

DISEÑO BASADO EN DESPLAZAMIENTO APLICADO A UN EDIFICIO EQUIPADO CON DISIPADORES DE ENERGÍA

DISPLACEMENT-BASED DESIGN TO A BUILDING WITH ENERGY DISSIPATIVE SYSTEM

Cristian Bay^a y Gustavo Palazzo^b

^aGEDEC, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Rafael, Urquiza 314B, 5600 San Rafael, Mendoza, Argentina, cbay@frsr.utn.edu.ar, <http://www.frsr.utn.edu.ar>

^bCeReDeTeC, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, Rodríguez 273, 4200 Mendoza, Argentina, <http://www.frm.utn.edu.ar>

Palabras clave: Diseño por desplazamientos, Disipadores, Estructuras sismorresistente

Resumen. Los sistemas pasivos de disipación de energía son cada vez más utilizados en el diseño de estructuras nuevas, una de las principales ventajas es concentrar el daño en dispositivos diseñados para tal fin. Además, los reglamentos internacionales cada vez imponen más a la utilización del análisis dinámico no lineal para estructuras equipadas con sistemas de disipación pasiva de energía, para lo cual resulta necesario algún método de diseño preliminar que permita estimar las propiedades de los disipadores y elementos estructurales. En este trabajo se presenta un método de diseño, de fácil implementación y bajo costo computacional, para estimar las propiedades de los disipadores en un edificio de media altura, de hormigón armado, emplazado en una zona de elevada peligrosidad sísmica. Para evaluar la eficiencia del método se somete a la estructura a un análisis dinámico no lineal conforme lo indica la norma norteamericana. Se utilizan siete registros característicos de la zona. En base a la consideración de varios parámetros de respuesta se muestra la eficiencia del procedimiento de diseño propuesto.

Keywords: Instructions, AMCA style, Computational Mechanics, article.

Abstract. Passive energy dissipation systems are increasingly used in the design of new structures, one of the main advantages is to concentrate the damage in devices designed for this purpose. In addition, international regulations increasingly impose the use of nonlinear dynamic analysis for structures equipped with passive energy dissipation systems, for which a preliminary design method is necessary to estimate the properties of dissipators and structural elements. This paper presents a design method, easy to implement and with low computational cost, to estimate the properties of dissipators in a medium-height reinforced concrete building, located in an area of high seismic danger. To evaluate the efficiency of the method, the structure is subjected to a non-linear dynamic analysis as indicated by the North American standard. Seven characteristic records of the area are used. Based on the consideration of several response parameters, the efficiency of the proposed design procedure is shown.

1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas pasivos de disipación de energía permiten concentrar el daño en ciertos dispositivos dispuestos en la estructura para tal fin, esta es la razón por la que cada vez son más utilizados para el refuerzo de estructuras existentes, pero también para estructuras nuevas (Christopoulos y Filiatrault; 2007).

Dentro de los sistemas de disipación de energía se encuentran los sistemas histeréticos, los cuales permiten incorporar rigidez y resistencia a la estructura, además de resultar más económicos que los demás sistemas (viscosos, friccionales, etc). Incluso dentro de los sistemas histeréticos, las barras de pandeo restringido (BPR) son un sistema muy desarrollado para aplicar en estructuras nuevas (Christopoulos y Filiatrault; 2007). Tal es el caso, que varias normas internacionales consideran las BPR como un sistema estructural y no como un sistema de disipación (ASCE/SEI 7, 2016).

El diseño estructural de estos sistemas ha evolucionado conforme avanzaron los métodos de diseño para estructuras convencionales, y conocidos los problemas conceptuales de los métodos de diseño basados en fuerzas, es que en el último tiempo se han desarrollado métodos de diseño basados en desplazamientos (Priestley, 1993). Estos métodos utilizan el desplazamiento como punto de partida, a diferencia de los métodos basados en fuerzas que lo utilizan como verificación final.

Los métodos basados en desplazamiento comienzan a vincularse con el diseño de estructuras equipadas con sistemas de disipación. Los primeros desarrollos son Lin *et al.* (2003), siguieron Kim y Choi (2004) y Ponzo *et al.* (2009). Ponzo *et al.* (2009) determinaron las propiedades del sistema de disipación imponiendo la equivalencia entre la energía almacenada en un sistema elástico equivalente de un grado de libertad (estructura original) y en el sistema elastoplástico (sistema de disipación). Bergami y Nuti (2013) desarrollaron un procedimiento para estructuras existentes basado en desplazamientos que utiliza el método del espectro de capacidad. Mazza y Vulcano (2015) desarrollaron un método donde se fija un desplazamiento de desempeño de la estructura. Recientemente se desarrolló un método (Bay, 2021) que parte fundamentalmente del método propuesto por Mazza y Vulcano (2015) e incorpora una forma distinta de considerar el amortiguamiento equivalente del sistema en paralelo formado por la estructura convencional y el sistema de disipación. Este método permite estimar las propiedades de los sistemas de disipación en el refuerzo de estructuras existentes y mediante algunas modificaciones es factible su aplicación a estructuras nuevas.

Además, el avance de los métodos de análisis dinámico no lineal (ADNL), conforme avanzan los procesadores computacionales, ha generado que las normativas internacionales prácticamente acepten únicamente estos métodos para estructuras que incorporan sistemas de disipación (ASCE/SEI 7, 2016). Sin embargo, estos métodos requieren de tiempos computacionales extensos, lo cual hace necesario el desarrollo de métodos de diseño simples y de fácil implementación que permitan establecer propiedades a priori de los disipadores.

El objetivo de este trabajo es implementar el método desarrollado por Bay (2021) a una estructura nueva de hormigón armado, de mediana altura, y situada en una zona de elevada peligrosidad sísmica. Para ello se siguen los lineamientos del capítulo 18 del reglamento americano, los cuales han servido de base para el proyecto de reglamento argentino sobre disipación de energía que prontamente saldrá a discusión pública nacional.

En el apartado 2 se presenta el edificio, en el 3 el diseño de la estructura y del sistema de disipación, para luego contrastar los resultados obtenidos con ADNL. Finalmente se exponen las conclusiones del trabajo.

2 EDIFICIO EN ESTUDIO

Se presenta un edificio de 8 niveles con pórticos de hormigón armado en las dos direcciones y sistema de entrepiso de losas macizas para la implementación de disipadores histeréticos del tipo BPR.

Para los fines del estudio, se considera que el edificio se encuentra ubicado en zona del gran Mendoza, con alta peligrosidad sísmica, suelo tipo D (S_D), el destino es comercial en planta baja y viviendas en los restantes niveles.

En la Figura 1 se muestra una planta típica del edificio, con dimensiones de 15 m en dirección X y 28 m en dirección Y. El primer nivel tiene 4 m de altura y los 7 restantes 3.5 m, en total 28.5 m de altura desde el nivel de referencia a la azotea.

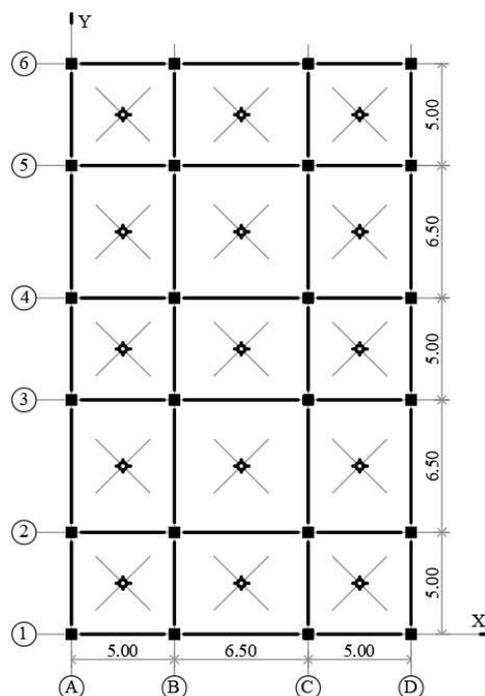


Figura 1 Esquema estructural planta típica

En la Figura 2 se presentan los planos estructurales exteriores donde se ubican los disipadores. Los planos estructurales intermedios tienen las mismas secciones de hormigón armado, pero sin BPR.

Además, del peso propio de la estructura se ha considerado una carga permanente (D) de 2.5 kN/m^2 en niveles de 1 a 7, y de 1.5 kN/m^2 en el nivel 8. La sobrecarga por uso (L) se ha considerado de 2.5 kN/m^2 en niveles de 1 a 7 y de 1 kN/m^2 en el nivel 8. Todo de acuerdo con normativa argentina. El peso total para el análisis sísmico resulta de 33,580 MN (aproximadamente 10 kN/m^2).

Para los materiales se ha considerado en columnas hasta el nivel 4 hormigón H-40 ($f'_c = 40 \text{ Mpa}$; $E_c = 29.7 \text{ Gpa}$) y para el resto de las columnas H-30 ($f'_c = 30 \text{ Mpa}$; $E_c = 25.74 \text{ Gpa}$). En vigas y losas de todos los niveles se ha considerado H-25 ($f'_c = 25 \text{ Mpa}$; $E_c = 23.50 \text{ Gpa}$). El acero de refuerzo utilizado es ADN420S ($F_y = 420 \text{ Mpa}$ y $E_s = 200 \text{ Gpa}$), todo según normativa sismorresistente argentina ([INPRES-CIRSOC 103-II-2005](#)).

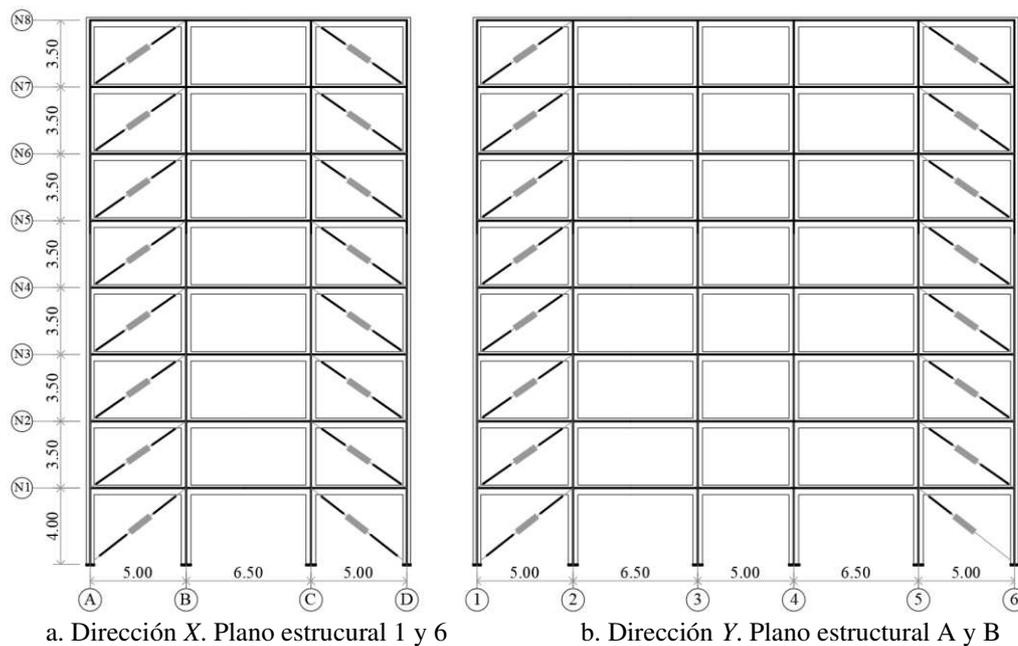


Figura 2. Planos estructurales exteriores y ubicación de las BPR.

3 DISEÑO ESTRUCTURAL CON EL MÉTODO PROPUESTO

En primera instancia se describe el procedimiento de diseño basado en desplazamiento para el refuerzo de estructuras mediante disipadores histeréticos (Bay, 2021) y luego se presentan los cambios para aplicar la metodología a estructuras nuevas.

La formulación considera una estructura primitiva o sistema original (SO) que requiere un refuerzo estructural para mejorar su desempeño. Este refuerzo estructural se materializa mediante un sistema de disipación (SD) histerético en este caso. Entonces, la estructura o sistema reforzado (SR) será el resultado de SO+SD.

El SO y SD trabajan en paralelo (Figura 3), entonces las rigideces y resistencias de ambos sistemas se suman para obtener las propiedades de la estructura reforzada (Lin, et al., 2003; Priestley, et al., 2007; Mazza y Vulcano, 2015). El amortiguamiento viscoso equivalente (AVE) del SR se determina en función del AVE y del corte basal que aporta cada uno de los sistemas (Bay, 2019; 2021). Para el SO se considera 5%.

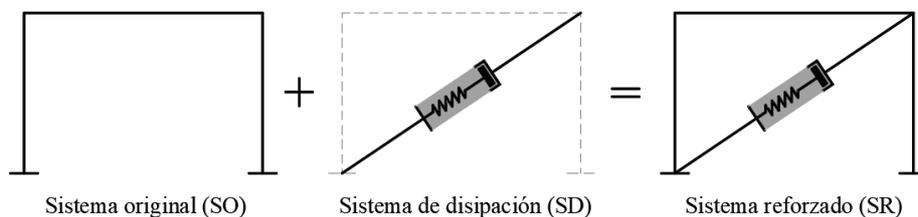


Figura 3. Representación del sistema en paralelo.

El método propuesto es de simple implementación y no requiere software de cálculo estructural, es por ello que resulta una herramienta de bajo costo que permite determinar las propiedades del sistema de disipación para realizar el ADNL requerido por los reglamentos actuales. En estructuras existentes el método ha sido validado en otras publicaciones (Bay 2019; 2020; 2021)

Para aplicar el método a una edificación nueva es necesario compatibilizar la nomenclatura utilizada por el reglamento con la adoptada en el desarrollo original. El reglamento (ASCE/SEI 7, 2016) designa como sistema sismorresistente (SSR) al sistema que resiste la fuerza sísmica pero no incluye al sistema de disipación. También el reglamento define al sistema de disipación (SD), y por último el reglamento define al sistema total como el SSR+SD, que para este trabajo será el sistema reforzado (SR). Entonces, el SO y SD deberán cumplir los requerimientos que establece el reglamento para SSR y SD, respectivamente.

En la primera parte se define la resistencia del SO o sistema sismorresistente, teniendo en cuenta el corte mínimo requerido por la normativa. Luego se define el desplazamiento objetivo, se consideran dos escenarios posibles terremoto de diseño (TD) y terremoto máximo considerado (TMC). Por último, en esta sección se diseña el sistema de disipación y se distribuyen las propiedades entre los distintos niveles y vanos de la estructura. Todo se realiza según establece el reglamento (ASCE-7, 2016).

3.1 Definición de la resistencia del SO

En el refuerzo de edificios, la resistencia del SO es un dato obtenido del análisis estático no lineal (AENL). Pero en el caso de edificios nuevo es una variable que se debe definir en base a algún criterio. En este caso se propone asignarle al SO la mínima resistencia que permite el reglamento para el sistema sismorresistente, SO.

El corte basal mínimo, V_{min} , se determina siguiendo el capítulo 6 de reglamento (INPRES-CIRSOC 103-I, 2018). Para el coeficiente mínimo, y considerando que el SO tiene que ser flexible, se utiliza el máximo periodo natural aproximado, T_{aMAX} , determinado en función de la altura de la construcción y la tipología estructural. Además, este periodo puede ser incrementado un valor de $C_u T_a$, resultando $T_{aMAX} = 1.33$ s. Considerando $R = 7$, $I = 1$, y el espectro de diseño para la zona y tipo de suelo definidos anteriormente, resulta un coeficiente sísmico estático, $C_s = 0.076$ y por lo tanto $V_{min} = 2553$ kN. Además, el reglamento americano exige que el SO resista el 75% del V_{min} , resultando $V_{SO} = 1915$ kN para dirección X e Y. Es importante recordar que para el reglamento esta resistencia, afectada por el factor de sobre resistencia, representa el momento en el cual se formará la primer rotula plástica en la estructura.

La rigidez del SO se define bajo el concepto que presente la menor rigidez posible, pero admitiendo la resistencia determinada en el párrafo anterior. Además, se tiene en cuenta el diseño por capacidad establecido según el reglamento argentino, el cual requiere que las columnas tengan una capacidad de entre 2 y 3 veces la capacidad de las vigas.

Bajo estos conceptos se define la rigidez y resistencia del SO. En la Figura 4 se presentan las secciones de hormigón armado y el acero de refuerzo en los extremos de vigas y columnas.

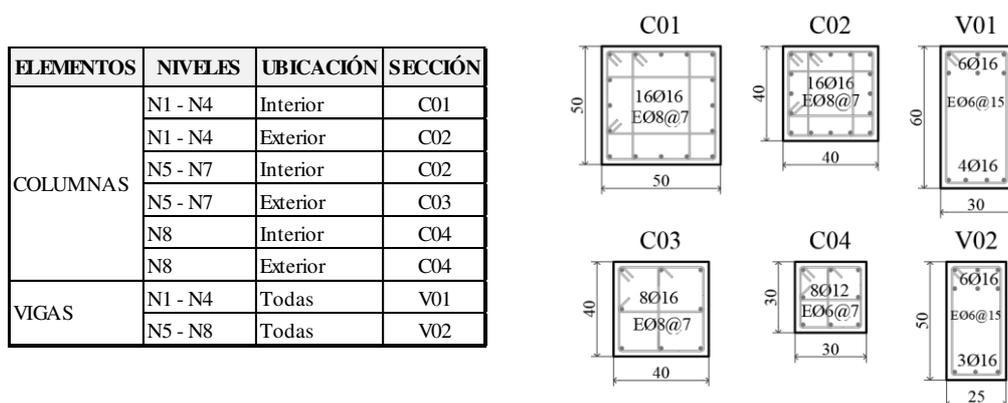


Figura 4. Secciones de hormigón armado en extremos de vigas y columnas.

Una vez definidas las secciones de la estructura, se somete el SO a un análisis modal y se determinan las propiedades dinámicas. Se obtiene un periodo fundamental de 2.18 s para dirección X y 2.12 s para dirección Y. Ambos periodos resultan superiores al utilizado para determinar el corte mínimo.

En términos de desplazamientos y distorsiones para el método estático se presenta la Figura 5. Se observan distorsiones máximas en X, para TD resulta 3.81% y para TMC 5.71%. Evidentemente el SD debe aportar rigidez para que las distorsiones cumplan las prescripciones de normativa (ASCE-7, 2016).

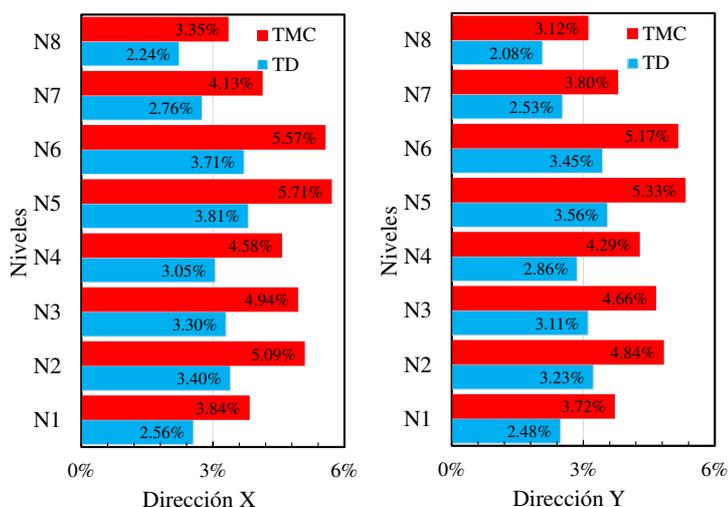


Figura 5. Distorsiones para la acción estáticas.

La estructura se diseñó para la carga estática mínima, no obstante, se realiza un AENL para mejorar la estimación del SO en cuanto a rigidez y resistencia. Para ello, se disponen rotulas concentradas en extremos de vigas y columnas definidas según los criterios del ASCE 41 (2017). En la Figura 6 se presenta la curva obtenida en color gris, negro la curva bilineal del sistema de varios grados de libertad (SVGL) y rojo la transformación al sistema equivalente de un grado de libertad (SUGLE). Las resistencias máximas fueron de 3190 kN y 3490 kN para dirección X e Y, en tanto que los desplazamientos a la fluencia 21.8 cm y 21.5 cm, los desplazamientos últimos superaron los 70 cm en ambos casos. En la figura se indica cuando la estructura alcanza el estado de ocupación inmediata según los lineamientos del reglamento ASCE 41 (2017).

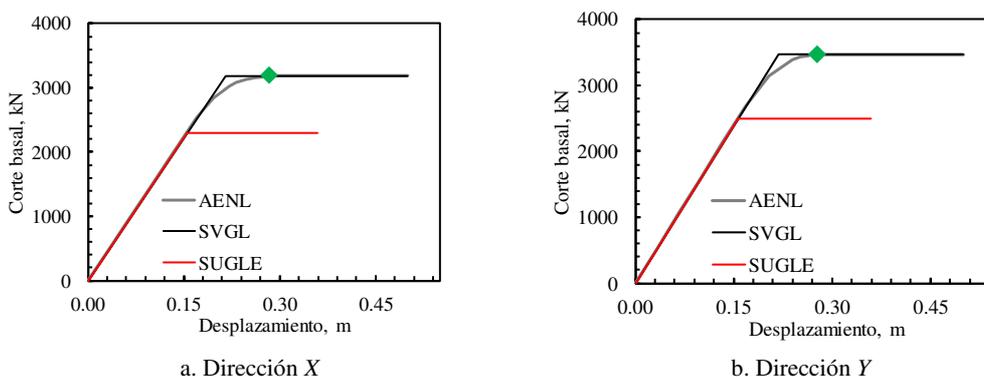


Figura 6. AENL del pórtico analizado y curva bilineal para SVGL y SUGLE.

Del AENL se observa que la estructura presenta una sobrerresistencia en dirección X de 1.67 (3190 kN / 1915 kN) y en dirección Y de 1.82 (3490 kN / 1915 kN), inferior al valor estimado por reglamento para este tipo de estructuras ($\Omega Cd / R = 2$). Cabe mencionar que la sobrerresistencia para el SO según el reglamento resulta $\Omega = 3$, pero en forma conservadora el reglamento supone la relación de coeficientes anteriores (Ramirez, et al., 2001).

Es importante destacar que, otra alternativa, en caso de no realizar el AENL, hubiese sido incrementar el corte de demanda por el factor ($\Omega Cd / R$) y utilizar este valor como resistencia que aporta el SO.

3.2 Desplazamiento objetivo

Para definir el desplazamiento objetivo se considera una distorsión máxima del 2.5% para TMC (57 cm) y 1.6% para TD (35 cm), consistentes con lo establecido en la norma estadounidense.

3.3 Diseño del sistema de disipación

Para el diseño de las BPR (según arreglo mostrado en la Figura 2) se sigue el algoritmo de diseño propuesto por Bay (2021) e implementado en un software CALDIS v1.0.

Las BPR tienen núcleo de acero F24 ($F_y = 237$ Mpa; $E_S = 200$ Gpa; $r_{SD} = 0.05$) y se admite una ductilidad de desplazamientos de 10 para TD y 20 para TMC.

En la Figura 7 se presenta una imagen del software donde se puede observar las propiedades, resistencia y rigidez, del SD necesarios para alcanzar los niveles de desempeño establecidos. El AVE resulta de 19.5% y 18.9% en dirección X e Y respectivamente. También se destaca el cumplimiento del requisito del TMC.

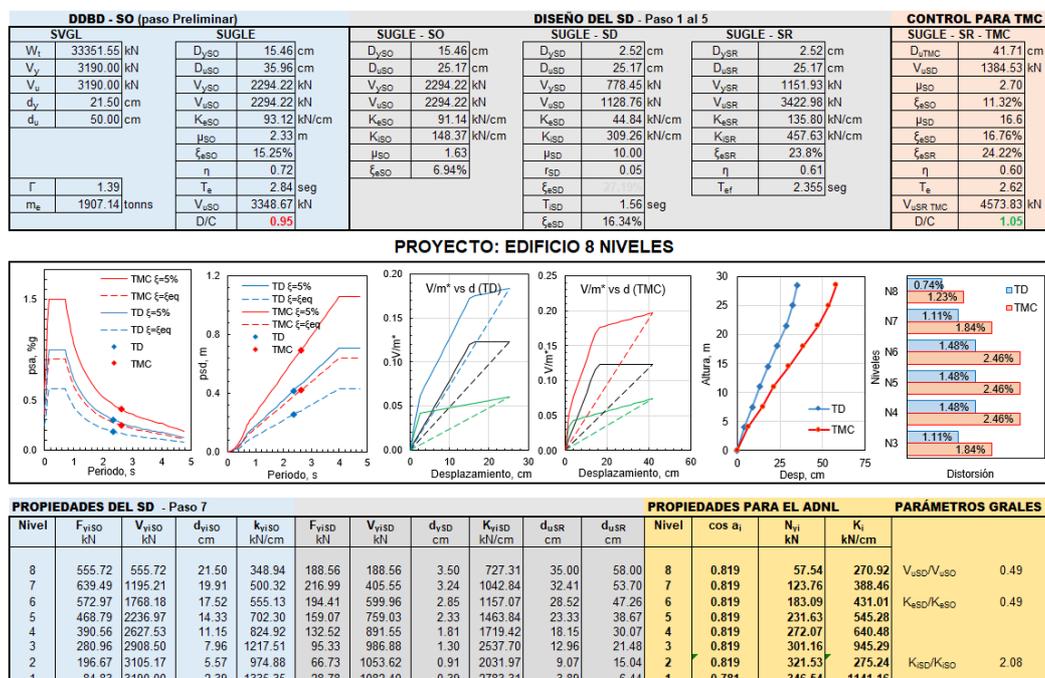


Figura 7. CALDIS v.1.1. Para dirección X.

Es importante destacar que, el esfuerzo de corte en la base se incrementa debido a la disminución del periodo por aumento de rigidez que aporta el SD. Entonces el SD absorbe un 49% de la resistencia que absorbe el SO en dirección X y un 42% en dirección Y. Estos

valores se muestran en el recuadro amarillo de la Figura 7.

En términos de rigidez inicial, el SD aporta 2.08 veces la rigidez del SO en dirección X y 1.81 veces en dirección Y. Esta rigidez es necesaria para que el SD desarrolle la ductilidad.

Finalmente, la Tabla 1 muestra el arreglo final de disipadores, donde se indican la cantidad por nivel (n_{SDi}), la resistencia ($v_{ySD,i,j}$) y rigidez ($k_{SD,i,j}$) que cada uno aporta.

Nivel	Dirección X			Dirección Y		
	n_{SDi}	$v_{ySD,i,j}$ kN	$k_{SD,i,j}$ kN/cm	n_{SDi}	$v_{ySD,i,j}$ kN	$k_{SD,i,j}$ kN/cm
8	4	57.54	270.92	4	52.97	249.38
7	4	123.76	388.46	4	113.92	357.57
6	4	183.09	431.01	4	168.53	396.73
5	4	231.63	545.28	4	213.21	501.92
4	4	272.07	640.48	4	250.43	786.07
3	4	301.16	945.29	4	279.89	658.90
2	4	321.53	756.91	4	298.64	703.03
1	4	346.54	1141.1	4	321.79	1059.6

Tabla 1. Propiedades de los dispositivos del sistema de disipación

De esta forma queda definido el SO y el SD de la estructura. Escapan a los objetivos del trabajo el diseño y verificación del sistema de disipación. A continuación, y para evaluar el diseño propuesto, se realiza un ADNL.

4 ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL

Para evaluar la eficiencia del método de diseño propuesto (MP) se contrastan los resultados con un ADNL.

Se realiza un modelo computacional de la estructura 3D con elementos *frame* para secciones de hormigón armado y elementos *link* para las BPR. En los elementos *frame* se disponen rotulas concentradas en los extremos de elementos, configuradas según el reglamento ASCE 41 (2017). Para la demanda sísmica se utilizan 7 registros, vibratorios no impulsivos, del FEMA P695 (2009) escalados por ajuste espectral, todo según indica el ASCE/SEI 7 (2016).

4.1 Comparación entre el ADNL y el MP

En la Figura 8a se presentan los desplazamientos en cubierta máximos promedio del ADNL y del MP para las dos direcciones. Para el TD se estimó un desplazamiento en el MP de 35 cm y el ADNL mostró 38.7 cm y 40.60 cm para cada dirección, es decir, un 13% superior. Esta diferencia se redujo para el TMC al 7%.

En la Figura 8b se presentan los cortes basales máximos promedios para ADNL y MP. Los cortes obtenidos para ADNL resultan superiores en un 40% a los previstos en el MP. Las diferencias entre ADNL y MP están asociadas a que el AENL se realizó para un peine proporcional al primer modo, muy conservador, respecto de otros peines (p.e. constante o proporcional a las masas).

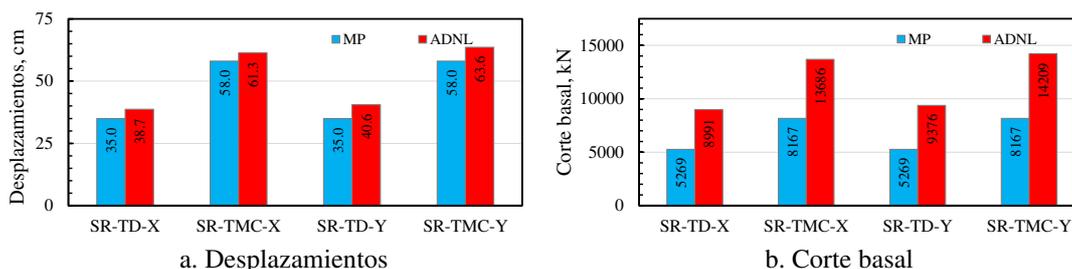


Figura 8. Comparación entre MP y ADNL en desplazamientos y corte basal.

En la Figura 9a se compara la distorsión entre ADNL y MP en dirección X, y en la Figura 9b para la dirección Y. Se observa que para TD la distorsión máxima en el ADNL es superior un 9% al MP incrementándose esta diferencia a un 18% para TMC. También se observa que el perfil de distorsiones tiene correlación entre el MP y el ADNL.

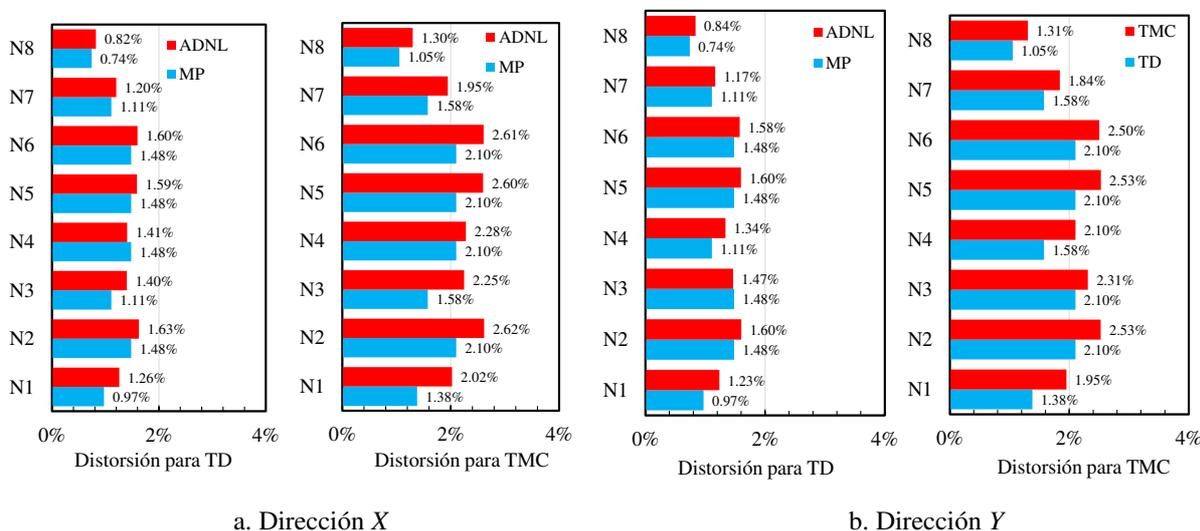


Figura 9. Comparación entre MP y ADNL en distorsiones.

Mediante los resultados en desplazamientos, distorsiones y cortes basales se valida el método propuesto. En términos de desplazamientos y distorsiones, principales variables a comparar, el ADNL arroja valores superiores al MP. Estas diferencias están asociadas a las limitaciones e hipótesis del método propuesto, pero también a la demanda sísmica. Otros resultados obtenidos para la estructura pueden observarse en Bay (2021).

5 CONCLUSIONES

Los sistemas pasivos de disipación de energía son cada vez más utilizados en el diseño de estructuras nuevas, una de las principales ventajas es concentrar el daño en dispositivos diseñados para tal fin. Se propuso en este trabajo implementar un método de diseño propuesto por Bay (2021) para estructuras nuevas con sistemas histeréticos de disipación de energía.

La estructura original se diseñó con el mínimo corte admitido por el reglamento estadounidense (base de nuestro futuro reglamento). Para este análisis 3D se consideraron 7 registros sísmicos como los que podrían afectar a edificios del gran Mendoza.

Los resultados del análisis dinámico no lineal mostraron que la incorporación del sistema de disipación permite cumplir con aspectos normativos de distorsiones de piso y

desplazamientos máximos.

De la comparación entre MP y ADNL se mostró que desplazamientos del ADNL resultan superiores al MP en 13% para TD y se reduce al 7% para TMC. En distorsiones la diferencia en TD es del 9% y se incrementa al 18% para TMC. Se destaca la importancia del método de escalamiento, que para este caso el espectro objetivo se incrementa en un 10%.

El aporte fundamental de este trabajo resulta en la aplicación de un método simple y de fácil implementación para el diseño de estructuras nuevas que incorporan sistemas histeréticos de disipación de energía.

REFERENCIAS

ASCE-7. *Minimum design loads for buildings and other structures.*, Reston, Virginia, EEUU: American Society of Civil Engineers. 2016

ASCE-41. *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*, Virginia, USA: American Society of Civil Engineers.

Bay, C. y Palazzo, G., 2019. Amortiguamiento Viscoso Equivalente en el Diseño Basado en Desplazamientos. *Revista Tecnología Y Ciencia*, Volumen 36, pp. 115-129.

Bay, C., Palazzo, G. y Prados, J., 2019. Diseño basado en desplazamiento para disipadores de energía empleado en refuerzo de edificios escolares. *Mecánica Computacional XXXVII*, pp. 129-138.

Bay, C. y Palazzo, G., 2020. Displacement based design procedure for the retrofitting structure with hysteretics damped braced. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 25(4), pp. 285-305.

Bay, C. 2021. Diseño basado en desplazamientos para el refuerzo de estructuras existentes. *Tesis doctoral. Universidad Tecnológica Nacional.*

Bergami, A. y Nutti, C., 2014. Design of Dissipative Braces for an Existing Strategic Building with a Pushover Based Procedure. *Journal of Civil Engineering and Architecture*.

Christopoulos C., Filiatrault A., 2007. *Principles of passive supplemental damping and seismic isolation*. IUSS Press—Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia, Pavia

INPRES-CIRSOC 103-I, 2018. *Reglamento argentino para construcciones sismorresistente. Parte I. Construcciones en general*. Bs. As.: INTI.

FEMA-P695, 2009. *Quantification of building seismic performance factors*, Washington: Federal Emergency Management Agency Publication.

Kim, J., Choi, H. y Min, K., 2003. Performance-based design of added viscous dampers using capacity spectrum method.. *Journal Structural Engineering*, pp. (7):1-24.

Lin, Y., Tsai, M., Hwang, J. y Chang, K., 2003. Direct displacement-based design for building with passive energy dissipation systems.. *Eng. Struct.*, pp. 251, 25-37.

Mazza, F. y Vulcano, A., 2014. Equivalent viscous damping for displacement-based seismic design of hysteretic damped braces for retrofitting framed buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, p. (12):2797–2819.

Ponzo, F., Dolce, M., Vigoriti, G. y Arleo, G., 2009. *Progettazione di controventi dissipativi a comportamento dipendente dagli spostamenti*. Bologna, Italia, s.n.

Priestley, M., 1993. Myths and fallacies in earthquake engineering – conflicts between design and reality.. *NZ National Society for Earthquake Engineering*, p. (3):26.

Priestley, M., Kowalsky, M. y Calvi, M., 2007. *Displacement Based Seismic Design Of Structure*. Pavia, Italia(Pavia): IUSS Press.

Ramirez, O., Constantinou, M., Kircher, C. & Whittaker, A. J. M. G. J. C. C., 2001. *Development and evaluation of simplified procedures for analysis and design of buildings with passive energy dissipation systems. Report No. MCEER-00-0010, Revision 1*, Buffalo,