

DISEÑO SÍSMICO SIMPLIFICADO DE ESTRUCTURAS CON MUROS DE MAMPOSTERÍA AISLADAS SÍSMICAMENTE

SIMPLIFIED DESIGN METHOD FOR BASE-ISOLATED BEARING-WALL MASONRY STRUCTURES

Arturo Tena Colunga

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

RESUMEN

Se presenta una propuesta de método simplificado para el análisis de estructuras con base en muros de carga aisladas sísmicamente. La propuesta adapta el método simplificado de diseño de estructuras con base en muros de mampostería de las normas de diseño sísmico de México y la propuesta para el diseño del sistema de aislamiento sísmico del método estático de los reglamentos de los Estados Unidos. Además de discutir los conceptos medulares del método, se ilustra su aplicación con el diseño de una estructura tipo, y se demuestra su eficacia en llegar a diseños seguros mediante análisis dinámicos no lineales (paso a paso) de la estructura diseñada ante la acción de una familia de registros de aceleración asociados al espectro de diseño sísmico. Se espera que este método simplificado de diseño ayude a promover el uso del aislamiento sísmico en estructuras de baja altura con base en muros de mampostería y, con ello, reducir su vulnerabilidad ante la acción de sismos intensos.

Palabras clave: método simplificado de diseño sísmico; estructuras de mampostería; aislamiento sísmico

ABSTRACT

A simplified method for the seismic design of low-rise, base-isolated shear wall structures is proposed. This simplified method is basically a hybrid method, where the design of the isolation system is a simpler version for the static method available in US guidelines for the design of base-isolated structures and the design of the superstructure essentially is an improved version of the simplified method for the seismic design of conventional low-rise masonry shear wall structures of Mexican seismic codes. The application of this method and its effectiveness to obtain safe designs is illustrated with a practical example. It is anticipated this simple methodology would help promote the use of base isolation in low-rise masonry shear wall structures and reduce their vulnerability when subjected to strong earthquakes.

Keywords: Simplified method for seismic design; masonry structures; base isolation.

1 INTRODUCCIÓN

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

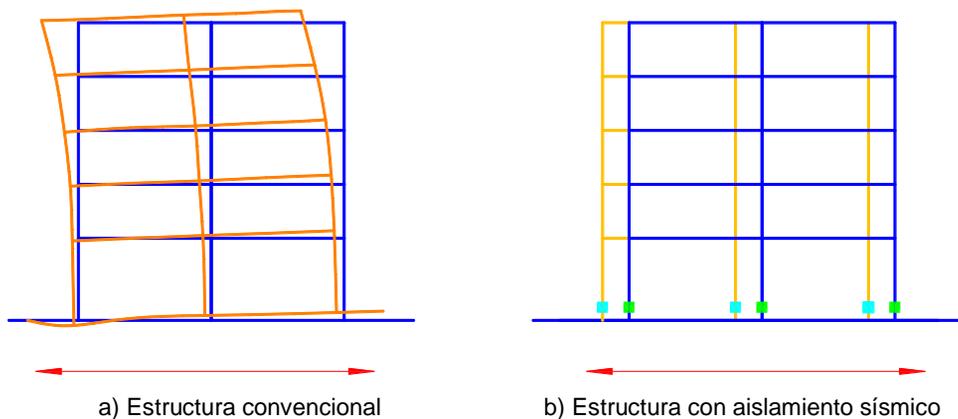


Figura 1 Comparación conceptual de la respuesta ante sismos de una estructura convencional y una estructura con aislamiento sísmico

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

Este principio funciona razonablemente bien en terrenos firmes y roca. Es un hecho ampliamente reconocido en la literatura que el aislamiento sísmico ofrece grandes ventajas en terrenos firmes o en roca, pero no en terrenos blandos.

En terrenos firmes o roca, se tienen periodos dominantes del terreno donde las máximas ordenadas de aceleración se presentan en un intervalo de periodos cortos y éstas disminuyen a medida que se incrementa el periodo, como se ilustra en la Fig. 2a. En contraste, los desplazamientos esencialmente aumentan a medida que el periodo aumenta (Fig. 2b).

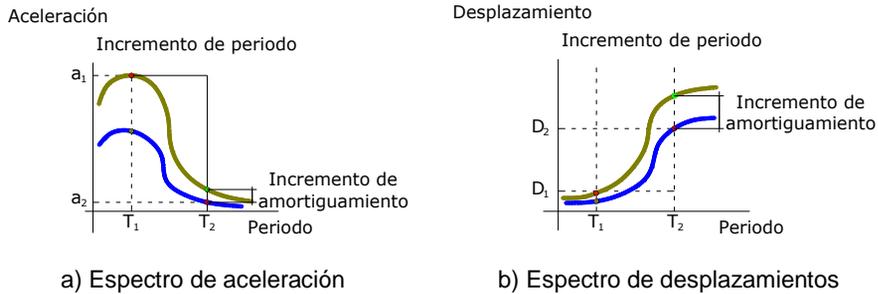


Figura 2 Esquematación de espectros típicos de suelo firme o roca y su relación con el aislamiento sísmico

Los sistemas de aislamiento sísmico proporcionan una flexibilidad lateral adicional al sistema que, en esencia, alargan su periodo fundamental, por lo que a una estructura con periodo natural de vibración relativamente corto desplazada en terreno firme, con periodo fundamental en base rígida T_1 , la pueden llevar a un periodo fundamental efectivo T_2 .

Por lo tanto, desde el punto de vista del diseño de la estructura por encima del sistema de aislamiento, esto es ventajoso, dado que, como se observa en la Fig. 2a, el incremento del periodo lleva a una zona del espectro donde las aceleraciones son menores, por lo que las fuerzas de inercia que actúan en la estructura por encima del sistema de aislamiento se reducen notablemente y, por ello, el impacto de las cargas por sismo es también menor. Si el sistema de aislamiento además proporciona amortiguamiento adicional, entonces las ordenadas espectrales se reducen, por lo cual las aceleraciones horizontales en la estructura son aún menores.

Para que lo anterior sea posible, se requiere que el sistema de aislamiento sea capaz de acomodar de manera estable desplazamientos mayores asociados al incremento del periodo (Fig. 2b), los cuales se pueden reducir en caso que el sistema sea capaz de proporcionar amortiguamiento adicional.

En cambio, las características dinámicas de terrenos blandos, donde los periodos dominantes del terreno varían entre uno y cuatro segundos, hacen 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 suelos blandos no es recomendable sin estudios muy detallados y rigurosos que justifiquen su aplicación, principalmente en sistemas de aislamiento con franco comportamiento bilineal, como los elastómeros con corazón de plomo, donde la rigidez elástica inicial es muy distinta a la rigidez secante efectiva al desplazamiento de diseño. Esto se debe a la potencial respuesta resonante de la estructura aislada sísmicamente como consecuencia del alargamiento de su periodo fundamental de vibrar, como ya se ha demostrado analíticamente con estudios muy rigurosos hace ya 20 años (González y Noguez 1994, Tena-Colunga 1996). De hecho, en terrenos blandos es muy probable que sin estudios detallados de por medio (por ejemplo Tena *et al.* 2014, Tena-Colunga *et al.* 2015), alargando el periodo en el intervalo de uno a cuatro segundos se aumenten tanto las demandas de aceleración como las de desplazamiento, por lo cual emplear

aislamiento sísmico no ofrece conceptualmente ventajas. Además, en suelos muy blandos los hundimientos diferenciales ocasionados por las deformaciones de los estratos arcillosos pueden ser muy riesgosos, ya que éstos tendrían un impacto desfavorable en la estabilidad del sistema de aislamiento para tomar la carga vertical ante el desplazamiento máximo de diseño.

En México históricamente ha existido y existe interés por el aislamiento sísmico; sin embargo, su aplicación con diseños hechos totalmente en México ha sido reducida hasta la fecha, aunque se ha venido incrementando en fechas recientes (Cautín 2010, Tena *et al.* 2014, Tena-Colunga *et al.* 2015, MagebaUSA 2015, Tena 2016). Hasta donde se sabe, actualmente existen 23 estructuras aisladas sísmicamente en el país, como se indica en la Tabla 1, que es una versión actualizada de compilaciones previas (Tena-Colunga 2007, Tena 2016).

Tabla 1 Proyectos de aislamiento sísmico construidos y en construcción en México hasta 2016

<i>Proyecto</i>	<i>Tipo</i>	<i>Sistema de Aislamiento</i>	<i>Lugar</i>	<i>Año</i>
Escuela secundaria pública en Legaria	Edificio (N)	Sistema deslizante de González Flores	Ciudad de México	1974
Iglesia en Legaria	Edificio (N)	Sistema deslizante de González-Flores	Ciudad de México	1980
Puente Hidalgo-San Rafael	Puente (N)	Elastómeros laminados con corazón de plomo (LRB)	Carretera México-Querétaro	1994
Prensa del Periódico Reforma	Maquinaria - Equipo (N)	Sistema pendular GT-BIS	Ciudad de México	1994
Laboratorio de pruebas Conexant I	Edificio (N)	LRB	Guadalajara	1997
Periódico Mural	Edificio (N)	GT-BIS	Guadalajara	1998
Segunda Ampliación Expo-Guadalajara	Edificio (N)	LRB	Guadalajara	1999
Torre Administrativa del CUAAD, Universidad de Guadalajara	Edificio (N)	LRB	Guadalajara	2001
Edificio para la Investigación y el Posgrado, CUAAD, Universidad de Guadalajara	Edificio (N)	LRB	Guadalajara	2001
Conexant Mexicali II	Edificio (N)	LRB	Mexicali	2001
Puente Infiernillo II	Puente (R)	Aislador multirotacional	Carretera que cruza la Presa de Infiernillo	2002
Santuario de los Mártires	Edificio (N)	LRB	Guadalajara	2002
Nodo Vial Patria-Acueducto	Puente (N)	LRB	Guadalajara	2004
Universidad de Guadalajara	Edificio (R)	LRB	Guadalajara	2005
Distribuidor Vial Mexicali	Puente (N)	LRB	Mexicali	2005
Puente Tijuana	Puente (N)	LRB	Tijuana	2007
Hotel Vía Vallejo	Edificio (N)	LRB	Ciudad de México	2015
Subestación Narvarte	Edificio (N)	Pendular	Ciudad de México	2015
Subestación Verónica	Edificio (N)	Pendular	Ciudad de México	2016
Subestación Culhuacán	Edificio (N)	Pendular	Ciudad de México	2016
Subestación El Rosal	Edificio (N)	Pendular	Ciudad de México	2016
Subestación Chimalpa	Edificio (N)	Pendular	Naucalpan	2016
Subestación Los Reyes	Edificio (N)	Pendular	Los Reyes La Paz	2016

N=proyecto nuevo, R=proyecto de reparación

La mayoría de las estructuras aisladas que se ubican en la Ciudad de México y sus alrededores están en terrenos de transición o firmes. Las excepciones son las nuevas subestaciones encapsuladas de CFE Narvarte,

Verónica y Culhuacán, que están ubicadas en terrenos blandos (no excesivamente), y donde no sólo se realizaron estudios de sitio específicos muy detallados para valorar con bases sólidas la aplicación de un aislamiento sísmico pendular, sino que también se reportan con rigor los detalles técnicos de dichos estudios (Tena *et al.* 2014, Tena-Colunga *et al.* 2015). Con respecto al proyecto del Hotel Vía Vallejo, lamentablemente en el folleto publicitario (MagebaUSA 2015) no se proporciona información técnica sobre el tipo suelo o su ubicación geográfica exacta (coordenadas geográficas), que permita discernir qué tan blando o de transición es el terreno. Sin embargo, buscando su localización en Google Maps se encuentra que está ubicado en la Calzada Vallejo casi esquina con Poniente 128, en la Colonia Santa Cruz de la Salinas. Por lo tanto, a partir del mapa de periodos dominantes del suelo disponible en las Normas Técnicas Complementarias por Sismo (NTCS-04 2004), se puede inferir que el suelo muy probablemente es de transición, dado que en esa zona la Calzada Vallejo está ubicada principalmente en zona de transición (zona II), aunque en las inmediaciones a la Glorieta de La Raza pueden existir suelos blandos (zona III) y ese pudiera ser el caso en ese sitio. Desafortunadamente, no se ha ubicado ningún artículo técnico publicado donde se describa con mucho mayor rigor los detalles técnicos, tanto del sitio donde se ubica, como de los estudios técnicos rigurosos que avalan su diseño y construcción. Preocupa el hecho que se hayan utilizado elastómeros con corazón de plomo (MagebaUSA 2015), si el terreno es blando.

Hasta donde se sabe, a mediados de 2016, de los 23 proyectos de aislamiento sísmico construidos o en construcción, 17 eran en edificios, 5 en puentes y uno en equipo (Tabla 1). También se aprecia que sólo existen dos aplicaciones en edificios de escuela, a pesar de que la primera aplicación fue precisamente en una escuela con el sistema deslizante desarrollado por el Ing. González Flores (Tabla 1) y que no existe todavía ninguna aplicación en edificios de vivienda o para casa habitación, como sí existen en otras partes del mundo (por ejemplo, Fujita 2005).

En terrenos firmes y roca, el aislamiento sísmico es una técnica ideal para mejorar la seguridad de estructuras de poca altura y relativamente rígidas, como son las casas habitación y edificios de vivienda construidos tradicionalmente con muros de mampostería y/o de concreto reforzado. La respuesta de estas estructuras se vuelve muy predecible si se aíslan sísmicamente, pues prácticamente se mueven como cuerpos rígidos.

Por ello, es posible desarrollar métodos de análisis y diseño muy simples para este tipo de estructuras. En el capítulo intitulado *Diseño de estructuras con aislamiento de base* del Manual de Obras Civiles de CFE (Tena 2016), se permite un método simplificado para el análisis de estructuras aisladas sísmicamente con base en muros de carga. La propuesta básicamente adapta el método simplificado de diseño de estructuras de baja altura con base en muros de las normas de diseño sísmico de México y la propuesta para el diseño del sistema de aislamiento sísmico del método estático de los reglamentos de los Estados Unidos, como se describe e ilustra en las siguientes secciones.

2 MÉTODO SIMPLIFICADO PARA DISEÑO

En el capítulo de diseño de estructuras con aislamiento de base desarrollado por un servidor para el Manual de Obras Civiles de CFE (Tena 2016) se presenta como novedad un método simplificado para el análisis y diseño de estructuras aisladas sísmicamente. La propuesta adapta el método simplificado de diseño de estructuras de baja altura con base en muros de las normas de diseño sísmico de México (por ejemplo, NTCEM-04 2004, MOC-2008 2009, Tena *et al.* 2010) y la propuesta para el diseño del sistema de aislamiento sísmico del método estático de los reglamentos de los Estados Unidos (por ejemplo, UBC-97 1997, FEMA-368 2001, ASCE-7 2010), precisando algunas disposiciones adicionales que se discuten a continuación.

2.1 Requisitos para su empleo

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

- A) La estructura pertenece al grupo B identificado en el Manual de Obras Civiles.
- B) La estructura aislada sísmicamente cumple con todas las condiciones de regularidad que se establecen a continuación:
 1. La distribución en planta de masas, muros y otros elementos resistentes, es sensiblemente simétrica con respecto a dos ejes ortogonales. Estos elementos son sensiblemente paralelos a los ejes ortogonales principales del edificio.
 2. La relación entre la altura y la dimensión menor de la base no es mayor que 2.0.
 3. La relación entre largo y ancho de la base no excede de 2.0.
 4. En planta no se tienen entrantes ni salientes cuya dimensión exceda 20% de la dimensión de la planta medida paralelamente a la dirección en que se considera la entrante o saliente.
 5. En cada nivel se tiene un sistema de techo o piso rígido y resistente.
 6. No se tienen aberturas en los sistemas de techo o piso cuya dimensión exceda 20% de la dimensión de la planta medida paralelamente a la dirección en que se considera la abertura. Las áreas huecas no ocasionan asimetrías significativas ni difieren en posición de un piso a otro y el área total de aberturas no excede, en ningún nivel, 20% del área de la planta.
 7. El peso de cada nivel, incluyendo la carga viva que debe considerarse para diseño sísmico, no es mayor que 110% ni menor que 70% del correspondiente al piso inmediato inferior. El último nivel de la construcción está exento de condiciones de peso mínimo.
 8. Ningún piso tiene un área, delimitada por los paños exteriores de sus elementos resistentes verticales, mayor que 110% ni menor que 70% de la del piso inmediato inferior. El último piso de la construcción está

exento de condiciones de área mínima. Además, el área de ningún entrepiso excede en más de 50% a la menor de los pisos inferiores.

9. En todos los pisos, todos los muros están restringidos en dos direcciones ortogonales por diafragmas horizontales, o por trabes o losas planas.
 10. La rigidez y la resistencia al corte de cada entrepiso no excede en más de 50% la del entrepiso inmediatamente inferior. El último entrepiso queda excluido de esta condición.
 11. En cada entrepiso, la excentricidad torsional calculada estáticamente en la superestructura, e_s , no excede en más del cinco por ciento (5%) su dimensión en planta, medida paralelamente a la excentricidad torsional.
 12. La excentricidad torsional calculada estáticamente en el sistema de aislamiento, e_{sa} , no excede del dos por ciento (2%) de la dimensión en planta del sistema de piso soportado por el sistema de aislamiento medida paralelamente a la excentricidad mencionada.
- C) La estructura por encima del sistema de aislamiento es con base en muros y, en cada planta, las cargas verticales bajan a través de los muros de carga en más del 75 %.
- D) La altura total de la estructura por encima del sistema de aislamiento es menor o igual a 13 m ó tiene cuatro pisos ó menos.
- E) La estructura se localiza a más de 50 km de cualquier falla activa.
- F) La estructura se desplanta en terreno firme o roca, con factor de sitio $1.0 \leq F_s \leq 1.25$ o con velocidades de onda de corte $v_s \geq 250 \text{ m/s}$.
- G) El periodo natural de vibración de la estructura aislada sísmicamente, T_{as} (s), es mayor o igual a 1.5 segundos y menor ó igual a tres segundos, es decir, $1.5s \leq T_{as} \leq 3s$.
- H) El periodo natural de vibración de la estructura aislada sísmicamente, T_{as} (s) es mayor o igual a cinco veces el periodo fundamental de vibración de la estructura en base rígida, T_E (s), es decir, $T_{as} \geq 5T_E$.
- I) El sistema de aislamiento debe tener las siguientes características:
- a) La rigidez efectiva del sistema de aislamiento para el desplazamiento total de diseño (D_T) es mayor que una tercera parte de la rigidez efectiva al 20% del desplazamiento total de diseño (Fig. 3).
 - b) El sistema de aislamiento debe ser capaz de proporcionar una fuerza restauradora.
 - c) La curva carga-deformación del sistema de aislamiento es independiente de la velocidad de aplicación de la carga.
 - d) La curva carga-deformación del sistema de aislamiento no cambia su forma sensiblemente con variaciones en las cargas verticales y las cargas laterales aplicadas en ambas direcciones, es decir, su forma debe ser estable y, por ello, relativamente independiente de la magnitud de las cargas verticales y laterales aplicadas.

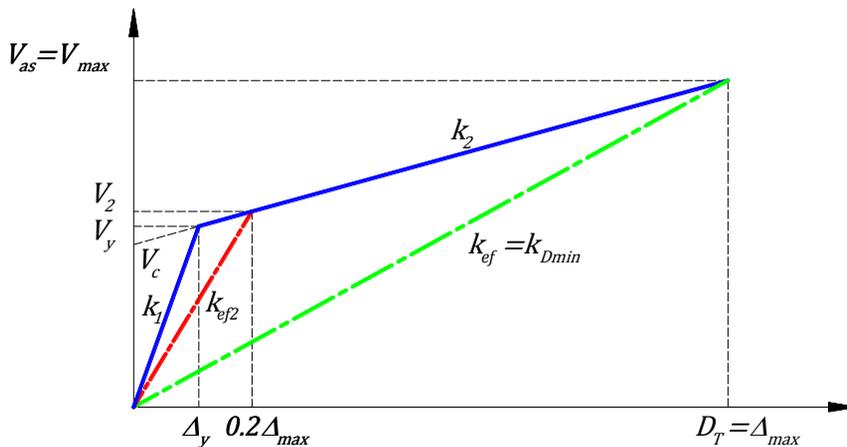


Figura 3 Curva primaria del sistema de aislamiento especificada por la condición del inciso I-a

Todos los lineamientos establecidos tienen su justificación tanto en recomendaciones reglamentarias como en estudios específicos. Por ejemplo, se adecuan los límites de las condiciones de regularidad B.2 y B.3, pues en estudios previos se ha visto que se debe limitar más la esbeltez (por ejemplo, Naeim y Kelly 1999) y la relación de aspecto de la planta (por ejemplo, Tena-Colunga 1996). Además, se impone una nueva condición de regularidad (B.12) para vigilar la torsión debida a excentricidades en el sistema de aislamiento, basada en análisis de la información presentada en varios estudios, donde se demuestra fehacientemente que la fuente más desfavorable de excentricidad para una estructura aislada sísmicamente es precisamente tener excentricidades en el sistema de aislamiento (por ejemplo, Eisenberger y Rutenberg 1986, Nagarajaiah *et al.* 1993, Jangid y Datta 1994, Gómez 2000, Tena-Colunga y Zambrana-Rojas 2006). Es por ello que el límite en la excentricidad torsional calculada estáticamente en el sistema de aislamiento, e_{sa} , es más estricto que en la superestructura, e_s .

Conforme a lo establecido en los incisos C y D, la estructura debe satisfacer además las condiciones que se imponen para el uso del método simplificado en las recomendaciones para estructuras de edificios del Capítulo C.1.3 del MOC-2008 (2009). En los comentarios de dichas recomendaciones se discuten las bases del método simplificado de análisis y las actualizaciones que se han realizado al método, proponiendo mejoras para los factores de área efectiva con base en estudios paramétricos realizados específicamente para ello (Tena *et al.* 2010) y la revisión de la excentricidad estática máxima que puede permitirse en la superestructura para distintos comportamientos estructurales con base en estudios paramétricos (Tena *et al.* 2010). Al respecto, como se desea que el comportamiento de la estructura por encima del sistema de aislamiento sea elástico, se limita a 5% la excentricidad estática torsional de la superestructura, e_s , con base en los resultados del estudio paramétrico de referencia cuando los muros exhiben un comportamiento elástico.

La estructura debe estar razonablemente alejada de una falla activa (inciso E), pues a medida que una estructura está más alejada de una falla, los efectos de

fuente cercana se atenúan y, por tanto, su respuesta es más predecible utilizando métodos simplificados.

En este mismo sentido, para que su respuesta sea fácilmente predecible con métodos simples, es por lo que se establece en el inciso F que debe ubicarse en terreno firme o roca. Ya se han discutido con anterioridad las ventajas de usar el aislamiento sísmico en zonas de terreno firme o roca. Los límites en el factor de sitio, F_s , y en la velocidad de ondas de corte, v_s , se proponen para que el método simplificado se use en suelos que esencialmente no amplifican la respuesta de manera importante.

El intervalo de periodos establecido en el inciso G corresponde a una adaptación de la recomendación que se ha establecido para el empleo del análisis estático en los reglamentos de aislamiento sísmico de los Estados Unidos desde sus inicios (Tena 1997) y que sigue vigente en todos ellos. El límite inferior se basa en una recomendación neozelandesa (Skinner *et al.* 1993), mientras que el límite superior está establecido en los reglamentos de los Estados Unidos (UBC-97 1997, ASCE-7 2010) para el empleo del método estático.

El método simplificado se permite sólo para superestructuras rígidas donde el sistema de aislamiento introduce una importante flexibilidad lateral y, por lo tanto, reduce notablemente las respuestas en la superestructura. Es por ello que se especifica en el inciso H que sólo se permite cuando $T_{as} \geq 5T_E$.

Las recomendaciones del inciso I provienen de las establecidas en los reglamentos de aislamiento sísmico de los Estados Unidos para el empleo del análisis estático. La condición del inciso I subinciso a es una restricción mecánica importante que define las características de la curva primaria requerida para el sistema de aislamiento sísmico y que se ilustra esquemáticamente en la Fig 3, donde se observa que lo que se establece en esta recomendación es vigilar que

$k_{ef} \geq \frac{1}{3}k_{ef2}$, con lo cual se asegura el empleo de sistemas de aislamiento sísmico

que no presentan una degradación de rigidez importante. Las condiciones de los subincisos b, c y d excluyen del método simplificado (y del estático) a estructuras con sistemas friccionantes de aislamiento sísmico, las que deberán analizarse mediante análisis dinámicos paso a paso (NCh2745 2003).

2.2 Guías generales de diseño

El método simplificado propuesto es un híbrido que combina una versión más simple del método estático para el diseño del sistema de aislamiento propuesto en los reglamentos de los Estados Unidos con adaptaciones a la filosofía de diseño del Manual de Obras Civiles, que se combina con la actualización propuesta para el método simplificado en ese mismo manual para el diseño de la estructura por encima del sistema de aislamiento sísmico (superestructura), que básicamente es una estructura de baja altura, robusta con base en muros de carga, donde se puede asegurar respuesta elástica si se emplea de forma adecuada un sistema de aislamiento sísmico. Por lo tanto, los pasos necesarios para realizar el diseño son los siguientes:

1. El periodo natural de vibración de la estructura aislada sísmicamente, T_{as} (s), puede estimarse como:

$$T_{as} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{gk_{Dmin}}} \quad (1)$$

donde W es el peso efectivo total de la estructura por encima del sistema de aislamiento debido a carga muerta y viva instantánea, k_{Dmin} es la rigidez lateral efectiva mínima del sistema de aislamiento para el desplazamiento de diseño en la dirección en consideración y g es la constante de aceleración de la gravedad.

La estimación simplificada del periodo fundamental de vibrar de una estructura sísmicamente aislada dada por la ecuación 1 proviene de principios básicos de la dinámica estructural considerando una rigidez secante del sistema de aislamiento al desplazamiento de diseño, como se demuestra, por ejemplo, en Skinner *et al.* (1993). La recomendación se basa en la propuesta de los reglamentos de aislamiento sísmico de los Estados Unidos, donde se propone conservadoramente utilizar el menor valor de la rigidez efectiva, para así estimar el máximo valor del periodo efectivo de diseño.

2. El desplazamiento de diseño en el centro de rigidez del sistema de aislamiento en la dirección de análisis, D_D , se obtiene como:

$$D_D = F_c S_d(T_{as}) \quad (2)$$

donde $S_d(T_{as})$ es el desplazamiento espectral correspondiente al periodo efectivo de la estructura aislada sísmicamente, T_{as} , amplificado por el factor de combinación de cargas verticales y laterales correspondiente, F_c (generalmente $F_c = 1.1$ en los reglamentos de diseño sísmico de México).

El desplazamiento de diseño del sistema de aislamiento, D_D , se supone que ocurre en el centro de masa del sistema estructural y se debe estimar a partir del espectro de desplazamientos para el periodo fundamental de la estructura aislada, dado que responderá esencialmente en ese modo. En el proceso de diseño, aquí es donde debe aplicarse el factor de combinación de cargas laterales y verticales, ya que posteriormente todos los elementos mecánicos de diseño se amplifican en función de este desplazamiento.

3. El desplazamiento de diseño del sistema de aislamiento se debe amplificar para tomar en cuenta los efectos de la acción simultánea de ambos componentes horizontales del movimiento del terreno, D_{2D} , que se obtiene como:

$$D_{2D} = D_D(1.3 - 0.02T_{as}); \quad T_{as} \geq 1.5s \quad (3)$$

El espectro de desplazamientos está definido a partir de considerar movimientos unidireccionales, por lo que se deberán tomar en cuenta los efectos que tienen otros componentes ortogonales. Dados los requisitos de distancia a la fuente que se especifican para el empleo del método simplificado, se amplifica exclusivamente por la acción simultánea de ambos componentes horizontales del

terreno, para calcular el desplazamiento correspondiente, D_{2D} . La propuesta del cálculo de D_{2D} se basa en un extenso estudio paramétrico que tomó en cuenta una base de datos de cerca de 250 pares de registros de aceleración de sismos de subducción con magnitud $M \geq 6.4$ para definir los desplazamientos de diseño (Tena-Colunga y Pérez-Osornio 2006). En el estudio se demuestra que la respuesta estadística de desplazamientos ante acción bidireccional y unidireccional para sistemas de aislamiento sísmico simétricos en ambas direcciones no es constante, aunque tienden a cumplir con la regla de combinación del 100%+30%, tanto para aisladores de comportamiento elástico y de comportamiento inelástico.

4. El desplazamiento total de diseño en el centro de rigidez del sistema de aislamiento en la dirección de análisis, D_T , debe incluir además 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 fines del método simplificado, éste puede estimarse como:

$$D_T = 1.1D_{2D} \quad (4)$$

El incremento del 10% para D_T se basa en el estudio presentado por Seguí (2007), donde se aprecia que las amplificaciones debidas a una torsión accidental del 5% en sistemas de aislamiento elastomérico difícilmente exceden del 10% en un intervalo de relación de frecuencias lateral entre torsional (Ω_{0as}) amplio, y que esta amplificación se reduce conforme se utiliza un mayor número de aisladores.

5. El sistema de aislamiento sísmico, la cimentación y los elementos estructurales por debajo del sistema de aislamiento deben diseñarse para soportar una fuerza cortante mínima, V_{as} , utilizando los requisitos que sean adecuados para una estructura convencional, donde V_{as} se calcula como:

$$V_{as} = k_{Dmin} D_T \quad (5)$$

donde k_{Dmin} es la sumatoria de la rigidez de los aisladores en el sentido de análisis. La fuerza cortante de diseño del sistema de aislamiento se obtiene a partir de su rigidez efectiva (k_{ef}) al desplazamiento de diseño máximo ($D_T = \Delta_{máx}$) aplicando el elemental principio de análisis lineal que la fuerza es igual a rigidez por desplazamiento (Fig. 3). La recomendación se basa en la propuesta de los reglamentos de aislamiento sísmico de los Estados Unidos.

6. La estructura que se encuentra por encima del sistema de aislamiento debe diseñarse y construirse para resistir una fuerza cortante sísmica mínima, V_E , igual a:

$$V_E = \frac{V_{as}}{Q'_{as}} \quad (6)$$

donde Q'_{as} es el factor de reducción para estructuras aisladas sísmicamente que se calcula como:

$$Q'_{as} = R_{as} \rho_{as} \geq 1 \quad \text{si} \quad \frac{T_{as}}{T_E} \geq 5 \quad (7)$$

donde R_{as} y ρ_{as} son respectivamente los factores de reducción por sobrerresistencia y por redundancia para estructuras sísmicamente conforme se definen con detalle en las secciones 4.1 a 4.3 del Capítulo Diseño de Estructuras con Aislamiento de Base del Manual de Obras Civiles (Tena-Colunga 2013, Tena 2016). El valor obtenido para V_E no deberá ser menor a:

- a) la fuerza cortante basal obtenida conforme al espectro de diseño sísmico para estructuras convencionales, considerando a la estructura del mismo peso W empotrada en su base con un periodo efectivo igual al periodo natural de vibración de la estructura aislada sísmicamente, T_{as} .
- b) la fuerza cortante basal asociada a la carga factorizada para diseño por viento.

Estas recomendaciones se basan en adaptaciones de la propuesta de los reglamentos de aislamiento sísmico de los Estados Unidos. Sin embargo, se propone de manera original que el cortante basal con que se diseña la estructura por encima del sistema de aislamiento, V_E , se reduzca de manera transparente exclusivamente por concepto de redundancia y sobrerresistencia, que se toman en cuenta en el factor de comportamiento sísmico Q'_{as} (Tena 2004, Tena-Colunga 2013, Tena 2016). Es bien conocido, a partir de los extensos estudios que se han hecho sobre aislamiento sísmico en el ámbito mundial, que la respuesta de la superestructura disminuye notablemente a medida que aumenta el contraste entre el periodo fundamental de la estructura con base aislada y el de la estructura con base rígida (T_{as}/T_E), siendo entonces más efectivo el aislamiento sísmico (por ejemplo, Skinner *et al.* 1993, Tena *et al.* 1995, Tena-Colunga y Escamilla-Cruz 2007). Es por ello que se propone permitir mayores reducciones a sistemas donde la relación $T_{as}/T_E \geq 5$, que es el intervalo de valores propuesto concretamente para el empleo del método simplificado. Conforme a los valores especificados para R_{as} y ρ_{as} en el capítulo desarrollado para el Manual de Obras Civiles (Tena 2016), el máximo valor de reducción por comportamiento sísmico para estructuras típicas de edificios es $Q'_{as}=2 \times 1.25=2.5$ para estructuras muy redundantes cuando $T_{as}/T_E \geq 5$. Cabe señalar que en los reglamentos de aislamiento sísmico de los Estados Unidos (UBC-97 1997, FEMA-368 2001, ASCE-7 2010) se proponen reducciones fijas en función del sistema estructural que varían entre 1.4 y 2.0, y que aunque no se indican de manera transparente, se deben por concepto de sobrerresistencia y redundancia, como destacan Naeim y Kelly (1999).

Sin embargo, el cortante V_E no debe ser menor que el que se requiere para una estructura convencional de similar estructuración y periodo natural de vibración T_{as} , usando en ese caso las reducciones por redundancia, sobrerresistencia y capacidad de deformación que le permite el Capítulo C.1.3 del MOC-2008 (2009) a ese sistema estructural, es decir, se compara con el obtenido a partir de la ordenada espectral reducida $a' = a(\beta)/Q'R\rho$ amplificada por efectos bidireccionales y por torsión, conforme se establece en las recomendaciones para el diseño de Estructuras de Edificios. Con ello se garantiza entonces que una estructura aislada sísmicamente no se pueda diseñar con un cortante basal menor al de una estructura análoga empotrada en su base y con el mismo periodo fundamental de vibrar, como es la propuesta de los reglamentos de aislamiento

sísmico de los Estados Unidos. Además, el cortante de diseño no debe ser inferior al requerido por un diseño eólico, como también se establece en la normatividad estadounidense.

7. Para calcular las fuerzas cortantes a diferentes niveles de una estructura, se supone un conjunto de fuerzas horizontales con un patrón de aceleraciones uniformemente distribuido actuando sobre cada uno de los puntos donde se supongan concentradas las masas. Cada una de estas fuerzas se calcula para las masas sobre el desplante del sistema de aislamiento, o nivel a partir del cual las deformaciones estructurales pueden ser apreciables. De acuerdo con este requisito, la fuerza lateral que actúa en el i -ésimo nivel de la estructura por encima del sistema de aislamiento, F_i , resulta ser:

$$F_i = V_E \frac{W_i}{\sum W_i} \quad (8)$$

donde W_i es el peso de la i -ésima masa sobre el desplante del sistema de aislamiento.

Para estructuras aisladas sísmicamente, donde la relación T_{as}/T_E es grande, las fuerzas de inercia actuantes en la estructura por encima del sistema de aislamiento siguen un patrón de distribución sensiblemente uniforme. Aunque este hecho es bien conocido desde hace mucho tiempo (por ejemplo, Naeim y Kelly 1999), esta propuesta más racional de distribución de fuerzas laterales es sorpresivamente original en las reglamentaciones de diseño de aislamiento sísmico, pues no se incluye en los reglamentos de aislamiento sísmico de los Estados Unidos, donde en cambio se propone una distribución triangular invertida típica del primer modo de vibración de una estructura desplantada en base rígida.

8. Finalmente, conforme a lo establecido en el subinciso 3.3.4 del capítulo C.1.3 del MOC-2008 (2009) para el diseño de estructuras de edificios, con el método simplificado únicamente será necesario verificar que en cada piso la suma de las resistencias al corte de los muros de carga, proyectadas en la dirección en que se considera la aceleración, sea cuando menos igual a la fuerza cortante total que obre en el piso, calculada según se especifica en el inciso 7. La fuerza cortante que toma cada muro j en el nivel, V_{ji} , se calcula a partir de la fuerza cortante actuando en el nivel i de la estructura, V_i , como:

$$V_{ji} = V_i \frac{F_{AE_{ji}} A_{T_{ji}}}{\sum F_{AE_{ji}} A_{T_{ji}}} \quad (9)$$

donde $A_{T_{ji}}$ es el área bruta de la sección transversal del muro j en el nivel i y $F_{AE_{ji}}$ es el factor de área efectiva (F_{AE}) del muro j en el nivel i . Para estructuras aisladas sísmicamente, se debe usar el F_{AE} para comportamiento elástico, dado por:

$$F_{AE} = \begin{cases} 1.5 + \frac{h'}{L} - 1.5 \left(\frac{h'}{L} \right)^2 & \text{si } \frac{h'}{L} \leq 1 \\ 2.2 - 1.5 \frac{h'}{L} + 0.3 \left(\frac{h'}{L} \right)^2 & \text{si } 1 \leq \frac{h'}{L} \leq 2.5 \end{cases} \quad (10)$$

donde h'_i es la altura del entrepiso y L es la longitud del muro. La propuesta actualizada del factor de área efectiva para comportamiento elástico tiene su fundamento en los extensos estudios paramétricos reportados en Tena *et al.* (2010), tomando en cuenta que los muros responderán esencialmente en el intervalo de comportamiento elástico para una estructura aislada sísmicamente en su base de manera correcta.

Toda vez que se han estimado de manera correcta las fuerzas sísmicas de diseño en los muros conforme al método simplificado, se pueden calcular las resistencias a cortante de cada muro conforme se establecido en las NTCM-04 (2004) y revisar la capacidad global de la estructura acorde al método simplificado y, con ello, dar por terminado el diseño. No se requieren hacer cálculos adicionales, pues los efectos de ambos componentes horizontales del movimiento del terreno y de la torsión accidental y máxima permitida de 5% en las fuerzas cortantes que se desarrollan en la estructura por encima del sistema de aislamiento ya se están tomando en cuenta en la fuerza cortante sísmica mínima transmitida a la superestructura por el sistema de aislamiento en la dirección de análisis, V_E , ya se consideró una amplificación por torsión accidental, y dado que la estructura por encima del sistema de aislamiento es rígida, se desprecian los efectos $P-\Delta$ y el cálculo de distorsiones de entrepiso y su comparación con límites reglamentarios.

Es por ello que el método simplificado propuesto es muy atractivo para el diseño de este tipo de estructuras con aislamiento sísmico, pues permite analizar de una manera rápida distintas opciones de estructuración para edificios de baja altura con un esfuerzo computacional muy pequeño. De hecho, se puede emplear una computadora muy modesta con un programa de hoja de cálculo convencional para implantar el método simplificado propuesto. Por supuesto, primero es importante saber hacer cálculos a mano antes de programar en una hoja de cálculo o en programas como Mathcad o Matlab. Por ello, en la siguiente sección se presenta con cierto detalle un ejemplo de diseño.

3 EJEMPLO DE DISEÑO

Se tiene la planta tipo del módulo del proyecto de un edificio de cuatro pisos que se muestra en la Fig. 4, con altura típica de entrepiso de 2.7 m. La estructura será de mampostería confinada de tabique de barro de 12.5 cm de espesor, construida con mortero tipo I. Los castillos se dimensionarán para cumplir con los requisitos mínimos de las NTCM-2004. La carga muerta debida al sistema de piso es de 500 kg/m² en azotea y de 450 kg/m² en los niveles de piso. Las cargas vivas son, para cargas verticales de 100 kg/m² en azotea y de 250 kg/m² en los niveles de piso, para sismo son de 70 kg/m² y 180 kg/m² respectivamente.

El peso volumétrico del muro es $\gamma = 1.3 \text{ ton/m}^3$, y no existen aplanados ya que el terminado es el ladrillo tratado con parafina.

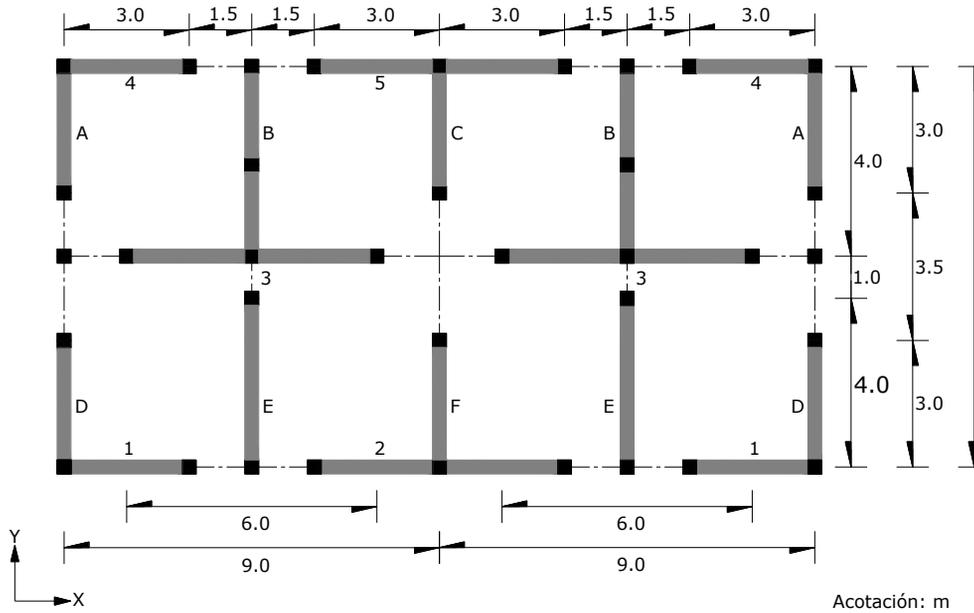


Figura 4 Planta tipo de la estructura en estudio

La estructura se encontrará en un sitio de terreno firme a más de 80 km de una falla activa, con las siguientes características: aceleración en roca $a_0^r = 0.157g$, $T_s = 0.5s$, contraste de impedancia entre suelo y roca de $\rho_s = 0.7832$, por lo que el factor de sitio es $F_s = 1$. Los periodos que definen la meseta del espectro de aceleraciones son $T_a = 0.175s$ y $T_b = 0.6s$, por lo que se tienen los espectros de diseño de aceleraciones y de desplazamientos que se muestran en la Fig. 5 que se obtuvieron conforme se establece en el MOC-2008 (MOC-2008 2009, Tena-Colunga et al. 2009).

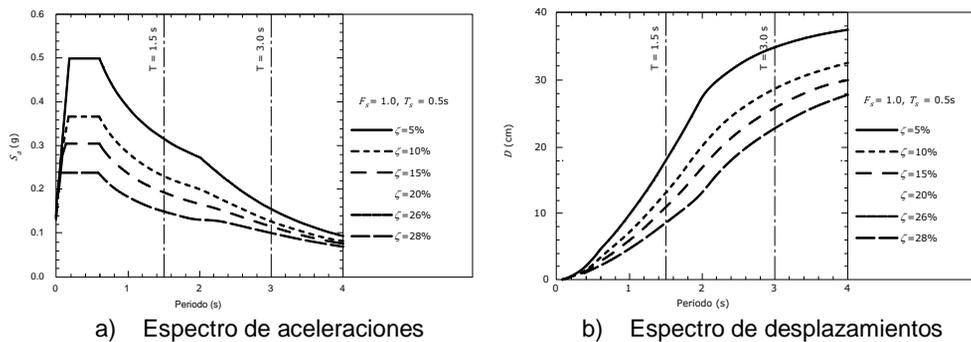


Figura 5 Espectros de diseño del MOC- 2008 para un sitio con $a_0^r = 0.157g$, $T_s = 0.5s$ y $F_s = 1$

Se desea valorar la posibilidad de hacer un proyecto con aislamiento sísmico utilizando elastómeros con corazón de plomo, de manera que el proyecto sea viable con la mampostería artesanal. Se trata de diseñar el sistema de aislamiento y a la estructura por encima del sistema de aislamiento conforme a la propuesta del Manual de Obras Civiles (Tena 2016).

3.1 Revisión de los Requisitos para la Aplicación

El primer paso consiste en revisar que se cumplan todos los requisitos para aplicar el método simplificado. Conforme a la descripción del edificio, se concluye que puede clasificarse como perteneciente al Grupo B, por lo que el requisito A se satisface. Con respecto a las 12 condiciones de regularidad estructural que deben satisfacerse (requisito B), a partir de la descripción del edificio, de su sistema estructural y de su planta tipo (Fig. 4), se concluye que las condiciones B1, B4, B5, B6, B7, B8, B9 y B10 se cumplen. El requisito B2 (esbeltez global) se satisface, ya que $H/L_2=10.8/9.5=1.14<1.5$. El requisito B3 (planta no muy alargada) se cumple dado que $L_1/L_2=18/9.5=1.89<2$.

De la estructuración propuesta para la planta tipo (Fig. 4), se aprecia a simple vista que la estructura es totalmente simétrica con respecto al eje **Y**, y prácticamente simétrica con respecto al eje **X**, lo cual se verifica fácilmente calculando la excentricidad con respecto al centro de cortante conforme lo establecen las NTCEM-04 (2004):

$$e_{sj} = \frac{\left| \sum_{i=1}^n x_i F_{AEi} A_{Ti} \right|}{\sum_{i=1}^n F_{AEi} A_{Ti}} \leq 0.05 B_j \quad (11)$$

En la dirección **X** trabajan los muros tipo 1 a 5 y $B=9.50$ m (Fig. 4). La coordenada del centro de cortante del entrepiso de PB, suponiendo que las masas están uniformemente distribuida coincide con el centro geométrico, por lo que $y_c=4.75$ m. Tomando ese punto como referencia, se tiene que, calculando las distancias a centroides de los muros (Tabla 2).

Tabla 2 Cálculo de e_s en dirección x

Muro tipo	y_i (m)	A_{Ti} (m ²)	h/L	F_{AEi}	$F_{AEi} A_{Ti}$	$y_i F_{AEi} A_{Ti}$
1	-4.6875	0.375	0.90	1.185	0.4444	-2.0830
1	-4.6875	0.375	0.90	1.185	0.4444	-2.0830
2	-4.6875	0.75	0.45	1.6463	1.2347	-5.7876
3	0.25	0.75	0.45	1.6463	1.2347	0.3087
3	0.25	0.75	0.45	1.6463	1.2347	0.3087
4	4.6875	0.375	0.90	1.185	0.4444	2.0830
4	4.6875	0.375	0.90	1.185	0.4444	2.0830
5	4.6875	0.75	0.45	1.6463	1.2347	5.7876
Σ					6.7163	0.6173

Entonces:

$$e_{sy} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i F_{AEi} A_{Ti}}{\sum_{i=1}^n F_{AEi} A_{Ti}} = \frac{0.6173}{6.7163} = 0.092 \text{ m} \leq 0.1(9.5) = 0.95 \text{ m}$$

y, por lo tanto, la condición B11 se cumple, dado que $e_{sy} / B = 0.092 / 9.5 = 0.01 \leq 0.05$.

Dado que los elastómeros se ubicarán tan simétricos como sea posible, la condición B12 también se cumple, puesto que e_{sya} será similar a e_{sy} y, por lo tanto, estará dentro de límites razonables. Por lo tanto, se cumplen todos los requisitos de regularidad estructural para aplicar el método simplificado.

A partir de la planta tipo, se concluye que se satisfacen el requisito C, dado que en cada planta las cargas verticales bajan a través de los muros de carga en un 100%. El requisito D se cumple dado que la altura del edificio es $H=10.8$ m y tiene cuatro pisos. A partir de la información que se da en la formulación del problema de diseño, se aprecia que también se cumplen con los requisitos E y F. Finalmente, los requisitos G, H e I se deberán cumplir en el diseño de la estructura sísmicamente aislada. Por lo tanto, se concluye que la propuesta estructural del edificio en estudio cumple con los requisitos para que se pueda diseñar el sistema de aislamiento mediante el método simplificado permitido en el Manual de Obras Civiles (Tena 2016).

3.2 Estimación del peso y del periodo en base rígida

Lo primero que debe hacerse es estimar el peso total de la estructura por encima del sistema de aislamiento considerando la carga muerta y la carga viva con intensidad instantánea, para lo cual hay que determinar el peso de la estructura y del piso rígido que estará en la interfase del sistema de aislamiento y la estructura. Por simplicidad en el ejemplo, se supone que el peso de la losa rígida y vigas perimetrales que requiere el piso pesa lo mismo que un entrepiso intermedio. A partir de la información proporcionada en la Fig. 4, se calcula que la longitud total de muros en planta es $L_m=71$ m y que, por lo tanto, el peso de los muros por metro lineal es $\omega_w=1.3(2.7)(0.125)=0.44$ Ton/m. Por lo tanto, a partir del resto de la información proporcionada en la formulación del problema de diseño se obtiene que el peso total de la estructura para diseño sísmico es:

$$W = W_{\text{superestructura}} + W_{\text{losa interfase}} = W_{\text{niveles}} + W_{\text{muros}} + W_{\text{losa interfase}}$$

$$W = [0.57 + 3(0.63)](18)(9.5) + 4(71 \text{ m})(0.44 \text{ Ton/m}) + 0.63(18)(9.5)$$

$$W = 420.66 + 124.61 + 107.73 \rightarrow W = 653 \text{ Ton}$$

Se requiere también estimar el periodo fundamental en base rígida. Para este propósito, se emplea la fórmula aproximada propuesta por Murià y González

(1995) para edificios de mampostería confinada desplantados en terreno firme. Por lo tanto, y dado que el edificio consta de 4 pisos ($N=4$), se obtiene que:

$$T_E \approx 0.04N = 0.04(4) = 0.16s$$

3.3 Diseño del sistema de aislamiento sísmico

Existen varias opciones sobre cómo pueden diseñarse aisladores elastoméricos o de fricción en la literatura (por ejemplo, Skinner *et al.* 1993, Naeim y Kelly 1999, Kelly 1993). En este ejemplo se utilizará un procedimiento de diseño iterativo presentado con anterioridad (Tena 2001), adaptado para el método simplificado.

La curva primaria del sistema de aislamiento sísmico debe satisfacer el requisito *la* que se ilustra en la Fig. 3. Por lo tanto, $k_{D_{\min}} = k_{ef} \geq \frac{1}{3}k_{ef2}$. Dado que el cociente de la pendiente posterior a la fluencia del aislador, k_2/k_1 , depende principalmente de sus características y que, para fines prácticos de prediseño se puede suponer que $k_2/k_1 \cong 0.1$ para elastómeros con corazón de plomo. Entonces, para satisfacer la curva primaria del sistema de aislamiento (requisito *la*) para $k_2/k_1 = 0.1$, se tiene que (Tena 2001):

$$V_2 = 0.6V_{\max} = 0.6V_{as} \quad (12)$$

$$V_{as} = 1.8V_y \quad (13)$$

$$\Delta_y = \frac{D_T}{9} \quad (14)$$

$$k_1 = 5 \frac{V_{as}}{D_T} = 5k_{ef} \quad (15)$$

$$k_2 = 0.5k_{ef} \quad (16)$$

La fuerza de fluencia del sistema de aislamiento, $V_y = \kappa W$ se debe proponer o estimar en función del desplazamiento de diseño objetivo D_T y del amortiguamiento viscoso equivalente proporcionado por el sistema de aislamiento (β_D) al desplazamiento de diseño, que para sistemas con comportamiento bilineal puede estimarse como (Tena 2016):

$$\beta_D = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{E_{ciclo}}{k_{D_{\min}} (D_T)^2} \right] = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{E_{ciclo}}{V_{as} D_T} \right] \quad (17)$$

$$E_{ciclo} = 4V_c (D_T - \Delta_y) = 4(V_{as} - k_2 D_T) (D_T - \Delta_y) \quad (18)$$

donde V_c es la fuerza cortante característica, que se define como la obtenida de la intersección de la línea correspondiente a la pendiente posterior a la fluencia (k_2)

con el eje de las ordenadas (cuando $\Delta=0$, Fig. 3). Si $k_2/k_1=0.1$, se puede demostrar a partir de las ecuaciones 12 a 16 que las ecuaciones 17 y 18 se reducen a:

$$E_{ciclo} = 3.6V_y(D_T - \Delta_y) = 28.8V_y\Delta_y$$

$$\beta_D = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{28.8V_y\Delta_y}{1.8V_y(9\Delta_y)} \right] = 0.283$$

Por lo tanto, se aprecia que β_D es constante toda vez que la curva primaria se define en función de k_2/k_1 y Δ_y/D_T , independientemente del valor de V_y , hecho que simplifica notablemente el problema de diseño.

Se sabe que el periodo efectivo de la estructura sísmicamente aislada, T_{as} , debe proponerse para cumplir con los requisitos G y H. Por lo tanto, se propone inicialmente que $T_{as} = 2s$, pues así $T_{as}/T_E \approx 12.5 > 5$.

Entonces, a partir de la ecuación 1 se calcula k_{Dmin} como:

$$k_{Dmin} = \frac{4\pi^2 W}{g T_{as}^2} = 6.57 \text{ Ton/cm}$$

Suponiendo inicialmente que $\kappa = 0.11$, se estiman las fuerzas de fluencia y máxima del sistema de aislamiento:

$$V_y = \kappa W = 71.83 \text{ Ton}$$

$$V_{as} = 1.8V_y = 129.29 \text{ Ton}$$

A partir de la ecuación 5 y de la Fig. 3, se aprecia que el desplazamiento total de diseño que puede acomodar el sistema de aislamiento es:

$$D_T = \frac{V_{as}}{k_{Dmin}} = 19.68 \text{ cm}$$

Se sabe que el desplazamiento total de diseño (D_T) se estima a partir del desplazamiento D_D conforme a las ecuaciones 2 a 4 como:

$$D_{2D} = 1.1D_D(1.3 - 0.02T_{as}) = 1.386D_D$$

$$D_T = 1.1D_{2D} = 1.525D_D$$

entonces:

$$D_D = \frac{D_T}{1.525} = 12.91 \text{ cm}$$

$$h = \frac{\pi\phi^2 G_{ais}}{4k_2 / N_{ais}} = 51.01 \text{ cm}$$

$$h / \phi = 51.01 / 59.04 = 0.86 > 0.8, \text{ pero suficientemente próximo}$$

$$A_{pb} = \frac{V_y - k_2 \Delta_y}{N_{ais} \tau_{pb}} = 100.70 \text{ cm}^2$$

$$\phi_{pb} = \sqrt{\frac{4A_{pb}}{\pi}} = 11.32 \text{ cm}$$

$$\phi_{pb} / \phi = 11.32 / 59.04 = 0.19 < 0.25$$

Por lo tanto, a partir del diseño preliminar se concluye que, para satisfacer la relación de esbeltez límite del aislador, se pueden ajustar las medidas de manera que se usen seis elastómeros con corazón de plomo con diámetro $\phi = 60 \text{ cm}$ y altura $h = 45 \text{ cm}$, debiéndose ajustar el diámetro del corazón de plomo, ϕ_{pb} . Los ajustes en el diseño de los aisladores se realizan fácilmente de la siguiente manera:

$$h / \phi = 45 / 60 = 0.75 < 0.8$$

$$D_T = \frac{\phi}{3} = 20 \text{ cm}$$

$$\Delta_y = \frac{D_T}{9} = 2.22 \text{ cm}$$

$$k_2 = \frac{\pi\phi^2 G_{ais}}{4h / N_{ais}} = 3.845 \text{ Ton/cm}$$

$$A_{pb} = \frac{V_y - k_2 \Delta_y}{N_{ais} \tau_{pb}} = 98.57 \text{ cm}^2$$

$$\phi_{pb} = \sqrt{\frac{4A_{pb}}{\pi}} = 11.2 \text{ cm}$$

$$\phi_{pb} / \phi = 11.2 / 60 = 0.19 < 0.25$$

Por supuesto, estos ajustes modifican a k_2 / k_1 , $k_{D_{\min}}$ y a β_D . Dado que el ajuste propuesto en h es relativamente importante, se debe revisar cómo dichos ajustes modifican las propiedades de diseño y se debe revisar si el diseño propuesto aún satisface la demanda de desplazamiento. Por lo tanto:

$$k_1 = \frac{V_y}{\Delta_y} = \frac{71.83}{2.22} = 32.354 \text{ Ton/cm}$$

$$k_2 / k_1 = 3.845 / 32.354 = 0.119$$

$$V_{as} = V_y + k_2(D_T - \Delta_y) = 140.19 \text{ Ton}$$

$$k_{D\min} = \frac{V_{as}}{D_T} = 7.009 \text{ Ton/cm}$$

Revisando que se satisfagan las características que debe cumplir la curva primaria (Fig. 3, requisito *1a*), se tiene que:

$$\Delta_2 = 0.2D_T = 4 \text{ cm}$$

$$V_2 = V_y + k_2(\Delta_2 - \Delta_y) = 78.67 \text{ Ton}$$

$$k_{ef2} = \frac{V_2}{\Delta_2} = 19.667 \text{ Ton/cm}$$

$$k_{D\min} / k_{ef2} = 0.36 > \frac{1}{3}, \text{ por lo tanto, satisfactorio}$$

Por lo tanto, para el sistema propuesto, β_D es:

$$E_{ciclo} = 4(V_{as} - k_2D_T)(D_T - \Delta_y) = 4,500.62 \text{ Ton-cm}$$

$$\beta_D = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{E_{ciclo}}{V_{as}D_T} \right] = 0.26$$

Entonces, T_{as} y D_D son:

$$T_{as} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{gk_{D\min}}} = 1.94 \text{ s}$$

$$D_D = \frac{D_T}{1.526} = \frac{20}{1.526} = 13.11 \text{ cm}$$

Dado que $T_{as} = 1.94 \text{ s}$ y $\zeta_{as} = \beta_D = 0.26$, a partir del espectro de diseño por desplazamientos mostrado en la Fig. 5b se obtiene que $S_d = 12.38 \text{ cm} < D_D = 13.11 \text{ cm}$. Por lo tanto, el diseño es adecuado y se pueden emplear seis elastómeros con corazón de plomo (Fig. 6) con las siguientes características: $\phi = 60 \text{ cm}$, $h = 45 \text{ cm}$ y $\phi_{pb} = 11.2 \text{ cm}$.

Se debe además prediseñar el espesor de los estratos de hule y de las placas de acero de los aisladores para tomar la carga axial que les corresponde a cada uno por su ubicación, en función de tener un factor de seguridad aceptable para la carga de pandeo del aislador ante el desplazamiento máximo de diseño, D_T , lo cual se puede hacer conforme a los procedimientos explicados e ilustrados en Skinner *et al.* (1993) o Naeim y Kelly (1999). Una vez terminado este prediseño, se puede trabajar con el fabricante para corroborar las propiedades mecánicas de los aisladores, y verificar o ajustar el diseño del sistema de aislamiento, según sea el caso. Por supuesto, se deben vigilar más aspectos importantes en el diseño de estructuras aisladas y que son independientes del método de diseño, como se establece en las recomendaciones del manual (Tena 2016).

3.4 Diseño de la estructura por encima del sistema de aislamiento

La fuerza cortante de diseño para la estructura por encima del sistema de aislamiento, V_E , se obtiene conforme a la ecuación 6. Por lo tanto, debe calcularse primero Q'_{as} .

Dado que $T_{as}/T_E = 1.94/0.16 = 12.13 > 5$, entonces $Q'_{as} = R_{as}\rho_{as} \geq 1$. Como la estructura por encima del sistema de aislamiento sísmico es con base en muros de carga de mampostería confinada de tabiques rojos recocidos, el factor de sobrerresistencia índice propuesto en Tena (2016) es $R_{a0} = 1.6$. Dado que $T_E = 0.16s < T_a = 0.175s$, el factor de sobrerresistencia R_{as} se calcula como:

$$R_{as} = R_{a0} + 0.3 \left(1 - \sqrt{\frac{T_E}{T_a}} \right) = 1.61$$

El factor de redundancia para estructuras sísmicamente aisladas, ρ_{as} , se determina a partir de la observación de la Fig. 6. Se aprecia que el sistema de aislamiento propuesto es menos redundante en la dirección **Y**, pues si los aisladores representaran “columnas” de “marcos”, en esa dirección se tendrían un sistema de aislamiento compuesto de tres marcos de una sola crujía, por lo que en esta dirección, $\rho_{as} = 0.8$. En cambio, en la dirección **X**, la ubicación de los aisladores definirían dos marcos de dos crujías, por lo que $\rho_{as} = 1$. Por ello, tendríamos distintos factores de reducción y cortantes de diseño para la superestructura en dirección **X** y **Y**, que serían:

$$Q'_{as_x} = 1.61(1) = 1.61$$

$$V_{E_x} = \frac{V_{as}}{Q'_{as_x}} = \frac{140.19}{1.61} = 87.1 \text{ Ton}$$

$$Q'_{as_y} = 1.61(0.8) = 1.29$$

$$V_{E_y} = \frac{140.19}{1.29} = 108.8 \text{ Ton}$$

Conforme a lo descrito en el inciso 6, se deben revisar dos condiciones, una que depende del diseño por viento (condición *b*), que no se checará por no contar en este ejemplo con esa información (además de no ser esencial para ilustrar al método simplificado), pero se verificará la otra condición.

En el inciso *a* se indica que V_E no debe ser menor la fuerza cortante basal obtenida conforme al espectro de diseño sísmico para estructuras convencionales, considerando a la estructura del mismo peso W empotrada en su base con un

periodo efectivo igual al periodo natural de vibración de la estructura aislada sísmicamente, T_{as} , a la cual denominaremos como V_{Ebr} .

En aras de ahorrar espacio, los cálculos necesarios para hacer esta revisión se sintetizan a continuación, pero se presentan con mayor detalle en Tena (2016). Con $T_{as} = 1.94s$ y $\zeta = 0.05$, se obtiene a partir del espectro de diseño de aceleraciones (Fig. 5a) que $S_a = 0.278g$. Como $a' = S_a / Q' R \rho$, se requieren calcular los factores de sobrerresistencia (R), de redundancia (ρ) y de reducción de fuerzas sísmicas para fines de diseño (Q) para un sistema estructural con base en muros de mampostería confinada con piezas de arcilla macizas conforme al MOC-2008 (2009). Del análisis de la Fig. 6, se deduce que $\rho = 1$ en ambas direcciones ortogonales. Como $T_{as} = 1.94s > T_a = 0.175s$, entonces $R = R_0 = 2.5$. Q' se calcula como:

$$Q' = 1 + (Q - 1) \sqrt{\frac{\beta \left(\frac{T_c}{T_{as}} \right)^r}{k \left(\frac{T_c}{T_{as}} \right)}} \quad (19)$$

donde $\beta = 1$ para $\zeta = 0.05$, y dado que $T_s = 0.5s$, conforme a lo establecido en el MOC-2008 (2009), se tiene que: $k = 2 - T_s = 2 - 0.5 = 1.5$ y que $r = T_s = 0.5$. Por lo tanto:

$$Q' = 1 + (2 - 1) \sqrt{\frac{1 \left(\frac{2}{1.94} \right)^{0.5}}{1.5 \left(\frac{2}{1.94} \right)}} = 1.80$$

$$a' = \frac{0.278g}{1.80(2.5)(1)} = \frac{0.278g}{4.50} = 0.062g$$

$$V_{Ebr} = 1.1aW = 44.4Ton$$

Por lo tanto, es claro que $V_{E_x} > V_{Ebr}$ y $V_{E_y} > V_{Ebr}$, por lo que V_{E_x} y V_{E_y} deben emplearse para el diseño de la estructura por encima del sistema de aislamiento.

La distribución de fuerzas laterales en la superestructura se hace conforme a lo establecido en la ecuación 7. A partir de la información proporcionada en la formulación del problema, se calculan las masas (los pesos) que actúan en cada nivel, incluyendo los debidos a los muros, donde se supone que se reparten a mitades entre los pisos que delimitan a cada muro. De esta manera, se obtiene que:

$$F_{4x} = 87.1 \frac{113.09}{530} = 18.59 Ton; F_{1x} = F_{2x} = F_{3x} = 87.1 \frac{138.97}{530} = 22.84 Ton$$

$$F_{4y} = 108.8 \frac{113.09}{530} = 23.22 Ton; F_{1y} = F_{2y} = F_{3y} = 108.8 \frac{138.97}{530} = 28.53 Ton$$

Para el prediseño de los muros de mampostería confinada conforme al método simplificado, se requieren determinar primero las resistencias nominales a la compresión mínimas de la mampostería (f_m^*) y de los tabiques de barro recocido (f_p^*) conforme a las NTCEM-04 (2004), que permitan resistir adecuadamente las combinaciones de diseño por carga vertical. Por restricciones de espacio, no se ilustra con detalle este procedimiento, el cual sí se presenta con detalle en Tena (2016). Si se resume rápidamente el diseño por cargas gravitacionales, se encuentra que el elemento crítico es el muro F en planta baja (Figs. 4 y 6), que debe tomar una carga última factorizada $P_{UPB}=54.17$ Ton. Por lo tanto, la resistencia mínima de diseño de la mampostería confinada se puede determinar, conforme a las NTCEM-04 como:

$$f_m^* \geq \frac{P_{UPB}}{F_R F_E A_T} - 4 \quad (20)$$

dado que el factor de reducción por excentricidad y esbeltez calculado para ese muro es $F_E=0.9$, que el factor de reducción de resistencia es $F_R=0.6$, y que el área del muro es $A_T=(300)(12.5)=3,750$ cm², entonces:

$$f_m^* \geq \frac{54,170}{0.6(0.9)(3750)} - 4 = 26.75 - 4 = 22.75 \text{ kg / cm}^2$$

Interpolando linealmente de la Tabla 2.7 de las NTCEM-04 (2004), se tiene que para $f_m^* = 22.75$ kg/cm² y mortero tipo I, $f_p^* \geq 64.15$ kg/cm², por lo que en planos se deberá especificar que la resistencia de diseño mínima del tabique rojo recocido sea $f_p^* \geq 65$ kg/cm².

El diseño sísmico de los muros de mampostería confinada conforme al método simplificado propuesto se presenta con detalle en Tena (2016), y se ilustra en este trabajo exclusivamente para los muros de planta baja en la dirección crítica Y, donde $V_{E_y} = 108.8$ Ton.

La capacidad individual de cada muro se calcula como:

$$V_{mR} = F_R(0.5v_m^* A_T + 0.3P) \leq 1.5F_R v_m^* A_T \quad (21)$$

donde $F_R=0.7$, y dado que los muros son de tabique rojo recocido unidos con mortero tipo I, $v_m^* = 3.5$ kg/cm²= 35 Ton/m². El cálculo de la vertical P no factorizada correspondiente a la carga muerta más la carga viva con intensidad instantánea en PB para cada muro se reporta con detalle en Tena (2016). Si se hacen las siguientes definiciones para el cálculo de la resistencia nominal de cada muro tipo:

$$V_{mRn} = F_R(0.5v_m^* A_T + 0.3P) \quad (22)$$

$$V_{mRL} = 1.5F_R v_m^* A_T \quad (23)$$

$$V_{mR} = \text{Min} \begin{cases} V_{mRn} \\ V_{mRL} \end{cases} \quad (24)$$

$$V_{mRD} = F_{AER} V_{mR}; \quad F_{AER} = \begin{cases} 1 & \text{si } \frac{h}{L} \leq 1.33 \\ \left(1.33 \frac{L}{h}\right)^2 & \text{si } \frac{h}{L} > 1.33 \end{cases} \quad (25)$$

entonces, se puede resumir el cálculo de la resistencia de diseño de cada muro tipo en planta baja en la dirección Y con ayuda de la Tabla 3.

Tabla 3 Capacidad resistente de los muros tipo en la dirección Y en planta baja

Muro tipo	A _T (m ²)	P (Ton)	V _{mRn} (Ton)	V _{mRL} (Ton)	V _{mR} (Ton)	F _{AER}	V _{mRD} (Ton)
A	0.375	18.43	8.46	13.78	8.46	1.0	8.46
B	0.563	34.21	14.07	20.67	14.07	1.0	14.07
C	0.375	30.19	10.93	13.78	10.93	1.0	10.93
D	0.375	21.19	9.04	13.78	9.04	1.0	9.04
E	0.500	38.25	14.16	18.38	14.16	1.0	14.16
F	0.375	35.72	12.09	13.78	12.09	1.0	12.09

Por lo tanto, y conforme se establece en las NTCEM-04, se debe revisar que todos los muros resistentes en la dirección Y sean capaces de resistir el cortante actuante en cada dirección. Por lo tanto, observando de la Fig. 4 el número de muros tipo que existen, y tomando el cortante resistente calculado para cada muro (Tabla 3), se tiene que revisando de manera gruesa la capacidad resistente en la dirección Y:

$$V_{Ry} = 2(8.46) + 2(14.07) + 10.93 + 2(9.04) + 2(14.16) + 12.09$$

$$V_{Ry} = 114.48 \text{ Ton} > V_{Ey} = 108.8 \text{ Ton}$$

Por lo tanto, la estructura tiene una capacidad a cortante suficiente de manera gruesa en la dirección Y, por lo que puede aceptarse su diseño como válido.

Como se calcula y reporta con detalle en Tena (2016), los muros resistentes en la dirección X también tienen suficiente capacidad para resistir el cortante demandado en planta baja, dado que con la evaluación gruesa se obtiene que $V_{Rx} = 108.8 \text{ Ton} > V_{Ex} = 87.1 \text{ Ton}$.

Con este ejemplo se intenta ilustrar que el método simplificado propuesto para el diseño sísmico de estructuras de mampostería de baja altura sensiblemente regulares con aislamiento de base es sencillo de aplicar, y que muchos de las revisiones y cálculos requeridos se pueden programar fácilmente en herramientas sencillas, como hojas de cálculo o programas como Matlab o Mathcad.

4 REVISIÓN DEL DISEÑO MEDIANTE ANÁLISIS DINÁMICOS NO LINEALES

La eficacia del diseño del aislamiento sísmico de la estructura de mampostería confinada en estudio obtenido mediante el método simplificado se evaluó mediante análisis dinámicos paso a paso, conforme a lo que se establece en las recomendaciones de diseño de estructuras con aislamiento sísmico propuestas para el Manual de Obras Civiles (Tena 2016).

Para este propósito, se seleccionaron 16 pares de registros de aceleración registrados en estaciones ubicadas en terreno firme o roca que corresponden a ocho sismos distintos con magnitudes $M > 6.4$. Los registros de aceleración fueron escalados por pares, de manera que la componente fuerte o dominante alcanzara la ordenada espectral $S_a = 0.274g$ para $T_{as} = 2s$ para el espectro de aceleraciones de diseño para $\zeta = 0.05$ mostrado en la Fig 5a, usando el procedimiento explicado con mayor detalle en Tena-Colunga y Pérez-Osornio (2006), es decir, el mismo factor de escala se empleó para los dos componentes (E-W y N-S) de cada estación, de manera individualizada. Los registros se corrigieron, filtraron y procesaron de manera similar a la indicada en Tena-Colunga y Pérez-Osornio (2006), dado que pertenecen a la misma base de datos.

Los análisis dinámicos paso a paso no lineales se realizaron en el programa 3D-Basis (Nagarajah *et al.* 1991), pero bien pudieron haberse realizado en programas más comerciales como el ETABS, SAP2000 o similares. La estructura se sometió simultáneamente a la acción de las dos componentes horizontales ortogonales y se intercambiaron éstas para evaluar los efectos de directividad de una manera cruda, pero práctica.

Cada aislador se modeló de manera independiente empleando el modelado histerético con comportamiento bidireccional disponible en el programa 3D-Basis, que además modela potenciales problemas de inestabilidad dinámica en el aislador por efectos P- δ (que es la razón principal por la cual se prefiere usar este software en lugar del ETABS, que no dispone de ese modelo constitutivo).

La estructura por encima del sistema de aislamiento se modeló como una estructura de cortante en 3D que, de hecho, es la hipótesis en que se fundamenta el método simplificado para el análisis y diseño de estructuras de mampostería de los reglamentos de México, como se describe en Tena *et al.* (2010). Se emplearon los 12 modos de vibración de la estructura, con base en la hipótesis que los sistemas de piso constituyen diafragmas infinitamente rígidos. Cabe señalar que los periodos fundamentales de traslación en base rígida calculados con el programa 3D-Basis bajo estas hipótesis de modelado fueron $T_{E_x} = 0.187s$ y $T_{E_y} = 0.175s$, razonablemente cercanos al periodo en base rígida estimado inicialmente para fines de prediseño ($T_E \approx 0.04N = 0.16s$).

Las respuestas dinámicas máximas obtenidas a partir de los análisis paso a paso no lineales se resumen en las Tablas 4 (superestructura) y 5 (sistema de aislamiento). Cabe señalar que, conforme se establece en las recomendaciones de referencia (Tena 2016), si se emplean siete o más pares de registros de

aceleración, para fines de diseño (o revisión) se puede emplear el valor promedio del parámetro de interés, que es la razón por la cual el valor medio (σ) también se incluye en dichas tablas.

Así, a partir de los resultados presentados en la Tabla 4, se puede confirmar que el proyecto de aislamiento sísmico es efectivo para minimizar el movimiento de la estructura por encima del sistema de aislamiento sísmico. De hecho, la superestructura se mueve esencialmente como un cuerpo rígido, con desplazamientos relativos entre la azotea y el plano de aislamiento prácticamente despreciables, y distorsiones de entrepiso máximas (en planta baja) muy por debajo del límite $\Delta=0.0015$ (0.15%) que se establece en dichas recomendaciones para el aislamiento sísmico de estructuras con base en muros de mampostería confinada construidos con piezas macizas (Tena-Colunga 2013, Tena 2016).

Tabla 4 Respuestas dinámicas máximas de la superestructura para el diseño de aislamiento sísmico de la estructura de mampostería confinada en estudio cuando se sujeta a la acción bidireccional de los registros de aceleración seleccionados

Estación	Sismo	Desplazamiento máximo de azotea (mm)		Distorsión de entrepiso máxima		Aceleración máxima en azotea (g)		Cortante basal máximo normalizado	
		X	Y	X	Y	X	Y	V_{xe}/W	V_{ye}/W
AZIH	85/09/19	1.23	1.65	0.00019	0.00026	0.134	0.157	0.108	0.127
CALE	85/09/19	1.19	0.97	0.00018	0.00015	0.130	0.095	0.105	0.075
PAPN	85/09/19	1.03	2.02	0.00016	0.00031	0.113	0.195	0.090	0.155
SUCH	85/09/19	1.58	1.24	0.00024	0.00019	0.173	0.120	0.139	0.095
UNIO	85/09/19	1.09	1.69	0.00016	0.00026	0.122	0.162	0.094	0.130
VILE	85/09/19	1.52	1.33	0.00023	0.00021	0.165	0.129	0.134	0.103
AZIH	85/09/20	1.70	1.43	0.00026	0.00022	0.184	0.138	0.149	0.109
COPL	95/09/14	1.08	1.92	0.00017	0.00030	0.120	0.184	0.095	0.148
PTSU	95/10/09	1.28	1.45	0.00020	0.00022	0.139	0.139	0.112	0.112
ZHIG	96/07/15	1.49	1.42	0.00023	0.00022	0.165	0.138	0.129	0.108
PTSU	97/01/11	1.18	1.56	0.00018	0.00024	0.129	0.152	0.104	0.120
UNIO	97/01/11	1.14	1.87	0.00017	0.00029	0.126	0.182	0.099	0.144
CUER	99/06/15	1.45	1.45	0.00022	0.00022	0.158	0.139	0.127	0.111
CSER	99/09/30	1.23	1.60	0.00019	0.00025	0.134	0.154	0.108	0.124
CUER	99/09/30	1.07	1.28	0.00016	0.00020	0.116	0.123	0.094	0.099
PPIG	99/09/30	1.02	1.29	0.00016	0.00020	0.111	0.123	0.090	0.100
σ		1.27	1.51	0.00019	0.00023	0.139	0.146	0.111	0.116

También se aprecia que el perfil de aceleraciones máximas de entrepiso es bastante uniforme, como consecuencia que la estructura se desplaza casi como un cuerpo rígido. El factor de amplificación máximo obtenido entre planta baja (no mostrado) y la aceleración de azotea (Tabla 4) es 1.03. Por lo tanto, estos resultados confirman la racionalidad de proponer una distribución de fuerzas laterales uniforme para el diseño de la superestructura (ecuación 8).

Finalmente, los cortantes resistentes normalizados obtenidos en el diseño de la estructura de mampostería confinada son $V_{R_x}/W = 0.167$ y $V_{R_y}/W = 0.175$, mayores a los cortantes dinámicos normalizados máximos demandados V_{xe}/W y V_{ye}/W reportados en la Tabla 4, donde $W=653$ Ton.

Tabla 5 Respuestas dinámicas máximas del sistema de aislamiento para el diseño de aislamiento sísmico de la estructura de mampostería confinada en estudio cuando se sujeta a la acción bidireccional de los registros de aceleración seleccionados

Estación	Sismo	Desplazamientos máximos de los aisladores				Cortantes normalizados máximos en el sistema de aislamiento			
		D_{xas} (cm)	D_{yas} (cm)	D_{as} (cm)	D_{as} / D_T	V_{xa}/W	V_{ya}/W	V_{xe}/V_{xa}	V_{ye}/V_{ya}
AZIH	85/09/19	7.32	11.12	13.17	0.66	0.133	0.156	0.814	0.813
CALE	85/09/19	5.96	2.84	6.29	0.31	0.129	0.091	0.813	0.820
PAPN	85/09/19	8.32	17.10	18.96	0.95	0.110	0.189	0.820	0.818
SUCH	85/09/19	12.82	9.83	16.06	0.80	0.170	0.117	0.815	0.818
UNIO	85/09/19	6.45	11.02	11.79	0.59	0.115	0.161	0.821	0.812
VILE	85/09/19	12.71	8.36	14.84	0.74	0.165	0.127	0.812	0.810
AZIH	85/09/20	15.01	10.39	16.39	0.82	0.184	0.134	0.812	0.818
COPL	95/09/14	5.03	14.99	15.23	0.76	0.111	0.183	0.814	0.812
PTSU	95/10/09	8.46	7.30	8.70	0.44	0.138	0.138	0.813	0.813
ZHIG	96/07/15	12.75	9.35	15.06	0.75	0.157	0.132	0.821	0.822
PTSU	97/01/11	12.02	10.13	15.66	0.78	0.128	0.148	0.814	0.814
UNIO	97/01/11	9.51	16.32	16.47	0.82	0.120	0.176	0.824	0.817
CUER	99/06/15	10.59	8.22	10.65	0.53	0.157	0.135	0.813	0.823
CSER	99/09/30	7.27	11.01	11.97	0.60	0.133	0.152	0.812	0.813
CUER	99/09/30	4.90	6.44	6.91	0.35	0.115	0.122	0.812	0.813
PPIG	99/09/30	5.64	6.46	8.57	0.43	0.110	0.123	0.814	0.812
σ		9.05	10.06	12.92	0.65	0.136	0.146	0.815	0.816

A partir de los resultados reportados en la Tabla 5 se confirma que el proyecto de aislamiento sísmico es satisfactorio, dado que los desplazamientos dinámicos máximos demandados en el sistema de aislamiento (D_{as}) son menores al desplazamiento total de diseño que se puede acomodar, $D_T=20$ cm. Además, el cortante normalizado que puede desarrollar el sistema de aislamiento al desplazamiento D_T es $V_{as}/W = 0.215$, mayor que los cortantes dinámicos máximos demandados y normalizados V_{xa}/W y V_{ya}/W , reportados en la Tabla 5. Finalmente, se aprecia una reducción bastante constante de la fuerza cortante máxima transmitida a la superestructura (V_{xe}/V_{xa} y V_{ye}/V_{ya}), del orden del 81.5%.

5 COMENTARIOS FINALES

Se presentó el método simplificado para el análisis y diseño de estructuras con base en muros de carga aisladas sísmicamente que se propone en el Manual de Obras Civiles de CFE. La propuesta adapta el método simplificado de diseño de estructuras con base en muros de mampostería de las normas de diseño sísmico de México y la propuesta para el diseño del sistema de aislamiento sísmico del método estático de los reglamentos de los Estados Unidos.

El fin último del método simplificado es promover el uso del aislamiento sísmico en estructuras de baja altura con base en muros de mampostería que sean razonablemente regulares, al facilitar enormemente su procedimiento de diseño.

Se presentó con detalle un ejemplo de diseño para ilustrar la aplicación del método simplificado en una estructura regular con base en muros de mampostería confinada. La eficacia del diseño del aislamiento sísmico de la estructura en

estudio se evaluó mediante análisis dinámicos paso a paso no lineales, conforme a lo que se establece en las recomendaciones de diseño de estructuras con aislamiento sísmico propuestas para el Manual de Obras Civiles.

A partir del análisis de los resultados obtenidos con los análisis dinámicos paso a paso no lineales, se corroboró que:

- la estructura por encima del sistema de aislamiento sísmico responde esencialmente como un cuerpo rígido, con desplazamientos máximos entre azotea y el plano de aislamiento prácticamente despreciables.
- las distorsiones de entrepiso máximas en la superestructura se encuentran por debajo del límite $\Delta=0.15\%$ propuesto en el Manual de Obras Civiles para estructuras con base en muros de mampostería confinada de piezas sólidas aisladas sísmicamente.
- el perfil de aceleraciones en los niveles de la superestructura es razonablemente uniforme, como consecuencia que la estructura responde esencialmente como un cuerpo rígido.
- el cortante nominal resistente de la estructura de mampostería confinada es mayor que los cortantes dinámicos máximos demandados en planta baja.
- los desplazamientos dinámicos máximos demandados en los aisladores son menores al desplazamiento total de diseño que los aisladores pueden acomodar.
- la capacidad a cortante del sistema de aislamiento es mayor a los cortantes dinámicos máximos que son demandados en el sistema de aislamiento.

Por lo tanto, se concluye que el método simplificado propuesto en el Manual de Obras Civiles de CFE es una herramienta útil y práctica que permitirá obtener diseños seguros para el aislamiento sísmico de estructuras regulares de baja altura con base en muros de carga, particularmente de mampostería confinada, siempre y cuando el peligro sísmico del sitio de interés esté bien definido y evaluado. No hay método de análisis y diseño infalible para cuando las acciones de diseño se encuentran notablemente subestimadas, ya sea por ignorancia u otras razones aún más lamentables.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el patrocinio de Comisión Federal de Electricidad (CFE) y de la beca Fullbright-García Robles del programa de investigadores.

REFERENCIAS

1. ASCE-7 (2010), "Minimum design loads for buildings and other structures", *ASCE Standard ASCE/SEI 7-10*, American Society of Civil Engineers, ISBN: 9780784410851, mayo.
2. Cautín (2010), "Construcciones con aislamiento sísmico en México", *Informe Interno*, Constructora Cautín, Guadalajara, México.
3. Eisenberger M. y Rutenberg A. (1986), "Seismic base isolation of asymmetric shear buildings", *Engineering Structures*, Vol. 8, No. 1, pp. 2-9.
4. FEMA-368 (2001), "NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures. Part 1: Provisions", *FEMA Publication 368*, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
5. Fujita, T. (2005), "State of the art on application of seismic isolation to civil and industrial structures in Japan", *Memorias, 9th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Control of Structures*, Kobe, Japón, CD-ROM, junio, pp. 1-22.
6. Gómez, L. A. A. (2000), "Efectos de torsión en estructuras aisladas sísmicamente en su base", *Tesis de Maestría*, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, septiembre.
7. González, R. y Noguez, F. J. (1994), "Respuesta teórica de un edificio con aislamiento de base", *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 46, pp. 23-52.
8. Jangid, R. S. y Datta, T. K. (1994), "Nonlinear response of torsionally coupled base isolated structure", *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 120, No. 1, pp.1-22.
9. Kelly, J. M. (1993), *Earthquake-resistant design with rubber*, primera edición, Springer-Verlang, Nueva York.
10. MOC-2008 (2009), "Manual de diseño de obras civiles. Diseño por sismo", Instituto de Investigaciones Eléctricas y Comisión Federal de Electricidad, México, noviembre.
11. MagebaUSA (2015), "Seismic reference projects – worldwide", 2015.08 US-EN, Mageba, pp. 1-24.
12. Murià, D. y González, R. (1995), "Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México", *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 51, pp. 25-45.
13. Naeim, F. y Kelly, J. M. (1999), *Design of seismic isolated structures*, primera edición, John Wiley & Sons, Nueva York.
14. Nagarajaiah, S., Reinhorn, A. M. y Constantinou, M. C. (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.
15. Nagarajaiah, S., Reinhorn, A. M. y Constantinou, M. C. (1993), "Torsion in base isolated structures with elastomeric isolation systems", *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 119, No. 10, pp. 2932-2951.

16. NCh2745 (2003), "Normas chilena oficial NCh2745.Of2003 Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica", Instituto Nacional de Normalización (INN), Santiago, Chile, diciembre.
17. NTCEM-2004 (2004), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería", *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, octubre.
18. NTCS-2004 (2004), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo", *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, Tomo II, No. 103-BIS, octubre, pp. 55-77.
19. Seguín, C. E. (2007), "Torsión en sistemas aislados sísmicamente con dispositivos elastoméricos", *Tesis Doctoral*, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.
20. Skinner, R. I., Robinson, W. H. y Mc Verry, G. H. (1993), *An introduction to seismic isolation*, primera edición, John Wiley and Sons, Inglaterra.
21. Tena, A., Gómez, C., Jara, J. M., González, R., Muñoz, A. y Álvarez, J. L. (1995), "Estudio analítico de la respuesta sísmica de edificios con aisladores de base", *Reporte FJBS/CIS-95/09*, Centro de Investigación Sísmica, AC, Fundación Javier Barros Sierra, junio.
22. Tena-Colunga, A. (1996), "Some retrofit options for the seismic upgrading of old low-rise school buildings in Mexico", *Earthquake Spectra*, Vol. 12, No. 4, pp. 883-902, octubre.
23. Tena, A. (1997), "Evaluación de un método de diseño estático para el aislamiento sísmico de estructuras de la costa Mexicana del Pacífico", *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 57, pp. 1-20.
24. Tena, A. (2001), "Diseño de estructuras con aislamiento sísmico mediante el uso de espectros de diseño por capacidad", *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 65, pp. 49-80.
25. Tena, A. (2004), "Propuesta de lineamientos para el diseño por sismo de estructuras con aislamiento de base. Fundamentos", *Reporte de Investigación 449*, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, marzo, ISBN 970-31-0272-7.
26. Tena-Colunga, A. y Zambrana-Rojas, C. (2006), "Dynamic torsional amplifications of base-isolated structures with an eccentric isolation system", *Engineering Structures*, Vol. 28, No. 1, pp. 72-83.
27. Tena-Colunga, A. y Pérez-Osornio, M. A. (2006), "Design displacements for base isolators considering bidirectional seismic effects", *Earthquake Spectra*, Vol. 22, No. 3, pp. 803-825, agosto.
28. Tena-Colunga, A. y Escamilla-Cruz, J. L. (2007), "Torsional amplifications in asymmetric base-isolated structures", *Engineering Structures*, Vol. 29, No. 2, pp. 237-247.
29. Tena-Colunga, A. (2007), "State of the Art and State of the Practice for energy dissipation and seismic isolation of structures in Mexico", *Memorias, 10th World Conference on Seismic Isolation, Energy*

Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Estambul, Turquía, CD-ROM, mayo.

30. Tena-Colunga, A., Mena-Hernández, U., Pérez-Rocha, L. E., Avilés, J., Ordaz, M. y Vilar, J. I. (2009), "Updated seismic design guidelines for buildings of a model code of Mexico", *Earthquake Spectra*, Vol. 25, No. 4, pp. 869-898, noviembre, doi: 10.1193/1.3240413.
31. Tena, A., Cano, J., López, A. y Pérez, M. A. (2010), "Revisión y actualización del método simplificado de análisis de estructuras de mampostería de los reglamentos de diseño sísmico de México", *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 82, pp. 1-33.
32. Tena-Colunga, A. (2013), "Seismic design of base-isolated buildings in Mexico. Part 1: Guidelines of a model code", *The Open Civil Engineering Journal*, Vol. 7, pp. 17-31.
33. Tena, A., Pérez, L. E., Avilés, J. y Cordero, C. (2014), "Estudio de la factibilidad de aislamiento sísmico pendular para subestaciones encapsuladas ubicadas en terrenos blandos del valle de México", *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, Vol. 14, No 1-2, pp. 5-37.
34. Tena-Colunga, A., Pérez-Rocha, L. E., Avilés, J. y Cordero-Macias, C. (2015), "Seismic isolation of buildings for power stations considering soil-structure interaction effects", *Journal of Building Engineering*, Vol. 4, pp. 21-40.
35. Tena, A. (2016), "Manual de diseño de obras civiles. Sección C: Estructuras, Tema 3: Monitoreo y Control de Respuestas Estructurales, Capítulo 2: Diseño de estructuras con aislamiento de base", Comisión Federal de Electricidad e Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
36. UBC-97 (1997), "Uniform Building Code, 1997 edition", *International Conference of Building Officials*, Whittier, California, Vol. 2.