

# **EVALUACIÓN DE UN MÉTODO DE DISEÑO ESTÁTICO PARA EL AISLAMIENTO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS DE LA COSTA MEXICANA DEL PACÍFICO**

*Arturo Tena-Colunga<sup>1</sup>*

## **RESUMEN**

El presente trabajo reporta los primeros esfuerzos realizados en México con la finalidad de evaluar un método de diseño estático para estructuras aisladas sísmicamente en su base, enfocándose el estudio para el estado de Guerrero, en el Pacífico Mexicano. El método se basa en las recomendaciones del reglamento norteamericano UBC y en el espectro de diseño del reglamento de diseño por sismo del estado de Guerrero. Se concluye que si se puede utilizar el método de diseño estático para elastómeros, siempre y cuando se adecúen algunos criterios propuestos por el UBC y se agreguen algunas restricciones a estructuras de planta alargada ( $L_1/L_2 > 2$ ).

## **SUMMARY**

This paper summarizes preliminary studies done in Mexico to evaluate a static design procedure for base-isolated structures for the state of Guerrero, in the Mexican Pacific Coast. The static design procedure is based on the design spectra for the building code of Guerrero and the Uniform Building Code (UBC) provisions for base isolation. It is concluded that a static design procedure based on the UBC code can be implemented for base-isolated structures in Guerrero, but some criteria need to be modified and some restrictions have to be implemented for structures with high plan aspect ratios ( $L_1/L_2 > 2$ ).

---

Artículo recibido el 18 de noviembre de 1997 y aprobado para su publicación el 19 de diciembre de 1997. Se aceptarán comentarios y/o discusiones al artículo hasta cinco meses después de su publicación.

<sup>1</sup> Centro de Investigación Sísmica, AC  
Fundación Javier Barros Sierra, AC  
Carretera al Ajusco # 203, 14200 México, DF, MÉXICO

## INTRODUCCIÓN

El uso de aisladores de base en la reducción de la respuesta estructural ante sismos ha comenzado a extenderse significativamente en países como Japón, Estados Unidos, Nueva Zelanda e Italia, principalmente. El notable incremento de estructuras sísmicamente aisladas en los Estados Unidos se ha dado a partir de la incorporación de recomendaciones de diseño a los reglamentos UBC (Uniform Building Code) para edificios en 1991 ("Uniform", 1991) y AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) para puentes en 1990 (Mayes *et al.*, 1992).

En México históricamente ha existido y existe interés por el aislamiento sísmico; sin embargo, su aplicación ha sido reducida. Actualmente existen cuatro estructuras aisladas sísmicamente en terrenos de transición o duros en la ciudad de México y sus alrededores: una escuela de cuatro niveles y una iglesia aislada con un mecanismo deslizante a base de balines metálicos desarrollado por González Flores (Newmark y Rosenbluth, 1971), la prensa del periódico Reforma con un sistema aislador de acción pendular (sistema GT-BIS) desarrollado y patentado por Garza Tamez y probado en la Universidad de Illinois (Foutch *et al.*, 1993), y el puente vehicular Hidalgo-San Rafael que cruza la autopista México-Querétaro utilizando elastómeros. De estos proyectos, únicamente el puente Hidalgo-San Rafael ha sido diseñado utilizando los aisladores de base más comerciales a nivel mundial y conforme a los lineamientos de un reglamento ("Directory", 1995).

El aislamiento sísmico a base de elastómeros (laminados o con corazón de plomo) tiene poco futuro en la zona de terreno blando de la ciudad de México, ya que las características dinámicas del terreno blando de la ciudad, con periodos dominantes del terreno entre uno y cuatro segundos, hacen peligroso y poco atractivo el uso de la mayoría de los sistemas de aislamiento de base comerciales. La utilización de sistemas de aislamiento sísmico en estructuras localizadas en la zona blanda del valle de México no es recomendable, debido a los largos periodos fundamentales de los espectros de respuesta de estos sitios, el alargamiento del periodo fundamental estructural

producto del aislamiento y a los hundimientos diferenciales ocasionados por las deformaciones de los estratos arcillosos. Este sistema de estructuración es adecuado cuando los lugares de ubicación de la estructura tienen periodos dominantes cortos, y así los aisladores seleccionados conduzcan a ordenadas espectrales de aceleración menores (además de disipación de energía e incremento de amortiguamiento). Asimismo, la deformabilidad del suelo debido a su peso propio debe ser mínima. Por otra parte, históricamente, los movimientos del terreno durante sismos intensos en las zonas de terreno firme de la ciudad han sido relativamente bajos, por lo que, en estas zonas, los espectros de diseño del Reglamento vigente tienen ordenadas espectrales relativamente bajas (ordenada espectral máxima de 0.16 g para el espectro de diseño elástico) y, en consecuencia, el diseño de estructuras con sistemas convencionales resulta razonablemente económico en la mayoría de los casos y, por tanto, las estructuras con sistemas comerciales de aislamiento sísmico están en desventaja debido a que su costo inicial es mayor. Como prácticamente no se han observado daños de ningún tipo en estructuras diseñadas ingenierilmente en la zonas de terreno firme de la ciudad de México, entonces, los aisladores de base parecen no ofrecer grandes ventajas y su aplicación parece estar limitada a proyectos donde se requiera controlar con mucha precisión los movimientos de maquinaria o equipo de gran costo y cuya operación deba garantizarse después de un sismo intenso, como es el caso de la prensa del periódico Reforma, o en puentes urbanos, como es el caso del puente Hidalgo-San Rafael.

Ciertamente los aisladores de base parecen no tener gran aplicación en la ciudad de México; sin embargo, su aplicación en estructuras de ciudades costeras del Pacífico mexicano ofrece, *a priori*, grandes ventajas, dadas las características de los suelos y de los movimientos del terreno que ahí se han registrado. Para fomentar el uso de aisladores de base en la costa del Pacífico se requiere desarrollar recomendaciones y normas de diseño que sean prácticas y que den un nivel de seguridad satisfactorio tomando en cuenta la sismicidad regional.

Como parte de un proyecto de investigación previo (Tena *et al*, 1995), se iniciaron los estudios sobre la respuesta sísmica de distintas edificaciones, típicas de las zonas costeras del Pacífico, con aisladores de base, para determinar la aplicabilidad de distintos aisladores como opciones de estructuración y reestructuración de edificaciones y evaluar recomendaciones que se han sugerido para su diseño, para de esta manera poder incorporar dichas recomendaciones en los reglamentos mexicanos pertinentes, así como proveer al gremio de métodos confiables para su diseño. El diseño de los sistemas de aislamiento sísmico se realizó con un procedimiento que está basado en las recomendaciones de Skinner *et al* (1993) y Clark *et al* (1993), utilizando análisis dinámicos no lineales con acelerogramas típicos de la costa de Guerrero.

Se estudiaron once estructuras, en las cuales el procedimiento de diseño fue común. Se seleccionaron dos estructuras de hotel, una muy irregular tanto en planta como en elevación, pero de moderada altura, y que fue seleccionada porque su arquitectura vanguardista es representativa de los hoteles modernos construidos en los puertos turísticos del Pacífico mexicano, y porque presenta irregularidades en planta y en elevación que dan como resultado que se presenten excentricidades de masa y rigidez importantes, por lo que dicho hotel resultaba ideal para estudiar en qué medida afecta la torsión al comportamiento de estructuras aisladas sísmicamente. El otro hotel es una estructura esbelta e irregular en elevación y fue seleccionada porque su irregularidad en elevación introduce excentricidades de masa y rigidez importantes, por lo que este hotel resulta ideal para estudiar en qué medida afecta la torsión y los momentos de volteo al comportamiento de estructuras aisladas sísmicamente.

Se estudiaron dos edificios de oficinas, uno de tres niveles, muy regular en planta, pero con excentricidades moderadas en masas y rigidez por la distribución de muros estructurales y los espacios de oficina, el cual se seleccionó ya que debido a su alta rigidez lateral resulta, *a priori*, ideal para el aislamiento sísmico en zonas de terreno firme, donde las mayores excitaciones se producen en altas

frecuencias. El otro edificio de oficinas es un edificio de mampostería de diez niveles cuya estructuración es muy vulnerable en zonas de alta sismicidad.

Se estudiaron dos edificios de departamentos de tres y cuatro niveles así como cinco diseños típicos de escuelas públicas del Comité Administrador del Programa Federal de Construcción de Escuelas (CAPFCE) del mismo número de niveles, debido a que este tipo de estructuras sufrieron un considerable número de daños durante el sismo del 19 de septiembre de 1985, además que su gran rigidez lateral las califica como estructuras ideales para el aislamiento sísmico en zonas de terreno firme o relativamente firme.

En el estudio de referencia (Tena *et al*, 1995), se realizaron esencialmente cuatro tipos de análisis: (a) análisis elásticos tridimensionales de las estructuras en base rígida, con la finalidad de determinar las características dinámicas elásticas y las formas modales de la estructura, que permitieron evaluar su vulnerabilidad ante sollicitaciones intensas registradas en las costas del Pacífico en sismos recientes (todos los edificios), (b) análisis dinámicos no lineales tridimensionales de los proyectos de aislamiento de las estructuras con la ayuda del programa 3D-Basis (Nagarajaiah *et al*, 1991), con la finalidad de evaluar la eficiencia del sistema de aislamiento con respecto a la estructura en base rígida, además de ser muy útil para verificar que el diseño del sistema de aislamiento fuera dinámicamente estable (todos los edificios), (c) análisis de identificación de sistemas de los resultados de los análisis dinámicos tridimensionales, con la finalidad de evaluar propiedades elásticas equivalentes del sistema aislador-estructura y compararlos con lo que se reporta en la literatura (tres edificios) y (d) análisis dinámicos no lineales en 2-D donde se considera que tanto el sistema de aislamiento como la estructura puedan incursionar en el intervalo no lineal (dos edificios). Se estudiaron esencialmente tres tipos de aisladores de base: a) elastómeros laminados con corazón de plomo (todos los edificios), b) amortiguadores de acero trabajando por deformación inelástica del material (histéresis) a flexión y/o a torsión (tres edificios) y c) péndulos deslizantes de fricción (cuatro edificios).



Estos estudios sugieren que se pueden lograr diseños seguros con los tres tipos de aisladores bajo estudio y que, dependiendo de la estructura, unos resultaban ser más apropiados que otros. Adicionalmente, se efectuaron estudios comparativos del diseño estructural para el proyecto en base rígida y la mejor opción de aislamiento sísmico para tres edificios: los dos hoteles y un edificio de oficinas, donde se pudo observar que el diseño de una estructura aislada sísmicamente en su base conduce a diseños más razonables de la superestructura con respecto a un diseño convencional con ahorros significativos de material, y que la respuesta dinámica de la estructura aislada es muchísimo más favorable, aún para estructuras irregulares y esbeltas como uno de los hoteles en estudio, siempre y cuando ésta se ubique en las zonas de terreno firme.

Los resultados obtenidos de este estudio inicial permiten concluir que el uso de aislamiento de base en estructuras típicas de las costas turísticas mexicanas es favorable, aún para estructuras donde se presentan acoplamiento importantes por torsión. Los estudios sugieren que el acoplamiento por torsión de una estructura aislada sísmicamente se reduce cuando se compara con la respuesta de la estructura en base rígida. Por otra parte, los estudios también revelan que debe tenerse un particular cuidado en el diseño de los aisladores de base para asegurarse que éstos sean dinámicamente estables. La observación de las distorsiones dinámicas máximas de entrepiso obtenidas de los análisis de la estructura aislada con el programa 3D-Basis, corroboran que el diseño adecuado de un sistema de aislamiento mantendrá a la estructura en el intervalo de respuesta elástico, aunque, en algunos casos, la estructura aislada pudiera responder inelásticamente. Los análisis dinámicos donde se consideró la no linealidad tanto del aislador como de la estructura indican, sin embargo, que la acción no lineal de la estructura, de presentarse, sería muy reducida. Por último, el uso de técnicas de identificación de sistemas fue útil para definir estructuras elásticas equivalentes que representen la respuesta del sistema aislador-estructura de manera razonable. Los análisis con técnicas de identificación de sistemas permitieron definir amortiguamientos viscosos equivalentes asociados a los sistemas

de aislamiento similares a los reportados en la literatura utilizando otras técnicas (Skinner *et al*, 1993). Detalles sobre los estudios de algunas de estas estructuras también pueden consultarse en Muñoz (1995), Gómez-Soberón *et al* (1996), Tena-Colunga (1996) y Tena-Colunga *et al* (1997).

Los resultados obtenidos en estudios previos (Tena *et al*, 1995) permiten afirmar que el uso de aislamiento de base en estructuras típicas de las costas mexicanas es favorable, aún para estructuras que en base rígida presentan acoplamiento importantes por torsión. Sin embargo, estos estudios también revelan que debe tenerse un particular cuidado en el diseño de los aisladores para garantizar que éstos sean dinámicamente estables. Por tanto, resulta sumamente importante evaluar las consecuencias de diseñar aisladores de base utilizando métodos estáticos de análisis como los propuestos por el reglamento estadounidense UBC.

El presente trabajo reporta los primeros esfuerzos realizados en la búsqueda de un método de diseño estático de estructuras aisladas sísmicamente en su base para el estado de Guerrero. El método se basa en las recomendaciones del reglamento norteamericano UBC y en el espectro de diseño del reglamento de diseño por sismo del estado de Guerrero. Los resultados más importantes de este estudio se presentan a continuación.

### RECOMENDACIONES DEL REGLAMENTO UBC

El reglamento UBC ("Uniform", 1991 y 1997, "UBC", 1994) señala claramente que en el diseño de estructuras aisladas sísmicamente se deben tomar en cuenta las características del sitio donde se va a desplantar la estructura, la altura de la misma y su sistema estructural. La estructura puede ser regular o irregular; sin embargo, si es irregular, se deben realizar análisis dinámicos en su diseño. La estabilidad del sistema de aislamiento ante carga vertical debe comprobarse mediante estudios analíticos y pruebas experimentales, cuando el desplazamiento lateral debido al sismo sea igual al desplazamiento máximo total permitido para el sistema de aislamiento.

*Condiciones para utilizar el método de análisis estático*

El sistema de aislamiento sísmico puede ser diseñado utilizando el método estático de análisis sísmico, siempre y cuando cumpla con las siguientes restricciones:

- (1) La estructura se localiza al menos a 15 km de cualquier falla activa.
- (2) La estructura se desplanta en terreno firme.
- (3) La altura total de la estructura montada sobre el sistema de aislamiento es menor de 19.8 m ó tiene cuatro pisos o menos.
- (4) El periodo natural de vibración de la estructura aislada es menor o igual a tres segundos.
- (5) El periodo natural de vibración de la estructura aislada es mayor a tres veces el periodo fundamental de vibración de la estructura en base rígida, calculado mediante la fórmula aproximada 34-5 del UBC ("Uniform", 1994).
- (6) La estructura aislada es regular.
- (7) El sistema de aislamiento no limita el desplazamiento máximo total a menos de  $M_M$  veces el desplazamiento total de diseño, donde  $M_M$  es un coeficiente amplificador asociado al sismo máximo probable de diseño, y cuyo valor varía entre 1.2 y 1.5, dependiendo de la zona sísmica y de la región del espectro de diseño (velocidad constante o aceleración constante).
- (8) El sistema de aislamiento debe tener las siguientes características:
  - (a) La rigidez lateral efectiva del sistema de aislamiento para el desplazamiento de diseño es mayor que una tercera parte de la rigidez efectiva al 20 % del desplazamiento de diseño (fig 1).
  - (b) El sistema de aislamiento debe ser capaz de proporcionar una fuerza restitutiva.
  - (c) La curva carga-deformación del sistema de aislamiento es independiente de la velocidad de carga.
  - (d) La curva carga-deformación del sistema de aislamiento es independiente de las cargas verticales y de cargas laterales en ambas direcciones.

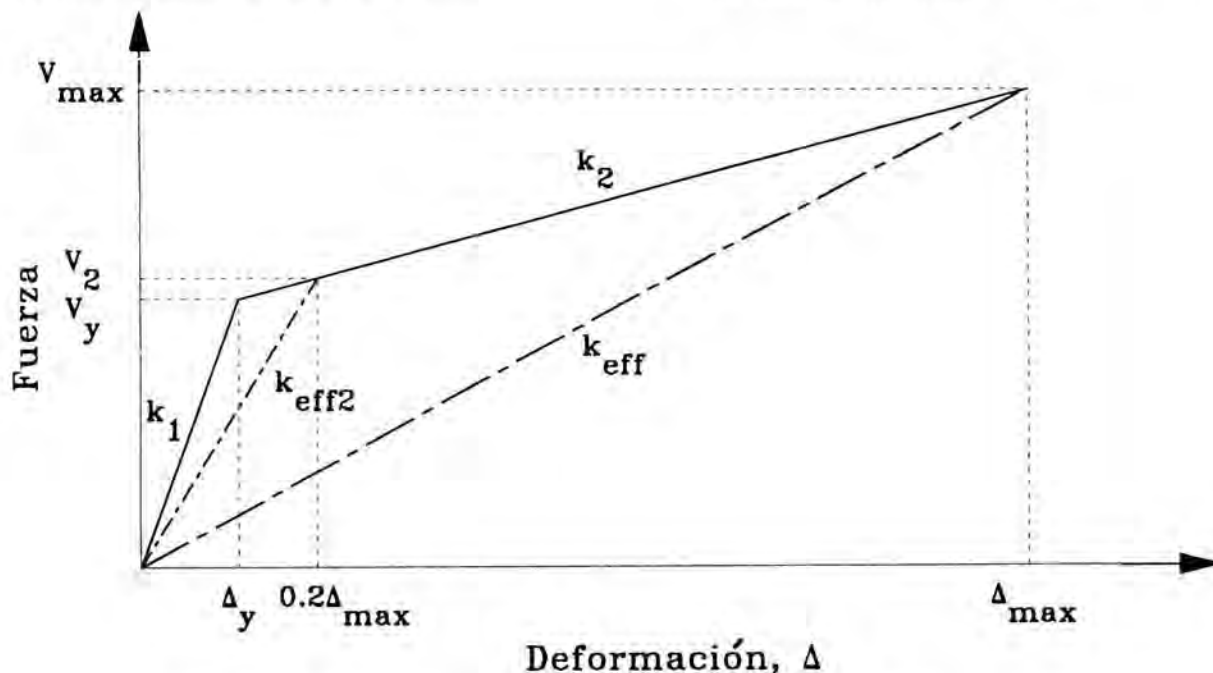


Fig 1. Gráfica esfuerzo-deformación de un aislador bilineal

*Definición de las características de los aisladores*

La condición 8a del inciso anterior define las características mecánicas mínimas necesarias que el UBC exige a los sistemas de aislamiento. Esta condición puede expresarse matemáticamente de acuerdo con la notación de la fig 1 como:

$$k_{eff2} = \frac{V_2}{0.2 \Delta_{max}} \quad (1)$$

$$k_{eff} \geq \frac{1}{3} k_{eff2} \therefore \text{sea } k_{eff2} \leq 3 k_{eff} \quad (2)$$

sustituyendo (1) en (2):

$$V_2 = 0.6 V_{max} k_{eff} \quad (3)$$

de la fig 1 se aprecia que:

$$\Delta_{max} k_{eff} = V_{max} \quad (4)$$

$$V_2 = 0.6 V_{max} \quad (5)$$

Para poder obtener los valores de  $k_1$  y  $k_2$ , se debe resolver un sistema de ecuaciones simultáneas, donde hay que tomar en cuenta que la relación existente entre la rigidez posterior a la fluencia de los aisladores,  $k_2$ , es generalmente el diez por ciento de su rigidez inicial,  $k_1$ , particularmente para aisladores de naturaleza elastomérica, es decir:

$$k_2 = 0.1 k_1 \quad (6)$$

De igual forma, de la geometría representada en la fig 1 se puede obtener  $\Delta_{max}$ , a partir de  $V_{max}$ :

$$V_{max} = k_1 \Delta_y + k_2 (\Delta_{max} - \Delta_y) \quad (7)$$

sustituyendo (6) en (7):

$$V_{max} = 0.9 k_1 \Delta_y + 0.1 k_1 \Delta_{max} \quad (8)$$

Para un desplazamiento al 20 % de  $\Delta_{max}$ , se requiere una fuerza máxima acotada por  $V_2$ , esto es, de la ec 5 y de la fig 1 se tiene:

$$0.6 V_{max} = 0.9 k_1 \Delta_y + 0.1 k_1 (0.2 \Delta_{max}) \quad (9)$$

por lo que el sistema de ecuaciones a resolver está dado por las ecs 8 y 9. Resolviendo el sistema y sustituyendo, se obtienen los valores que definen la curva primaria del modelo histérico para aisladores de comportamiento bilineal con pendiente posterior a la fluencia del 10 % y que cumplen con los requisitos del UBC:

$$k_1 = 5 \frac{V_{max}}{\Delta_{max}} = 5 k_{eff} \quad (10)$$

$$k_2 = 0.5 k_{eff} \quad (11)$$

$$V_y = 0.555 V_{max} \quad (12)$$

$$\Delta_y = 0.111 \Delta_{max} \quad (13)$$

Se puede seguir un procedimiento parecido para aisladores de base con distintas pendientes posteriores a la fluencia de las consideradas en este estudio para definir su curva primaria para cumplir con los requisitos del UBC, y estas características mecánicas mínimas deben comprobarse por medio de pruebas experimentales.

*Método de diseño estático*

El periodo natural de vibración de la estructura aislada sísmicamente puede estimarse con la siguiente expresión, basada en que el modo fundamental es controlado por el sistema de aislamiento:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{min} g}} \quad (14)$$

donde  $W$  es el peso total de la estructura montada sobre el sistema de aislamiento debido a carga muerta y  $k_{min}$  es la rigidez lateral efectiva mínima del sistema de aislamiento para el desplazamiento de diseño en la dirección en consideración.

El desplazamiento total de diseño,  $D_T$ , del sistema de aislamiento y sus componentes, debe

de incluir el desplazamiento adicional debido a torsión efectiva y accidental calculada considerando la distribución espacial de la rigidez del sistema de aislamiento y la posición más desfavorable de la excentricidad de masas. Para sistemas de aislamiento con una distribución espacial de rigidez uniforme, el desplazamiento total de diseño no debe ser menor a:

$$D_T \geq D \left[ 1 + y \left( \frac{12e}{b^2 + d^2} \right) \right] \quad (15)$$

En caso de que se demuestre analíticamente que el sistema de aislamiento está configurado para resistir torsiones ("Uniform", 1991 y 1994), el desplazamiento total de diseño puede ser menor al establecido por la ec 15, pero no menor a:

$$D_T \geq 1.1 D \quad (16)$$

donde  $b$  y  $d$  son respectivamente las dimensiones menor y mayor de la estructura en planta,  $e$  es la excentricidad medida en planta entre el centro de masa de la estructura desplantada sobre el sistema de aislamiento y el centro de rigidez del sistema de aislamiento, más una excentricidad accidental tomada como  $0.05d$ , y es la distancia entre el centro de rigidez del sistema de aislamiento y el elemento de interés, medido perpendicularmente a la dirección de interés y  $D$  es el desplazamiento de diseño en el centro de rigidez del sistema de aislamiento en la dirección de análisis, dada por:

$$D = 10 Z N S_i \frac{T_i}{B} \text{ (plg)} \quad \text{o} \quad D = 25.4 Z N S_i \frac{T_i}{B} \text{ (cm)} \quad (17)$$

donde  $Z$  es el coeficiente sísmico (que depende de la zona donde se ubique la estructura),  $N$  es un coeficiente que se relaciona con la proximidad de la estructura a fallas activas,  $S_i$  es un factor relacionado con las características del terreno donde se desplanta la estructura y  $B$  es un coeficiente relacionado con el amortiguamiento efectivo proporcionado por el sistema de aislamiento. El desplazamiento máximo total ( $D_{TM}$ ), requerido para verificar la

estabilidad del sistema de aislamiento en la dirección crítica de carga lateral se debe calcular como:

$$D_{TM} = M_M D_T \quad (18)$$

El sistema de aislamiento, la cimentación y todo elemento estructural que se encuentre por debajo del sistema de aislamiento deben diseñarse y construirse para resistir una fuerza cortante sísmica mínima dada por:

$$V_b = \frac{k_{\max} D}{15} \quad (19)$$

donde  $k_{\max}$  es la rigidez efectiva máxima del sistema de aislamiento para el desplazamiento de diseño en la dirección en consideración. La estructura que se encuentra montada sobre el sistema de aislamiento debe diseñarse y construirse para resistir una fuerza cortante sísmica mínima igual a:

$$V_s = \frac{k_{\max} D}{R_{wi}} \quad (20)$$

donde  $R_{wi}$  es un factor de reducción por comportamiento sísmico para estructuras aisladas en su base que depende del sistema estructural seleccionado para resistir la carga lateral. Los factores de reducción por comportamiento sísmico propuestos por el código UBC para estructuras aisladas oscilan entre el 25 % y 43 % de los valores propuestos por el mismo código para estructuras sin ningún tipo de aislamiento. Aunque pudiera parecer sorprendente, las reducciones mayores de los  $R_{wi}$  propuestos con respecto a los  $R_w$  son para las estructuras más dúctiles (marcos de acero y concreto reforzado con detallado sísmico especial) y las reducciones menores son para sistemas menos dúctiles (muros de cortante de mampostería), tal vez reconociendo que, en general, las estructuras a base de marcos tienen una menor capacidad a cortante basal y empiezan a fluir ante fuerzas sensiblemente menores que los muros de cortante. Se debe recordar que la filosofía de diseño de estructuras sísmicamente aisladas es que éstas deben permanecer en el intervalo de comportamiento elástico.



Sin embargo, el apartado del UBC para el diseño de estructuras aisladas sísmicamente especifica que  $V_s$  no deber resultar menor al valor dado por la ec 20, el que se obtendría para el diseño tradicional de una estructura en base rígida con el mismo peso y el mismo periodo que el de la estructura aislada o la fuerza sísmica requerida para activar completamente al sistema de aislamiento, es decir:

$$V_{bre} = \frac{ZS_iIW}{R_{wi}} \quad (21)$$

La distribución de fuerzas horizontales en la estructura en su elevación se debe calcular por medio de la siguiente expresión, basada en una aproximación del primer modo de vibración de una estructura en base rígida:

$$F_x = \frac{V_s w_x h_x}{\sum_{i=1}^n w_i h_i} \quad (22)$$

donde  $F_x$  es la fuerza sísmica aplicada en el nivel  $x$ ,  $w_x$  es el peso del nivel  $x$  de la estructura y  $n$  es el número de niveles. Por último, la máxima distorsión de entrepiso permitida para la estructura aislada debe ser menor que:

$$\delta_x \leq \frac{0.010}{R_{wi}} \quad (23)$$

## ADECUACIONES DEL MÉTODO DE DISEÑO ESTÁTICO PARA MÉXICO

Para que el procedimiento de diseño estático de aisladores propuesto por el reglamento UBC pueda ser utilizado en México, en primer lugar se deben realizar estudios que permitan calibrar sus disposiciones, además de adecuar la terminología y los criterios utilizados por el UBC con los empleados en México, por lo que algunas de las ecuaciones presentadas en la sección anterior deben ser adaptadas. Por ejemplo, los parámetros  $Z$  y  $S_i$  del UBC definen al espectro de diseño elástico base y dependen del tipo de suelo y de la zona sísmica donde va a ser desplantada la edificación, de acuerdo con la clasificación estadounidense. En los reglamentos mexicanos, la definición del espectro de diseño elástico base es también función de las zonas sísmicas consideradas y

su respectiva ordenada del espectro de diseño, a, la cual es a su vez función del tipo de suelo y del coeficiente de diseño sísmico  $c$ , cuyo valor depende de la zona sísmica y del tipo de terreno.

Por otra parte, el factor de reducción por comportamiento sísmico  $R_w$  del UBC sería equivalente en cuanto a concepto al factor de comportamiento sísmico  $Q$  de los reglamentos mexicanos, aunque sus valores absolutos difieren substancialmente. El factor de comportamiento sísmico del UBC para estructuras aisladas en su base,  $R_{wi}$ , no tiene equivalente en los reglamentos mexicanos; sin embargo, se puede introducir como su equivalente al factor  $Q_a$ . No existen estudios en México para definir valores adecuados para el factor de comportamiento sísmico para estructuras aisladas sísmicamente,  $Q_a$ . Por tanto, en el presente estudio se define a  $Q_a$  en función de  $Q$ , el cual se divide por un factor de seguridad  $FS$ . Los valores de  $FS$  están inspirados en las relaciones existentes entre  $R_w$  y  $R_{wi}$  de acuerdo con el reglamento UBC, los cuales varían entre 2.0 y 3.0. Para el presente estudio,  $FS$  varía entre 1.5 y 2, tomando en cuenta los valores de  $Q$  estipulados en los reglamentos mexicanos y que, además, los factores  $R_w$  del UBC se basan en estudios que tomaron en cuenta efectos como la sobrerresistencia y la redundancia, los cuales no han sido evaluados directamente (por ejemplo, con estudios propios) para los factores  $Q$  de los reglamentos mexicanos, aunque se consideraron indirectamente con base en la experiencia. Finalmente, los reglamentos mexicanos limitan la distorsión de entrepiso a  $\Delta = 0.012$  para estructuras donde los elementos no estructurales están debidamente desligados del sistema estructural y a  $\Delta = 0.006$  para estructuras donde los elementos no estructurales no están debidamente desligados del sistema estructural principal.

Por tanto, las adecuaciones de las ecs 14 a 23 para los reglamentos mexicanos, en cuanto a su notación exclusivamente, consistirían esencialmente en hacer las siguientes substitutiones:  $a = ZS_i$ ,  $Q = R_w$  y  $Q_a = R_{wi}$ . Además, se deben realizar las adecuaciones de cada uno de los términos y calibrarlos, tomando en cuenta que la propuesta del Reglamento UBC está basada en estudios de la sismicidad de los



Estados Unidos y no en la de la costa mexicana del Pacífico, en particular el estado de Guerrero, que es el objeto del presente estudio. Por ejemplo, los factores de importancia  $I$  contemplados en los reglamentos mexicanos son diferentes a los del reglamento UBC. En los reglamentos mexicanos no existen los coeficientes  $B$ ,  $M_M$  y  $N$ , y además no hay estudios que permitan definir valores apropiados, por lo que en la calibración inicial se utilizaron los propuestos por el reglamento UBC. Finalmente, es claro que la ec 17, que define el desplazamiento de diseño del aislador  $D$ , es función de los movimientos del terreno contemplados por el espectro de diseño del UBC y, por tanto, el desplazamiento base de 10 pulgadas (25.4 cm) pudiera no cubrir los movimientos observados y esperados en las costas mexicanas y, en general, de cualquier otra parte del mundo. Por tanto, la ec 17 debe modificarse para tomar en cuenta las características de los movimientos del terreno de la región, como se demostrará en secciones posteriores, ya que el desplazamiento de diseño es también función del espectro de diseño y de las ordenadas espectrales (definidas por  $a$ ), según se aprecia de la ec 17.

### ESPECTROS DE DISEÑO DEL REGLAMENTO DE GUERRERO

Aunque el Manual de Obras Civiles (MOC-93, 1993) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) cuenta con una zonación sísmica para toda la República Mexicana y, con base en ello, se definen los espectros de diseño de cada una de esas zonas, en el presente estudio se decidió utilizar las Normas de Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones del Estado de Guerrero (RCEG-90, 1990) por las siguientes razones: (1) Se trata del primer reglamento estatal en la República Mexicana donde se condujeron estudios detallados para definir sus espectros de diseño sísmico y, (2) la mayoría de los acelerogramas representativos registrados en sismos importantes que han afectado a la costa mexicana del Pacífico se ubican en el estado de Guerrero, salvo unos cuantos que se ubican en el vecino estado de Michoacán y, recientemente, en el estado de Colima (fig 2). Los espectros de diseño elástico base del RCEG-90 se presentan en la fig 3. El RCEG-90 considera dos zona sísmicas, la C y la D,

siendo ésta última la zona de mayor peligro sísmico. Por ejemplo, Acapulco está ubicado en la zona D. El RCEG-90 define tres zonas geotécnicas: la zona I identifica al terreno firme, la II a los suelos de transición y la III a los suelos blandos, como se podrá deducir de la fig 3.

### ACELEROGRAMAS SELECCIONADOS

Para evaluar las adecuaciones del método estático del UBC para el RCEG-90 señaladas en secciones anteriores, se seleccionaron registros sísmicos obtenidos en la costa del Pacífico, principalmente ubicados en la costa de Guerrero. En la costa de Guerrero se cuenta con una red de más de 30 aparatos instalados. En la fig 2 se presenta un mapa de la zona con la ubicación de las estaciones, donde se observa que la mayoría se encuentran localizadas en el estado de Guerrero.

Se consideraron acelerogramas representativos de cuatro de los últimos sismos ocurridos en México y que cuentan con un número razonable de registros sísmicos: (1) sismo del 19 de septiembre de 1985 ( $M_s = 8.1$ ), (2) sismo del 25 de abril de 1989 ( $M_s = 6.9$ ), (3) sismo del 31 de mayo de 1990 ( $M_s = 6.1$ ) y, (4) sismo del 9 de octubre de 1995 ( $M_w = 8.0$ ). De cada evento sísmico se eligieron acelerogramas intensos de diferentes estaciones que estaban disponibles, en sus componentes N-S y E-W. Las características principales de los registros utilizados se resumen en la tabla 1. Los acelerogramas y sus respectivos espectros de respuesta de pseudoaceleraciones para un amortiguamiento viscoso equivalente del 5 % se presentan en la fig 4.

Los eventos sísmicos y sus acelerogramas respectivos fueron escogidos por sus magnitudes y por los contenidos de energía que presentan. De acuerdo con las recomendaciones de Clark *et al* (1993), el diseño de los aisladores de base y de su superestructura debe basarse en acelerogramas de sismos de magnitud importante ( $M_s > 7.0$ ) y, además, se debe revisar que los aisladores trabajen y que los elementos no estructurales no sufran daño durante sismos de magnitud relativamente baja o moderada ( $5.5 \leq M_s \leq 7.0$ ).

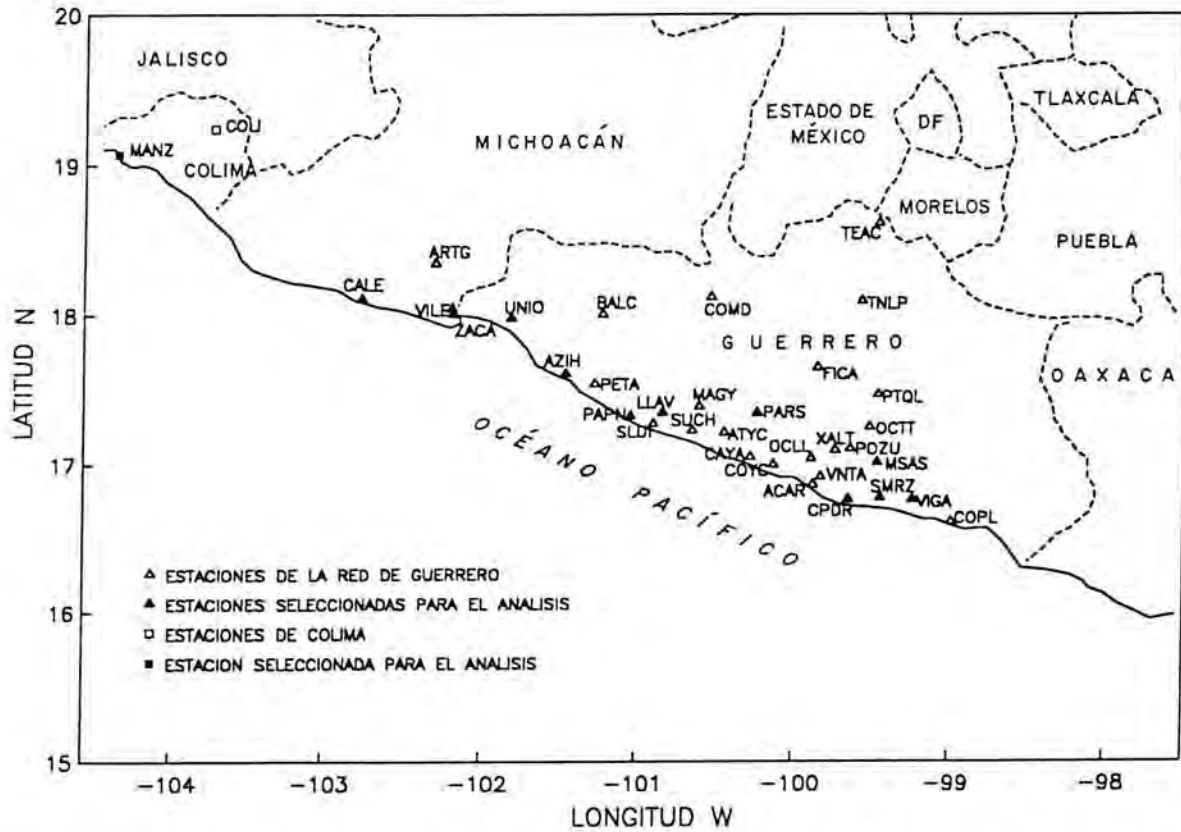


Fig 2. Estaciones acelerométricas en los estados de Colima, Guerrero y Michoacán (cortesía de María Zárate)

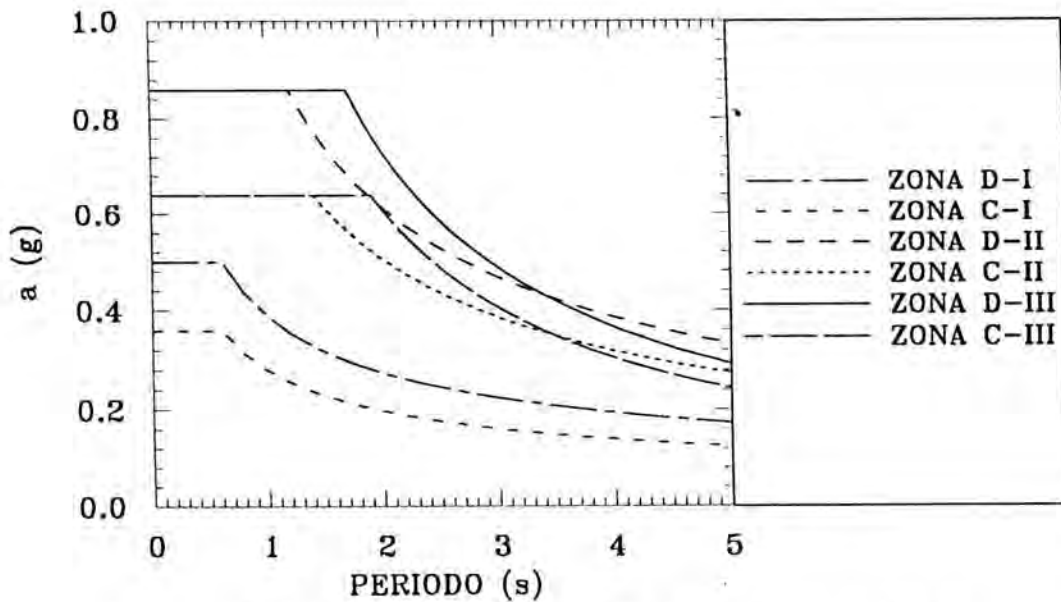


Fig 3. Espectros de diseño elásticos del RCEG-90

Tabla 1. Características principales de los eventos sísmicos considerados

Sismo	Registro	Duración (s)		Aceleración máxima (cm/s <sup>2</sup> )		Periodo dominante del sitio (s)	
		Sismo	Fase intensa	E-W	N-S	E-W	N-S
19/09/85	AZIH	71.8	20	162.	101.	0.12	0.30
	CALE	48.9	10	138.	138.	0.35	0.40
	PAPN	59.5	5	114.	157.	0.12	0.14
	UNIO	62.7	25	147.	163.	0.23	0.35
	ZACA	90.0	45	271.	182.	0.36	0.20
25/04/89	VIGA	34.5	4	318.	305.	0.14	0.09
	SMRZ	30.5	4	127.	175.	0.19	0.30
31/05/90	LLAV	41	2.5	313.	390.	0.15	0.16
09/10/95	MANZ	155	20	383.	363.	0.23	0.22

El reglamento UBC define su coeficiente  $N$ , que se relaciona con la proximidad de la estructura a fallas activas, en función de la magnitud máxima probable ( $M_{MCE}$ ) de la falla, y acota los valores considerando como límite inferior  $M_{MCE} < 6.0$  y como límite superior  $M_{MCE} \geq 8.0$ , por lo que resulta claro que éstos han sido aproximadamente los límites de magnitud evaluados por el UBC para el desarrollo de sus normas de aislamiento sísmico.

### DESCRIPCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS EN ESTUDIO

Para evaluar las adecuaciones del método estático del UBC para el RCEG-90, se seleccionaron un total de tres estructuras (Gómez, 1996) que cumplieran con los requisitos impuestos por el UBC para utilizar el método estático. De las tres estructuras, dos corresponden a escuelas públicas con diseños típicos del CAPFCE de los años 60 y 70, estudiadas previamente (Tena *et al.*, 1995 y 1997, Tena, 1996), y donde se calibró exclusivamente el diseño de los aisladores de base utilizando el método estático. Las escuelas están estructuradas a base de marcos de concreto reforzado y de muros divisorios de tabique rojo recocido, que en el caso de la dirección longitudinal albergan las ventanas y las puertas de acceso

para las aulas. Fueron seleccionadas por ser representativas de gran parte de las escuelas públicas antiguas de todo el país, muchas de las cuales, por encontrarse ubicadas en zonas de moderado o alto peligro sísmico, deben ser revisadas para garantizar un comportamiento satisfactorio ante sismos de gran magnitud inclusive. La estructura remanente corresponde a un diseño original donde se calibró tanto el diseño de los aisladores como del edificio con el método estático, comparándose este último con el diseño de la misma estructura en base rígida conforme al RCEG-90. A continuación se describen las estructuras con mayor detalle.

#### *Escuela EPI*

Es un plantel escolar conformado por dos cuerpos, que de ahora en adelante se nombrarán como EPI-A y EPI-B; ambos cuentan con tres niveles con altura de entrepiso de 3 m para una altura total del plantel de 9 m (fig 5). El cuerpo EPI-A consta de 17 crujías en la dirección longitudinal (E-W), 15 de ellas tienen claros de 3 m y las dos restantes de 4 m. El cuerpo EPI-B tiene seis crujías de 3 m cada una. Ambos cuerpos constan de una crujía de 9 m de claro en la dirección transversal (N-S). El área en planta para EPI-A es de 477 m<sup>2</sup> y de 162 m<sup>2</sup> para EPI-B, por lo que el área total

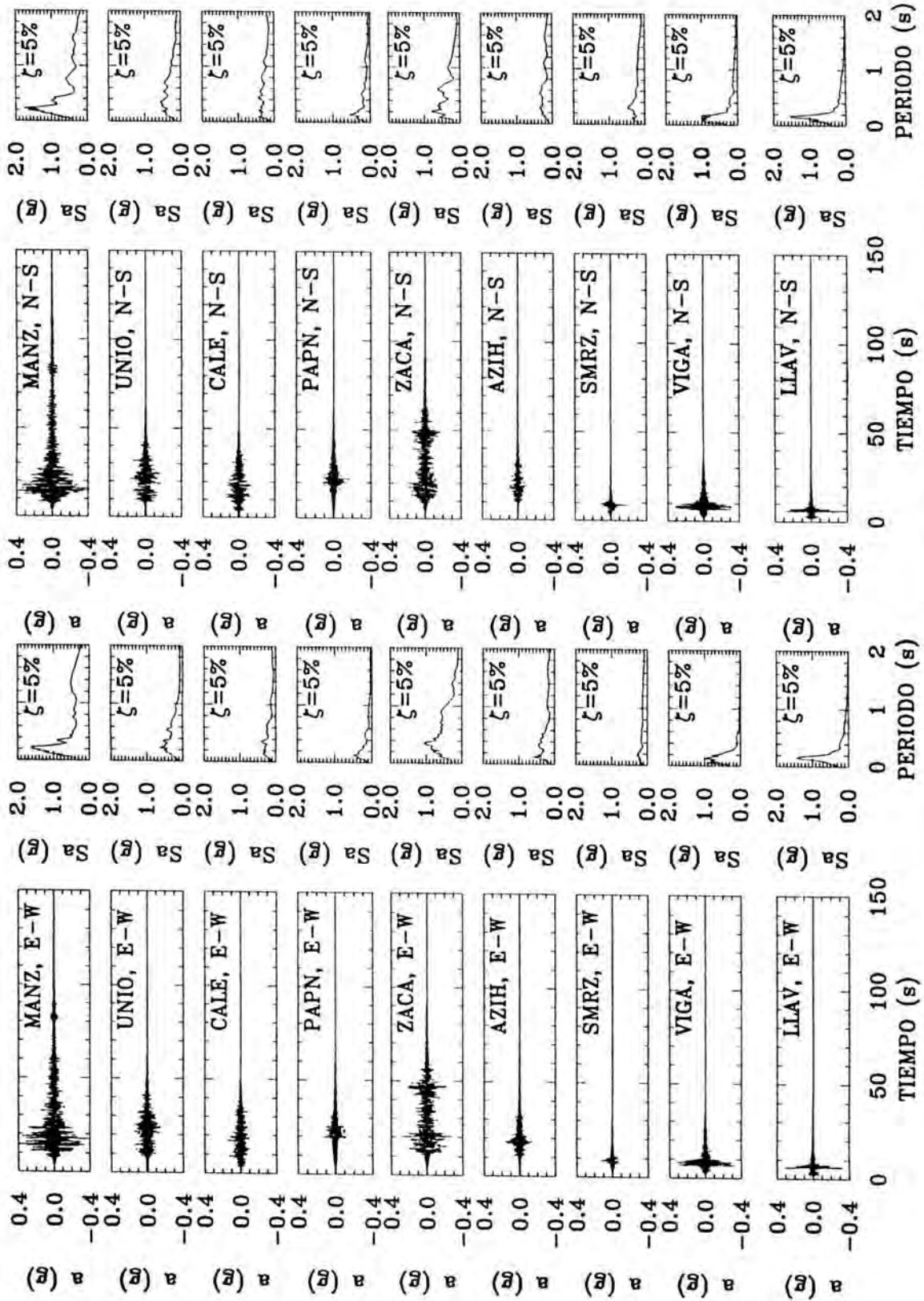


Fig 4. Acelerogramas seleccionados de la costa mexicana del Pacífico



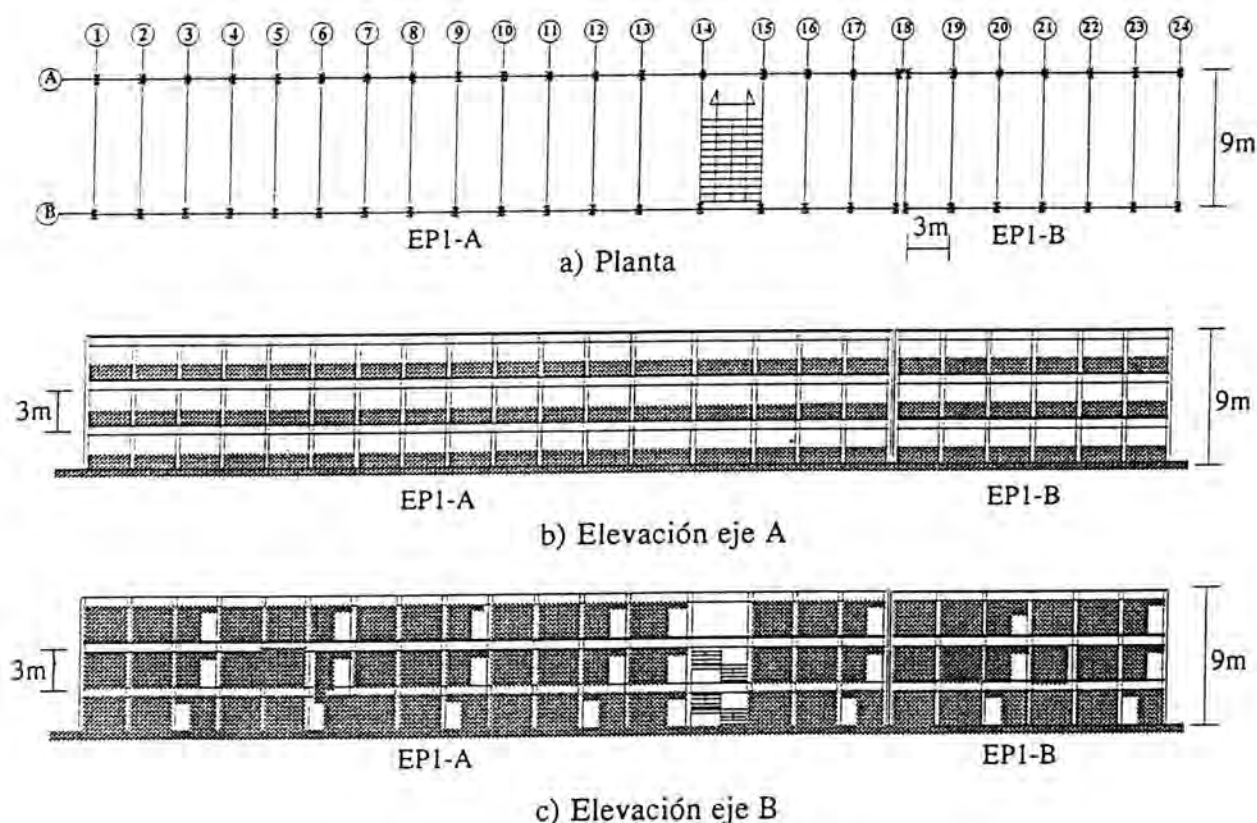


Fig 5. Planta y elevaciones de la escuela EP1

en planta del plantel EP1 es de  $639 \text{ m}^2$ . En la dirección transversal la escuela cuenta con muros estructurales de bloque de concreto hueco cada tres crujías en los ejes interiores y de tabique rojo recocido en los ejes exteriores 1, 18, 18' y 24 (fig 5). Los muros longitudinales, "no estructurales" son de tabique rojo recocido y no alcanzan la altura de entrepiso, ya que contemplan la ubicación de ventanas y puertas (fig 5).

El sistema estructural principal consiste en columnas rectangulares de  $30 \times 50 \text{ cm}$  orientadas en la dirección transversal; vigas rectangulares de  $25 \times 65 \text{ cm}$  en el eje A de la fig 5, de  $15 \times 65 \text{ cm}$  en el eje B y de  $30 \times 65 \text{ cm}$  en los ejes 1 a 24. Todas las columnas poseen un porcentaje de refuerzo longitudinal de  $\rho = 0.034$ . En las vigas, el porcentaje de refuerzo es simétrico en ambos lechos ( $\rho = \rho^+ = \rho^-$ ), variando de  $\rho = 0.0044$  para las del piso superior a  $\rho = 0.0088$  para las del primer nivel. La losa es de  $10 \text{ cm}$  de es-

pesor. La cimentación es a base de zapatas corridas con una profundidad de desplante de  $1.5 \text{ m}$ . En ambos cuerpos, la resistencia del concreto a la compresión ( $f'_c$ ) especificada en planos es de  $200 \text{ kg/cm}^2$  y el esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo ( $f_y$ ) especificado es de  $4200 \text{ kg/cm}^2$ . La resistencia de diseño en compresión supuesta para la mampostería ( $f'_m$ ) fue de  $15 \text{ kg/cm}^2$  para las unidades de arcilla y de  $20 \text{ kg/cm}^2$  para las de concreto, de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCEM-87), referencia citada por el RCEG-90 (1990).

#### Escuela EP2

Es una escuela pública cuyo cuerpo principal consta de cuatro niveles ( $12.40 \text{ m}$  de altura). La planta tipo del edificio y sus elevaciones se presentan en la fig 6. La orientación de la estructura es N-S en la dirección corta. El plantel

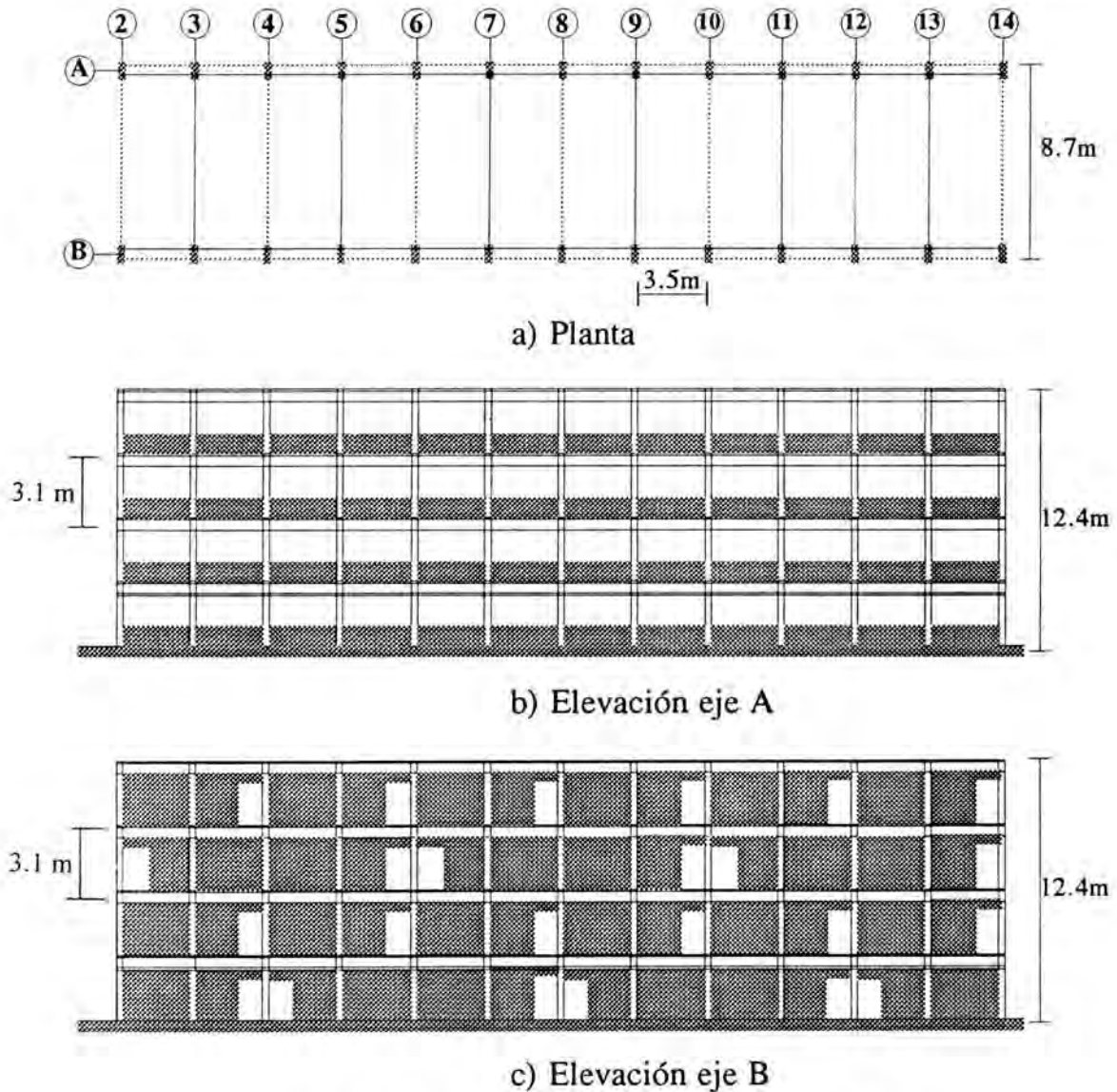


Fig 6. Planta y elevaciones de la escuela EP2

consta de doce marcos que corren en dirección N-S y dos marcos en dirección E-W. Sus dimensiones en planta son 42 x 8.7 m, con un área de 365.4 m<sup>2</sup>. La estructura original consiste de marcos de concreto reforzado que en su dirección larga disponen de muros de mampostería de ladrillo hueco, con aberturas para ventanas y puertas, que se encuentran desligados de los marcos por medio de placas metálicas; mientras que en su dirección corta cuenta con muros estructurales de bloque de concreto no reforzados cada dos crujías. Los muros de los marcos exteriores 2 y 14 son

muros de cortante de concreto reforzado. Las columnas y las vigas son de sección rectangular; las columnas miden aproximadamente 25 x 50 cm, y están orientadas en la dirección corta, mientras que las vigas son de 25 x 50 cm. El peralte de las losas es de 10 cm.

El refuerzo en columnas y trabes, y las propiedades del concreto y el acero de refuerzo corresponde a los diseños típicos de las escuelas del CAPFCE. Las propiedades de los materiales son  $f'_c = 200 \text{ kg/cm}^2$ ,  $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$  y la cuantía de refuerzo en columnas es de  $\rho =$

0.0406, mientras que en vigas  $\rho$  varía de 0.0057 a 0.0095 en ambos lechos, ya que el refuerzo es simétrico ( $\rho = \rho^+ = \rho^-$ ). La cimentación de EP2 es a base de zapatas corridas con profundidades de desplante de 1.50 m y el ancho de la zapata en su base es de 2.00 m con un peralte que varía de 15 cm en sus extremos a 20 cm en el centro de la zapata. El ancho de la zapata de la base de la estructura a su base es de 40 cm. Las propiedades de los muros de mampostería se tomaron de acuerdo con los valores recomendados para diseño de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño de Estructuras de Mampostería (NTCEM-87, 1987). Se consideró que el esfuerzo nominal a compresión de los muros de ladrillo hueco era  $f_m = 15 \text{ kg/cm}^2$  y  $f_m = 20 \text{ kg/cm}^2$  para los muros hechos con bloque hueco.

### Edificio E1

Es una edificación totalmente simétrica; está constituida por cuatro niveles con alturas de entrepiso de 4.57 m, alcanzando una altura total de 18.28 m. Se tienen cinco crujeas tanto en la dirección N-S, como en la E-W con claros de 9.15 m. La dimensión de cada lado es de 45.75 m y el área total de la planta es de 2 090.4 m<sup>2</sup>. La estructuración del edificio es a base de marcos de concreto reforzado con contravientos metálicos, como se indica en la fig 7. Como se trata de un proyecto nuevo para los efectos del análisis y del diseño de los aisladores de base y posteriormente de la superestructura, se consideró inicialmente, para fines de prediseño, el número, ubicación y dimensionamiento de los principales elementos estruc-

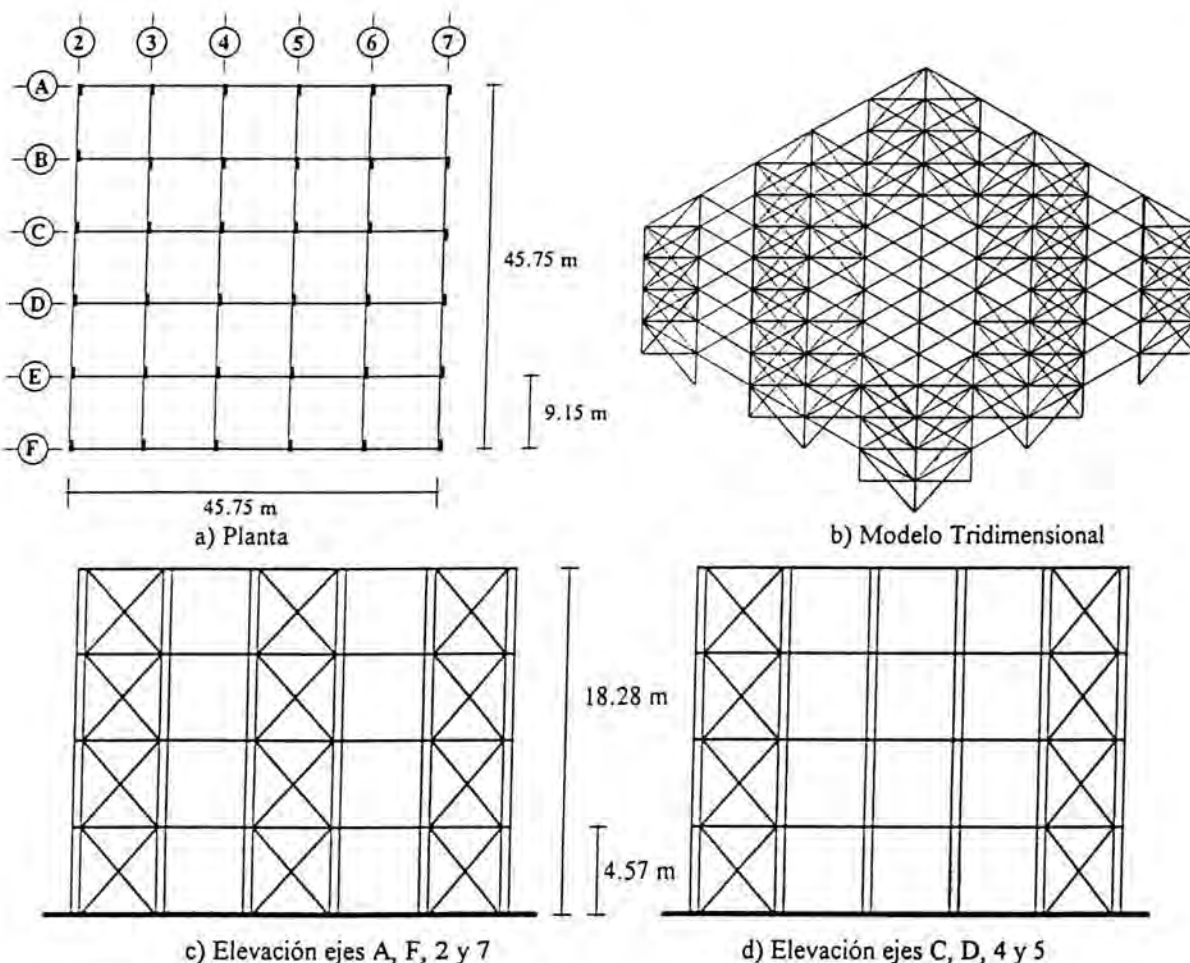


Fig 7. Planta, elevaciones y modelo tridimensional del edificio E1

turales como columnas, vigas y contravientos, así como una estimación de las cargas de diseño. En un principio, se propusieron columnas cuadradas y vigas rectangulares, las primeras de 50 x 50 cm y las vigas de 35 x 75 cm. Para los contravientos se propusieron secciones cajón de 25 x 25 x 0.635 cm.

Las propiedades de los materiales consideradas para el diseño son: concreto con  $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$ , acero de refuerzo con  $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$  y acero estructural A-36 con  $f_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$ . Se estimó un peso total de la estructura de 10030 toneladas. Las dimensiones, refuerzos y detalles de los diseños finales de vigas, columnas y contravientos para los modelos con aisladores de base y en base rígida se presentan con detalle en Gómez (1996) y se resumen en secciones posteriores.

### DISEÑO CONVENCIONAL EN BASE RÍGIDA

Como se contaba con los diseños de las escuelas EP1 y EP2, solamente fue necesario diseñar la estructura del edificio E1 como una estructura convencional en base rígida. Este diseño se hizo con la finalidad de comparar las secciones y los armados entre un proyecto convencional y uno con aislamiento de base. Se diseñó el edificio E1 para la zona D-I (fig 3) considerando un factor de comportamiento sísmico  $Q = 2$ , ya que se trata de un marco contraventeado no dúctil, lo que dio como resultado que la estructura se diseñara para un cortante basal  $V = 0.25 W$ , al tratarse de una estructura de periodo corto ( $T = 0.58 \text{ s}$ ). El edificio E1 se diseñó para cumplir con todos los requisitos de deformación y resistencia exigidos por el RCEG-90, considerando todas las combinaciones de carga asociadas al espíritu del Reglamento (nueve, una de carga vertical y ocho donde se combinan las cargas laterales con la vertical, tomando en cuenta la directividad de las fuerzas sísmicas), utilizando un análisis tridimensional modal espectral con el procedimiento de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados para la combinación de respuestas modales máximas.

El diseño de los contravientos de acero estructural fue de sección cajón formado por cuatro placas soldadas con dimensiones

25 x 25 x 0.635 cm. El diseño de los elementos de concreto consiste en columnas de 70 x 70 cm de sección transversal con porcentajes de refuerzo que varían de  $\rho = 0.0145$  para los niveles superiores a  $\rho = 0.0420$  para las columnas más esforzadas del primer entrepiso. La sección transversal de las vigas fue de 40 x 85 cm y sus porcentajes de refuerzo a momento positivo variaron entre  $\rho = 0.0034$  y  $\rho = 0.0086$  y para momento negativo entre  $\rho = 0.0094$  y  $\rho = 0.0140$ , obteniéndose los menores refuerzos para las vigas de los dos últimos pisos. Los detalles del diseño se encuentran en Gómez (1996).

### DISEÑO CON AISLADORES DE BASE

Con base en lo expuesto en secciones anteriores, se procedió a diseñar los aisladores de base para los edificios EP1, EP2 y E1 utilizando un método estático que se basa en las recomendaciones del reglamento UBC y sus adecuaciones preliminares anteriormente expuestas y en el espectro de diseño sísmico del reglamento de Guerrero (RCEG-90, 1990), que se muestra en la fig 3. Se consideró que todas las estructuras se localizan en la zona D-I. Los aisladores de base estudiados fueron elastómeros laminados (fig 8a) y elastómeros laminados con corazón de plomo (fig 8b). Para su diseño se utilizaron los criterios de estabilidad dinámica señalados por Skinner et al (1993) y que se pueden consultar también en Tena *et al* (1995), Muñoz (1995) y Gómez (1996). Solamente para el edificio E1 se diseñó la estructura, con el procedimiento que se muestra a continuación.

#### Método de diseño utilizado

El diseño de los sistemas de aislamiento de base se automatizó mediante el desarrollo de un programa de cómputo que facilitara y agilizara el cálculo de distintos elastómeros, laminados o laminados con corazón de plomo, y que minimizara la posibilidad de errores. El algoritmo utilizado se describe a continuación:

- (a) Datos de entrada: (1) zona sísmica donde va a desplantarse la estructura (C-I, D-I, etc), (2) aceleración de la gravedad,  $g$ , (3) periodo fundamental de la estructura en



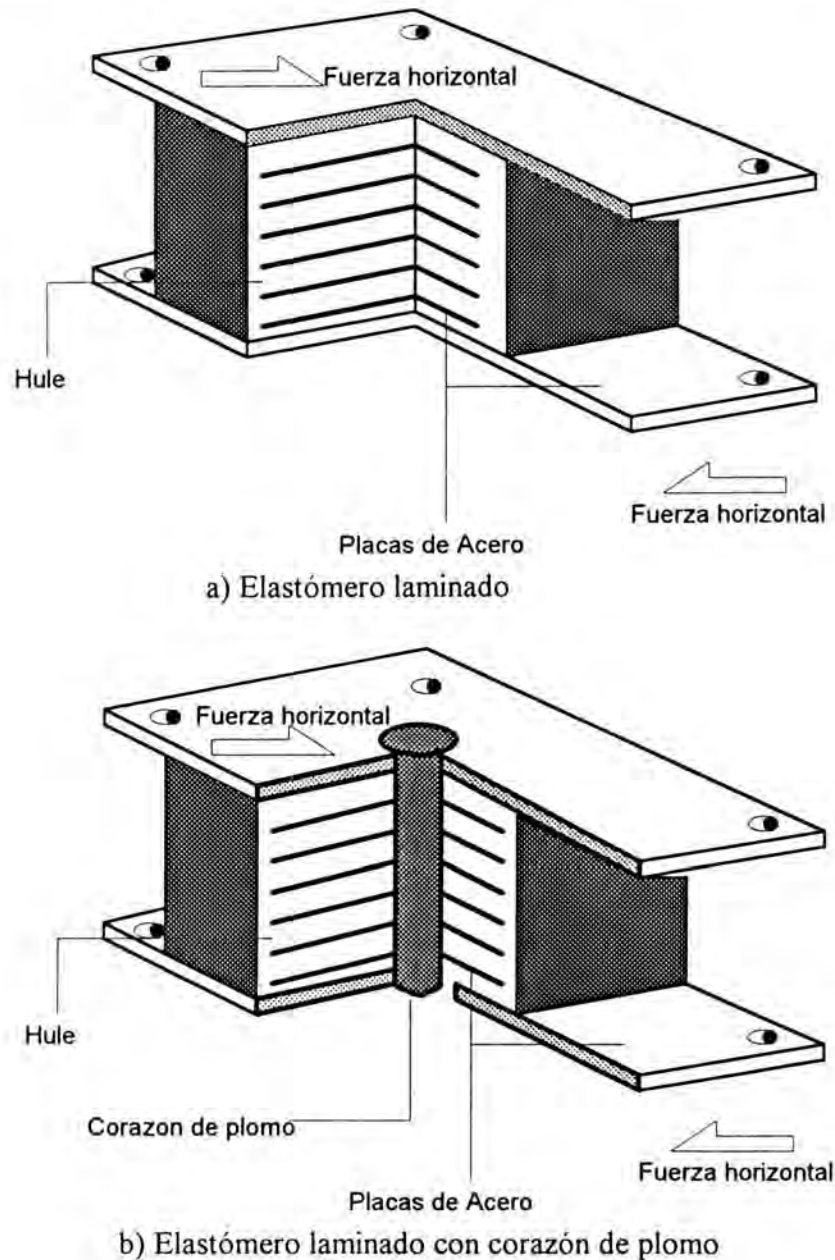


Fig 8. Aisladores de base en estudio

base rígida ( $T$ ), (4) periodo óptimo de la estructura en base aislada ( $T_a$ ) para el diseñador, tomando en cuenta las restricciones impuestas por el UBC y las recomendaciones neozelandesas, (5) peso total de la estructura ( $W$ ), (6) dimensión corta en planta del edificio ( $b$ ), (7) dimensión larga en planta del edificio ( $d$ ), (8)

excentricidad de diseño ( $e$ ), (9) distancia entre el centro de rigidez del sistema de aislamiento al elemento de interés ( $y$ ), (10) factor de amortiguamiento viscoso equivalente del sistema aislado ( $B$ ), (11) factor de proximidad a una falla activa ( $N$ ), (12) factor por el sismo máximo probable ( $M_M$ ), (13) factor de comportamiento sísmico en

base rígida ( $Q$ ), (14) factor de comportamiento sísmico en base aislada ( $Q_a$ ), (15) factor de importancia de la estructura ( $I$ ), (16) número de aisladores a utilizar ( $N_{ais}$ ), (17) módulo de cortante del elastómero ( $G_{ais}$ ) y (18) resistencia al cortante del plomo ( $\tau_{pb}$ ).

- (b) Con la zona sísmica,  $T$  y  $T_a$ , se calcula el coeficiente sísmico de diseño para la estructura en base rígida ( $a$ ) y para la estructura en base aislada ( $a_a$ ). El cálculo del coeficiente para base rígida solamente tiene la finalidad de ilustrar cuanto se reduce el coeficiente de diseño al introducir aisladores. El valor propuesto de  $T_a$  debe estar dentro del siguiente intervalo:  $1.5 \leq T_a \leq 3$  s. El límite superior es acotado por la condicionante (4) del UBC. El límite inferior está basado en la experiencia neozelandesa (Skinner *et al*, 1993). Por otra parte, el valor de  $T$  es importante para verificar que, como se señala en la restricción (5) del UBC, se cumpla que  $T_a \geq 3T$ . Sin embargo, la restricción (5) del UBC se basa en la determinación del periodo fundamental de vibración calculado mediante una fórmula aproximada. Skinner *et al* (1993) proponen como válido  $T_a \geq 2T$  para aisladores de tipo elastomérico, por lo que en el presente trabajo ésta última será la relación límite considerada. El programa verifica estas condiciones y en caso de que  $T_a$  no sea adecuado, propone un valor que cumpla con tales restricciones.

- (c) Se calcula el desplazamiento de diseño, de la ec 17 y las modificaciones expuestas:

$$D = 25.4 a_a N \frac{T_a}{B} \quad (\text{cm}) \quad (24)$$

- (d) De las ecs 15 y 16, se calcula el valor del desplazamiento total de diseño,  $D_T$ .
- (e) De la ec 18, se calcula el desplazamiento máximo total de diseño,  $D_{TM}$ . Este es el valor que se utilizará para el diseño final de los aisladores.
- (f) Se calcula la rigidez lateral total efectiva del sistema de aislamiento a partir de la ec 14:

$$k_{min} = \frac{4 \pi^2 W}{g T_a^2} \quad (25)$$

- (g) Se calcula la rigidez efectiva de cada uno de los aisladores:

$$k_{eff} = \frac{k_{min}}{N_{ais}} \quad (26)$$

- (h) Se calculan las rigideces inicial ( $k_1$ ) y posterior a la fluencia ( $k_2$ ) a partir de las ecs 10 y 11.

- (i) Se calcula el desplazamiento de fluencia de los aisladores con características histeréticas bilineales a partir de la ec 13:

$$\Delta_y = 0.111 D_{TM} \quad (27)$$

- (j) Se calcula la fuerza cortante mínima  $V$  con la que debe diseñar el sistema de aislamiento. De acuerdo con DIS ("UBC", 1994), este valor debe ser calculado como:

$$V = k_{max} D \quad (28)$$

y es válido considerar que en un sistema de aislamiento estable  $k_{max} = k_{min}$ , por lo que el cortante máximo de cada aislador debe calcularse como:

$$V_{ais} = k_{eff} D \quad (29)$$

y, por tanto, la fuerza de fluencia de cada aislador bilineal se calcula a partir de la ec 14.

- (k) Se dimensionan los aisladores de base. Para el caso de elastómeros laminados y laminados con corazón de plomo, se toman en cuenta los criterios de estabilidad dinámica expuestos por Skinner *et al* (1993), aunque existen otros criterios documentados en la literatura y que también pudieran emplearse ("UBC", 1994; Kelly, 1993). Por ejemplo, para aisladores laminados de sección circular, se calcula el diámetro  $\phi$  y su altura  $h$  de la siguiente manera:

$$\phi = 3 D_{TM} \quad (30)$$

$$h = \frac{\pi \phi^2 G_{ais}}{4 k_{eff}} \quad (31)$$

mientras que para elastómeros laminados con corazón de plomo, el diámetro del elastómero se calcula de acuerdo con la ec 30, pero la altura se calcula en función de  $k_2$  en lugar de  $k_{eff}$ , es decir:

$$h = \frac{\pi \phi^2 G_{ais}}{4 k_2} \quad (32)$$

en el caso de los elastómeros laminados con corazón de plomo, restaría dimensionar el corazón de plomo. El área y el diámetro requeridos se calculan de la siguiente manera:

$$A_{pb} = \frac{V_y - k_2 \Delta y}{\tau_{pb}} \quad (33)$$

$$\phi_{pb} = \sqrt{\frac{4 A_{pb}}{\pi}} \quad (34)$$

- (l) Se revisan las dimensiones de los elastómeros para asegurarse que el diseño sea adecuado. Por ejemplo, se debe revisar que el elastómero no sea ni muy corto ni muy esbelto, por lo que se recomienda que la relación entre la altura del elastómero y su dimensión menor en planta esté entre 0.25 y 0.8, es decir, para elastómeros de sección circular sería  $0.25 \leq h/\phi \leq 0.8$ . Para elastómeros laminados con corazón de plomo se debe revisar que el diámetro del corazón se encuentre también en intervalos razonables, por lo que se recomienda limitarlo entre 0.1 y 0.3, que para el caso de un elastómero de sección circular sería  $0.1 \leq \phi_{pb}/\phi \leq 0.3$ . Si la relación de esbeltez no se cumple por tratarse de un aislador muy esbelto,  $h/\phi > 0.8$ , se debe proponer un periodo de aislamiento  $T_a$  más corto o disminuir el número de aisladores y repetir el procedimiento desde el inciso (c). Si la relación de esbeltez no se cumple por tratarse de un aislador muy corto,  $h/\phi < 0.25$ , se debe proponer un periodo de aislamiento  $T_a$  más largo o aumentar el número de aisladores y repetir el procedimiento desde el inciso (c). Si el diseño cumple con las restricciones

anteriores entonces el diseño de los aisladores está listo y se puede continuar con el diseño de la estructura.

- (m) Se calcula la fuerza cortante basal de diseño de la estructura,  $V_{bde}$  como:

$$V_{bde} = \text{Max} (V_s, V_{bre}) \quad (35)$$

$$V_s = \frac{k_{max} D}{Q_a} = \frac{k_{min} D}{Q_a} \quad (36)$$

$$V_{bre} = \frac{a_a IW}{Q} \quad (37)$$

Finalmente, se procede a diseñar a la superestructura distribuyendo las fuerzas laterales conforme a la ec 22 o utilizando el perfil del primer modo de vibración en base rígida para distribuir las fuerzas.

#### *Diseños iniciales*

Se diseñaron los aisladores de base de las tres estructuras en estudio siguiendo el procedimiento anterior en el cual, como se observa, no se modificó el valor del desplazamiento de diseño  $D$  del UBC todavía, lo que tuvo como propósito evaluar qué tan inseguros eran los diseños si no se toman en cuenta las características de los movimientos del terreno de las costas mexicanas en la definición de  $D$ , puesto que no sería difícil que compañías trasnacionales e incluso, compañías nacionales, intentaran aplicar directamente el reglamento del UBC o la modificación en evaluación para el diseño sísmico de estructuras aisladas en México, a falta de criterios nacionales específicos. En el proceso de diseño se estudiaron distintos arreglos con diferente número de aisladores, hasta que se obtuvo un diseño satisfactorio. Los detalles se presentan en Gómez (1996). Los detalles de los diseños con este procedimiento se resumen en la tablas 2 (datos de entrada) y 3 (resumen del diseño final). En los datos de entrada comunes, se consideró: (1)  $N = 1.0$ , ya que el método estático no puede utilizarse en estructuras que se encuentren cercanas a una falla activa, por lo que se consideró una distancia mayor a 15 km (tabla

Tabla 2. Datos generales para el diseño de aisladores

	EP1-A	EP1-B	EP2	E1
Zona	D-I	D-1	D-1	D-1
$T$ (s)	0.32	0.38	0.63	0.58
$T_a$ (s)	1.50	1.50	1.89	1.50
$W$ (t)	1218.2	685.7	1530.0	10030
$b$ (m)	9.0	9.0	8.7	45.7
$d$ (m)	53.0	18.0	42.0	45.7
$e$ (m)	2.65	0.90	2.10	2.29
$y$ (m)	25.5	9.0	21.0	22.86
$B$	1.35	1.35	1.35	1.35
$N$	1.0	1.0	1.0	1.0
$M_M$	1.5	1.5	1.5	1.5
$I$	1.5	1.5	1.5	1.0
$Q$	2.0	2.0	2	2
$Q_a$	1.5	1.5	1.5	1.5
$G_{ais}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	10.2	10.2	10.2	10.2
$\tau_{pb}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	107	107	107	107

A-23-V, UBC), (2)  $B = 1.35$ , para un porcentaje de amortiguamiento viscoso equivalente del sistema de aislamiento de 15 % en promedio (Tabla A-23-W, UBC), (3)  $M_M = 1.5$ , por considerarse que la zona D-I del RCEG-90 es "equivalente" a la zona 4 del UBC (Tabla A-23-Y) y (4) en todas las estructuras se consideró una excentricidad accidental de 0.05 veces la dimensión mayor en planta.

Se pueden hacer los siguientes comentarios de los resultados de los diseños presentados en la tabla 3. El primero, que debiera resultar obvio, es que las dimensiones ahí presentadas, que corresponden a un diseño preliminar, tendrían que adecuarse a dimensiones de aisladores comerciales. La segunda, relacionada con la escuela EP1, es que aunque para los dos cuerpos (EP1-A y EP1-B) tenemos el mismo periodo efectivo de la estructura aislada, se cuenta con diferentes dimensiones de los aisladores debido al número que se seleccionó utilizar para uno y otro caso. Al ser la altura de los aisladores bastante diferente, en este caso se debería adecuar el diseño de los aisladores para uno y otro cuerpo de manera que resultaran iguales o al menos semejantes, ya que se trata de estructuras contiguas. La tercera, relacionada

con el plantel EP2, es que en este caso  $2T < T_a < 3T$ , por lo que en esta estructura se evaluará la validez de la recomendación neozelandesa. La cuarta, relacionada con el edificio E1, se observa que el aislador es muy corto ( $h/\phi < 0.25$ ) y que  $\phi < D_{TM}$ , por lo que el diseño del aislador no parece razonable y debería rechazarse, buscando un diseño más razonable; sin embargo, este diseño se evaluó con fines académicos para demostrar lo peligroso que resulta aceptar malos diseños.

La efectividad de estos diseños se evaluaron mediante análisis dinámicos no lineales utilizando el programa 3D-Basis (Nagarajaiah *et al*, 1991) ante los acelerogramas presentados en la fig 4 y cuyas características se resumen en la tabla 1. Se consideró la acción simultánea de las dos componentes acelerográficas horizontales de cada estación. Los diseños deben resultar totalmente satisfactorios ante todos los registros exceptuando SMRZ, MANZ y ZACA, el primero por ser un registro epicentral, ya que el UBC no permite utilizar el método de diseño estático en estructuras próximas a fallas activas, el segundo por ser un acelerograma de un sismo severo no considerado en la definición del espectro de diseño del RCEG-



Tabla 3. Resumen del diseño de aisladores y superestructura, D calculado conforme a (24)

	EP1-A	EP1-B	EP2	E1
<b>Diseño global</b>				
$T$ (s)	0.32	0.38	0.63	0.58
$a$ (g)	0.500	0.500	0.488	0.500
$T_a$ (s)	1.50	1.50	1.50	1.50
$a_a$ (g)	0.316	0.316	0.317	0.316
$N_{ais}$	20	8	26	36
$D$ (cm)	8.92	8.92	8.91	8.93
$D_T$ (cm)	11.52	11.07	11.48	10.26
$D_{TM}$ (cm)	17.28	16.60	17.22	15.40
$K_{min}$ (t/cm)	21.32	12.00	26.92	175.5
$V$ (t)	194.0	109.2	244.7	1597.6
<b>Características individuales de los aisladores</b>				
$\phi$ (cm)	51.84	49.80	51.64	46.19
$h$ (cm)	40.41	26.49	41.28	7.01
$\phi_{pb}$ (cm)	7.21	8.59	7.10	15.61
$V_{ais}$ (t)	9.70	13.65	9.41	44.38
$V_y$ (t)	5.39	7.58	5.23	24.56
$\Delta_y$ (cm)	1.92	1.84	1.91	1.71
$\Delta_M = D_{TM}$ (cm)	17.28	16.60	17.22	15.40
$k_{eff}$ (t/cm)	1.066	1.500	1.035	4.875
$k_1$ (t/cm)	5.329	7.500	5.176	24.38
$k_2$ (t/cm)	0.533	0.750	0.518	2.438
<b>Parámetros para el diseño de la superestructura</b>				
$V_s$ (t)	126.8	71.4	159.3	783.1
$V_{bre}$ (t)	288.9	162.6	363.4	792.9
$V_{bde}$ (t)	288.9	162.6	363.4	792.9
$V_{bde} / V_{br}$	0.63	0.63	0.65	0.79

90 y por no ser totalmente congruente con un suelo tipo I y el tercero por no ser un movimiento totalmente congruente con un suelo tipo I. Se estudió crudamente la incidencia de los movimientos del terreno al realizar análisis donde las componentes del terreno fueron intercambiadas, es decir, se definió como sismo "X-Y" cuando la componente E-W era paralela a la dirección X de la estructura y la N-S paralela a la dirección Y, mientras que un sismo "Y-X" es cuando la componente E-W era paralela a la dirección Y y la N-S a la X. Los resultados de los análisis se resumen en las tablas 4 a

7. En ellas,  $\Delta_a$  es el desplazamiento dinámico máximo del aislador en la dirección definida por  $\theta$ , que es el ángulo con que se presenta  $\Delta_a$ , medido con respecto al eje horizontal (X).

De la tabla 4 se observa que el diseño de los aisladores para el plantel EP1-A es satisfactorio para todas las estaciones, ya que la relación entre el desplazamiento máximo dinámico del aislador  $\Delta_a$  es menor al desplazamiento máximo de diseño  $\Delta_M$  ( $\Delta_M$  corresponde a  $\Delta_{max}$  de la ec 13 y fig 1), por lo que su cociente resulta menor a la unidad. Se observa que las máximas

Tabla 4 Desplazamientos y cortantes dinámicos máximos para el edificio EPI-A en base aislada

Sismo	Registro	Dir.	Desplazamiento máximo relativo en azotea (mm)		Desplazamientos máximos de los aisladores		Cortantes Basales (t)				$\frac{V_{xe}}{V_{xu}}$	$\frac{V_{ye}}{V_{yu}}$	$\frac{V_{xe}}{W}$	$\frac{V_{ye}}{W}$
			$\Delta x_{max}$	$\Delta y_{max}$	$\Delta a/\Delta M$	$\theta$	$V_{xe}$	$V_{ye}$	$V_{xa}$	$V_{ya}$				
19/09/85	AZIH	Y-X	1.5	0.7	0.44	47.24	85.9	74.1	125.1	108.1	0.687	0.685	0.071	0.061
	CALE	X-Y	1.1	1.0	0.79	68.09	65.5	104.1	94.6	152.5	0.692	0.683	0.054	0.085
	PAPN	X-Y	1.0	0.7	0.20	70.79	57.3	70.5	79.7	100.8	0.719	0.699	0.047	0.058
	UNIO	X-Y	1.3	0.8	0.45	72.73	74.7	88.6	107.9	127.8	0.692	0.693	0.061	0.073
	ZACA	X-Y	1.8	0.7	0.77	332.53	99.5	74.7	146.6	109.9	0.679	0.680	0.082	0.061
25/04/89	VIGA	X-Y	0.7	0.7	0.15	66.13	35.3	73.6	55.8	102.3	0.633	0.719	0.029	0.060
	SMRZ	X-Y	1.6	0.7	0.74	316.69	94.1	79.7	135.5	114.7	0.694	0.692	0.077	0.065
31/05/90	LLAV	X-Y	0.8	0.6	0.09	60.06	34.7	57.3	47.7	70.4	0.727	0.814	0.028	0.047
09/10/95	MANZ	Y-X	1.7	1.1	0.94	60.21	95.3	118.6	134.2	171.8	0.711	0.690	0.078	0.097

Tabla 5 Desplazamientos y cortantes dinámicos máximos para el edificio EPI-B en base aislada

Sismo	Registro	Dir.	Desplazamiento máximo relativo en azotea (mm)		Desplazamientos máximos de los aisladores		Cortantes Basales (t)				$\frac{V_{xe}}{V_{xa}}$	$\frac{V_{ye}}{V_{ya}}$	$\frac{V_{xe}}{W}$	$\frac{V_{ye}}{W}$
			$\Delta x_{max}$	$\Delta y_{max}$	$\Delta a/\Delta M$	$\theta$	$V_{xe}$	$V_{ye}$	$V_{xa}$	$V_{ya}$				
19/09/85	AZIH	Y-X	2.8	0.5	0.36	27.39	47.0	42.3	67.2	62.8	0.699	0.674	0.069	0.062
	CALE	X-Y	2.3	0.6	0.42	68.21	37.1	48.3	53.1	72.0	0.699	0.671	0.054	0.070
	PAPN	X-Y	1.8	0.5	0.17	62.06	30.7	37.4	43.1	55.2	0.712	0.678	0.045	0.055
	UNIO	X-Y	2.4	0.6	0.36	71.62	36.3	47.6	50.7	71.0	0.716	0.670	0.053	0.069
	ZACA	X-Y	3.5	0.5	0.75	333.39	55.6	40.0	83.5	59.4	0.666	0.673	0.081	0.058
25/04/89	VIGA	X-Y	1.0	0.5	0.17	83.40	17.5	40.9	20.0	60.2	0.875	0.679	0.026	0.060
	SMRZ	X-Y	2.8	0.6	0.69	311.59	45.9	45.7	64.8	67.9	0.708	0.673	0.067	0.067
31/05/90	LLAV	X-Y	1.5	0.3	0.10	58.65	27.4	27.4	30.0	38.5	0.913	0.712	0.040	0.040
09/10/95	MANZ	Y-X	3.7	0.7	0.93	52.61	50.8	58.9	70.2	87.0	0.723	0.877	0.074	0.086

Tabla 6 Desplazamientos y cortantes dinámicos máximos para el edificio EP2 en base aislada

Sismo	Registro	Dir	Desplazamiento máximo relativo en azotea (mm)		Desplazamientos máximos de los aisladores		Cortantes Basales (t)				$\frac{V_{xe}}{V_{xa}}$	$\frac{V_{ye}}{V_{ya}}$	$\frac{V_{xe}}{W}$	$\frac{V_{ye}}{W}$
			$\Delta x_{max}$	$\Delta y_{max}$	$\Delta a/\Delta M$	$\theta$	Estructura		Aisladores					
							$V_{xe}$	$V_{ye}$	$V_{xa}$	$V_{ya}$				
19/09/85	AZIH	Y-X	10.7	0.5	0.33	28.49	122.8	100.0	149.0	140.5	0.824	0.712	0.080	0.065
	CALE	X-Y	8.1	0.5	0.38	67.30	89.7	110.9	117.1	155.7	0.766	0.712	0.059	0.072
	PAPN	X-Y	6.1	0.4	0.16	64.60	72.7	89.7	98.2	125.9	0.740	0.712	0.048	0.059
	UNIO	X-Y	9.2	0.5	0.34	76.27	98.6	112.4	104.5	157.8	0.944	0.712	0.064	0.073
	ZACA	X-Y	15.4	0.4	0.70	331.49	144.5	94.5	180.1	133.0	0.802	0.711	0.094	0.062
25/04/89	VIGA	X-Y	2.6	0.4	0.17	79.75	33.1	95.5	47.3	134.2	0.700	0.712	0.022	0.062
	SMRZ	X-Y	9.7	0.4	0.64	310.01	109.5	109.6	133.4	153.4	0.821	0.714	0.072	0.072
31/05/90	LLAV	X-Y	5.1	0.3	0.08	55.55	59.3	59.8	55.3	79.9	1.072	0.748	0.039	0.039
09/10/95	MANZ	Y-X	12.5	0.7	0.91	52.81	129.5	156.0	156.1	190.2	0.830	0.820	0.085	0.102

Tabla 7 Desplazamientos y cortantes dinámicos máximos para el edificio E1 en base aislada

Sismo	Registro	Dir	Desplazamiento máximo relativo en azotea (mm)		Desplazamientos máximos de los aisladores		Cortantes Basales (t)				$\frac{V_{xe}}{V_{xu}}$	$\frac{V_{ye}}{V_{yu}}$	$\frac{V_{xe}}{W}$	$\frac{V_{ye}}{W}$
			$\Delta x_{max}$	$\Delta y_{max}$	$\Delta a/\Delta M$	$\theta$	Estructura		Aisladores					
							$V_{xe}$	$V_{ye}$	$V_{xa}$	$V_{ya}$				
19/09/85	AZIH	Y-X	0.2	0.2	0.38	21.98	683.6	705.8	896.8	911.2	0.762	0.775	0.068	0.070
	CALE	X-Y	0.2	0.1	0.32	56.57	550.2	644.8	727.5	881.7	0.756	0.731	0.055	0.064
	PAPN	X-Y	0.1	0.1	0.17	46.70	459.3	531.4	617.0	696.0	0.744	0.764	0.046	0.053
	UNIO	X-Y	0.3	0.2	0.30	57.65	573.6	665.8	804.0	910.2	0.713	0.731	0.057	0.066
	ZACA	X-Y	0.4	0.3	0.71	36.39	763.6	651.7	1048.6	884.0	0.728	0.737	0.076	0.065
25/04/89	VIGA	Y-X	0.1	0.1	0.15	38.11	446.1	456.6	538.0	577.7	0.829	0.790	0.044	0.046
	SMRZ	X-Y	0.2	0.2	0.61	24.83	536.7	511.5	624.2	778.1	0.860	0.657	0.054	0.051
31/05/90	LLAV	Y-X	0.1	0.1	0.13	54.59	458.0	451.3	569.2	659.4	0.805	0.684	0.046	0.045
09/10/95	MANZ	Y-X	0.4	0.3	1.27	44.22	1004.3	935.3	1276.4	1180.0	0.787	0.793	0.100	0.093



respuestas se obtienen para los registros CALE, ZACA, SMRZ y MANZ, y que la respuesta de los aisladores es elástica ante los registros de la estación LLAV, ya que  $\Delta_a < 0.111 \Delta_M$  (ec 13, fig 1). Se observa que el cortante transmitido a la superestructura varía entre el 63 % y el 84 % del actuante en los aisladores, valores que se encuentran en el intervalo considerado por el UBC. La magnitud del cortante basal dinámico máximo ( $0.097 W = 171.8 \text{ t}$ , estación MANZ, dirección Y) es menor al calculado con el método de diseño estático ( $V_{bde} = 288.9 \text{ t}$ , tabla 3). Los desplazamientos dinámicos máximos de la superestructura al nivel de azotea son prácticamente despreciables (tabla 4). Por otra parte, se observaron diferencias importantes en los desplazamientos máximos de los aisladores, a pesar de tratarse de una estructura simétrica. Esto se debe principalmente a que la planta es muy alargada ( $L_1/L_2 > 2$ ) y, por tanto, la estructura de cimentación, que se apoya sobre los elementos del sistema de aislamiento, sufre deformaciones importantes en planta, comportándose todo el sistema de manera similar a estructuras con diafragmas flexibles. El UBC no limita la relación de aspecto en planta para la utilización del método estático de diseño; sin embargo, es opinión del autor que debe limitarse ya que en muchas ocasiones la respuesta de una estructura con diafragmas flexibles es más desfavorable que aquellas con diafragmas rígidos (por ejemplo, Tena-Colunga y Abrams, 1996), sobre todo en la magnitud de los desplazamientos, que es lo que rige el diseño de los sistemas de aislamiento.

Por otra parte, en la tabla 5 se observa que el diseño para el plantel EPI-B resultó también satisfactorio, con observaciones similares que para el cuerpo EPI-A, salvo que en este caso no se presentaron desplazamientos máximos notablemente desiguales en los aisladores. Lo mismo puede concluirse para el plantel EP2, de acuerdo con los resultados presentados en la tabla 6, salvo que en este caso es de llamar la atención que para el registro LLAV en dirección "X" se transmite un cortante mayor a la estructura con respecto al sistema de aislamiento. Este hecho es posible ya que, al igual que cuando se considera interacción suelo-estructura, existen algunos casos en que la superestructura debe soportar amplificaciones

de fuerzas cortantes, aunque en la mayoría de los casos los cortantes transmitidos a la superestructura se reducen alrededor de un 15-35 %.

En la tabla 7 se observa que el diseño de aisladores es aceptable para el edificio EI para los registros de las costas de Guerrero y Michoacán; sin embargo, se presenta inestabilidad dinámica ante los acelerogramas de la estación MANZ, donde aparte de que se supera el desplazamiento de diseño se supera el cortante basal de diseño de la estructura ( $V_{bde}$ , tabla 3). Esto no puede considerarse como falla del método estático para el estado de Guerrero por las razones anteriormente expuestas. Sin embargo, sí cabe reflexionar que sería muy difícil acomodar un desplazamiento de 10.8 cm (acelerogramas de la estación ZACA) o de 9.4 cm (estación SMRZ) en aisladores con una altura de aproximadamente 7 cm, por lo que el diseño debe mejorarse para tomar en cuenta el comportamiento real de los elastómeros, no aceptar como válidos exclusivamente resultados analíticos de modelos teóricos que no hagan ninguna reflexión sobre la geometría adecuada de los elastómeros para acomodar los desplazamientos de diseño.

Se puede concluir que el método de diseño empleado resultó satisfactorio a pesar de no tomarse en cuenta completamente las características regionales de los movimientos del terreno, puesto que el desplazamiento de diseño D (ec 24) está tomado íntegramente del reglamento UBC, y este desplazamiento D debe estar basado en el desplazamiento máximo obtenido de la media más una desviación estándar de los movimientos del terreno para la zona 4 del UBC en el intervalo de periodos establecido por el UBC para estructuras aisladas sísmicamente de su base ( $1.5 \text{ s} \leq T_a \leq 3 \text{ s}$ ). Esto no tiene por qué cumplirse para los movimientos del terreno de la costa mexicana del Pacífico. En la fig 9 se grafican los espectros de pseudodesplazamientos de los registros más intensos bajo estudio (ZACA, AZIH, CALE, UNIO, PAPN, SMRZ y MANZ) y se comparan éstos con el desplazamiento base del UBC (10 pulgadas = 25.4 cm) para el intervalo de periodos de diseño. Se aprecia de la misma gráfica que, en general, los desplazamientos espectrales máximos no superan a este límite en gran parte del intervalo comprendido, salvo para el registro



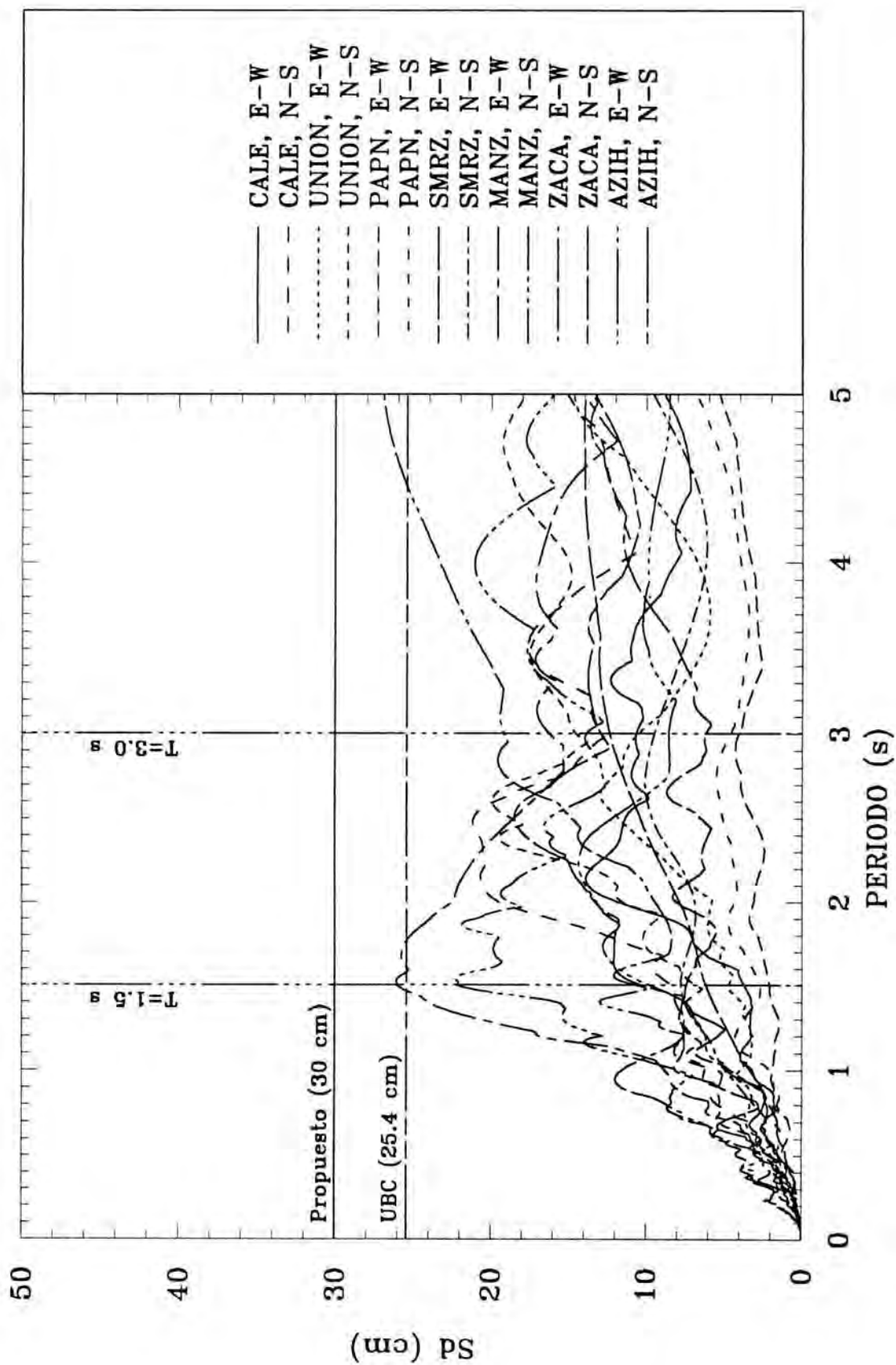


Fig 9. Comparación de los espectros de pseudodesplazamientos de los acelerogramas en estudio con los desplazamientos de diseño de aisladores (del UBC y propuesto)

MANZ E-W en el intervalo de periodos de 1.5 s y 1.8 s. Se infiere que se podría tomar un límite más bajo para definir el desplazamiento base de diseño en estructuras del estado de Guerrero, pero para ello se requieren realizar estudios más detallados acerca de los límites adecuados tomando en cuenta otros factores no contemplados en el presente estudio. Por otra parte, se observa que se debería tomar un límite mayor si se desea que los diseños con el método estático resulten estables y más seguros también ante los acelerogramas de la estación MANZ, no contemplada en el espectro de diseño de Guerrero. Por tanto, en la misma gráfica se presenta un límite de 30 cm propuesto en este estudio, el cual cubre razonablemente a los registros en estudio en el intervalo de periodos comprendidos para el diseño de estructuras aisladas, sin ser excesivamente conservador, ya que hay que tomar en cuenta que se compara con valores máximos de espectros de pseudodesplazamiento de componentes acelerográficas unidimensionales.

#### *Diseño final*

Se procedió a calibrar el método de diseño estático en evaluación si ahora se toma como desplazamiento base los 30 cm propuestos a partir de la observación de la fig 9. Por tanto, el desplazamiento de diseño es, con la modificación propuesta:

$$D = 30 a_a N \frac{T_a}{B} \quad (\text{cm}) \quad (38)$$

Se repitieron los diseños para la escuela EP1 y para el edificio E1, a pesar de que para la escuelas EP1 y EP2 los diseños basados con el desplazamiento de 25.4 cm ya eran adecuados (tablas 4 a 6). Los nuevos diseños se resumen en la tabla 8. Se presentan dos diseños para el plantel EP1-A, el primero con elastómeros laminados con corazón de plomo y el segundo con elastómeros laminados, los cuales tienen las mismas propiedades globales. Se aprecia que la diferencia consiste en que con el corazón de plomo se requiere de elastómeros más altos que utilizando elastómeros laminados simples y que, para este caso, el segundo resultaría más adecuado dadas las relaciones de aspecto del aislador. Las dimensiones de los elastómeros laminados con corazón de plomo parecen razonables para los edificios EP1-B y E1, particularmente para este último, donde ahora

la relación altura entre diámetro ( $h/\phi$ ) es mayor al 0.25 mínimo propuesto. El impacto en aumentar el desplazamiento de diseño es que ahora se requiere de aisladores de mayor diámetro y, por consiguiente, capaces de acomodar mayores desplazamientos.

Como se enfatizó previamente, faltaría adecuar estos diseños a dimensiones comerciales, tomando en cuenta, entre otras cosas, las características de la superestructura y la cimentación de cada edificio. Sin embargo, estos diseños se evaluaron como se presentan en la tabla 8 con la finalidad de discernir si el procedimiento de diseño estático es razonablemente seguro, ya que se toma por descontado que un diseñador experimentado tendrá particular cuidado en el dimensionamiento y detallado de los sistemas de aislamiento de acuerdo con las características de la estructura que pretende aislar sísmicamente y, en cambio, tal vez no cuente con las herramientas o con una familia de acelerogramas lo suficientemente representativa para evaluar sus diseños utilizando análisis no lineales paso a paso.

La efectividad de los diseños resumidos en la tabla 8 se evaluaron nuevamente realizando análisis dinámicos no lineales utilizando el programa 3D-Basis. Los resultados de los análisis para la escuela EP1 no se presentan por razones de espacio, pero resultan más favorables a los presentados en la tablas 4 y 5, como era de esperarse. Se continuaron observando los problemas de respuestas desiguales y amplificadas en los aisladores del plantel EP1-A.

Dado que las características de estructuración, rigidez y peso entre los edificios EP1-A y EP1-B son similares, cabe remarcar y reflexionar nuevamente por qué su respuesta es tan diferente si el periodo efectivo de aislamiento es similar, y la distribución de los aisladores en planta es totalmente simétrica en ambos casos. La razón de esta diferencia es la relación de aspecto de la planta. La planta de EP1-A es muy alargada ( $L_1/L_2 = 5.8$ ) mientras que la planta de EP1-B, aunque alargada ( $L_1/L_2 = 2$ ), su relación de aspecto está en el límite establecido para diafragmas rígidos por la mayoría de los reglamentos de diseño estructural. Al ser la planta de EP1-A muy

Tabla 8. Resumen del diseño de aisladores y superestructura, D calculado conforme a (38)

	EP1-A	EP1-A (lam)	EP1-B	E1
<b>Diseño global</b>				
$T$ (s)	0.32	0.32	0.38	0.58
$a$ (g)	0.500	0.500	0.500	0.500
$T_a$ (s)	1.50	1.50	1.50	1.80
$a_a$ (g)	0.316	0.316	0.316	0.289
$N_{ais}$	20	20	8	36
$D$ (cm)	10.54	10.54	10.54	11.55
$D_T$ (cm)	13.61	13.61	13.07	13.28
$D_{TM}$ (cm)	20.41	20.41	19.61	19.92
$K_{min}$ (t/cm)	21.32	21.32	12.00	121.88
$V$ (t)	194.0	194.0	109.2	1215.3
<b>Características individuales de los aisladores</b>				
$\phi$ (cm)	61.24	61.24	58.82	59.76
$h$ (cm)	56.37	28.19	36.96	16.90
$\phi_{ph}$ (cm)	7.05	-	8.42	13.36
$V_{ais}$ (t)	9.70	9.70	13.65	33.76
$V_y$ (t)	5.39	5.39	7.58	18.75
$\Delta_y$ (cm)	2.27	2.27	2.18	2.21
$\Delta_M=D_{TM}$ (cm)	20.42	20.42	19.61	19.92
$k_{eff}$ (t/cm)	1.066	1.066	1.500	3.385
$k_1$ (t/cm)	5.329	5.329	7.489	16.93
$k_2$ (t/cm)	0.533	0.533	0.749	1.692
<b>Parámetros para el diseño de la superestructura</b>				
$V_s$ (t)	149.8	149.8	84.3	938.2
$V_{bre}$ (t)	288.9	288.9	162.6	1447.7
$V_{bde}$ (t)	288.9	288.9	162.6	1447.7
$V_{bde}/V_{br}$	0.63	0.63	0.63	0.58

alargada, la respuesta dinámica de los aisladores se amplifica, pues en cierta manera trabajan en sus direcciones horizontales principales de manera similar a los diafragmas flexibles (por ejemplo, Tena-Colunga y Abrams, 1996). Además, las estructuras cortas con plantas alargadas son más susceptibles a volteos dinámicos cuando se flexibilizan sus apoyos, como se ha observado en estudios donde se toma en cuenta la interacción suelo-estructura (Álvarez, 1995). Por tanto, enfatizamos nuevamente que parece adecuado agregar una restricción al método de diseño

estático para que no se permita utilizarlo en el diseño de aislamiento sísmico de estructuras con plantas alargadas ( $L_1/L_2 > 2$ ).

La respuesta del nuevo diseño de aisladores para el edificio E1 se resume en la tabla 9. Se aprecia que el diseño de los aisladores es totalmente estable ante todos los registros y que las deformaciones máximas en la superestructura son prácticamente despreciables. Las magnitudes de los cortantes basales transmitidos a la superestructura son en general bajas e inferiores a las calculadas con el método de

diseño estático (tabla 8), incluyendo a la estación MANZ (tabla 9).

#### Diseño de la estructura del edificio El

Se diseñó la estructura del edificio aislado en su base conforme a los lineamientos del método estático presentado, utilizando para ello una distribución de fuerzas basadas en sus modos principales de vibración, para el cortante basal de diseño presentado en la tabla 8 ( $V = 0.144 W$ ), que como se puede observar, es del orden del 58 % del cortante basal de diseño de la estructura en base rígida.

El diseño de los contravientos de acero estructural no cambió debido a que se evitó introducir diagonales muy esbeltas, por lo que también fueron secciones cajón compuestas de cuatro placas soldadas con dimensiones 25 x 25 x 0.635 cm. El diseño de los elementos de concreto consiste en columnas de 50 x 50 cm de sección transversal con porcentajes de refuerzo que varían de  $\rho = 0.0104$  para los niveles superiores a  $\rho = 0.06$  para las columnas más esforzadas del primer entrepiso, recordando que este último porcentaje de refuerzo es el límite superior permitido actualmente por los reglamentos mexicanos para el diseño de marcos con detallado no dúctil. La sección transversal de las vigas fue de 35 x 75 cm y sus porcentajes de refuerzo a momento positivo variaron entre  $\rho = 0.0031$  y  $\rho = 0.0051$  y para momento negativo entre  $\rho = 0.0077$  y  $\rho = 0.0106$ , obteniéndose los menores refuerzos para las vigas de los dos últimos pisos. Los detalles del diseño se encuentran en Gómez (1996).

### COMPARACIÓN DEL DISEÑO CON AISLADORES vs BASE RÍGIDA

#### Diseño de la estructura del edificio El

Con fines ilustrativos, se compararon crudamente los volúmenes de materiales requeridos para la construcción de vigas, columnas y diagonales entre los diseños de El con base rígida con respecto al diseño con aisladores de base. Los detalles de la estimación se presentan en Gómez (1996). Aunque no existió ahorro alguno en el diseño de los contravientos metálicos, ya que en ambos diseños se cuenta con las mismas secciones, sí en cambio existió un ahorro substancial en el volumen de concreto requerido para el diseño de base aislada (728.6 m<sup>3</sup>) con respecto al

Tabla 9. Desplazamientos y cortantes dinámicos máximos para el edificio El en base aislada

Sismo	Registro	Dir	Desplazamiento máximo relativo en azotea (mm)		Desplazamientos máximos de los aisladores		Cortantes Basales (t)			$\frac{V_{xe}}{V_{xa}}$	$\frac{V_{ye}}{V_{ya}}$	$\frac{V_{xe}}{W}$	$\frac{V_{ye}}{W}$
			$\Delta x_{max}$	$\Delta y_{max}$	$\Delta_a/\Delta M$	$\theta$	Estructura	Aisladores					
19/09/85	AZIH	Y-X	0.1	0.1	0.43	32.44	V <sub>xe</sub>	V <sub>xe</sub>	V <sub>xe</sub>	0.743	0.767	0.051	0.050
		X-Y	0.1	0.1	0.42	53.24	V <sub>ye</sub>	V <sub>ye</sub>	V <sub>ye</sub>	0.743	0.798	0.051	0.054
		X-Y	0.1	0.1	0.18	28.65	V <sub>xe</sub>	V <sub>xe</sub>	V <sub>xe</sub>	0.758	0.848	0.037	0.038
		X-Y	0.2	0.1	0.29	43.63	V <sub>ye</sub>	V <sub>ye</sub>	V <sub>ye</sub>	0.770	0.758	0.045	0.053
		X-Y	0.3	0.2	0.60	36.48	V <sub>xe</sub>	V <sub>xe</sub>	V <sub>xe</sub>	0.718	0.679	0.054	0.045
25/04/89	VIGA	Y-X	0.1	0.0	0.13	45.29	V <sub>xe</sub>	V <sub>xe</sub>	V <sub>xe</sub>	0.787	0.696	0.030	0.033
		X-Y	0.1	0.1	0.58	26.51	V <sub>ye</sub>	V <sub>ye</sub>	V <sub>ye</sub>	0.779	0.596	0.036	0.035
31/05/90	LLAV	X-Y	0.1	0.1	0.10	55.20	V <sub>xe</sub>	V <sub>xe</sub>	V <sub>xe</sub>	0.807	0.801	0.024	0.033
09/10/95	MANZ	Y-X	0.2	0.2	0.92	44.58	V <sub>xe</sub>	V <sub>xe</sub>	V <sub>xe</sub>	0.795	0.763	0.062	0.064



diseño en base rígida ( $1049.1 \text{ m}^3$ ), lo que constituye un ahorro del 44 %. Asimismo, se requiere de menos acero de refuerzo longitudinal en vigas y columnas en el diseño de base aislada (94.5 t) con respecto al diseño de base rígida (143 t), con un ahorro del 51.4 %. Estos ahorros tan significativos deberán reducirse cuando se cubiquen con detalle los armados a cortante de vigas y columnas y se tome en cuenta el diseño del sistema de piso. Sin embargo, los ahorros aún serán importantes.

Por ejemplo, el volumen de concreto en base aislada considerando que el sistema de piso está compuesto de losas perimetralmente apoyadas de 10 cm de peralte y refuerzo promedio  $\rho = 0.008$ , soportadas en vigas secundarias de  $25 \times 65 \text{ cm}$  con refuerzos a flexión promedio de  $\rho = 0.006$ , sería de  $1802.5 \text{ m}^3$ , con respecto a los  $2119.6 \text{ m}^3$  de concreto requerido para el diseño en base rígida incluyendo este mismo sistema de piso, lo que constituye un ahorro del 18 % en volumen. Con respecto al acero de refuerzo, se tendría ahora 172.2 t de acero de refuerzo para el modelo en base aislada contra 220.8 t para el modelo en base rígida, por lo que el ahorro sería del 28 %, faltando por cuantificar el acero de refuerzo transversal de vigas y columnas. Por otra parte, también se tendrían ahorros que pudieran ser importantes en la cimentación, ya que ésta se diseñaría ante fuerzas sensiblemente menores que aquellas calculadas para un diseño convencional en base rígida.

Quizá los ahorros que se puedan conseguir en el diseño de la superestructura y la cimentación no resulten suficientes para amortizar el costo inicial de los aisladores, ya que se trata de una tecnología que no es particularmente barata, especialmente si uno considera que los elastómeros tendrían que ser arancelados por derechos de importación al no producirse actualmente en México. Sin embargo, los beneficios a mediano y a largo plazos, y la respuesta de estructura ante sismos de moderada y alta intensidad, puede promover su uso en cierto tipo de estructuras en ciudades de la costa mexicana del Pacífico.

#### *Respuesta dinámica de las estructuras*

Se compararon las respuestas dinámicas máximas de las estructuras para los diseños en base

rígida y base aislada, utilizando análisis dinámicos con el programa 3D-Basis. Se observan grandes reducciones en la magnitud de los cortantes dinámicos máximos y de las distorsiones de entrepiso para los diseños con aisladores de base con respecto a los modelos en base rígida para todas las estructuras. En la fig 10 se comparan las distorsiones de entrepiso máximas para los modelos en base aislada con respecto a los modelos en base rígida para las direcciones ortogonales principales de cada estructura. Se identifica en la figura la estación que produjo las máximas demandas de deformación en cada caso, de la siguiente manera, la extensión "z" se refiere a la estación ZACA mientras que la extensión "m" está relacionada a la estación MANZ. RGa identifica al límite de distorsión de entrepiso  $\Delta = 0.006$  y RGb al límite máximo  $\Delta = 0.012$  establecidos por el RCEG-90, según se definieron en secciones anteriores.

Para el caso de las escuelas EP1 y EP2, se observa que las distorsiones de entrepiso para los modelos en base rígida son grandes en la dirección débil (X o E-W), donde se dispone de los muros de mampostería que acortan las columnas (figs 5 y 6). La mampostería se agrieta importantemente a distorsiones mayores a 0.3 %, y los resultados sugerirían que se debería de presentar daño importante en la mampostería. Como el 3D-Basis modela a la estructura elásticamente en función de sus modos de vibración, no se puede observar en este caso el problema de columnas cortas. Sin embargo, estudios detallados realizados anteriormente a estas estructuras donde se modelaron todos los elementos para trabajar en el intervalo de comportamiento no lineal (Tena-Colunga, 1996) demuestran que en las escuelas se presentan columnas cortas y que, además, son susceptibles a grandes demandas de deformación que las llevarían al colapso ante sismos de estas características. Las distorsiones de entrepiso máximas de las escuelas EP1 y EP2 con aisladores de base son, en cambio, muy reducidas, se presentan distorsiones máximas del orden de 0.15 %, niveles a los cuales los muros de mampostería no sufrirían agrietamientos o éstos difícilmente serían apreciables a simple vista.

En el edificio E1 también se observan demandas de deformación mucho menores en la estructura

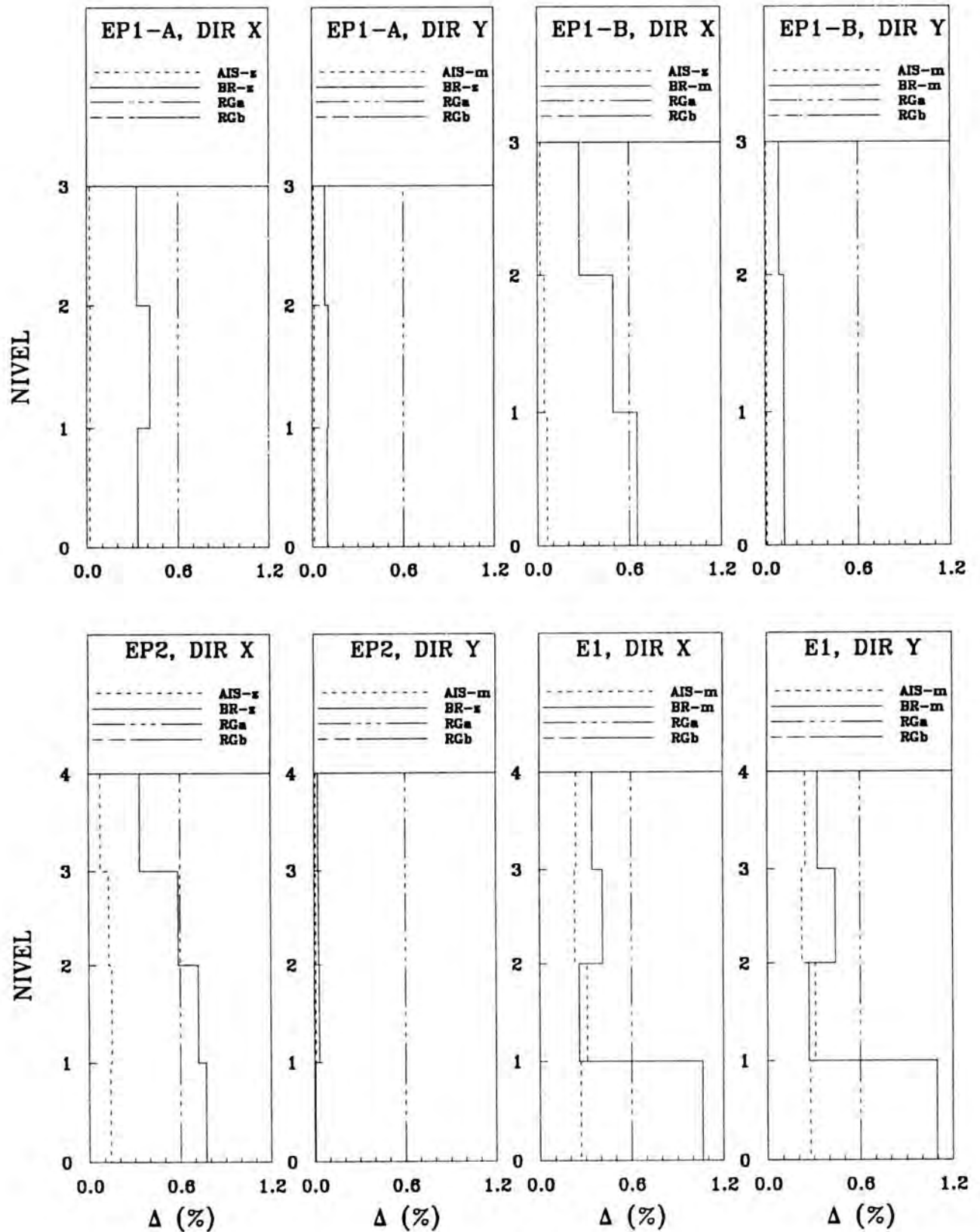


Fig 10. Envolventes de distorsiones máximas de entrepiso

aislada. Mientras las distorsiones de entrepiso calculadas con el 3D-Basis sugieren una posible respuesta no lineal importante para el modelo en base rígida, para el modelo con aislamiento de base las distorsiones de entrepiso no indican posibilidad alguna de daño para una estructura de concreto reforzado contraventeada con diagonales de acero.

## RESUMEN Y CONCLUSIONES

El trabajo reportó los primeros esfuerzos realizados por este grupo de investigación con la finalidad de evaluar un método de diseño estático para estructuras aisladas sísmicamente en su base, enfocándose el estudio para el estado de Guerrero por contar con un reglamento de diseño sísmico expresamente desarrollado para el estado, basado en su sismicidad regional y, además, porque es el estado que cuenta con mayor número de registros acelerográficos de sismos intensos. El método se basa en las recomendaciones del reglamento norteamericano UBC y en el espectro de diseño del reglamento de diseño por sismo del estado de Guerrero. Se estudiaron exclusivamente aisladores de base de tipo elastomérico.

Se diseñaron tres estructuras tipo que cumplen con las restricciones del método estático del UBC, un edificio de oficinas (diseño de aisladores y superestructura) y dos escuelas antiguas con diseño del CAPFCE (diseño de aisladores como proyecto de reparación). La efectividad de los diseños realizados con el método estático se evaluaron mediante análisis dinámicos no lineales ante acelerogramas registrados en la costa mexicana del Pacífico en los sismos de septiembre de 1985 ( $M_s = 8.1$ ), abril de 1989 ( $M_s = 6.9$ ), mayo de 1990 ( $M_s = 6.1$ ) y octubre de 1995 ( $M_w = 8.0$ ).

Los estudios permiten concluir que es viable la utilización de un método de diseño estático para aisladores elastoméricos para el estado de Guerrero y, por ende, en los estados de la costa mexicana del Pacífico, siempre y cuando se adecuen algunos criterios propuestos por el UBC. Las modificaciones sugeridas al procedimiento del UBC son las siguientes:

- (1) Se debe modificar el coeficiente del desplazamiento base de diseño,  $D$  (ec 24)

a un valor adecuado tomando en cuenta los espectros de pseudodesplazamientos de los movimientos regionales. En el presente estudio se observó que el límite actual del UBC de 25.4 cm parece adecuado para la costa de Guerrero y se propuso de una manera muy cruda un valor de 30 cm para satisfacer adecuadamente en todos los casos los registros de la termoeléctrica de Manzanillo (ec 38, fig 9). Sin embargo, el valor más adecuado de diseño debe basarse en un estudio estadístico más profundo de los movimientos del terreno asociados a los espectros de diseño de las distintas zonas de terreno firme y de transición contempladas por el RCEG-90 y por el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad para otras regiones de alto peligro sísmico. Esta es una investigación que debe realizarse lo más pronto posible y para lo cual será necesario contar con los registros más representativos reportados en la Base Nacional de Datos de Sismos Fuertes ("Base", 1995), pero que lamentablemente no se encuentran disponibles, sobre todo los anteriores a 1990.

- (2) Se deben hacer estudios particulares para calibrar los siguientes parámetros de diseño del UBC, basados en la sismicidad regional de Guerrero y/o de la costa mexicana del Pacífico: (a) factor de proximidad a una falla activa ( $N$ ) y, (b) factor por el sismo máximo probable ( $M_M$ ). Además, se deben calibrar por medio de investigaciones tanto experimentales como analíticas los siguientes parámetros: (a) factor de amortiguamiento viscoso equivalente del sistema aislado ( $B$ ) y, (b) factor de comportamiento sísmico de la estructura en base aislada ( $Q_a$ ). En el presente estudio se utilizaron los valores propuestos por el UBC para  $B$ ,  $N$  y  $M_M$ , y se propusieron valores para  $Q_a$  basados en las relaciones que existen entre los factores de comportamiento sísmico para estructuras aisladas y en base rígida del reglamento UBC.
- (3) Se debe revisar la condicionante establecida por el UBC donde se estipula que el periodo fundamental de la estructura aislada debe ser de por lo menos tres veces su periodo en base rígida calculado mediante fórmulas

aproximadas ( $T_a \geq 3T$ ). Los resultados del presente estudio sugieren que la recomendación neozelandesa para estructuras aisladas con elastómeros ( $T_a \geq 2T$ ) pudiera ser razonable, como lo demuestra la respuesta del plantel EP2. Por otra parte, se debería evitar el uso de fórmulas aproximadas en el diseño de estructuras aisladas sísmicamente, ya que en la actualidad resulta relativamente sencillo para los despachos de ingeniería estructural estimar los periodos de sus sistemas estructurales utilizando programas de análisis estructural, dado el gran avance que se ha tenido en este campo en los últimos años.

- (4) Los límites de distorsión de entrepiso deben ser consistentes con los manejados por los reglamentos mexicanos para otros sistemas estructurales. Quizá aquí cabría reflexionar sobre la necesidad de modificar los límites actuales en función de los materiales y de los sistemas estructurales utilizados, pero esto debe basarse en estudios encaminados a ese propósito y que salen del alcance del presente estudio.
- (5) No se debe permitir el uso del método de diseño estático para estructuras con plantas alargadas ( $L_1/L_2 > 2$ ), a pesar de que éstas sean regulares, ya que se introducen amplificaciones dinámicas importantes como consecuencia del incremento de la flexibilidad lateral en la base. La respuesta del edificio EP1-A justifica esta propuesta.

Por otra parte, se deben continuar los estudios en México con la finalidad de evaluar procedimientos de diseño dinámico de estructuras aisladas en su base, de probar experimentalmente el comportamiento de estos sistemas en estructuras ante acelerogramas registrados en México y, además, estudiar tanto analítica como experimentalmente los desarrollos tecnológicos nacionales, como son los sistemas desarrollados por González Flores y por Garza Tamez, de los cuales existen algunos estudios (Newmark y Rosenblueth, 1971, Sosa y Ruiz, 1992, Foutch *et al*, 1993, Garza, 1995). Para que esto último sea posible, se debe promover la cooperación entre instituciones de investigación y hacer participar a los empresarios nacionales en el proceso de investigación y, sobre todo, en el

financiamiento de estos estudios, ya que de otra manera resultará muy difícil su ejecución y los más interesados en que se desarrollen estos estudios deberían ser precisamente ellos, los empresarios nacionales.

Igualmente, debe promoverse la vinculación de los ingenieros de la práctica y de los investigadores nacionales, la cual puede darse de dos maneras: (1) en consultoría de los investigadores sobre proyectos de aislamiento que pretendan desarrollarse en México y, (2) en la participación de los ingenieros de la práctica en proyectos de investigación de esta naturaleza. Si esto se logra, se tendrán mayores posibilidades de que tanto la investigación como el diseño de estructuras aisladas en su base sea un éxito en México. Se debe evitar a toda costa que los proyectos de aislamiento sísmico en México sean hechos o asesorados exclusivamente por empresas o profesionales extranjeros, la mayoría de los cuales son ajenos a la realidad sísmica de México. Si se procede de esta manera, se corre un gran riesgo de presenciar comportamientos indeseables en sistemas aislados en su base ante sismos intensos.

## AGRADECIMIENTO

Esta investigación ha sido posible gracias al patrocinio del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) como parte del proyecto 1824P-A, "Criterios de diseño y reglamentación de estructuras con aisladores de base para la costa del Pacífico". El autor agradece la colaboración de Luis A. A. Gómez Soberón en este estudio como parte de su tesis de licenciatura dirigida por el autor, a los profesores James Kelly y Ronald Mayes por haber compartido sus experiencias y proporcionar información valiosa acerca de las prácticas de diseño de aisladores de base en los Estados Unidos, a Luis Eduardo Pérez Rocha por facilitar y discutir las características de los registros acelerográficos empleados en el presente estudio, a María Zárate por proporcionar una de las gráficas presentadas en este artículo, y a los valiosos comentarios aportados por los árbitros del presente manuscrito que contribuyeron a enriquecerlo y clarificarlo.



## REFERENCIAS

- [1] Álvarez, J L (1995), "Estudio analítico sobre el comportamiento sísmico de la reestructuración de planteles escolares por medio de cables de acero de presfuerzo", Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, septiembre.
- [2] "Base nacional de datos de sismos fuertes. Catálogo de acelerogramas 1960-1993", (1995), Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, A. C., México.
- [3] Clark, P W, A S Whittaker, I D Aiken y J A Egan (1993), "Performance considerations for isolation systems in regions of high seismicity", Memorias, ATC 17-1 Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, San Francisco, California, pp 29-40.
- [4] "Directory of seismically isolated bridges in North America", (1995), Dynamic Isolation Systems, Inc, Berkeley, California.
- [5] Garza, F (1995), "Ventajas de la aplicación de un sistema pendular de aislamiento de base en la estructura de concreto de un edificio de mediana altura", Trabajo presentado en la convención de otoño del ACI de 1995 en Montreal, Canadá.
- [6] Gómez-Soberón, C, A Tena-Colunga y A Muñoz-Loustaunau (1996), "Analytical study on the seismic isolation of two irregular buildings at the Mexican Pacific Coast", Memorias, 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, México, junio, Artículo No 496.
- [7] Gómez, L A A (1996), "Procedimientos y recomendaciones para el diseño de estructuras aisladas sísmicamente en México", Tesis de Licenciatura, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, octubre.
- [8] Foutch, D A, J B Gambill y F Garza-Tamez (1993), "Investigation of a seismic base isolation system based on pendular action", Structural Research Series No 578, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [9] Kelly, J M (1993), **Earthquake-resistant design with rubber**, primera edición, Springer-Verlang, Nueva York.
- [10] Mayes, R L, I G Buckle, T E Kelly y L R Jones (1992), "AASHTO seismic isolation design requirements for highway bridges", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 1, pp. 284-304.
- [11] MOC-93 (1993), "Manual de diseño de obras civiles. Diseño por sismo", Instituto de Investigaciones Eléctricas, Comisión Federal de Electricidad.
- [12] Muñoz, A (1995), "Estudio analítico de la respuesta de edificios aislados sísmicamente ante acelerogramas de la costa de Guerrero", Tesis de Licenciatura, Universidad La Salle, septiembre.
- [13] Nagarajaiah, S, A M Reinhorn y M C Constantinou (1991), "3D-Basis: Nonlinear dynamic analysis of three-dimensional base isolated structures: Part II", Technical Report NCEER-91-0005, National Center for Earthquake Engineering, State University of New York at Buffalo.
- [14] Newmark, N M y E Rosenblueth (1971), **Fundamentals of earthquake engineering**, primera edición, Prentice Hall, Londres, pp 529.
- [15] NTCEM-87 (1987), "Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería", Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal, noviembre.
- [16] RCEG-90 (1990), "Reglamento de construcciones del Estado de Guerrero. Diseño por sismo", México.
- [17] Skinner, R I, W H Robinson y G H Mc Verry (1993), **An introduction to seismic isolation**, primera edición, John Wiley and Sons, Inglaterra.
- [18] Sosa, A y S E Ruiz (1992), "Análisis estructural y costos de edificios con

- aisladores sísmicos", *Revista de Ingeniería Sísmica*, No 44, enero-marzo, pp 11-28.
- [19] Tena, A, C Gómez, J M Jara, R González, A Muñoz y J L Álvarez (1995), "Estudio analítico de la respuesta sísmica de edificios con aisladores de base", Reporte FJBS/CIS-95/09, Centro de Investigación Sísmica, Fundación Javier Barros Sierra, México.
- [20] Tena-Colunga, A y D P Abrams (1996), "Seismic behavior of structures with flexible diaphragms", *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol 122, No. 4, abril, pp 439-445.
- [21] 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, octubre, pp. 883-902.
- [22] Tena-Colunga, A, C Gómez-Soberón y A Muñoz-Loustaunau (1997), "Seismic isolation of buildings subjected to typical subduction earthquake motions for the Mexican Pacific Coast", *Earthquake Spectra*, Vol 13, No 3, agosto, pp. 505-532.
- [23] "UBC procedures for seismically isolated buildings", (1994), Dynamic Isolation Systems, Inc., Berkeley, California.
- [24] "Uniform Building Code, 1991 Edition", (1991), International Conference of Building Officials, Whittier, California.
- [25] "Uniform Building Code, 1994 Edition", (1994), International Conference of Building Officials, Whittier, California.