

Análisis sísmico dinámico no lineal de una edificación de seis niveles con disipadores histeréticos mediante openseespy

Nonlinear dynamic seismic analysis of a six-story building with hysteretic dampers using openseespy

Luis Musaja Chura¹, Ronny Coaquira Huanca², Wilber Mendoza Ramirez³, Arleth Mendoza Chura⁴

¹Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú, luis.musaja@unjbg.edu.pe

²Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú, rcoaquirah@unjbg.edu.pe

³ Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú, wmendozar@unjbg.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0002-8960-1835>

⁴ Universidad de Salamanca, Salamanca, España, idu069463@usal.es, <https://orcid.org/0009-0006-0997-0769>

The main objective of this study is to evaluate the seismic performance of a building through the incorporation of hysteretic dampers, using OpenSeesPy. The sample is a six-story building with a frame structural system, located in the city of Tacna. Through nonlinear time-history dynamic analysis, it was observed that the incorporation of hysteretic dampers reduced roof displacements by an average of 49% and drifts by 52%, complying with the requirements of ASCE/SEI 7-22 and Peruvian Technical Standard E.030. In conclusion, this study demonstrated that the implementation of hysteretic dampers in frame-system buildings contributes to improving their seismic performance under severe loads, but these findings should be corroborated with further seismic analysis studies using OpenSeesPy to strengthen their validation.

Keywords: Nonlinear dynamic seismic analysis, OpenSeesPy, hysteretic dampers.

El presente estudio, tiene como objetivo principal evaluar el desempeño sísmico de una edificación mediante la incorporación de disipadores histeréticos, empleando OpenSeesPy, tomando como muestra una edificación de seis niveles con sistema estructural aporticado, ubicada en la ciudad de Tacna. Mediante el análisis dinámico no lineal tipo tiempo-historia, se observó que la incorporación de disipadores histeréticos redujo en promedio un 49 % los desplazamientos de techo y un 52% las derivas, cumpliendo con lo establecido por la norma ASCE/SEI 7-22 y la Norma Técnica Peruana E.030. En conclusión, se comprobó en el presente estudio que la implementación de disipadores histeréticos en edificaciones de sistema de pórticos contribuye a mejorar su desempeño sísmico frente a solicitaciones severas, pero deben ser corroboradas con más estudios de análisis sísmicos empleando el OpenSeesPy para reforzar su validación.

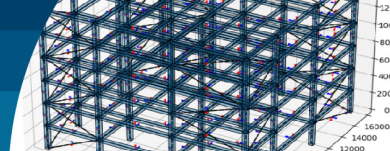
Palabras clave: Análisis sísmico dinámico no lineal, OpenSeesPy, disipadores histeréticos.

Introducción

Por su naturaleza, el Perú es un país con elevada actividad sísmica especialmente porque se encuentra en el Cinturón de Fuego del Pacífico (Tavera, 2020), el cual alberga numerosos límites de placas y zonas de subducción, lo que provoca frecuentes terremotos y erupciones volcánicas (Koketsu y Furumura, 1999), siendo responsable de aproximadamente el 90% de los terremotos en el mundo (Roqué et al. 2023).

El epicentro de la mayor cantidad de terremotos en Perú se localiza frente a la línea costera, desde Tumbes hasta Tacna, frecuentemente alcanzando magnitudes considerables que, en superficie, han provocado muerte y devastación (Tavera, 2020).

Esto en contraparte resulta de un peligro inminente, puesto que, según Goñi et al. (2019) más del 80% de las viviendas dentro del país son autoconstruidas, ocasionando diferentes errores constructivos que conllevan a que el 70% de estas



viviendas no tengan garantías para soportar un gran sismo. Debido a esto, Lewis (2003) reafirma la necesidad de mejorar el desarrollo de la construcción en los países propensos a terremotos, incluidos los edificios urbanos de varios pisos y los pequeños edificios autoconstruidos, esto acompañado de la concientización y microzonificación de riesgos.

Es por ello que, ante esa problemática resulta prudente reforzar las edificaciones mediante la aplicación de disipadores histeréticos, puesto que su aplicación en estructuras de concreto armado tienen un impacto significativo en el comportamiento sísmico.

Los estudios demuestran que los disipadores reducen considerablemente las respuestas estructurales de las edificaciones, especialmente los desplazamientos y derivas, reportando reducciones promedio del 48% en los desplazamientos y del 58% en las derivas máximas (Orocillo, 2024), esto resulta prudente puesto que dichos dispositivos actúan en el rango no lineal, previniendo daños estructurales al incursionar en el rango inelástico antes que los elementos principales (Caballero et al., 2023).

Además, se han identificado balances óptimos de rigidez que conducen a mecanismos últimos satisfactorios, donde los disipadores desarrollan su máxima ductilidad mientras el marco principal permanece elástico o con fluencias incipientes (Tena y Gama, 2017).

Metodología

Descripción del edificio analizado

El presente estudio se desarrolla en un edificio multifamiliar de seis niveles, con sistema estructural aporticado, ubicado en la ciudad de Tacna. La edificación presenta un área aproximada de 236,25 m² por planta. A partir del plano de estructuras del aligerado de la (Figura 1) se identificaron las características geométricas de los elementos más representativos: la losa aligerada cuenta con un espesor de 200 mm; las columnas poseen sección rectangular de 300 mm × 500 mm; las vigas principales presentan dimensiones de 250 mm × 550 mm; las vigas secundarias, de 250 mm × 500 mm; y las vigas de techo, de 250 mm × 350 mm.

En la (Figura 2) se observa la sección de la columna y en la (Figura 3) las secciones de las vigas, así como la

distribución de los aceros longitudinales y transversales que el primer nivel alberga, en los demás niveles superiores presentan la misma distribución típica.

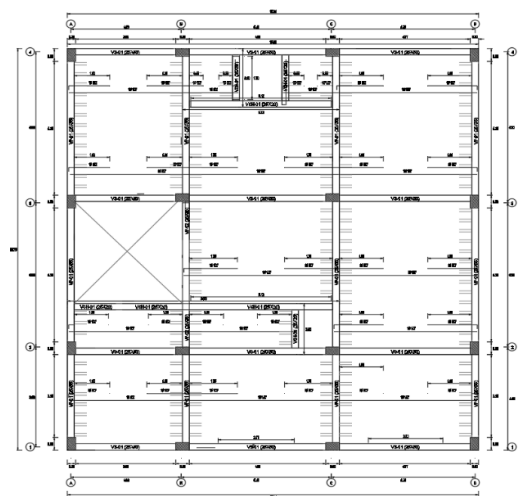


Figura 1: Plano de la Estructura.

CUADRO DE COLUMNA GENERAL

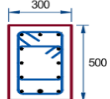
ZONA	TIPO	C-01
Nivel 1	Sección	300 X 500
	As	12 Ø 5/8"
	Graphic Scanning	
	Estrido	2 Ø 3/8" 1 @50, 6 @100, Rto @250

Figura 2: Sección Transversal de la Columna.

CUADRO DE VIGAS

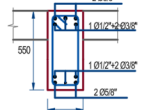
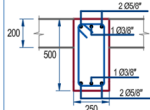
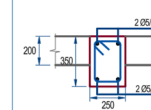
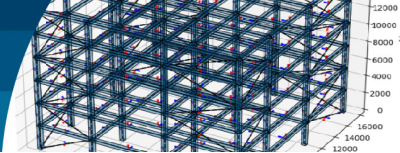
ZONA	TIPO	VP-01	VS-01	VT-01
Nivel 1	Sección	250 X 550	250 X 500	250 X 350
	Graphic Scanning			
	Estrido	Ø 1 Ø3/8" 1 @50, 10 @100, Rto @200	Ø 1 Ø3/8" 1 @50, 10 @100, Rto @200	Ø 1 Ø1/4" 1 @50, 4 @100, Rto @250

Figura 3: Sección Transversal de las Vigas.

Tratamiento de registros sísmico

Para el análisis dinámico no lineal tiempo-historia se seleccionó un conjunto de 11 registros acelerográficos del Pacific Earthquake Engineering Research Center



(PEER), esto debido a la falta de registros sísmicos de la zona de estudio, por lo cual se consideraron sismos que proporcionen un espectro de aceleración similar al espectro de diseño de la Norma E.030 de Perú, por lo tanto, los resultados serán acorde a los sismos considerados.

Siguiendo lo indicado por el artículo 16.2.3.2. de la Norma ASCE 7-22, se construyó el espectro de dirección máxima combinando los dos componentes ortogonales de cada sismo para identificar la orientación que genera la mayor demanda sobre la estructura. Esto debido a que las estructuras no siempre experimentan su mayor demanda en una de las dos direcciones ortogonales (componentes “X” y “Y”), en ese sentido, la dirección más crítica puede ser una combinación de las dos componentes, ello implica el sismo de dirección máxima.

A partir de los registros rotados se construyeron los espectros de pseudo-aceleración, los cuales se escalan para aproximarse al espectro de diseño de la Norma Técnica Peruana E.030, de acuerdo a la Tabla 1.

Tabla 1: Registros sísmicos escalados

Nº	Nombre de Terremoto	Año	Nombre de Estación	Magnitud (Mw)	PGA (mm/s²)
1	Imperial Valley-02	1940	El Centro Array #9	6.95	1747.00
2	San Fernando	1971	Pacoima Dam	6.61	6741.40
3	Managua Nicaragua-01	1972	Managua ESSO	6.24	3005.90
4	Friuli Italia-01	1976	Tolmezzo	6.50	2716.80
5	Imperial Valley-06	1979	Delta	6.53	1394.30
6	Tabas Iran	1978	Tabas	7.35	6290.90
7	Landers	1992	Coolwater	7.28	1731.20
8	Kocaeli Turkey	1999	Duzce	7.51	2023.10
9	Chi-Chi Taiwan	1999	CHY028	7.62	3367.30
10	Victoria Mexico	1980	Cerro Prieto	6.33	2868.20
11	Corinth Greece	1981	Corinth	6.60	1089.10

La Figura 4 muestra los espectros de pseudo-aceleración cumpliendo con el criterio normativo de que el promedio de los espectros escalados no sea inferior al 90 % del espectro objetivo en el rango de períodos críticos (0.12–0.93 s), los cuales se obtuvieron siguiendo el criterio dado

por el artículo 16.2.3.1. de la ASCE 7 – 22, teniendo un rango entre 0.2 y 1.5 veces el periodo fundamental, según la Tabla 2.

Tabla 2: Modos de vibración de la estructura sin disipadores

Modo	Periodo (s)	Modo	Periodo (s)	Modo	Periodo (s)
1	0.608	7	0.111	13	0.060
2	0.594	8	0.110	14	0.058
3	0.501	9	0.092	15	0.051
4	0.196	10	0.076	16	0.049
5	0.192	11	0.076	17	0.048
6	0.161	12	0.063	18	0.041

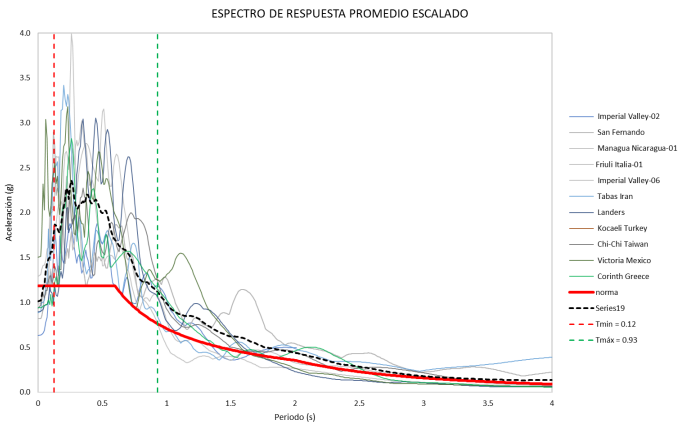


Figura 4: Espectro Compatibilizado de Pseudo-Aceleraciones.

Disipadores de barras de pandeo restringido (CRP)

Este es un dispositivo diagonal, que está expuesto tanto a cargas axiales de tracción como a las de compresión, tal como se observa en la Figura 5.

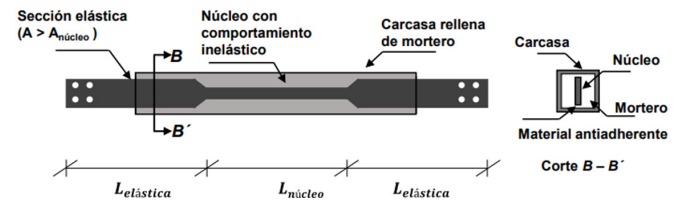
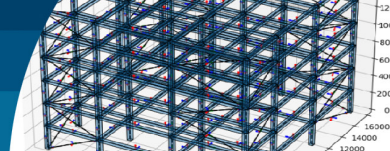


Figura 5: Esquema típico de un Disipador Tipo CRP. Extraído de Diseño Óptimo del Refuerzo Estructural, mediante Disipadores CRP, para la Adecuación del Desempeño Sísmico de Estructuras Aporticadas de Hormigón Armado (p. 6), por L. Velasco, 2021.

Cuando se le inducen cargas cíclicas, estas generan fluencia y, por ende, transforman la energía mecánica en calor, dicho mecanismo se refleja en una curva histerética,



la cual evidencia la disipación sostenida de energía, tal como se muestra en la Figura 6.

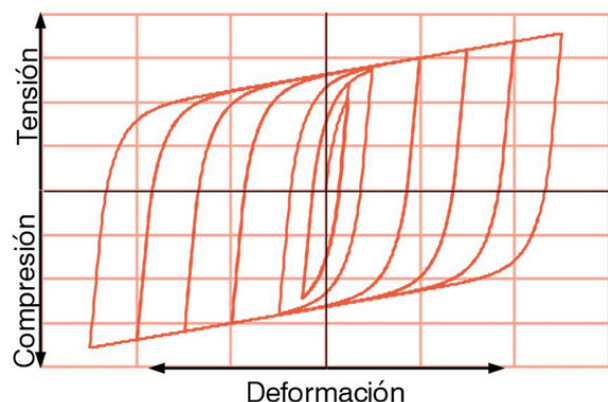


Figura 6: Curva histerética de un Disipador Tipo CRP. Extraído de Características Generales del Disipador Dampo Dual Protect por Dampo.

El dispositivo utilizado en la investigación presenta las siguientes dimensiones y características según la Figura 7.

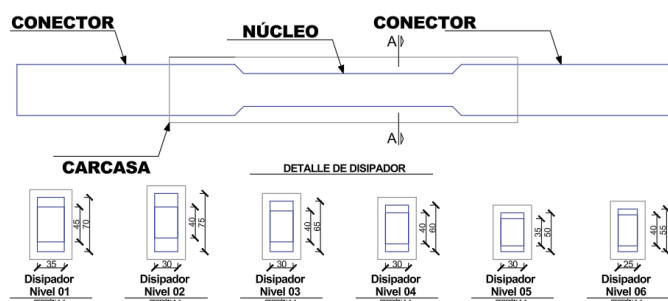


Figura 7: Sección transversal del Disipador Tipo CRP.

Modelado en OpenSeesPy

Para el análisis dinámico no lineal se empleó el software OpenSeesPy, con el objetivo de evaluar la respuesta estructural más allá del rango elástico, permitiendo que los materiales desarrollen deformaciones permanentes. El modelo numérico consideró la caracterización no lineal del concreto y del acero de refuerzo, así como la discretización mediante secciones tipo fibra y la representación de elementos estructurales con capacidad de formación de rótulas plásticas.

Asimismo, OpenSeesPy se eligió debido a su disposición de código abierto, teniendo gran cantidad de módulos para el análisis de estructuras, destacando el algoritmo “KrylovNewton”, utilizado para análisis no lineales, de

igual manera “NormDispIncr”, el cual permite ajustar las tolerancias en las iteraciones y el integrador temporal “Newmark”, para la solución de ecuaciones dinámicas.

Concreto

El comportamiento a compresión del concreto se representó utilizando el modelo hognestad con el comando Concrete02 en OpenSeesPy, lo que permite modelar la degradación de resistencia conforme aumenta la deformación a compresión (Figura 8).

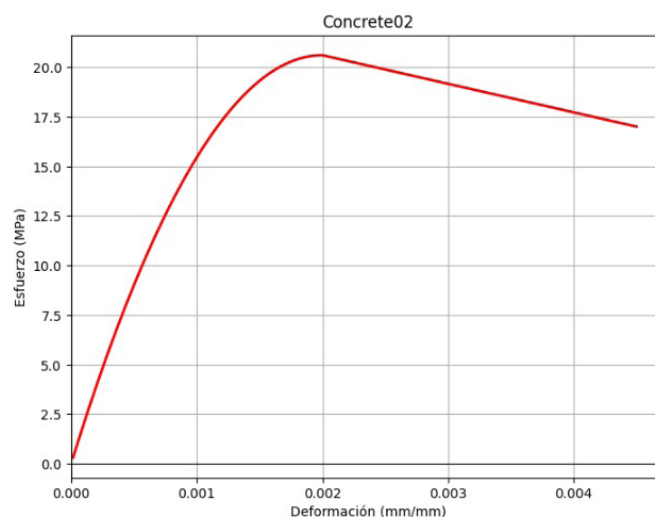


Figura 8: Diagrama Esfuerzo – Deformación del Concreto.

Acero

El acero de refuerzo se modeló mediante una relación esfuerzo-deformación bilineal, implementada en OpenSeesPy mediante el comando Steel01 (Figura 9).

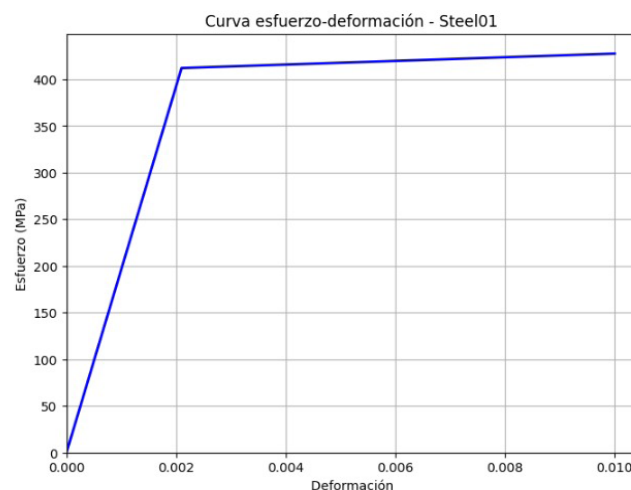
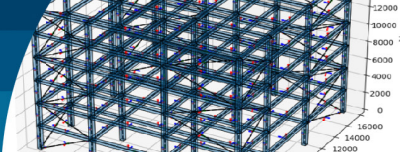


Figura 9: Diagrama Esfuerzo - Deformación del Acero.



Secciones tipo fibra

Las secciones de las columnas y vigas se discretizaron mediante el comando section ('Fiber'), utilizando parches rectangulares de concreto subdivididos en mallas de fibras para representar tanto el núcleo como el recubrimiento (Figura 10).

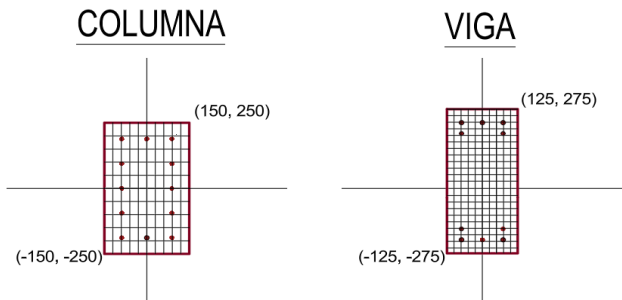


Figura 10: Secciones fibra de una columna y una viga.

El refuerzo longitudinal se definió mediante el comando layer ('straight'), distribuyendo simétricamente las fibras de acero en las zonas extremas y centrales de las secciones, con áreas equivalentes a diámetros comerciales. De forma análoga, las vigas principales se modelaron incorporando fibras de acero.

Plastificación Distribuida

Se adoptó el esquema de integración HingeRadau, concentrando la no linealidad en las zonas críticas de vigas y columnas, mientras que la zona central se mantuvo predominantemente elástica.

Modelo analizado

Modelo con disipadores: Se incorporaron dispositivos de disipación de energía tipo CRP en distintos niveles del edificio. Su comportamiento hysterético se representó en OpenSeesPy mediante materiales uniaxiales definidos. En la Figura 11 se observa el modelo con disipadores, las barras en forma de diagonales representan a los disipadores CRP.

Resultados Desplazamientos de Azotea

Los desplazamientos se monitorearon en el nodo maestro del último nivel, ubicado en el nivel superior (nivel 06) de la edificación. El análisis dinámico no lineal tiempo-historia se realizó considerando únicamente la dirección de máxima aceleración para cada registro. La Figura 12

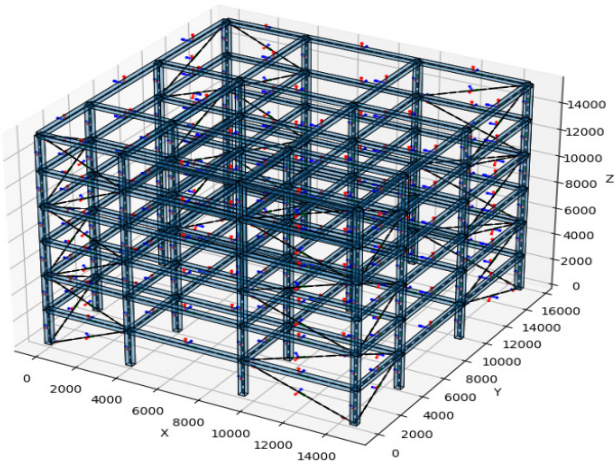


Figura 11: Modelo con disipadores hystereticos en OpenSeesPy.

muestra el historial temporal de desplazamientos del nodo maestro, comparando la respuesta estructural del edificio con y sin disipadores de energía.

Del análisis de la Figura 12, se aprecia que la estructura presenta una deformación permanente producto de su incursión en el rango no lineal, para casi todas las acciones sísmicas; no sucediendo lo mismo con la estructura con dispositivos CRP, ya que se vuelve más rígida al considerar estos dispositivos, su incursión no lineal solo se aprecia en algunos sismos, por ejemplo, el sismo 12 (Kocaeli Turkey 1999). De igual forma, se observa una reducción significativa en los desplazamientos máximos del nivel superior al incorporar disipadores de energía. Esta disminución se cuantifica de manera más clara en la Tabla 3.

Tabla 3: Reducción de Respuesta en Techo por Efecto de Disipadores

Nº	TERREMOTO	Sin Disipadores (mm)	Con Disipadores (mm)	Reducción (%)
1	Imperial Valley 02	66.3819	40.1786	39.47%
3	San Fernando	75.8437	42.2193	44.33%
4	Managua Nicaragua 01	83.5878	41.8242	49.96%
5	Friuli Italy 01	92.3606	42.0809	54.44%
6	Imperial Valley 06	82.2259	34.9918	57.44%
9	Tabas Iran	68.991	41.8796	39.30%
11	Landers	67.3393	34.1402	49.30%
12	Kocaeli Turkey	68.7106	37.8571	44.90%
13	Chi Chi Taiwan	90.9973	44.6112	50.98%
16	Victoria Mexico	85.2895	38.0662	55.37%
18	Corinth Greece	86.3408	37.5492	56.51%

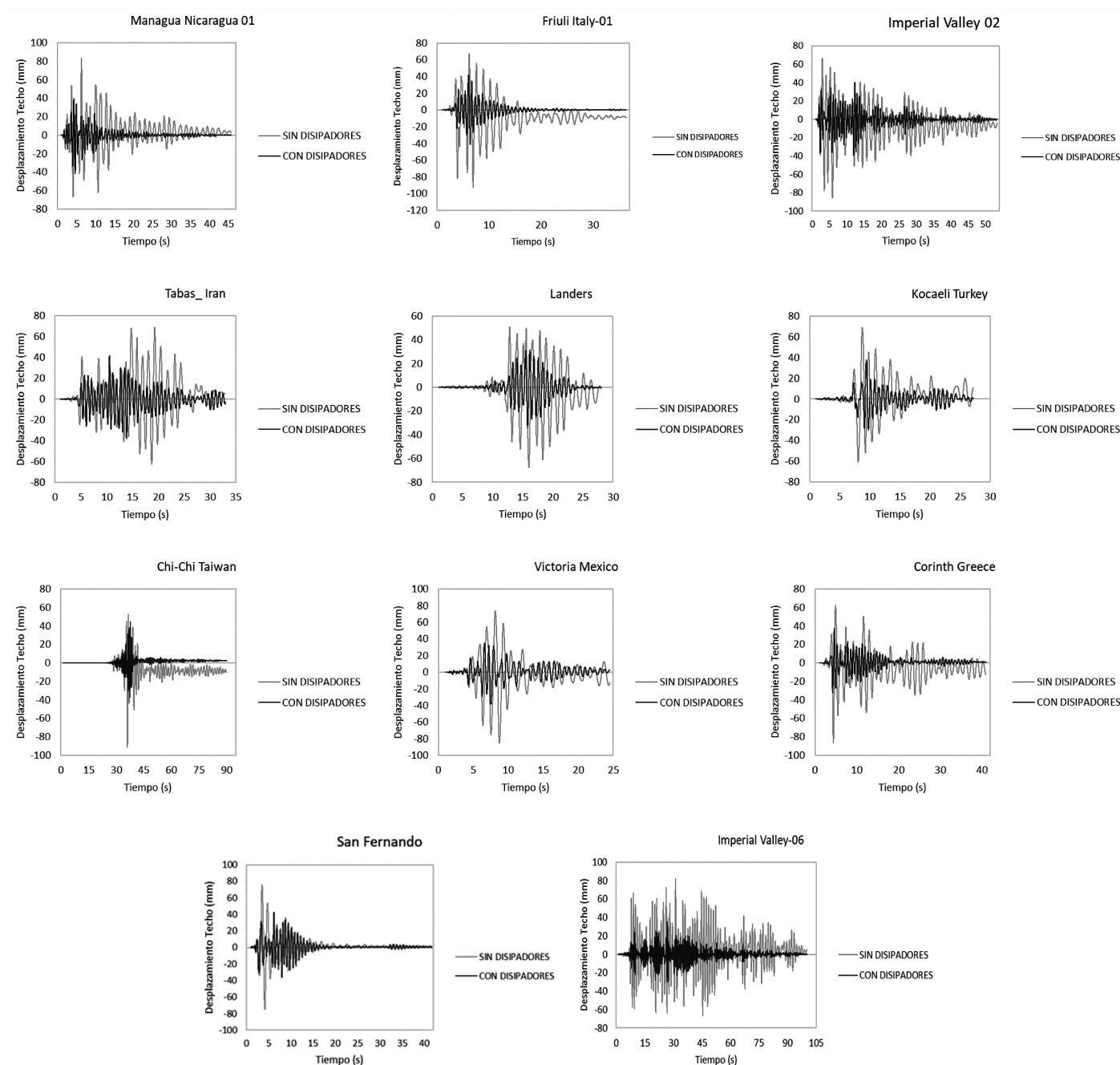
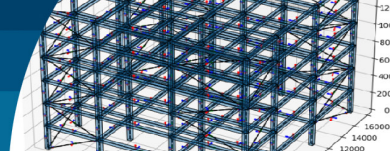


Figura 12: Desplazamientos Máximos de Azotea.

Tal como se evidencia en la Tabla 3, la cual muestra una disminución en los desplazamientos, y conjuntamente con lo observado en la Figura 12, donde se aprecia una reducción del periodo de la estructura y un comportamiento no tan alejado del eje de equilibrio, se infiere que los disipadores incrementan la rigidez de la estructura.

Derivas

Para el análisis comparativo, se definieron dos umbrales

de control de derivas: para la edificación sin disipadores de energía se consideró un límite de 0.007, de acuerdo con la Norma Técnica Peruana E.030 para estructuras de concreto armado; en los modelos con disipadores, se empleó un criterio más estricto, adoptando un límite de 0.005, correspondiente al nivel “Operacional” definido por la norma ASCE 41-17. La Figura 13 muestra las derivas máximas por piso obtenidas para un conjunto representativo de 11 registros sísmicos.

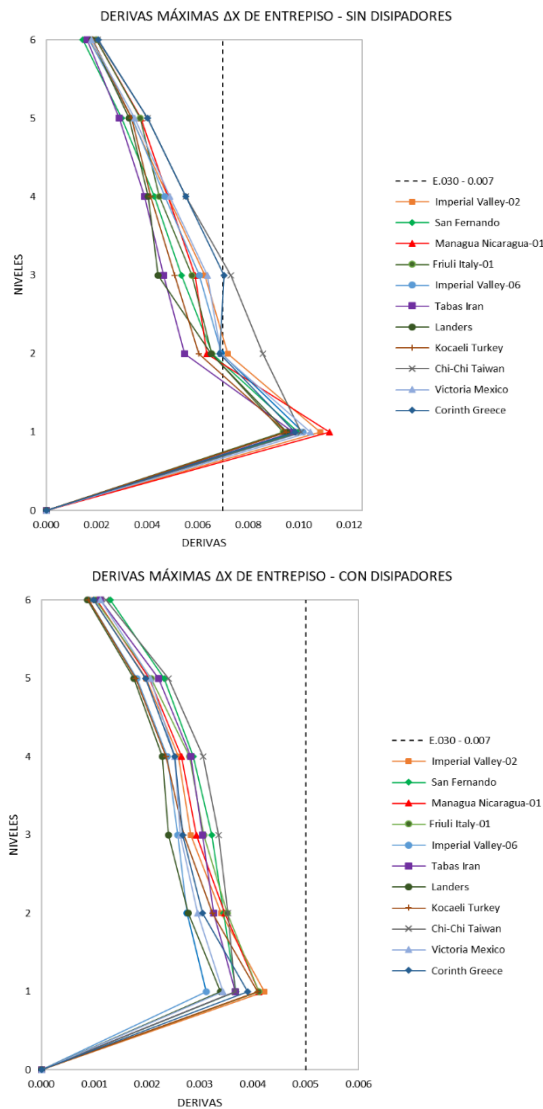
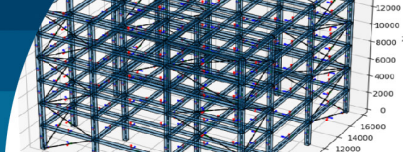


Figura 13: Derivas de Entrepiso

Tabla 4: Reducción de Derivas por Efecto de Disipadores

TERREMOTO	Deriva Máx Sin (%)	Deriva Máx Con (%)	Reducción Máx (%)	Deriva Prom Sin (%)	Deriva Prom Con (%)	Reducción Prom (%)
Imperial Valley 02	0.0109	0.0042	61.09%	0.0057	0.0027	53.18%
San Fernando	0.0100	0.0037	63.02%	0.0051	0.0028	44.97%
Managua Nicaragua 01	0.0112	0.0041	63.35%	0.0057	0.0027	52.19%
Friuli Italy 01	0.0094	0.0041	56.12%	0.0053	0.0028	47.87%
Imperial Valley 06	0.0102	0.0031	69.24%	0.0055	0.0023	58.90%
Tabas Iran	0.0098	0.0037	62.36%	0.0047	0.0027	42.84%
Landers	0.0095	0.0034	64.47%	0.0049	0.0023	54.46%
Kocaeli Turkey	0.0095	0.0041	56.87%	0.0050	0.0025	49.69%
Chi Chi Taiwan	0.0101	0.0037	63.64%	0.0063	0.0029	54.10%
Victoria Mexico	0.0105	0.0034	67.18%	0.0057	0.0025	56.63%
Corinth Greece	0.0099	0.0039	60.34%	0.0059	0.0025	57.23%

La comparación evidencia que la implementación de disipadores reduce significativamente las derivas entre pisos, especialmente en los niveles superiores, confirmando la efectividad del sistema de disipación en el control de deformaciones laterales y su cumplimiento con los límites normativos establecidos. Esta disminución se cuantifica de manera más clara en la Tabla 4.

Comparación

La validación parcial se llevó a cabo mediante la comparación de los desplazamientos máximos del nivel superior, para un caso de sismo. La comparación se centró en el modelo con disipadores, ya que es el escenario más importante para propósitos de esta investigación, los valores se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Desplazamientos Máximos y Mínimos - OpenSeesPy vs SAP2000

Desplazamiento (mm)	OpenSeesPy	Sap2000	Error relativo (%)
Máximo	33.87	31.35	8.03%

La Figura 14 presenta la comparación de los historiales temporales de desplazamientos del nivel superior obtenidos mediante ambos softwares.

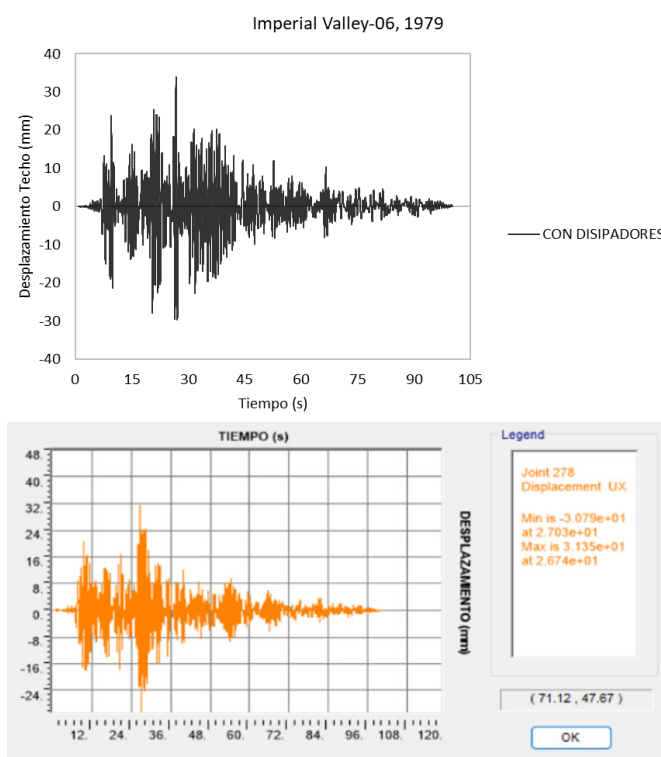


Figura 14: Historial de Desplazamiento de Azotea

Discusión

Los resultados presentados en las Figura 13, así como en la Tabla 4, muestran que la incorporación de disipadores histeréticos generó una reducción significativa tanto en las derivas máximas de entrepiso como en los desplazamientos globales del techo, en comparación con el modelo sin disipadores. Estas reducciones se mantuvieron dentro de los límites normativos establecidos por la norma ASCE 41-17 y la Norma Técnica Peruana E.030, lo que demuestra que el sistema estructural modificado cumple con los requisitos de seguridad y desempeño sísmico.

De acuerdo con Mendez y Olivares (2024), OpenSeesPy combina la robustez del motor de análisis OpenSees con la flexibilidad de Python, permitiendo automatizar procesos, realizar análisis secuenciales y modificar parámetros con facilidad. Esto se evidenció en el presente estudio al comparar la velocidad de ejecución entre OpenSeesPy y SAP2000, obteniéndose una diferencia promedio de 10 minutos a favor de OpenSeesPy, especialmente en registros sísmicos con mayor número de puntos. Esta eficiencia permitió realizar múltiples análisis en menor tiempo, lo cual es fundamental para realizar análisis no lineales a gran escala.

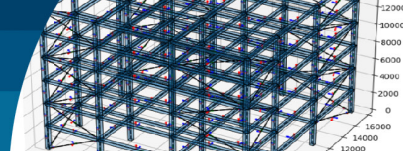
Asimismo, los resultados obtenidos fueron consistentes con los reportados en estudios previos. Por ejemplo, Mendez y Olivares (2024) desarrollaron modelos similares con OpenSees para estructuras aporticadas de concreto armado, encontrando respuestas dinámicas comparables a las obtenidas con software comerciales como SAP 2000. Del mismo modo, Contreras et al. (2021) reportaron diferencias menores al 8.5 % entre los desplazamientos y derivas calculadas en OpenSees y SAP2000. En concordancia con estos antecedentes, el análisis realizado en el presente estudio, utilizando el registro sísmico del Imperial Valley, evidenció una diferencia del 8.03 % en el desplazamiento de azotea entre el modelo con disipadores simulado en OpenSeesPy y su réplica en SAP2000 (ver Tabla 5). Esta similitud numérica respalda el modelo propuesto elaborado con OpenSeesPy, sin embargo, es importante la necesidad de realizar investigaciones adicionales que amplíen y profundicen la comparación entre estos 2 softwares.

De la misma manera, es importante señalar que, si bien, la estructura con disipadores presenta un periodo relativamente bajo, pudiendo haberse utilizado otras tecnologías, la presente investigación se centró en demostrar la eficacia y aplicabilidad de los disipadores CRP correspondiente a la realidad constructiva predominante en la Región Tacna.

Conclusiones

Se logró evaluar el desempeño sísmico no lineal mediante modelos desarrollados en OpenSeesPy, encontrando que la implementación de disipadores histeréticos permitió reducir los desplazamientos máximos de techo hasta en un 57% y las derivas máximas hasta en un 69%. Estos resultados demuestran que la estructura con disipadores cumple con los límites establecidos por la norma ASCE 41-17 (0.5%) y la E.030 (0.7%), mejorando significativamente su comportamiento frente a eventos sísmicos.

Se construyó un código de análisis dinámico no lineal para una edificación de seis niveles utilizando OpenSeesPy. La estructura fue modelada con elementos tipo fibra, lo que permitió representar adecuadamente la no linealidad del concreto y del acero mediante los modelos constitutivos de Hognestad y el modelo bilineal idealizado, respectivamente. El análisis tiempo-historia se realizó con registros sísmicos escalados en función de la Norma ASCE 7-22.

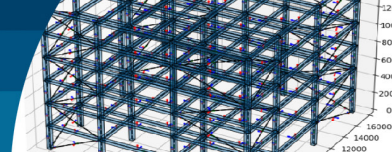


Se implementaron disipadores hysteréticos CRP tipo barra en configuración diagonal, logrando una reducción promedio del 49% en desplazamientos de techo y del 52% en derivas, en comparación con el modelo sin disipadores. En el caso más crítico (sismo Imperial Valley-02), la deriva máxima con disipadores fue de 0.42%, valor que permanece dentro del límite normativo.

Se reconoce que los modelos utilizados en la presente investigación permiten evaluar adecuadamente la respuesta dinámica no lineal, futuras investigaciones deberán considerar diferentes parámetros estructurales, variabilidad de registros, y configuraciones alternativas de los disipadores, con el fin de ampliar la validez de los resultados y consolidar conclusiones más generales.

Referencias

- ASCE (2017). ASCE standard, ASCE/sei, 41–17: Seismic evaluation and retrofit of existing buildings.
- ASCE (2022). ASCE standard, ASCE/sei, 7-22: Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures.
- Caballero, L., Cano, H., Molina, M. y Villalba, J. (2023). Propuesta de modelación numérica de disipadores hysteréticos metálicos tipo TADAS, en edificaciones de pórticos de concreto y acero. *Revista EIA*, 20(40), 1-20. <https://doi.org/10.24050/reia.v20i40.1688>
- Computers and Structures, Inc. (CSI). (2025). SAP2000 (versión 25) [Software]. <https://www.csiamerica.com>
- Contreras, N., Hernández, F., Bazáez, R., Astroza, R., Ochoa, F., y Pastén, C. (2022). Análisis de la respuesta no lineal tiempo-historia del Puente Águila Norte usando OpenSees y SAP2000. Universidad de Chile. <https://www.researchgate.net/publication/359222734>
- Dampo. (s.f.). Características Generales del Disipador Dampo Dual Protect [Catálogo]. <https://www.dampo.com.mx/disipador-dampo-dual-protect/>
- Göni, W., Maquin, N., Rodríguez, J., y Moran, Y. (2019). Analysis of Constructive Errors in masonry confined in Highly Seismic Countries and Reinforcement of Walls with Galvanized Mesh. *Revista MATEC Web of Conferences*, 303(2), 1-6. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201930304001>
- Guerrero, D. y Maza, G. (2020). Análisis no lineal de estructuras regulares de acero con pórticos especiales resistentes a momento utilizando OpenSees y Ceinci-Lab. *Revista Green World Journal*, 5(5), 1-23. <https://doi.org/10.53313/gwj51013>
- Hognestad, E. (1951). *A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members*. University of Illinois Engineering Experiment Station, Bulletin Series No. 399, Bulletin No. 1.
- Koketsu, K., y Furumura, T. (1999). Imaging earthquake fault rupture and simulating seismic ground motion. *Revista Geophysics*, 18(12), 1414-1416. <https://doi.org/10.1190/1.1438238>
- Lewis, W. J. (2003). *Tension structures: Form and behaviour*. Thomas Telford Publishing.
- Mendez, L. y Olivares, E. (2024). Análisis dinámico de una estructura de concreto armado de 4 niveles de sistema aporticado con la aplicación del software OpenSees [Tesis para título, Universidad César Vallejo]. Repositorio de la Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/147356>
- Ministerio de Vivienda y Construcción (2019). Norma E.030: Diseño Sismorresistente de Reglamento Nacional de Edificaciones.
- Orocollo, H. (2024). Análisis comparativo del comportamiento sísmico de disipadores hysteréticos SLB, TADAS y disipadores sísmicos de fluido-viscoso aplicados en la infraestructura de la Universidad Tecnológica del Perú de Tacna – 2024. [Tesis de Maestría, Universidad Privada de Tacna]. <http://hdl.handle.net/20.500.12969/3717>
- Pimiento, J., Salas, A. y Ruiz, D. (2014). Desempeño sísmico de un pórtico con disipadores de energía pasivos de placas ranuradas de acero. *Revista Ingeniería de Construcción*, 29(3), 283-198. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732014000300005>
- Roque, P., Violanda, R., Bernido, C., y Soria, L. (2023). Earthquake occurrences in the Pacific Ring of Fire exhibit a collective stochastic memory for magnitudes, depths, and relative distances of events. *Research Center for Theoretical Physics*. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4450059>
- Ruiz-García, J. y Miranda, E. (2006). Residual displacement ratios for assessment of existing structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35(3), 315–336. <https://doi.org/10.1002/EQE.523>



Saldaña, K. y Scaletti, H. (2022). Eficiencia de los disipadores de energía en la respuesta sísmica de los edificios. *Revista Tecnia*, 32(2), 127–137. <https://doi.org/10.21754/tecnica.v32i2.1379>

Tavera, H. (2020). Terremotos vs. sismos: frases y reflexiones para recordar. Instituto Geofísico del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/4851>

Tena, A., y Gama, A. (2017). Determinación de parámetros de diseño sísmico para marcos dúctiles de concreto reforzado con disipadores de energía histeréticos. *Revista SulAmericana de Engenharia Estrutural*, 14(1), 36–58. <http://dx.doi.org/10.5335/rsace.v14i1.6496>

Velasco, L., Guerrero, H. y Hospitaler, A. (2025). Seismic optimization of buckling restrained brace mid rise frames by metaheuristics and machine learning surrogate models. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 68(62). <https://doi.org/10.1007/s00158-025-04000-3>