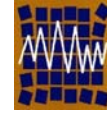




Universidad de Concepción  
Departamento de Ingeniería Civil



Asociación Chilena de Sismología e  
Ingeniería Antisísmica

## CÓDIGO N° A13-03

# AMPLIFICACIÓN DINÁMICA DE LOS DESPLAZAMIENTOS DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS ASOCIADA A LA TORSIÓN INDUCIDA POR LA ASIMETRÍA EN RIGIDECES LATERALES DE LA SUPERESTRUCTURA

Arturo Tena Colunga <sup>1</sup> y José Luis Escamilla Cruz <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana  
Edificio H, 3er. Piso Av. San Pablo # 180, 02200 México, D.F., México.  
e-mail [atc@correo.azc.uam.mx](mailto:atc@correo.azc.uam.mx)

<sup>2</sup>Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, ESIA-IPN,  
U. P. Adolfo López Mateos, 07738 México, DF, México.  
e-mail: [josecamc75@hotmail.com](mailto:josecamc75@hotmail.com)

## RESUMEN

El estudio presenta la evaluación de la respuesta lateral-torsional de los aisladores sísmicos considerando excentricidades de los centros de rigidez de la superestructura. Para realizar este estudio paramétrico se eligieron cuatro modelos para la superestructura, cada uno con diferentes periodos fundamentales de vibración, así como también diferentes relaciones de frecuencias lateral-torsional no acopladas. Se realizaron análisis dinámicos no lineales de los modelos de referencia que presentan distintos porcentajes de excentricidad de los centros de rigidez de la superestructura con respecto a sus correspondientes centros de masa (0%, 5%, 10%, 15% y 20%) en dos direcciones ortogonales, evaluando la respuesta dinámica ante excitación bidireccional de acelerogramas registrados en terrenos firmes para periodos efectivos de las estructuras aisladas entre 1.5 y 3.0 segundos ( $1.5s \leq T_a \leq 3s$ ).

*Palabras Clave: aislamiento sísmico, torsión, excentricidades, elastómeros, estructuras irregulares*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los avances recientes de tecnologías novedosas, como el aislamiento sísmico, cuya función principal es reducir la vulnerabilidad de las edificaciones ante la acción de sismos intenso, han tenido gran aplicación en países como Japón, Estados Unidos, Nueva Zelanda, Italia y China, entre los países con mayor número de aplicaciones, y su uso se está extendiendo rápidamente en países como Rusia, Armenia y Corea del Sur, entre otros, entre los cuales se encuentran Chile y México.

Existen diversos aspectos estructurales que han sido ampliamente estudiados por los investigadores con respecto al aislamiento sísmico y que ha permitido la evolución de esta novedosa tecnología. Sin embargo, uno de los aspectos que ha recibido menos atención es la respuesta torsional. Existen pocos trabajos disponibles en la literatura donde la respuesta torsional es estudiada para aisladores elastoméricos, entre los que destacan los trabajos presentados por Eisenberger y Rutenberg (1986), Nagarajaiah *et al.* (1993), Jangid y Datta (1994), Gómez (2000), Gómez y Tena (2002), Tena-Colunga y Gómez-Soberón (2002) y Tena-Colunga y Zambrana-Rojas (2004).

En las investigaciones previas dirigidas por el primer autor se estudió la respuesta torsional de estructuras con planta regular, aisladas sísmicamente y con excentricidades en la superestructura debida a la posición asimétrica de los centros de masa (Gómez 2000, Tena-Colunga y Gómez-Soberón 2002), o excentricidades en el sistema de aislamiento (Gómez 2000, Tena-Colunga y Zambrana-Rojas 2004) y, finalmente, excentricidades simultáneas tanto en la estructura como en el sistema de aislamiento (Gómez 2000, Gómez y Tena 2002), realizando análisis dinámicos no lineales de modelos tridimensionales para distintos porcentajes y ángulos de excentricidad de los centros de rigidez con respecto a los centros de masa. Se evaluó la respuesta dinámica ante excitación sísmica unidireccional y bidireccional de acelerogramas registrados en terreno firme, para periodos de la estructura aislada entre 1.5 y 3.0 segundos, diseñando los aisladores con cortantes de fluencia del 5% y 10% del peso estructural. Se compararon desplazamientos dinámicos máximos de los aisladores con los de los modelos sin excentricidad. Entre otras conclusiones, están las siguientes: (1) observaron que conforme se incrementa la excentricidad, se aumentan las demandas de ductilidad y se diferencia más la respuesta de los aisladores de esquina en estudio, (2) contrario con lo que pudiera pensarse *a-priori*, las respuestas máximas no se obtienen generalmente cuando la excentricidad se presenta en ambos sentidos; ya que la relación es mucho más compleja y depende tanto de la ubicación del aislador, como de las características del movimiento del terreno, el acoplamiento dinámico de la estructura aislada con los movimientos del terreno, el cortante de fluencia del sistema de aislamiento y el nivel de la excentricidad relativa que se presente (ya sea en la superestructura o en el sistema de aislamiento), entre los parámetros más identificables, (3) las amplificaciones o deamplificaciones de la respuesta de los aisladores con respecto al sistema simétrico no son constantes, se hacen más importantes conforme aumenta el nivel de excentricidad y la diferencia puede llegar a ser notable, hasta un incremento del 60% del desplazamiento, por ejemplo y, (4) la respuesta torsional se amplifica más cuando la excentricidad se produce en el sistema de aislamiento en lugar que en la superestructura.

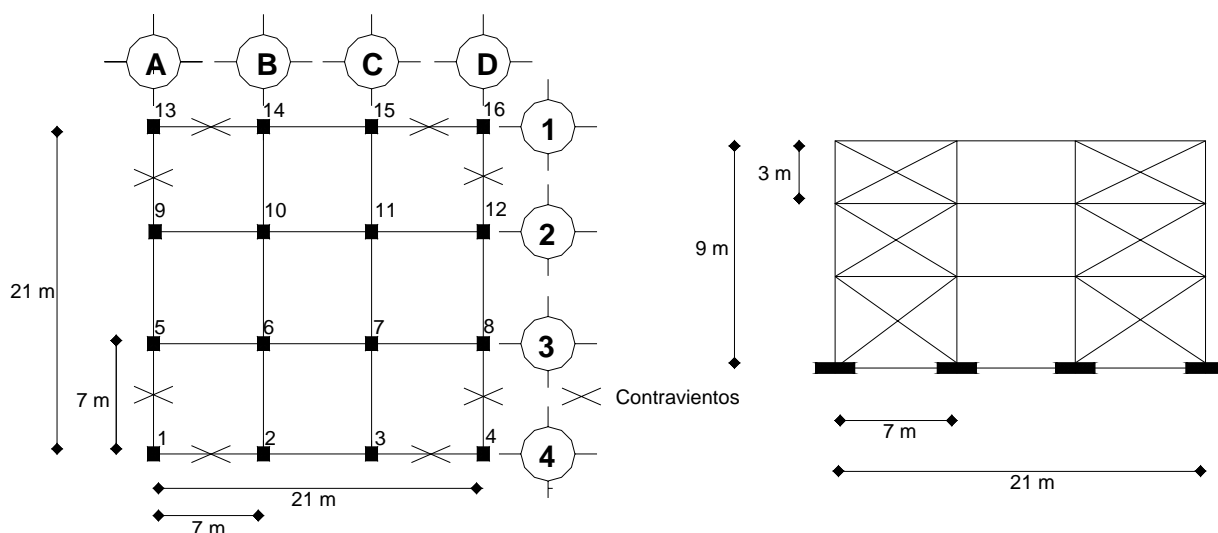
De hecho, los estudios previos dirigidos por Tena constituyen el antecedente del presente estudio, donde se presenta la respuesta torsional de aisladores sísmicos debida a excentricidades asociadas al centro de rigideces de la superestructura, en contraste con el presentado por Tena-Colunga y Gómez-Soberón (2002), donde se debe a la posición asimétrica de los centros de masa.

## 2. MODELOS EN ESTUDIO

Para determinar qué influencia tienen las características dinámicas de la superestructura se considera en este estudio una serie de edificios con distintos periodos fundamentales de vibración en base rígida ( $T_E$ ), que son de 0.187s, 0.5s, 0.75s y 1.2s para los sistemas simétricos de referencia. Dado que en este estudio paramétrico el menor periodo efectivo de las estructuras aisladas sísmicamente considerada en este estudio es  $T_a=1.5s$  y el máximo es  $T_a=3.0s$ , esto implica que los cocientes mínimos entre los periodos en base aislada con respecto a base rígida fluctúan en los siguientes intervalos  $8 \leq T_a/T_E \leq 16$  para  $T_E=0.187s$ ,

$3 \leq T_a/T_E \leq 6$  para  $T_E=0.5s$ ,  $2 \leq T_a/T_E \leq 4$  para  $T_E=0.75s$  y  $1.25 \leq T_a/T_E \leq 2.5$  para  $T_E=1.2s$ . Además, para la relación de la frecuencia lateral y la frecuencia torsional no acoplada de la superestructura ( $\Omega_{0b}$ ) se tomaron dos valores diferentes. Para los modelos donde  $T_E=0.187s$  la relación es de 1.20 y para los modelos restantes ( $T_E=0.50s, 0.75s$  y  $1.2s$ ) esta razón es de 0.80.

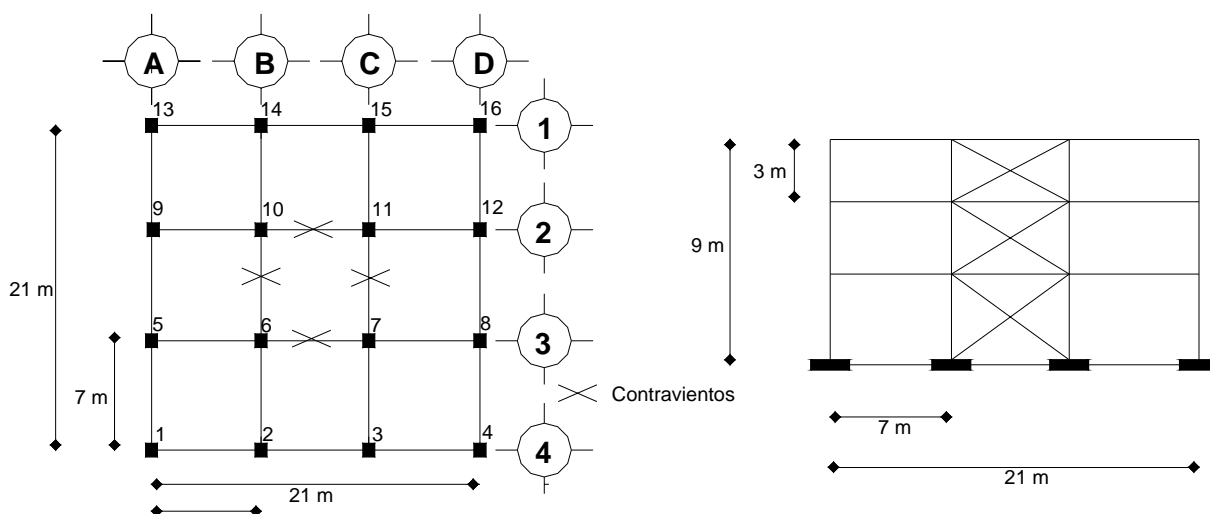
Todos los modelos representan una estructura regular y simétrica en ambos ejes perpendiculares (eje E-W y N-S), conformada por marcos de concreto reforzado compuestos por columnas cuadradas y vigas rectangulares con  $f'_c=250 \text{ kg/cm}^2$  y contravientos de acero A-36 de sección cajón (figs 1 y 2). Cuenta con tres niveles y altura de entrepiso de 3m, con lo que se obtiene una altura total de 9m. Existen tres claros de 7m cada uno en ambas direcciones (E-W y N-S), dando una longitud por lado de 21m. Existen un total de 16 apoyos, donde en cada uno de ellos, se localiza un aislador (figs 1 y 2).



(a) Planta

(b) Elevación

Figura 1. Planta y elevación del modelo SBA1



(a) Planta

(b) Elevación

Figura 2. Planta y elevación de los modelos SBA2, SBA3 y SBA4

Los periodos fundamentales de vibración de la estructura por encima del sistema de aislamiento (superestructura) se obtuvieron básicamente modificando el producto EI de vigas y columnas y la sección transversal de los contravientos de acero, como se identifican en la tabla 1. Los módulos de elasticidad  $E_c$  considerados son congruentes con los propuestos en los reglamentos del Distrito Federal entre 1976 y la nueva versión de 2004. Las relación de la frecuencia lateral y la frecuencia torsional no acoplada de la superestructura ( $\Omega_{\theta}$ ) se variaron modificando la ubicación espacial de los contravientos en planta, obteniéndose una estructura torsionalmente más rígida cuando los contravientos se disponen en el perímetro (fig 1,  $\Omega_{\theta}=1.2$ ) y una torsionalmente más flexible cuando los contravientos se disponen en la zona central (fig 2,  $\Omega_{\theta}=0.8$ ).

<b>Tabla 1. Datos generales de la superestructura en base rígida de los modelos en estudio</b>						
<b>Modelo</b>	<b>T<sub>E</sub>(s)</b>	<b><math>\Omega_{\theta}</math></b>	<b>Elementos de concreto reforzado</b>			<b>Elementos de acero</b>
			Columnas (cm)	Vigas (cm)	$E_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Contravientos (cm)
<b>SBA1</b>	0.187	1.2	65x65	35x75	$14,000\sqrt{f'c}$	25x25x0.8
<b>SBA2</b>	0.5	0.8	55x55	35x60	$10,000\sqrt{f'c}$	15x15x0.68
<b>SBA3</b>	0.75	0.8	46x46	25x53	$8,000\sqrt{f'c}$	15x15x0.65
<b>SBA4</b>	1.2	0.8	36x36	20x42	$8,000\sqrt{f'c}$	15x15x0.52

La superestructura identificada como SBA1, con  $T_E=0.187s$  y  $\Omega_{\theta}=1.2$ , fue utilizada en todos los estudios previos dirigidos por el primer autor. La superestructura identificada como SBA2, con  $T_E=0.5s$  y  $\Omega_{\theta}=0.8$  se eligió con la finalidad de observar las respuestas de los aisladores que cumplen con disposición del reglamento UBC de los Estados Unidos para poder utilizar el método estático, donde se recomienda que el periodo fundamental de la superestructura debe de ser cuando menos tres veces el periodo de la estructura en base aislada. La superestructura identificada como SBA3, con  $T_E=0.75s$  y  $\Omega_{\theta}=0.8$  se consideró con la finalidad de observar las respuestas de los aisladores que cumplen con una recomendación proveniente de la experiencia Neozelandesa (Skinner *et al*, 1993), donde se recomienda que el periodo fundamental de la superestructura debe de ser cuando menos dos veces el periodo de la estructura en base aislada. Estas recomendaciones pretenden prevenir que se presente el fenómeno de amplificación dinámica en el sistema aislador-estructura, y de minimizar el impacto de los modos superiores de vibración de la superestructura.

La superestructura identificada como SBA4, con  $T_E=1.2s$  y  $\Omega_{\theta}=0.8$ , se eligió dado que es precisamente para este caso de estudio para el cual Nagarajaiah *et al.* (1993) reportan las mayores amplificaciones de la respuesta torsional, lo cual no debe sorprender pues utilizó parámetros que definen a una estructura torsionalmente muy flexible, además de que en su caso, el cociente  $T_a/T_E=2.12/1.2=1.77$  se encuentra debajo del mínimo recomendado internacionalmente, que es  $T_a/T_E=2$ , como proponen los neozelandeses. De la observación de la fig 2 y la tabla 1, se puede concluir que estructuras de este tipo son excepcionales en una práctica de diseño sísmico racional.

### 3. ACELEROGRAMAS EMPLEADOS

Se utilizaron acelerogramas de estaciones ubicadas en terreno firme en la zona costera del Pacífico mexicano, dos en el estado de Guerrero y otra en el estado de Colima. Los registros corresponden a tres sismos intensos: (a) estación La Unión del sismo del 19 de septiembre de 1985 ( $M_s=8.1$ ), registros

representativos de terreno firme sin efectos de sitio; (b) estación Termoeléctrica de Manzanillo del sismo del 9 de octubre de 1995 ( $M_w= 8.0$ ), registros que incluyen efectos de sitio y, (c) registros de la estación San Marcos del sismo del 25 de abril de 1989 ( $M_s= 6.9$ ), de tipo epicentral o impulsivo. La Tabla 2 resume las principales características de cada uno de los acelerogramas empleados en el estudio. En la figura 3 se presenta la componente E-W de los acelerogramas empleados en este estudio.

Tabla 2. Características de los registros acelerográficos empleados en el estudio							
Estación	Duración Total (s)	Registro E-W			Registro N-S		
		$A_{max}$ ( $cm/s^2$ )	$V_{max}$ ( $cm/s$ )	Duración de Arias (s)	$A_{max}$ ( $cm/s^2$ )	$V_{max}$ ( $cm/s$ )	Duración de Arias (s)
UNION	62.3	127	12.6	26.4	174	21.0	24.2
SMRZ	30.4	148	16.7	6.47	165	17.7	5.03
TMANZ	154.6	387	30.7	38.8	381	28.9	45.6

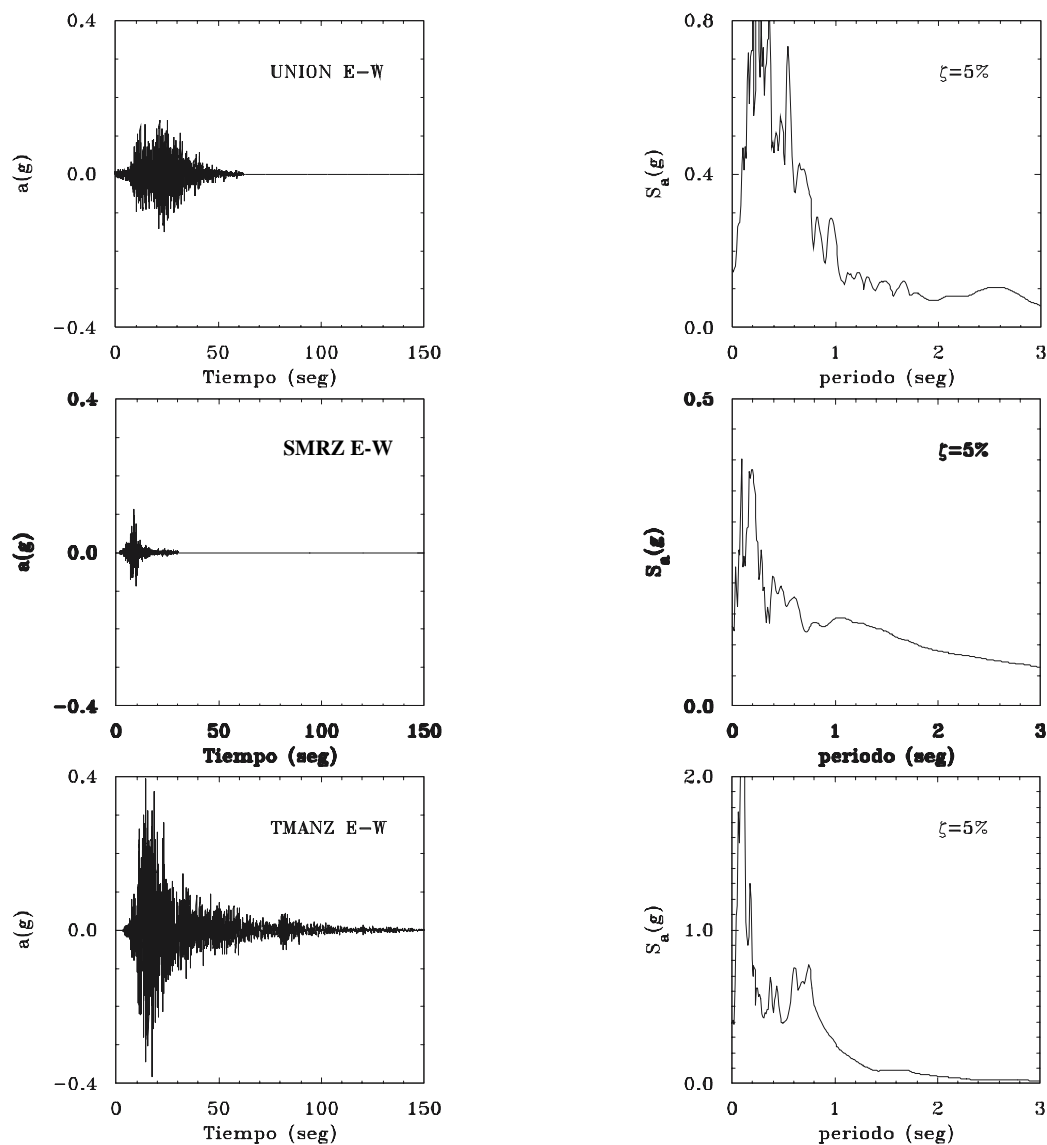


Figura 3. Acelerogramas (E-W) y espectros de respuesta de las estaciones UNION, SMRZ y TMANZ

#### 4. CARACTERÍSTICAS DE LOS AISLADORES BILINEALES

En este estudio, fueron seleccionados aisladores bilineales con rigidez posterior a la fluencia,  $k_2$ , del 10% de la rigidez inicial  $k_1$  ( $k_2/k_1=0.10$ ). El diseño de los aisladores sísmicos empleados se basó en trabajos anteriores (por ejemplo, Tena, 1997; Gómez, 2000) donde se emplearon elastómeros laminados con corazón de plomo, considerando recomendaciones del UBC y de la práctica neozelandesa.

Las propiedades mecánicas globales del sistema de aislamiento bilineal se definieron de acuerdo a un requisito mecánico solicitado por los reglamentos UBC-97 e IBC-2000 de los Estados Unidos para poder utilizar el método estático, que establece que la rigidez efectiva ( $k_{eff}$ ) del sistema de aislamiento para el desplazamiento de diseño debe ser mayor a un tercio de la rigidez efectiva al 20% del desplazamiento de diseño ( $k_{eff2}$ ), esto es,  $k_{eff} > 1/3 k_{eff2}$ , como se muestra en la figura 4. Para satisfacer los aisladores bilineales los requisitos mencionados con anterioridad, se deben de satisfacer las siguientes relaciones, como se demuestra en (Tena-Colunga, 1997):

$$k_1 = 5k_{eff} \tag{1}$$

$$V_Y = 0.555V_{max} \tag{2}$$

$$\Delta_Y = 0.111\Delta_{max} = \frac{1}{9}\Delta_{max} \tag{3}$$

$$\mu_{max} = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_Y} = 9 \tag{4}$$

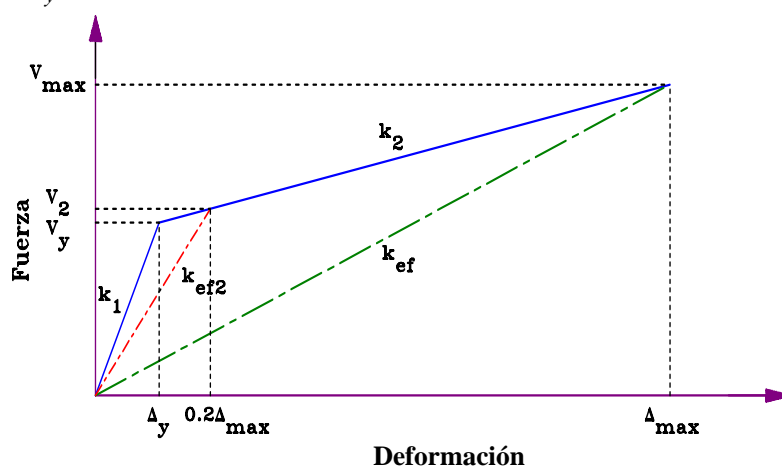


Figura 4. Propuesta mecánica de los reglamentos UBC e IBC para un aislador bilineal

#### 5. SISTEMA SIMÉTRICO DE REFERENCIA

Para evaluar el impacto de las excentricidades estáticas de la superestructura en la respuesta sísmica de los aisladores, se necesita primero un marco de referencia para comparar tales respuestas. Por lo tanto, se estudió la respuesta sísmica de los sistemas donde todos los aisladores tienen las mismas propiedades y son distribuidos uniformemente dentro de la planta. Todos los modelos empleados se excitan con la acción bidireccional de los movimientos del terreno. En la mayoría de los casos se observa que los aisladores incursionan en el intervalo no lineal, es decir, desarrollan una respuesta de desplazamiento mayor a la de fluencia. Las mayores demandas ocurren ante la acción de los registros de la estación TMANZ, por lo que

en la figura 5 se grafica y compara la relación entre el periodo aislado  $T_a$  y las demandas máximas de ductilidad para los modelos SBA1, SBA2, SBA3 y SBA4.

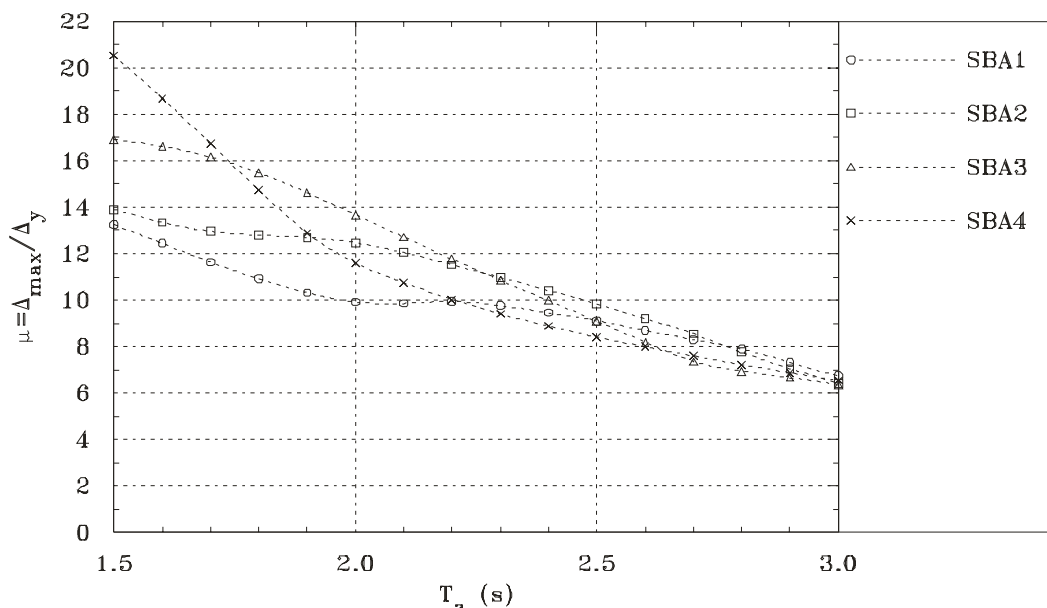


Figura 5. Relación entre el periodo aislado  $T_a$  y las demandas de ductilidad  $\mu$  para excitación bidireccional (TMANZ) sin excentricidad, modelos SBA1, SBA2, SBA3 y SBA4

De la figura 5 se observa que, en todos los modelos en estudio, las demandas de ductilidad son mayores en los periodos aislados efectivos “cortos” del intervalo en estudio ( $T_a < 2s$ ), descendiendo en forma gradual para valores mayores de  $T_a$ , lo que indica un contenido de energía importante de este acelerograma en este intervalo de periodos. En general, las menores demandas de ductilidad ante los registros de TMANZ se presentan para todo el intervalo de periodos  $T_a$  en estudio para los modelos SBA1, que tiene más desacoplados los periodos efectivos en base aislada con respecto a base rígida ( $8 \leq T_a/T_E \leq 16$ ), como dictaría una buena práctica de diseño de aislamiento sísmico. En contraste, los modelos SBA4, presentan demandas muy altas en el intervalo  $1.5s \leq T_a \leq 2s$ , donde estos modelos no cumple claramente con las recomendaciones mínimas de la relación  $T_a/T_E$  propuestas internacionalmente, que es  $T_a/T_E \geq 2$ . En los modelos SBA4, esto se satisface cuando  $T_a \geq 2.4s$ , donde se observan menores demandas, más cercanas además a las de otros modelos en estudio. Los modelos que cumplen las recomendaciones mínimas propuestas por los reglamentos norteamericanos UBC e IBC (SBA2,  $T_a/T_E \geq 3$ ) y de la práctica neozelandesa (SBA3,  $T_a/T_E \geq 2$ ), presentan en general menores demandas que los modelos SBA4 en el intervalo de periodos más crítico ( $T_a < 2s$ ), siendo relativamente mejor la respuesta del modelo que cumple con la recomendaciones norteamericanas (SBA2).

En el estudio también se observa que las menores respuestas están asociadas a la estación UNION (no mostrado, Escamilla 2005). Quizá esto pudiera resultar sorpresivo del análisis de la información general presentada en la tabla 2 y en la figura 3, dado que SMRZ es un acelerograma de un sismo de menor magnitud; sin embargo, es un registro de tipo epicentral que contiene un pulso de velocidad importante que afecta severamente a las estructuras con periodos  $T_a > 1s$ , como se señalado en numerosos estudios previos dirigidos por el primer autor.

## 6. ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS CON EXCENTRICIDADES EN LA SUPERESTRUCTURA

Se estudia la influencia de la excentricidad en los desplazamientos dinámicos máximos, cuando los porcentajes de excentricidad son del 5%, 10%, 15% y 20%. Como se ha comentado en secciones anteriores, las propiedades dinámicas de la superestructura cambian al incrementarse la excentricidad, ya que la superestructura se hace más rígida, por lo tanto, se reduce el periodo fundamental de vibración de la superestructura y aumenta la relación de frecuencias torsional-lateral  $\Omega_{\theta_s}$ .

### 6.1. Excentricidad en dos direcciones

Se presentan las respuestas dinámicas de los aisladores en estudio, cuando se excitan a los modelos con las componentes bidireccionales de los registros sísmicos seleccionados y con la excentricidad ubicada a un ángulo de  $45^\circ$  medido a partir del eje  $x$  (fig 6).

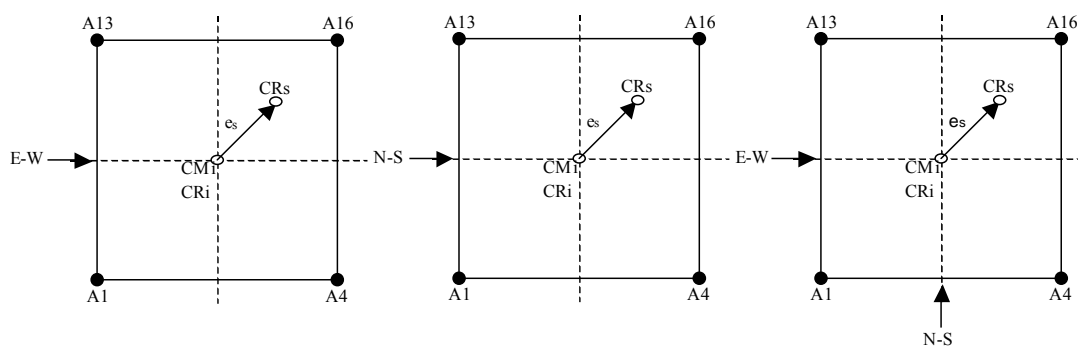


Figura 6. Excentricidades asociadas a las rigideces en dos direcciones (acción bidireccional)

Por fines de espacio se presentan los resultados únicamente de todos los modelos para la estación TMANZ, aunque los resultados para las estaciones SMRZ y UNION son similares, pero con demandas menores (Escamilla, 2005). En las figuras 7 a 10 se presentan las demandas de ductilidad que desarrollan los aisladores en estudio ante la acción bidireccional del movimiento del terreno de la estación TMANZ, para los diferentes modelos utilizados en este estudio.

Para los modelos SBA1 (fig 7), que tienen la superestructura más rígida ( $T_s = 0.183$  seg) y con la mejor relación  $T_a/T_E$  desde el punto de vista de la eficiencia del aislamiento sísmico, el fenómeno de acoplamiento dinámico por torsión no es evidente, por lo que todos los desplazamientos de los aisladores en estudio son bastante similares para todas las excentricidades  $e_s$  en estudio, es decir, parece como si no existiera un aumento relativo en la excentricidad en la superestructura. Esta reducción favorable de los efectos de torsión la propician las relaciones  $T_a/T_E$  consideradas en estos modelos ( $8 \leq T_a/T_E \leq 16$ ), demostrando la importancia que tiene este parámetro para garantizar una respuesta satisfactoria en estructuras aisladas sísmicamente. Los resultados de la figura 7 son para una relación de frecuencias torsional y lateral de  $\Omega_{\theta_s} = 1.20$ , pero se realizaron simulaciones con  $\Omega_{\theta_s}$  menores ( $\Omega_{\theta_s} = 0.8$  y  $\Omega_{\theta_s} = 0.6$ ), y los resultados fueron similares.

Para los modelos que cumplen con las relaciones  $T_a/T_E$  mínimas propuestas por los reglamentos norteamericanos UBC e IBC (SBA2,  $T_a/T_E \geq 3$ , fig 8) y de la práctica neozelandesa (SBA3,  $T_a/T_E \geq 2$ , fig 9), así como para los modelos que no cumplen estos mínimos en todo el intervalo de periodos considerado (SBA4,  $T_a/T_E \geq 2$  a partir de  $T_a > 2.4s$ , fig 10), se observa que las demandas de ductilidad para todos los



aisladores de esquina son muy variables. Resulta muy complejo definir un solo factor como el responsable de esta variabilidad, ya que las demandas dependen de varios, que entre otros son:

- (a) el nivel de excentricidad; al incrementar las excentricidades, cambian las propiedades dinámicas de la superestructura. En este caso, la estructura se convierte en una más rígida reduciendo su periodo fundamental de vibración y aumentando las relaciones de frecuencias torsional-lateral  $\Omega_{ob}$  de la superestructura. En general, al aumentar el nivel de excentricidad, aumentan las demandas de ductilidad.
- (b) las características dinámicas del sistema aislado; en este caso, el periodo fundamental de vibración se hace variar de 1.5 a 3.0 segundos, pero la relación de frecuencias torsional-lateral  $\Omega_{ob}$  permanece constante en todas las simulaciones empleadas en este estudio  $\Omega_{ob} = 1.29$ .

Otro parámetro que influye y que no se ilustra en las figuras 7 a 10, pero que se discute en Escamilla (2005) es:

- (c) las características de los registros sísmicos empleados (contenidos de frecuencias, fases intensas, efectos de sitio, etc). De las curvas obtenidas para los registros acelerográficos TMANZ (figs 7 a 10), SMRZ (no mostrados) y UNION (no mostrados), se observa que las curvas de demandas de ductilidad son diferentes en forma para cada par de registros en estudio. Generalmente, las demandas de ductilidad máximas están asociadas a la estación TMANZ, considerando que las demandas menores se obtienen en algunas ocasiones para la estación UNION y en otras para la estación SMRZ.

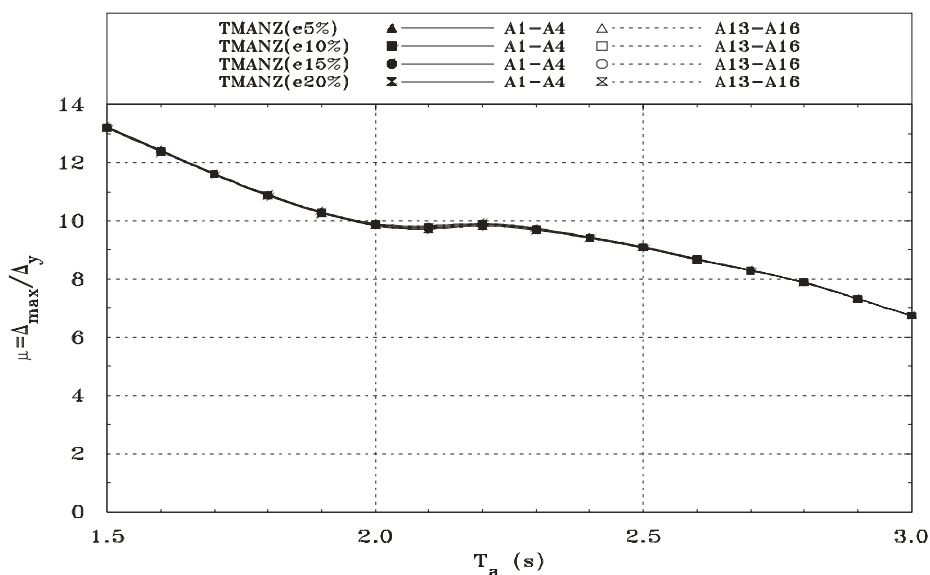


Figura 7. Relación entre el periodo aislado  $T_a$  y las demandas de ductilidad  $\mu$  para excitación bidireccional (TMANZ) con excentricidades  $e_s = 5\%$ ,  $10\%$ ,  $15\%$ ,  $20\%$  en dos direcciones, modelos SBA1.

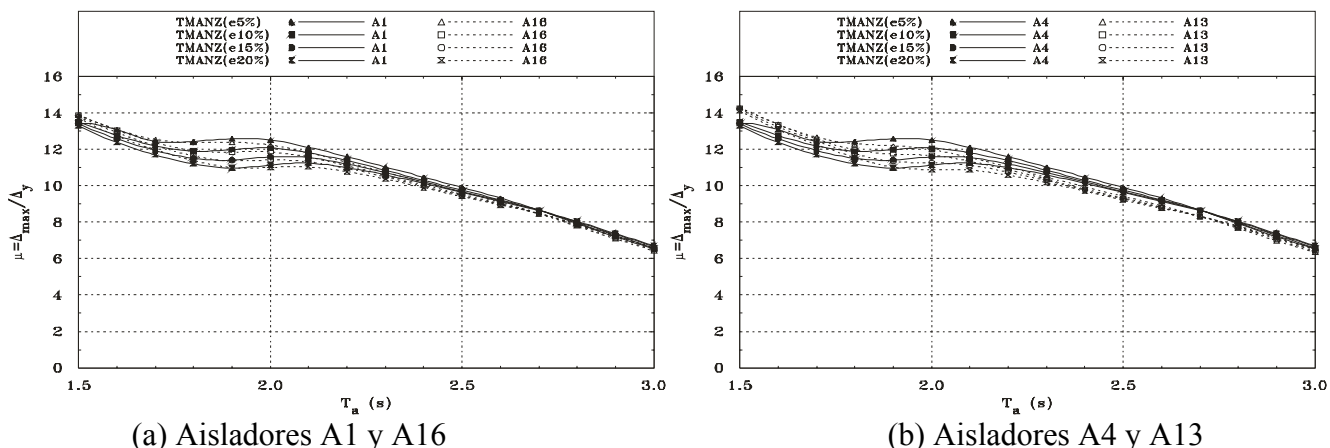


Figura 8. Relación entre el periodo aislado  $T_a$  y las demandas de ductilidad  $\mu$  para excitación bidireccional (TMANZ) con excentricidades  $e_s = 5\%$ ,  $10\%$ ,  $15\%$ ,  $20\%$  en dos direcciones, modelos SBA2.

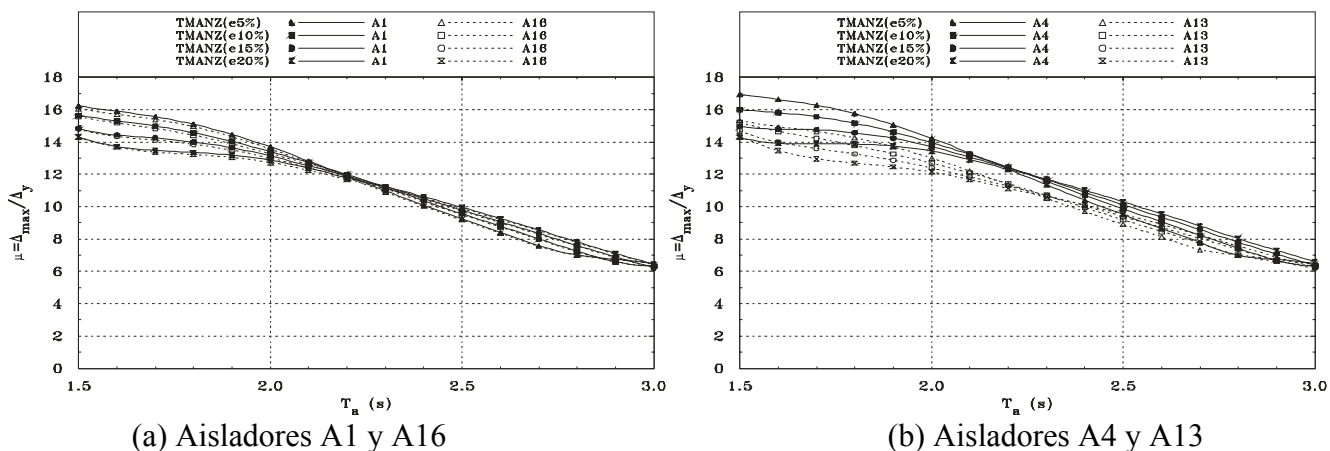


Figura 9. Relación entre el periodo aislado  $T_a$  y las demandas de ductilidad  $\mu$  para excitación bidireccional (TMANZ) con excentricidades  $e_s = 5\%$ ,  $10\%$ ,  $15\%$ ,  $20\%$  en dos direcciones, modelos SBA3.

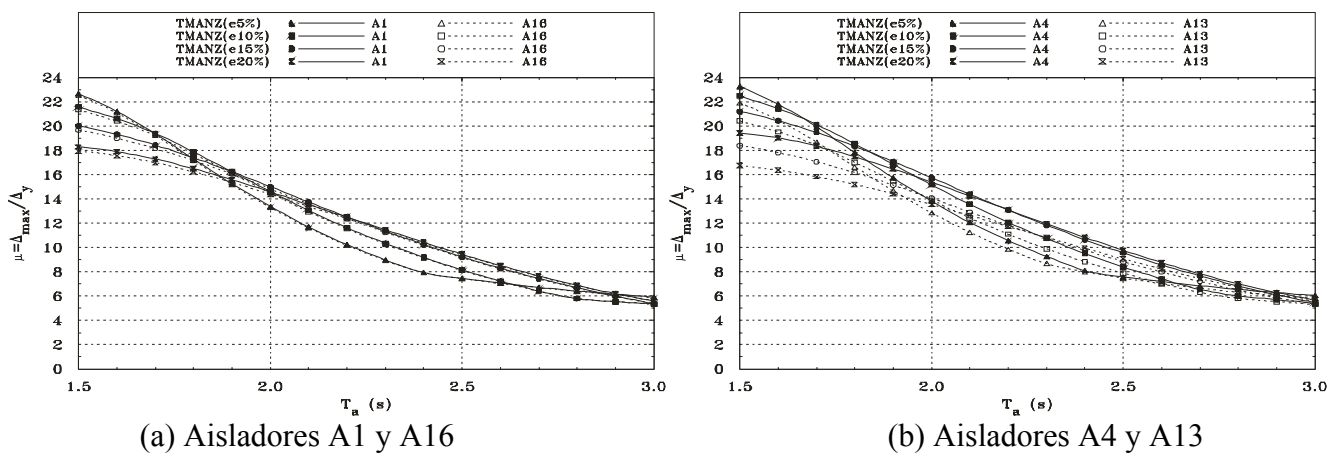


Figura 10. Relación entre el periodo aislado  $T_a$  y las demandas de ductilidad  $\mu$  para excitación bidireccional (TMANZ) con excentricidades  $e_s = 5\%$ ,  $10\%$ ,  $15\%$ ,  $20\%$  en dos direcciones, modelos SBA4.

Para los modelos SBA2, SBA3 y SBA4 (figs 8 a 10), en general, las demandas de ductilidad máximas ocurren para la estación TMANZ y los aisladores A1 y A4 en la mayoría del intervalo de periodos seleccionado.

De la comparación relativa de los resultados de las figuras 8, 9 y 10, se puede concluir lo siguiente:

- (d) la máxima amplificación torsional se observa para los modelos SBA4, donde se presentan los valores más elevados para las demandas de ductilidad y, además, existe mayor diferencia entre las curvas para cada nivel de excentricidad estática  $e_s$  considerada en el estudio.
- (e) los modelos que cumplen con la relación  $T_a/T_E$  mínima propuesta por los reglamentos norteamericanos UBC e IBC (SBA2, fig 8) presentan menores demandas de ductilidad y menores amplificaciones torsionales que los modelos que cumplen con la relación  $T_a/T_E$  mínima propuesta en la práctica neozelandesa (SBA3, fig 9), lo que sugiere que la recomendación de los reglamentos estadounidenses ofrece ventajas sobre la propuesta neozelandesa para reducir potenciales respuestas torsionales indeseables en los aisladores.

Las mayores respuestas dinámicas de los aisladores se presentan en la estación TMANZ para los modelos SBA4 (fig 10), que son los que presentan mayor flexibilidad en la superestructura.

De lo observado en las figuras anteriores (figs 8 a 10) se tiene que, al comparar las respuestas de los aisladores, cuando se incrementa la excentricidad de la superestructura en los porcentajes del 5%, 10%, 15% y 20%, las demandas de ductilidad de los aisladores en estudio experimentan incrementos o decrementos dependiendo del acoplamiento del sistema de aislamiento y de las características dinámicas de la superestructura. Por lo tanto, resulta muy complejo definir qué excentricidad es la que provoca demandas de ductilidad máximas para un periodo efectivo  $T_a$  dado, aunque la lógica común sugeriría que a mayor excentricidad, mayor debería ser la demanda para cualquier valor de  $T_a$ , que como se aprecia de las figs 8 a 10, no siempre sucede, pues las curvas para distintas  $e_s$  se cruzan. Como se observa en las curvas de las figs 8 a 10, en algunas ocasiones las demandas se comportan como se espera *a-priori*, es decir, al incrementar la excentricidad de la superestructura, los desplazamientos dinámicos también se incrementan, obteniendo las demandas de ductilidad máximas para  $e_s = 20\%$ . Sin embargo, en estas curvas también se observa que en algunas ocasiones las demandas de ductilidad máximas están asociadas a excentricidades menores (por ejemplo  $e_s = 5\%$  y  $10\%$ ).

En general, las demandas de ductilidad máximas dependen fuertemente de las características propias del movimiento del terreno y de las características dinámicas de la superestructura. Por ejemplo, para las estaciones UNION y SMRZ en los modelos SBA2, SBA3 y SB4 (no mostrado), conforme se incrementa el periodo de la superestructura en el intervalo considerado, las demandas de ductilidad se reducen ligeramente. En cambio, para la estación TMANZ, el comportamiento es contrario, es decir, conforme aumenta la flexibilidad de la superestructura (de SBA2 a SBA3 y a SBA4, figs 8 a 10), las demandas de ductilidad máximas se incrementan y, en general, para esta estación las demandas de ductilidad sobrepasan el límite  $\mu = 9$  en la mayor parte del intervalo de periodos efectivos de aislamiento en estudio.

Con respecto a las demandas de ductilidad que experimentan aisladores de esquina en sistemas torsionalmente acoplados, es difícil llegar a una conclusión general sobre la relación óptima entre el periodo de la estructura en base rígida y el periodo efectivo del sistema aislado, ya que las respuestas máximas observadas en este estudio dependen en gran parte de las características de los movimientos del

terreno y propiedades dinámicas de la estructura. Quizá sólo se pueda concluir que el aumento del acoplamiento torsional de la superestructura (aumento de la excentricidad) impacta en menor medida a sistemas donde el periodo fundamental de la superestructura en base rígida es notablemente menor al periodo efectivo del sistema aislado (modelos SBA1), que aquéllas en que es más próximo (modelos SBA4).

### 7. COMPARACIÓN DE LOS DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS DE LOS AISLADORES DE SISTEMAS CON ASIMETRÍA EN LA SUPERESTRUCTURA CON RESPECTO A SISTEMAS SIMÉTRICOS.

Para comparar los desplazamientos máximos que experimentan los aisladores en estudio (A1, A4, A13 y A16), cuando no existe excentricidad en la superestructura, con aquéllos cuando existe excentricidad en la superestructura, los desplazamientos máximos de los aisladores de los sistemas asimétricos son normalizados con aquéllos obtenidos en los sistemas simétricos para excentricidad bidireccional. En este trabajo, por restricciones de espacio, sólo se presentan los resultados para la estación TMANZ.

Para los modelos SBA1 (fig 11), se observa que prácticamente no existen amplificaciones o deamplificaciones en los aisladores de esquina de los modelos asimétricos con respecto a los simétricos en el intervalo de periodos considerado, ya que estos factores permanecen casi constantes a lo largo del intervalo bajo estudio para todos los registros sísmicos seleccionados. El comportamiento de los modelos SBA1 es similar cuando se excitan con los registros de las estaciones SMRZ y UNION (no mostrado, Escamilla 2005).

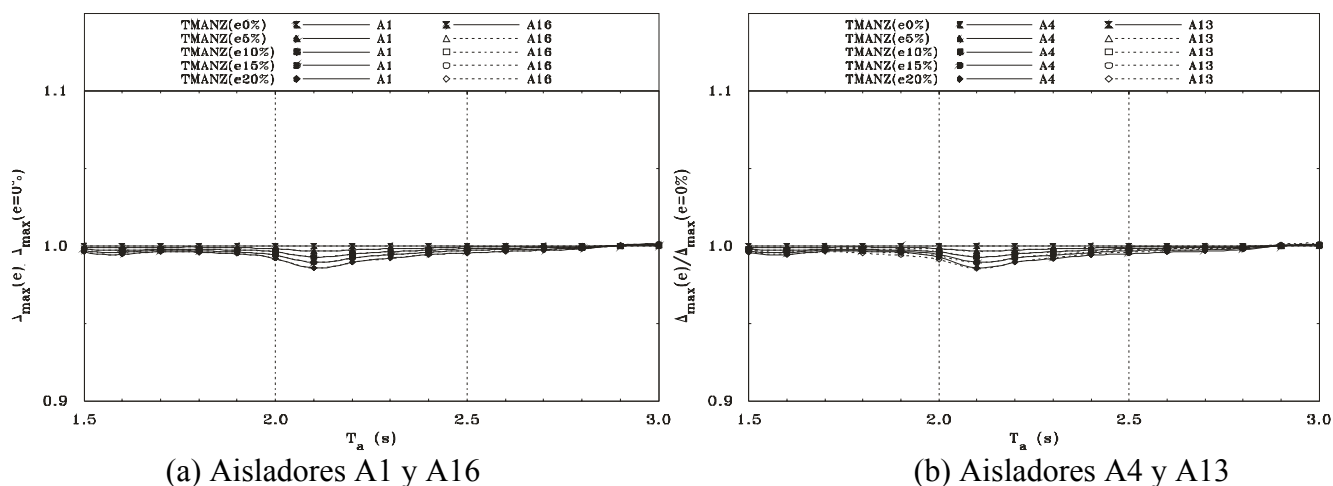


Figura 11. Relación entre los desplazamientos máximos de los aisladores de los sistemas asimétricos [ $\Delta_{max}(e)$ ] y los sistemas simétricos [ $\Delta_{max}(e = 0\%)$ ], bajo excitación sísmica bidireccional del registro TMANZ, modelos SBA1.

Para los modelos SBA2 (fig 12), los cuales cumplen con las relaciones  $T_a/T_E$  mínimas propuestas por los reglamentos norteamericanos UBC e IBC, se observa una mayor variación en las curvas que para los modelos SBA1, y lo que llama poderosamente la atención es que para la mayor parte del intervalo de periodos en estudio ( $1.5s \leq T_a \leq 2.7s$ ), los aisladores de esquina de los modelos asimétricos experimentan desplazamientos máximos menores con respecto a los modelos simétricos para la estación TMANZ,

presentándose amplificaciones de los desplazamientos sólo en el intervalo  $2.8s \leq T_a \leq 3.0s$ . Este comportamiento es atípico y excepcional, ya que ante los otros registros bajo estudio (SMRZ, UNION), las curvas muestran amplificaciones y deamplificaciones de los desplazamientos de los aisladores de esquina con respecto al sistema simétrico (Escamilla, 2005). En general, las amplificaciones y deamplificaciones máximas obtenidas para estos modelos están cercanas al 15% para TMANZ, 20% para UNION y 30% para SMRZ.

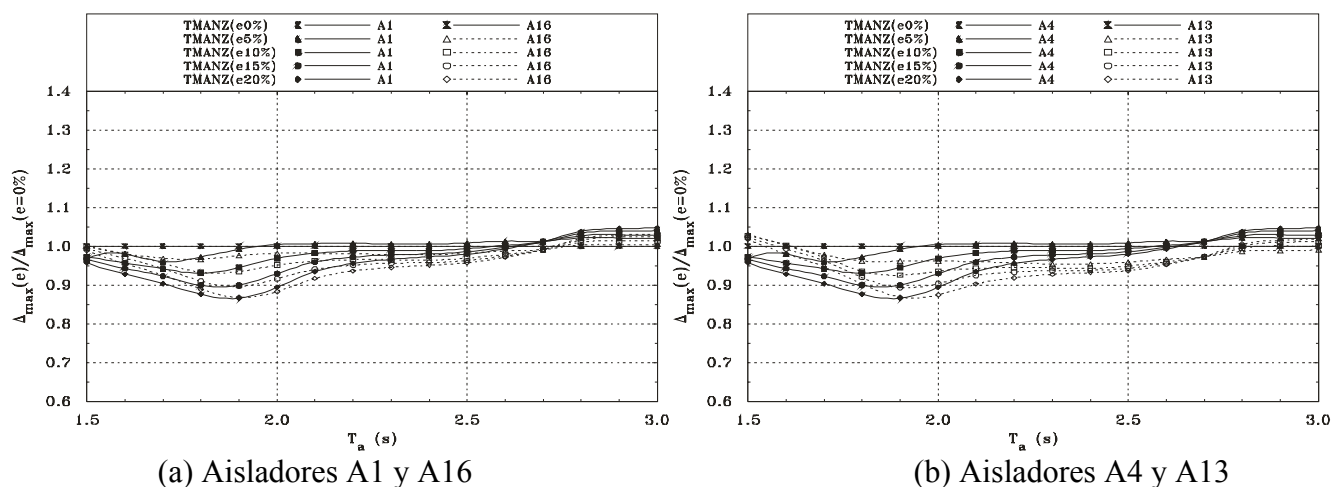


Figura 12. Relación entre los desplazamientos máximos de los aisladores de los sistemas asimétricos  $[\Delta_{max}(e)]$  y los sistemas simétricos  $[\Delta_{max}(e = 0\%)]$ , bajo excitación sísmica bidireccional del registro TMANZ, modelos SBA2.

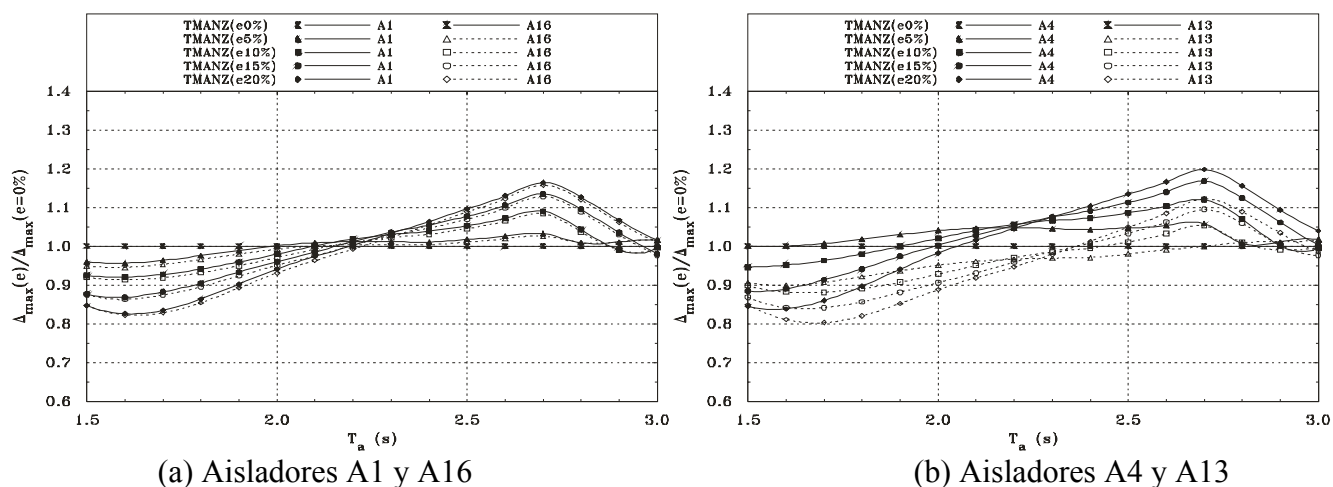


Figura 13. Relación entre los desplazamientos máximos de los aisladores de los sistemas asimétricos  $[\Delta_{max}(e)]$  y los sistemas simétricos  $[\Delta_{max}(e = 0\%)]$ , bajo excitación sísmica bidireccional del registro TMANZ, modelos SBA3.

Para los modelos SBA3 (fig 13), los cuales cumplen con las relaciones  $T_a/T_E$  mínimas propuestas por una recomendación neozelandesa (Skinner *et al* 1993), se observa mayor variación en las curvas que para los modelos SBA1 y SBA2. En estas curvas se observa que para la mayoría de los aisladores de esquina se experimentan desplazamientos máximos menores en los modelos asimétricos con respecto a los modelos simétricos para la estación TMANZ en el intervalo de periodos  $1.5s \leq T_a \leq 2.2s$  (aisladores A1, A16 y A13),

presentándose amplificaciones de los desplazamientos de la mayoría de los aisladores de esquina en el intervalo  $2.3s \leq T_a \leq 3.0s$  (aisladores A1, A16 y A4). Se pueden hacer observaciones similares para los registros SMRZ y UNION, aunque las curvas difieren en forma y amplitud (Escamilla, 2005). En general, las amplificaciones y deamplificaciones máximas obtenidas para los modelos SBA3 están cercanas al 20% para TMANZ y 30% para UNION y SMRZ.

Para los modelos SBA4 (fig 14) se observa para la estación TMANZ una mayor amplificación (deamplificación) del desplazamiento máximo de los aisladores de esquina conforme aumenta la excentricidad en comparación a los modelos SBA3, SBA2 y SBA1, pero se presentan curvas con trayectorias bastante similares para todos los aisladores en estudio y, generalmente, los factores de amplificación máximos (1.30, 1.35, 1.20 y 1.35 para los aisladores A1, A4, A13 y A16 respectivamente) se presentan en el periodo  $T_a = 2.0$  segundos para todos los aisladores en estudio. Para la estación UNION (no mostrada), las curvas de los factores de amplificación (o deamplificación) son bastante dispersas a lo largo del intervalo de periodos seleccionado, y el mayor factor de amplificación obtenido fue de 1.9. Para la estación SMRZ (no mostrada) las curvas de los factores de amplificación (deamplificación) son similares para los cuatro aisladores. El mayor factor de amplificación (deamplificación) fue de 1.3.

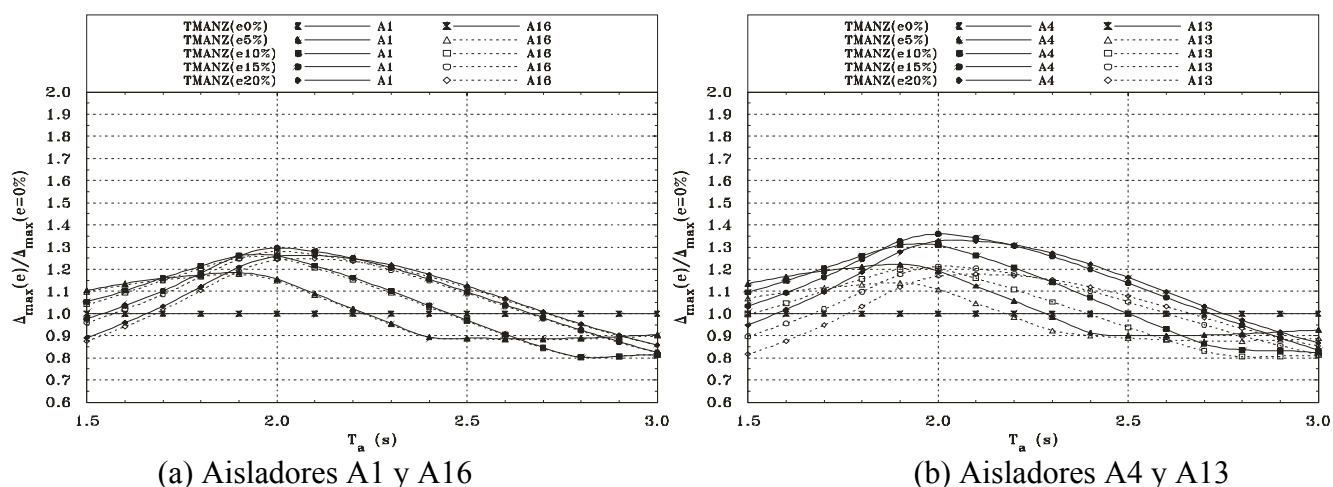


Figura 14. Relación entre los desplazamientos máximos de los aisladores de los sistemas asimétricos [ $\Delta_{max}(e)$ ] y los sistemas simétricos [ $\Delta_{max}(e = 0\%)$ ], bajo excitación sísmica bidireccional del registro TMANZ, modelos SBA4.

De las figuras anteriores se observa para todos los aisladores en estudio (A1, A4, A13 y A16) y, en general, para todos los modelos empleados, como se esperaba, las amplificaciones (o deamplificaciones) de las respuestas del sistema asimétrico con respecto al sistema simétrico se incrementan cuando aumenta la excentricidad de la superestructura, aunque estos incrementos no son constantes, ya que varían en el intervalo de periodos bajo estudio para todos los modelos y movimientos sísmicos seleccionados. Es importante aclarar que la excentricidad máxima  $e_s = 20\%$  no siempre es la que amplifica más los desplazamientos del sistema asimétrico respecto al simétrico, ya que en algunas ocasiones, excentricidades pequeñas (como por ejemplo,  $e_s = 5\%$ ) provocan amplificaciones importantes, inclusive mayores que  $e_s = 20\%$ . Las características de las curvas de estas amplificaciones (o deamplificaciones) varían para cada registro sísmico en forma y localización de los factores de amplificación o deamplificación máximos y mínimos. Para acciones y excentricidades bidireccionales, no es claro qué

aislador experimenta mayores factores de amplificación o deamplificación, ya que resulta muy complejo definir qué aislador se encuentra en el lado rígido o flexible de la superestructura.

### 8. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS CON EXCENTRICIDAD EN DOS DIRECCIONES CON MODELOS SIN EXCENTRICIDAD.

Se considera importante evaluar las diferencias relativas entre las demandas de desplazamientos máximos cuando la excentricidad se ubica en dos direcciones  $[\Delta_{max}(e2D)]$  y cuando se localiza en una sola dirección  $[\Delta_{max}(e1D)]$ , debido a excitación sísmica bidireccional. Esta evaluación es con la finalidad de observar qué excentricidad (unidireccional o bidireccional) provoca mayores desplazamientos en los aisladores en estudio, ya que *a-priori* se supone que los mayores desplazamientos generalmente deben ocurrir cuando la excentricidad se localiza en dos direcciones; sin embargo, la relación resulta muy compleja, considerando que en el estudio intervienen diversas variables, las cuales provocan que la estructura cambie sus propiedades dinámicas constantemente y esto origine que no siempre los momentos torsionantes que se produzcan en direcciones ortogonales se sumen, pues en muchas ocasiones actúan en sentidos opuestos.

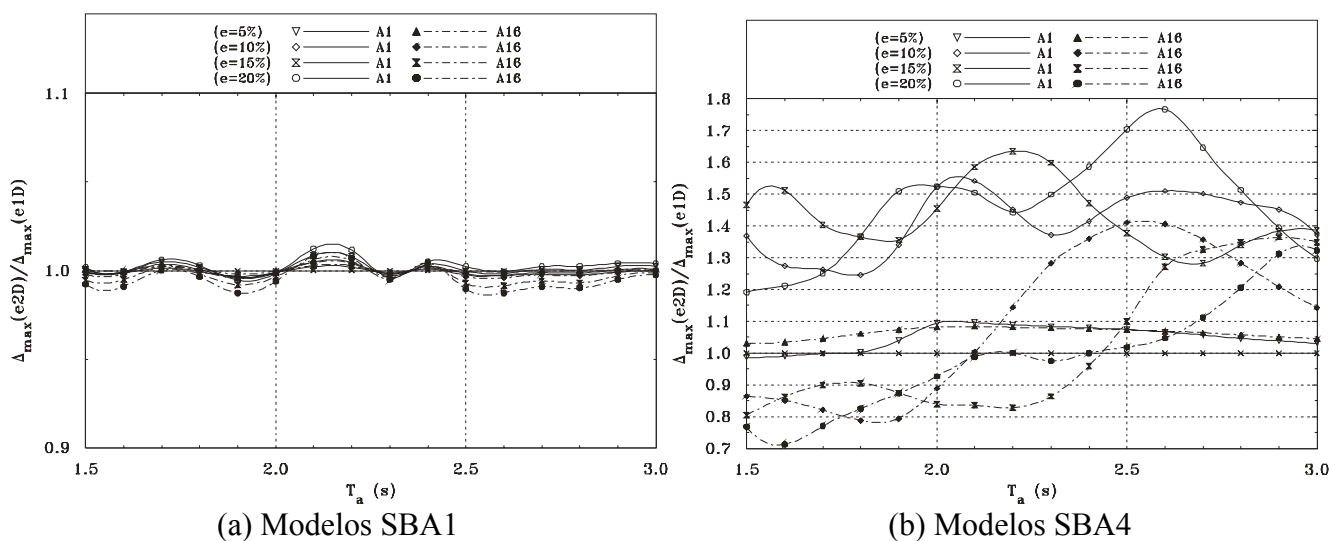


Figura 15. Relación entre los desplazamientos máximos con excentricidades en dos direcciones y una dirección  $[\Delta_{max}(e2D)/\Delta_{max}(e1D)]$ , bajo la excitación de la estación UNION, modelos SBA1 y SBA4.

En las figuras 15 a 17 se presentan algunas curvas que relacionan el cociente entre los desplazamientos de los aisladores de esquina A1 y A16 con excentricidades en dos direcciones con respecto a excentricidades en una dirección. El comportamiento para los aisladores A4 y A13 es similar al comportamiento de los aisladores A1 y A16, por lo que por fines de espacio no se presentan estas gráficas. En general, las mayores amplificaciones de los desplazamientos de los sistemas con excentricidad bidireccional con respecto a los sistemas con excentricidad unidireccional se presentan para el modelo SBA4 para el aislador A1 para todos los registros considerados en el estudio (figs 15 y 16), encontrándose factores alrededor de 1.8 para la estación UNION (fig 15b). Para el caso del aislador A16, las trayectorias de los factores son muy complejas, ya que éstas varían para ciertos porcentajes de excentricidad, así como para algunas franjas del intervalo de periodos seleccionado y, en general, para todos los registros sísmicos, por

lo que no es muy claro qué tipo de excentricidad (dos direcciones o una dirección) provoca las mayores respuestas en los aisladores en estudio.

Para el modelo con superestructura más rígida SBA1 (fig 15a), los desplazamientos máximos para excentricidades bidireccionales y unidireccionales son prácticamente iguales, por lo que no se observan grandes amplificaciones o deamplificaciones en los desplazamientos que experimentan los aisladores.

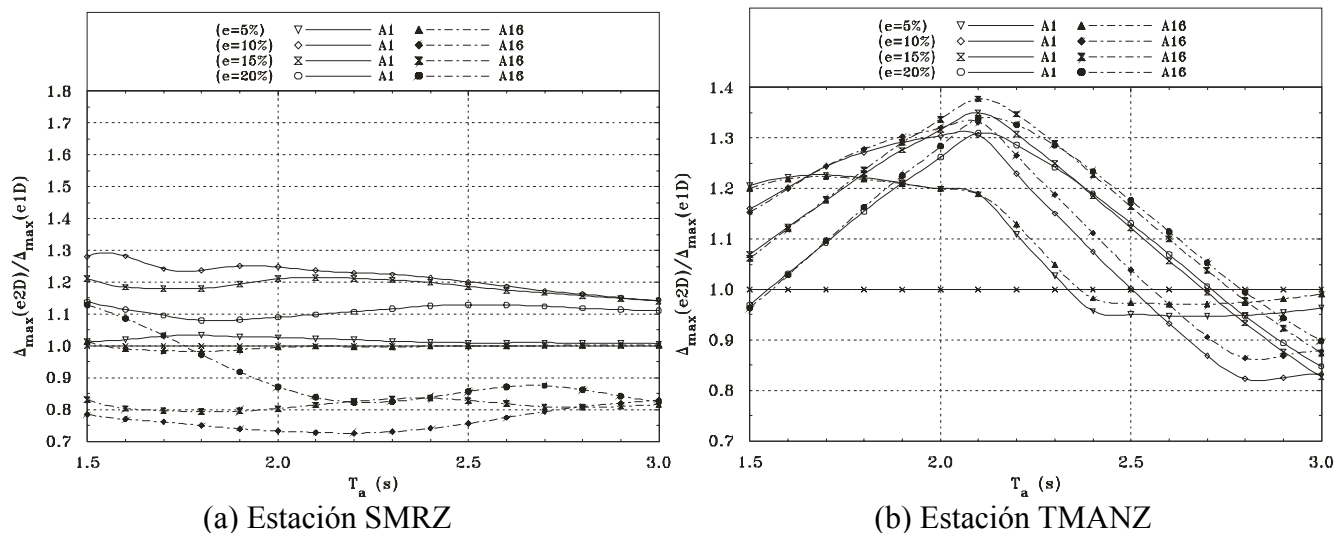


Figura 16. Relación entre los desplazamientos máximos con excentricidades en dos direcciones y una dirección  $[\Delta_{\max}(e2D)/\Delta_{\max}(e1D)]$ , bajo excitación de las estaciones SMRZ y TMANZ, modelos SBA4.

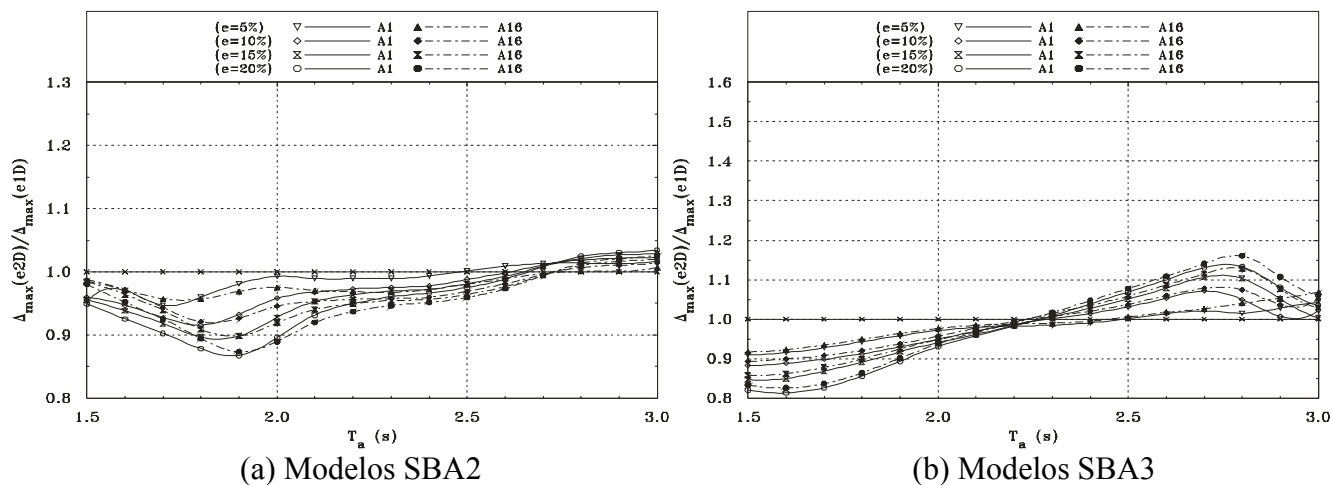


Figura 17. Relación entre los desplazamientos máximos con excentricidades en dos direcciones y una dirección  $[\Delta_{\max}(e2D)/\Delta_{\max}(e1D)]$ , bajo la excitación de la estación TMANZ, modelos SBA2 y SBA3.

De los resultados para la estación TMANZ (figura 17), se observa que, en general, para los modelos SBA2 (fig 17a), la excentricidad bidireccional produce desplazamientos máximos inferiores a los que se obtienen ante una excitación unidireccional para la mayor parte del intervalo de periodos en estudio ( $1.5s \leq T_a \leq 2.6s$ ),



lo que coincide con lo observado cuando se compara con respecto a los modelos sin excentricidad (fig 12), por lo que resulta claro entonces que la razón de esta reducción es que los momentos torsionantes máximos que se produzcan en direcciones ortogonales en los modelos SBA2 ante los registros de TMANZ generalmente actuaron en sentidos opuestos en la mayor parte del intervalo de periodos considerados y, por lo tanto, se restaron. Para los modelos SBA3 (fig 17b) esto ocurrió en el intervalo de periodos  $1.5s \leq T_a \leq 2.3s$ , y las curvas también coinciden con lo observado cuando se compara con respecto a los modelos sin excentricidad (fig 13).

## 9. CONCLUSIONES

En el presente estudio se evaluó la respuesta torsional de estructuras con aislamiento sísmico, cuando la excentricidad está asociada a los centros de rigidez de la superestructura. De los resultados obtenidos en el estudio, se presentan las siguientes conclusiones:

1. En el caso donde las excentricidades se ubican en dos direcciones y la acción de los sismos son bidireccionales, se tiene que las demandas de ductilidad para todos los aisladores de esquina son muy variables y dependen de diversos factores considerados en este estudio, por lo que resulta muy complejo definir un solo factor como el responsable de esta variabilidad, ya que estas demandas están cambiando constantemente dependiendo de factores como son: (a) nivel de excentricidad; al incrementar las excentricidades, cambian las propiedades dinámicas de la superestructura. (b) características dinámicas del sistema aislado, (c) las características de los registros sísmicos empleados (contenidos de frecuencias, fases intensas, efectos de sitio).
2. Se estudiaron y compararon las recomendaciones de los reglamentos estadounidenses UBC e IBC y una recomendación de la práctica neozelandesa con respecto a la proporción óptima del periodo de la estructura aislada con respecto al sistema con base rígida ( $T_a/T_E$ ) y su impacto en las demandas de ductilidad que experimentan los aisladores de esquina en sistemas torsionalmente acoplados. Resulta difícil concluir sobre la relación óptima entre el periodo de la estructura con base rígida y el periodo efectivo del sistema aislado, ya que las respuestas máximas observadas en este estudio dependen en gran parte de las características de los movimientos del terreno y propiedades dinámicas de la superestructura. En este estudio se aprecia un mejor comportamiento (ligera ventaja) de la propuesta norteamericana ( $T_a \geq 3T_E$ ) sobre la neozelandesa ( $T_a \geq 2T_E$ ).
3. Se puede concluir que el incremento del acoplamiento torsional de la superestructura (aumento de la excentricidad) impacta en menor medida a sistemas donde el periodo fundamental de la superestructura en base rígida es notablemente menor al periodo efectivo del sistema aislado (modelos SBA1).
4. Basado en el estudio comparativo de los desplazamientos máximos que experimentan los aisladores de esquina, cuando no existe excentricidad en la superestructura (sistemas simétricos) con aquéllos donde existe excentricidad en la superestructura (sistemas asimétricos), se puede concluir que: (a) como se esperaba, las amplificaciones (o deamplificaciones) en la respuesta de sistemas asimétricos con respecto a sistemas simétricos generalmente se incrementan (o reducen) cuando se incrementa la excentricidad de la superestructura, (b) los factores de amplificación y deamplificación no son constantes en el intervalo de periodos seleccionado, para todos los registros sísmicos en estudio, (c) las características de estas curvas (factores de amplificación o

deamplificación), varían para cada movimiento sísmico en forma y localización de máximos y mínimos.

5. Contrario a lo que se pudiera pensar *a-priori*, las respuestas máximas no se obtienen generalmente cuando la excentricidad se presenta en ambas direcciones, ya que la relación resulta muy compleja y depende de: (a) las propiedades dinámicas de la superestructura (periodo y relación de frecuencias torsional-lateral), en particular su contraste de rigidez con respecto a las de la estructura totalmente aislada, (b) las características de los movimientos del terreno, (c) el acoplamiento dinámico de la estructura en base aislada con los movimientos del terreno, (d) la ubicación de los aisladores dentro de la planta, (e) las características propias de los aisladores (cortante de fluencia y rigidez posterior a la fluencia del sistema de aislamiento) y, (f) el nivel de excentricidad relativa que se presenta en la superestructura, entre los parámetros más importantes.

## REFERENCIAS

Eisenberger, M y A Rutenberg (1986), "Seismic base isolation of asymmetric shear buildings", *Engineering Structures*, Vol. 8, No. 1, pp. 2-9.

Escamilla, J L (2005), "Respuesta torsional de aisladores sísmicos debida a excentricidades de los centros de rigidez de la superestructura", *Tesis de Maestría*, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Instituto Politécnico Nacional, Unidad Zacatenco, abril.

Gómez, L A A (2000), "Efectos de torsión en estructura aisladas sísmicamente en su base", *Tesis de Maestría*, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM, septiembre.

Gómez, L A A y A Tena (2002), "Respuesta torsional de edificios con base aislada, debido a excentricidades simultáneas en el sistema de aislamiento y en la superestructura", *Memorias, XIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Puebla, CDROM, Artículo No. 167, pp. 611-621, noviembre.

Jangid, R S y T K Datta (1994), "Seismic response of torsionally coupled structures with elastoplastic base isolation", *Engineering Structures*, Vol. 16, No. 4, pp 256-262.

Nagarajaiah, S, A M Reinhorn y M C Constantinou (1993), "Torsion in base isolated structures with elastomeric isolation systems", *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 119, No. 10, pp 2932-2951.

Skinner, R I, W H Robinson y G H Mc Verry (1993), *An introduction to seismic isolation*, primera edición, John Wiley and Sons.

Tena, A (1997), "Evaluación de un método de diseño estático para el aislamiento sísmico de estructuras de la costa Mexicana del Pacífico", *Revista de Ingeniería Sísmica*, SMIS, No. 57, pp 1-34, septiembre-diciembre.

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.

Tena-Colunga, A y C Zambrana-Rojas (2004), "Torsional response of base-isolated structures due to stiffness asymmetries of the isolation system", *Proceedings, 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, CD-ROM, Paper No. 2022, agosto.