

Estudio experimental en mesa vibradora de una estructura de madera de 3 pisos de entramado ligero con aisladores sísmicos friccionales resilientes a impacto

Experimental study on a shaking table of a 3-floor light-framed timber structure with impact-resilient frictional seismic isolators

Fecha de entrega: 23 de octubre 2023

Fecha de aceptación: 20 de marzo 2024

Diego Quizanga^{1,2}, Diego Valdivieso¹, José Luis Almazán^{1,3}, Pablo Guindos^{1,3} y Diego López-García^{1,4}

¹ Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile, dmquizanga@uc.cl, dnvaldivieso@uc.cl, jlalmazá@ing.puc.cl, pguindos@ing.puc.cl, dlg@ing.puc.cl

² Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ciencias Aplicadas, Quito, Ecuador

³ Pontificia Universidad Católica de Chile, Centro Nacional de Excelencia para la Industria de la Madera CENAMAD, Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

⁴ Pontificia Universidad Católica de Chile, Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres CIGIDEN, Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

La construcción de edificios ha contribuido considerablemente en la contaminación ambiental. Por tal motivo, diferentes países han generado políticas públicas enfocadas a reducir la huella de carbono, incentivando el uso de la madera como material en la construcción. Por otra parte, la aislación basal es una tecnología probadamente eficaz de protección sísmica, que se ha implementado principalmente en edificios de concreto y acero, pero uno de los aspectos que más ha limitado su uso a nivel mundial, es el costo de su implementación (aisladores, losa de aislación, muro perimetral de impacto). En este trabajo se presentan los resultados de un estudio experimental en mesa vibradora de una estructura de madera de entramado ligero de 3 pisos a escala 1:2, con aisladores de tipo péndulo friccional resiliente a impacto lateral. Los resultados experimentales obtenidos indicaron que pese a haber sometido la estructura a excitaciones de gran intensidad, incluso con demandas superiores al sismo máximo posible, la superestructura no presentó daño. El uso de estos dispositivos evitaría la necesidad de construir un muro perimetral, ya que tienen la capacidad de absorber en forma controlada los efectos del eventual impacto de los deslizadores contra su propio anillo interno.

Palabras clave: aislación sísmica, mesa vibradora, aisladores friccionales, edificio de entramado ligero

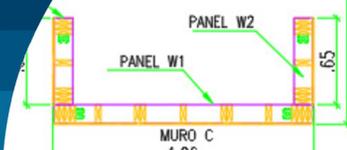
The construction of buildings has contributed considerably to environmental pollution. For this reason, different countries have implemented public policies focused on reducing the carbon footprint through the use of wood in construction. On the other hand, base isolation is an effective technology for seismic protection, which has been implemented mainly in concrete and steel buildings. Still, one of the aspects that has most limited its use is the cost of its implementation (isolator devices, isolation base, perimeter moat wall). This paper presents the results of a shaking table test of a light frame timber building of 3 floors at a 1:2 scale, isolated with frictional pendulum devices, which are resilient to impact. The experimental results indicated that the superstructure did not present damage even when subjected to extreme ground motions (demands higher than the maximum possible earthquake). The use of these devices could avoid the construction of a perimeter wall since they can absorb in a controlled way the effects of the eventual impact of the sliders against their inner ring.

Keywords: seismic isolation, shaking table, frictional isolators, light frame timber building

Introducción

La aislación basal es una técnica para proteger estructuras en zonas de alta amenaza sísmica, cuya eficacia hoy es ampliamente reconocida debido a que ha sido estudiada de

forma teórica y experimental durante las últimas décadas, y a que las estructuras aisladas mostraron un excelente desempeño sísmico cuando fueron sometidas a eventos de gran magnitud (Almazán, 2001). En Japón el uso de



aislación sísmica se ha masificado, mientras que en países como EEUU y Chile su uso ha sido más bien limitado y la implementación de esta tecnología ha ocurrido principalmente en edificios públicos y hospitales (Becker *et al.*, 2015).

Por otra parte, las estructuras de madera se caracterizan por presentar un buen desempeño sísmico durante eventos de gran magnitud mostrando baja probabilidad de colapso. Sin embargo, han presentado daño severo en sus componentes no estructurales cuando fueron sometidas a movimientos extremos, esto se evidenció por ejemplo en el sismo de Northridge (Comerio, 1997; Kircher *et al.*, 1997; Jampole *et al.*, 2016).

La aislación sísmica es una alternativa que se podría emplear en la protección de estructuras de entramado ligero de madera. Por sus características, la aislación tipo friccional es la más apropiada para este tipo de estructuras (Jampole *et al.*, 2016). Se han realizado diferentes estudios para verificar la eficiencia de la aislación friccional en estructuras de entramado ligero de madera. Estas investigaciones indicaron que el uso de la aislación friccional permitió: 1) reducir las aceleraciones de piso y los desplazamientos relativos de entrepiso, 2) mantener a la superestructura en el rango elástico, y 3) conservar la funcionalidad de las estructuras luego de ser sometidas a eventos sísmicos destructivos (Pall y Pall, 1991; Zayas y Low, 1997; van de Lindt *et al.*, 2011).

Pese a la eficiencia de la aislación sísmica friccional en estructuras de entramado ligero de madera, su uso ha sido limitado principalmente debido al costo de: (1) los aisladores; (2) los ensayos requeridos de prototipo; y (3) la construcción de diafragmas horizontales rígidos sobre el sistema de aislación (Jampole *et al.*, 2016; Symans *et al.*, 2002; Sancin *et al.*, 2014).

Adicionalmente, las estructuras aisladas requieren desplazarse libremente dentro de un cierto rango de desplazamiento, para lo cual las normas de aislación sísmica como la NCh2745 (2013) y el ASCE/SEI 7 (2016) establecen que debe ser lo suficientemente grande para que la estructura no impacte con el muro perimetral (*moat wall*) ante el sismo máximo considerado (MCE) (Masroor y Mosqueda, 2015). La construcción de este tipo de adecuaciones que se necesitan para el correcto funcionamiento de una estructura aislada incrementa

aún más el costo de la construcción de edificios de base aislada, haciéndolo poco competitivo en comparación a las estructuras de base fija, las cuales se implementan masivamente, a pesar de no tener el mismo nivel de desempeño sísmico que las estructuras de base aislada.

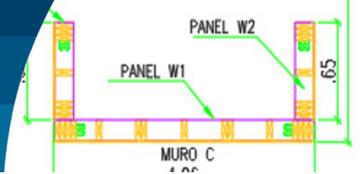
Considerando que el impacto puede ser uno de los causantes de colapso (Bao *et al.*, 2017; Becker *et al.*, 2017) y que la construcción del *moat wall* podría evitarse, Auad y Almazán (2021) desarrollaron un dispositivo denominado IR-DCFP (Impact Resilient Double Concave Frictional Pendulum), el cual es capaz de reducir las fuerzas producidas por impacto. El dispositivo tiene dos interfaces de roce, la primera interfaz llamada de bajo roce o exterior se produce debido al roce producido entre una placa polimérica y el acero inoxidable de la superficie de deslizamiento. La segunda interfaz llamada de alto roce o interior se obtiene debido al contacto entre dos superficies metálicas, que se activa únicamente cuando existe impacto contra el anillo perimetral del aislador (Nivel MCE).

Para validar la eficiencia del sistema de aislación mediante el uso de dispositivos IR-DCFP en una estructura de entramado ligero de madera, se realizaron diferentes ensayos en mesa vibratoria de una probeta de 3 pisos con escala geométrica 1:2, cuyos resultados se describen y discuten a continuación.

Descripción de la probeta

La probeta es una estructura de entramado ligero de madera que fue escalada con una relación 1:2, y que es representativa de una vivienda unifamiliar de 21.64 m².

La Figura 1(a) muestra que la planta de la probeta tiene una dimensión de 2.76 m × 1.96 m, con 3 tipos de muros de entramado ligero: Muro L localizado en el extremo sur, Muro I central, Muro C en el extremo Norte. Estos muros a su vez estaban conformados por paneles denominados W1, W2 y W3. Los paneles W2 y W3 tienen una dimensión de 0.65 m y el panel W1 tiene una dimensión de 1.96 m. Estos paneles se conformaron con pies derechos de 4.1 cm × 13.7 cm de grado C16 de acuerdo con la norma NCh1198 (2014). En la planta se puede apreciar la ubicación de los anclajes tipo *hold down*. Notar que no existen anclajes en los dos extremos del panel W2, debido a que se consideró que existe un acople tridimensional entre los paneles que forman los muros.



La Figura 1(b) muestra una vista en elevación de la fachada norte de la probeta, que tiene una altura de 4.29 m. Se muestra la nomenclatura que se utilizó para identificar los niveles, siendo el nivel 0 (N0) el nivel de aislación, y el nivel 3 (N3) el nivel del techo, adicionalmente se puede ver que se colocaron diafragmas denominados D1 en los niveles de la superestructura y un diafragma D0 en el nivel de aislación. Este diafragma se formó con pies derechos de 4.1 cm × 18.5 cm.

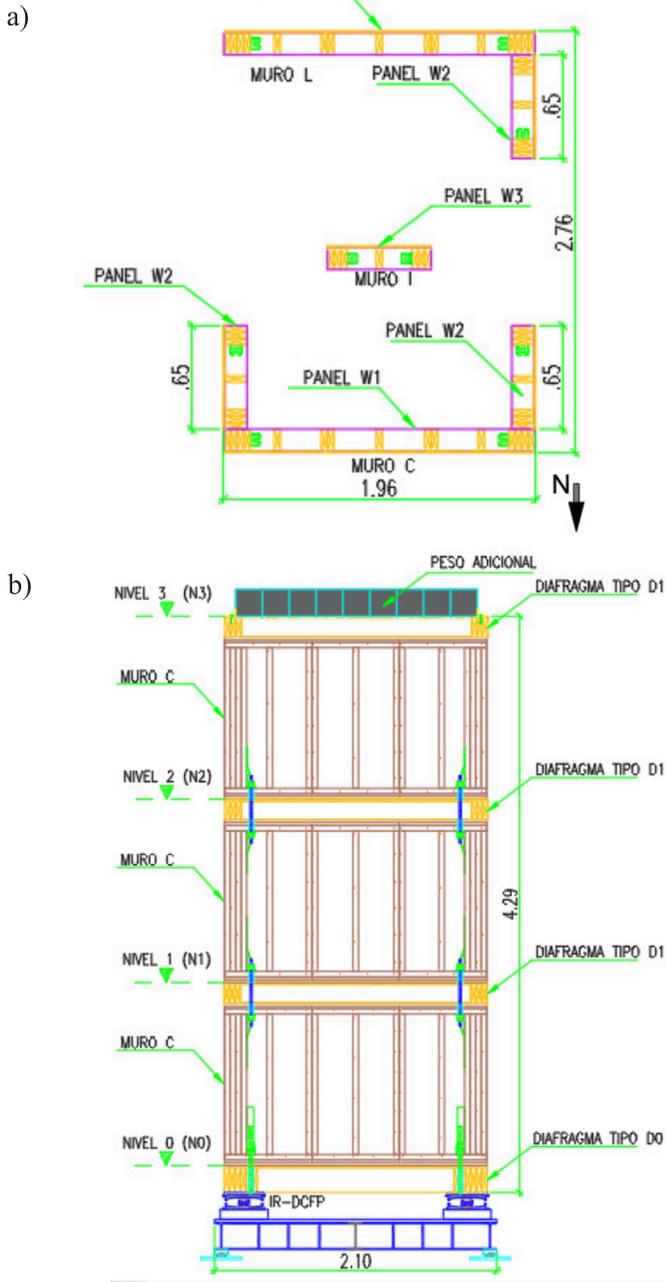


Figura 1: a) Planta de la probeta y b) fachada Norte de la probeta (dimensiones en metros)

Adicionalmente, se puede observar que se colocaron masas adicionales mediante cubos de hormigón de 20 cm y 15 cm de lado en los diferentes niveles de la probeta. La masa adicional se colocó con el objetivo de aumentar las fuerzas inerciales de tal forma de aumentar las deformaciones de la estructura de madera. Considerando el peso propio y la sobrecarga generada por los cubos de hormigón se obtuvo que el peso total de la probeta (W) fue de 8.1 ton.

El sistema de aislación se diseñó siguiendo los lineamientos de la NCh2745 (2013) y asumiendo que la probeta estaría localizada en suelo C y zona 3. El sistema de aislación consistió en 4 aisladores IR-DCFP que se colocaron en los 4 extremos del diafragma D0. El deslizador tiene un diámetro de 8 cm, y la distancia libre d entre el anillo perimetral y el deslizador es de 6 cm. Se espera entonces que la superficie de alto roce se active una vez que el desplazamiento total sea mayor a $2d$ (12 cm).

La Figura 2(a) muestra los componentes del deslizador, se aprecia que el dispositivo tiene dos placas de cobre que conforman la superficie de alto roce. Además, tiene dos piezas de acero HE y M, exteriormente el dispositivo tiene 2 placas poliméricas. La Figura 2(b) muestra el dispositivo ensamblado, donde se aprecia que las placas poliméricas tienen un área de contacto reducida, lo cual se debe a que se dimensionó el dispositivo para que soporte una presión de contacto de 25 MPa (presión cercana a la que tendría la placa de contacto de un deslizador friccional en una estructura de entramado ligero real). La Figura 2(c) muestra el dispositivo en posición deformada luego de que se produjo un impacto entre el anillo perimetral y el deslizador. Se aprecia que el impacto produce un movimiento relativo de la pieza HE con respecto a la pieza M, lo cual activa la superficie de alto roce. En esta figura también se aprecia las superficies de deslizamiento superior e inferior, las cuales tienen un radio de curvatura 75 cm y un ancho total de 20 cm. Adicionalmente se puede ver que no se colocó el anillo perimetral en todo el borde del dispositivo, sino únicamente perpendicular al sentido del movimiento que se impuso con la mesa vibradora (Este – Oeste).

Setup del ensayo

Para realizar la instrumentación del ensayo se utilizaron más de 60 sensores tales como: sensores láser de

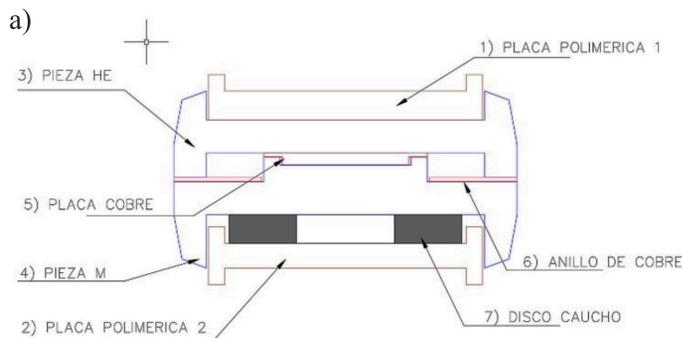
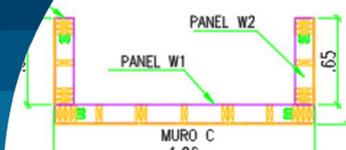


Figura 2: a) Componentes IR-DCFP; b) deslizador ensamblado y c) deslizador luego de impactar

desplazamiento, acelerómetros uniaxiales y triaxiales, potenciómetros de desplazamiento, y strain gauges. La Figura 3 muestra una fotografía del setup del ensayo. Se puede ver que la mesa vibratora está conectada en serie a otra mesa vibratora que controla el movimiento. Se hizo este arreglo debido a que la mesa de control no soportaba la carga vertical de la probeta. Las características de la mesa que carga a la probeta son: máximo desplazamiento ± 50 cm, máxima velocidad 0.5 m/s, máxima carga 200 kN.

Estimación de las fuerzas de corte por piso

Todos los cálculos que se presentan a continuación se basan en las fuerzas obtenidas usando la información de los acelerómetros. Las ecuaciones usadas para el cálculo de los cortes de piso son:



Figura 3: Setup de ensayo (Laboratorio de Ingeniería Estructural PUC)

$$F_3 = m_3 \times a_3 \quad (1)$$

$$F_2 = F_3 + m_2 \times a_2 \quad (2)$$

$$F_1 = F_2 + m_1 \times a_1 \quad (3)$$

$$F_0 = F_1 + m_0 \times a_0 \quad (4)$$

donde $F(j)$ son las fuerzas de corte en los diferentes niveles $j = 0, 1, 2, 3$; $a(j)$ son las aceleraciones medidas en el centro de masa de cada nivel; y $m(j)$ son las masas en cada nivel.

Resultados experimentales

La probeta fue sometida a una serie de señales de entrada que incluyeron: ruido blanco, señales senoidales y registros sísmicos. Por razones de espacio, los resultados que se presentan en este artículo se enfocan en la respuesta obtenida para dos excitaciones: (1) movimiento armónico de 1.5 s de periodo; y (2) componente longitudinal del sismo del Maule (2010), estación de Concepción Centro, con un factor de escala $F = 1.30$. La Figura 4 muestra una comparación del espectro de respuesta en aceleración de la señal medida en la mesa de carga comparada con el espectro normativo para zona 3 y suelo C. La señal generada produjo una pseudo-aceleración 1.5 veces mayor que la correspondiente al espectro en zona 3 y suelo C a nivel MCE de la NCh2745 (2013), en la zona comprendido entre 1 y 1.75 s.

En la Figura 5 se presentan los resultados correspondientes al ensayo armónico para el cual se produjo impacto

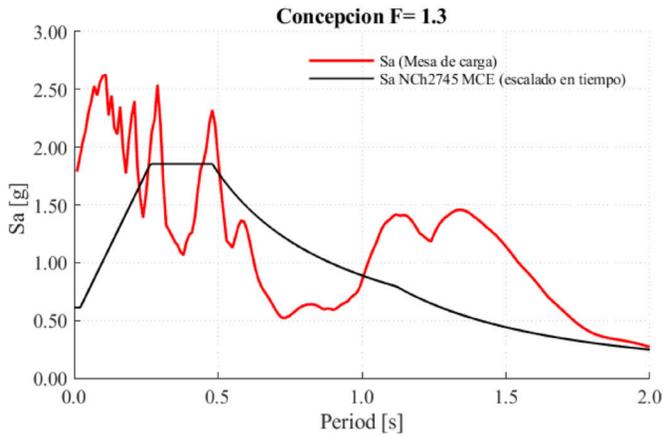


Figura 4: Espectro de respuesta de la señal de entrada

interno en los aisladores. Se muestra en la parte superior e inferior de la figura un acercamiento a las zonas donde quedan en evidencia los 5 impactos identificados, 3 para desplazamientos positivos (#1, #3, y #5) y 2 para desplazamientos negativos (#2, y #4). Se puede concluir que el coeficiente de fricción medio en la interfaz de alto roce tiene un valor máximo comprendido entre 0.16 y 0.19, que tiende a disminuir con la velocidad de deformación. Debe destacarse que a pesar de que la torsión en planta es pequeña, es suficiente para que el impacto interno no se produzca al mismo tiempo en todos los aisladores.

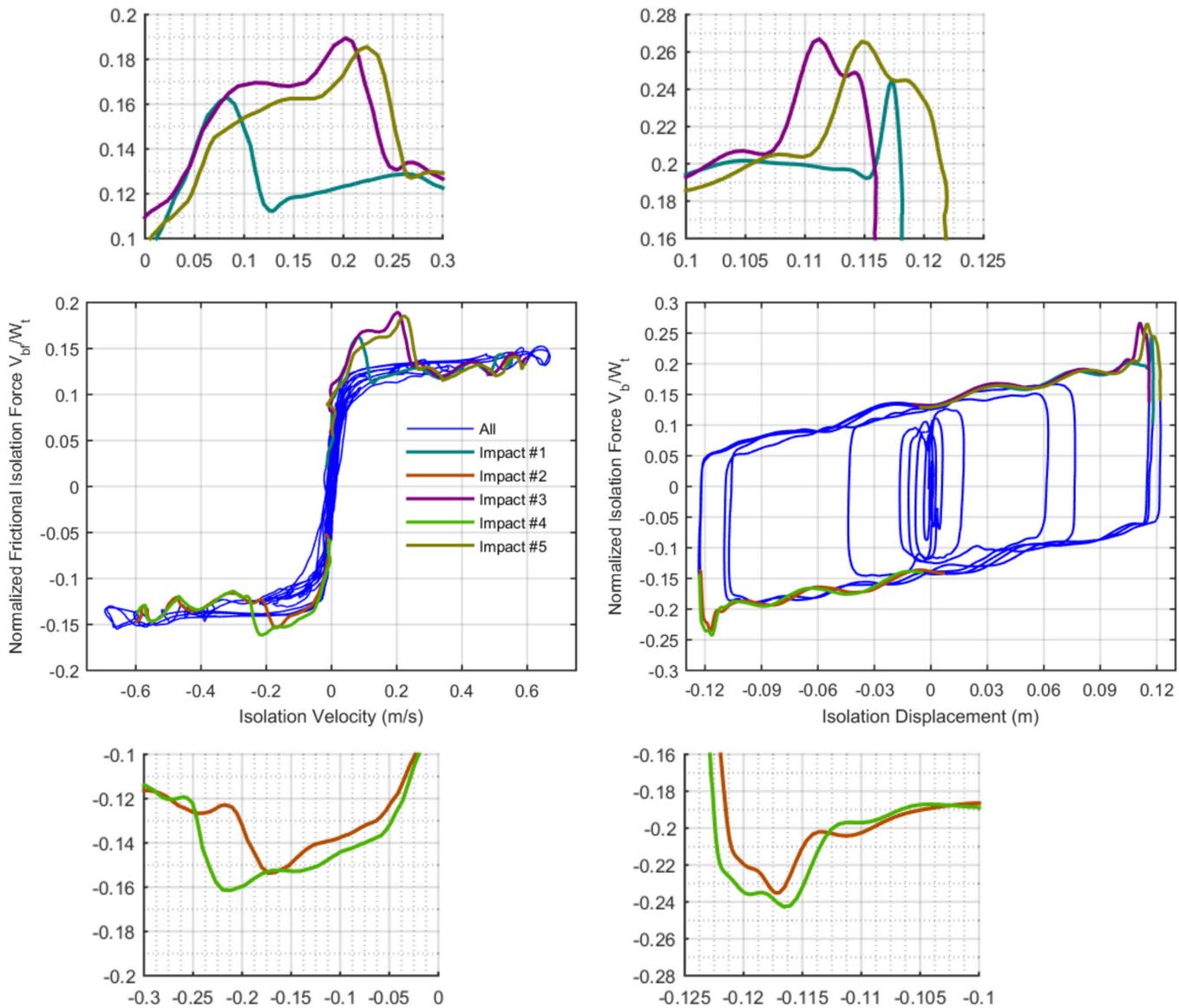
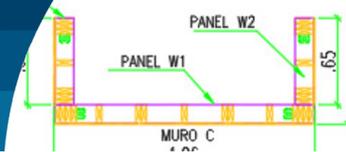


Figura 5: Relación constitutiva medida del sistema de aislación para excitación armónica.



La Figura 6(a) muestra las respuestas en aceleración medida en el centro de masas de cada nivel de la superestructura en una ventana temporal comprendida entre 14.5 y 16 s. Se observa que el impacto se produce en el tiempo 15.2 s y que su efecto inmediato es un incremento de la aceleración en todos los niveles, siendo más evidente el incremento en los niveles inferiores. Además, se observa que luego de que ocurre el impacto las aceleraciones disminuyen hasta que los dos niveles superiores entran en “contrafase” respecto a los 2 niveles inferiores, con una frecuencia aproximada de 4 Hz (frecuencia asociada al segundo modo).

La Figura 6(b) muestra los valores máximos de aceleración obtenidos en cada nivel (PFA). Se observa que pese a que la señal de entrada alcanzó un valor cercano a 1.8g, en la superestructura no se observaron aceleraciones mayores a 0.44g. Para evidenciar de mejor manera la reducción de la

aceleración por efecto de la aislación se normalizaron los PFA respecto a la aceleración medida en la mesa vibradora (PGA). Se observa que la aceleración en la superestructura no supera el 25% del PGA (ver Figura 6(c)).

La Figura 7(a) muestra la respuesta en el tiempo del sistema de aislación. Se aprecia que la fase intensa del movimiento ocurre entre 14 y 21 s, en los que el sistema de aislación tuvo desplazamientos mayores a 12 cm, los cuales activaron la superficie de alto roce. La Figura 7(b) muestra la historia de la fuerza lateral a nivel de la aislación normalizada respecto al peso W , donde se observa que esta fuerza alcanzó un valor del 25% del peso W en el momento del impacto. La Figura 7(c) muestra la histéresis del sistema de aislación, donde se aprecia que el coeficiente de fricción para la interfaz de bajo roce es cercano al 12 %.

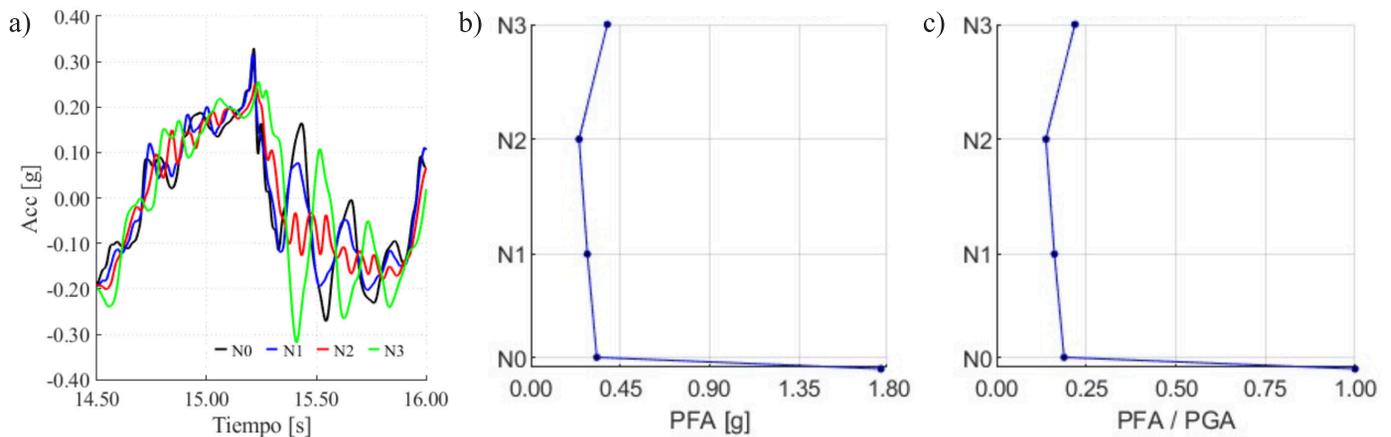


Figura 6: a) Historia de aceleraciones de la superestructura, b) PFA y c) PFA normalizado respecto al PGA

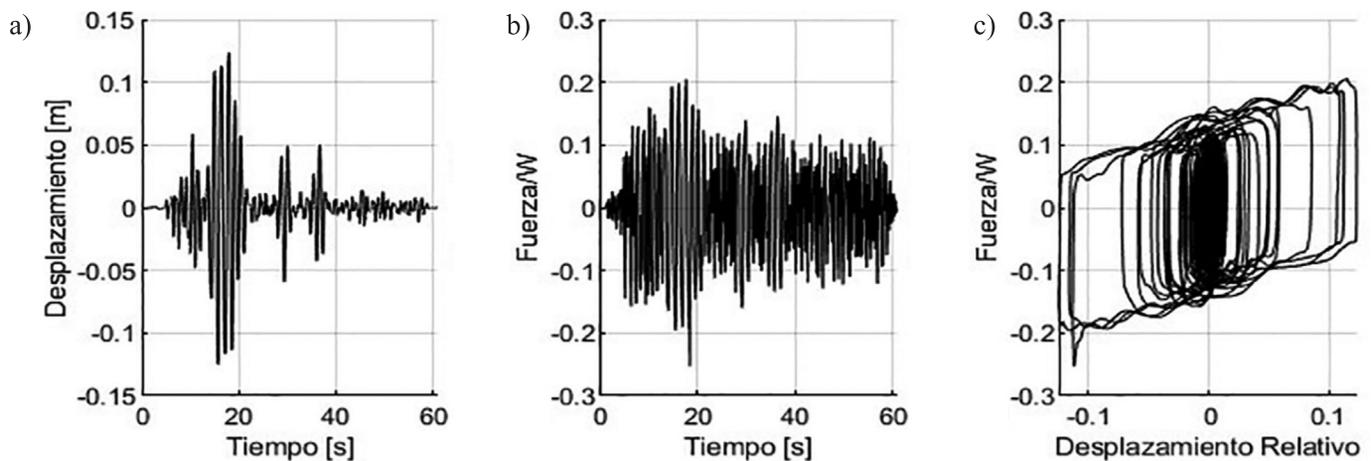
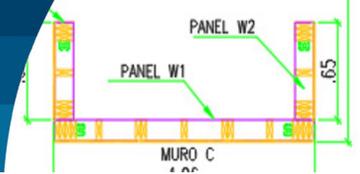


Figura 7: Respuesta del sistema de aislación para el ensayo sísmico.



La Figura 8(a) muestra el valor del desplazamiento máximo relativo entre pisos, normalizado con respecto a la altura (SDR). Se puede apreciar que pese a que la probeta se excitó con un registro con una amplitud amplificada por 1.3, el valor de SDR no supera el 0.4%. Los mayores valores de SDR ocurrieron en el lado Sur, siendo mayores en el último piso. Los bajos niveles de SDR obtenidos gracias a la implementación de los dispositivos IR-DCFP permitieron que la estructura se mantenga en rango esencialmente elástico y que no se aprecie daño visible en la superestructura, tal como se puede apreciar en la Figura 8(b).

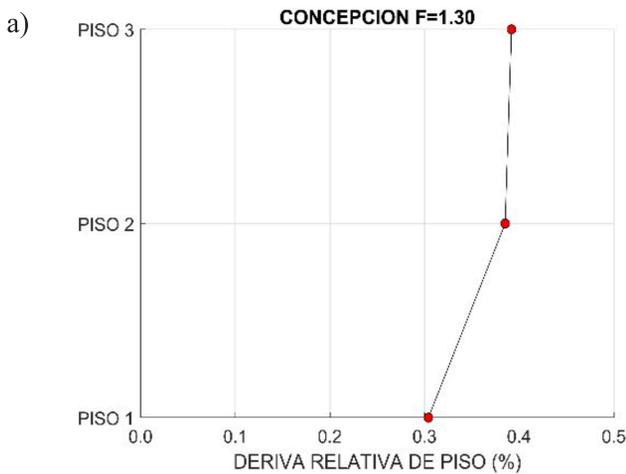


Figura 8: a) SDR y b) inspección visual del daño luego del ensayo

Conclusiones

Se presentan los resultados de un ensayo en mesa vibradora de una estructura de entramado ligero de madera de 3 pisos con aisladores friccionales resilientes a impacto lateral (IR-DCFP), sometida a dos excitaciones: (1) una señal

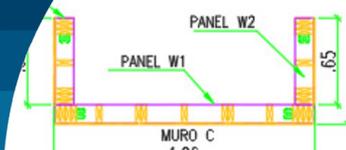
armónica en resonancia con el sistema de aislación; y (2) el registro de Concepción escalado por 1.3. A continuación se presentan las conclusiones generales.

- El sistema de aislación resiliente a impacto que se utilizó en los ensayos permitió disipar una cantidad adicional de energía por la activación de la superficie de alto roce. Pese al relativo pequeño tamaño del aislador, se controló la respuesta para excitaciones de gran intensidad, obteniendo valores de SDR menores a 0.4%, con lo que la superestructura no presentó daño alguno.
- Los PFA comparados con el PGA mostraron una reducción considerable llegando a tener un valor de apenas 0.25 del valor del PGA, este valor indica una alta eficiencia de los dispositivos IR-DCFP si se considera que en estructuras de entramado ligero con base fija en ensayos similares se han observado amplificaciones cercanas a 2.
- Se ha mostrado que es posible realizar la aislación sísmica en estructuras de entramado ligero de madera sin la necesidad de incluir diafragmas horizontales de acero o de hormigón, y sin la necesidad de construir un muro perimetral.

Finalmente, se debe indicar que implementar aislación sísmica resiliente a impacto usando los dispositivos IR-DCFP con diafragma 100% de madera puede incidir en la reducción de los costos del sistema de aislación, debido a que se evitaría la fabricación de una gran losa de hormigón y de un *moat wall* perimetral. Pese a ello, para lograr sistemas más eficientes es necesario seguir investigando el efecto que puede tener el uso de diferentes materiales en las superficies de alto y bajo roce de los dispositivos IR-DCFP.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo brindado por el Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres CIGIDEN, ANID/FONDAP/1522A0005; el Centro Nacional de Excelencia para la Industria de la Madera CENAMAD, ANID/BASAL/FB210015; y ANID/FONDECYT/Regular 1201841. Los autores desean



expresar su agradecimiento al Laboratorio DICTUC de Ingeniería Estructural PUC, y al profesor Francisco Hernández de la Universidad de Chile. El primer autor agradece el apoyo económico para la realización de estudios de postgrado brindado por parte de la Universidad Central del Ecuador.

Referencias

- Almazán, J. (2001). *Torsión accidental y natural en estructuras aisladas con el sistema de péndulo friccional*. Tesis de doctorado, P. Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile
- ASCE/SEI 7 (2016). Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers ASCE, Reston, VA, USA
- Auad, G. and Almazán, J.L. (2021). Lateral impact resilient double concave friction pendulum (LIR-DCFP) bearing: Formulation, parametric study of the slider and three-dimensional numerical example. *Engineering Structures* **233**, 111892
- Bao, Y., Becker, T.C. and Hamaguchi, H. (2017). Failure of double friction pendulum bearings under pulse-type motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* **46**(5), 715-732
- Becker, T.C., Bao, Y. and Mahin, S.A. (2017). Extreme behavior in a triple friction pendulum isolated frame. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* **46**(15), 2683-2698
- Becker, T.C., Yamamoto, S., Hamaguchi, H., Higashino, M. and Nakashima, M. (2015). Application of isolation to high-rise buildings: a Japanese design case study through a US design code lens. *Earthquake Spectra* **31**(3), 1451-1470
- Comerio, M.C. (1997). Housing issues after disasters. *Journal of Contingencies and Crisis Management* **5**(3), 166-178
- Kircher, C.A., Reitherman, R.K., Whitman, R.V. and Arnold, C. (1997). Estimation of earthquake losses to buildings. *Earthquake Spectra* **13**(4), 703-720
- Jampole, E., Deierlein, G., Miranda, E., Fell, B., Swensen, S. and Acevedo, C. (2016). Full-scale dynamic testing of a sliding seismically isolated unibody house. *Earthquake Spectra* **32**(4), 2245-2270
- Masroor, A. and Mosqueda, G. (2015). Assessing the collapse probability of base-isolated buildings considering pounding to moat walls using the FEMA P695 methodology. *Earthquake Spectra* **31**(4), 2069-2086
- NCh2745 (2013). Análisis y diseño sísmico de edificios con aislación sísmica. Instituto Nacional de Normalización INN, Santiago, Chile
- NCh1198 (2014). Madera - Construcciones en madera - Cálculo. Instituto Nacional de Normalización INN, Santiago, Chile
- Pall, A.S. and Pall, R. (1991). Seismic response of a friction-base-isolated house in Montreal. *6th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Toronto, Canada, 375-382
- Sancin, L., Rinaldin, G., Fragiaco, M. and Amadio, M. (2014) Seismic analysis of an isolated and a non-isolated light-frame timber building using artificial and natural accelerograms. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* **55**, 103-118
- Symans, M.D., Cofer, W.F. and Fridley, K.J. (2002). Base isolation and supplemental damping systems for seismic protection of wood structures: Literature review. *Earthquake Spectra* **18**(3), 549-572
- van de Lindt, J.W., Liu, H., Symans, M.D. and Shinde, J.K. (2011). Seismic performance and modeling of a half-scale base-isolated wood frame building. *Journal of Earthquake Engineering* **15**(3), 469-490
- Zayas, V. and Low, S.S. (1997). Seismic isolation of a four-story wood building. In *Earthquake Performance and Safety of Timber Structures*. Forest Products Society, 83-91