislamiento (a la rigidez k_1 del aislador, Figura 17) fue $T_1=0.77$ s. Cabe señalar que de acuerdo con la planta de la escuela, la dirección "x" es la dirección longitudinal alargada, mientras que la dirección "y" es la dirección transversal corta.

Se realizaron análisis dinámicos paso a paso no lineales ante 13 pares de series de aceleración registrados e identificados en la Tabla 1 con el acrónimo de identificación de cada estación según la Base Mexicana de Sismos Fuertes, llamando "x" a la componente E-W del registro e "y" a la componente N-S. Se consideró de manera muy aproximada la direccionalidad de los movimientos del terreno, alternando las componentes de los registros, de manera que lo que se indica como sismo "x-y" es cuando la componente E-W del registro se aplicó en la dirección "x" de la planta y la N-S en la dirección "y", mientras que en un sismo "y-x" se aplicó la componente N-S en la dirección "x" y la E-W en la dirección "y".

Tabla 1 Respuestas dinámicas máximas del proyecto de aislamiento sísmico de la escuela EP2

Evento	Estación	Sismo	Desplazamiento relativo máximo entre azotea y sistema de aislamiento (cm)		Desplazamiento máximo del aislador normalizado con el permisible		Cortante Basal (Ton)		$\frac{V_x}{W}$	$\frac{V_y}{W}$
			Δx_{max}	Δy_{max}	D_x/D_{max}	D_y/D_{max}	V_x	V_y		
09/19/85	CALE	y-x	1.58	0.06	0.621	0.342	184.2	131.1	0.120	0.086
	PAPN	y-x	1.15	0.05	0.208	0.170	119.2	139.5	0.078	0.091
	UNIO	y-x	1.86	0.06	0.902	0.444	206.7	140.1	0.135	0.092
04/25/89	VIGA	y-x	1.51	0.04	0.192	0.119	154.3	90.6	0.101	0.059
	MSAS	x-y	0.75	0.03	0.071	0.062	79.9	67.2	0.052	0.040
	SMR2	y-x	1.53	0.06	0.894	0.745	188.7	153.0	0.123	0.100
05/31/90	LLAV	x-y	1.74	0.06	0.363	0.305	135.4	121.3	0.088	0.079
	PARS	y-x	0.42	0.01	0.030	0.028	42.3	32.1	0.028	0.021
10/09/95	MANZ	x-y	1.62	0.07	0.924	0.679	189.2	138.6	0.124	0.091
09/19/85	SCT	x-y	4.54	0.14	4.090*	2.045*	564.7	253.1	0.369	0.165
	TBOM	y-x	2.71	0.10	1.995*	1.391*	326.4	243.4	0.213	0.159
	VIV	x-y	1.05	0.04	0.138	0.109	116.7	91.2	0.076	0.060
	TACY	y-x	0.73	0.04	0.090	0.094	87.2	84.4	0.057	0.055

* Inestabilidad dinámica, ya que el desplazamiento máximo de diseño $D_{max}=15$ cm se excede $W=1,530$ Ton

En la Tabla 1 se resumen parte de las respuestas máximas obtenidas que permiten valorar la eficacia del proyecto de aislamiento sísmico con elastómeros con corazón de plomo. De todas las reportadas, la crítica para evaluar la seguridad del proyecto de aislamiento sísmico está dada por los desplazamientos máximos

teóricos del sistema de aislamiento normalizados con respecto al desplazamiento máximo que puede acomodar el aislador de manera estable. Así, se confirma que para todos los registros de terreno firme o roca registrados en la costas del Pacífico que fueron considerados y evaluados (CALE, PAPN, UNIO, VIGA, MSAS, SMR2, LLAV, PARS y MANZ), el proyecto de aislamiento sísmico fue efectivo, seguro y estable, y que lo sería también para movimientos de terreno firme (TACY) y de transición muy rígidos (VIV) registrados en la Ciudad de México.

Sin embargo, resulta muy claro que el proyecto era inviable e inestable para los movimientos de suelos blandos registrados durante el sismo del 19 de septiembre de 1985, tanto SCT (Figura 12a), como TBOM (Figura 12b). Observando de cerca los espectros de desplazamientos de estos registros, se aprecia que, definitivamente, aislar con elastómeros con corazón de plomo no es una opción técnica, pues para ello se debería llevar el periodo elástico del sistema de aislamiento (T_1 a la rigidez inicial k_1) a periodos mayores a 4.5s ($T_1 > 4.5s$) para el sitio SCT y, definitivamente, no tendría la menor oportunidad en TBOM, pues de hecho, el periodo T_1 a que se aisló era el “más favorable” con respecto al espectro de desplazamientos (Figura 12b) y, aún así, no garantizó su estabilidad (Tabla 1). Por ello, en el estudio (Tena-Colunga 1996) se advirtió de la inviabilidad y el enorme riesgo de emplear elastómeros con corazón de plomo para intentar aterrizar proyectos de aislamiento sísmico en la zona del lago (con terrenos muy blandos) de la Ciudad de México.

Finalmente, a solicitud expresa de Comisión Federal de Electricidad (CFE), recientemente se realizó un estudio muy extenso y detallado para evaluar la factibilidad de emplear aislamiento sísmico para nuevas estaciones encapsuladas que se planeaban construir en terrenos blandos de la Ciudad de México (Tena *et al.* 2014, Tena-Colunga *et al.* 2015) y que se resumen de manera muy breve a continuación, resaltando los aspectos relacionados con la interacción dinámica-suelo estructura.

Las subestaciones encapsuladas están compuestas de una serie de tubos de acero de gran diámetro a presión que contienen un gas tóxico que funciona como agente aislante de los cables eléctricos que alberga. Debido a ello, se requería garantizar que durante un sismo intenso, la subestación esté en operación completa y que no exista el riesgo de alguna fuga del gas tóxico, especialmente en los terrenos blandos del Valle de México, dado que su exposición con seres humanos pueda ocasionar su muerte en muy pocos minutos.

Con base en la experiencia previa por todos las consideraciones ya presentadas en secciones anteriores, *a-priori*, la utilización de sistemas de aislamiento sísmico convencionales (con base en elastómeros, sobre todo si tienen corazón de plomo) en estructuras localizadas en suelos blandos de la Ciudad de México, con periodos de sitio mayores a 1.25 segundos ($T_s \geq 1.25s$) no es recomendable, debido a la potencial respuesta resonante de la estructura aislada sísmicamente, como consecuencia del alargamiento de su periodo fundamental de vibrar, lo cual, como brevemente se discute antes, ya se había demostrado analíticamente (González y Noguez 1994, Tena-Colunga 1996). Además, como también ya se ha discutido previamente, los hundimientos diferenciales ocasionados por las deformaciones de los estratos arcillosos pueden ser muy riesgosos, ya que éstos tendrían un impacto desfavorable en la

estabilidad del sistema de aislamiento para tomar la carga vertical ante el desplazamiento máximo de diseño.

Dado que un diseño convencional de una subestación encapsulada (marcos a momento con cimentación de cajón compensado exclusivamente) en suelos blandos no garantiza que ésta se encuentre en operación completa después de un sismo intenso, y que existe el riesgo de que se dañe alguna de las tuberías, de manera tal que se fugue el gas tóxico, el personal técnico de CFE consideró que el empleo de aislamiento sísmico parecería una opción viable para evitar o minimizar movimientos diferenciales de importancia, que no pudieran absorber las conexiones de las tuberías, por lo que debería estudiarse y así valorar si permitiría dar una mayor protección a este tipo de instalaciones y sus contenidos durante la ocurrencia de un sismo intenso.

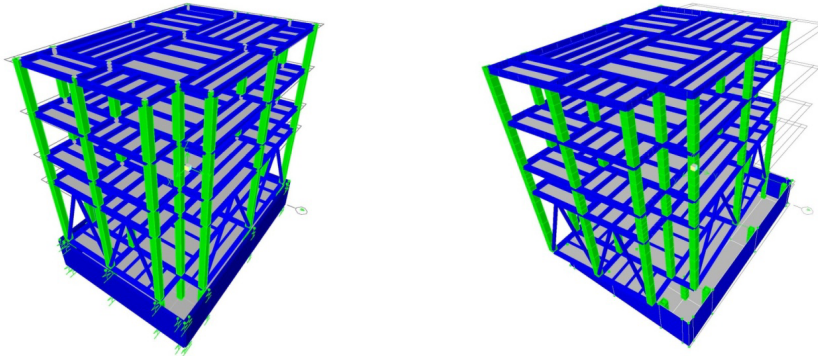
Cabe señalar nuevamente que el empleo del aislamiento sísmico en terrenos blandos como los de la zona del lago de la Ciudad de México es atípico y requiere evaluarse a cabalidad, dada la posibilidad de que puedan presentarse problemas de inestabilidad dinámica en el sistema aislador-estructura, tanto por la potencial respuesta resonante con el sitio, como por el cabeceo global o efectos de asentamientos diferenciales y/o súbitos durante sismos intensos. Por ello, CFE solicitó al autor y a sus colaboradores un estudio de factibilidad técnica para explorar sistemas de aislamiento sísmico que se pudieran emplear para aislar de manera eficiente este tipo de subestaciones en suelos relativamente blandos, más cercanos a la frontera con la zona de transición del Valle de México (Figura 11), minimizando los movimientos diferenciales entre edificios contiguos que contienen estas tuberías, lo cual se logra aislándolos al mismo periodo objetivo, antes de hacer cualquier convocatoria y licitación del concurso de diseño y obra correspondiente.

El reto planteado fue muy interesante, dado que involucró dar soluciones concretas a muchos aspectos fundamentales del proyecto, que se explican con detalle en otros trabajos (Tena *et al.* 2014, Tena-Colunga *et al.* 2015). Por ello, el proyecto de investigación incluyó: a) la evaluación de estructuraciones *ad-hoc* de la superestructura por encima del sistema de aislamiento, b) definición del peligro sísmico para cada sitio de interés y generación de movimientos del terreno representativos tomando en cuenta los efectos de sitio, c) propuesta de sistemas de aislamiento sísmico que fueran efectivos en liderar a la estructura a periodos iniciales de aislamiento sísmico fuera de respuestas resonantes o amplificadas en desplazamientos y aceleración, c) evaluación del impacto de la interacción suelo-estructura en modelos bidimensionales y tridimensionales, tanto en el dominio del tiempo, como en el de la frecuencia.

Con fines ilustrativos, se presentará exclusivamente los resultados de una de las subestaciones (Narvarte), resumiendo exclusivamente los resultados del modelo analítico más representativo (Figura 22). En la Figura 23 se presentan los 10 registros sintéticos así definidos para el sitio Narvarte de interés.

Tomando en cuenta la experiencia del autor en estos temas, se tomó muy en cuenta para que un sistema de aislamiento sea eficiente y filtre los movimientos del terreno de manera que la estructura por encima del sistema de aislamiento casi no se deforme relativamente y se traslada esencialmente como un cuerpo

rígido, es conveniente desacoplar dinámicamente de manera importante al edificio del sistema de aislamiento, por lo que el periodo de vibración efectivo del edificio aislado sísmicamente (T_{as}) debe ser varias veces mayor que el periodo fundamental de vibración del edificio si se considera éste desplazado en base rígida (T_{br}) y, para fines prácticos y para un proyecto de esta importancia, se propuso que el objetivo debiera ser $T_{as}/T_{br} \geq 7$.



a) Modelo aislado completo y con ISE

b) Primer modo modelo aislado completo y con ISE

Figura 22 Modelo tridimensional en ETABS de la subestación SF6-Contra, incluyendo el cajón de cimentación, el sistema de aislamiento, la holgura del muro perimetral del cajón y la interacción suelo-estructura (Tena-Colunga *et al.* 2015)

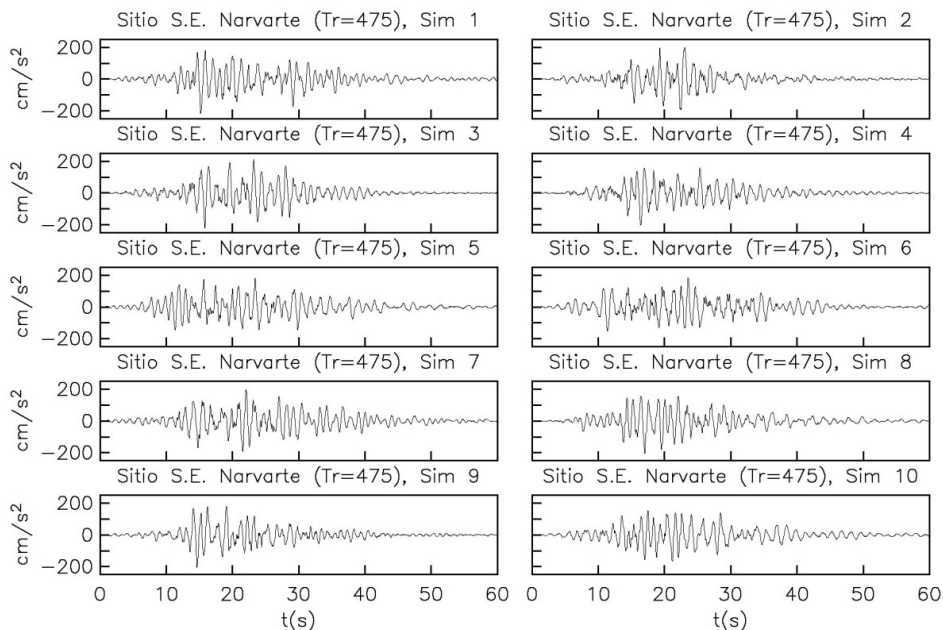


Figura 23 Registros de aceleración sintéticos generados para el sitio Narvarte para un periodo de retorno de 475 años (Tena-Colunga *et al.* 2015)

Para minimizar cualquier potencial respuesta resonante con el terreno en terrenos blandos consolidados, también es conveniente que el periodo de aislamiento objetivo sea al menos tres veces mayor al periodo dominante del sitio

T_s , es decir, $T_{as}/T_s \geq 3$. En terrenos blandos, también parece conveniente que, para evitar (o saltar) el intervalo de periodos donde se presentan respuestas resonantes, el sistema de aislamiento debe tener la característica de aislar de inmediato al periodo de aislamiento objetivo, donde ya no se presente la posibilidad de respuestas resonantes. Con los sistemas elastoméricos con corazón de plomo no se puede garantizar lo anterior, por lo que difícilmente constituyen una buena opción, como ya se había comprobado analíticamente en estudios previos (González y Noguez 1994, Tena-Colunga 1996). En este sentido, los sistemas de aislamiento de tipo pendular y/o deslizante pudieran ser una alternativa atractiva para lograr este objetivo o, si se emplea un elastómero, que éste sea de comportamiento lineal y alto amortiguamiento, sin emplear corazón de plomo.

Así, se estudiaron como sistemas de aislamiento sísmico de potencial aplicación: a) sistemas pendulares sin amortiguamiento adicional, b) sistemas pendulares con amortiguamiento viscoso suplementario y, c) péndulos de fricción. En las simulaciones numéricas iniciales se consideraron modelos tridimensionales (Figura 22) y análisis dinámicos no lineales paso a paso ante la acción simultánea de dos componentes ortogonales de los movimientos del terreno (Figura 23), pero sin modelar aún la interacción suelo-estructura (sin el cajón y los resortes mostrados en la Figura 22). De esta primera aproximación se obtuvo que era factible utilizar los sistemas de aislamiento en estudio. Sin embargo, se observó que si sólo se aísla sísmicamente incrementando el periodo con un sistema pendular que carezca de amortiguamiento adicional, los desplazamientos máximos desarrollados por los aisladores serían muy grandes y difíciles de acomodar. Entonces, las mejores opciones parecían ser utilizar un sistema de aislamiento pendular al que se le proporcione amortiguamiento viscoso adicional o péndulos de fricción.

Con base en las simulaciones hechas para los modelos tridimensionales que desprecian la interacción suelo-estructura, y de los resultados obtenidos con modelos bidimensionales que incluyen la interacción suelo-estructura analizando sólo una dirección principal de traslación (no mostrados, por ejemplo, Tena-Colunga *et al.* 2015), se desarrollaron nuevos modelos tridimensionales que incluyeron tanto la interacción suelo-estructura como el aislamiento sísmico, como se ilustra en las Figuras 22a y 22b.

Para ello, se modeló el cajón de cimentación con una profundidad de desplante de 3.5 m, donde los muros del cajón están separados 60 cm de la losa de planta baja, para permitir el desplazamiento del sistema de aislamiento (Figura 22a). Se consideró una losa del cajón de cimentación de concreto reforzado de 25 cm de espesor y los muros también de concreto reforzado de 25 cm de espesor. El modelado de la interacción suelo-estructura se completó incluyendo resortes de traslación y amortiguadores viscosos en contacto con los muros del cajón de cimentación en ambas direcciones, así como de traslación y rotación (cabecero) en contacto con la losa de cimentación. De igual manera, se modeló el sistema de aislamiento considerando que se ubica un aislador debajo de cada línea de columnas, por lo que se consideraron un total de 13 aisladores por modelo.

Nuevamente, se consideraron péndulos elásticos (sin amortiguamiento), como péndulos elásticos que disipan energía por amortiguamiento viscoso

adicional del 15% del crítico, que corresponden a idealizaciones representativas del sistema GT-BIS. También se estudiaron péndulos de fricción simples, y se consideraron dos opciones. En la primera se consideró que: a) el coeficiente de fricción dinámico máximo es $\mu=0.095$, b) la diferencia entre los coeficientes de fricción dinámicos máximo y mínimo es $\Delta\mu=0.045$, c) la potencia de la relación constitutiva de fricción es 0.8 y, d) el desplazamiento aparente de fluencia es de 1.27 mm. Adicionalmente, se consideró otra opción, en que sólo variaron los siguientes parámetros con respecto a la opción anterior: a) el coeficiente de fricción dinámico máximo es $\mu=0.04$ y, b) la diferencia entre los coeficientes de fricción dinámicos máximo y mínimo es $\Delta\mu=0.01$, es decir, un péndulo con bajo coeficiente de fricción y pequeña variación en el mismo. En ambos casos el radio de curvatura considerado para la superficie esférica fue $R=304.40$ cm y la rigidez efectiva total del sistema pendular en las direcciones de traslación horizontal es de 2.40 Ton/cm.

Para llevar a cabo análisis confiables, se requirieron considerar al menos 10 modos de vibración para obtener al menos el 90% de la masa modal participando en cada dirección. Los primeros tres modos de vibración de todos los modelos resultaron acoplados de traslaciones en ambas direcciones con rotación. El primer modo de vibración se ilustra en la Figura 22b. La razón del acoplamiento en los modos se debe a que el centro de masa del sistema de aislamiento no coincide razonablemente con su centro de rigidez en ambas direcciones y esta excentricidad acopla notablemente la respuesta de los modelos. La excentricidad en el sistema de aislamiento es de aproximadamente 11% en la dirección x y de 16% en la dirección y . Se consideraron las mismas características mecánicas de los aisladores que para el estudio en base rígida para obtener un periodo aislado objetivo $T_{as}=3.5s$, existiendo pequeñas diferencias en el modelo que incluye todos los efectos, por las razones que se discuten con detalle en otros documentos (Tena *et al.* 2014, Tena-Colunga *et al.* 2015). Toda vez que se calibraron razonablemente los modelos tridimensionales con interacción, se realizaron análisis dinámicos paso a paso, considerando la acción simultánea de dos componentes ortogonales de los movimientos del terreno, con base en proponer aleatoriamente dos de las simulaciones obtenidas cuando se consideran la interacción cinemática. Se hicieron cinco simulaciones por subestación de interés para cada modelo. Las máximas respuestas para cada sistema de aislamiento obtenidas para la subestación Narvarte se resumen en la Tabla 2. Se aprecia lo siguiente con los datos del sitio Narvarte exclusivamente:

Tabla 2 Resultados con ISE para el proyecto de aislamiento del modelo SF6-Contra, sitio Narvarte

Tipo de Aislamiento	D_{\max} -aislador (cm)	V_{\max} - estructura (Ton)	D_{\max} -estructura (cm)	Δ_{\max} -entrepiso (N3)	D_{\max} - h-cajón (cm)	D_{\max} - v-cajón (cm)
Pendular, $\zeta=0\%$	69.35	64.76	9.48	0.0056	0.49	1.43
Pendular, $\zeta=15\%$	22.57	35.48	5.58	0.0036	0.26	0.97
Péndulo de fricción, $\mu_{\max}=0.095$	20.87	59.33	7.20	0.0046	0.73	2.31
Péndulo de fricción, $\mu_{\max}=0.04$	21.56	47.06	5.45	0.0036	0.56	2.04

1. El aislamiento sísmico es potencialmente efectivo para el modelo SF6-Contra, aun incluyendo los efectos de interacción, como consecuencia del adecuado desacoplamiento dinámico entre el sistema de aislamiento con

la superestructura ($T_{as}/T_{br} \approx 7$) y con los periodos dominantes del terreno ($T_{as}/T_s > 3$).

2. Se confirmó que si sólo se aísla incrementando el periodo con un sistema pendular que carezca de amortiguamiento, los desplazamientos máximos desarrollados por los aisladores ($D_{\max\text{-aislador}}$) serían muy grandes y difíciles de acomodar. De hecho, con la holgura planeada de 60 cm, en teoría se produciría choque estructural con los muros del cajón de cimentación en el sitio Narvarte. Además, los desplazamientos máximos entre la azotea y el nivel de aislamiento ($D_{\max\text{-estructura}}$), y la distorsión máxima de entrepiso ($\Delta_{\max\text{-entrepiso}}$ en el nivel 3), siempre resultan ser también las más grandes, a pesar de que los efectos de interacción (desplazamiento lateral y cabeceo del cajón, $D_{\max\text{-h-cajón}}$ y $D_{\max\text{-v-cajón}}$ respectivamente), no resultan ser los mayores. Cabe señalar que cuando se produce choque estructural con el cajón, como se ha demostrado, los daños en la estructura por encima del sistema de aislamiento son muy grandes (Pant y Wijeyewickrema 2014).
3. Se confirmó que, en términos generales, la mejor opción de las estudiadas parece ser utilizar un sistema de aislamiento pendular que proporcione amortiguamiento viscoso adicional, pues existe un mejor balance entre todos los parámetros de diseño evaluados: a) desplazamientos máximos de los aisladores razonables (menores a 25cm), b) se desarrollan los menores cortantes basales máximos de todos los sistemas estudiados, c) normalmente, los desplazamientos relativos máximos entre la azotea y el nivel de aislamiento son de los más bajos, así como la distorsión de entrepiso máxima del nivel N3 y, d) además, se reducen notablemente los efectos de interacción (desplazamiento lateral y cabeceo del cajón).
4. Se confirmó también que los péndulos de fricción pueden ser una opción muy razonable, pues pueden limitar aun más los desplazamientos de los aisladores con respecto a un aislamiento pendular con 15% de amortiguamiento viscoso adicional. Sin embargo, se confirma también que estos sistemas desarrollarían mayores cortantes basales en la estructura y esto puede impactar el costo. También se aprecia que estos sistemas son más sensibles a la interacción inercial suelo-estructura y, por lo tanto, normalmente se desarrollan mayores desplazamientos laterales y cabeceos del cajón de cimentación, con respecto al sistema pendular con amortiguamiento.
5. Con respecto a los coeficientes de fricción dinámicos estudiados en los péndulos de fricción, en términos generales resultó más favorable, para todos los sitios en estudio, utilizar un coeficiente de fricción más bajo ($\mu_{\max}=0.04$) y con menor variación ($\Delta\mu=0.01$), que un coeficiente de fricción más alto ($\mu_{\max}=0.095$) y con mayor variación ($\Delta\mu=0.045$), pues el primero reduce, con respecto al segundo: a) los cortantes basales máximo de la estructura, b) los desplazamientos relativos máximos entre la azotea y el nivel de aislamiento, c) la distorsión de entrepiso máxima del nivel N3 y, d) los efectos de interacción inercial (desplazamiento lateral y cabeceo de la cimentación). La única ventaja que ofrece el utilizar un coeficiente de fricción más alto, y con mayor variación, es reducir un poco más los desplazamientos máximos del sistema de aislamiento.

6. Con respecto a la mejor opción para cada sitio en particular, y en virtud de los resultados obtenidos, para el sitio Narvarte parecía que lo más adecuado era utilizar un sistema pendular con $\zeta=15\%$.
7. Las distorsiones de entrepiso máximas reportadas para el nivel 3 y para todos los sistemas de aislamiento se encuentran por debajo de la distorsión permisible $\Delta_u=0.007$ para marcos dúctiles de acero establecida en el Capítulo C.3.2 Diseño de Estructuras con Aislamiento de Base del Manual de Obras Civiles (Tena-Colunga 2013, Tena 2016).
8. Con base en todos los resultados analizados, cabe destacar que el cabeceo de la cimentación afecta más a los péndulos de fricción, dado que la eficiencia de este sistema depende de que la carga axial que se transmite al péndulo sea lo más normal posible sobre un plano perfectamente horizontal. No obstante, el cabeceo de la cimentación lidera a desplazamientos verticales dinámicos máximos de los cajones en sus esquinas menores a 2.5 cm, y dado que no son tan grandes, no tienen un impacto importante en la estabilidad de los aisladores.

La conclusión general de la investigación solicitada por CFE fue que, aun tomando en cuenta los efectos de interacción suelo-estructura, era viable emplear sistemas de aislamiento sísmico del tipo pendular para las subestaciones tipo SF6 en los seis sitios de interés que CFE solicitó hacer el estudio, y por fines de espacio y de ilustración, en esta sección sólo se presentan algunos resultados obtenidos para el sitio Narvarte. Sin embargo, el interesado puede buscar los resultados más sobresalientes de este estudio para cada uno de los seis sitios en estudio en publicaciones previas (Tena *et al.* 2014, Tena-Colunga *et al.* 2015). Cabe señalar que los seis sitios estudiados, aunque poseen estratos blandos, son suelos consolidados, prácticamente de transición, y cuyos periodos de sitio, en todos los casos, fueron inferior a 1.1s ($T_s < 1.1s$), por lo que prácticamente están en la vecindad de la frontera de la zona de transición con la zona del lago (Figura 11) y, por ello, los desplazamientos espectrales para periodos objetivos de 3.5 segundos, aunque grandes, pueden ser acomodados por ciertos sistemas de aislamiento con amortiguamiento adicional, como los estudiados y discutidos en el trabajo.

Con base en este estudio, se formularon una serie de recomendaciones generales a CFE para concursar el proyecto de diseño sismorresistente de este tipo de estructuras en sus licitaciones, mismas que también se detallan en los trabajos antes referidos. Con base en estas guías se hicieron las licitaciones y, de hecho, ya están construidas subestaciones encapsuladas en al menos tres de los sitios estudiados, con proyectos estructurales similares a los empleados en esta investigación. Dos de estas subestaciones, Narvarte y Verónica, están ubicadas en la Ciudad de México, y se encontraban ya en operación al momento que ocurrió el sismo del 19 de septiembre de 2017, donde no experimentaron daño alguno (Figura 24), ni se tuvo que interrumpir su operación.

4 COMENTARIOS FINALES

En el artículo se presentó con amplitud las razones dinámicas del por qué el aislamiento sísmico ofrece grandes ventajas para obtener diseños sísmicos

100% resilientes en terrenos firmes y roca, aún para movimientos del terreno de sismo de gran magnitud (para sismos de subducción de las costas del Pacífico mexicano de magnitud hasta $M_w=8.2$ al menos), siempre y cuando no se ignoren y se tomen en cuenta otros aspectos relevantes como la cercanía a la fuente y la posibilidad de tener registros conocidos como de fuente cercana o “epicentrales”, con pulsos de velocidad que tienen una energía muy importante que afecta la respuesta de desplazamientos en periodos intermedios, la pertinencia de tomar en cuenta en el diseño las aceleraciones verticales y, en su caso, efectos de sitio debido a la presencia de estratos de arenas sueltas y/o algunos depósitos blandos que puedan alterar la respuesta del sistema sísmicamente aislado. Por ello, los principales lineamientos de diseño sísmico desarrollados para el Manual de Obras Civiles de Comisión Federal de Electricidad (Tena 2016), fueron pensados para su aplicación en terrenos relativamente firmes y roca, como de hecho es el caso en todas las normas internacionales sobre aislamiento sísmico, por ejemplo, las de los Estados Unidos, Nueva Zelanda, Japón, Chile y Europa, entre otras.



a) Subestación Narvarte

b) Subestación Verónica

Figura 24 Subestaciones encapsuladas (SF6) construidas en terrenos blandos de la Ciudad de México y aisladas sísmicamente. Las fotos fueron tomadas por un servidor días después del sismo del 19 de septiembre de 2017. Reportadas sin daño alguno

Finalmente, y con base en su amplia experiencia y su compromiso ético ante la sociedad, a quien debemos servir y proteger ante la acción de sismos muy intensos, no sólo garantizando su seguridad de vida, sino también su patrimonio, el autor discute por qué, en los casos más generales, la aplicación del aislamiento sísmico en terrenos blandos no ofrece grandes ventajas y puede ser contraproducente si se hace sin estudios detallados del sitio, y si además no se considera la interacción suelo-estructura. Por ello, se discutieron los aspectos que se deben considerar para su aplicación en suelos blandos, como son la enorme magnitud de los desplazamientos del terreno y la potencial respuesta resonante en el intervalo de periodos donde más frecuentemente se aplica el aislamiento sísmico, además de los peligros inherentes tanto a hundimientos diferenciales del terreno de desplante a través del tiempo, y súbitos durante la acción de un sismo intenso, que constituyen enormes riesgos y retos para garantizar un diseño sismorresistente responsable, ético y resiliente.

La aplicación de aislamiento sísmico en terrenos blandos requiere de estudios muy detallados como son obtener información experimental específica de las propiedades de los estratos del suelo donde se pretende desplantarlo, definir

espectros y registros de aceleración de sitio (históricos y/o sintéticos) para el nivel de peligro sísmico asociado al sismo de diseño, seleccionar un sistema de aislamiento competente que sea efectivo en llevar a la estructura aislada fuera de la zona de potencial resonancia, además de realizar el diseño con modelos analíticos que modelen a la interacción suelo-cimentación-sistema de aislamiento-estructura de manera adecuada y razonablemente realista. Sólo de esta manera se pueden llegar a diseños éticos, responsables y resilientes. Hacerlo de otra manera “más sencilla” en suelos blandos, constituye un enorme acto de irresponsabilidad y de corrupción. Por ello es también importante que estos proyectos sean vigilados y supervisados por expertos nacionales e internacionales en el tema de aislamiento sísmico y que ésta se pueda comprobar fehacientemente *a-priori*, y no por expertos en otros temas, como lamentablemente ocurre en ocasiones en nuestro gremio, lo cual es sumamente irresponsable.

REFERENCIAS

1. Alhan, C., H. Gazi y H. Kurtuluş (2016), “Significance of stiffening of high damping rubber bearings on the response of base-isolated buildings under near-fault earthquakes”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 79, pp. 297-313.
2. Alhan, C. y S. Öncü-Davas (2016), “Performance limits of seismically isolated buildings under near-field earthquakes”, *Engineering Structures*, Vol. 116, pp. 83-94.
3. ASCE-7 (2010), “Minimum design loads for buildings and other structures”, *ASCE Standard ASCE/SEI 7-10*, American Society of Civil Engineers, ISBN: 9780784410851, mayo.
4. Bhagat, S. y A. C. Wijeyewickrema (2017), “Seismic response evaluation of base-isolated reinforced concrete buildings under bidirectional excitation”, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol. 16, No. 2, pp. 365-382.
5. Fallahian, M., F. Khoshnoudian y V. Loghman (2015), “Torsionally seismic behavior of triple concave friction pendulum bearing”, *Advances in Structural Engineering*, Vol. 18, No. 12, pp. 2151-2166.
6. FEMA-368 (2001), “NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures. Part 1: Provisions”, *FEMA Publication 368*, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
7. Gazi, H. y C. Alhan (2019), “Reliability of elastomeric-isolated buildings under historical earthquakes with/without forward-directivity effects”, *Engineering Structures*, Vol. 195, pp. 490-507.
8. Godínez, E. A. (2005), “Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras existentes en el Distrito Federal. El caso específico del sismo del 19 de septiembre de 1985”, *Tesis de Maestría*, Posgrado en Ingeniería Estructural, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, mayo.
9. Godínez, E. A., A. Tena y L. E. Pérez (2005), “Vulnerabilidad de estructuras con base en marcos de concreto reforzado en el Valle de México ante un escenario similar al sismo de septiembre de 1985”, *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 73, pp. 71-101.

10. González, R. y F. J. Noguez (1994), "Respuesta teórica de un edificio con aislamiento de base", *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 46, pp. 23-52.
11. Mazza, F. (2017), "Torsional response of fire-damaged base-isolated buildings with elastomeric bearings subjected to near-fault earthquakes", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 15, No. 9, p. 3673-3694.
12. Mazza, F. (2018), "Seismic demand of base-isolated irregular structures subjected to pulse-type earthquakes", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 108, pp. 111-129.
13. Mehr, N. P., F. Khoshnoudian y H. Tajammolian (2017), "Effect of vertical component of near-field ground motions on seismic responses of asymmetric structures supported on TCFP bearings", *Smart Structures Systems*, Vol. 20, No. 6, pp. 641-656.
14. MOC-2008 (2009), "Manual de diseño de obras civiles. Diseño por sismo", *Instituto de Investigaciones Eléctricas y Comisión Federal de Electricidad*, México, noviembre.
15. MOC-2015 (2015), "Manual de diseño de obras civiles. Diseño por sismo", *Instituto de Investigaciones Eléctricas y Comisión Federal de Electricidad*, México, noviembre.
16. NCh2745 (2003), "Normas chilena oficial NCh2745.Of2003 Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica", *Instituto Nacional de Normalización (INN)*, Santiago, Chile, diciembre.
17. Özdemir, G., O. Avzar y B. Bayhan (2011), "Change in response of bridges isolated with LRBs due to lead core heating", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 31, No. 7, pp. 921-929.
18. Özdemir, G. y U. Akyuz (2012), "Dynamic analyses of isolated structures under bi-directional excitations of near-field ground motions", *Shock and Vibration*, Vol. 19, No. 4, pp. 505-513.
19. Panchal, V. R. y R. S. Jangid (2012), "Performance of variable friction pendulum system for torsionally coupled structures", *Journal of Vibration and Control*, Vol. 18, No. 3, pp. 323-343.
20. Pant, D. R. y A. C. Wijeyewickrema (2014), "Performance of base-isolated reinforced concrete buildings under bidirectional seismic excitation considering pounding with retaining walls including friction effects", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 43, No. 10, pp. 1521-1541.
21. Sosa, A. y S. E. Ruiz (1992), "Análisis estructural y costos de edificios con aisladores sísmicos", *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 44, pp. 11-28.
22. Tajammolian, H., F. Khoshnoudian y V. Bokaeian (2016a), "Seismic responses of asymmetric steel structures isolated with the TCFP subjected to mathematical near-fault pulse models", *Smart Structures and Systems*, Vol. 18, No. 5, pp. 931-953.
23. Tajammolian, H., F. Khoshnoudian y N. P. Mehr (2016b), "Seismic responses of isolated structures with mass asymmetry mounted on TCFP subjected to near-fault ground motions", *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 14, No. 8, pp 573-584.
24. Tajammolian, H. y F. Khoshnoudian (2018), "Reliability of symmetric and asymmetric structures mounted on TCFP base isolators subjected to near-field earthquakes", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 32, No. 4, Article number 04018042.
25. Tena, A., L. E. Pérez, J. Avilés y C. Cordero (2014), "Estudio de la factibilidad de aislamiento sísmico pendular para subestaciones

- encapsuladas ubicadas en terrenos blandos del valle de México”, *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, Vol. 14, No 1-2, pp. 5-37.
26. Tena, A. (2016), “Manual de diseño de obras civiles. Sección C: Estructuras, Tema 3: Monitoreo y Control de Respuestas Estructurales, Capítulo 2: Diseño de estructuras con aislamiento de base”, *Comisión Federal de Electricidad e Instituto de Ingeniería*, UNAM, México.
 27. Tena-Colunga, A. (1996), “Some retrofit options for the seismic upgrading of old low-rise school buildings in Mexico”, *Earthquake Spectra*, Vol. 12, No. 4, pp. 883-902, octubre.
 28. Tena-Colunga, A. y L. A. Gómez-Soberón (2002), “Torsional response of base-isolated structures due to asymmetries in the superstructure,” *Engineering Structures*, Vol. 24, No. 12, pp. 1587-1599.
 29. Tena-Colunga, A. y C. Zambrana-Rojas (2006) “Dynamic torsional amplifications of base-isolated structures with an eccentric isolation system”, *Engineering Structures*, Vol. 28, No. 1, pp. 72-83.
 30. Tena-Colunga, A. y J. L. Escamilla-Cruz (2007), “Torsional amplifications in asymmetric base-isolated structures”, *Engineering Structures*, Vol. 29, No. 2, pp. 237-247.
 31. Tena-Colunga, A. (2007), “State of the Art and State of the Practice for energy dissipation and seismic isolation of structures in Mexico”, *Memorias, 10th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*, Estambul, Turquía, CD-ROM, mayo.
 32. Tena-Colunga, A. (2013), “Seismic design of base-isolated buildings in Mexico. Part 1: Guidelines of a model code”, *The Open Civil Engineering Journal*, Vol. 7, pp. 17-31.
 33. Tena-Colunga, A., L. E. Pérez-Rocha, J. Avilés y C. Cordero-Macias (2015), “Seismic isolation of buildings for power stations considering soil-structure interaction effects”, *Journal of Building Engineering*, Vol. 4, pp. 21-40.
 34. UBC-97 (1997), “Uniform Building Code, 1997 edition”, *International Conference of Building Officials*, Whittier, California, Vol. 2.
 35. Wang, H., W.-Z. Zheng, J. Li y Y.-Q. Gao (2019), “Effects of temperature and lead core heating on response of seismically isolated bridges under near-fault excitations”, *Advances in Structural Engineering*, pp. 1-16, 1369433219855914.
 36. Zheng, W., H. Wang, J. Li y H. Shen (2019), “Performance evaluation of bridges isolated with SMA-based friction pendulum system at low temperatures”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 125, 105734.