

ANÁLISIS DE REDUCCIÓN DE FRAGILIDAD EN ESTRUCTURAS DE ALTA FRECUENCIA MEDIANTE EL USO DE AMORTIGUADORES DE LÍQUIDO SINTONIZADO

ANALYSIS OF FRAGILITY REDUCTION IN HIGH-FREQUENCY STRUCTURES USING TUNED LIQUID DAMPERS

Domizio, Martín^{a,b} y Ambrosini, Daniel^{a,b}

^a*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Centro Universitario, Ciudad de Mendoza, M5502JMA, Mendoza, Argentina*

^b*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET, Argentina*

Palabras clave: Control de vibraciones, Disipación suplementaria de energía, Amortiguadores de Líquido Sintonizado, Acción sísmica, Curva de fragilidad.

Resumen. El uso de amortiguadores de líquido sintonizado se presenta como una alternativa atractiva para la reducción de la vulnerabilidad de estructuras civiles sometidas a la acción sísmica debido a su simpleza y practicidad en las etapas de fabricación, instalación y mantenimiento. Por otra parte, de manera reciente se ha realizado una propuesta de implementación, denominada Amortiguador de Líquido Sintonizado de Alta Frecuencia, que permite hacer que los dispositivos de control mencionados sean efectivos en estructuras de periodos bajos o dinámicamente rígidas. En el presente trabajo se evalúa de manera numérica la capacidad de este nuevo dispositivo para reducir la fragilidad de una estructura con frecuencia relativamente elevada mediante una serie de análisis sísmicos, demostrando la efectividad para controlar la respuesta dinámica de la estructura analizada.

Keywords: Vibration control, Supplementary energy dissipation, Tuned Liquid Dampers, Seismic action, Fragility curves

Abstract. The use of tuned liquid dampers is presented as an attractive alternative for reducing the vulnerability of civil structures subjected to seismic action due to their simplicity and practicality in the manufacturing, installation and maintenance stages. On the other hand, an implementation proposal, called High Frequency Tuned Liquid Damper, has been recently developed, which allows making the mentioned control devices effective in low period or dynamically stiff structures. In the present work, the ability of this new device to reduce the fragility of a relatively high frequency structure is numerically evaluated through a series of seismic analyses, demonstrating the effectiveness in controlling the dynamic response of the analyzed structure..

1. INTRODUCCIÓN

La estrategia de control de vibraciones en estructuras civiles mediante la disipación suplementaria de energía ha tenido numerosas implementaciones en los años recientes a través de diversos dispositivos (Yang et al., 2022; Lu et al., 2018; Javanmardi et al., 2020; Jaisee et al., 2021; De Domenico et al., 2019). Dentro de estos dispositivos se encuentran los amortiguadores de líquido sintonizado (ALS) (Konar y Ghosh, 2022), cuyo principio básico de funcionamiento consiste en ajustar la frecuencia natural de oscilación del líquido con alguna frecuencia natural, normalmente la fundamental, de la estructura a proteger. De este modo se produce una transferencia de energía hacia el dispositivo de control, reduciendo el efecto de las acciones dinámicas sobre la estructura a proteger. En particular, los ALS que basan su funcionamiento en el oleaje de una superficie libre dentro de un recipiente vinculado a la estructura principal se caracterizan por sus bajos costos de construcción e instalación y prácticamente nulo mantenimiento. Estos dispositivos también se caracterizan por ser sensibles a distintas amplitudes de excitación, ya que carecen de mecanismos que requieran de un umbral de excitación para iniciar la disipación de energía. Sin embargo, es importante mencionar que la respuesta dinámica de los TLD de oleaje clásicos presenta una no linealidad creciente a medida que se incrementa el nivel de excitación de entrada. Esto representa una dificultad al momento de la modelación, diseño y predicción de la respuesta del dispositivo.

Los TLD han sido utilizados ampliamente con el fin de controlar la respuesta de estructuras frente a cargas de viento (Zuo et al., 2020; Xie y Aly, 2020; Jafari y Alipour, 2021) y en menor medida frente a la acción sísmica (Tang et al., 2022; Pandit y Biswal, 2020; Chen et al., 2016). En particular, es de interés reducir la vulnerabilidad sísmica de estructuras bajas y períodos cortos (Ilki et al., 2009; Park et al., 2009; Di Sarno y Wu, 2021; Bessason y Bjarnason, 2016; Lee et al., 2022). La investigación sobre el uso de ALS con este objetivo es limitada, debido a que en la práctica el límite superior de frecuencias que es posible alcanzar con el ALS clásico no es lo suficientemente alto como para ser sintonizado con las frecuencias naturales de las estructuras bajas. Pandey et al. (2019) proponen el uso de un ALS montado sobre almohadillas de elastómero con un concepto similar al dispositivo propuesto por Banerji y Samanta (2011). En este caso, la rigidez de las almohadillas de elastómero se diseña de manera que la frecuencia que surge al considerar la masa del contenedor sea cercana a la frecuencia natural de la estructura a proteger. De este modo el ALS ve amplificado su movimiento y funciona principalmente como disipador. Otra alternativa al ALS convencional es propuesta por Vafaei et al. (2021), la cuál consiste en un péndulo sumergido en un ALS tradicional. El péndulo en este dispositivo es sintonizado con los modos más elevados de vibrar de la estructura a proteger e interacciona con el fluido en el que está sumergido. De esta manera el dispositivo propuesto es capaz de responder a frecuencias más elevadas que el ALS clásico.

En el presente trabajo se analiza el desempeño del dispositivo denominado ALS de alta frecuencia (ALSAF), con el objetivo de controlar la respuesta sísmica de estructuras de período corto. El dispositivo fue presentado por Domizio et al. (2024) y en el mismo se utiliza una tapa para imponer una condición cinemática sobre la superficie del líquido, pero en lugar de incrementar el amortiguamiento se incrementa en este caso la componente restitutiva mediante el uso de resortes. Para demostrar la capacidad del dispositivo de cumplir con el objetivo planteado se realizó una serie de análisis numéricos cuyas configuraciones y resultados se resumen en las secciones siguientes.

2. DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO DE CONTROL

El dispositivo de control consiste básicamente en una modificación del Amortiguador de Líquido Sintonizado clásico, donde a la componente restitutiva gravitatoria del dispositivo tradicional se le suma una componente restitutiva impuesta por la deformación de un par resortes. La deformación de los resortes se produce por una rotación relativa entre el recipiente contenedor y la tapa del dispositivo que está en contacto con la superficie libre del fluido. De esta manera es posible incrementar la frecuencia natural del ALSAF en comparación con la frecuencia fundamental del dispositivo clásico, haciendo que el dispositivo sea capaz de controlar la respuesta de estructuras con frecuencias fundamentales relativamente altas. Las dimensiones y partes componentes del ALSAF utilizado en los estudios experimentales realizados por [Domizio et al. \(2024\)](#) se presentan en la Figura 1. Para la realización de los ensayos descritos en el trabajo mencionado se utilizaron dos alturas de agua diferente. Las alturas definidas son de 64 mm y 128 mm, con una masa de 2.56 kg y 5.12 kg respectivamente, lo que representa el 5 % y el 10 % de la masa de la estructura a proteger. El par de resortes fue seleccionado de modo de alcanzar una frecuencia de 3 Hz, empleando un resorte de 64 espiras 20 mm de diámetro de espira y 2 mm de diámetro de alambre. De este modo, la relación de frecuencia de diseño entre la frecuencia natural del dispositivo y la frecuencia fundamental de la estructura a proteger resulta ser 1. Cabe destacar que a pesar de no ser un valor óptimo de la relación de frecuencias, el hecho de que se utilicen relaciones de masas relativamente pequeñas hace que el valor adoptado no se aleje del óptimo, tal y como se menciona en [Banerji et al. \(2000\)](#) para el diseño tradicional del ALS.

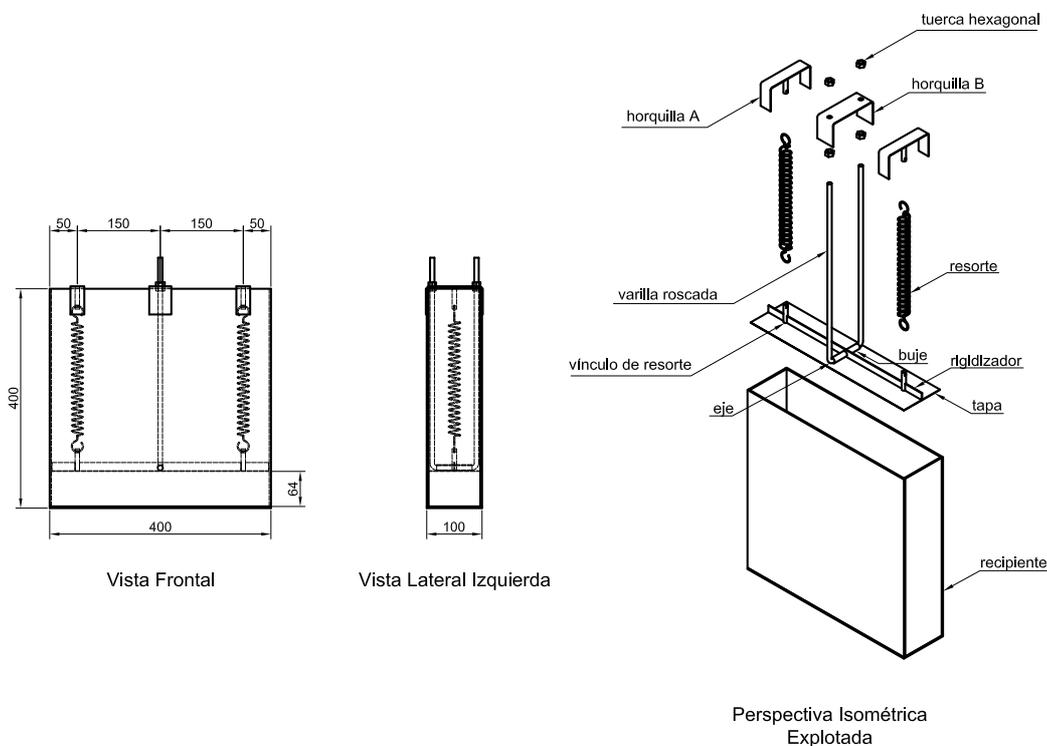


Figura 1: Esquema de la composición del ALSAF

2.1. Modelo numérico

Se desarrolló un modelo de elementos finitos con el software ANSYS Mechanical (ANSYS Inc, 2018). Se utilizaron elementos hexaédricos FLUID80 para representar el fluido contenido en el interior del dispositivo, mientras que las paredes del contenedor y la tapa se modelaron con elementos de placa de cuatro nodos denominados SHELL181. Las dimensiones definidas en el modelo numérico coinciden con las del prototipo experimental descrito en la sección previa, generando una malla con tamaño de elemento entre 1,6 cm y 2 cm. La malla de elementos que representan al fluido y al contenedor tienen nodos coincidentes en el espacio pero no son compartidos, ya que se ha tenido en cuenta la interacción entre ambos tipos de elementos mediante ecuaciones de restricción. Estas ecuaciones impiden el movimiento relativo entre el fluido y las paredes del contenedor en la dirección normal a la cara del elemento de placa. Por otro lado, las traslaciones relativas tangenciales a la cara del elemento de placa están limitadas por elementos de parámetros concentrados, denominados COMBIN14, con un amortiguamiento viscoso que simula la disipación de energía debida al gradiente de velocidad en las proximidades de las paredes. La conexión entre el contenedor y la tapa se realizó también con ecuaciones de restricción, eliminando los grados de libertad relativos traslacionales en dos puntos y permitiendo así la rotación relativa entre ambos sobre el eje definido por los dos puntos mencionados. Para modelar la componente restitutiva de los resortes se utilizaron elementos de parámetros concentrados COMBIN14, con valores de rigidez y amortiguamiento definidos posteriormente en el proceso de optimización. Estos elementos se vincularon en el extremo inferior a la tapa del dispositivo, a través de nodos compartidos, y en el extremo superior a un nodo que se mueve conjuntamente con el contenedor. Esta última condición cinemática también se definió mediante ecuaciones de restricción. Por último, la estructura a proteger se representó como un sistema de un solo grado de libertad, con un valor de masa igual al de la estructura experimental (51.2 kg) y directamente vinculado al dispositivo de control mediante la definición de un elemento de masa puntual MASS21 en un nodo perteneciente al contenedor. Esta masa también se vinculó al sistema de referencia inercial con un elemento COMBIN14 que tiene valores de rigidez y amortiguamiento que permiten representar dinámicamente la estructura utilizada en las pruebas experimentales, es decir, una frecuencia fundamental de 3 Hz y un amortiguamiento relativo de 1,3 %. En la Figura 2 se muestra una vista seccional del modelo de elementos finitos.

2.2. Optimización de parámetros

Para encontrar los valores óptimos de los parámetros considerados, se realizó una serie de análisis numéricos. El resultado obtenido en cada análisis es la función de respuesta en frecuencia (FRF) para el caso de aceleración unitaria en la base de la estructura a proteger. En estos análisis se evaluaron diferentes valores de rigidez y amortiguamiento asignados al elemento que une la cubierta y el contenedor. Los valores de rigidez se analizaron en un rango que permite obtener valores de relación de frecuencias entre 0,85 y 1,15. Por otra parte, los valores asignados a la amortiguación suplementaria (dispuesta en paralelo con el resorte que une la tapa y el contenedor) se definieron para obtener una relación de amortiguación ζ comprendida entre 0 y 0,6. En la Figura 3 se muestra la relación R entre las normas H_∞ de la estructura con y sin el dispositivo de control en función de los valores de rigidez y amortiguamiento analizados. Se observa que la adición de disipación viscosa en conjunto con la rigidez óptima reduce la respuesta de la estructura en aproximadamente un 80 %. Finalmente, la función de respuesta obtenida para el caso del dispositivo de control con valores óptimos de amortiguamiento y rigidez, así como la respuesta de la estructura sin control, se presentan en la Figura 4.

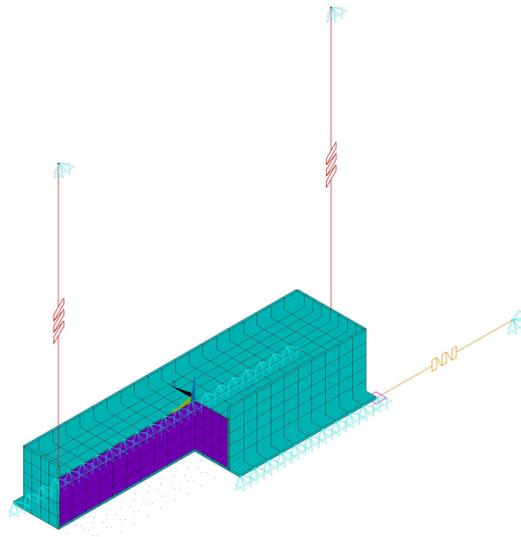


Figura 2: Modelo numérico del conjunto estructura-ALSAF

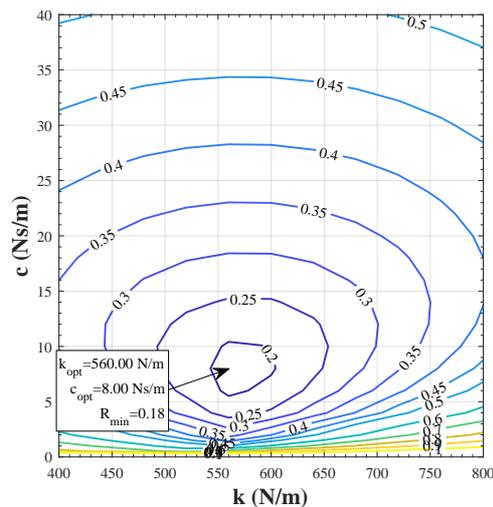


Figura 3: Reducción de la respuesta en frecuencia en función de los parámetros de diseño.

3. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

Con el objetivo de determinar la efectividad del dispositivo para controlar la respuesta estructural frente a la acción sísmica se realizó una serie de análisis dinámicos sobre el modelo numérico de la estructura con y sin la incorporación del dispositivo. A partir de la comparación de los resultados obtenidos con ambos modelos se establece la efectividad de la incorporación del ALSAF para reducir los desplazamientos relativos de la estructura a proteger.

3.1. Acciones sísmicas consideradas

Las acciones sísmicas utilizadas en los análisis dinámicos fueron las definidas en el FEMA P695. En el apéndice A del documento mencionado se presentan los detalles de los registros utilizados, clasificándolos en tres grupos: registros de falla lejana (21 registros medidos a más de 10 kilómetros de la falla que produce el evento sísmico), registros de falla cercana con pulso

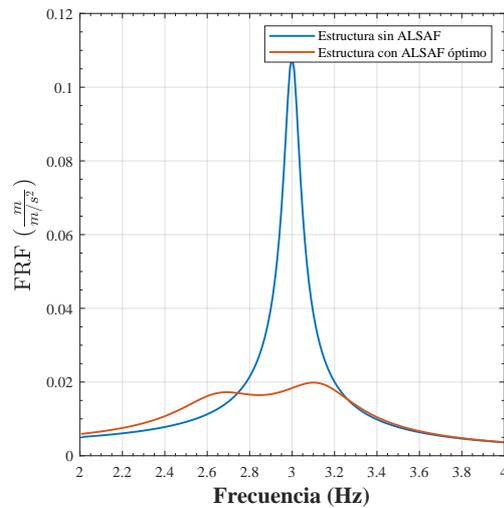


Figura 4: Función de respuesta en frecuencia de la estructura sin control y con ALSAF óptimo.

de velocidad (14 registros que cumplen el criterio establecido por Baker (2007)) y registros de falla cercana sin pulso de velocidad (14 registros sísmicos que se obtuvieron a menos de 10 km de distancia de la falla). Los registros de aceleraciones fueron obtenidos de la base de datos del PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2013). En el presente estudio se utilizaron los dos registros horizontales medidos en cada estación, dando un total de 196 análisis dinámicos incluyendo los casos con y sin control. Los espectros de pseudoaceleración para un valor de ζ de 1.3 % de los tres grupos mencionados se presentan en la Figura 5, donde también se muestran el espectro que surge de los valores medios y los que se apartan en una desviación estándar por exceso y por defecto.

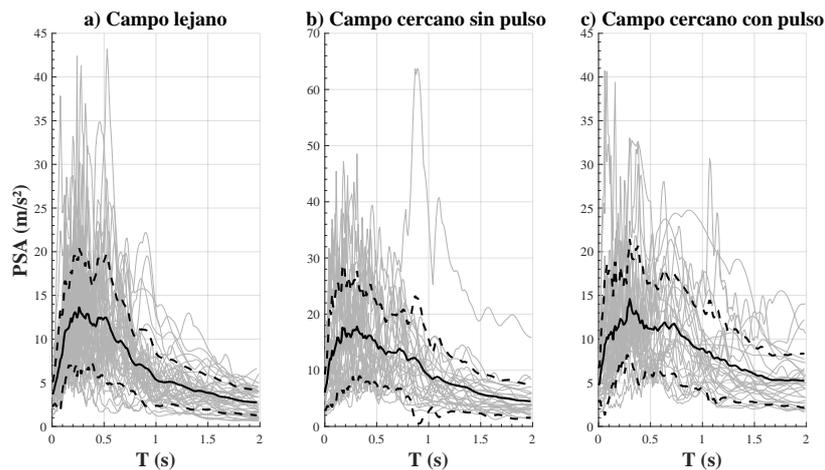


Figura 5: Espectros de respuesta de los registros para un valor de ζ de 1.3 %. Valor medio (línea llena de color negro) y valor medio \pm desviación estándar (línea de trazo de color negro).

3.2. Resultados

A partir de los resultados obtenidos en término de desplazamientos máximos se calculó la respuesta relativa del caso de la estructura con el dispositivo incorporado dividiéndola por el

valor máximo de desplazamiento registrado en el caso sin control. En la Figura 6 se presenta el diagrama de caja donde se observa la distribución de los resultados obtenidos. La caja encierra en este caso a la mitad de la población de resultados, entre el percentil 25 y el percentil 75, indicando con una línea roja el valor de la mediana. Se consideran datos anómalos aquellos que se apartan de la caja en un valor mayor a la mitad de la distancia entre los percentiles 25 y 75. Se observa en la figura que el mejor desempeño se obtuvo para los registros de campo lejano, con una mediana que indica una reducción del 28 % de los desplazamientos máximos. Para ambos tipos de registros de campo cercano el valor de reducción en la mediana es similar y cercana al 20 %, con una dispersión significativamente menor en el caso de los registros con pulso de velocidad. En la Figura 7 se observan los desplazamientos de la estructura en el dominio del tiempo para los tres tipos de registros. En este caso se muestran los registros que dan como resultados reducciones de desplazamientos relativos al caso sin control ubicados en los percentiles 25, 50 y 75. Se indica en cada caso el número de registro asignado en la base de datos de la cuál se obtuvieron los registros utilizados.

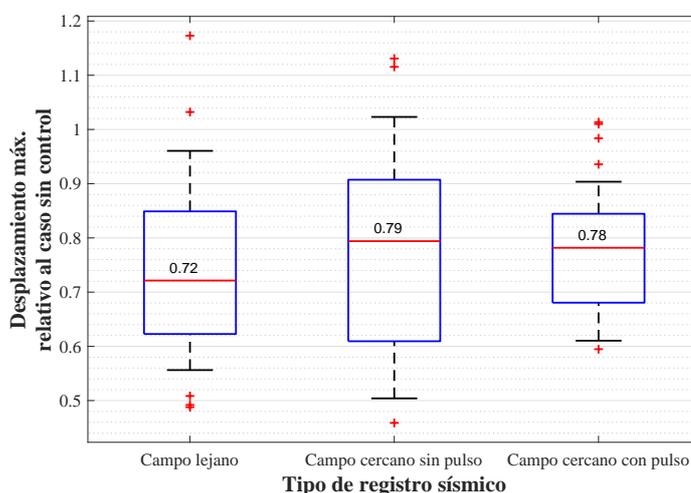


Figura 6: Diagrama de cajas de la distribución de resultados en términos de desplazamiento máxima en la estructura con ALSAF respecto del caso sin control.

Una segunda manera de evaluar el desempeño se presenta en la Figura 8. En este caso se muestra el beneficio obtenido por la incorporación del dispositivo como el incremento en la intensidad de la acción que lleva a la estructura a alcanzar el límite elástico (debido a que los análisis fueron realizados asumiendo un comportamiento lineal de la estructura). La intensidad de los registros fue caracterizada por el valor máximo de aceleración (o PGA por las siglas de peak ground acceleration) y por el valor máximo de velocidad (o PGV por las siglas de peak ground velocity). Para construir las curvas presentadas en la figura se dividió en cada caso el valor característico de la intensidad por el valor del desplazamiento máximo, obteniendo de este modo el nivel de intensidad que produce un desplazamiento unitario en todos los casos. Posteriormente el valor de la intensidad se normalizó respecto del valor de intensidad que produce un desplazamiento unitario en la mediana de los casos de control de cada tipo de registro. De este modo se caracteriza al desempeño del dispositivo de manera directa, observando que cuando se considera como indicador de intensidad a la PGA, los mejores resultados se obtienen para el caso de registros de campo lejano, con un 38 % de incremento en la intensidad que produce la mediana de los casos. Por otro lado, cuando se considera la máxima velocidad del registro

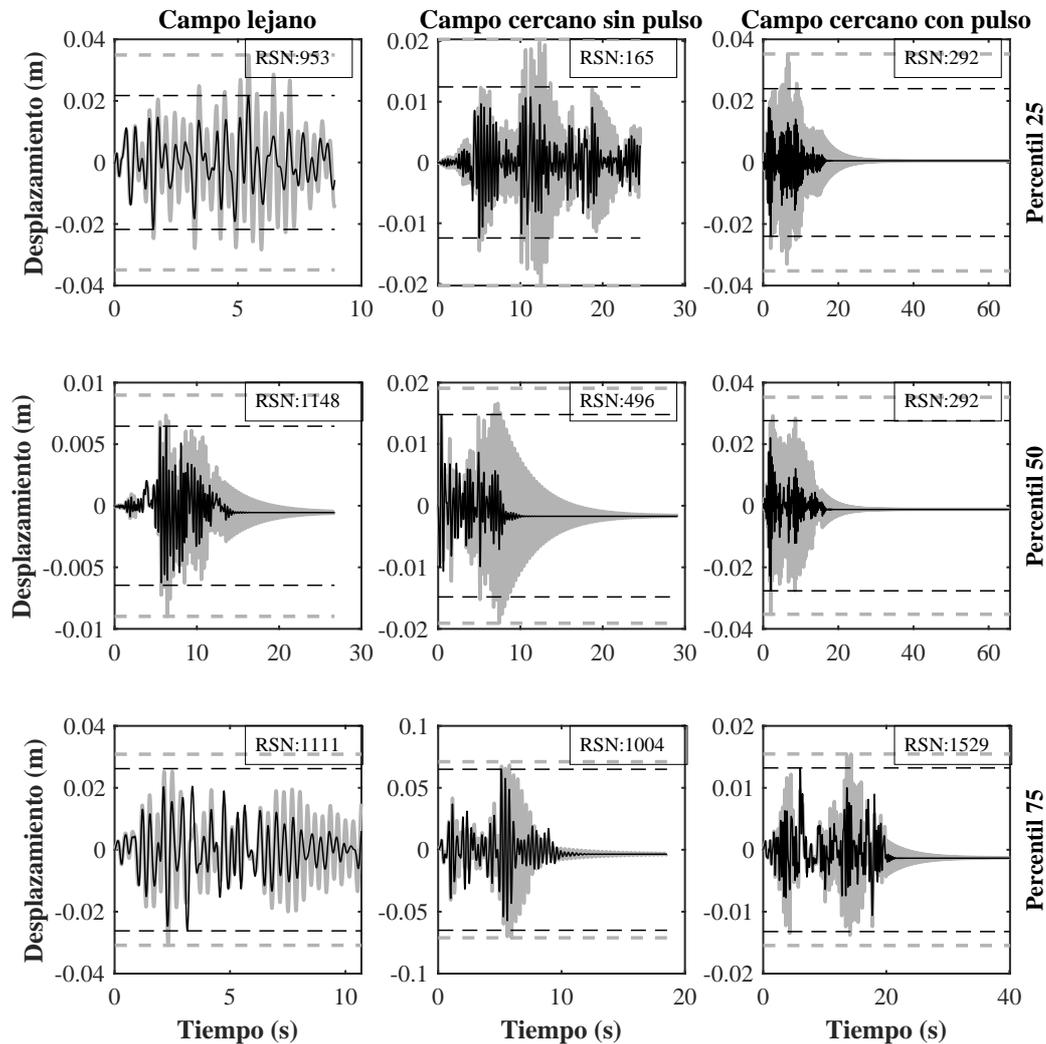


Figura 7: Historia de desplazamientos en la estructura con y sin control de los registros ubicados en los percentiles 25, 50 y 75 de reducción de respuesta.

como indicador, el mejor desempeño se obtiene en los registro de campo cercano con pulso de velocidad, con un incremento de la intensidad mediana del 45 % respecto del caso sin control.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se describe la evaluación del desempeño de un dispositivo de control denominado amortiguador de líquido sintonizado de alta frecuencia (ALSAF) para controlar la respuesta frente a la acción sísmica de una estructura con una frecuencia fundamental relativamente elevada (3 Hz). La estructura y el dispositivo de control son representados en este estudio mediante un modelo de elementos finitos, sobre el cuál se realiza una serie de análisis dinámicos. Se emplean en este caso registros de campo lejano y de campo cercano, con y sin pulso de velocidad. A partir de los resultados caracterizados por los máximos desplazamientos obtenidos para cada registro se observa que el mejor desempeño se obtiene para los registros de campo lejano, con una reducción de los desplazamientos máximos del 28 % en la mediana de

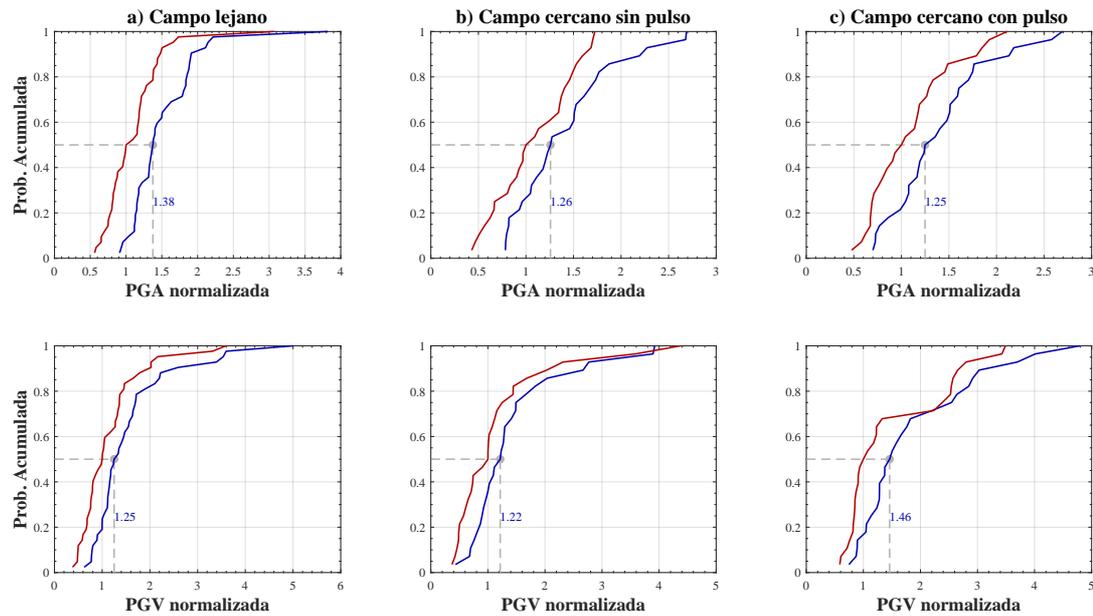


Figura 8: Curvas de fragilidad de límite elástico con intensidad normalizada correspondientes al caso de la estructura con la adición del ALSAF (línea azul) y al caso sin control (línea roja).

los casos respecto de la respuesta sin control. Por otra parte, a partir de la evaluación mediante curvas de fragilidad se pudo observar que la inclusión del dispositivo permite un incremento en la PGA que produce la respuesta en el límite elástico del 38 % en la mediana de los casos cuando el registro es de campo lejano. Cuando se considera la PGV como la medida de intensidad del registro el incremento máximo de la mediana del 46 % en el caso de registros de campo cercano con pulso de velocidad.

REFERENCIAS

- ANSYS Inc. Ansys theory manual, release 18. 2018.
- Baker J.W. Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(5):1486–1501, 2007. doi:10.1785/0120060255.
- Banerji P., Murudi M., Shah A.H., y Popplewell N. Tuned liquid dampers for controlling earthquake response of structures. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 29(5):587–602, 2000.
- Banerji P. y Samanta A. Earthquake vibration control of structures using hybrid mass liquid damper. *Engineering Structures*, 33(4):1291–1301, 2011. ISSN 0141-0296. doi:https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.01.006.
- Besson B. y Bjarnason J.Ö. Seismic vulnerability of low-rise residential buildings based on damage data from three earthquakes (mw6. 5, 6.5 and 6.3). *Engineering Structures*, 111:64–79, 2016.
- Chen J., Zhan G., y Zhao Y. Application of spherical tuned liquid damper in vibration control of wind turbine due to earthquake excitations. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 25(10):431–443, 2016.
- De Domenico D., Ricciardi G., y Takewaki I. Design strategies of viscous dampers for seismic protection of building structures: a review. *Soil dynamics and earthquake engineering*,

- 118:144–165, 2019.
- Di Sarno L. y Wu J.R. Fragility assessment of existing low-rise steel moment-resisting frames with masonry infills under mainshock-aftershock earthquake sequences. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(6):2483–2504, 2021.
- Domizio M., Ambrosini D., y Campi A. A novel tuned liquid damper for vibration control in high-frequency structures. *Engineering Structures*, 301:117350, 2024.
- Ilki A., Karadogan F., Pala S., y Yuksel E. *Seismic Risk Assessment and Retrofitting: With Special Emphasis on Existing Low Rise Structures*, volumen 10. Springer Science & Business Media, 2009.
- Jafari M. y Alipour A. Methodologies to mitigate wind-induced vibration of tall buildings: A state-of-the-art review. *Journal of Building Engineering*, 33:101582, 2021.
- Jaisee S., Yue F., y Ooi Y.H. A state-of-the-art review on passive friction dampers and their applications. *Engineering Structures*, 235:112022, 2021.
- Javanmardi A., Ibrahim Z., Ghaedi K., Benisi Ghadim H., y Hanif M.U. State-of-the-art review of metallic dampers: testing, development and implementation. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27(2):455–478, 2020.
- Konar T. y Ghosh A. A review on various configurations of the passive tuned liquid damper. *Journal of Vibration and Control*, página 10775463221074077, 2022.
- Lee B.H., Chen C.C., Chen T.W., Shiao S.Y., Jiang C.R., y Yeh F.Y. Enhancement of structural seismic performance of low-rise buildings using displacement-dependent tuned mass damper. *Structures*, 37:1119–1128, 2022.
- Lu Z., Wang Z., Zhou Y., y Lu X. Nonlinear dissipative devices in structural vibration control: A review. *Journal of Sound and Vibration*, 423:18–49, 2018.
- Pacific Earthquake Engineering Research Center. Peer ground motion database. <https://ngawest2.berkeley.edu>, 2013. Accessed: 2024-09-13.
- Pandey D.K., Sharma M.K., y Mishra S.K. A compliant tuned liquid damper for controlling seismic vibration of short period structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 132:405–428, 2019.
- Pandit A. y Biswal K. Seismic control of multi degree of freedom structure outfitted with sloped bottom tuned liquid damper. *Structures*, 25:229–240, 2020.
- Park J., Towashiraporn P., Craig J.I., y Goodno B.J. Seismic fragility analysis of low-rise unreinforced masonry structures. *Engineering Structures*, 31(1):125–137, 2009.
- Tang Z., Dong Y., Liu H., y Li Z. Frequency domain analysis method of tuned liquid damper controlled multi-degree of freedoms system subject to earthquake excitation. *Journal of Building Engineering*, 48:103910, 2022.
- Vafaei M., Pabarja A., y Alih S.C. An innovative tuned liquid damper for vibration mitigation of structures. *International Journal of Civil Engineering*, 19(9):1071–1090, 2021.
- Xie F. y Aly A.M. Structural control and vibration issues in wind turbines: A review. *Engineering Structures*, 210:110087, 2020.
- Yang F., Sedaghati R., y Esmailzadeh E. Vibration suppression of structures using tuned mass damper technology: A state-of-the-art review. *Journal of Vibration and Control*, 28(7-8):812–836, 2022.
- Zuo H., Bi K., y Hao H. A state-of-the-art review on the vibration mitigation of wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 121:109710, 2020.