

Análisis sísmico de gradas con tres modelos mediante los métodos: espectral y del espectro de capacidad, que sirven de acceso a una estructura con aisladores sísmicos

Seismic analysis of stairs with three models using the spectral and the capacity spectrum methods, give access to a building with seismic isolators

R. Aguiar ^{1*}, D. Mora **, D. Muñoz ***, S. Serrano ***, D. Vera ***, M. Rodríguez *, D. Páez ***

* Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, Quito. ECUADOR

** Escuela Politécnica Nacional, Quito. ECUADOR

*** Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Manta. ECUADOR

Fecha de Recepción: 26/01/2017

Fecha de Aceptación: 22/09/2017

PAG 113-130

Abstract

At the Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, in Ecuador, different structural blocks with and without seismic isolators of triple friction pendulum are being built. In one of them, the access stairs to the floors is located in a Structural Block with no seismic isolators; therefore, it has special construction details to allow a free displacement of the Isolators' Building without impacting the Stairs' Building at all. This paper addresses these details. On the other hand, three models (each with different degrees of freedom) for seismic analyses of a longitudinal frame and a transversal frame are shown. The results were obtained and compared using the Spectral Method and the Capacity Spectrum Method. Moreover, these results highlight the importance of appropriately selecting the numerical calculation model. Later on, the seismic analysis of the Structural Block of the Access Stairs is shown, using a three-phase constitutive model.

Keywords: Spectral Method; Capacity Spectrum Method; Seismic Isolators; Access Stairs.

Resumen

En la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE de Ecuador, se están construyendo algunos Bloques Estructurales con aisladores sísmicos de triple péndulo de fricción. En uno de ellos, las gradas de acceso a los diferentes pisos se encuentran en un Bloque Estructural sin aisladores sísmicos, por lo que tiene detalles especiales en su construcción para permitir el libre desplazamiento de los aisladores sin posibilidad de impacto con el Bloque de Gradas. En este artículo se indican esos detalles. Por otra parte, se presentan tres modelos con diferentes grados de libertad para el análisis sísmico de un pórtico en sentido longitudinal y de un pórtico en sentido transversal de la grada; se compara sus respuestas empleando el Método Espectral y el Método del Espectro de Capacidad. Destacando con ello la importancia de seleccionar en forma apropiada el modelo numérico de cálculo. Posteriormente se presenta el análisis sísmico del Bloque Estructural al que dan acceso las gradas, utilizando como constitutiva un modelo de tres fases.

Palabras clave: Método espectral, método del espectro de capacidad, aisladores sísmicos, gradas de acceso

1. Introducción

La Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, ubicada en el Valle de los Chillos, en la mitad del mundo, se encuentra construyendo ocho bloques estructurales, donde funcionarán los Centros de Investigación y de Post Grado. Los Bloques Estructurales 1, 2, 3, 6, 7 y 8 tienen aisladores sísmicos de triple péndulo de fricción (FPT) y los Bloques 4 y 5 tienen disipadores de energía Shear Link; ver figura 1 en que se presenta una panorámica de los bloques estructurales mencionados que en total tienen un área de construcción de aproximadamente 23500 metros cuadrados.

Las gradas de emergencia fueron construidas, con una estructura de acero, empleando columnas tubulares cuadradas de 250/250/20 mm y vigas "I" de 400/200/15/12 mm, en Bloques Estructurales sin aisladores sísmicos, que contiene adicionalmente a la estructura del ascensor. En la figura 1 se aprecia en un círculo las gradas de emergencia que se analizan en este artículo y son los accesos a los Bloques Estructurales 1 y 7.

En la Figura 2 a) se presenta el bloque de la estructura sin aisladores, que contiene a la grada y ascensor; posteriormente se realizará el análisis sísmico del pórtico J (sentido longitudinal) y del pórtico 7' (sentido transversal).

Ahora, en la Figura 2 b) se muestra el desarrollo de la grada y se aprecia que para subir de un piso a otro piso se tienen tres tramos inclinados y dos descansos entre los ejes $J - J''$. El ascensor se encuentra entre los ejes $J' - J'''$ y los ejes $7a - 7b$. En la parte posterior del ascensor (ejes $J - J'$) y al lado derecho (ejes $7b - 6a$) se tiene una habitación.

El ingreso a uno de los Bloques Estructurales con aisladores, por ejemplo al Bloque 7 se da a partir del eje I. El

¹ Autor de correspondencia:

Profesor Titular, Dep. de Ciencias de la Tierra y la Construcción.

E-mail: rraguiar@espe.edu.ec



problema que se debe resolver es como construir la unión entre el Bloque Estructural 7 que tiene aisladores FPT, que va a desplazarse lateralmente una cantidad considerable (GAP de 60 cm) y el Bloque de Escalera indicado en la Figura 2.

La solución que se ha dado para evitar el impacto de estas dos estructuras durante un sismo se presenta en la figura 3 a) para la grada y en la 3 b) para el ascensor. En la grada se aprecia que el último peldaño es el voladizo del Bloque Estructural 7; los peldaños, que dicho sea de paso son de acero llegan hasta 7 cm, menos de la losa del Bloque 7 para que puedan moverse independientemente sin impacto. En la parte superior de un piso el primer peldaño también se halla

a 7 cm de la losa, ver figura 4. Lo importante es notar que la grada se mueve independientemente del Bloque Aislado para que no se impacten por este motivo en la cubierta se tienen dos losas a diferente altura.

En la figura 3 b) se muestra el acceso que se tiene desde el ascensor al Bloque con aisladores, se observa que existe una viga en voladizo que se encuentra a un nivel más bajo que la estructura aislada, sobre la viga existe un relleno de espuma flex cuyo objetivo es que la gente cuando salga del ascensor camine a un solo nivel; se tiene previsto que durante un sismo el relleno se rompa y el Bloque aislado pueda desplazarse completamente. Evidentemente, posterior al sismo se volverá a colocar la espuma flex, de ser necesario.

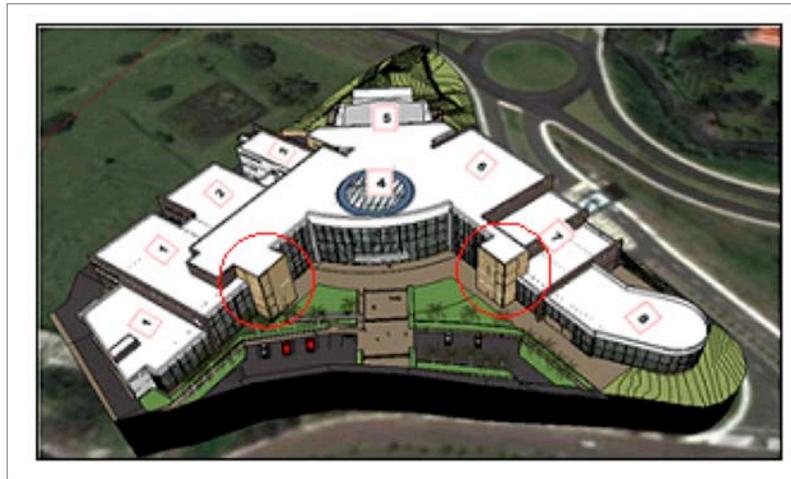


Figura 1. Panorámica de los Bloques Estructurales donde funcionarán los Centros de Investigación y de Post Grados de la UFA-ESPE

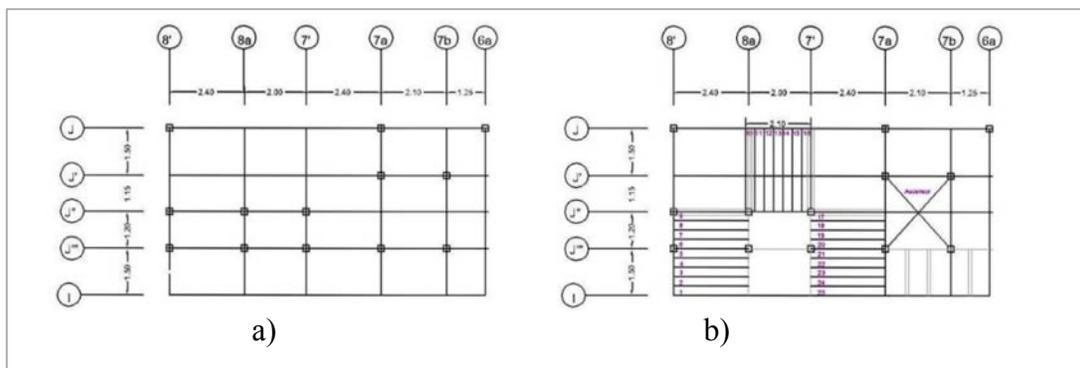


Figura 2. Planta del Bloque Estructural sin aisladores: a) Implantación de columnas; b) Desarrollo de escalera

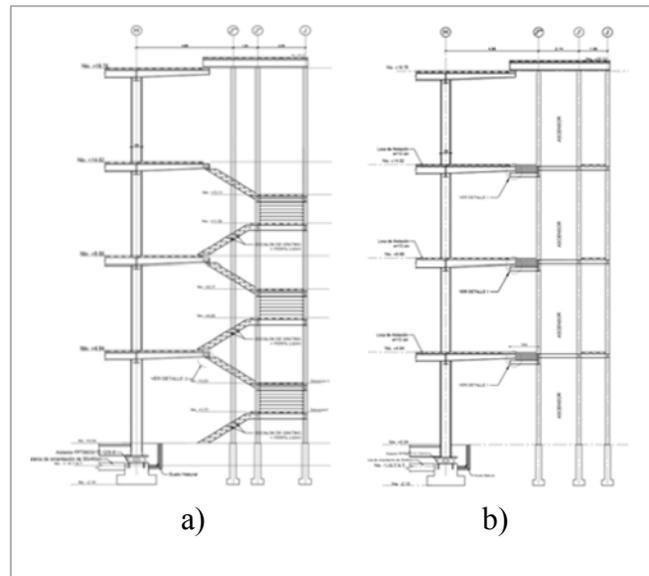


Figura 3. Detalle del Ingreso al Bloque Estructural 7 que tiene aisladores sísmicos: a) Acceso por grada; b) Acceso por ascensor. Fuente: Aguiar y Pazmiño (2016)

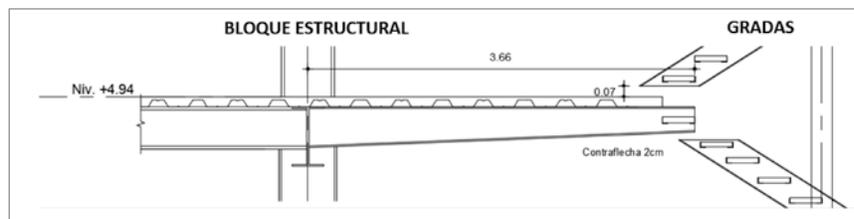


Figura 4. Detalle de la construcción de los peldaños que llegan o salen de Bloque Estructural con aisladores

2. Modelos numéricos de análisis de Pórtico Longitudinal

Aparentemente una grada es una estructura muy sencilla, que algunas veces ni siquiera se realiza el análisis sísmico o se lo realiza con modelos extremadamente elementales, que no reportan resultados adecuados. Por lo que se decidió, realizar el análisis sísmico de la grada del Bloque de Acceso al Bloque Estructural 7.

Se realiza un análisis sísmico plano, de un pórtico en sentido longitudinal, el "J" y de un pórtico en sentido transversal el 7'. En éste apartado se describe al Pórtico "J", para ello en la figura 5 a) se indica la geometría del pórtico y en la 6 a) y 7 a) se presentan dos aproximaciones de cálculo, que se las realiza en la práctica para simplificar el análisis para no trabajar con elementos inclinados pero como ser vera conduce a resultados diferentes.

En la Figura 5 b) se presentan los grados de libertad del modelo asociado a la figura 5 a) tiene 10 coordenadas laterales y en total 55 grados de libertad. Por lo tanto se calculará la matriz de rigidez por ensamblaje directo de 55 por 55 y para el análisis sísmico se condensa a una matriz de 10 por 10. (Modelo M10)

Para el análisis con modelo simplificado de figura 6 a) en la figura 6 b) se observa que se tiene 7 coordenadas laterales y 40 grados de libertad, con lo que la matriz de rigidez lateral, asociada a las coordenadas laterales es de 7 por 7. (Modelo M7)

Finalmente, el tercer modelo se presenta en la Figura 7 a) que tiene 4 coordenadas laterales y 31 grados de libertad, ver Figura 7 b), (Modelo M4)



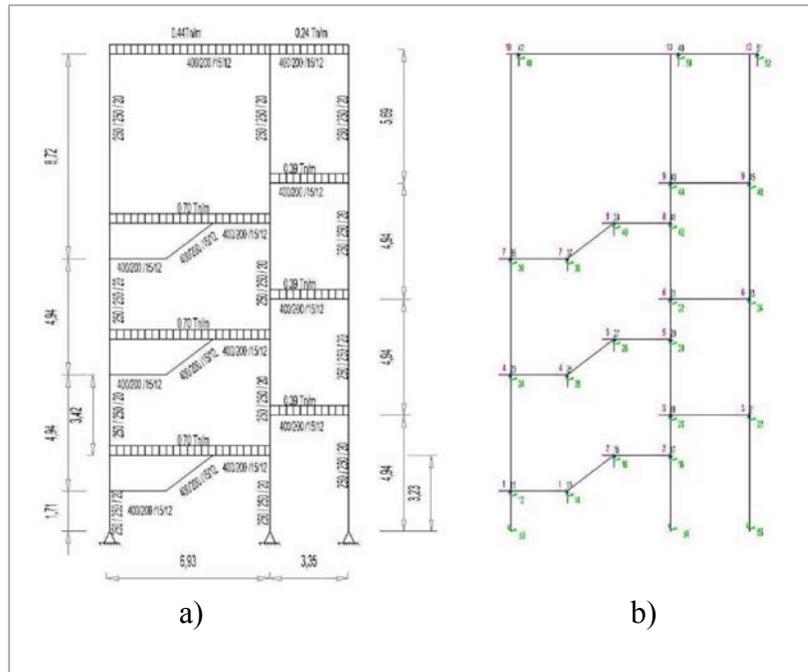


Figura 5. a) Geometría y cargas de Pórtico J, b) Modelo con 10 coordenadas principales

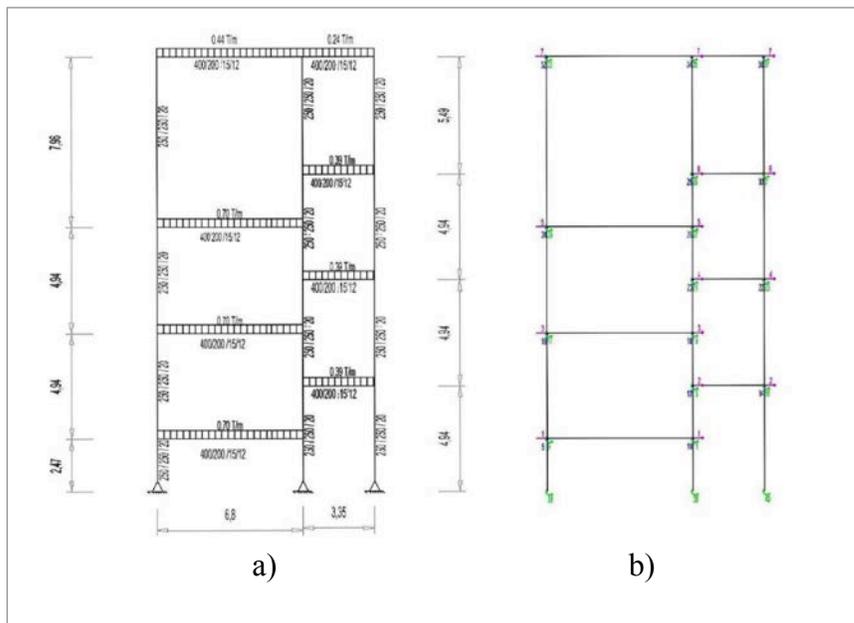


Figura 6. a) Geometría y cargas de Pórtico J, b) Modelo con 7 coordenadas principales

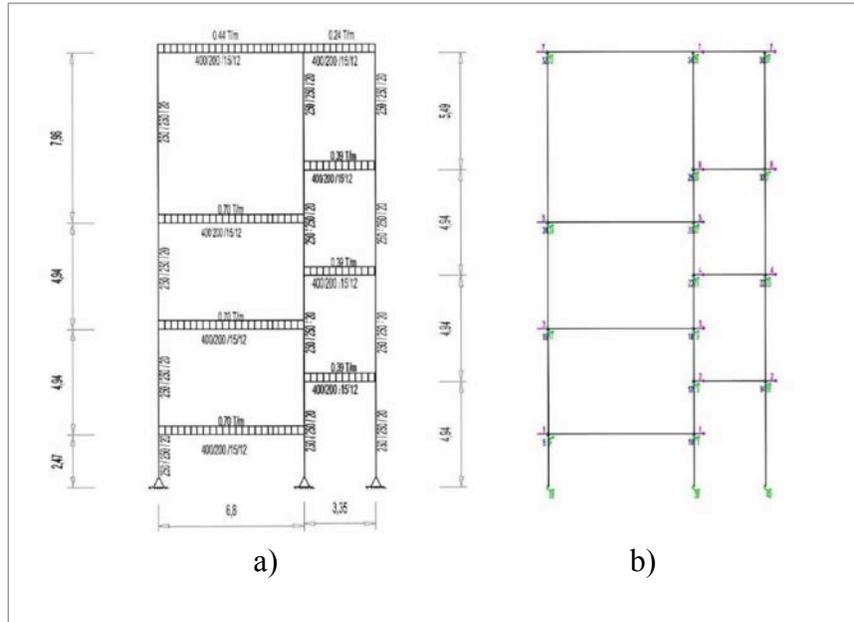


Figura 7. a) Geometría y cargas de Pórtico J, b) Modelo con 4 coordenadas principales

En el Anexo A, se presenta el marco teórico del Método Espectral. El sismo de análisis en los dos casos es el recomendado por la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-15 para una zona sísmica cuyo PGA es $0.4 g$, y el suelo es tipo C.

3. Resultados con el Método Espectral

En la Tabla 1 se presenta, el modelo de análisis; el período fundamental de vibración T , el desplazamiento lateral máximo q , la deriva de piso γ , y el cortante basal V_0 , encontrados en el Pórtico J, empleando el Método Espectral,

con un factor de reducción de las fuerzas sísmicas $R = 4$. Se aprecia que modelo con 10 grados de libertad M10 reporta el menor período, lo propio sucede y con el desplazamiento lateral. La menor deriva de piso se halla con el modelo M7 y el menor cortante con modelo M4.

En la Figura 8 a) se presenta los desplazamientos laterales con cada uno de los modelos y en la 8 b) las derivas de piso. El modelo más simple es el M4 pero este no debe utilizarse porque reporta valores muy altos y además difiere de la geometría de la grada. Se puede trabajar con el modelo M7 pero lo mejor es hacerlo con el M10.

Tabla 1. Resultados del análisis sísmico del Pórtico J. Método Espectral

Modelo	T (s.)	q (cm)	γ (%)	V_0 (T.)
M10	0.483	9.57	1.5	5.36
M7	0.542	12.32	1.3	5.64
M4	0.806	16.13	1.9	4.46



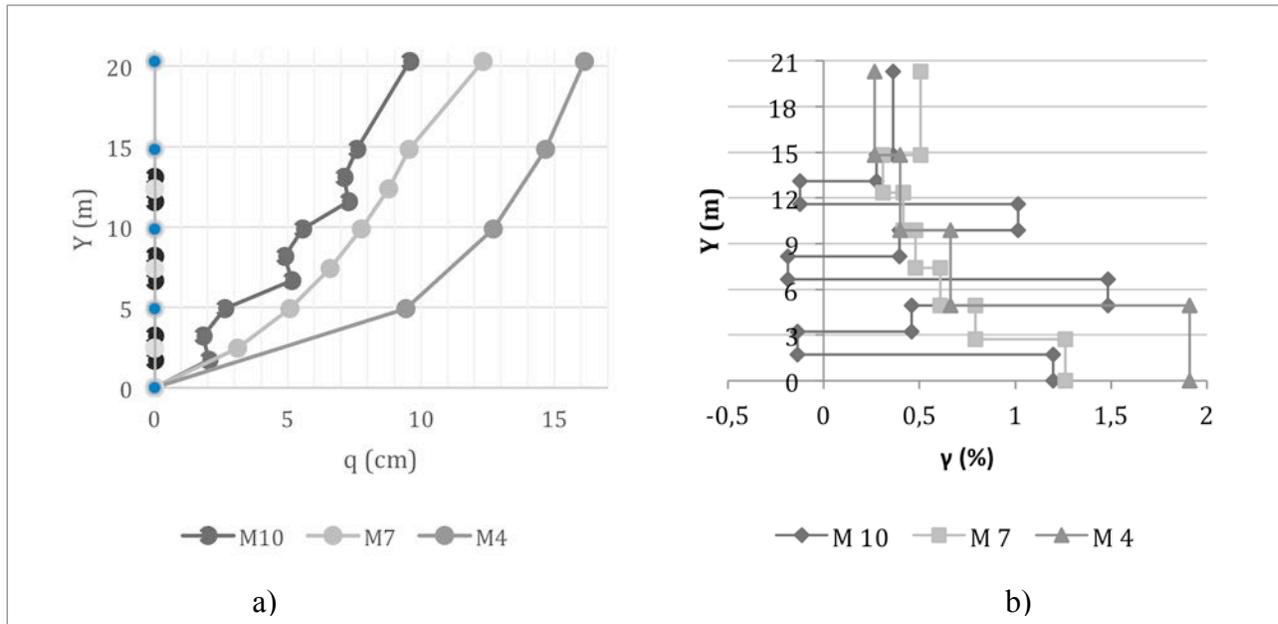


Figura 8. a) Desplazamientos laterales b) Derivas de piso, del Pórtico J.

4. Resultados con Método del Espectro de Capacidad

Se obtuvo la curva de capacidad sísmica resistente que relaciona el cortante basal con el desplazamiento en el tope mediante un pushover monotónico (gráficos que se encuentran a la izquierda de la figura 9); luego se halló el punto de desempeño para el efecto en la parte central de la figura 9, se presenta el espectro de capacidad de la estructura (línea verde) el espectro de demanda del NEC-15 (línea roja) y el punto con el cual se halla el punto de demanda (línea azul) que se halla al aplicar el Método del Espectro de Capacidad descrito en el Anexo B.

Por último los gráficos que se hallan a la derecha de la Figura 9, corresponden al nivel de daño que va a sufrir la estructura, durante el sismo, el color verde significa que la sección superó el momento de fluencia M_f e ingresó al rango no lineal. En otras estructuras puede presentarse también un color rojo que significa que se formó una rótula plástica en la sección, que no se dio en la estructura en estudio.

La Figura 9 a) corresponde al análisis con el modelo de 10 grados de libertad M10, se aprecia que la estructura trabaja elásticamente, puesto que no se observa ningún color en el gráfico que se encuentra a la derecha.

La Figura 9 b) corresponde al modelo M7, en que se analiza con 7 grados de libertad y tampoco la estructura sufre daño. Finalmente, en la Figura 9 c) se tiene el desempeño con el modelo M4, en este caso existen dos secciones que han superado el momento de fluencia y son la columna central en la parte superior y la viga que se encuentra a la derecha del primer piso; esto se debe a que el modelo M4 reporta grandes desplazamientos.

En la Tabla 2 se presentan los resultados que se hallan con el Método del Espectro de Capacidad en el Pórtico J, se indica el modelo de análisis, el desplazamiento correspondiente al punto de demanda (q) y la aceleración asociada (A), el desplazamiento en el tope de la estructura (q_T), la deriva de piso γ y el cortante basal (V_0). Los desplazamientos y derivas de piso halladas son parecidas a las que se encontró con el Método Espectral y se hallan en la Tabla 1. El cortante basal si es diferente y es debido a que el cortante de la Tabla 1, se halla dividido para $R = 4$, en el Método Espectral, ahora se tiene un cortante basal elástico.

Tabla 2. Resultados del análisis sísmico del Pórtico J. Método Espectro de Capacidad

Modelo	q (m) 1gdl	A ($\frac{m}{s^2}$)	q_r (m)	γ (%)	V_0 (T)
M10	0.075	11.033	0.105	1.739	23.93
M7	0.103	11.565	0.134	1.762	24.06
M4	0.153	9.259	0.179	2.271	20.12

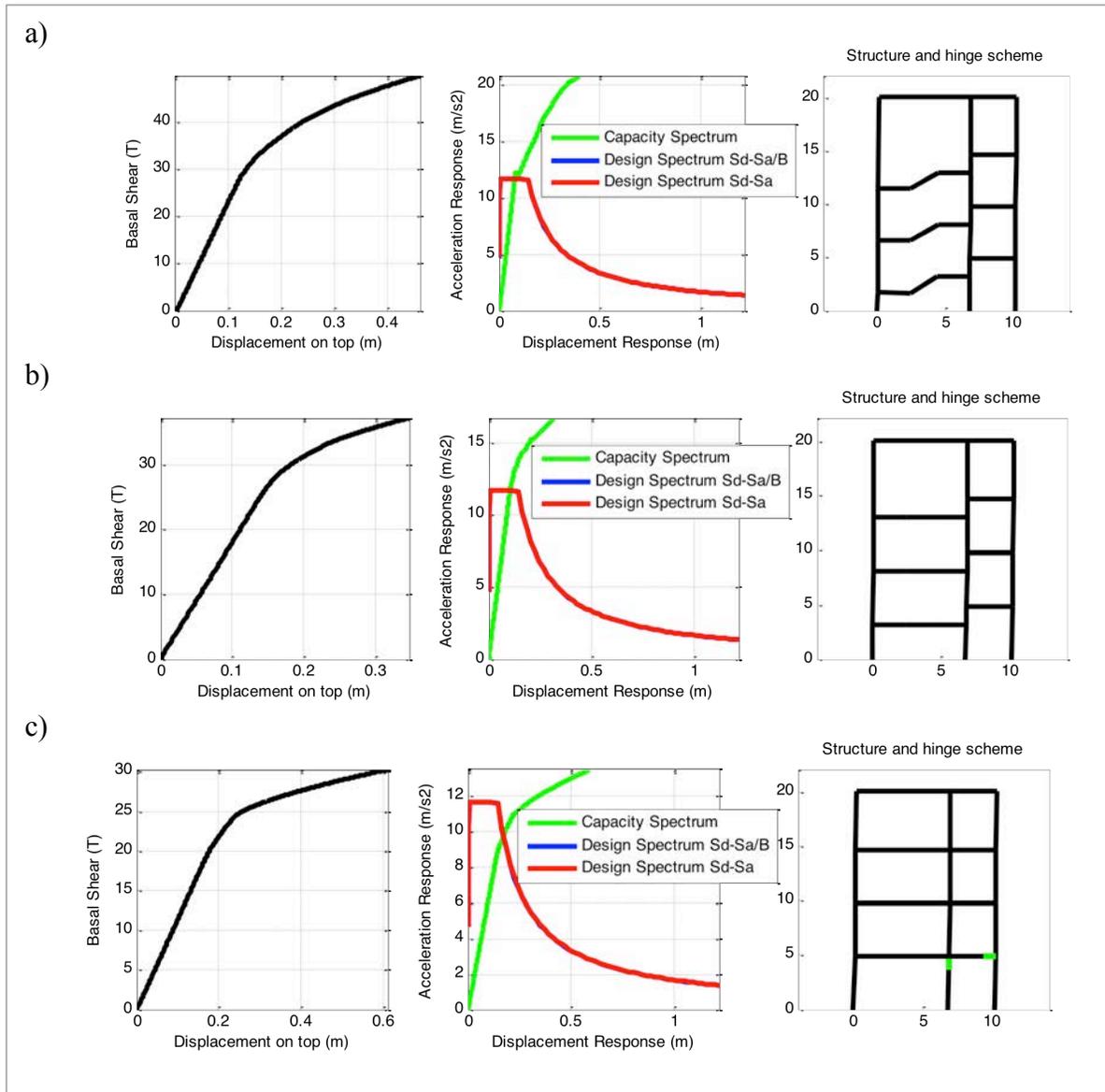


Figura 9. Capacidad sísmica resistente, Método del Espectro de Capacidad y zonas de daño en Pórtico J, a) Modelo M10, b) Modelo M7, c) Modelo M4



5. Modelo numérico de análisis de Pórtico en sentido transversal

En las Figuras 10 a 12, se presenta la geometría, cargas, secciones de los elementos para el Pórtico 7' y los modelos de análisis denominados: M10, M7 y M4, para

cuando se realiza el análisis sísmico considerando 10, 7 y 4 grados de libertad, respectivamente, ante el sismo DBE.

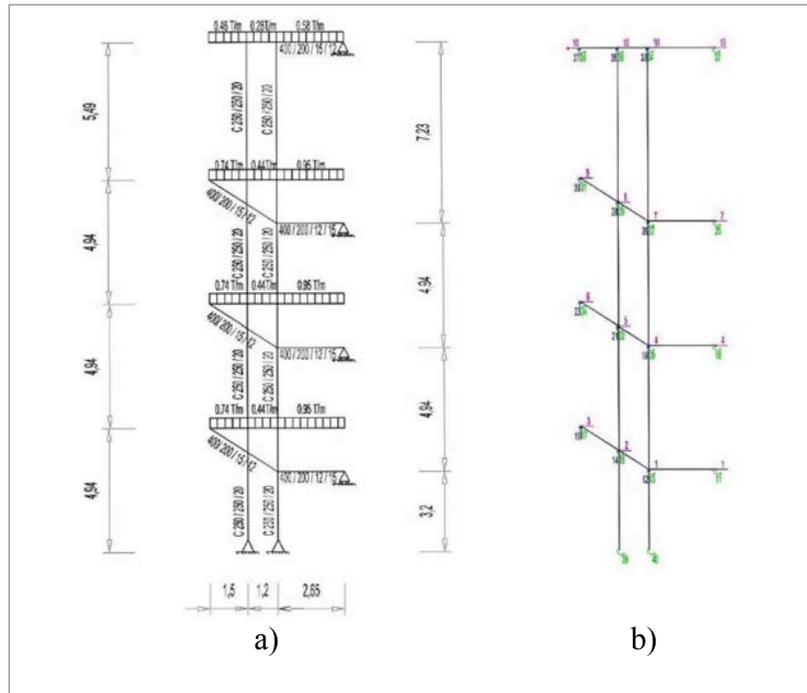


Figura 10. Pórtico 7'; a) Geometría y cargas; b) Modelo de 10 Grados de libertad

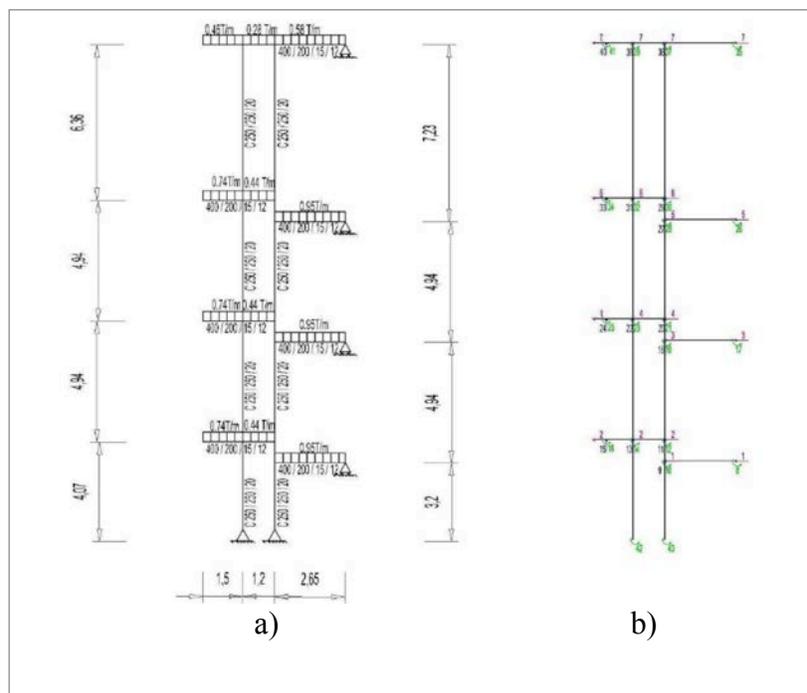


Figura 11. Pórtico 7'; a) Geometría y cargas; b) Modelo de 7 Grados de libertad

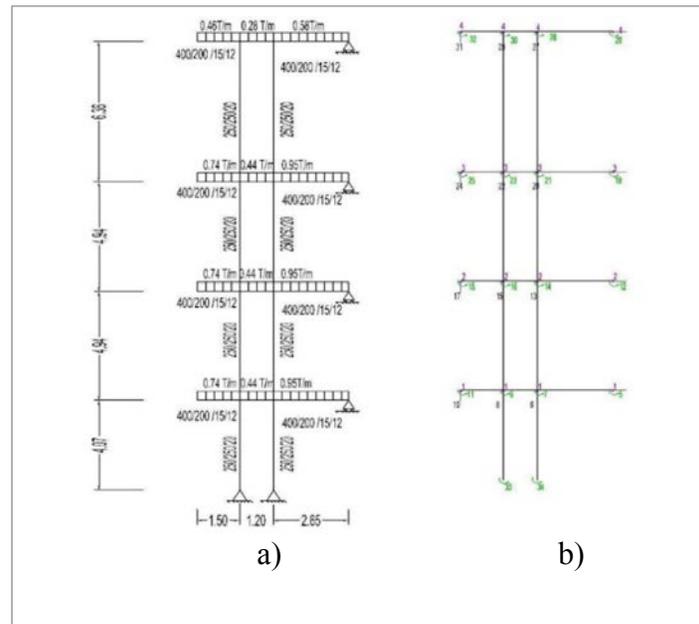


Figura 12. Pórtico 7'; a) Geometría y cargas; b) Modelo de 4 Grados de libertad

Los resultados del análisis sísmico del Pórtico 7', se indican en la Tabla 3. Nuevamente los resultados del modelo M4, son diferentes con relación a los otros modelos y lo mejor es trabajar con el modelo M10.

En la Figura 13 se presentan los desplazamientos y derivas de piso, encontrados con los tres modelos: M10, M7 y M4 para el pórtico 7'.

Tabla 3. Resultados del análisis sísmico del Pórtico 7'

Modelo	T (s)	q (cm)	γ (%)	V_0 (T)
M10	0.597	14.00	1.30	3.66
M7	0.579	13.46	1.48	3.96
M4	0.652	14.51	1.48	3.53

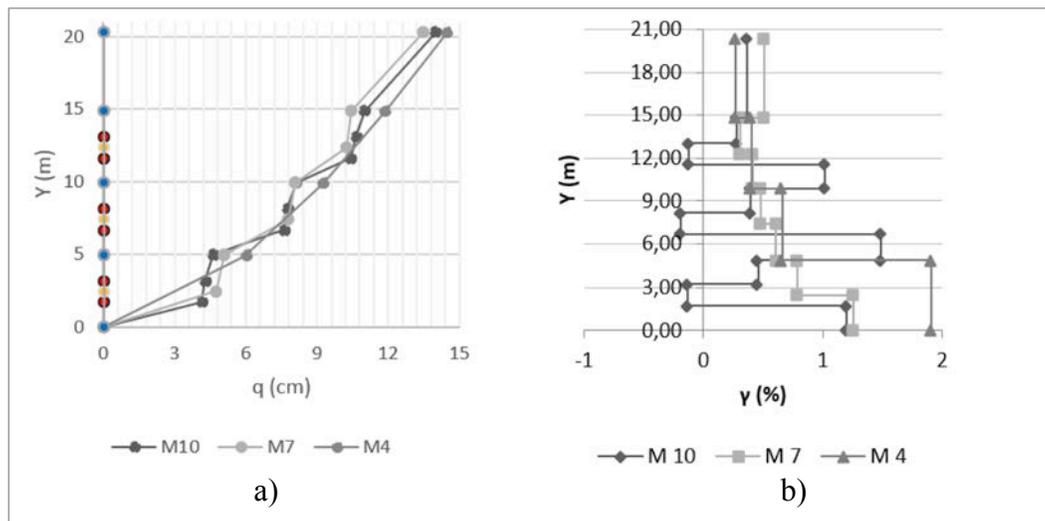


Figura 13. a) Desplazamientos laterales b) Derivas de piso, del Pórtico 7'



6. Resultados con Método del Espectro de Capacidad

De igual manera el modelo M4 no es confiable. Nótese que en el modelo M10 el nudo final de una columna del primer piso ingresa al rango no lineal (color verde).

Los resultados que se tienen al aplicar el Método del Espectro de Capacidad en el Pórtico 7', con los tres modelos: M10, M7 y M4 se indican en la Figura 14 y sus valores máximos se presentan en la Tabla 4.

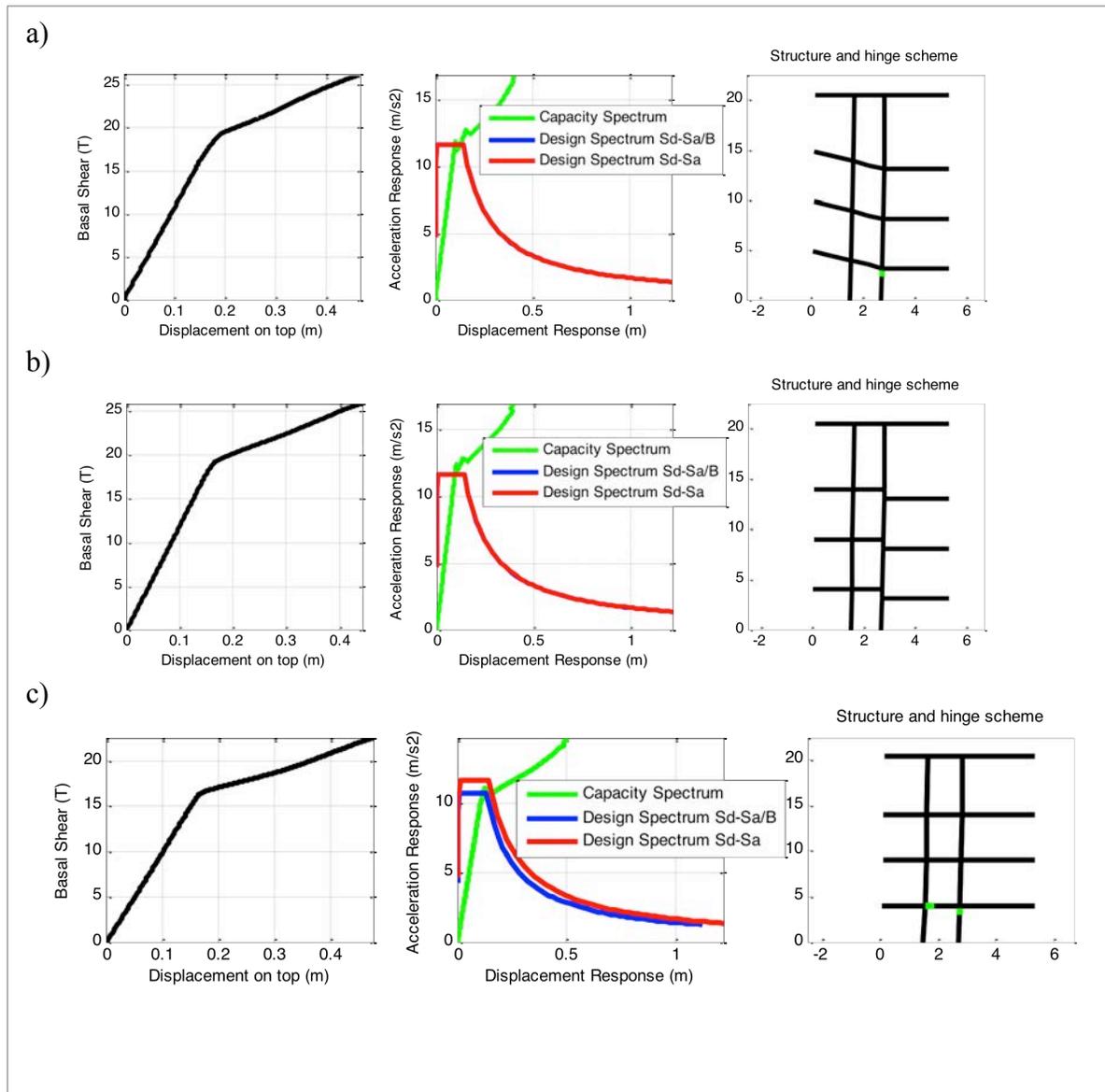


Figura 14. Capacidad sísmica resistente, Método del Espectro de Capacidad y zonas de daño en Pórtico 7', a) Modelo M10, b) Modelo M7, c) Modelo M4

Tabla 4. Resultados del análisis sísmico del Pórtico 7'

Modelo	q (m) 1gdl	A ($\frac{m}{s^2}$)	q_r (m)	γ (%)	V_0 (T)
M10	0.114	11.238	0.153	1.507	16.41
M7	0.092	11.18	0.129	1.417	15.34
M4	0.127	11.089	0.162	1.709	15.99

Nuevamente los resultados que reporta el Método del Espectro de Capacidad son bastante parecidos a los que reporta el Método Espectral a nivel de desplazamientos lateral y derivas de piso. Para comparar los cortantes se debe multiplicar por $R = 4$, los valores que reporta el Método Espectral.

7. Análisis sísmico de bloque estructural con aisladores

El Bloque de Gradas, que se ha analizado sirve de acceso al Bloque Estructural 6-7 por el lado del voladizo de 3.51 m, que se encuentra en el eje W de la figura 15; el ingreso se produce entre los ejes 39 y 41. Los vanos 32-33 y 33-36 tienen un subsuelo, por lo que inicialmente se pensó construir este sector independiente del resto de vanos. Estos dos vanos conformaban el Bloque 6 y los restantes el Bloque 7.

Si la estructura no tendría aisladores se debía construir el Bloque 6 y el Bloque 7 con una junta de construcción debido a que el Bloque 7 es irregular en elevación. Pero al

tener aisladores sísmicos, en este caso de triple péndulo de fricción FPT, lo mejor es construir sin junta ya que por una parte se elimina el eje de columnas con sus respectivos aisladores que se deben colocar en la junta; por otra parte se evita usar tuberías especiales para pasar las instalaciones de un bloque a otro bloque; finalmente con junta de construcción se debe arreglar el problema que se origina en la fachada al tener una separación que está alrededor de un metro, todo esto cuando se colocan aisladores y se construyen dos bloques independientes.

Por lo tanto lo mejor es tener un solo Bloque Estructural que se ha denominado 6-7, en el cual los aisladores FPT se han colocado sobre las columnas de hormigón armado de 80/80 cm, en el lado del subsuelo y sobre los pedestales de 120/120 cm, que salen de los plintos en los ejes 39, 41 y 43; los aisladores tienen una longitud que está alrededor de un metro por lo que sobre las columnas de 80/80 cm, se construyó una canastilla de 120/120 cm, como se observa a la izquierda de la figura 16 y en esa gráfica a la derecha se observa los aisladores para los tres ejes antes indicados.

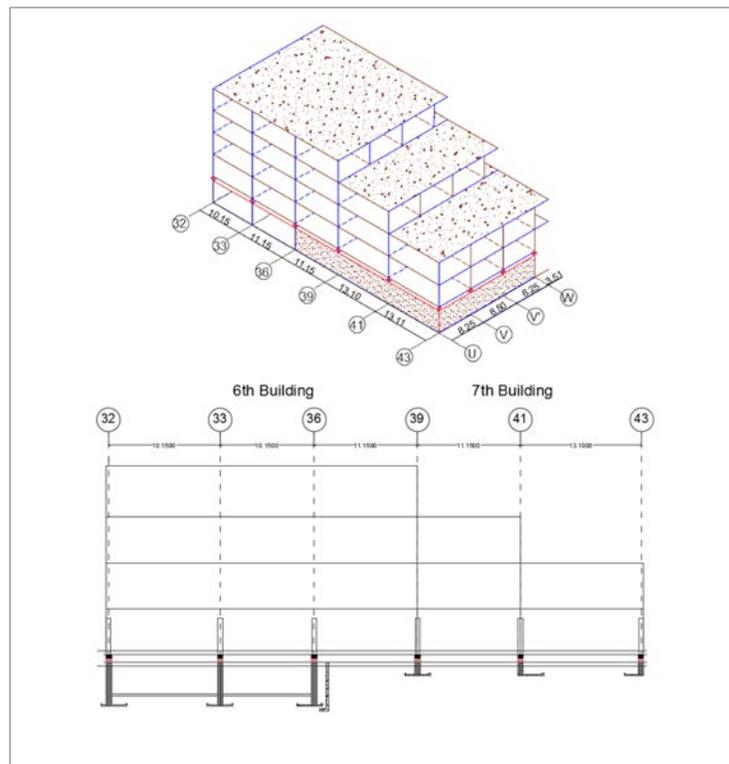


Figura 15. Bloque Estructural 6-7 con aisladores FPT al que llegan las gradas en el vano 39-41 por el lado del voladizo de 3.51 m. Fuente: Aguiar y Pazmiño (2016)



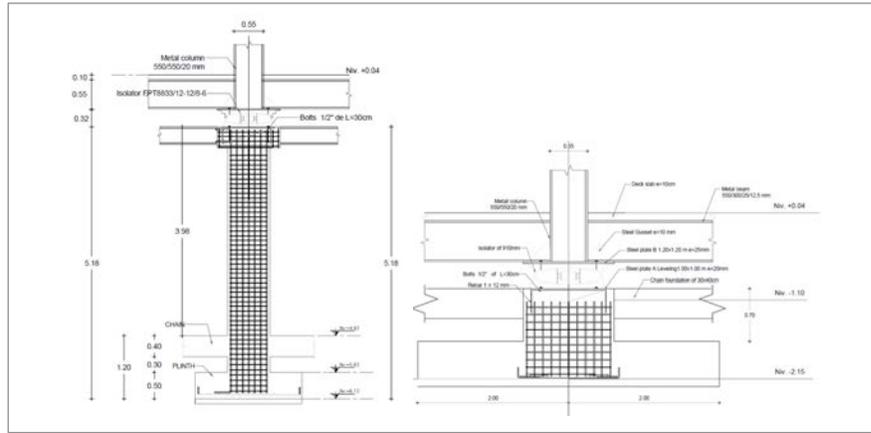


Figura 16. Aislador FPT sobre columnas de hormigón y sobre pedestal en el Bloque 6-7. Fuente: Aguiar y Pazmiño (2016)

En el anexo C, se presenta el marco teórico del modelo de 3 fases propuesto por Mc Vitty y Constantinou (2015) para las curvas constitutivas fuerza-desplazamiento de los aisladores, que fue el que se utilizó para el análisis sísmico por el Método Espectral. En la figura 17 se indican los desplazamientos encontrados en dirección X y en dirección Y, para los sismos de diseño DBE (se obtiene con la NEC-15, para un período de retorno de 475 años) y el sismo máximo considerado MCE (se halla multiplicando el DBE por 1.4 y tiene un período de recurrencia de 1000 años, Constantinou *et al.* 2016).

Los desplazamientos en sentido Y son en dirección a los ejes 8', 7', 7 a y 6 a, de la grada de acceso. Se aprecia que ante el sismo MCE se esperan desplazamientos laterales

máximos en el bloque aislado que están alrededor de los 47 cm.

En la Figura 17 también se ha presentado los desplazamientos laterales que se producen al considerar la estructura no aislada y aparentemente se desplazan casi lo mismo o hasta un poco menos pero existe una gran diferencia y es que en la estructura con aisladores, es el aislador el que más se desplaza (línea horizontal) y la estructura que está encima se desplaza muy poco, con respecto al desplazamiento de los aisladores.

De tal manera que la estructura sin aisladores al tener grandes desplazamientos, sufre daño, lo que no sucede con la estructura con aisladores en que se tiene desplazamientos relativos pequeños.

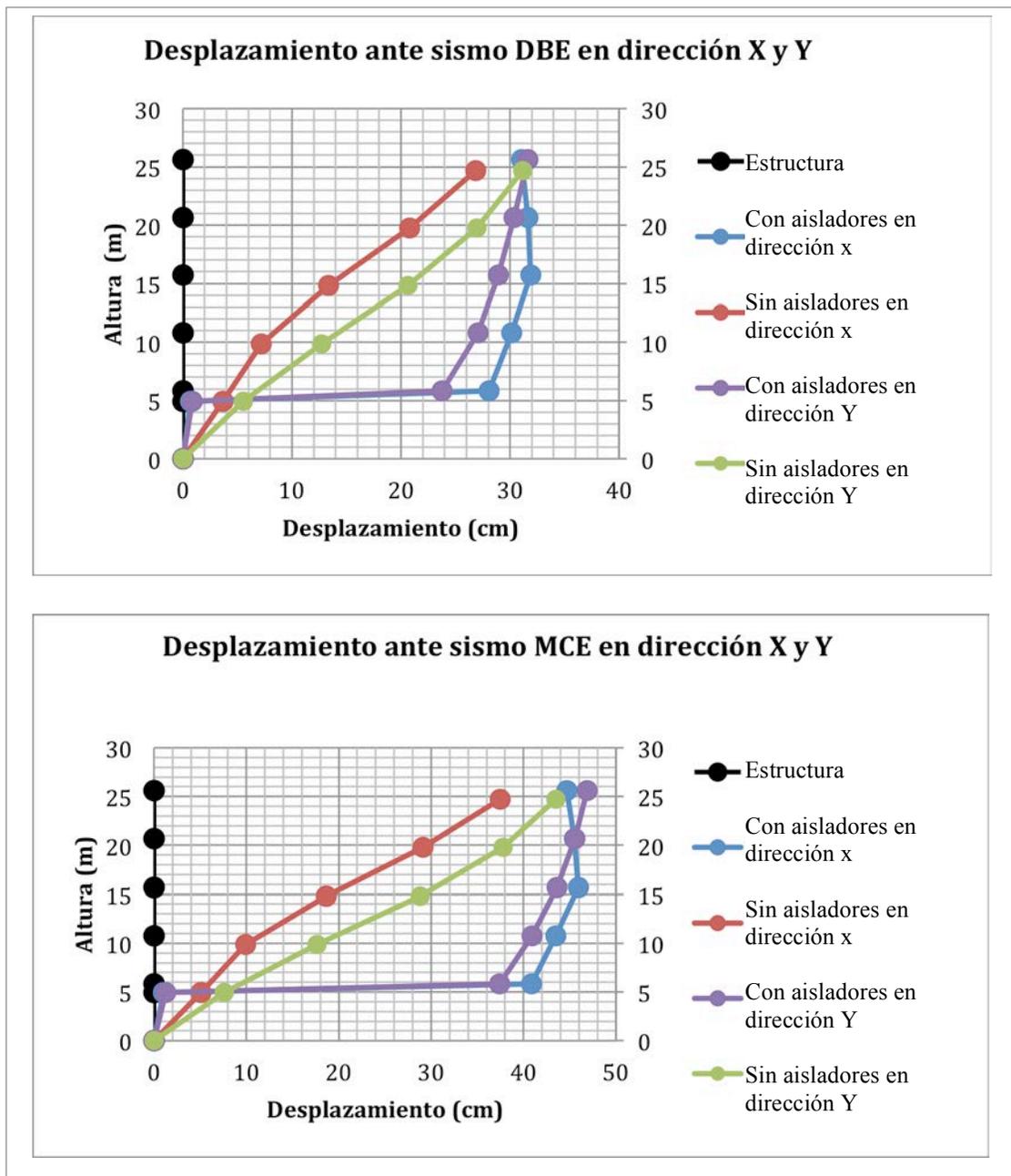


Figura 17. Desplazamientos laterales en Bloque Estructural con aisladores, ante sismo DBE y MCE en dos direcciones.
Fuente: Aguiar et al. 2016

8. Comentarios y Conclusiones

Se ha presentado el análisis sísmico de una grada de 4 pisos, diseñada sin aisladores sísmicos y que sirve de acceso a un bloque estructural con aisladores sísmicos de triple péndulo de fricción. El análisis se lo ha realizado con tres modelos que consideran 10 grados de libertad (M10), 7 grados de libertad (M7) y 4 grados de libertad (M4); encontrando que este último modelo, es el más simple no reporta resultados que puedan considerarse confiables.

El análisis sísmico se lo realizó, empleando el Método Espectral y empleando el Método del Espectro de Capacidad, encontrando que los resultados encontrados por los dos métodos son muy parecidos. En la práctica profesional se utiliza el Método Espectral por su sencillez en cambio el Método del Espectro de Capacidad es más elaborado pero presenta como van a quedar los elementos estructurales luego del sismo, si sufrieron o no daño.



Finalmente se presentó los resultados que se obtuvieron del análisis sísmico del Bloque Estructural con aisladores, al que dan acceso las gradas, se lo hizo considerando el modelo constitutivo de los aisladores, de Mc Vitty y Constantinou (2015). Se realizó un análisis espacial en coordenadas de piso por el Método Espectral ante los sismos DBE y MCE, y se encontró que se esperan desplazamientos máximos que están alrededor de los 47 cm, destacando que son los aisladores los que más se van a desplazar, alrededor de 40 cm. Por lo tanto los desplazamientos relativos de la estructura con respecto a los aisladores están alrededor de los 7 cm, que significa que no van a tener daño.

Al tener grandes desplazamientos en la estructura aislada, se procuró que el Bloque Estructural de las gradas, que es de acero, sea una estructura rígida, sin embargo de ello se tienen desplazamientos que están alrededor de los 15 cm, por lo que se tomaron precauciones constructivas en el acceso del Bloque de Gradas y Ascensor al Bloque con Aisladores sísmicos, las mismas que han sido presentadas en este artículo.

Se aspira a que todas estas experiencias, de análisis estructural y de construcción sean de beneficio para quienes están trabajando en el diseño de edificios con aisladores sísmicos.

9. Anexo A: Procedimiento de análisis con método espectral

1. Se numeran los grados de libertad en forma apropiada, agrupando las coordenadas principales y las coordenadas secundarias. Luego se encuentra la matriz de rigidez de la estructura por ensamblaje directo. (Lamar y Fortoul, 2007)

$$K = \begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde K es la matriz de rigidez de la estructura, la misma que se particiona, de acuerdo al número de coordenadas principales en las submatrices $K_{aa}(na, na)$; $K_{ab}(na, nb)$; $K_{ba} = K_{ab}^t$; $K_{bb}(nb, nb)$. Donde na, nb , es el número de coordenadas principales y secundarias.

2. Se determina la matriz de rigidez asociada a las coordenadas laterales K_L para ello se tiene tres opciones, la primera invertir una matriz (ecuación 2), la segunda resolver ecuaciones lineales (ecuaciones 3 y 4) y la tercera mediante la triangularización de Gauss (ecuación 5), para este último caso las coordenadas principales se numeran al final.

$$K_L = K_{aa} - K_{ab} (K_{bb})^{-1} K_{ba} \quad (2)$$

$$K_L = K_{aa} + K_{ab} T \quad (3)$$

$$K_{bb} T = -K_{ba} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ Q_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & -T \\ 0 & K_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \end{bmatrix} \quad (5)$$

Donde q_a , q_b , son los vectores que contienen a los desplazamientos y giros (coordenadas generalizadas). El

sistema de ecuaciones lineales a resolver está definido en la ecuación (4). En la ecuación matricial (5) se indica la forma como queda la matriz de rigidez luego de la triangularización para hallar la matriz de rigidez lateral.

3. Para el caso plano, la matriz de masas M es diagonal y está compuesta por las masas totales de cada uno de los pisos.
4. Se resuelve el problema de valores y vectores propios.

$$(K_L - \lambda M) \phi = 0 \quad (6)$$

Donde λ son los valores propios con los que se halla las frecuencias de vibración W_n y los períodos T , en cada modo de vibración ϕ .

$$W_{ni} = \sqrt{\lambda_i} \quad T_i = \frac{2\pi}{W_{ni}} \quad (7)$$

5. Con cada período en el espectro inelástico se halla la aceleración espectral A_{di} . En la estructura de la grada se trabajó con un factor de reducción $R = 4$.
6. Se determinan los factores de participación modal Γ en cada modo.

$$\Gamma_i = \left| \frac{\phi^{(i)t} M b}{\phi^{(i)t} M \phi^{(i)}} \right| \quad (8)$$

Donde b es el vector de incidencia del movimiento del suelo en los grados de libertad. Para el caso plano el vector b es un vector unitario.

7. Se encuentran los desplazamientos modales $q^{(i)}$

$$q^{(i)} = \left(\frac{T_i}{2\pi} \right)^2 A_{di} \Gamma_i \phi^{(i)} \quad (9)$$

Ahora se debe utilizar un criterio de combinación modal para hallar los desplazamientos resultantes. En este artículo se aplicó el criterio de combinación modal CQC, Combinación cuadrática completa. Chopra (2001).

8. Determinar los desplazamientos inelásticos q_{ine} multiplicando los desplazamientos elásticos q por el factor de reducción de respuesta R .
9. Encontrar las derivas de piso $\gamma^{(i)}$ inelásticas.

$$\gamma^{(i)} = \frac{q_{ine\ i} - q_{ine\ i-1}}{h_i} \quad (10)$$

Donde $q_{ine\ i}$, $q_{ine\ i-1}$, son los desplazamientos inelásticos en los pisos i , e $i - 1$; h_i es la altura de piso.

10. Se determinan las fuerzas en cada modo $F^{(i)}$ y las resultantes aplicando el criterio de combinación modal CQC.

$$F^{(i)} = \Gamma_i A_{di} M \phi^{(i)} \quad (11)$$

Lo indicado es lo que se ha realizado en el presente artículo, faltaría realizar los controles de acuerdo a la normativa sísmica de cortante basal mínimo, efecto $P - \Delta$, y calcular la torsión accidental. Barbat y Bozzo (1997), Chopra (2014).

10. Anexo B: Procedimiento de cálculo con el método del espectro de capacidad

El Método del Espectro de Capacidad requiere de tres elementos primarios: capacidad, demanda (desplazamiento) y desempeño (ATC-40, 1996).

Capacidad

La curva de capacidad de una estructura es representada por una curva pushover (análisis estático no lineal). La manera más conveniente de graficarla, es con el cortante basal y el desplazamiento en el tope del edificio.

Para lograr severas iteraciones de análisis estáticos y definir la curva de capacidad se debe usar un proceso computacional (Ger & Cheng, 2012).

Proceso:

1. Se define la geometría de la estructura, las secciones de cada elemento y los grados de libertad de cada nudo.
2. Se calculan las acciones actuantes resultado de cargas gravitacionales.
3. Luego estas se acumulan a las acciones resultantes de cargas laterales.

Se carga a la estructura con relativamente pequeñas fuerzas laterales, se hará un análisis estático en cada iteración acumulando las acciones resultantes para la siguiente iteración. Las secciones eventualmente fluirán, disminuyendo sus rigideces EI (Módulo de Young por la Inercia de la sección).

Se puede conocer el comportamiento no lineal de la estructura con la variación de la rigidez EI , porque este es un parámetro que interviene en el proceso del análisis estático.

$$k_1 = \begin{bmatrix} 4EI/L & 2EI/L & 0 \\ 2EI/L & 4EI/L & 0 \\ 0 & 0 & EA/L \end{bmatrix} \quad (12)$$

Donde k_1 es la matriz de rigidez de una sección en coordenadas locales reducidas; EI es la rigidez a flexión que cambia de acuerdo al grado de daño de la sección; L es la longitud del elemento; EA es la rigidez axial.

La manera aquí utilizada para calcular las acciones es mediante el método de análisis estructural de rigideces usando matrices de rigidez y de transformación para sistemas reducidos, locales y generalizados de cada sección, usando ensambles de acuerdo a los grados de libertad de cada elemento para obtener la matriz de rigidez de toda la estructura. Posteriormente se encuentran las deformaciones de cada grado de libertad y las acciones resultantes.

Para conocer la rigidez a flexión EI en todas las etapas de una sección, se necesita conocer el diagrama momento -

curvatura de todas las secciones, ya que por la teoría de Bernulli - Navier se tiene:

$$EI = \frac{M}{\phi} \quad (13)$$

Dónde, E es el Modulo de Young, I es la Inercia de sección analizada, M es el Momento resistente y ϕ es la Curvatura.

4. Luego de varios ciclos de pequeñas cargas laterales, acumulando fuerzas resultantes, eventualmente varias secciones perderán capacidad de resistir momentos, a esto se lo conoce como rótula plástica. Como se señaló anteriormente el análisis estructural se lo realiza usando matrices de rigideces y de transformación, el problema que surge en la formación de una rótula plástica es que la matriz de rigidez de la estructura se vuelve singular, y al calcular los desplazamientos y giros de cada grado de libertad se necesita conocer la inversa de la matriz de rigidez lo cual no es posible.

$$q = K \backslash Q \quad (14)$$

Dónde K es la Matriz de rigidez de la estructura, Q es el Vector de cargas en grados de libertad, q es el Desplazamiento o giros en los grados de libertad.

Se puede solucionar este problema creando nuevas matrices de rigidez de elementos y de transformación para diferentes sistemas de casos de formación de rótulas plásticas.

5. Las iteraciones se detendrán solo cuando la estructura colapse. El criterio de colapso puede ser de derivas de piso mayor o igual al 2% (ASCE 7, 2010; NEC, 2015), o teniendo una deriva global suficiente para poder obtener resultados en el punto de desempeño generalmente colocando un límite del 4%, la deriva global está en función de la altura total del edificio.

También, el programa aquí utilizado se detendrá si la matriz de rigidez de la estructura es singular, ya que esto indica que la estructura es inestable, esta situación ocurre con la aparición de varias rótulas plásticas.

Demanda

Es el movimiento del suelo durante un sismo. Para el método no lineal es fácil y más directo usar un set de desplazamientos laterales como una condición de diseño. Para una estructura dada y movimiento del suelo, la demanda de desplazamiento es un estimado de la respuesta máxima esperada de una estructura durante el movimiento del suelo. De los códigos se obtiene el espectro de diseño, el cual relaciona la aceleración de respuesta de la estructura, y el periodo fundamental de la estructura.

Desempeño

Para verificar el desempeño de la estructura, la curva de capacidad de la estructura y el espectro de demanda sísmico, deben colocarse en el mismo formato: desplazamiento con aceleración espectral. (Chopra y Goel 2000, 2001).



Una vez que se ha definido la curva de capacidad y de demanda se debe chequear el desempeño (ASCE 41, 2013). Un chequeo de desempeño verifica que los componentes estructurales y no estructurales no sean dañados más allá de los límites aceptables.

El punto de desempeño representa el máximo desplazamiento probable que se experimenta en el sismo de diseño. Dado que el modelo matemático toma en cuenta directamente efectos inelásticos de la respuesta del material. Las fuerzas internas calculadas son aproximaciones razonables esperadas durante el sismo de diseño.

11. Anexo C: Modelo constitutivo de tres fases

Para el comportamiento no lineal de los aisladores de triple péndulo de fricción FPT, se tienen varios modelos constitutivos, entre los que se destaca el método lineal equivalente del ASCE 7-10; el modelo de 5 fases propuesto por Fenz y Constantinou (2007, 2008) y el último el de tres

fases, que se utilizó en el estudio, propuesto por Mc Vitty y Constantinou (2015), que se indica a continuación para ello en la figura A1, se indica la geometría y nomenclatura del aislador FPT, con las dimensiones del que se está utilizando en las construcciones de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, en Ecuador.

Para describir el modelo de tres fases, se necesita presentar las siguientes ecuaciones:

$$R_{i,eff} = R_i - h_i \quad \text{Para } i \text{ de } 1 \text{ a } 4. \quad (15)$$

$$d_i^* = \frac{R_{i,eff}}{R_i} \quad (16)$$

Donde R_i es el radio de curvatura; h_i es la altura, presentada en la figura A1; $R_{i,eff}$ es el radio de curvatura efectivo; d_i^* es la capacidad de desplazamiento. El subíndice i , varía de 1 a 4. A continuación se indican las 3 fases o regímenes del modelo.

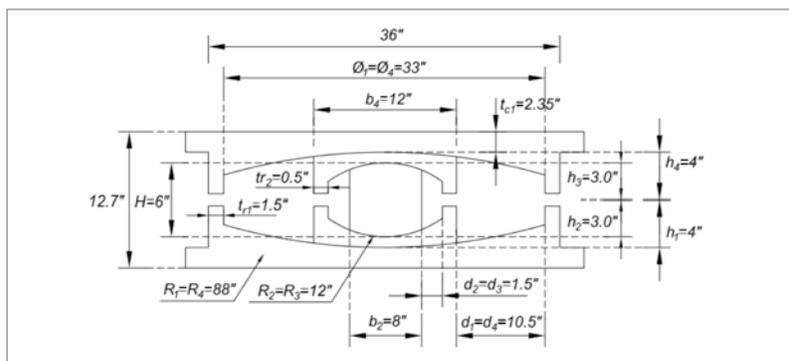


Figura A1. Geometría de aislador de triple péndulo de fricción. [FTP8833/12-12/8-6](https://doi.org/10.15446/ricuc.12-12-8-6), utilizado en las construcciones de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE

Régimen I

El desplazamiento se da solamente en las placas 2 y 3.

$$0 \leq u \leq u^*$$

$$u^* = 2 (\mu_1 - \mu_2) R_{2,eff} \quad (17)$$

$$F = \frac{W}{2 R_{2,eff}} u + \mu_2 W \quad (18)$$

Donde u es el desplazamiento lateral del aislador; F es la fuerza lateral aplicada; W es el peso que gravita sobre el aislador. A la izquierda de la figura A2 se aprecia al aislador interior desplazándose en las superficies 2 y 3; a la derecha se muestra el diagrama de histéresis correspondiente.

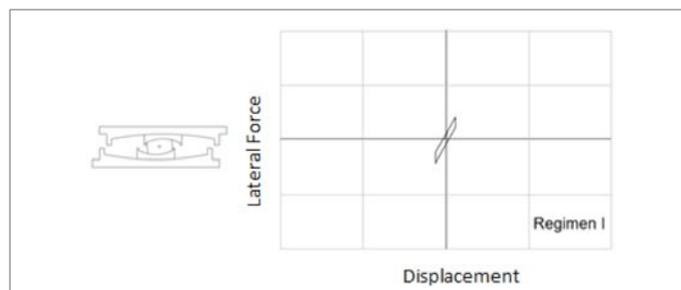


Figura A2. Desempeño de aislador en Régimen I. Fuente: Mc Vitty y Constantinou (2015)

Régimen II

El movimiento en el aislador interior llega a los toques y empieza a desplazarse en las superficies 1 y 4. Normalmente es en este régimen en que trabaja un aislador ante un sismo de intensidad moderada y alta. Las ecuaciones se indican a continuación y en la Figura A3 se presenta la curva de histéresis correspondiente.

$$u^* \leq u \leq u^{**}$$

$$u^{**} = u^* + 2 d_1^* \quad (19)$$

$$F = \frac{W}{2 R_{1,eff}} (u - u^*) + \mu_1 W \quad (20)$$

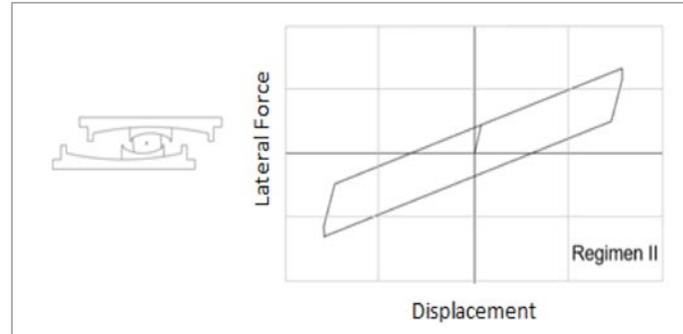


Figura A3. Desempeño de aislador en Régimen II. Fuente: Mc Vitty y Constantinou (2015)

Régimen III

Este régimen se presenta cuando el sismo es extremadamente fuerte y el aislador interior se topa con los toques exteriores, en estas condiciones empieza a deslizarse el aislador interior en las superficies 2 y 3. Las ecuaciones de cálculo y el desempeño se indica en la Figura A4.

$$u^{**} \leq u \leq u_{cap}$$

$$u_{cap} = 2 d_1^* + 2 d_2^* \quad (21)$$

$$F = \frac{W}{2 R_{2,1ff}} (u - u^{**}) + \frac{W}{2 R_{1,eff}} (u^{**} - u^*) + \mu_1 W \quad (22)$$

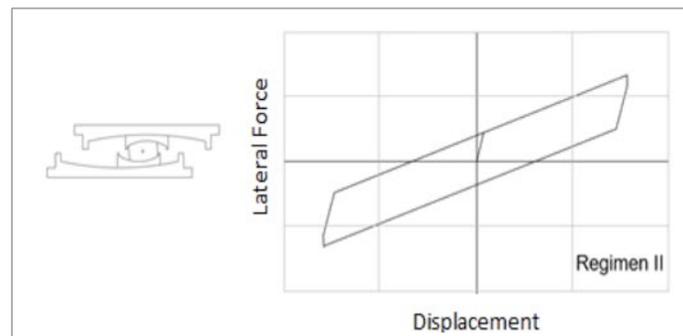


Figura A4. Desempeño de aislador en Régimen III. Fuente: Mc Vitty y Constantinou (2015)

12. Referencias

- Aguar R., Pazmiño E. (2016)**, Detalles constructivos debido a los aisladores sísmicos en las construcciones de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE en Ecuador, *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, **21 (2)**, 217-256. Disponible en: <http://www.riie.espe.edu.ec>.
- Aguar R., Andrade V., Guaygua B., Piedra P. (2016)**, Aplicación del Método Espectral en los Bloques 6 y 7 con aisladores sísmicos de la UFA-ESPE en Ecuador, *Revista Ciencia*, 18 (1), 67-92. Disponible en: http://www.revista_ciencia.espe.edu.ec
- ASCE Standard (ASCE/SEI 41)**, Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, American Society of Engineers, 2013.
- ASCE Standard (ASCE/SEI 7-10)**, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- ATC-40 (1996)**, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Redwood City, California: Applied.
- Bonifaz H. (2015)**, Informe de suelos. Edificio de Investigaciones. Laboratorio de Ensayo de Materiales LEM-ESPE, 33 p., Sangolquí.



- Constantinou M., Aguiar R., Morales E., Caiza P. (2016)**, "Desempeño de aislador FPT8833/12-12/8-5 en el análisis sísmico del Centro de Investigaciones y de Post Grado", Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras, **21 (1)**, 1-25. Disponible en: <http://www.riie.espe.edu.ec>
- Chopra A. K. (2001)**, Dynamic of structures: Theory and applications to earthquake engineering, 2nd edn. Prentice Hall: Saddle River New York.
- Chopra A. K. (2014)**, Dynamic of Structures Theory and application to earthquake engineering. 4th edition.
- Fadi F. and Constantinou M. (2010)**, Evaluation of simplified methods of analysis for structures with triple friction pendulum isolators, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 39, 5-22.
- Fenz D., Constantinou M., (2007)**, Mechanical behavior of multi-spherical sliding bearings, Technical Report MCEER-08-0007, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research. Available at <http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/Mechanical-Behavior-of-Multi-Spherical-Sliding-Bearings-MCEER-08-0007.html>
- Fenz D.M. and Constantinou M.C. (2008)**, Development, implementation and verification of Dynamic Analysis Models for Multi-Spherical sliding bearings. Report No. MCEER-08-0018, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY. Available at <http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/Development-Implementation-and-Verification-of-Dynamic-Analysis-Models-for-Multi-Spherical-Sliding-Bearings-MCEER-08-0018.html>
- Ger J. and Cheng F. Y. (2012)**, Seismic Design Aids for Nonlinear Pushover Analysis of Reinforced Concrete and Steel Bridges. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Lamar S. and Fortoul C. (2007)**, Análisis estático de estructuras. Formulación matricial. Editorial CITECI, Caracas, Venezuela.
- McVitty W.J. y Constantinou M.C. (2015)**, Property Modification Factors for Seismic Isolators: Design Guidance for Buildings, MCEER Report. 15-0005, 242 p. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY, 2015. Available at <http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/Property-Modification-Factors-for-Seismic-Isolators-Design-Guidance-for-Buildings-MCEER-15-0005.html>
- NEC-15 (2015)**, Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-DS, Ministerio de la Vivienda MIDUVI.