

ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL DE ESTRUCTURAS DE EDIFICIOS CON AISLACIÓN DE BASE

NON-LINEAR DYNAMIC ANALYSIS OF BUILDING STRUCTURES WITH BASE ISOLATION

Oscar Möller^a, Juan P. Ascheri^a, Germán Lucero^a

^a*Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Facultad Cs.Ex., Ingeniería y Agrimensura,
Universidad Nacional de Rosario, Riobamba y Berutti, 2000 Rosario, Argentina,
moller@fceia.unr.edu.ar*

Palabras clave: Estructuras espaciales, Acción sísmica, Aislación de base, Dinámica no lineal.

Resumen. El dimensionamiento por capacidad para estructuras sismorresistentes con base fija produce daños importantes en las regiones de rótulas plásticas que pueden ser difíciles y costosas de reparar luego de la ocurrencia de un sismo severo. Otra estrategia para reducir la vulnerabilidad de las construcciones es la utilización de aisladores de base que aumenta el periodo fundamental de vibración, disminuyendo la demanda de pseudoaceleraciones, y puede incrementar el amortiguamiento en función de los dispositivos utilizados, produciendo otra reducción adicional de la acción sísmica. En este trabajo se analiza el desempeño de una estructura tridimensional para edificio de hormigón armado de 3 pisos con aislación de base, dimensionada con el método estático. Se utiliza análisis dinámico no lineal para el sistema modelado en OpenSees con elementos de barra discretizados en fibras y elementos especiales para los aisladores, bajo la acción de las 3 componentes simultáneas de acelerogramas registrados compatibles con el espectro de diseño del código INPRES-CIRSOC 103 y amplificados para el terremoto máximo considerado. Se obtienen conclusiones de interés para la utilización de la metodología simplificada.

Keywords: Spatial structures, Seismic action, Base isolation, Non-linear dynamics.

Abstract. Design by capacity for fixed base seismic structures produces significant damage in plastic hinge regions that can be difficult and costly to repair after a severe earthquake. Another strategy to reduce the vulnerability of constructions is the use of base isolators, which increases the fundamental period of vibration, reducing the demand for pseudo-accelerations, and it can increase the damping depending on the devices used, producing another additional reduction of the seismic action. In this work, it is analyzed the performance of a three-dimensional structure for a 3-story reinforced concrete building with base insulation, dimensioned with the static method. Nonlinear dynamic analysis is used for the system modeled in OpenSees with bar elements with fiber sections and special elements for isolators, under the action of the 3 simultaneous components of registered accelerograms compatible with the design spectrum of the INPRES-CIRSOC 103 code and amplified for the maximum earthquake considered. Conclusions of interest are obtained for the use of the simplified methodology.

1 INTRODUCCIÓN

El dimensionamiento por capacidad es una estrategia utilizada para estructuras de hormigón armado ubicadas en zonas de elevada peligrosidad sísmica, donde se elige un mecanismo de disipación de energía con regiones, “rótulas plásticas”, preparadas para incursionar fuertemente en el campo no lineal. Este tipo de comportamiento produce daños importantes en esas regiones que pueden ser difíciles y costosas de reparar luego de la ocurrencia de un sismo severo.

Otras estrategias se han desarrollado en las últimas décadas para reducir la vulnerabilidad de las construcciones como son la de aislación de base (Naeim and Kelly, 1999; Skinner, 1993, Christopoulos, 2006, Nassani, 2015) y las de disipación de energía mediante la incorporación de dispositivos especiales (Zhang, 2021).

Hasta el año 2021, China posee unos 12000 edificios sísmicamente aislados, sigue Japón con alrededor de 10000, luego Rusia con 700, Italia con 400 al año 2016), Estados Unidos con 200, Nueva Zelanda con 41 al año 2016. En América Latina, Chile, en el año 2016 poseía 62 edificios aislados, y en el año 2021 pasó a 130 (Seky, 2022). Este crecimiento, entre otros factores, se debe a la buena respuesta de las estructuras con aislamiento sísmico frente a los grandes terremotos y la mejor tecnología y confiabilidad en su fabricación. Aunque el concepto de aislamiento fue desarrollado para proteger nuevos edificios, es posible su extensión al campo de la rehabilitación de estructuras antiguas.

Las ventajas en el uso de aisladores de base son: (a) El periodo fundamental de vibración del sistema se aumenta con respecto al diseño con base fija, disminuyendo significativamente la demanda de pseudoaceleraciones; (b) Se puede incrementar el amortiguamiento en función de los dispositivos utilizados, produciendo otra reducción adicional de la acción sísmica. (c) Los desplazamientos totales se incrementan, pero se disminuyen las distorsiones de piso. Significa que el aislamiento sísmico se basa en el concepto de reducir la demanda sísmica en lugar de aumentar la capacidad resistente de la estructura. Se aceptan métodos simplificados de diseño como el método estático equivalente, con la incorporación de factores específicos para sistemas de aislamiento. Es efectivo para estructuras con un periodo fundamental de 1 segundo o menos, es decir edificios de baja y mediana altura (Falborski 2017).

Se estudia el desempeño de una estructura para un edificio de hormigón armado de 3 pisos con aislación de base, dimensionada con el método estático siguiendo los lineamientos de ASCE 7-16. Se utiliza análisis dinámico no lineal para el sistema modelado en OpenSees bajo la acción de las 3 componentes simultáneas de 4 acelerogramas registrados compatibles con el espectro de diseño del código INPRES-CIRSOC 103, y amplificadas para el terremoto máximo considerado. El desempeño se evalúa con la respuesta de desplazamientos, distorsiones de piso e índice de daños.

2 ESTRUCTURA ANALIZADA

2.1 Geometría

La Figura 1 presenta la estructura de 3 pisos utilizada como ejemplo para la evaluación del desempeño. Se muestra la planta y corte general con un aislador de base por columna.

2.2 Diseño con método estático

Los desplazamientos laterales de diseño y las fuerzas sobre las estructuras aisladas sísmicamente son función de las deformaciones del sistema de aislamiento. En este trabajo, su evaluación se realiza siguiendo los lineamientos del ASCE 7-16, cap.17. Se selecciona el

procedimiento de Fuerzas Laterales Equivalentes, ya que se cumplen los requerimientos para su aplicación.

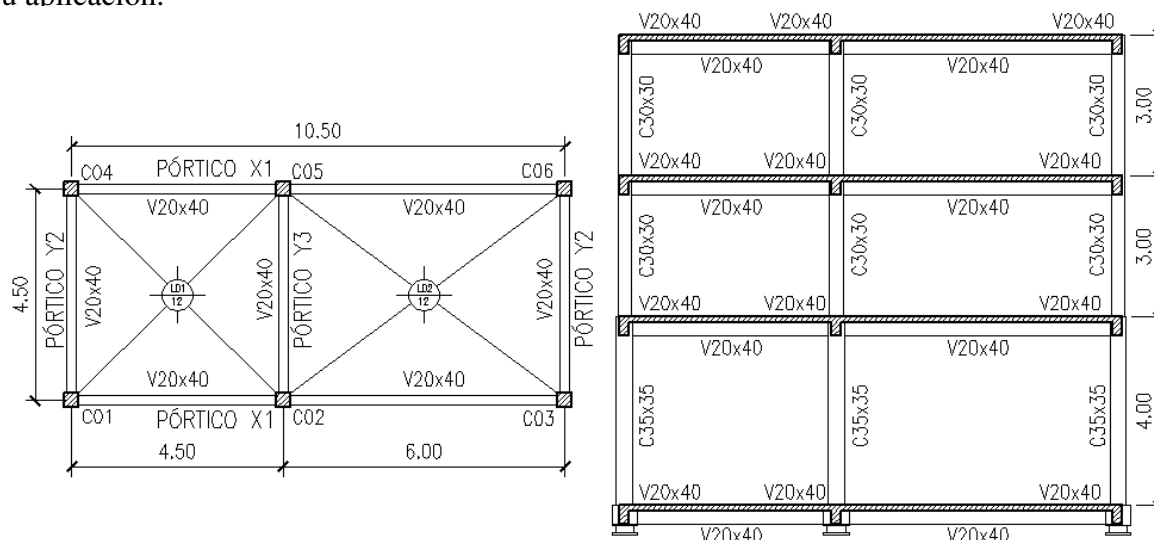


Figura 1: Planta y corte de la estructura aislada

Las secciones se predimensionan con columnas de 35x35 cm en el primer nivel y 30x30 cm en el 2do y 3er nivel. Las vigas longitudinales y transversales tienen una sección de 20x40 cm. Se consideran las cargas verticales reglamentarias, cargas permanente D, sobrecarga L, con sus valores nominales del Reglamento CIRSOC 101.

La acción sísmica se evalúa a partir del terremoto máximo considerado (TMC), definido con una probabilidad de excedencia de 2% en 50 años, equivalente a un período de retorno de 2475 años. El TMC se obtiene amplificando el espectro del terremoto de diseño (TD), definido por el INPRES-CIRSOC 103 Parte I, por un factor 1.5 para la zona sísmica 4, que es donde está ubicada la estructura, ver Figura 2.

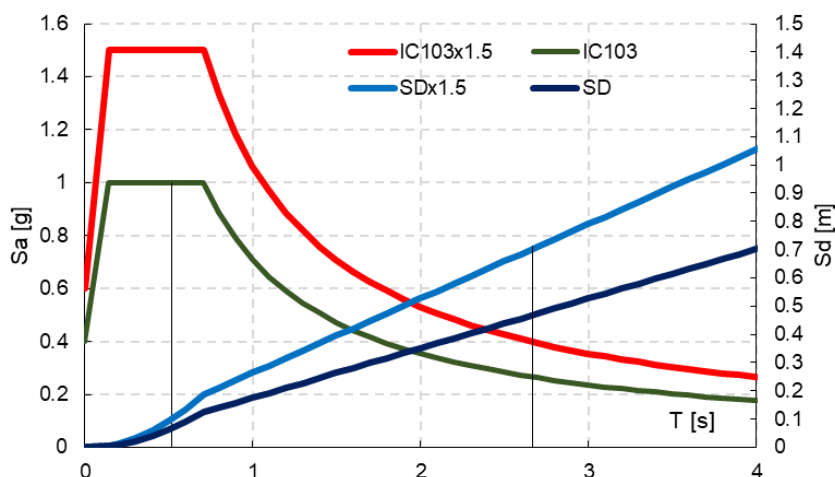


Figura 2: Espectro de aceleraciones y desplazamientos

2.3 Diseño del sistema de aislamiento

El sistema de aislamiento se diseña para resistir el desplazamiento máximo D_M , para la dirección determinante de la respuesta horizontal. Se calcula a partir:

$$D_M = \frac{g S_{M1} T_M}{4 \pi^2 B_M} = \frac{9.81 \cdot 1.06 \cdot 2.6}{4 \pi^2 \cdot 1.8} = 0.38m \quad (1)$$

Donde: S_{M1} es la ordenada de pseudoaceleración del TMC, para 5% de amortiguamiento y para período de 1 seg.; $T_M = 2.6$ seg es el periodo efectivo propuesto para la estructura aislada para el desplazamiento D_M ; B_M es el coeficiente de amortiguamiento que depende del amortiguamiento efectivo $\beta_M = 20\%$, valor que depende del tipo de aislador utilizado.

Se considera el desplazamiento adicional por torsión función de las dimensiones de la planta y de las excentricidades entre el centro de masa de la superestructura y el centro de rigidez del sistema de aislamiento, pero el desplazamiento total debe ser $D_{TM} \geq 1.15 D_M$.

El diseño y dimensionado del sistema de aislamiento es un proceso iterativo. Se utiliza un aislador del tipo HDR (High Damping Rubber), cuyas propiedades mecánicas se obtienen del catálogo de aisladores de Bridgestone. Con el periodo T_M y la masa del edificio se obtiene la rigidez efectiva que tiene que tener el sistema de aislamiento para el desplazamiento D_M . Para este ejemplo, los valores para cada uno de los 6 aisladores, resultan: $D_{ext} = 500$ mm; $D_{int} = 15$ mm; Altura de la goma $Hr = 250$ mm; Rigidez efectiva $k_{eff} = 183.7$ kN/m; Rigidez elástica $ke = 1311$ kN/m; Rigidez posfluencia $kd = 131$ kN/m; Fuerza de fluencia $Fy = 22.6$ kN.

Estas propiedades de rigidez y resistencia se modifican con factores lambda para tener en cuenta la variación de los parámetros de diseño nominales por los efectos de calentamiento causados por el movimiento dinámico cíclico, la velocidad de carga, el envejecimiento, la temperatura, exposición ambiental y contaminación.

2.4 Fuerzas horizontales

El sistema de aislamiento y las fundaciones se construirán para soportar una fuerza sísmica mínima V_b , utilizando las propiedades del sistema de aislamiento más desfavorables, ya sea del límite superior o del límite inferior. Luego se obtiene la fuerza sísmica de diseño total horizontal o corte en los elementos de la superestructura V_{st} . La estructura por encima del sistema de aislamiento debe diseñarse con V_s según ec.(2).

$$V_b = K_M D_M \rightarrow V_{st} = V_b \left(\frac{W_s}{W} \right)^{1-2.5\beta_M} \rightarrow V_s = \frac{V_{st}}{R_I} \quad (2)$$

Donde $W = 2240$ kN es el peso de la estructura por encima del sistema de aislamiento, y $W_s = 1616$ kN es el peso W pero excluyendo el peso del nivel inmediatamente por encima de los dispositivos de aislamiento; R_I es el factor de reducción global igual a $3/8$ del valor de R según la tipología estructural, con límites entre 1.00 y 2.00, resulta $R_I = 3/8 \cdot 7 = 2.6 \rightarrow R_I = 2$.

Los resultados numéricos para el límite superior son $V_b = 442$ kN; $V_{st} = 382$ kN; $V_s = 181$ kN que se distribuye en la altura con

$$F_1 = \frac{V_b - V_{st}}{R_I}, \quad F_i = C_i V_s, \quad C_i = \frac{W_i h_i^k}{\sum_{j=2}^N W_j h_j^k}, \quad k = 14 \beta_M T_{fb} \quad (3)$$

Donde F_1 es la fuerza del nivel 1, nivel inmediatamente por encima de los dispositivos de aislamiento; F_j es la fuerza en el nivel i ; T_{fb} es el periodo de la superestructura con base fija.

Con los resultados del análisis de la estructura bajo las cargas estáticas equivalentes combinadas con cargas permanentes y fracción de la sobrecarga, se dimensionan las armaduras de cada elemento siguiendo las prescripciones del INPRES-CIRSOC 103 Parte II para "Ductilidad limitada" $R_I = 2$.

Los desplazamientos calculados con las fuerzas reducidas se multiplican por $C_d = R_I$ para obtener las distorsiones de piso mostradas en la Tabla 1.

Nivel	Desp X (cm)	Dist X	Desp Y (cm)	Dist Y
Aislación	40.9		41.1	
1	46.4	0.0137	46.5	0.0135
2	49.7	0.0113	49.8	0.0113
3	51.9	0.0073	51.9	0.0068

Tabla 1: Desplazamientos y distorsiones de piso con método estático

3 ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL - DESEMPEÑO

3.1 Modelo en OpenSees

Se utiliza el software de libre acceso OpenSees (2020), ver Mazzoni (2005), Makenna (2010), especialmente desarrollado para modelizar sistemas solicitados por acción sísmica. La discretización se presenta en la Figura 3

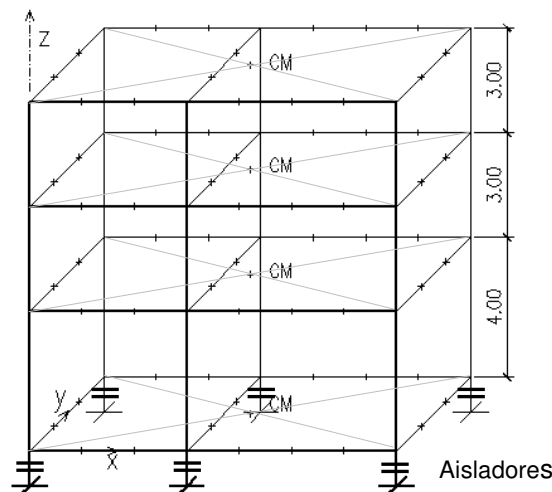


Figura 3: Modelo de la estructura

Para las vigas y columnas se utilizan elementos tipo “element forceBeamColumn”. Las vigas se dividen en elementos de 1.50m para aplicar las cargas gravitacionales en los nodos, y en cada elemento se disponen 3 secciones para la integración numérica de Gauss-Lobatto. Las columnas se modelan con 1 elemento por tramo y 4 secciones de integración.

Las secciones se discretizan en fibras rectangulares de hormigón “patch quad”, en una cantidad suficiente para representar el comportamiento del recubrimiento y la zona confinada, y capas de armadura con “layer straight” o fibra de acero para cada barra de armadura individual con “fiber”.

A cada tipo de fibra se le asigna una relación constitutiva no lineal del material. Para las fibras de hormigón se utiliza el modelo “uniaxialMaterial Concrete04” que incluye la ecuación de Popovics con degradación lineal para la descarga y recarga de acuerdo con Karsan-Jirsa, y resistencia a tracción con decaimiento exponencial. Para las fibras de acero aplicó el modelo “uniaxialMaterial ReinforcingSteel” que incluye pandeo en el

comportamiento a compresión. Los valores de los parámetros se calculan para $f'c = 25$ MPa y $f_y = 420$ MPa.

Las losas son consideradas como diafragmas rígidos en su plano utilizando restricciones “Multi-Point Constraint objects” mediante “rigidDiaphragm”.

Los aisladores se modelizan con “element elastomericBearingBoucWen” de acuerdo con las dimensiones y parámetros del neopreno utilizado. El elemento se esquematiza en la Figura 4. Las componentes axiales y de momento se representan con resortes lineales mediante “uniaxialMaterial Elastic”.

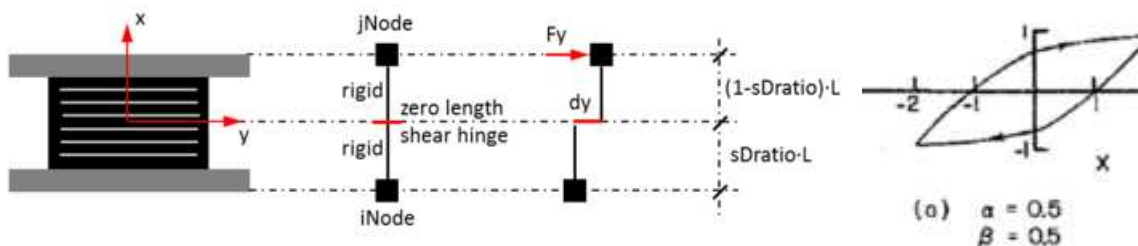


Figura 4: Modelo de los aisladores

3.2 Acelerogramas registrados

De la base de datos de PEER (2019) se seleccionaron 4 registros de terremotos ocurridos con el criterio que la forma del espectro de respuesta sea similar al espectro del TD. De cada registro se elige la componente horizontal de mayor aceleración máxima (a_G) y se le aplica un factor para que $a_G = 0.35g$ compatible con IC103. El mismo factor se aplica a la componente vertical. Este conjunto de acelerogramas se escala uniformemente con un factor $F = 2.40$ para que el espectro medio de los SSRS de las componentes horizontales no sea inferior al 90% del espectro objetivo (TMC) dentro del rango de períodos de interés.

En este trabajo se seleccionaron registros de los terremotos de El Centro, 1940; Managua, 1972; Chi-Chi Taiwan, 1999; y Japón, 2007. La Figura 5 muestra los espectros escalados y el espectro objetivo (TMC).

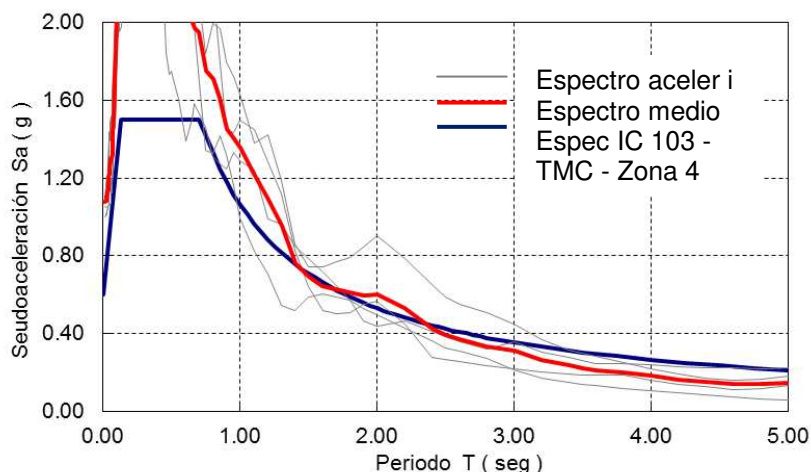


Figura 5: Espectro de los acelerogramas escalados y espectro de diseño

También se realizan comparaciones con el desempeño de la estructura con base fija, que por razones de espacio sólo se incluyen algunos resultados finales. Para ellas, los acelerogramas están escalados para el TD de acuerdo con IC103. Se observa una gran diferencia entre ambas acciones, que deberían ser revisadas en el futuro.

3.3 Resultados del análisis numérico

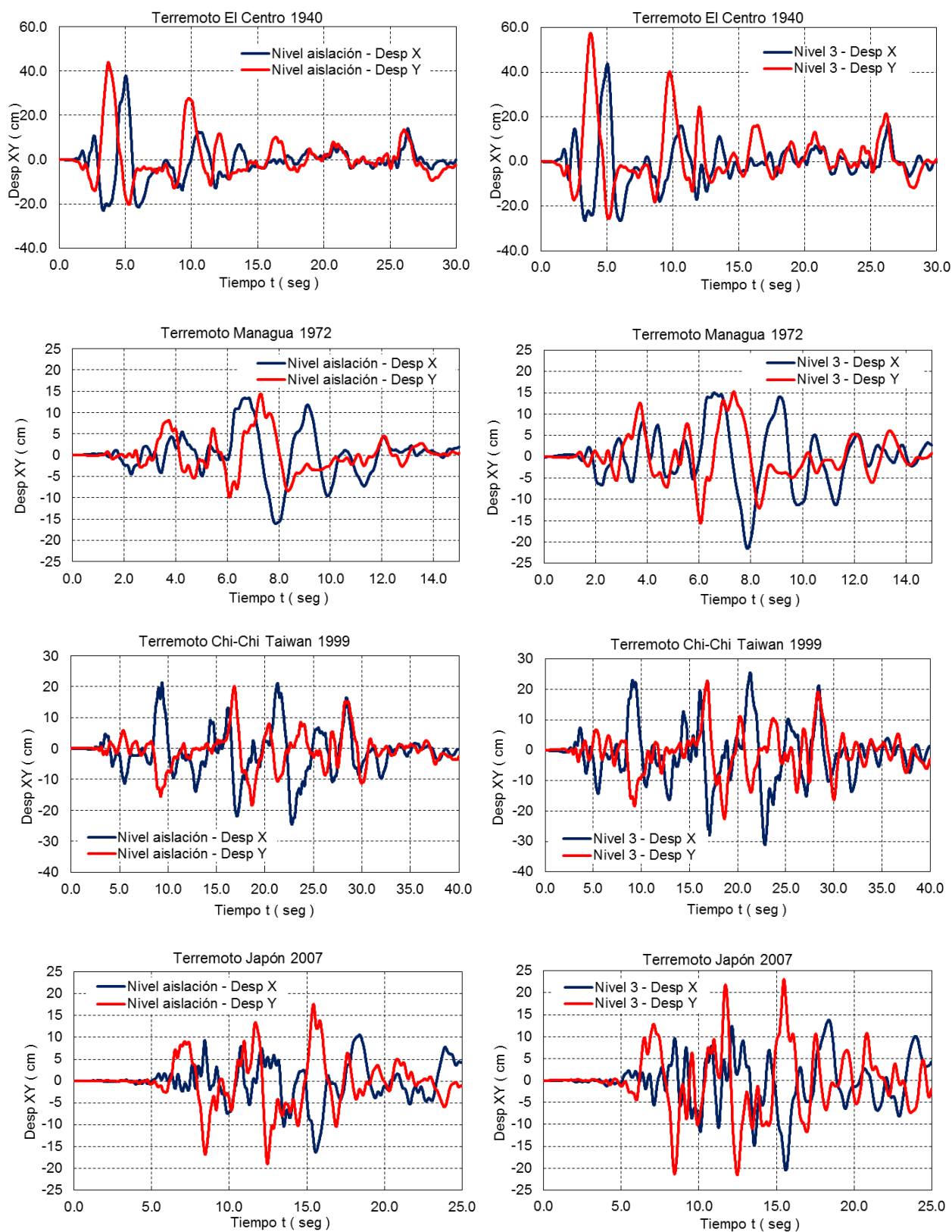


Figura 6: Desplazamientos a nivel aislación y último piso para los acelerogramas escalados al TMC

La Figura 6 muestra, para cada terremoto analizado, los resultados de desplazamiento - tiempo en el centro de masa del último piso (nivel 3) en cada dirección principal X, Y, y similarmente en el nivel de los aisladores de base. El sistema OpenSees resulta eficiente para el procesamiento numérico de este tipo de estructuras de comportamiento no lineal tanto de las secciones de integración de los elementos de hormigón armado, como del modelo para los aisladores de base. Como ejemplo, el terremoto de Chi-Chi Taiwan 1999, con 40seg de su parte más intensa, 8000 pasos de tiempo, tolerancia en la convergencia de la norma de incrementos de desplazamientos 10^{-3} , es procesado en 569 seg en una PC estándar.

Los desplazamientos para el terremoto El Centro son significativamente mayores que para los otros. Se explica porque las ordenadas del espectro de respuesta de ese terremoto son superiores a la media, ver Figura 5.

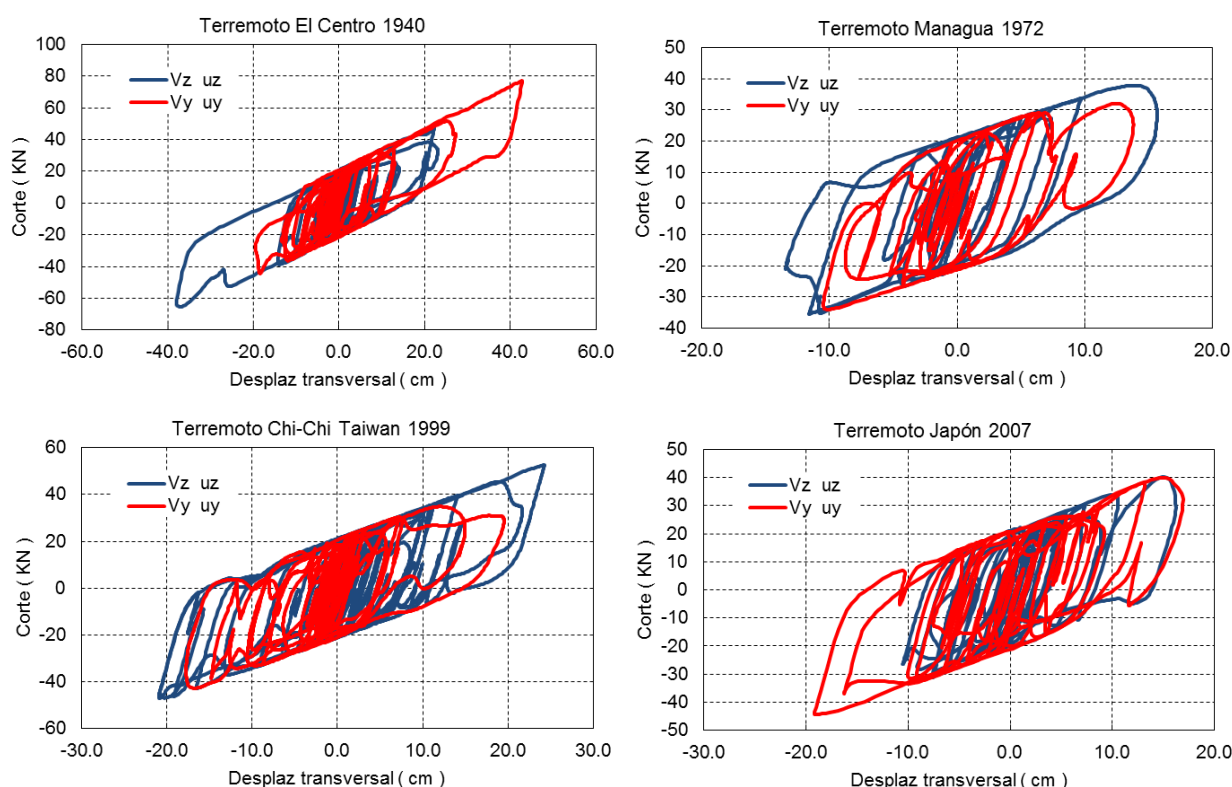


Figura 7: Relación corte – desplazamiento en los aisladores para los acelerogramas escalados al TMC

La Figura 7 muestra, para cada terremoto analizado, la relación fuerza de corte – desplazamiento transversal del aislador de la columna C01, ver Figura 1. Los 6 aisladores presentan comportamiento casi idéntico debido a la losa rígida inmediatamente por encima de ellos. El desplazamiento D_M de diseño de los aisladores es 38 cm, ver ec.(1). La composición de los desplazamientos X, Y para el terremoto El Centro alcanza el valor máximo de 48.1 cm, superior al de diseño, pero con distorsión de la goma $\gamma = 48.1/25 = 1.92$, aceptable. Además, el valor medio entre todos los acelerogramas es 29.4 cm.

El modelo de Bouc-Wen resulta adecuado para este tipo de aislador HDR mostrando la evolución en el tiempo de la relación corte-desplazamiento dentro de la envolvente, que es función de los parámetros del aislador dimensionado.

La Tabla 2 resume los valores numéricos más significativos que serían los utilizados para las verificaciones de los estados límites de diseño. En todos los casos el terremoto de El

Centro resulta el más demandante para esta estructura por los motivos ya explicados. Se informa también los datos estadísticos de valor medio y desvío estándar, aun cuando se deberían analizar mayor cantidad de registros sísmicos.

El corte basal presenta valor medio de 320 kN y máximo 462 kN. Para el cálculo estático el corte basal resulta 442 kN, ver sección 2.4, similar al máximo para el registro de El Centro.

Las distorsiones de piso en el primer nivel tienen un valor máximo de 0.022, con valor medio de 0.012 adecuados para control de daños en elementos no estructurales. Las distorsiones de piso obtenidas con el Método Estático Equivalente, ver Tabla 1, llegan a valores de 0.0137, es decir resultados similares a la media del análisis dinámico no lineal.

La misma estructura pero diseñada con base fija según INPRES-CIRSOC 103 Parte I y II, solicitada por los acelerogramas escalados al TD, alcanza distorsiones de piso máxima de 0.0206 en la dirección X y 0.0166 en Y, significa mayores daños estructurales y no estructurales.

Resultado	El Centro	Managua	Chi-Chi	Japón	Valor medio	Desvío estándar
Desplaz. (cm)						
Nivel aislación X	37.75	16.09	24.57	16.37	23.69	10.16
Nivel 3 - X	43.68	21.50	31.08	20.44	29.18	10.79
Nivel aislación Y	43.78	14.44	20.12	19.02	24.34	13.19
Nivel 3 - Y	57.32	15.55	22.82	23.11	29.70	18.74
Corte basal (kN)	462.00	240.00	315.00	264.60	320.40	99.43
Distorsión						
Nivel 1 - X	0.00952	0.00625	0.00892	0.00645	0.00778	0.00168
Nivel 2 - X	0.00826	0.00727	0.00931	0.00739	0.00806	0.00095
Nivel 3 - X	0.00517	0.00584	0.00551	0.00578	0.00557	0.00031
Nivel 1 - Y	0.02201	0.00948	0.00742	0.01047	0.01234	0.00657
Nivel 2 - Y	0.01795	0.00964	0.00686	0.01054	0.01124	0.00474
Nivel 3 - Y	0.00750	0.00629	0.00425	0.00731	0.00634	0.00149
Daño elem H ^o A ^o						
Local máximo	0.517	0.165	0.134	0.191	0.252	0.179
Global	0.194	0.089	0.083	0.083	0.112	0.055

Tabla 2: Resumen de resultados del análisis dinámico no lineal

Finalmente se calculan los índices de daño local (sección) máximo y global para la superestructura siguiendo el criterio de Park y Ang (1985). El valor medio del índice local máximo, 0.25, significa daño leve. Los resultados momento-curvatura de extremos de vigas en el primer nivel alcanzan ductilidades del orden de 4, compatible con el factor de reducción $R_I = 2$. La estructura con base fija alcanza índice de daño local máximo de 0.47 e índice de daño global 0.26.

4 CONCLUSIONES

Se estudió el desempeño de una estructura de 3 pisos de hormigón armado con aislación de base, diseñada con el Método Estático. El desempeño se analiza mediante análisis dinámico no lineal bajo la acción de las cargas gravitacionales y las 3 componentes simultáneas para

cada uno de los 4 terremotos seleccionados y escalados para que acuerden con el terremoto máximo considerado para la zona 4 del IC 103. Las principales conclusiones observadas para este ejemplo se resumen a continuación:

- El sistema OpenSees resulta eficiente para el procesamiento numérico de este tipo de estructuras de comportamiento no lineal tanto de las secciones de integración de los elementos de hormigón armado, como del modelo para los aisladores de base.
- El comportamiento del sistema responde aproximadamente al objetivo del diseño, que la superestructura se desplace “casi” como un rígido sobre el sistema de aislación.
- El modelo de Bouc-Wen resulta adecuado para este tipo de aislador HDR mostrando la evolución en el tiempo de la relación corte-desplazamiento dentro de la envolvente del aislador dimensionado.
- Los resultados presentan dispersión significativa especialmente para el terremoto El Centro. Los valores promedio de distorsión de piso son adecuados para control de daños en elementos no estructurales, y corte basal similar al obtenido con el método estático.
- Los índices de daño local (sección) máximo y global para la superestructura corresponde a situaciones con daño leve, que es el desempeño esperado para una estructura con aislación de base y para el TMC.

REFERENCIAS

- ASCE 7-16. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. *American Society of Civil Engineers*, 2016.
- Christopoulos, C., Filiatrault, A. *Principle of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation*. IUSS Press, 2006.
- Falborski, T., Jankowski, R. Experimental Study on Effectiveness of a Prototype Seismic Isolation System Made of Polymeric Bearings. *Faculty of Civil and Environmental Engineering, Gdansk University of Technology*, pp. 11-12, 2017.
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H., Fenves, G.L. OpenSees command language manual. *Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center*, 2005.
- McKenna, F., Scott, M.H., Fenves, G.L. Nonlinear finite-element analysis software architecture using object composition, *Journal of Computing in Civil Engineering* 24: 95-107, 2010.
- Naeim, F., Kelly, J.M. *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*. John Wiley & Sons, Inc, 1999.
- Nassani, D.E., Abdulmajeed, M.W. Seismic base isolation in reinforced concrete structures. *International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology*, Vol.2 (2), pp.1-13, 2015.
- Open Sees. The Open System for Earthquake Engineering Simulation 3.2.2-x64, *Pacific Earthquake Engineering Research Center University of California, Berkeley*, 2020. <https://opensees.berkeley.edu/>
- Pacific Earthquake Engineering Research Center. PEER Strong ground motion database, 2019. <https://peer.berkeley.edu/peer-strong-ground-motion-databases>
- Park, Y.J., Ang, A.H-S. “Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete”. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.111 (ST4), pp.722-739, 1985.
- Seki, Matsutaro. Tecnología de control de vibraciones y aislamiento sísmico para edificios. *Workshop on line Chile-Japón, ACHISINA*, 2022.
- Skinner, R.I., Robinson, W.H., McVerry, G.H. *An Introduction to Seismic Isolation*. John Wiley & Sons, Inc, 1993.
- Zhang, C, Ali, A. The advancement of seismic isolation and energy dissipation mechanisms based on friction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 146, 106746, 2021.