

Diseño de estructuras con sistema de amortiguamiento viscoso lineal

Fernanda M. Candanedo

Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
fernanda.candanedo@utp.ac.pa

Carlos E. Miranda

Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
carlos.miranda@utp.ac.pa

Rubén E. Cedeño

Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
ruben.cedeno1@utp.ac.pa

Richard Lozada

Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
richard.lozada@utp.ac.pa

Oscar M. Ramírez

Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de Panamá
oscar.ramirez@utp.ac.pa

Resumen— El diseño sísmico propuesto en la nueva versión del Reglamento Estructural Panameño REP-14, está basado en la normativa estadounidense ASCE 7-05. Esta normativa, además de los procedimientos tradicionales de diseño, incluye metodologías y técnicas que permiten equipar los edificios con tecnología de punta, como fuente alterna para la disipación de energía sísmica. En este artículo se compara el diseño sísmico de un edificio de concreto reforzado de seis pisos utilizando una estructura convencional, respecto al mismo edificio con una estructura reducida y con un sistema de amortiguadores viscosos lineales, diseñados según el ASCE-7-05, para rendir el mismo nivel de desempeño. Se evalúa la respuesta de desplazamiento global, y se compara el costo del sistema lateral de ambos modelos.

Palabras Clave— Amortiguamiento, Articulaciones Plásticas, Daño, Diseño Sísmico, Resistencia, Respuesta Sísmica.

Abstract— The seismic design proposed in the new version of Panamanian structural regulation REP-14 is based on the normative ASCE 7-05. These regulations, in addition to traditional design methods, including methodologies and techniques that allow buildings equipped with updated technology, as an alternative source for seismic energy dissipation. This article compare the seismic design of a six floors reinforced concrete building using a conventional structure, with the same building with a reduced structure and a system of linear viscous dampers, designed according

to the ASCE 7-05, for the same level of performance. Overall response is evaluated, and the cost of the lateral system is compared for both models.

Keywords— *Damage, Damping, Plastic Hinge, Pushover, Seismic Design, Seismic Response, Strength.*

Tipo de artículo: Original

Fecha de recepción: 15 de septiembre de 2014

Fecha de aceptación: 23 de noviembre de 2014

1. Introducción

En el diseño sísmico tradicional, o diseño basado en daño, la energía impuesta por un sismo en una estructura es disipada mediante fricción inelástica en articulaciones plásticas que se desarrollan en secciones pre-establecidas de la estructura. El enfoque moderno del diseño sísmico, es el uso de nuevas estrategias de protección. Una de dichas estrategias, es la adición de dispositivos de amortiguamiento pasivos. El objetivo primario de adicionar estos dispositivos a la estructura de edificios es concentrar la disipación de energía durante un sismo en dispositivos específicamente diseñados para este propósito, reduciendo sustancialmente, o eliminando, disipación de energía a través de la estructura de resistencia lateral de un edificio. Es decir, reduciendo o eliminado el daño en la estructura como mecanismo de disipación.

El Capítulo 15 del NEHRP-2003 [1] y el Capítulo 18 del ASCE-7-05 [2] incluyen procedimientos para el análisis y diseño de estructuras con sistemas de amortiguamiento, los cuales están sustancialmente basados en el trabajo desarrollado por Ramírez et al. 2000 [3]. En estas normativas, se incluye el método de fuerza lateral equivalente, FLE, y el método de respuesta espectral modal, RSA, en un formato consistente con los métodos tradicionales existentes para el diseño de edificios.

El Método 2 de FEMA [4], fue ampliamente basado en el método de capacidad espectral

realizado por Freeman et al. 1975 [5] y Freeman et al. 1978 [6], pero extendido para incluir estructuras con sistemas de amortiguamiento. El trabajo realizado por Ramírez et al. 2000 presentó una modificación sustancial al Método 2 de FEMA. Ramírez et al. 2002^a [7] presenta el desarrollo de factores de corrección de velocidades, los cuales son utilizados para obtener velocidades pico a partir de pseudo-velocidades. Asimismo, presenta métodos simplificados para la determinación de respuestas máximas de aceleración y velocidades. Ramírez et al. 2002b [8] presenta el desarrollo de factores de reducción de demanda espectral para amortiguamientos de 0 a 100 %. Adicionalmente, Wittaker et al. 2003 [9] desarrolló procedimientos para el cálculo de amortiguamiento efectivo, y período efectivo, así como las relaciones de amortiguamiento para modos de vibración más altos en edificios con sistemas de amortiguamiento. Finalmente, Ramírez et al. 2003 [10] desarrolló la base teórica y validó los procedimientos de Fuerza Lateral Equivalente, FLE, y el método de Análisis de Respuesta Espectral, RSA, para estructuras con sistemas de amortiguamiento.

El Reglamento Estructural Panameño, REP-2014 [11], propone adoptar el formato del ASCE 7-05 para el diseño sísmico de edificios en Panamá. Es decir, se incluyen procedimientos y técnicas para el análisis de edificios equipados con tecnología de punta para disipar energía sísmica. La utilización de estas tecnologías permite un mejor desempeño de los edificios ante movimientos sísmicos, reduciendo o anulando el daño estructural implícito en métodos tradicionales; sin embargo, su aplicación es aún incipiente en muchos países del mundo. La ingeniería panameña carece de experiencia en el manejo conceptual de esta tecnología, por lo que es importante ilustrar su aplicación y comparar su efecto en la práctica de diseño y construcción actual.

En este documento, se compara el diseño sísmico de un edificio utilizando una estructura

convencional, respecto al mismo edificio con una estructura reducida adicionando un sistema de amortiguamiento pasivo, según el ASCE-7-05. Ambas estructuras son diseñadas para atender la demanda sísmica prescrita por el REP-2014, y satisfacer el mismo nivel de desempeño. Se busca investigar el efecto en términos de costo, y reducción del daño, del equipamiento de este edificio con dispositivos viscosos lineales.

2. Marco de Trabajo

2.1 Fundamento Conceptual

El método RSA, incluido en el Capítulo 18 del ASCE 7-05, propone un procedimiento iterativo para la determinación de la respuesta de desplazamiento de estructuras con sistemas de amortiguamiento. En este procedimiento, la respuesta sísmica se obtiene reemplazando el sistema de cedencia por un sistema elástico lineal equivalente. Para evaluar la respuesta en el primer modo de vibración de la estructura, se desarrolla un modelo matemático del sistema, el cual incluye todas las características del sistema estructural y de los dispositivos de disipación de energía. Se construye la curva de capacidad, o curva de *pushover* del sistema para determinar la capacidad plástica. Se supone un valor del desplazamiento del último piso, y se determina el amortiguamiento efectivo del sistema a ese nivel de desplazamiento. Se reduce el espectro aplicando el correspondiente valor del factor de reducción de amortiguamiento, y se determina el nuevo valor del desplazamiento, definido como la intersección entre la curva de capacidad espectral y la curva de demanda espectral reducida. El proceso se repite hasta lograr una convergencia satisfactoria. A este nivel de desplazamiento se obtiene por métodos modales los desplazamientos en los pisos inferiores, fuerzas inerciales, aceleraciones, velocidades, y acciones de diseño. La contribución de los modos más altos a la respuesta total se calcula utilizando el mismo método, considerando que la estructura permanece

elástica, y luego se obtienen acciones resultantes utilizando una regla de combinación.

En el caso de sistemas de amortiguamiento dependientes de la velocidad, como el que se presenta en este estudio, la respuesta del sistema en cada modo, debe ser evaluada en tres estados límites: Máximo desplazamiento, máxima velocidad, y máxima aceleración.

Se reconoce la capacidad del sistema de amortiguamiento para reducir tanto la demanda sísmica, como la respuesta de desplazamiento de una estructura. Ramírez et al. 2002b [8] desarrollo la base técnica para la reducción de 25 % en el cortante basal en estructuras con sistemas de amortiguamiento adicional, respecto al valor del cortante basal en estructuras sin sistemas de amortiguamiento, V. En consecuencia, ASCE 7-05 acepta la reducción de la capacidad a corte de la estructura a $0.75V$, en estructuras con sistema de amortiguamiento.

2.2 Definición del Problema

Se examina un edificio de concreto reforzado de seis (6) pisos con un sistema estructural a base de pórticos de momento especiales, diseñado con una resistencia a cortante V. Luego se propone una estructura con resistencia reducida a cortante de $0.75V$, a la cual se le incorpora un sistema de amortiguadores viscosos lineales. Los análisis estructurales, para establecer las propiedades dinámicas de los modelos, han sido llevados a cabo a partir de un modelo tridimensional de la estructura, utilizando el programa SAP-2000 V15.0 [12]. La respuesta global de los modelos se evalúa utilizando el Método RSA incluido en el capítulo 18 del ASCE-7-05. Ambos modelos son dimensionados y diseñados para satisfacer el mismo nivel de desempeño. El diseño por resistencia se lleva a cabo de acuerdo a ACI-318-08 [13], y finalmente se compara el costo del sistema lateral de ambos modelos.

2.3 Definición del Modelo de Referencia

El modelo de referencia consiste de un edificio de concreto reforzado de seis plantas para uso residencial, ubicado en la ciudad de Panamá en suelo tipo B. El edificio tiene dimensiones en planta de 30 x 48 m, y consta de seis niveles con altura de entrepiso de 4.5m en el primer nivel, y de 3.0 m en los demás niveles, para una altura total de 19.50 m. Se considera una losa de piso tipo placa plana postensada de 200 mm de espesor. El peso sísmico efectivo en cada piso se estima en 1.15 ton/m², o sea un peso de 1650 ton/planta, y un peso sísmico total del edificio de 9900 ton. La figura 1 muestra la planta y elevación del edificio.

La demanda sísmica en la ciudad de Panamá está caracterizada según el espectro de diseño del ASCE-7-05 con parámetros espectrales de $S_S = 1.2$ y $S_1 = 0.45$. El sistema de resistencia lateral en ambas direcciones ortogonales de la estructura consiste de pórticos especiales de momento de concreto reforzado, ubicados en el perímetro de la planta. Son dos pórticos en la dirección E-O, y dos pórticos en la dirección N-S, tal como se muestra en la figura 1.

El cortante basal requerido según ASCE-7-05 es $V = 386$ ton. El sistema de resistencia lateral ha sido dimensionado y diseñado según ACI-318-08 para permitir un desplazamiento máximo de 12 cms. en el centro de masas del último piso, bajo el sismo de servicio. El modelo de referencia presenta un período fundamental de vibración de $T = 1.29$ s.

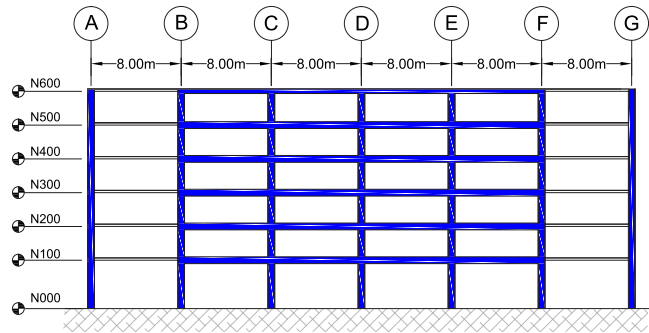
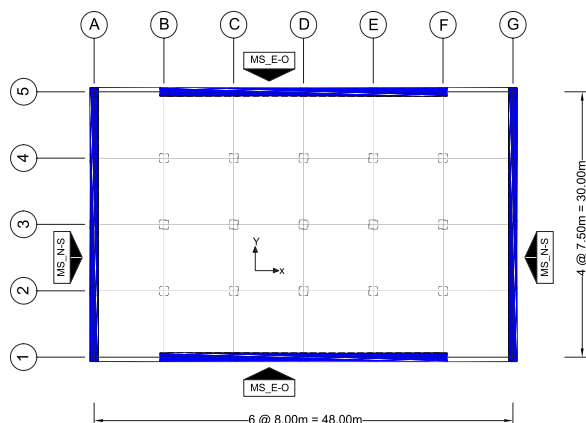


Figura 1. Vista de planta y elevación del edificio.

2.4 Definición del Modelo Reducido

Cuando se utiliza un sistema de amortiguamiento adicional, el ASCE 7-05 permite la reducción de la capacidad a cortante a:

$$V_{\min} = 0.75 V \quad (1)$$

Se ha dimensionado el modelo reducido para producir una resistencia a cortante basal $V_{\min} = 290$ Ton, aproximadamente igual al 75 % del cortante basal V . Este modelo tiene un período fundamental de vibración de $T = 1.71$ s. Es importante indicar que este modelo tiene una rigidez equivalente a 80 % de la rigidez del modelo de referencia. El desplazamiento lateral en el centro de masas del último piso de este modelo, bajo el sismo de servicio, es de 16.67 cm, excediendo en 39 % el desplazamiento objetivo de 12 cms. La figura 2 muestra las curvas de *pushover* del modelo de referencia y del modelo reducido. Tal como se observa en la figura 2, la resistencia plástica del modelo de referencia es $V_p = 426$ ton, mientras que en el modelo reducido es de $V_p = 319$ ton. Obsérvese que la resistencia plástica del modelo reducido es aproximadamente 75 % de la resistencia plástica del modelo de referencia.

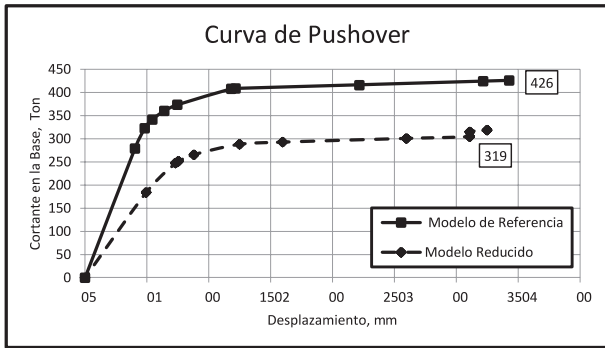


Figura 2. Gráficas de análisis estático no lineal *Pushover*.

La figura 3, muestra la ubicación de las articulaciones plásticas del pórtico del modelo de referencia, y del modelo reducido, correspondientes al sismo de diseño. La máxima rotación plástica ocurre en el extremo de la viga del nivel 300 en el modelo de referencia con un valor de 0.00739 radianes, mientras que en el modelo reducido la máxima rotación plástica ocurre en el nivel 100 con un valor de 0.0113 radianes, tal como se indica en la figura 3. Es decir, la máxima rotación plástica del modelo reducido presenta un incremento de 48 % respecto a la máxima rotación plástica en el modelo de referencia.

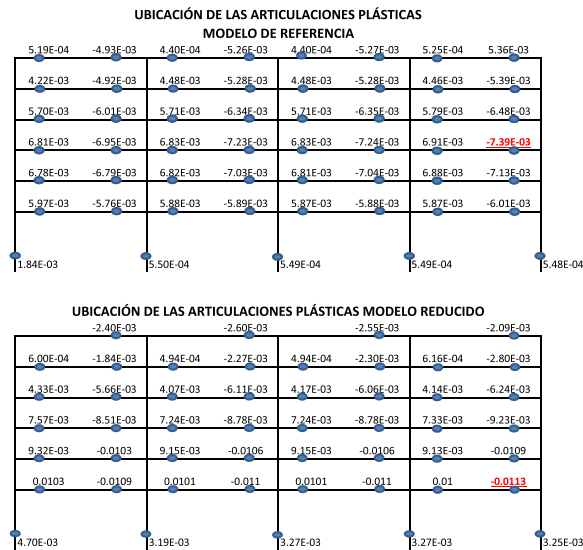


Figura 3. Ubicación de articulaciones plásticas y valor de rotación en radianes.

2.5 Amortiguamiento Requerido

La estructura del modelo reducido no es capaz de atender por sí mismo la demanda sísmica de diseño, V. Asimismo, debido a la reducción de rigidez de este modelo, el desplazamiento lateral estimado del centro de masas del último nivel del modelo reducido, excede el desplazamiento objetivo de 12 cm. Para satisfacer los objetivos del diseño se propone incorporar un sistema de amortiguamiento con dispositivos viscosos lineales, capaz de proveer un amortiguamiento adicional, bajo condiciones elásticas, de $\beta_v = 9\%$. Este amortiguamiento adicional se proveerá mediante dispositivos viscosos lineales, con constante de amortiguamiento, C, instalados en cada uno de los cuatro pórticos perimetrales, sobre puntales tipo “Chevron”, tal como se muestra en la figura 4.

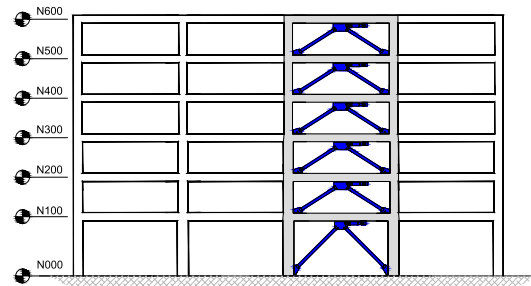


Figura 4. Marco del modelo reducido con dispositivos de amortiguamiento en configuración “Chevron”.

La constante de amortiguamiento se establece tomando en consideración el período fundamental de la estructura y las amplitudes modales del primer modo, a partir de la ecuación (2) del ASCE 7-05, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$C_j = \left(\frac{4\pi}{T_m} \right) \beta_{vm} \frac{\sum \left(\frac{w_i}{s} \right) \phi_{im}^2}{\sum \phi_{rj}^2} \quad (2)$$

Donde, C_j es la constante del amortiguador, T_m es el período del modo m^{th} de vibración, β_{vm} es el porcentaje de amortiguamiento viscoso adicional,

w_i es el peso tributario del marco en su respectivo nivel i , ϕ_{im} es la amplitud modal de cada nivel ϕ_{ij} es la amplitud modal relativa, y “ g ” es el valor de la aceleración de la gravedad.

El sistema de amortiguamiento propuesto considera que todos los dispositivos tienen la misma constante de amortiguamiento, C . En este caso, la constante de amortiguamiento resultante de la aplicación de la ecuación (2) al sistema propuesto es $C = 9.95$ Tons/cm

3. Análisis y resultados

La respuesta de desplazamiento de ambos modelos es evaluada utilizando los procedimientos de ASCE-7-05 para estructuras con sistemas de amortiguamiento. En el análisis de la respuesta de estructuras con sistema de amortiguamiento viscoso se definen tres estados límites: (a) Máximo Desplazamiento, (b) Máxima Velocidad y, (c) Máxima Aceleración. En cada estado se evalúa la respuesta de desplazamiento, así como las fuerzas inerciales, cortante, velocidades y aceleraciones impuestas al sistema por el sismo de diseño, DBE. Estas acciones son determinadas a partir de las siguientes expresiones:

Fuerza lateral inercial:

$$F_{im} = w_i \phi_{im} \frac{\Gamma_m}{\bar{W}_m} V_m \quad (3)$$

Donde, para cada modo m , y nivel i , F_{im} es la fuerza lateral de diseño en el estado de máximo desplazamiento, ϕ_{im} es la amplitud modal, w_i es el peso reactivo del piso correspondiente al pórtico, T_m es el factor de participación de modo m^{th} , \bar{W}_m es el peso modal, y V_m es el valor del cortante basal.

Velocidad relativa de piso:

$$\nabla_{1D} = \frac{2\pi}{T_{1D}} \Delta_{1D} \quad (4)$$

Donde, ∇_{1D} es la velocidad del piso, T_{1D} es el período efectivo, Δ_{1D} es la deriva de piso.

Fuerza axial en el dispositivo:

$$Fd_{i1D} = C_i \nabla_{i1D} \quad (5)$$

Donde, F_{di1D} es la fuerza en el dispositivo de amortiguamiento, C_i es la constante de amortiguamiento, ∇_{i1D} es la velocidad de piso.

Cortante en estado de máxima aceleración:

$$V_{i1MAX} = CF_1 \cdot V_{i1} \Big|_{MaxDesp} + CF_2 \cdot V_{i1} \Big|_{MaxVel} \quad (6)$$

Donde, V_{i1MAX} es el máximo cortante de nivel en estado de máxima aceleración, CF_1 y CF_2 son los coeficientes de fuerza.

Similarmente, se establece la respuesta en los tres estados correspondientes al Máximo Sismo Creíble, MCE, con el objeto de diseñar los elementos del sistema de amortiguamiento, tal cual lo exige el ASCE-7-05. En cada caso, se incluye la participación de los tres primeros modos de vibración, y se estima la respuesta resultante utilizando la regla de combinación SRSS. Los resultados de estos análisis se muestran en el tabla 1.

Tabla 1. Resultados en los tres estados para DBE y MCE

Cantidad	Unidad	Método SRSS	
		DBE	MCE
Estado de Máximo Desplazamiento			
Deriva, Δ_m	mm	12	18
		21	32
		26	38
		25	38
		24	36
		24	36
Actual Fuerza de Cortante en Piso V_m	Tonf	58	87
		95	143
		115	173
		132	198
		152	228
		168	153
Estado de Máxima Velocidad			
Fuerza en el Dispositivo de Amortiguamiento, F_{dm}	Tonf	86	129
		106	159
		98	147
		81	121
		80	120
		95	142
Estado de Máxima Aceleración			
Máximo Cortante entre Piso, V_m max	Ton	99	148
		137	206
		150	225
		158	237
		177	266
		199	299

La resistencia de los elementos de la estructura completa se verificó, utilizando la envolvente de las máximas fuerzas resultantes en el estado de máximo desplazamiento y en el estado de máxima aceleración. Se utilizaron las combinaciones de carga aplicables según ASCE-7-05, y se verificó resistencia según ACI-318-08. Por otro lado, el sistema de amortiguamiento, el cual incluye todos los elementos de conexión del dispositivo, y de la estructura del pórtico donde se conectan los dispositivos, fue diseñado para resistir el escenario más desfavorable de combinaciones de cargas, para las fuerzas del sismo máximo considerado MCE, como lo establece la sección 18.7.1.2 de ASCE-7-05.

La tabla (2), muestra las características del disipador viscoso lineal, respectivamente. El stroke se refiere a la tolerancia de desplazamiento axial del pistón del dispositivo, para acomodar el desplazamiento esperado durante el máximo sismo creíble, MCE.

Tabla 2. Propiedades de los dispositivos de amortiguamiento

Nivel	Fuerza en el Dispositivo de amortiguamiento (Ton)	Constante de Amortiguamiento (Ton.s/cm)	Stroke (cm)
600	129	9.95	1.84
500	158	9.95	3.17
400	146	9.95	3.84
300	121	9.95	3.76
200	120	9.95	3.64
100	141	9.95	3.59

Basados en información de las curvas de *pushover* de ambos modelos, se determinó la respuesta inelástica de la estructura al nivel de desplazamiento objetivo de 12 cms en el último piso del edificio. De interés en este caso, es presentar las rotaciones inelásticas en las articulaciones plásticas desarrolladas a ese nivel de desplazamiento. Estas rotaciones inelásticas proveen un indicativo del nivel de daño en las secciones más solicitadas. La figura 5, muestra los valores de rotación

plástica obtenidos en el modelo de referencia, y en el modelo reducido, incluyendo el sistema de amortiguamiento viscoso.

Como se observa en la figura 5, el número de secciones que han desarrollado articulaciones plásticas en el modelo reducido de 0.75V, al cual se le instaló el sistema de amortiguamiento, es menor al número de secciones con articulaciones plásticas del modelo de referencia, diseñado para atender la demanda sísmica V. Adicionalmente, se observa que la magnitud de la mayoría de las rotaciones plásticas reportadas en el modelo reducido es sustancialmente menor a las del modelo de referencia.

Es de interés también notar, según se indica en la figura 5 que la máxima rotación plástica en el modelo reducido es de 0.00713 rads, y se produce en la viga del nivel 100, mientras que en el modelo de referencia es de 0.00739 rads, y se produce en la viga del nivel 300, con una diferencia de tan solo 0.00026 rads. Adicionalmente, se debe observar que la rotación máxima en el modelo reducido con sistema de amortiguamiento, es 58 % menor a la rotación plástica máxima del mismo modelo, sin sistema de amortiguamiento.

Se llevó a cabo un estimado de costos del sistema de resistencia lateral de ambos modelos. Se reporta el volumen de concreto, y la cuantía de acero de refuerzo de los cuatro pórticos de momento del modelo de referencia, diseñado para acomodar "V" mediante una estructura convencional. Asimismo, se reporta el volumen de concreto y la cuantía de refuerzo de los cuatro pórticos reducidos del modelo diseñado para acomodar "0.75V", incluyendo el sistema de amortiguamiento. Adicionalmente, se incluyen los costos correspondientes a los puntales, placas de soporte, y conexiones de la estructura de soporte del disipador. La tabla 3 muestra los resultados obtenidos.

Como se puede observar el costo global estimado del sistema lateral del modelo reducido con la adición del sistema de amortiguamiento es USD 506,800.00, mientras que el costo global

estimado del sistema lateral del modelo de referencia es USD 281,150.00. Es decir, se presenta un incremento de USD 225,650.00 en el sistema reducido respecto al costo del sistema lateral del modelo de referencia. Si se toma este diferencial, y se divide entre el área de construcción total del proyecto, 8640 m², se obtiene que el incremento del costo unitario de la estructura reducida a 0.75V con el sistema de amortiguamiento propuesto es de aproximadamente USD 26.00/m².

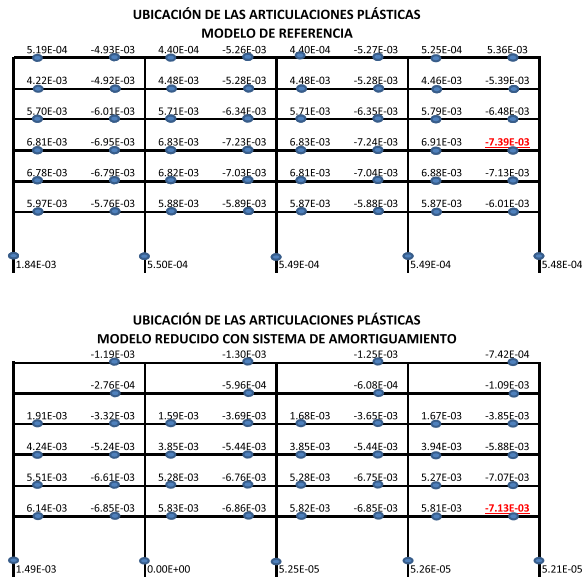


Figura 4. Formación de articulaciones plásticas y valor de rotación en radianes para un desplazamiento de 12 cm en el último piso.

Tabla 3. Cantidades y costos

Modelo de Referencia		
	Cantidad	Costo (USD)
Concreto	439 m ³	153,650.00
Acero de Refuerzo	85 Ton	127,500.00
Costo del Sistema Lateral		281,150.00
Modelo Reducido		
	Cantidad	Costo (USD)
Concreto	328 m ³	114,800.00
Acero de Refuerzo	78 Ton	117,000.00
Costo del Sistema Lateral		231,800.00
Sistema de Amortiguamiento		
Acero Estructural	10 Ton	25,000.00
Dispositivos	-	250,000.00
Costo TOTAL		506,800.00

4. Conclusiones

Se ha desarrollado el diseño de un edificio de concreto reforzado de seis niveles con el objeto de estudiar las ventajas y desventajas de incorporar un sistema de amortiguamiento. Para ello se ha considerado un edificio de referencia diseñado para atender un cortante basal V, y satisfacer un desplazamiento máximo de 12 cm en el último piso, bajo el sismo de servicio. Luego, se propone una estructura con capacidad reducida para atender 0.75 V, y se le incorpora un sistema de amortiguamiento con dispositivos viscosos lineales, el cual rinde un amortiguamiento adicional, bajo condiciones elásticas, de 9 %. Se evalúa la respuesta del sistema utilizando el método RSA de ASCE-7-05, para los estados límites de máximo desplazamiento, máxima velocidad, y máxima aceleración. Se verifica la resistencia de la estructura del pórtico y del sistema de amortiguamiento, y cumplimiento de nivel de desempeño pre-establecido. Se dimensionan los dispositivos y la estructura de soporte del dispositivo. Finalmente se lleva a cabo un análisis comparativo de costo del sistema lateral propuesto para ambos modelos.

A continuación se listan las conclusiones más relevantes de este estudio:

1. El incremento de costo en la estructura reducida con amortiguamiento se traduce en un aumento de USD 26.00/m² en el costo de la estructura global del proyecto, lo cual representa solamente un 3 % de incremento en el costo del edificio completo.
2. La cantidad y magnitud de las rotaciones en la mayoría de las secciones plastificadas en el sistema reducido con sistema de amortiguamiento incluido son menores. Es decir, el daño en el modelo de referencia es mayor. Esto implica que el costo de reparación de daños en la estructura del edificio de referencia, bajo el sismo de diseño, y muy probablemente los costos de coberturas de seguros para el edificio durante su vida útil, serán mayores. A largo plazo el 3 % de sobre costo inicial en la estructura reducida con sistema de amortiguamiento, se diluye frente a los costos de reparación y de cobertura de seguros, aplicables al modelo de referencia. La reducción en la capacidad de la estructura, y la adición del sistema de amortiguamiento, ha demostrado que es económicamente atractiva, y permite un mejor desempeño de la estructura.

Referencias Bibliográficas

- [1] National Earthquake Hazard Reduction Program, "NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Federal Emergency Management Agency, Report No FEMA 450, Washington, D.C., 2003.
- [2] ASCE 7-05, «Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures,» American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2005.
- [3] O. M. Ramirez, M. C. Constantinou, C. A. Kircher, A. S. Whittaker, M. W. Johnson, J. D. Gomez y C. Z. Chrysostomou, «Development and evaluation of simplified Procedures for Analysis and Design of Buildings with Passive Energy Dissipation Systems,» Technical Report MCEER-00-0010. State University of New York at Buffalo, Buffalo, N.Y. December 8, 2000.
- [4] FEMA, «Federal Emergency Management Agency, NEHRP Guideline for the Seismic Rehabilitation of Buildings and NEHRP Commentary on The Guideline for The Seismic Rehabilitation of Building,» Reports No. FEMA-273 and FEMA-274, Washington, D.C., 1997.
- [5] S. A. Freeman, J. P. Nicoletti and J. V. Tyrell, "Evaluation of Existing Buildings for Seismic Risk- A Case of Puget Sound Naval Shipyard, Bremerton, Washington,," in *Proceedings of the First U.S. National Conference of Earthquake Engineering, Engineering Research Institute, Oakland, California, 1975.*
- [6] S. Freeman, "Prediction of Response of Concrete Buildings to Severe Earthquake Motion," in *Douglas McHenry International Symposium on Concrete and Concrete Structures*, Detroit, Michigan, American Concrete Institute, 1978, pp. 589-606.
- [7] O. M. Ramirez, M. C. Constantinou, C. A. Kircher, A. S. Whittaker, M. W. Johnson, J. D. Gomez and C. Z. Chrysostomou, "Evaluation of Simplified Methods of Analysis of Yielding Structures with Damping Systems. *Earthquake Engineering Institute,*" *Earthquake Spectra*, vol. 18, no. 3, pp. 501-530, Agosto 2002.
- [8] O. M. Ramirez, M. C. Constantinou, C. A. Kircher, A. S. Whittaker, M. W. Johnson, J. D. Gomez and C. Z. Chrysostomou, "Elastic and Inelastic Response Buildings with Damping Systems," *Earthquake Spectra*, vol. 18, no. 3, pp. 531-547, Agosto 2002.
- [9] A. S. Whittaker, M. C. Constantinou, O. M. Ramirez, M. W. Johnson and C. Z. Chrysostomou, "Equivalent Lateral Force and Modal Analysis Procedures of the 2000 NEHRP Provisions for Buildings with Damping Systems," *Earthquake Spectra*, vol. 19, no. 4, pp. 959-980, November 2003
- [10] O. M. Ramirez, M. C. Constantinou, C. A. Kircher, A. S. Whittaker, M. W. Johnson, J. D. Gomez y C. Z. Chrysostomou, «Validation of the 2000 NEHRP Provisions Lateral Force and Modal Analysis Procedures for Buildings with Damping Systems,» *Earthquake Spectra*, vol. 19, n° 4, pp. 981-999, November 2003.
- [11] REP-2014, Reglamento Estructural Panameño, Junta Técnica de Ingeniería y Arquitectura, Comisión Permanente del Reglamento Estructural Panameño, Panamá, 2014.
- [12] CSI, Computers & Structures Inc., "SAP 2000 V.15, Estructural and Earthquake Engineering Software," California, 2011.
- [13] ACI 318-08, «Requisitos de Reglamento Para Concreto Estructural y Comentarios,» American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2008.