

# Análisis del Comportamiento Dinámico de Conectores de Alta Resistencia en un Muro Estructural de Madera

Morejón, Jimmy<sup>1\*</sup> ; Andrango, Carlos<sup>1</sup> ; Viera, Paulina<sup>1</sup> ; Quizanga, Diego<sup>1</sup> ; Coloma, Hernán<sup>1</sup> ; Morales, Christopher<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Quito, Ecuador

**Resumen:** La madera es un material que permite reducir la emisión de dióxido de carbono que genera la construcción de edificios. Por este motivo, su uso es cada vez más frecuente en Chile, Italia y Estados Unidos, especialmente en edificios de entramado ligero de madera (EELM), cuyos sistemas resistentes a carga lateral consiste en muros de corte formado por pies derechos y paneles de fibras orientadas (OSB). En EELM de base fija, se requiere muros con conectores perimetrales (clavos) capaces de proveer una alta ductilidad para que de esta manera tenga un mecanismo de disipación de energía ante la presencia de sismos. Sin embargo, cuando la base es aislada, esta condición no es necesaria. Por lo que se podría proponer el uso de conectores perimetrales que provean menor ductilidad, pero mayor resistencia. El motivo, de esta investigación es analizar el comportamiento histórico de un muro de entramado ligero de madera (MELM) con conectores perimetrales que consisten en tornillos autoroscantes de alta resistencia, mediante el análisis de respuesta ante un ensayo cíclico se pudo evidenciar una resistencia de 200 kN a carga vertical y 194.74 kN a carga lateral. Adicionalmente, en este artículo se presentan los parámetros no lineales para la modelación de la conexión perimetral, así como las propiedades efectivas del muro ensayado, concluyéndose que este presenta un comportamiento estructuralmente eficiente y una rigidez adecuada frente a las cargas aplicadas.

**Palabras clave:** Estructura, Edificios de madera, Anclaje, Disipación de energía, EELM, MELM

## Analysis of the Dynamic Behavior of High Strength Connectors in a Structural Timber Wall

**Abstract:** Wood is a material that reduces the carbon dioxide emissions generated by the construction of buildings. For this reason, its use is becoming more and more frequent in Chile, Italy and the United States, especially in light-frame wood-framed buildings (EELM), whose lateral load-resistant systems consist of shear walls formed by straight legs and oriented strand board (OSB). In fixed-base EELM, walls with perimeter connectors (studs) that provide high ductility are required to ensure an energy dissipation mechanism in the presence of earthquakes. However, when the base is isolated, this condition is not necessary. Therefore, the use of perimeter connectors that provide lower ductility but higher resistance could be proposed. The purpose of this research is to analyze the hysteretic behavior of a light wood framed wall (MELM) with perimeter connectors consisting of high-strength self-tapping screws, through the analysis of the response to a cyclic test, a resistance of 200 kN to vertical load and 194.74 kN to lateral load could be evidenced. Additionally, this article presents the nonlinear parameters for the modeling of the perimeter connection, as well as the effective properties of the tested wall, concluding that it exhibits a structurally efficient behavior and an adequate stiffness against the applied loads.

**Keywords:** Structure, Timber buildings, Anchoring, Energy dissipation, EELM, MELM

### 1. INTRODUCCIÓN

La contribución del sector de la construcción en todos los países es crucial para el desarrollo económico y social (Yagual et al., 2018). Sin embargo, los impactos ambientales negativos también son significativos (Enshassi et al., 2014). La producción del cemento es responsable del 5 % al 8 % de emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial (Velez & Guillen, 2019) y

del consumo masivo de diferentes recursos en el proceso constructivo (Torres & Jaramillo, 2019).

La madera es el único recurso natural renovable dotado de propiedades estructurales y el único elemento vivo que se emplea en construcción (Kottas, 2016). Debido a que la madera es renovable, actualmente, países como Japón, Chile, Canadá promueven políticas públicas para fomentar su uso (Quizanga et al., 2024). Pese a que actualmente el uso del

\*carlosandrango46@gmail.com; morejonzjf@gmail.com

Recibido: 20/02/2025

Aceptado: 10/06/2025

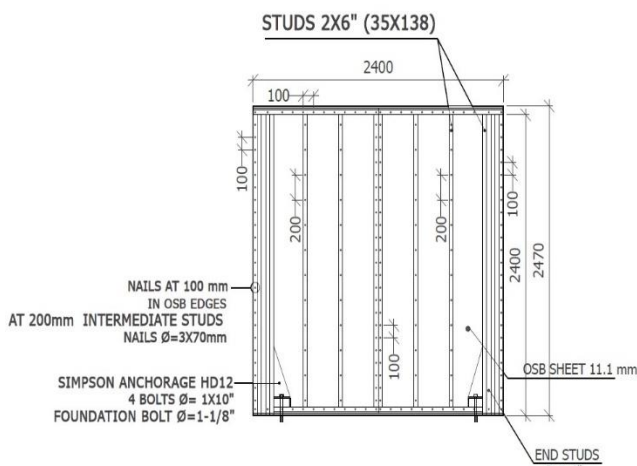
Publicado en línea el 31/08/2025

10.33333/tp.vol56n1.05

CC BY 4.0

(Cross Laminated Timber) CLT como material para la construcción en madera está en auge, el edificio de entramado ligero de madera es el más usado (Gindos, 2019). En este edificio, el sistema resistente a carga lateral consiste en muros formados por pies derechos y recubiertos de paneles de OSB, en los cuales los conectores perimetrales son los que le proveen ductilidad (Estrella et al., 2020). Debido a que Chile, es un país con alta amenaza sísmica, diferentes estudios se han realizado en ese país (Guiñez et al., 2019; Estrella et al., 2020; Orellana et al., 2021), los cuales se han enfocado en analizar y proponer configuraciones para incrementar la resistencia de estos muros, la cual depende de: número de pies derechos, características del panel, tipo y separación del conector (Gindos, 2019). Por ejemplo, Orellana et al. (2021) ensayaron 8 muros de entramado ligero de madera con paneles OSB y conectores perimetrales que consistieron en clavos helicoidales de  $\varnothing=3\text{mm}$ . Después de someter estos muros a carga cíclica y fuerza axial, su estudio concluyó que la carga axial genera una mayor rigidez inicial respecto a los muros que fueron ensayados sin carga por Guiñez et al. (2019).

La Figura 1 muestra un muro de entramado ligero de madera de 2400 mm de longitud con clavos de  $\varnothing = 3 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$  usados como conectores perimetrales.



**Figura 1.** Especificaciones del muro para el Ensayo cíclico realizado por Guiñez et al. (2019)

El Ecuador tiene un alto riesgo sísmico (Cunalata & Caiza, 2022). La elección del sistema estructural es de suma importancia para garantizar la seguridad. Los muros portantes tienen como principal característica la rigidez, lo cual es una ventaja sobre los sistemas que son más flexibles como el sistema de pórticos que es el predominante en el país (Calderón et al., 2021).

La Norma Ecuatoriana de Construcción NEC-15, en su apartado estructuras de madera (NEC, 2014a) y la Guía práctica para Estructuras de Madera, de la misma norma (NEC, 2014b), no hace recomendaciones sobre el uso de muros de entramado ligero de madera y en el país según el mejor conocimiento de los autores el único ensayo de un MELM lo realizaron Cayambe et al. (2024), sin considerar la presencia de la carga axial. Por otra parte, estos muros usualmente requieren ser altamente dúctiles para proveer mecanismos de disipación de la energía sísmica (Estrella et al., 2020), pero en

los últimos años se ha estudiado el uso de entramados ligeros de madera con aislación sísmica friccional (Van de Lindt, 2011; Jampole, 2016; Quizanga et al., 2024), debido a que en estas estructuras aisladas el mecanismo de disipación de la energía sísmica es la fricción de los dispositivos, no se requiere alta ductilidad de los muros. Con estos antecedentes, este artículo presenta los resultados experimentales del ensayo cíclico de una conexión entre el panel OSB y los pies derechos en los cuales se usaron conectores de alta resistencia, y con esto se calibraron los parámetros para la modelación. Adicionalmente, se presentan los resultados del ensayo cíclico de un muro de entramado ligero con conectores perimetrales de alta resistencia. Para la realización de este ensayo, se siguieron los lineamientos de la norma de la American Society for Testing and Materials (ASTM E2126, 2012). Finalmente, se presentan las propiedades efectivas del muro ensayado (rigidez, amortiguamiento, deriva de piso entre otros) y se discuten los resultados del ensayo del muro.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Metodología

Los ensayos se realizaron en las instalaciones del Centro de Investigación del Diseño Industrial, Innovación y Emprendimiento (CIDIIE) de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad Central del Ecuador y el Centro de Investigación de la Vivienda (CIV) de la Escuela Politécnica Nacional.

El proceso metodológico experimental en esta investigación empezó por el ensayo cíclico de los tirafondos en el CIDIIE, seguido de la gestión y adquisición de materiales para la elaboración del muro. Luego se procedió a la construcción de la probeta (muro estándar de Orellana et al., 2021), en la que se imitó el patrón de clavado, pero utilizando tirafondos de alta resistencia, debido a que para la construcción del sistema de carga, se implementaron todos los equipos necesarios, y se realizó el ensayo cíclico con carga vertical (ASTM E2126, 2012) en el CIV. Finalmente, se llevó a cabo el análisis de resultados, discusión y conclusiones.

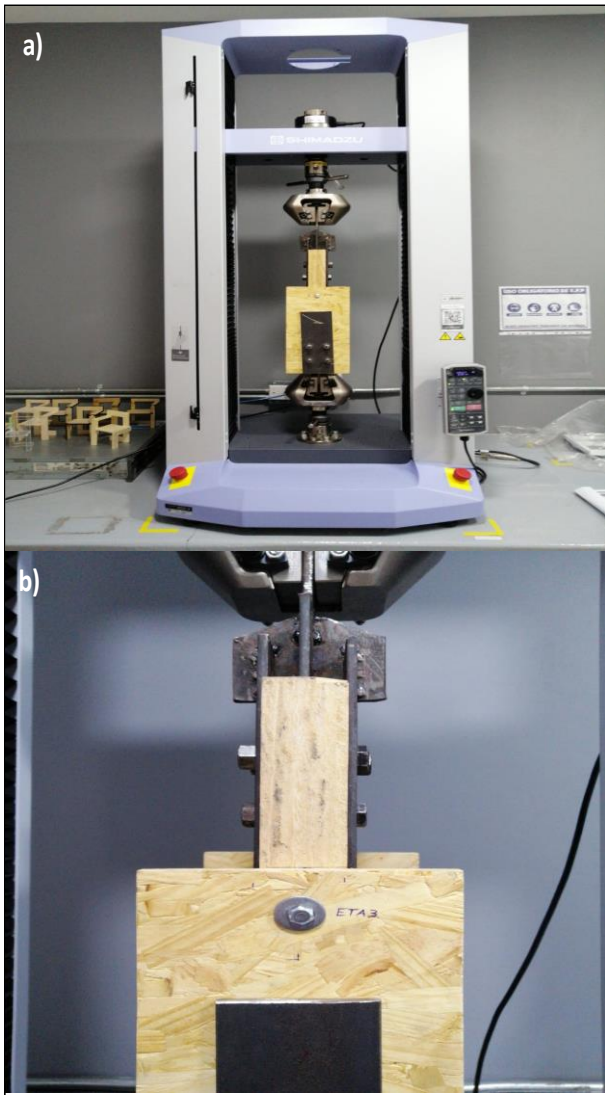
### 2.2 Ensayo cíclico de los tirafondos de alta resistencia

La probeta ensayada consiste en ubicar una pieza de madera central con dimensiones de  $40 \times 140 \times 260 \text{ mm}$ , sujeta con unas mordazas, y dos paneles de OSB de  $300 \times 150 \times 11.1 \text{ mm}$  conectados mediante los tirafondos de estudio con un diámetro de  $6 \text{ mm}$  y  $50 \text{ mm}$  de largo, como se muestra en la Figura 2a. Con la máquina electromecánica de ensayo universal Shimadzu AGS-X de  $50 \text{ kN}$ , se realizaron ensayos de compresión y tracción basados en el parámetro de carga especificado por la norma (ASTM E2126, 2012), hasta llevar al tirafondo a la falla, como se observa en la Figura 2b.

El comportamiento del conector se representa mediante un modelo histerético de Stewart modificado (MSTEW), propuesto por Folz & Filiatrault (2001). Investigaciones anteriores han demostrado la precisión del modelo y su representación de una respuesta no lineal entre las uniones y los tableros de recubrimiento (Estrella et al., 2020).

El modelo MSTEW consta de 10 parámetros de modelación que captan fenomenológicamente el aplastamiento de la madera junto con la elasticidad de los conectores (Estrella et al., 2020).

Una vez realizados los ensayos cíclicos de la conexión, se calibraron los resultados experimentales para lo cual se usó el modelo MSTEW y el programa M-CASHEW (Pang, 2014). Este programa realiza una corrección de los parámetros histeréticos, los cuales son fundamentales para la realización del modelado del muro de entramado ligero de madera.



**Figura 2.** a) Ensayo de los conectores en la maquina universal Shimadzu AGS-X de 50 kN, b) Ensayo cíclico de los tornillos autoroscantes para madera de alta resistencia

### 3. ENSAYO CÍCLICO DE UN MURO DE ENTRAMADO LIGERO DE MADERA

#### 3.1 Materiales

Posteriormente, se adquirieron los materiales necesarios para la construcción de las probetas, estas se refieren a muros marco plataforma con elementos de eucalipto y tirafondos de alta resistencia. La madera utilizada en esta investigación fue

adquirida en aserraderos locales especializados en el tratamiento de diferentes especies de la región, mientras que los tirafondos fueron obtenidos a través de un distribuidor de materiales de construcción.

El proceso inicial consistió en ensamblar las piezas del muro. Las conexiones entre los tablonos para formar los pies derechos y soleras se realizaron mediante pegamento industrial y tirafondos de 127 mm x  $\varnothing=6$  mm. Estos se colocaron a lo largo de los componentes mencionados. Las dimensiones y demás elementos se muestran en la Figura 3a. En el sistema de sujeción, se emplearon 8 anclajes metálicos (holdowns) para los dos muros, situados en las esquinas internas de cada probeta. Dado que no se encontraron holdowns en el mercado ecuatoriano, se optó por fabricarlos con manufactura nacional certificada.

El procedimiento fue despiezar el holdown con las especificaciones y dimensiones indicadas por Simpson Strong-Tie para el anclaje HD12. El resultado se muestra en la Figura 3b (Strong-Tie, 2024).

Cada anclaje se unió al muro mediante 5 pernos de  $\varnothing=1"$ , los cuales facilitaron su conexión con la viga de cimentación y de distribución de carga. Se utilizaron 4 paneles de OSB, de 2440 x 1220 x 11.1 mm, para recubrir el marco en ambas caras.

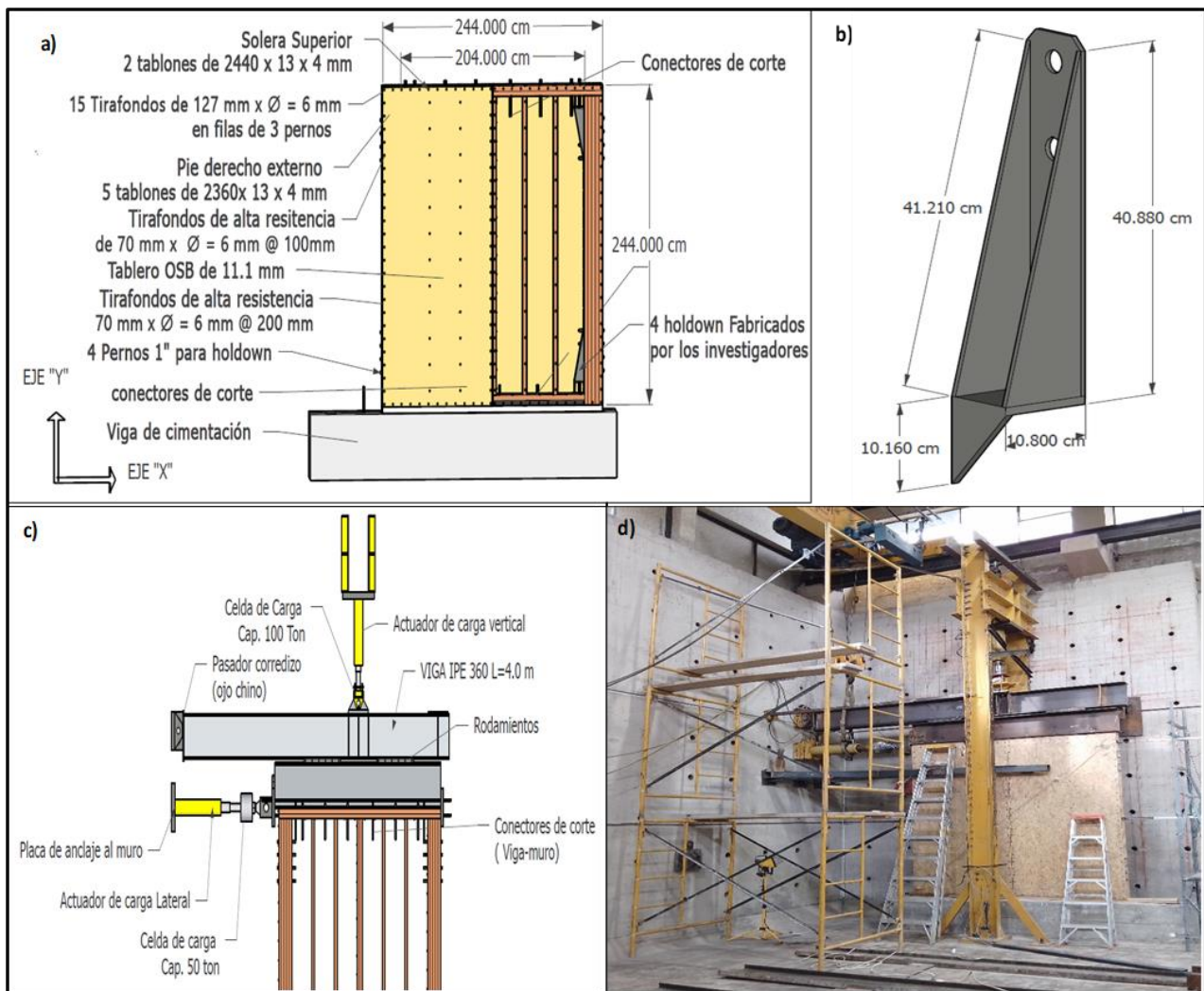
Estos paneles se sujetaron a los pies derechos y soleras mediante tirafondos de alta resistencia de 50 mm x  $\varnothing=6$  mm, siguiendo un patrón de atornillado con una separación de 10 cm en los bordes del tablero y de 20 cm en los pies derechos internos, como se observa en la Figura 3a. Además, se utilizaron arandelas de  $\varnothing=20$  mm en los tirafondos para proteger y aumentar la superficie de contacto con el OSB y evitar el punzonamiento.

#### 3.2 Construcción del sistema de carga

El ensayo cíclico especifica que la carga debe distribuirse sobre la superficie de la solera superior del muro, bajo las condiciones de peso propio y uso de la estructura para edificaciones de mediana altura (Orellana et al., 2021).

Al tratarse de un estudio sin precedentes en el país, los laboratorios disponibles no contaban con la estructura para distribución de carga vertical requerida en esta investigación. Por lo que se implementó un par de vigas y rodapiés para esta sollicitación y transformar la carga puntual a una distribuida sobre el muro.

Este mecanismo incluye una viga IPE 360 de  $L=4.0$  m, empernada al actuador vertical y sujeta al contrafuerte en ambos extremos con pasadores corredizos (ojo chino), los cuales facilitan el desplazamiento en el eje "Y" del conjunto. Debajo se colocaron dos rodapiés diseñados por los autores para reducir el coeficiente de fricción lateral durante el ensayo. Además, se utilizó una viga IPE 360 de  $L=2.5$  m para la transmisión de carga lateral, la cual fue sujeta al muro mediante conectores de corte, como se muestra en la Figura 3c.



**Figura 3.** Configuración del muro marco plataforma: a) Esquema general del muro, b) Forma del holddown, c) Componentes del sistema de distribución de carga, d) Sistema de aplicación de carga e instrumentación del muro

### 3.3 Montaje y ensamble

Con el fin de facilitar la comprensión del montaje en el laboratorio, la Figura 3d presenta el sistema preparado para el ensayo con carga vertical y lateral. El montaje se realizó conforme a la disposición de los orificios dispuestos en los contrafuertes del CIV, con el muro orientado en posición habitual de construcción (vertical), a diferencia de otros ensayos previos que realizaron de manera horizontal (Orellana et al., 2021).

La probeta se acopló a una viga de hormigón armado, la cual estaba anclada al sistema de cimentación del laboratorio mediante unas varillas de anclaje, lo que limitó el desplazamiento desde la base.

### 3.4 Instrumentación

Una vez anclado el muro a la viga de cimentación y conectado el sistema de distribución de carga, se procedió a instrumentar el ensayo. Se utilizó un actuador y una celda de 100 toneladas en los ejes “X” y “Y”, respectivamente. Para la medición de las deformaciones, se colocaron siete transductores de desplazamiento lineal variable (LDVT), en total cuatro al interior del muro para medir deformaciones cerca a los

holdowns, dos en la parte lateral para medir la deformación en el eje “X”, y uno acoplado a la celda de carga para registrar el desplazamiento vertical.

### 3.5 Ensayo del muro marco plataforma

La fuerza lateral se aplicó siguiendo el patrón de carga cíclico descrito en la norma (ASTM E2126, 2012). Cada onda corresponde a un ciclo ( $C\#$ ) y cada pico marca el inicio de una nueva fase ( $F\#$ ). Estas fuerzas laterales consisten en empujar y halar la probeta con una carga similar dentro de cada ciclo. El porcentaje máximo de desplazamiento se especifica como el 0.025 de la altura del muro, según la norma (ASTM, E2126 2012).

El procedimiento comenzó con la aplicación progresiva de la carga vertical, con incrementos de 5 toneladas hasta alcanzar las 20 toneladas previstas por los investigadores. Estas cargas representan las solicitudes gravitacionales de un edificio aproximadamente de 5 pisos, lo que provoca grandes fuerzas de compresión en los muros inferiores, que requieren montantes verticales resistentes (Orellana et al., 2021). Posteriormente, se aplicó la carga lateral según el procedimiento descrito en la normativa mencionada anteriormente. El punto de falla se consideró cuando la carga

lateral aplicada cayó un 20 % con respecto al máximo alcanzado, momento en el cual se finalizó el experimento. En este punto, se registró el desplazamiento final (Cayambe et al., 2024).

#### 4. RESULTADOS

Como se mencionó con anterioridad el modelo propuesto de los conectores es validado para tener una idea de la respuesta fuerza- desplazamiento del muro de entramado ligero de madera. El diagrama de histéresis del conector de alta resistencia se muestra en la Figura 4a, junto a los parámetros de modelación. Para una mejor apreciación, se muestran los resultados del modelo Stewart modificado (MSTEW) en la Tabla 1, se compararon los resultados con los obtenidos por Estrella et al. (2020) para los clavos helicoidales utilizados en su ensayo.

Se utilizó el programa M-CASHEW para ingresar el análisis histerético de los tornillos y modelar el muro portante de madera con los datos que solicita el programa, del cual se obtuvo como respuesta el diagrama de histéresis de muros de entramado ligero de madera, diagrama que después será corregido y ajustado para obtener los resultados definitivos. A partir de esto, se genera la envolvente que se muestra en la Figura 4b, y se cambia los signos de la parte negativa, lo cual permitió obtener las envolventes en un solo cuadrante para la visualización de las mismas como se muestra en la Figura 4c. Consecuentemente, se obtiene la curva Elasto-Plástica de Energía Equivalente (EEEEP), se determinan varios puntos en la envolvente, con el fin de comparar el modelo con las gráficas obtenidas del experimento.

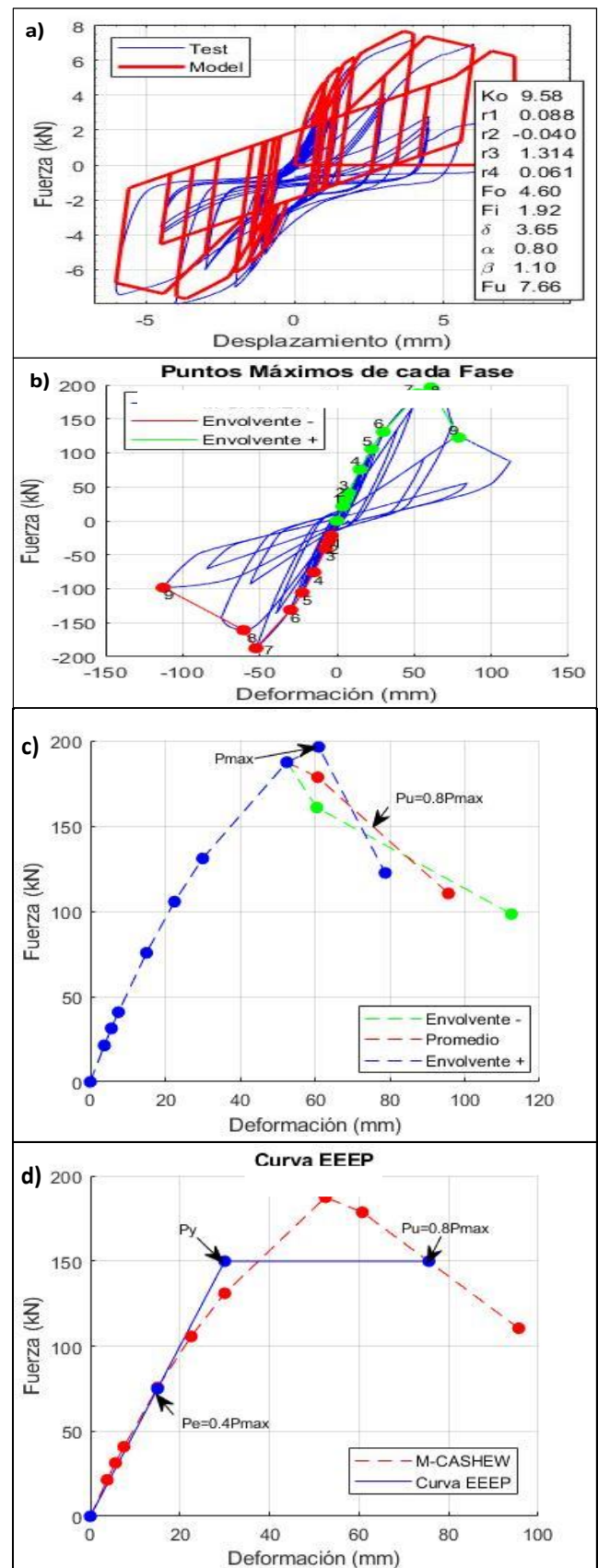
**Tabla 1.** Resultados del modelo de MSTEW del conector de alta resistencia y comparación con los conectores usados por Estrella et al. (2020)

Caso	Investigación actual	(Estrella et al. 2020)
<b>Ko (kN/mm)</b>	9.58	0.911
<b>r<sub>1</sub></b>	0.088	0.055
<b>r<sub>2</sub></b>	-0.04	-0.079
<b>r<sub>3</sub></b>	1.314	1.177
<b>r<sub>4</sub></b>	0.061	0.01
<b>Fo (kN)</b>	4.6	0.879
<b>Fi (kN)</b>	1.92	0.109
<b>δu (mm)</b>	3.65	11.951
<b>α</b>	0.8	0.569
<b>β</b>	1.1	1.165

En el ensayo experimental del muro, se determinaron los valores máximos de deformación y carga bajo empuje ( $D_{max}$  y  $F_{max}$ ), y los valores mínimos bajo tracción ( $D_{min}$  y  $F_{min}$ ) para cada ciclo realizado. Es importante destacar que los signos negativos en los datos finales indican únicamente la dirección de la fuerza y el movimiento.

Se aplicó la regla de trapecio (integración trapezoidal) (Chopra, 2014) para graficar cada ciclo y calcular las áreas de histéresis. De esta manera, se determinó la energía disipada ( $E_d$ ), la cual equivale al área de histéresis de cada ciclo ( $C\#$ ). La energía disipada acumulada ( $E_{dA}$ ) se obtuvo de la

sumatoria de las áreas de todos los ciclos. La Figura 5 muestra la variación de esta energía disipada.



**Figura 4.** a) Histéresis corregida del conector y sus parámetros histeréticos, b) Envolvente positiva y negativa del modelo de MELM c) gráfica de las envolventes y envolvente promedio del modelo de muro en M-CASHEW d) curva EEEP del modelado del MELM

Los picos de energía disipada ( $E_d$ ) corresponden a los primeros ciclos de cada fase, lo cual muestra un aumento gradual de la disipación. Se observan tres series de incrementos similares, mínimos en las tres primeras fases y más significativos en las fases posteriores, lo cual se refleja en el aumento de las pendientes que se han acentuado con una línea azul en la Figura 5. Este patrón está asociado con la configuración específica del ensayo, determinada por las amplitudes de la normativa utilizada.

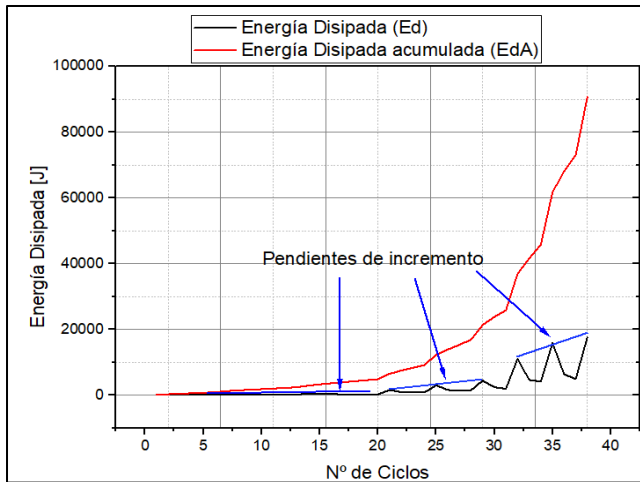


Figura 5. Valores de disipación de energía: Energía Disipada en cada ciclo de ensayo, energía disipada acumulada

#### 4.1 Histéresis de ciclos y envolvente

La Figura 6a muestra los ciclos de ensayo ( $C\#$ ) con el color azul para graficar todos los datos. La envolvente se crea a partir de esta figura, la cual conecta los puntos de carga máximos y mínimos ( $F_{max}$ ,  $D_{max}$  y  $F_{min}$ ,  $D_{min}$ ) de los ciclos iniciales de cada fase, como se ilustra en la misma figura.

La parte superior de la Figura 6a, marcada con un entrelineado verde, presenta la envolvente de las series positivas, mientras en la parte inferior, marcada con un entrelineado rojo, se muestra la envolvente de las series negativas.

#### 4.2 Envolvente promedio

Las envolventes se unen en el mismo cuadrante al invertir el signo de la parte negativa. Esto, como se muestra gráficamente en la Figura 6b, permite calcular un promedio entre ambas, con una línea azul se muestra la envolvente promedio del experimento y facilita la comparación con la envolvente del modelo de MELM que se representa con una línea roja.

#### 4.3 Curva Elasto-Plástica de Energía Equivalente (EEEP)

La curva Elasto-Plástica de Energía Equivalente se calcula a partir de la envolvente promedio. Esta curva idealiza el comportamiento de las probetas, la cual pasa de una figura curvilínea, a una bilineal equivalente.

En la Figura 6c, se representa la superposición entre el diagrama de histéresis del modelo del MELM obtenido como resultado del M-CAHSEW y del diagrama histerético

resultante del ensayo experimental de la probeta a escala real, lo que posibilita tener una visualización más eficiente y la comparación entre los resultados teóricos y los experimentales.

Con base en las comparaciones realizadas, las predicciones del modelo para este muro de entramado ligero, muestran parámetros similares entre los diagramas de histéresis lo que afianza el correcto procedimiento tanto del ensayo como del modelo.

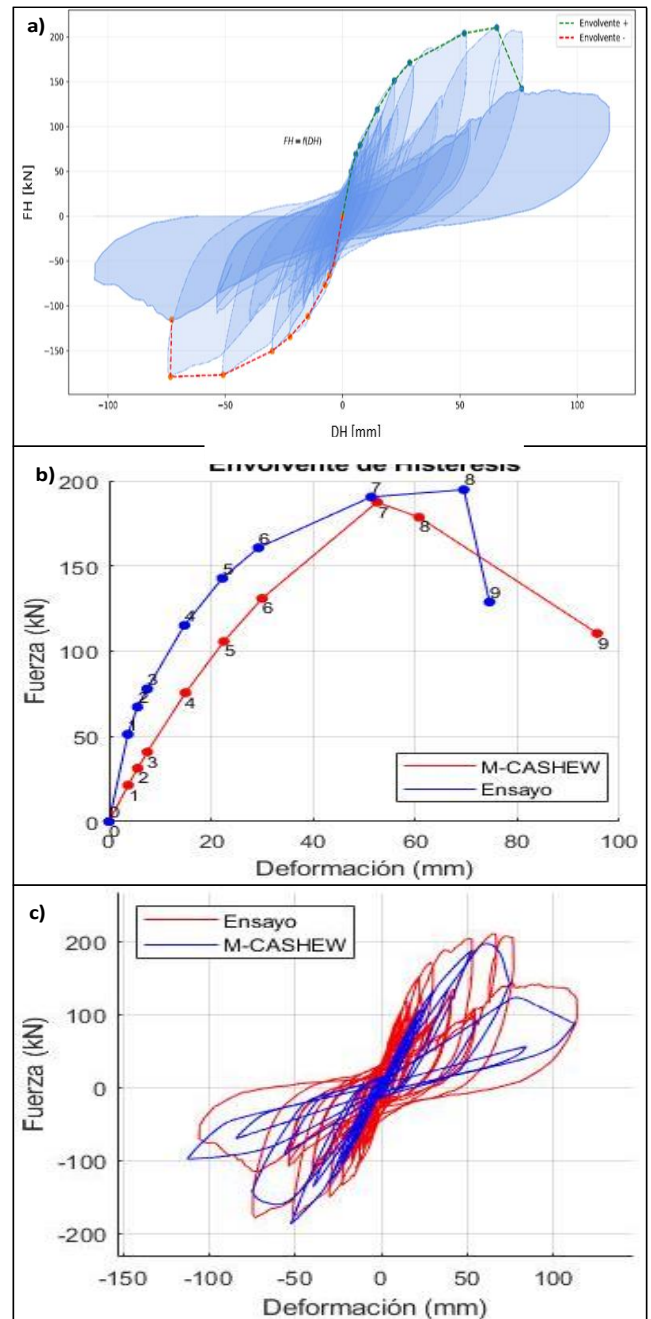


Figura 6. a) Envolvente de las cargas máximas, b) Envolvente positiva, negativa y promedio del modelo y del experimento, c) Superposición de histéresis teórica y experimental

#### 4.4 Cálculos

En el presente trabajo, se realizan los cálculos de la rigidez efectiva de cada ciclo ( $K_{eff}$ ), la energía de deformación

máxima (*Eso*), la deriva de piso (*Drift*), la deriva relativa a la altura (*SDR*), el amortiguamiento efectivo (*Beff*) y el amortiguamiento viscoso efectivo (*EVD*) mediante las siguientes fórmulas:

#### 4.5 Rigidez efectiva (*Keff*)

Este parámetro se calculó con la Ecuación (1), para lo cual se consideraron las deformaciones máximas y mínimas (*Dmax* y *Dmin*) y las fuerzas correspondientes para cada ciclo.

$$Keff = \frac{F^+ + F^-}{D^+ + D^-} \quad (1)$$

Donde:  $F^+$  = Fuerza máxima correspondiente al desplazamiento máximo positivo,  $F^-$  = Fuerza máxima correspondiente al desplazamiento máximo negativo,  $D^+$  = Desplazamiento máximo positivo,  $D^-$  = Desplazamiento máximo negativo.

Posteriormente, se calculó la pendiente entre estos dos puntos (*Keff*) según la variación de rigidez en función de los ciclos. Un comportamiento obtenido es que la rigidez disminuyó significativamente en el primer ciclo de cada fase, mientras que aumentó en los ciclos siguientes. En general, se puede decir que la rigidez disminuyó menos en las tres primeras fases del ensayo en comparación con los ciclos finales.

En la Figura 7a, se puede evidenciar como la deriva de piso aumenta a medida que la rigidez disminuye. Además, los ciclos iniciales de cada fase tienen una deriva mayor a los ciclos sucesivos de la misma fase, a pesar de que la rigidez de estos ciclos no es significativamente diferente.

#### 4.6 Energía de deformación máxima (*Eso*)

La variación de la cantidad de energía de deformación máxima (*Eso*) que disipó el muro en cada ciclo se calcula con la Ecuación 2.

$$Eso = \frac{1}{2} Keff * \Delta_{max}^2 \quad (2)$$

Dónde: *Keff* = Rigidez Efectiva,  $\Delta_{max}$  = Desplazamiento máximo.

Los primeros ciclos de cada fase corresponden a los picos de “*Eso*”, estos valores aumentan progresivamente. Cuando el MELM supera su capacidad de resistencia plástica y entra en la fase de falla, la “*Eso*” se ve reducida de manera significativa, en un porcentaje superior al 10 % de su valor máximo.

#### 4.7 Amortiguamiento Efectivo (*Beff*)

Se define como la capacidad de absorber fuerzas externas mediante secciones transversales de los componentes estructurales, donde una buena configuración proporciona un mayor amortiguamiento y un valor alto de disipación de energía. Esto se puede calcular con la ecuación 3 (Cayambe et al., 2024).

$$Beff = \frac{1}{\pi} \left( \frac{Ed}{Keff(|D_{max}^+|^2 + |D_{min}^-|^2)} \right) \quad (3)$$

Donde: *Ed* = Energía Disipada, *Keff* = Rigidez efectiva,  $D^+$  = Desplazamiento máximo positivo,  $D^-$  = desplazamiento máximo negativo.

La Figura 8b muestra gráficamente el amortiguamiento total generado por el muro. En los ciclos iniciales (del C1 al C13), el amortiguamiento es bajo porque la probeta todavía estaba dentro del rango elástico. El muro comienza a mostrar una mayor disipación de energía plástica en la tercera fase (F3) o C14. El pico de amortiguamiento se muestra en F2, F3 y F4 corresponde al segundo ciclo de cada una. Desde el ciclo 25 en adelante, los puntos máximos de la gráfica coinciden con el primer ciclo de cada fase.

#### 4.8 Amortiguamiento viscoso Equivalente

En las pruebas de carga cíclica, el amortiguamiento viscoso equivalente (EDV) es una métrica comúnmente utilizada para evaluar el amortiguamiento de los componentes estructurales. El EVD se calcula al igualar la energía disipada en un ciclo de carga del sistema y un sistema viscoso equivalente bajo excitación armónica (Orellana, Santa Maria, Almazan, & Estrella, 2021). La EVD se calcula con la Ecuación 4.

$$\varepsilon_e = \frac{1}{4\pi} * \frac{Ed}{Eso} \quad (4)$$

Donde:  $\varepsilon_e$  = Energía de deformación absorbida en el ciclo, *Eso* = Energía de deformación elástica máxima, *Ed* = Energía disipada.

## 5. TIPOS DE FALLAS PRESENTES EN EL ENSAYO

Se realizó el ensayo de los tirafondos de alta resistencia para observar su comportamiento frente a las sollicitaciones de empuje y hale, los resultados mostrados evidencian la alta rigidez que tienen los conectores usados en esta investigación. Al llevarlos hasta la falla, se produjeron fracturas de forma dentada, lo que describe que no hubo elongación sino una fractura frágil como se ve en la Figura 8a.

De la misma manera, se llevó cabo el ensayo cíclico del muro de entramado ligero, cuyos componentes mostraron varios daños, grietas y deformaciones.

La estructura soportó las cargas como un conjunto, sin embargo, el panel de revestimiento fue el primer elemento en fallar y presentó daños por aplastamiento o compresión, por corte y punzonamiento.

El aplastamiento se originó debido a la deformación del muro, esto hizo que el OSB subiera y bajara fuera del marco del muro, lo que provocó choques con las vigas de carga y cimentación, a pesar de haberse dejado un espacio adecuado entre estos elementos. A medida que la deformación aumentaba, el OSB sufrió mayor compresión hasta llegar a la rotura, como se muestra en la Figura 8b.

Las fallas por corte se observan en la Figura 8c, se hicieron presentes al momento en que el muro se deformó y adoptó una

forma trapezoidal, al estar anclado el OSB por los tirafondos se transmitió esta deformación, lo que causó este fenómeno, el cual por lo general se dió en las esquinas y extremos del panel.

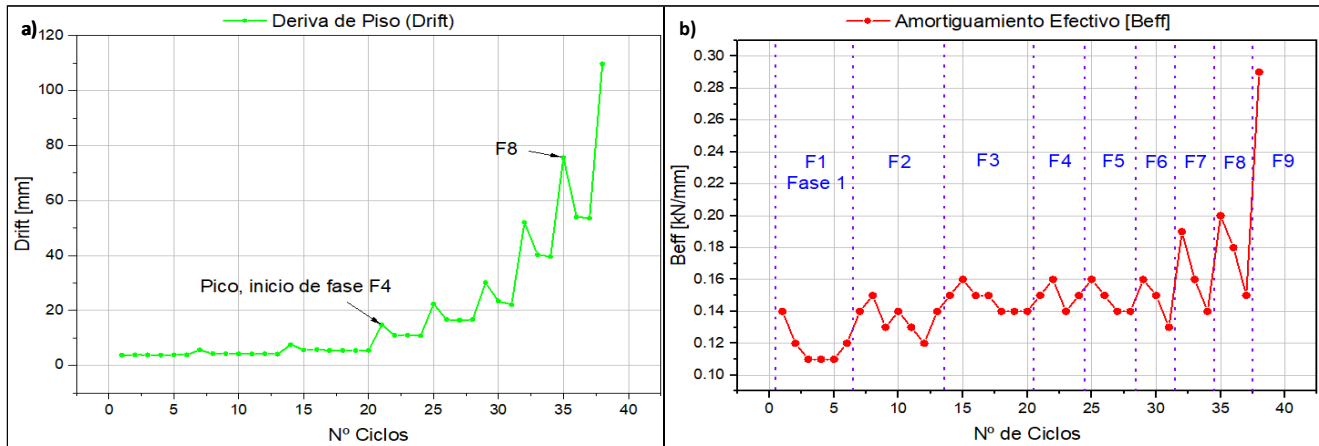


Figura 7. a) Deriva de piso presentada en función del número de ciclos, b) Variación del amortiguamiento efectivo (Beff) en cada ciclo de ensayo

El punzonamiento se debió a que la rigidez del tablero de recubrimiento fue inferior a la de los conectores de alta resistencia con las arandelas planas. Al aplicar la carga, el OSB tendía a deformarse hacia fuera, pero los tirafondos, al ser más rígidos que el tablero, provocaron el punzonamiento y la falla, como se muestra en la Figura 8d.

Otro factor fue el agrandamiento de las fallas naturales o existentes de la madera que se muestran en la Figura 8e. La coincidencia de estas fallas con la ubicación de los tirafondos de anclaje del OSB causó daños en ciertos elementos, ya que la rigidez de los tornillos superó la de la madera, lo cual ocasionó daños en la pieza estructural.

Por último, las perforaciones de los tirafondos produjeron fracturas en la madera, como se ve en la Figura 8e. Estas fracturas, al estar cercanas unas de otras, formaron una falla mayor que afectó directamente a la resistencia estructural del elemento.

Pocos conectores del panel sufrieron fractura por corte debido a su rigidez. En su mayoría, sufrieron una deformación en la dirección que se presentó la fuerza aplicada, como muestra en la Figura 8f, lo que indica un correcto funcionamiento de estos elementos en el ensayo.

Estos fueron los elementos donde se notaron fallas o deformaciones evidentes. Los demás componentes, como el sistema de distribución de carga, holdowns, pernos de corte, viga de cimentación, actuadores, lectores de deformación et al. elementos usados en la instrumentación, no sufrieron daños ni deformaciones que afectaran el desempeño del experimento ni a los datos recolectados.

## 6. DISCUSIÓN

Los parámetros que se obtuvieron del modelo de Stewart modificado (MSTEW) propuesto por Folz & Filiatrault (2001), como se muestran en la Tabla 1, indican que el valor de  $K_0 = 9.58$  kN/mm es la rigidez inicial del conector y denota

una superioridad a los clavos helicoidales utilizados por Estrella et al. (2020). El punto de inicio para la determinación de la fuerza máxima que resiste este conector es  $F_0 = 4.6$  kN lo que supera en un 500 % al  $F_0$  del conector de Estrella et al. (2020), una deformación en el punto máximo de carga de  $\delta u = 3.65$  mm que frente a la  $\delta u = 11.95$  mm presenta una evidente disminución. Es decir que, estos resultados muestran que el conector de alta resistencia en su comportamiento es altamente rígido, lo que al contrario de los clavos usados por Estrella et al. (2020), son 3 veces más dúctiles, los tirafondos de alta resistencia usados en la presente investigación, realizan un gran aporte a la rigidez general del muro a diferencia de los conectores de Estrella et al. (2020) y Orellana et al. (2021) que permiten una mayor deformación antes de llegar a las cargas máximas.

Los tornillos autoroscantes para madera de alta resistencia pudieron soportar una  $F_{maxprom} = 7.66$  kN con una deformación máxima de 7.25 mm lo que demuestra su rigidez en el ensayo cíclico. Los principales modos de falla que se evidenciaron en los muros fueron la combinación de la deformación de los conectores del revestimiento y las fallas por corte del tablero OSB.

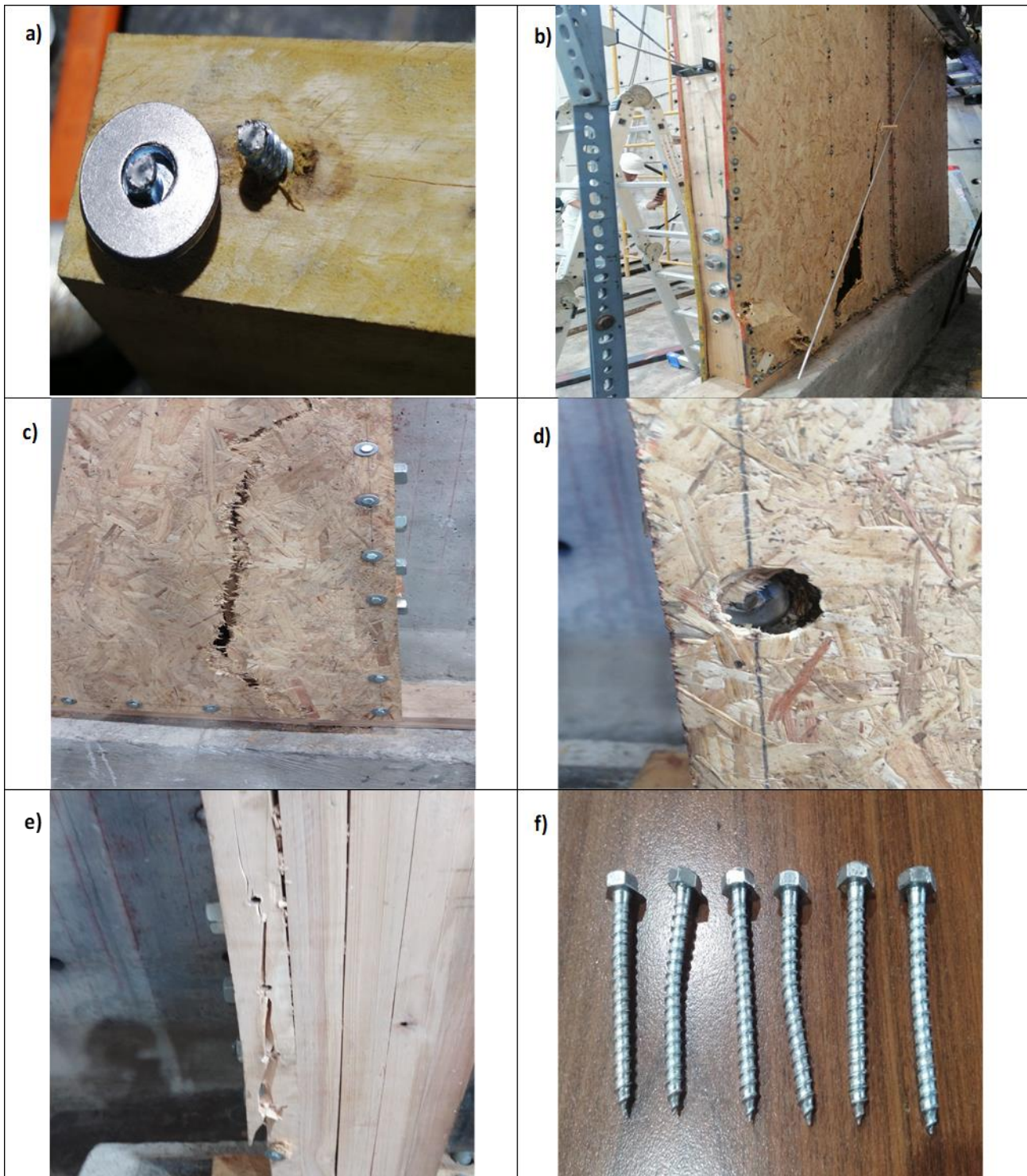
El pandeo del panel fuera del eje de acción del marco es un comportamiento común en este tipo de ensayos. Esto provoca que se genere un punzonamiento entre los clavos y el OSB como expresa Orellana et al. (2021), sin embargo, para evitar este comportamiento se añadieron arandelas en los tirafondos, lo que redujo en gran porcentaje este fenómeno.

Los resultados obtenidos del modelado de madera mediante el M-CASHEW indican que al usar los conectores de alta resistencia el muro teóricamente tiene una resistencia máxima de 198 kN y 70 mm de deformación, muy similares a los resultados obtenido en el experimento del muro marco plataforma a escala real ensayado en el CIV.

Del experimento se lograron completar ocho fases del ensayo cíclico y al inicio de la novena se concluyó. La energía máxima

disipada por el muro en el último ciclo (C38) fue de 17.5 [kJ], lo cual se atribuye a la rigidez de la probeta, ya que mientras

más dúctil es un elemento estructural, mayor la energía que disipa.



Durante las tres primeras fases de la gráfica de  $EdA$  (hasta el ciclo 20), se observa un ligero aumento de la energía disipada, con una tendencia similar a una función lineal. Después, se nota un incremento más rápido, similar a una gráfica exponencial.

Cuando se realiza la gráfica de la histéresis y se obtiene como resultado final la envolvente promedio, se puede ver como la deformación aumenta a medida que se incrementa la carga, para lo cual alcanzó su punto máximo a los 194.74 kN, similar a la carga resultante del modelo. Posteriormente, se calculó el punto de falla ( $Pu_{prom} = 0.8 Pmax_{prom} = 155.79$  kN).

Se puede ver en la Tabla 2 el  $P_0$  ( $P = 0$ ) hasta el primer punto ( $P_e = 0.4$   $P_{max} = 77.9$  kN), la curva promedio y la *EEEE* coinciden en el rango elástico. El límite elástico de la curva Elasto-Plástica de Energía Equivalente se muestra en el segundo tramo de la recta inclinada hasta el punto final ( $P_y = 170.72$  kN).

Una de las características de la probeta es la rigidez, al momento de realizar el ensayo cíclico, esta tiende a disminuir por la naturaleza del experimento, ya que el muro transita de su estado elástico a plástico. Por tal motivo, las primeras fases del experimento no tienen una disminución muy marcada de la rigidez, a diferencia de las fases finales, donde el declive es más notable, ya que la probeta entra en su estado límite de fluencia hasta llegar a la falla.

## 7. CONCLUSIONES

Los tornillos de alta resistencia demuestran un comportamiento altamente rígido, de esta manera, superan en gran medida a los conectores utilizados por otros autores en estudios similares, lo que denota la factibilidad de su uso en la fabricación de muros de entramado ligero de madera.

El desempeño de los tornillos autoroscantes para madera de alta resistencia se evidencia en el comportamiento general del muro. Mediante el ensayo, se observó que la resistencia del muro propuesto fue mayor a la presentada en ensayos similares, cerca al doble del muro reportada por Orellana et al. Sin embargo, no se evidenció un comportamiento dúctil de los conectores (Ver Figura 8a). Por este motivo, se puede inferir que el uso de este tipo de muros podría ser adecuado en sistemas como edificios de entramado ligero de madera con base-aislada, sistemas que se benefician al contar con mayor rigidez lateral y cuyo mecanismo de disipación de energía sísmica proviene de la deformación del sistema de aislación y no de la capacidad de disipar energía de los muros.

Los materiales utilizados en esta investigación, para la elaboración de las probetas con madera de eucalipto, tuvieron un buen desempeño frente a las cargas vertical y lateral. Esto dio como resultado una resistencia promedio de 19 Tn a carga lateral y 20 Tn a carga vertical, por tanto, la construcción de este sistema constructivo es viable desde el punto de vista antes mencionado.

El sistema de distribución de carga diseñado para este ensayo funcionó de la manera prevista, lo que permitió la interacción entre las componentes horizontal y vertical lo cual provocó una rotación del sistema conforme a la deformación del muro sin afectar ningún parámetro del ensayo.

Con los resultados obtenidos, se pudo evidenciar que este sistema estructural tiene una gran capacidad para disipar energía tanto elástica como plásticamente, debido a las propiedades intrínsecas de la madera, del OSB y la rigidez aportada por los conectores. En este sentido, si se cambia alguno de los parámetros mencionados cambiarán los resultados.

El elemento que presentó daños en primera instancia fue el anclaje del panel (tirafondos) y por consecuente el tablero OSB que otorgó en conjunto a los demás elementos del muro una

resistencia promedio de 19 Tn de carga lateral, luego procedió a una falla por corte y aplastamiento en las esquinas, para un posterior colapso.

La inexistencia de ciertos elementos en el mercado ecuatoriano como los anclajes metálicos, obligó a los investigadores a buscar opciones como la de fabricar el sistema de sujeción del muro, los holdowns fueron fabricados en función a los anclajes Simpson Strong-Tie HD12, con lo que se obtuvieron excelentes resultados, estos no sufrieron ningún daño, deformación, ni alteración durante el ensayo.

Los muros de corte investigados en el presente trabajo tienen una excelente respuesta estructural por tal motivo, este sistema es una solución sostenible y viable para la construcción en países con alto riesgo sísmico. El método constructivo es apropiado para edificaciones de madera de entramado ligero en mediana altura con base-aislada.

## FINANCIAMIENTO

Los autores expresan que este trabajo de investigación fue autofinanciado en un 70 %, y el 30 % restante tiene financiación a través de gestiones y donaciones con diferentes instituciones como SEDEMI y el CIV.

## DECLARACIÓN DE INTERESES CONCURRENTES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses sobre este proyecto de investigación.

## AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al Centro de Investigación de la Vivienda (CIV) de la Escuela Politécnica Nacional las facilidades presentadas y predisposición durante el ensayo.

A los Ingenieros Esteban y Santiago Proaño Gerentes de SEDEMI, también al Ingeniero Pablo Vaca supervisor, por el apoyo brindado para la realización del proyecto.

Al Ingeniero Paul Orellana por su tiempo y colaboración para aclarar dudas sobre esta investigación.

A el Ing. Edgar Patricio Jácome Monar director del Centro de Investigación del Diseño Industrial, Innovación y Emprendimiento (CIDIE), de la Universidad Central del Ecuador por la accesibilidad a sus instalaciones para realizar los ensayos requeridos en este trabajo de investigación.

## REFERENCIAS

- American Society for Testing and Materials. (2012). *Prueba de carga cíclica (invertida) para resistencia del corte vertical Elementos de los sistemas resistentes a fuerzas laterales para edificios. (ASTM E2126)*. Estados Unidos: ASTM. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/77475/4526ad8ffd426b8f37d2b5860b8e17/ASTM-E2126-11.pdf>
- Calderón, A., Yepez, C., & Silva, V. (2021). *Tipologías constructivas en Quito, Cali y Santiago de los Caballeros*. Quito: Global Earthquake Model, GEM;

- Obtenido de [https://cloud-storage.globalquakemodel.org/public/wix-new-website/pdf-collections-wix/publications/TREQ%20deliverables/publications/TREQ\\_Deliverable\\_D231\\_Building\\_Classes\\_v1\\_1.pdf](https://cloud-storage.globalquakemodel.org/public/wix-new-website/pdf-collections-wix/publications/TREQ%20deliverables/publications/TREQ_Deliverable_D231_Building_Classes_v1_1.pdf)
- Cayambe, A., Chiluisa, A., Quizanga, D., & Viera, L. (2024). Analisis de las características mecánicas de un muro marco plataforma de madera de Eucalipto, sin carga vertical. *Novasinergia*, 7(1), 107-121. <https://doi.org/10.37135/ns.01.13.06>
- Chopra, A. (2014). *Dinámica de Estructuras, Teoría y aplicaciones a la Ingeniería*. California: Pearson Editorial. Obtenido de [https://www.academia.edu/36451323/Dinamica\\_de\\_Estructuras\\_4Ed\\_Anil\\_K\\_Chopra](https://www.academia.edu/36451323/Dinamica_de_Estructuras_4Ed_Anil_K_Chopra)
- Cunalata, F., & Caiza, P. (2022). Estado del Arte de Estudios de Vulnerabilidad Sísmica en Ecuador. *Revista Politécnica*, 50(1), 55-64. <https://doi.org/10.33333/rp.vol50n1.06>
- Enshassi, A., Kochendoerfer, B., & Rizq, E. (2014). Evaluación de los impactos medioambientales de los proyectos de construcción. *Revista ingeniería de construcción*, 29(3). <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732014000300002>
- Estrella, X., Guindos, P., Almazan, J. L., & Malek, S. (2020). Modelización no lineal eficiente de muros de cortante de entramado de madera resistente para edificios de mediana altura. *Engineering Structures*, 215. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110670>
- Folz, B., & Filiatrault, A. (2001). Cyclic Analysis of Wood Shear Walls. *ASCE library*, 127(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:4\(433\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:4(433))
- Gindos, P. (2019). *Conceptos Avanzados del Diseño Estructural con Madera*. Santiago de Chile: Universidad Católica de Chile. <https://acortar.link/AdDHcW>
- Guiñez, F., Santa Maria, H., & Almazan, J. L. (2019). Comportamiento Monotónico y Cíclico de muros de corte de entramado de madera para edificios de madera de mediana altura. *Engineering Structures*, 189, 100-110. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.043>
- Jampole, E. (2016). *High-friction sliding seismic isolation for enhanced performance of light frame structures during earthquakes*. (Publication N° 28118483) [Doctoral Dissertation, Stanford University, California]. <https://acortar.link/ro8TiV>
- Kottas, D. (2016). *Materiales para la construcción*. Azuay: Plutón Ediciones.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2014) (a). *Estructuras de Madera (NEC-SE-MD)*. Quito: Dirección de Comunicación social, MIDUVI. Obtenido de <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/11.-NEC-SE-MD-Estructuras-Madera.pdf>
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2014) (b). *Guía práctica para el diseño de estructuras de madera*. Quito: Dirección de Comunicación Social, MIDUVI. Obtenido de <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/04/GUIA-4-MADERA.pdf>
- Orellana, P., Santa Maria, H., Almazan, J. L., & Estrella, X. (2021). Comportamiento Cíclico de los muros de Corte de estructura de madera con carga vertical y momento de flexión para Edificios de madera de mediana altura. *Engineering Structures*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112298>
- Pang, W. (2014). Corotational Model for Cyclic Analysis of Light-Frame Wood Shear Walls and. *Researchgate*, 139(8), 1-16. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000595](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000595)
- Quizanga, D., Valdiviezo, D., Almazan, J. L., Guindos, P., & Garcia, D. (2024). Estudio experimental en mesa vibradora de una estructura de madera de 3 pisos de entramado ligero con aisladores sísmicos friccionales resilientes a impacto. *Obras y Proyectos*, (35), 40-47. <https://doi.org/10.21703/0718-2813.2024.35.2798>
- Strong-Tie, S. (2024). *Holdowns and Tension Ties*. Simpson. Obtenido de [https://www.strongtie.com/holdownsandtensionties\\_wodconnectors/category](https://www.strongtie.com/holdownsandtensionties_wodconnectors/category)
- Torres, M., & Jaramillo, A. (2019). Transición a la sostenibilidad de la arquitectura ecuatoriana contemporánea a través del uso de materiales naturales. *EIDOS* (14), 45-53. <https://doi.org/10.29019/eidos.v14i1.606>
- Van de lindy, J. (2011). Seismic Numerical Modeling of a Six-Story Light-Frame Wood Building: Comparison with Experiments. *Journal of Earthquake Engineering*, 15(6), 924-941. <https://doi.org/10.1080/13632469.2010.544840>
- Velez, A., & Guillen, V. (2019). Energía contenida y emisiones de CO2 en el proceso de fabricación de cemento en el Ecuador. *Artigos*, 20(3). <https://doi.org/10.1590/s1678-862120200003000448>
- Yagual, A., Lopez, M., Sanchez, L., & Narváez, J. (2018). La contribución del sector de la construcción sobre el Producto interno bruto PIB en Ecuador. *La Sallista de investigación*, 15(2), 286-299. <https://doi.org/10.22507/rli.v15n2a22>

## BIOGRAFÍAS



**Jimmy, Morejón**, Estudiante egresado de Ingeniería Civil de la Universidad Central del Ecuador. Áreas de interés en estructuras de madera y acero. Experiencia en empresas privadas en el ámbito de la construcción en madera y ejecución de proyectos de contratación pública.

Actualmente, forma parte de la empresa TEAM MORES dedicada a proyectos agroforestales y turísticos, encargado de la parte de investigación y construcción.



**Carlos, Andrango**, Estudiante egresado de la Carrera de Ingeniería Civil en la Universidad Central del Ecuador, ha colaborado en proyectos de investigación realizados en el CIV, cuenta con certificaciones de trabajo en riesgos laborales y trabajos en altura aprobados por el Ministerio de Trabajo del Ecuador. Participe de múltiples proyectos de Estructuras Metálicas en el ámbito laboral.



Ecuador.

**Luisa, Viera**, Ingeniera Civil, segundo mejor promedio de su promoción. Magister en Estructuras Sismo-resistentes. Doctora en Ingeniería de la Construcción por la Universidad Politécnica de València. Docente titular Agregado 2 de la Carrera de Ingeniería civil de la Universidad Central del

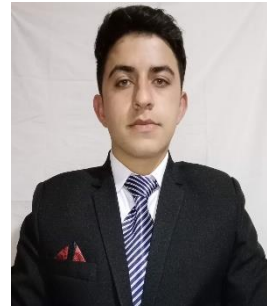


**Diego, Quizanga**, Ingeniero Civil (ESPE), Máster en Estructuras (EPN). Cuenta con de experiencia en la elaboración de ingeniería conceptual, básica y de detalle en proyectos para facilidades de Petróleo & Gas. Ha participado en el análisis estructural, diseño, construcción y coordinación de proyectos para los sectores de Oil & Gas a nivel nacional e internacional. Actualmente se desempeña como profesor e investigador en la Universidad Central del Ecuador, sus líneas de investigación son: aislación sísmica, riesgo sísmico, estructuras de madera. Ha sido ponente en diferentes conferencias internacionales y ha realizado publicaciones en revistas de alto impacto, con investigadores de Chile, Argentina, España y USA.



**Hernán, Coloma**, Ingeniero Civil especializado en estructuras con una destacada trayectoria como consultor, diseñador y constructor de obras civiles. Graduado de la Universidad Central del Ecuador, ha trabajado en la planificación y ejecución de proyectos estructurales, desde residencias hasta infraestructuras industriales. Con experiencia en la optimización de diseños para garantizar seguridad y eficiencia, ha liderado proyectos y colaborado con equipos

multidisciplinarios. Asimismo, se encuentra inmerso en el campo de la docencia durante casi seis años, destacándose por su compromiso con la formación continua y el uso de tecnología avanzada en ingeniería estructural.



muros de entramado ligero.

**Christopher, Morales**, estudiante de los últimos semestres de la carrera de ingeniería civil en el Itinerario de estructuras de la Universidad Central del Ecuador. Durante sus estudios, se dedicó al diseño y análisis de estructuras y al modelado 3D. Actualmente realiza investigaciones sobre el análisis y modelamiento de