

Evaluación de las diferentes configuraciones de Amortiguadores de Fluido Viscoso Lineal en el comportamiento sísmico para el Valle de México

Evaluation of different arrangements with Linear Fluid Viscous Dampers on seismic performance for Valley of Mexico

Bañuelos-García, F.H.^{1*} , Gutierrez-Trejo, J.² , De La Colina, J.¹  (*hbanuelosg589@profesor.uaemex.mx)

Recibido: 01-08-2024 Aceptado: 26-09-2024

RESUMEN

Este artículo presenta una evaluación del desempeño para distintas configuraciones y distribuciones de amortiguadores de fluido viscoso lineal para una estructura de acero de 9 niveles. El diseño de los amortiguadores se realizó mediante los manuales técnicos más utilizados para este tipo de dispositivos. El desempeño del modelo considerado se determinó a través de un análisis dinámico no lineal paso a paso. como demanda sísmica se utiliza la

componente EW del registro SCT del temblor de Michoacán de 1985. De los resultados obtenidos se presentan conclusiones para el diseño de amortiguadores de fluido viscoso.

Palabras clave: amortiguadores de fluido viscoso lineal, desempeño sísmico, análisis dinámico no lineal paso a paso.

ABSTRACT

This paper presents a performance evaluation for different configurations and distributions of linear fluid viscous dampers for a 9-storey steel structure. The design of the dampers was carried out using the most used technical manuals for this type of devices. The performance of the model considered was determined through a nonlinear time history analy-

sis. The EW component of the SCT record of the 1985 Michoacan earthquake is used as seismic demand. From the results obtained, conclusions for the design of viscous fluid dampers are presented.

Keywords: linear viscous fluid dampers, seismic performance, nonlinear time history analysis.

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro de Coatepec S/N, Ciudad Universitaria, Toluca 50110, México.

²Programa de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Zacatecas, Av. Ramón López Velarde Núm. 801, Col. Centro, Zacatecas, México, CP 98000.



INTRODUCCIÓN

El objetivo principal del diseño sísmico actual se enfoca en garantizar distintos niveles de resiliencia de una estructura ante las distintas acciones sísmicas que puedan presentarse durante su vida útil. No obstante, existen situaciones en donde para satisfacer estos niveles de resiliencia es necesario modificar significativamente las características de los elementos estructurales como es el caso de la geometría de los elementos estructurales. Incluso en muchos de los casos no siempre es posible modificar el diseño preliminar, o bien no es posible modificar las dimensiones de los elementos estructurales debido a las recomendaciones de los códigos de diseño actuales. Por lo que surge la necesidad de agregar elementos suplementarios a partir de los cuales pueda satisfacer estos niveles de resiliencia.

Por tal motivo han cobrado gran relevancia los disipadores de energía, con el uso de estos dispositivos es posible disipar parte de la energía que entra derivada de una acción lateral como es el caso de un sismo [1]. A partir de la inclusión de este tipo de dispositivos en las estructuras es posible reducir los desplazamientos y por consiguiente el daño en la estructura. Existen muchos tipos de disipadores de energía, y en general se pueden clasificar de acuerdo con el parámetro de ingeniería por el cual se activen, desplazamientos (e.g., ADAS), velocidades y desplazamientos (e.g., amortiguadores viscoelásticos), fuerzas inerciales (e.g., amortiguadores de masa sintonizados), y velocidades (amortiguadores de fluido viscoso). Estos últimos tienen la característica de que solo tienen como variable de diseño el amortiguamiento, por lo que las propiedades dinámicas de la estructura no se modifican de forma significativa. Lo cual ha quedado demostrado tanto de forma analítica como experimental [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11].

La inclusión de los FVDs en la estructura conduce a una matriz de amortiguamiento no clásica, lo cual genera modos y frecuencias complejas cuando se ejecuta el análisis modal espectral convencional; tal y como indican los códigos de diseño actuales. Para lo cual se han desarrollado procedimientos con los cuales es posible realizar un análisis modal espectral de una estructura con este tipo de dispositivos como es el caso de: Liang and Lee [12] y Soong and Grigoriu [13], Soong and Constantinou [14], entre otros. En a pesar de la efectividad de estos procedimientos no son del todo prácticos, ya que para poder aplicarlos es necesario considerar adicionalmente el espectro de velocidades relativas, el cual no se define en la mayor parte de los códigos de diseño actual. Por tal motivo se han desarrollado distintos procedimientos con los cuales es posible aproximar el comportamiento de estos dispositivos como amortiguamiento clásico, tal es el caso de: Constantinou y Symans [15]. Los cuales son la base de muchos de los documentos técnicos actuales para el diseño de FVDs como es el caso de: FEMA 356 [16], FEMA P-1050-1 [17], ASCE 7-22 [18], entre otros.

Dado que al aumentar el amortiguamiento mediante los FVDs es posible satisfacer el nivel de resiliencia considerado ahora el problema es como distribuir los dispositivos en la estructura. Existen muchos estudios en donde se evalúa distintos arreglos de los amortiguadores de fluido viscoso (FVD), como es el caso de Landi et al. [19], Siami Kaleybar and Tehrani [20], entre otros, sin embargo, este estudio no se ha realizado para sismos como los que afectan la valle de México. Por lo que en este artículo se presenta una evaluación tanto del arreglo como de la distribución de los FVDs para un marco de acero de 9 niveles, como demanda sísmica se utiliza la componente EW del registro SCT del temblor de Michoacán de 1985.

COMPORTAMIENTO DE LAS FVDs

Los amortiguadores de fluido viscoso han sido utilizados ampliamente para reforzar y diseñar nuevas estructuras. Este dispositivo consiste en una cabeza de pistón con orificios contenida en un cilindro lleno de un fluido altamente viscoso, que está compuesto de silicona o de un tipo de aceite. El fluido en el cilindro es casi incompresible, y cuando el dispositivo se somete a una fuerza de compresión, el volumen de fluido dentro del cilindro disminuye debido al movimiento del área del vástago del pistón. La disminución del volumen da lugar a una fuerza de restauración. Esta fuerza indeseable se evita utilizando un acumulador. Un acumulador funciona recogiendo el volumen de fluido que es desplazado por el vástago y almacenándolo en la zona de reposición. Cuando el vástago retrocede, el vacío creado extrae el fluido. La Figura 1 presenta un esquema de la FVD.

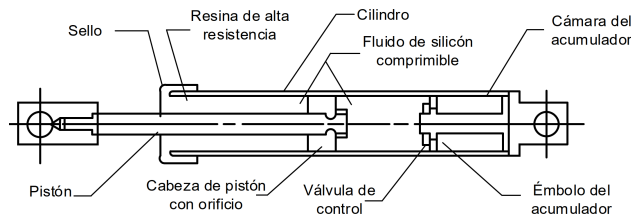


Figura 1: *Componentes de un Amortiguador de Fluido Viscoso.*

El comportamiento de los FVD se representa normalmente por el de los amortiguadores de Maxwell, ver Figura 2, Ec. (1).

$$F = C |\dot{u}|^{\alpha} \operatorname{sgn}(\dot{u}) \quad (1)$$

donde

F = Fuerza que proporciona el disipador

C = Coeficiente de amortiguamiento

$\dot{u}$ = Velocidad

α = Exponente de velocidad que determina el grado de no linealidad del dispositivo



Figura 2: *Modelo de Maxwell [21].*

Diseño de los amortiguadores lineales

Para poder realizar el diseño de FVDs utilizando un espectro como acción sísmica se debe de considerar que el comportamiento de estos dispositivos puede aproximarse como amortiguamiento clásico.

Existen muchos procedimientos para determinar el comportamiento de estos dispositivos como amortiguamiento clásico [22]. Sin embargo, los más utilizados son los que se recomiendan en: FEMA 356 [16], FEMA P-1050-1 [17], ASCE 7-22 [18]. La Ec. (2) es aplicable para LFVDs:

$$\xi_{DPLi} = \frac{T_i \sum_{j=1}^{nd} (C_{Lj}) (f_j) (\phi_{rj,1})^2}{4 \pi (\sum_{i=1}^{ns} m_i \phi_i^2)} \quad (2)$$

donde

ξ_{DPLi} = Relación de amortiguamiento clásico suplementario del modo de vibración i correspondiente a LFVDs

T_i = Periodo natural de vibración del modo i

θ_j = Ángulo del amortiguador viscoso j

ϕ_i = Coordenada modal horizontal del modo i

$\phi_{rj,1}$ = Distorsión modal del amortiguador j correspondiente al modo de vibración i

C_{Lj} = Coeficiente de amortiguación del LFVD en el piso j

f_j = Configuración del amortiguador j , ver Figura 3

m = Masa del piso j

nd = Número de dispositivos

ns = Número de entrepisos

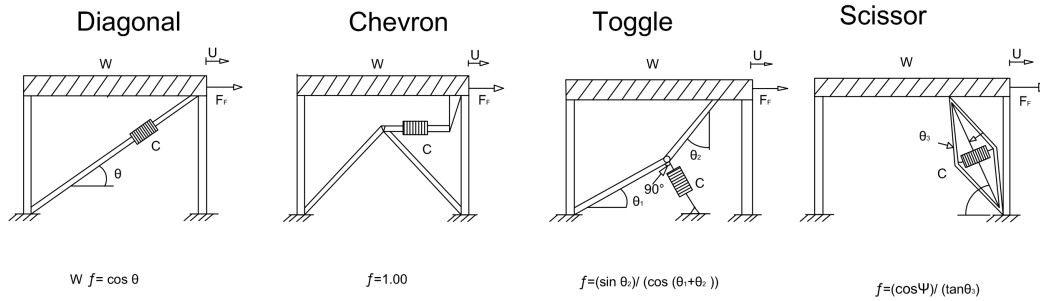


Figura 3: Configuraciones de los FVDs.

Distribución de los FVDs

En el diseño práctico de estructuras con amortiguadores se considera que todos los dispositivos tienen el mismo coeficiente de amortiguamiento. Sin embargo, no siempre es lo más adecuado, ya que pueden presentarse valores muy grandes. Además, la acción sísmica no actúa igual en todos los entrepisos, esto particularmente cuando se presenta irregularidades en planta, así como pisos blandos. [23], [24]. Por lo tanto, la distribución uniforme (UD) puede no proporcionar una proporción adecuada de los coeficientes de amortiguamiento a lo largo de la altura de las estructuras.

Por tal motivo lo más adecuado es que el coeficiente de amortiguamiento de cada entrepiso sea calculado en función de un Parámetro de Ingeniería (IP). Modificando la Ec. (2) para que el coeficiente

de amortiguamiento de cada dispositivo por entrepiso sea calculado en función de un IP, la ecuación quedaría como Ec. (3) y Ec. (4):

$$C_{\alpha T} = \frac{(\xi_{DPN Li}) \bullet (\rho_j) \bullet 4\pi \bullet \sum_{j=1}^{ns} (m_j) \bullet (\phi_{j,i})^2}{T_i \sum_{j=1}^{nd} \bullet (f_j)^{(2)} \bullet (\phi_{rj,i})^{(2)} \bullet (\rho_j)} \quad (3)$$

$$C_{\alpha j} = \frac{\rho_j}{\sum_{j=1}^{ns} \rho_j} C_{\alpha T} \quad (4)$$

EJEMPLOS DE APLICACIÓN

En este trabajo, se analiza un modelo de 9 niveles de acero con amortiguadores viscosos lineales (Ver Figura 4). Las propiedades nominales para el marco plano son las siguientes: esfuerzo a la fluencia $f_y = 344703.8 \text{ kN/m}^2$, módulo de elasticidad de $E_s = 1.96 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$. Basado en resultados preliminares de diseño, se presentan los perfiles y la geometría del modelo de 9 niveles. Ver Figura 4.

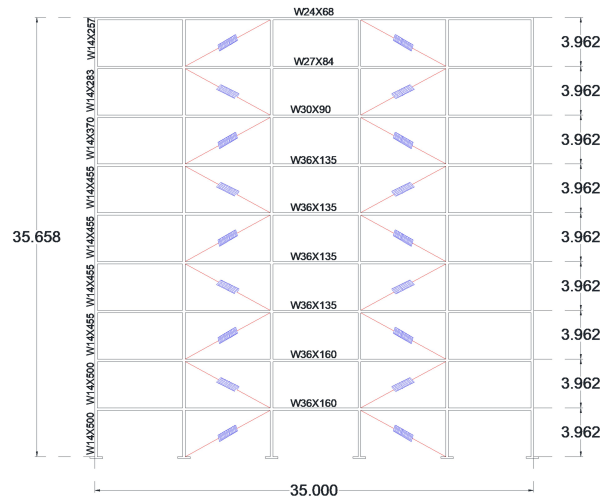


Figura 4: Geometría del modelo (dimensiones en m).

Acción sísmica

Para validar la efectividad de cada parámetro de ingeniería, la acción sísmica considerada en los casos de estudio fue un conjunto de espectros de respuesta correspondientes al registro de la componente SCT E-W del sismo de Michoacán de 1985, para evaluar directamente el desempeño de los modelos.

Distribución y cálculo de los FVDs

Para evaluar la influencia del amortiguamiento adicional al modelo se le asigna una relación diferente del $\xi_d = 10 \%$. En el caso del amortiguamiento inherente, se asignó un valor del $\xi_0 = 2 \%$ correspondiente para estructuras de acero.

Con respecto a la distribución de los amortiguadores en la estructura, se colocó cuando menos dos por nivel, de forma secuencial y simétrica, tal y como se puede apreciar en la Figura 4. Para cada modelo,

se diseñaron los FVDs para la distribución uniforme, y en función de la rigidez, distorsión modal, fuerza cortante y energía elástica; además de cuatro configuraciones del amortiguador: diagonal, Chevron, Toggle, and Scissor.

El cálculo de los coeficientes de amortiguación de los dispositivos se realiza mediante la Ec. (3) y la Ec. (4). Las disposiciones de los FVDs se modelaron en Opensees [25], para la configuración diagonal se utilizó el elemento "twoNodeLinkz" el material "ViscousDamper". En el caso de los FVDs chevron, toggle y scissor se utilizó el elemento "twoNodeLinkz" el material "Viscous". Los contravientos son modelados usando el comando ".elasticBeamColumn" que son libres de momento en ambos extremos [20].

Análisis no-lineal historia-tiempo

Para evaluar el cálculo del coeficiente de amortiguamiento y la disposición de los FVDs, se calcularon las derivas entre plantas mediante análisis no-lineal historia-tiempo para todas las estructuras. Estos análisis se realizaron con el OpenSees [25] con las siguientes consideraciones:

- a) Comportamiento histerético estable bilineal elasto-plástico para todas las vigas y columnas.
- b) Las articulaciones plásticas se modelaron como elementos elásticos rotacionales de longitud cero, sin considerar el deterioro de la rigidez.
- c) Se consideró la interacción carga axial - momento.
- d) Matriz de amortiguamiento no proporcional correspondiente a los FVD.
- e) Las columnas de gravedad y los correspondientes efectos P-Delta se idealizaron utilizando una columna inclinada [26], [27].
- f) La integración de las ecuaciones de movimiento no lineales se realizó mediante el método Beta de Newmark, con parámetros $\gamma = 0,5$ y $\alpha = 0,25$, junto con el método Newton-Raphson.

RESULTADOS NUMÉRICOS Y DISCUSIÓN

Para evaluar la eficiencia de los parámetros de diseño para el cálculo de los coeficientes de amortiguamiento, así como de las configuraciones de los FVDs se determinaron las distorsiones de entrepiso de cada modelo para la misma acción sísmica. La Figura 5 muestra los resultados de las distorsiones para las cuatro configuraciones de los amortiguadores (Diagonal, Chevron, Toggle, y Scissor) con respecto para cinco IP (distribución uniforme, distorsión modal, rigidez de entrepiso, energía potencial, y cortante de entrepiso). Como se puede apreciar para cada configuración de los dispositivos no se presentan diferencias significativas del desempeño en el entrepiso crítico (nivel 3). En donde las diferencias máximas que se presentaron fueron de no más del 10 %, por lo cual se puede decir que cualquier procedimiento de distribución proporciona resultados “similares”. Sin embargo, la máxima diferencia se presentó en los coeficientes totales de amortiguamiento (sumatoria de todos los coeficientes de cada entrepiso, ver Figura 6.) no hay una diferencia significativa entre cada configuración, también se puede apreciar que la configuración de tipo Scissors es la que presenta distorsiones más pequeñas. La diferencia de la distorsión en el entrepiso crítico de la configuración diagonal y la Scissors para todas las distribuciones es de aproximadamente del 20 % (Ver Figura 7).

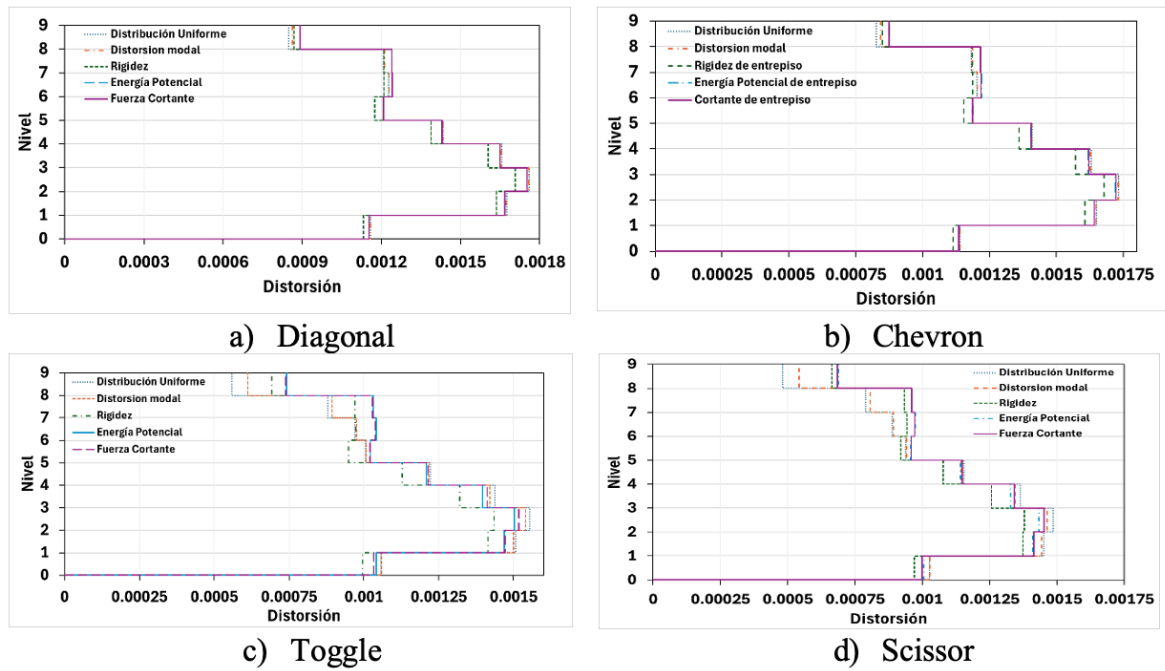


Figura 5: Perfil de distorsiones del modelo de 9 niveles para cada configuración de los FVDs.

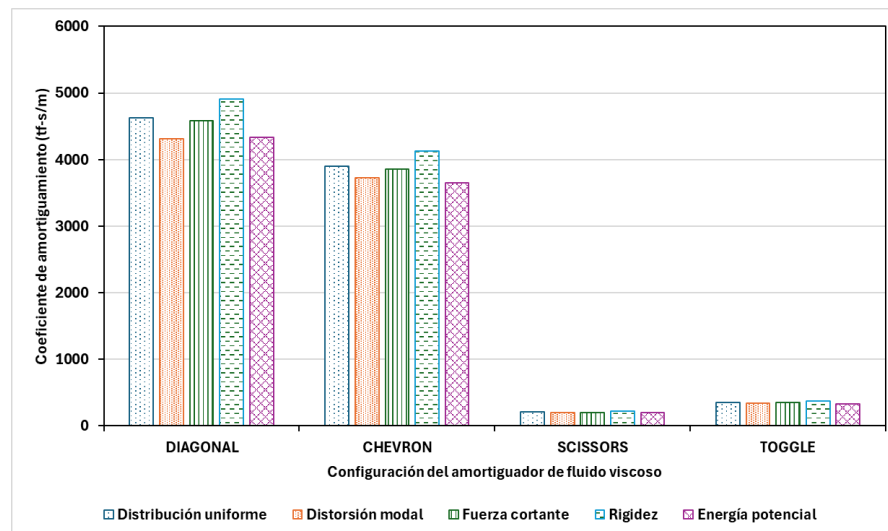


Figura 6: Coeficiente de amortiguamiento total del modelo de 9 niveles.

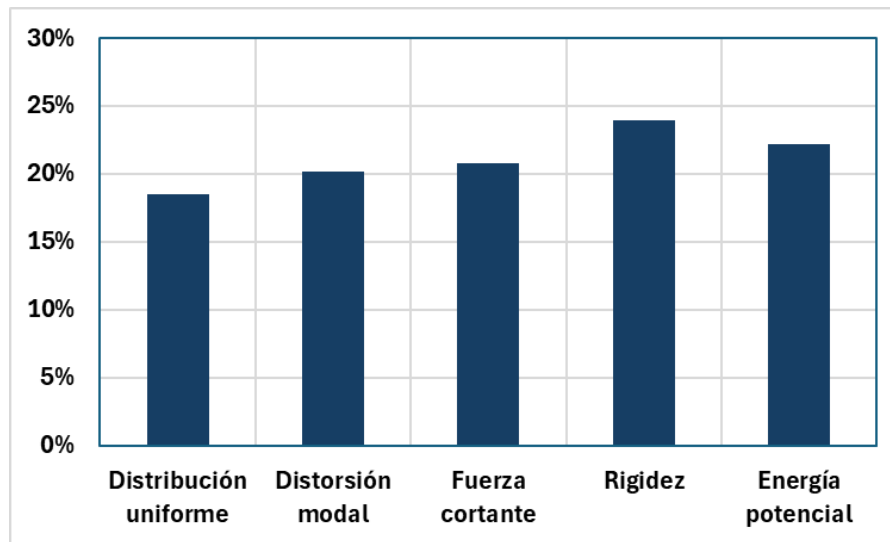


Figura 7: Error de la distorsión del entrepiso crítico de la configuración diagonal con respecto al Scissor.

CONCLUSIONES

En este artículo se presentó una evaluación de desempeño sísmico para un modelo de 9 niveles reforzado con amortiguadores de fluido viscoso lineal. Se utilizaron cuatro configuraciones diferentes de los FVDs (diagonal, Chevron, Toggle, and Scissor). Los coeficientes amortiguamiento se calcularon en función de cinco IP (distribución uniforme, distorsión modal, rigidez de entrepiso, energía potencial, y cortante de entrepiso). Como demanda sísmica se consideró el registro, como demanda sísmica se utiliza la componente EW del registro SCT del temblor de Michoacán de 1985. De los resultados obtenidos de un análisis no lineal historia tiempo se pueden obtener las siguientes conclusiones:

1. El desempeño del modelo de 9 niveles con respecto a cada uno de los cinco parámetros con lo que se determinó el tamaño de los coeficientes del amortiguador de fluido viscoso no presenta diferencias significativas. Sin embargo, en el caso del tamaño de los dispositivos, la distribución de los dispositivos utilizando la energía potencial presenta los valores más pequeños. Lo cual puede representar un ahorro en el costo de los amortiguadores.
2. De las cuatro configuraciones de los dispositivos la que presenta una menor distorsión de entrepiso es la de tipo Scissors, exhibiendo una diferencia de aproximadamente del 20 % en comparación de la diagonal que es la más utilizada. A partir de esto se puedan colocar disipadores con coeficientes más pequeños para lograr el desempeño correspondiente a la configuración diagonal. Lo cual puede representar una diferencia significativa en el costo de los dispositivos.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORES Y COLABORADORES

Francisco Bañuelos: Conceptualización, metodología y preparación del borrador original. **Juan Gutiérrez:** Conceptualización, validación y edición. **Jaime De La Colina:** Conceptualización, supervisión y redacción.

REFERENCIAS

- [1] T. T. Soong and B. F. Spencer. Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice. *Engineering Structures*, 24(3), pp. 243–259, Mar. 2002. doi: 10.1016/S0141-0296(01)00092-X.
- [2] A. M. Reinhorn, C. Li, and M. C. Constantinou. Experimental & Analytical Investigation of Seismic Retrofit of Structures with Supplemental Damping, Part 1: Fluid Viscous Damping Devices. National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY, 1995.
- [3] D. Lee and D. P. Taylor. Viscous damper development and future trends. *Struct. Design Tall Build.*, 10(5), pp. 311–320, Dec. 2001. doi: 10.1002/tal.188.
- [4] J.-S. Hwang, Y.-N. Huang, and Y.-H. Hung. Analytical and Experimental Study of Toggle-Brace-Damper Systems. *J. Struct. Eng.*, 131(7), pp. 1035–1043, Jul. 2005. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:7(1035).
- [5] K.-C. Chang, Y.-Y. Lin, and C.-Y. Chen. Shaking Table Study on Displacement-Based Design for Seismic Retrofit of Existing Buildings Using Nonlinear Viscous Dampers. *J. Struct. Eng.*, 134(4), pp. 671–681, Apr. 2008. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:4(671).
- [6] B. Dong, R. Sause, and J. M. Ricles. Seismic Response and Damage of Reduced-Strength Steel MRF Structures with Nonlinear Viscous Dampers. *J. Struct. Eng.*, 144(12), p. 04018221, Dec. 2018. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002226.
- [7] E. Polat and M. C. Constantinou. Open-Space Damping System Description, Theory, and Verification. *J. Struct. Eng.*, 143(4), p. 04016201, Apr. 2017. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001698.
- [8] M. Palermo and S. Silvestri. Damping reduction factors for adjacent buildings connected by fluid-viscous dampers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 138, p. 106323, Nov. 2020. doi: 10.1016/j.soildyn.2020.106323.
- [9] M. A. Santos-Santiago, S. E. Ruiz, and F. Valenzuela-Beltrán. Influence of Higher Modes of Vibration on the Seismic Response of Buildings with Linear and Nonlinear Viscous Dampers. *Journal of Earthquake Engineering*, 26(8), pp. 3914–3937, Jun. 2022. doi: 10.1080/13632469.2020.1822223.
- [10] A. Rodríguez Castellanos, M. P. Niño Lazaro, S. E. Ruiz Gómez, and M. A. Santos Santiago. DISEÑO SÍSMICO SUSTENTABLE DE ESTRUCTURAS EQUIPADAS CON DISIPADORES VISCOSOS. *RIS*, no. 112, pp. 72–100, Jun. 2024. doi: 10.18867/ris.112.638.

-
- [11] T. Castillo and S. E. Ruiz. Reduction Factors for Seismic Design Spectra for Structures with Viscous Energy Dampers. *Journal of Earthquake Engineering*, 18(3), pp. 323–349, Apr. 2014. doi: 10.1080/13632469.2013.860932.
- [12] Z. Liang and G. C. Lee. Damping of Structures - Part 1: Theory of Complex Damping. University at Buffalo, State University, Buffalo, New York, USA, Technical Report NCEER-91-0004, 1991.
- [13] T. T. Soong and M. Grigoriu. *Random Vibration of Mechanical and Structural Systems*. Englewood Cliffs, New Jersey, USA: Prentice Hall, 1992.
- [14] T. T. Soong and M. C. Constantinou, Eds. *Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering*, vol. 345. Vienna: Springer Vienna, 1994. doi: 10.1007/978-3-7091-3012-4.
- [15] M. C. Constantinou and M. D. Symans. Experimental and analytical investigation of seismic response of structure with supplemental fluid viscous dampers. National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, New York, NCEER-92-0032, 1992.
- [16] FEMA-356. *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. Washington, DC., 2000.
- [17] FEMA P-1050-1. *NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures*. Federal Emergency Management Agency, 2015.
- [18] ASCE. *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*, 7th ed. Reston, VA: ASCE/SEI 7-16., 2021. Accessed: Sep. 13, 2022. [Online]. Available: <https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784415788>.
- [19] L. Landi, F. Conti, and P. P. Diotallevi. Effectiveness of different distributions of viscous damping coefficients for the seismic retrofit of regular and irregular RC frames. *Engineering Structures*, 100, pp. 79–93, Oct. 2015. doi: 10.1016/j.engstruct.2015.05.031.
- [20] R. Siami Kaleybar and P. Tehrani. Effects of using different arrangements and types of viscous dampers on seismic performance of intermediate steel moment frames in comparison with different passive dampers. *Structures*, 33, pp. 3382–3396, Oct. 2021. doi: 10.1016/j.istruc.2021.06.079.
- [21] N. Makris and M. C. Constantinou. Fractional-Derivative Maxwell Model for Viscous Dampers. *J. Struct. Eng.*, 117(9), pp. 2708–2724, Sep. 1991. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:9(2708).
- [22] Ch. B. V. Hareen and S. C. Mohan. Energy-based seismic retrofit and design of building frames with passive dampers. *Engineering Structures*, 250, p. 113412, Jan. 2022. doi: 10.1016/j.engstruct.2021.113412.
- [23] C. Chintanapakdee and A. K. Chopra. Seismic Response of Vertically Irregular Frames: Response History and Modal Pushover Analyses. *J. Struct. Eng.*, 130(8), pp. 1177–1185, Aug. 2004. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:8(1177).

- [24] M. De Stefano and B. Pintucchi. A review of research on seismic behaviour of irregular building structures since 2002. *Bull Earthquake Eng.*, 6(2), pp. 285–308, May 2008. doi: 10.1007/s10518-007-9052-3.
- [25] S. Mazzoni, F. McKenna, M. H. Scott, and G. L. Fenves. Open system for earthquake engineering simulation Version 2.4.5 [Software]. Pacific Earthquake Engineering Research Center., Berkeley, CA, Manual, 2018.
- [26] G. M. Del Gobbo, A. Blakeborough, and M. S. Williams. Improving total-building seismic performance using linear fluid viscous dampers. *Bull Earthquake Eng.*, 16(9), pp. 4249–4272, Sep. 2018. doi: 10.1007/s10518-018-0338-4.
- [27] M. S. Sebaq, Y. Xiao, and G. Song. Damage indices of steel moment-resisting frames equipped with fluid viscous dampers. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, pp. 1–20, Mar. 2023. doi: 10.1080/13467581.2023.2182645.