



e-ISSN 2588-0721  
DOI: [10.33936/riemat.v11i2.8481](https://doi.org/10.33936/riemat.v11i2.8481)

**RIEMAT**

Página web de la revista: <https://revistas.utm.edu.ec/index.php/Riemat>



## Artículo Original

# Análisis del comportamiento de la conexión cola de milano en uniones viga-columna de pórticos de madera.

## Analysis of the behavior of the dovetail connection in beam-column joints of wooden frames.

Karina Jamileth Álava Pico <sup>a\*</sup>, Alisson Nathaly Mendieta Alvarado <sup>a</sup>, Alfonso Bernardo Horacio Romero Hidrovo <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Técnica de Manabí. Portoviejo, Ecuador.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6708-9981>

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1423-5242>

<sup>b</sup> Departamento de Construcciones Civiles, Arquitectura y Geología, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Técnica de Manabí. Portoviejo, Ecuador.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0223-0486>

\* Autor para correspondencia.

[kalava1418@utm.edu.ec](mailto:kalava1418@utm.edu.ec)

Recibido: 11/06/2026

Aceptado: 29/06/2026

Publicado: 12/08/2026

**Citacion sugerida:** Álava, K., Mendieta, A. & Romero, A. (2026). Análisis del comportamiento de la conexión cola de milano en uniones viga-columna de pórticos de madera. *Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología. RIEMAT*, 11(2), 16-32. <https://doi.org/10.33936/riemat.v11i2.8481>

## Resumen

Las conexiones en pórticos de madera pueden realizarse de varias formas y en la tradición constructiva ancestral, existe una, llamada Cola de Milano. Para analizar el comportamiento estructural del ensamble, las pruebas experimentales proporcionan la información más útil. Se escogió la Tectona Grandis por la amplia difusión de su uso en nuestro medio. Se escogió cargas horizontales al nivel de dintel, aplicándolas de manera cíclica según la norma ASTM E2126-19. Las deformaciones fueron registradas con transductores LVDT y strain gauges en ubicaciones apropiadas. Los resultados mostraron concentración de deformaciones en los nudos apoyados, evidenciando un comportamiento semirrígido de las conexiones. Dado el tipo de material, los especímenes ensayados presentaron variaciones en los parámetros estudiados. A pesar de esto, se mostró que los ensambles tienen una eficiencia favorable frente al tipo de solicitaciones aplicadas por su capacidad de redistribuir cargas y disipar energía.

**Palabras clave:** cola de milano, conexiones tradicionales, unión viga-columna, pórtico de madera, transductores

## Abstract

Connections in wooden frames can be made in various ways, and in traditional construction methods, there is one known as the dovetail joint. Experimental testing provides the most useful information for analyzing the structural behavior of the joint. Tectona Grandis was chosen due to its widespread use in our region. Horizontal loads were applied at the lintel level in a cyclic manner according to ASTM E2126-19. Deformations were recorded using LVDT transducers and Strain Gauges at appropriate locations. The results showed a concentration of deformations at the supported joints, indicating semi-rigid behavior of the connections. Given the type of material, the tested specimens exhibited variation in the parameters studied. Despite this, the assemblies were shown to perform favorably under the applied loads due to their ability to redistribute loads and dissipate energy.

**Keywords:** dovetail joint, traditional connections, beam-column joint, wooden frame, transducers

## 1. Introducción

Las estructuras de madera han sido utilizadas desde la antigüedad como un recurso constructivo sostenible, eficiente y adaptable en las diferentes condiciones ambientales y geográficas. Particularmente en las regiones con mayor actividad sísmica, la madera ha demostrado un comportamiento favorable por su bajo peso propio, su capacidad de disipar energía y su ductilidad, cualidades que contribuyen a la disminución de las fuerzas sísmicas transmitidas a la estructura (Melero Herranz, 2020).

Por sus numerosas propiedades muchas edificaciones de madera tradicionales en la costa ecuatoriana han cumplido con sus funcionalidades y su estabilidad estructural a lo largo del tiempo, incluso frente a eventos sísmicos de considerable magnitud (Bazurto et al., 2022). En Ecuador el análisis estructural resulta esencial debido a su elevada actividad sísmica y la necesidad de evaluar la respuesta de las edificaciones ante estas solicitaciones. (Pinargote et al., 2019). Y uno de los materiales más utilizado es la teca (*Tectona Grandis*), con módulo de elasticidad cuyo valor está en el rango de 9.479 a 10.920 kN/mm<sup>2</sup> (Rodríguez Anda et al., 2014).

Una de las uniones tradicionales más utilizadas en la Costa Manabita es la cola de milano, que ocupa un lugar destacado gracias a su particular geometría y su gran capacidad de autoanclaje haciendo posible la unión entre viga y columna sin necesidad de conectores metálicos. Esta unión se caracteriza por ser un ensamble trapezoidal que impide un desplazamiento de la viga respecto a la columna, por lo que produce un mecanismo de confinamiento mecánico que mejora la estabilidad del nudo estructural (Melero Herranz, 2020).

Los ensambles viga-columna de pórticos de madera, permiten que la cola de milano tenga una adecuada transmisión de esfuerzos a compresión y corte, así como también limita la rotación relativa entre los elementos, concediendo al nudo un comportamiento semirrígido favorable frente a cargas laterales (Sergeev et al., 2021).

La forma geométrica de la conexión colade milano influye directamente en la capacidad de resistencia y en el desempeño frente a distintos tipos de carga, de acuerdo a la inclinación de sus caras, la relación geométrica entre sus dimensiones y el área efectiva de contacto condiciona la distribución de esfuerzos internos y el desempeño de los mecanismos de transferencias de cargas (Laguna Orive, 2024). La conexión trabaja predominantemente a compresión bajo a cargas gravitacionales, mientras que, ante cargas laterales, como las inducidas por sismos o viento, el ensamble contribuye a resistir esfuerzos de corte y a controlar la rotación del nudo, reduciendo la probabilidad de fallas frágiles por deslizamiento (Vavrusova et al., 2020).

El desempeño de las edificaciones de madera depende muchas veces del comportamiento de sus ensambles, ya que estas deben ser diseñadas para manejar las cargas y fuerzas que actúan sobre la edificación, asegurando que no existan daños portantes, proporcionando un diseño adecuado de dichas conexiones que mantenga la resistencia y estabilidad de los elementos estructurales beneficiando el funcionamiento y seguridad de la infraestructura. Gracias a estas características, la unión cola de milano ha sido ampliamente utilizada en pórticos de madera tradicionales demostrando un comportamiento resistente y eficiente frente a cargas gravitacionales y laterales.

Estudios recientes demuestran que los desempeños sísmicos de los pórticos de madera están condicionados principalmente por la capacidad resistente y deformación de las uniones viga-columna (Bai et al., 2023). Dado que las conexiones constituyen las zonas críticas dentro de los sistemas estructurales, su evaluación permite comprender la forma en que las cargas son transmitidas entre los elementos y como estas influyen en el comportamiento global de la estructura (García Vincés et al., 2021).

Las conexiones tradicionales de carpintería como la cola de milano, han sido objeto de renovado interés académico debido a su comportamiento no lineal, su capacidad de redistribución de esfuerzo y su potencial de disipación de energía mediante fricción y aplastamiento local de la madera. A diferencia de las conexiones con elementos metálicos, estas uniones presentan mecanismos de daño progresivo que pueden resultar favorables para la respuesta sísmica global del sistema, disminuyendo la probabilidad de fallas frágiles en la estructura (Yang et al., 2025)

Ensayos cuasiestáticos y cíclicos realizados sobre las uniones cola de milano evidencian que parámetros

como la holgura lateral, el ángulo de la espiga y la superficie de contacto controlan la forma de los bucles histeréticos, la degradación de rigidez y la capacidad última bajo carga repartidas (Han et al., 2025; Yang et al., 2025).

Publicaciones previas han analizado el comportamiento de las conexiones cola de milano reforzadas y no reforzadas frente a requerimientos sísmicos, enfatizando que las conexiones tradicionales aun presentado reducciones progresivas de rigidez conforme se aumentan los ciclos de carga, pueden obtener niveles óptimos de ductilidad. Se ha determinado que en las zonas de aplastamientos, deslizamientos y extracción del acople se producen los principales modos de fallas, lo cual proporciona información primordial para la evaluación y desarrollo de modelos estructurales representativos (Yu et al., 2024).

Enfoques actuales han relacionado la pérdida de rigidez con los daños localizados en las uniones, lo que permite resaltar la ventaja de tener datos experimentales particulares para cada tipo de unión y disposición geométrica (Dong et al., 2023).

Sin embargo, pese a los avances informados, la literatura especializada aún presenta limitaciones en cuanto a la caracterización experimental del comportamiento de pórticos de madera que incorporan conexiones tipo cola de milano bajo solicitaciones laterales representativas de acciones sísmicas. Particularmente, son pocos los estudios que analizan de manera integral la respuesta del nudo viga-columna en términos de resistencia, deformación y modos de falla, lo que justifica la continuidad de investigaciones orientadas a fortalecer el conocimiento técnico y experimental sobre este tipo de uniones tradicionales (Bai et al., 2023).

La finalidad de esta investigación es analizar el comportamiento estructural de las conexiones tipo cola de milano en uniones viga-columna de pórticos de madera, los cuales son sometidos a la ejecución de ensayos experimentales que simulen los efectos de acciones sísmicas mediante la aplicación de cargas laterales cíclicas. Por ello, se ensayan tres pórticos de madera Tectona Gandis en el laboratorio de estructuras de la Universidad Técnica de Manabí, donde las conexiones entre viga y columna presentan el ensamble cola de milano. Con la intención de evaluar la respuesta estructural global y determinar su capacidad resistente, los pórticos se someten a la acción conjunta de cargas horizontales aplicadas al nivel del dintel. De la misma manera se analiza el comportamiento que presenta el nudo estructural de la conexión mencionada, permitiendo identificar mecanismos de transferencia de esfuerzos y la capacidad resistente frente a las solicitaciones consideradas.

## 2. Materiales y Métodos

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica orientada a comprender el comportamiento mecánico de las conexiones en las estructuras de madera con especial énfasis en las uniones tradicionales tipo cola de milano y con los criterios de evaluación utilizados en investigaciones recientes, se pretende analizar el funcionamiento estructural del ensamble citado, midiendo las deformaciones lineales ante cargas horizontales a nivel del dintel, incrementadas cíclicamente. El estudio busca aportar criterios técnicos sobre el desempeño de la conexión tradicional mencionada.

### 2.1 Caracterización del material y especímenes.

Se definió el modelo geométrico de la junta considerando dimensiones representativas de elementos estructurales reales, así como la configuración específica del ensamble, con el propósito de reproducir de manera adecuada el comportamiento de pórticos de madera empleados en edificaciones.

Las características del material fueron definidas utilizando propiedades mecánicas de la madera Tectona Grandis, teniendo en cuenta parámetros como el módulo de elasticidad, esfuerzo de flexión, momento flector, capacidad de carga axial y densidad. Estos factores posibilitan que se explique cómo actúa estructuralmente el material ante las solicitaciones aplicadas. La unión y probetas ensayadas fueron diseñadas con una relación geométrica a escala 1:3 respecto a estructuras reales de madera. Este escalamiento permite reproducir el comportamiento mecánico de conexiones típicas en edificaciones livianas.

Las dimensiones del modelo corresponden a una reducción proporcional directa, en este sentido, una altura de 1570 mm representa aproximadamente 4.71 m en escala real, mientras que una luz de 2000 mm equivale a 6.00 m. Asimismo, las secciones de 70 mm corresponden a dimensiones reales del orden de 210 mm. Estas

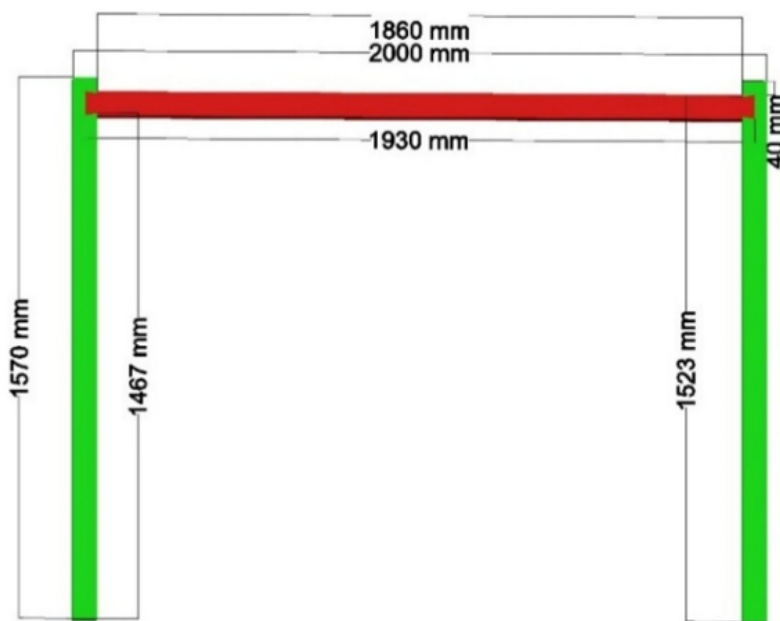
dimensiones corresponden a los pórticos de madera que se emplean en viviendas de hasta dos niveles. Por lo tanto, se estima que el modelo experimental es apropiado para analizar el comportamiento estructural de la conexión examinada bajo circunstancias de cargas cuasiestáticas. Se identificó a los especímenes como PCM1, PCM2 y PCM3, donde la sigla PCM corresponde a Pórtico Cola de Milano, mientras que los números 1, 2 y 3 permiten identificar el orden de ensayo de cada uno de los ejemplares. Los tres pórticos fueron contruidos usando madera de teca (*Tectona Grandis*).

La manufactura de las piezas fue realizada por un maestro carpintero en estructuras, siguiendo un procedimiento controlado de transformación del material desde su adquisición hasta la elaboración final de los especímenes de ensayo. Este proceso inició con la selección de tablonos de *Tectona Grandis*, los cuales fueron sometidos a un proceso de cepillado mecánico en sus cuatros caras para rectificar la madera y eliminar irregularidades superficiales, consiguiendo así la sección transversal uniforme de 70 x 70 mm requerida por el protocolo de ensayo en el marco de reacción del laboratorio.

Se procedió al corte longitudinal de las piezas estructurales, para este proceso se empleó una sierra de inglete con el fin de garantizar cortes perpendiculares respecto al eje longitudinal de los elementos; como resultado se obtuvo columnas con una longitud de 1570 mm y vigas de 1930 mm, considerando el ensamble tipo cola de milano de 35 mm en cada conexión y se estableció una luz total de 2000 mm medida de eje a eje de columnas, como se observa en la Figura 1. Esta configuración geométrica permite representar de manera adecuada el comportamiento de un sistema estructural típico de un pórtico de madera.

**Figura 1.**

*Configuración geométrica del pórtico ensayado.*



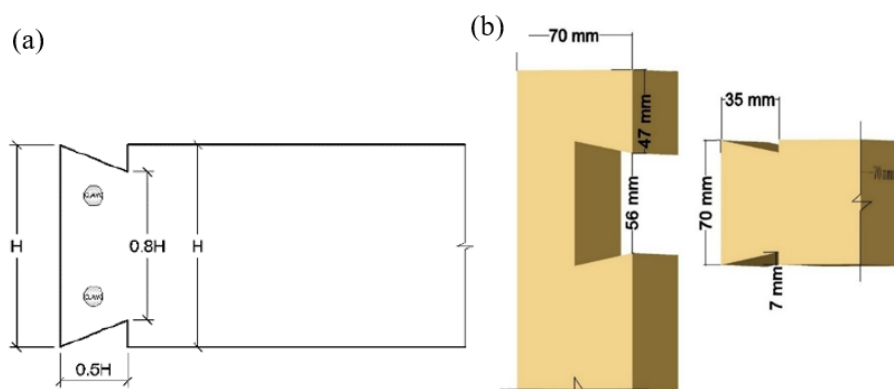
*Nota.* Dimensiones expresadas en milímetros del pórtico diseñado a escala 1:3. Fuente: Elaboración de los autores.

La conexión viga-columna se realizó mediante el ensamble cola de milano, cuya geometría se definió en función de la altura de la sección transversal del elemento ( $H$ ), como se muestra en la Figura 2 (a). En este estudio se consideró  $H = 70$  mm, correspondiente a la dimensión adoptada para los elementos estructurales. A partir de esta relación geométrica, la altura efectiva del ensamble se estableció como  $0.8H$  (56 mm), mientras que la longitud del encastre corresponde a  $0.5H$  (35 mm), valores que determinan la superficie de contacto entre los elementos conectados. Asimismo, la profundidad del ensamble corresponde a la totalidad de la sección transversal (70 x 70 mm), ocupando completamente el área del elemento. La configuración geométrica específica implementada en los especímenes ensayados se presenta en la Figura 2 (b). Estas proporciones permiten un área de contacto que garantiza la mejor transferencia de esfuerzos posible entre

la viga y la columna, debilitando las secciones de las piezas que conforman la unión, de manera que la afectación sea mínima, contribuyendo así a la estabilidad y rigidez del ensamble.

## Figura 2.

(a) Dimensiones teóricas del ensamble. (b) Dimensiones de la unión viga-columna.



*Nota.* Las medidas de la unión se presentan en relación a la altura de la sección transversal de la columna y viga. Fuente: (a) (González et al., 2025). (b) Elaboración de los autores.

### 2.1.1 Trazado geométrico y ajuste

Posteriormente, sobre la superficie previamente preparada de la madera se realizó el trazado de la geometría correspondiente a la conexión tipo cola de milano. Para ello, se utilizó herramientas de precisión como gramiles y escuadras, con las cuales se consiguió los ángulos de inclinación y la profundidad de inserción establecida, de 35 mm. Se llevó a cabo la remoción progresiva del material excedente, conformando el elemento tipo “macho” en la viga y el alojamiento tipo “hembra” en la columna. Este proceso se realizó mediante cortes con la sierra fina y el uso de formones, permitiendo ajustar gradualmente la geometría de la conexión hasta alcanzar un adecuado acople entre las piezas para asegurar la simetría de la unión y la adecuada transmisión de esfuerzos en el nudo estructural.

### 2.1.2 Acabado y control de calidad

Finalmente, las superficies de contacto de la unión fueron pulidas con el fin de eliminar fibras sueltas y mejorar la calidad del contacto entre las caras de la conexión. Como resultado del proceso de fabricación y ensamblaje, los pórticos obtenidos presentaron una luz total de 2000 mm, con una holgura de hasta 1 mm.

Con el propósito de ensayar 3 pórticos, la totalidad de las piezas fueron fabricadas con el mismo procedimiento constructivo y bajo las mismas condiciones de manufactura.

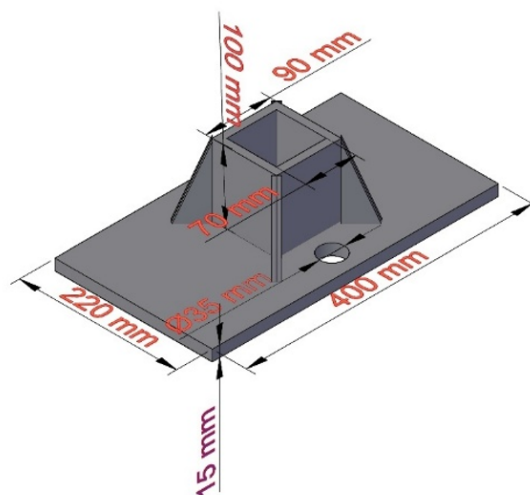
## 2.2 Configuración del marco de reacción

El marco de reacción en el cual se realizó los ensayos exigió ciertas modificaciones en cuanto a su configuración para asegurar la aplicación efectiva de la carga y el empotramiento en las bases de las columnas, por lo cual, se empleó un actuador hidráulico con una capacidad nominal de 60 toneladas (aproximadamente 588 kN). Originalmente dispuesto en la viga superior, el dispositivo fue reubicado hacia una posición lateral para permitir la aplicación de una carga horizontal directa a nivel del dintel, simulando fuerzas de origen sísmico.

En la Figura 3 se muestra un sistema de empotramiento, el cual fue diseñado como apoyos metálicos particulares que sirven como base de cada columna del pórtico y fueron conformados cajetines de acero con paredes de 10 mm de espesor, soldados a una placa base de 15 mm de espesor. El conjunto se fijó rígidamente a la losa de reacción mediante pernos A325 de acero de 35 mm de diámetro, eliminando rotaciones o desplazamientos no deseados en la base que pudieran falsear las lecturas de desplazamientos laterales del pórtico.

**Figura 3.**

*Dimensiones y modelo de los soportes metálicos para limitar los movimientos y rotaciones en la base de las columnas.*



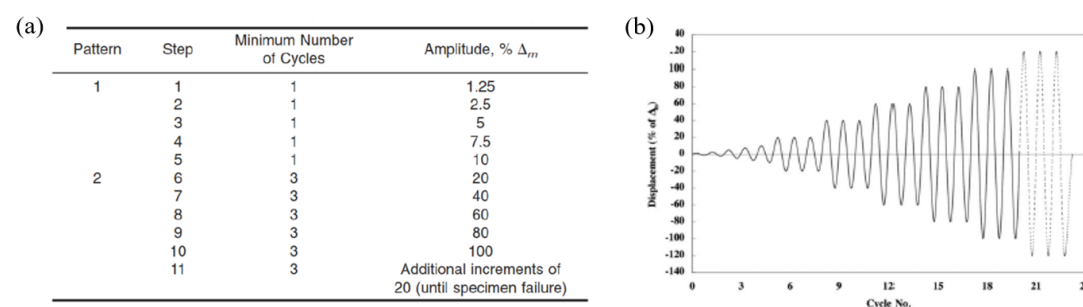
*Nota.* Se presenta en el dispositivo de empotramiento utilizando en el ensayo, diseñado para prevenir giros y deslizamientos. Fuente: Elaboración de los autores.

### 2.3 Protocolo de carga cíclica e Instrumentación

Se aplicó un protocolo de carga lateral cíclica controlado por desplazamiento, siguiendo estrictamente los lineamientos de la norma ASTM E2126-19, como se muestra en la Figura 4, con el objetivo de evaluar el comportamiento de la conexión bajo cargas que simulan la actividad sísmica.

**Figura 4.**

*(a) Protocolo de carga B – Amplitud de ciclos invertidos. (b) Programa de desplazamiento cíclico – Método B.*



*Nota.* Reproducido de Standard Test for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting System for Communities, por ASTM International, 2019. Fuente: (ASTM International, 2019).

Se identificó cada uno de los pórticos ensayados, como PCM1, PCM2 y PCM3, correspondientes a los tres Pórtico Cola de Milano ensayados experimentalmente.

Se presenta el protocolo de carga cíclica usado para la ejecución de ensayo en cada uno de los pórticos mencionados. Para el cálculo de los desplazamientos se realizó una relación entre la altura de las columnas con un porcentaje máximo de la deriva, teniendo en cuenta que la norma ecuatoriana de la construcción del 2015 permite un porcentaje máxima de deriva del 2% (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI), 2015). Tomando esta referencia, se trabajó con un porcentaje de deriva de 1%. Con esto se puede

establecer el recorrido de los pórticos mediante la Ecuación 1:

$$Drift = \frac{\Delta}{H} \quad \Delta = Drift * H \quad (1)$$

Donde:

$\Delta$ = Es el desplazamiento

$H$ = Es la altura del espécimen a analizar en mm

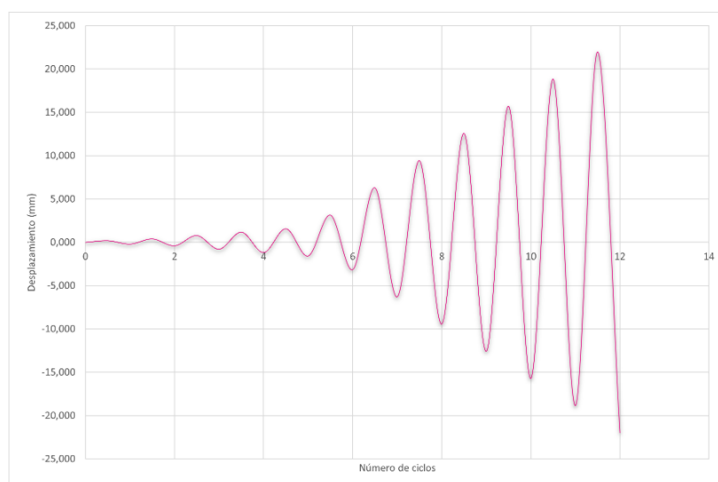
$Drift$ = El porcentaje de deriva definido, por lo que:

$$\Delta = \frac{1\% \times 1570 \text{ mm}}{100} = 15,70 \text{ mm} \approx 16 \text{ mm}$$

El valor de 16 mm se estableció como el objetivo límite del desplazamiento y a partir de él se puede aplicar el protocolo de carga con los diferentes porcentajes de amplitud. En la Figura 7 se muestra el programa de desplazamiento cíclico después de realizar los cálculos necesarios para llevar a cabo este ensayo.

### Figura 5.

Programa de desplazamiento cíclico para todos los ensayos.



*Nota.* El protocolo considera los ciclos de carga con amplitud creciente, expresados en milímetros, aplicado de manera cuasiestática. Fuente: Elaboración de los autores.

Para registrar la respuesta estructural de los pórticos durante la aplicación de carga lateral, se utilizó un sistema de instrumentación diseñado con LVDT y strain gauges para medir deformaciones y desplazamientos en áreas claves del espécimen.

### 2.4 Medición de desplazamiento

Para el monitoreo de los desplazamientos horizontales del pórtico se utilizó un transductor de desplazamiento lineal (LVDT), el cual fue ubicado en la parte superior del pórtico, a nivel de la viga con el fin de registrar el desplazamiento lateral global producido por la aplicación de la carga.

### 2.5 Medición de deformaciones

Con el objetivo de evaluar el comportamiento del material y la distribución de esfuerzos en los elementos estructurales, se empleó galgas extensométricas (strain gauges) adheridas a la superficie de la viga, tanto en la fibra superior como en la inferior en proximidad a la conexión viga-columna, así como en las columnas cerca de la base de empotramiento. Estos sensores fueron colocados donde se espera una mayor concentración de esfuerzos durante el ensayo y por ende las deformaciones de interés.

## 2.6 Sistema de adquisición de datos

Los sensores utilizados fueron conectados a un sistema de adquisición de datos que permitió registrar de manera continua las mediciones de desplazamiento y deformación durante todo el proceso de carga. Este sistema facilitó el almacenamiento y posterior procesamiento de la información experimental necesaria para la evaluación del comportamiento estructural de pórtico.

## 2.7 Procesamiento de análisis de datos

El análisis estructural se centró en la evaluación de la transferencia de cargas entre viga y columna. Los resultados permitieron identificar tendencias en la distribución de esfuerzos y en la respuesta mecánica de la unión. Con el fin de evaluar la respuesta mecánica de los elementos estructurales, se determinó los esfuerzos de flexión a partir de los valores de carga obtenidos experimentalmente. Para ello, se empleó las siguientes expresiones:

El esfuerzo de flexión se calculó mediante la Ecuación 2:

$$\sigma = M/S \quad (2)$$

Donde:

$\sigma$  = Es esfuerzo flexionante

$M$  = El momento flector

$S$  = Es el módulo de sección

El módulo de sección para una sección rectangular se determinó como se muestra en la Ecuación 3:

$$S = \frac{b * h^2}{6} \quad (3)$$

Donde:

$b$  = Base de la sección transversal

$h$  = Altura de la sección transversal

El momento flector máximo fue estimado a partir de la carga aplicada según la Ecuación 4:

$$M = \frac{F*H}{4} \quad (4)$$

Donde:

$F$  = Es la fuerza aplicada

$H$  = Es la altura efectiva

Estas expresiones permitieron estimar los esfuerzos internos desarrollados en los elementos estructurales y analizar su comportamiento frente a las solicitaciones laterales aplicadas.

Con base en los campos de deformación y desplazamientos, se determinaron zonas críticas asociadas a posibles modos de falla, tales como:

- Aplastamiento de las fibras de madera.
- Falla por corte en el ensamble.
- Fisuración por tracción.

La determinación del contenido de humedad, parámetro esencial de la madera, debido a su influencia en la rigidez, resistencia y capacidad de deformación se obtuvo mediante el método de secado en horno, que consiste en obtener el peso húmedo inicial de las muestras y someterlas posteriormente a un proceso de secado a temperatura controlada hasta alcanzar un peso invariable. A partir de estos valores, el contenido de humedad se determinó mediante la Ecuación 5:

$$C_h(\%) = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 \quad (5)$$

Donde:

$C_h$  = Contenido de humedad (%)

$P_h$  = Peso húmedo de la muestra (g)

$P_s$  = Peso seco de la muestra (g)

El control del contenido de humedad permitió asegurar condiciones homogéneas entre los especímenes ensayados, contribuyendo a la confiabilidad y reproducibilidad de los resultados experimentales obtenidos.

### 3. Resultados y Discusión

Los ensayos cíclicos aplicados a los pórticos de madera, permitieron obtener las curvas de histéresis carga-desplazamiento correspondiendo a los especímenes PCM1, PCM2, PCM3. A partir de estas curvas se evaluó el comportamiento no lineal de los sistemas estructurales, incluyendo la degradación de la rigidez, la resistencia máxima alcanzada y la capacidad de disipación de energía bajo cargas reversibles. Así mismo, se analizó el desempeño del nudo estructural conformado por la unión-columna tipo cola de milano, con el objetivo de correlacionar la respuesta global de los pórticos con los mecanismos de daño y los patrones de fisuración observados durante el proceso de carga.

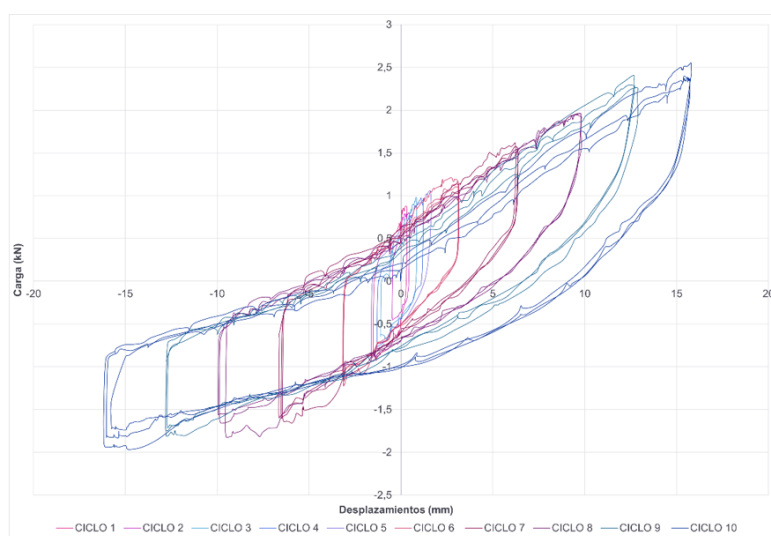
#### 3.1 Resultados de los pórticos

##### 3.1.1 Curva de histéresis PCM1

La amplitud y definición de los bucles histéricos que presentó el PCM1, mostrados en la Figura 6, evidenciaron una elevada capacidad de disipación de energía; en los primeros ciclos se observó un comportamiento casi lineal, sin embargo, conforme se aumentó la carga cíclica se mostró una respuesta no lineal.

**Figura 6.**

*Curva de histéresis carga – desplazamiento del pórtico PCM1.*



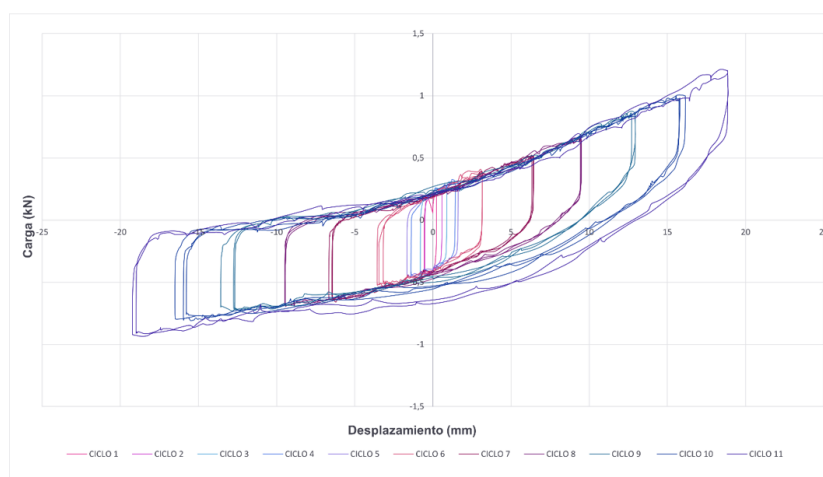
El desplazamiento máximo alcanzó valores de hasta 15,78 mm, mientras que la carga máxima fue de 2,63 kN y además se evidenció una degradación progresiva de la rigidez en los ciclos de mayor amplitud. Desde el punto de vista del nudo estructural, la unión tipo cola de milano permitió una adecuada transferencia de esfuerzos entre la viga y la columna favoreciendo el desarrollo de deformaciones inelásticas en la conexión.

### 3.1.2 Curva de histéresis PCM2

El pórtico PCM2 presentó bucles de menor amplitud en comparación con PCM1, lo que indicó una menor cantidad de disipación de energía. La Figura 7 muestra la curva de histéresis correspondiente donde se evidencia que el comportamiento inicial es aproximadamente lineal, sin embargo, se observa una reducción progresiva de la rigidez conforme se incrementa la carga.

**Figura 7.**

*Curva de histéresis cargas – desplazamientos del pórtico PCM2.*



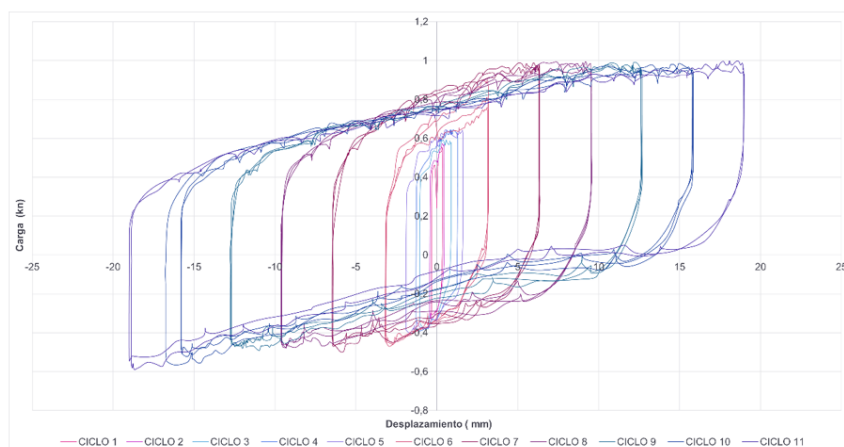
El desplazamiento máximo del PCM2 fue de 18,785 mm y alcanzó una carga máxima de 1,27 kN. La forma de los bucles histéricos presentó anomalías en algunos ciclos, lo cual sugirió una respuesta estructural menos estable respecto al nudo. Estos resultados mostraron que la unión tipo cola de milano tiene un bajo rendimiento al momento de transferir esfuerzos, lo que limitó la eficiencia de la conexión y disminuye la disipación energética del sistema.

### 3.1.3 Curva de histéresis PCM3

La curva de histéresis del pórtico PCM3, muestra bucles relativamente uniformes y estables a lo largo de los ciclos de carga como se observa en la Figura 8. El sistema presenta un comportamiento inicialmente lineal, seguido de una transición hacia un régimen no lineal con menor degradación de rigidez en comparación con el PCM1.

**Figura 8.**

*Curva de histéresis carga – desplazamiento del pórtico PCM3.*



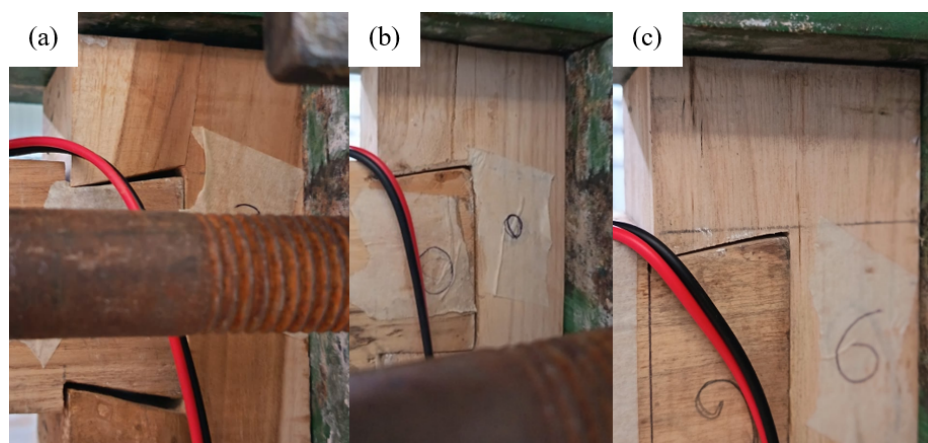
La unión tipo cola de milano proporcionó una distribución equitativa de esfuerzos en el nudo estructural, lo que disminuyó la acumulación de daños y potenció una respuesta estable del sistema. El desplazamiento máximo alcanzó 18,042 mm, mientras que la carga máxima 1,03 kN.

### 3.1.4 Daños observados en los especímenes después de los ensayos

Las fisuras que se presentaron en los tres especímenes ensayados se muestran en la Figura 9, donde se puede apreciar grietas localizadas en la zona de la unión viga-columna.

**Figura 9.**

(a) PCM1. (b) PCM2. (c) PCM3.



*Nota.* Daños presentados en los especímenes después del ensayo cíclico. Fuente: Tomada por los autores.

Las fisuras presentadas en la Figura (a) muestran grietas encontradas en la conexión viga-columna perteneciente a PCM1, están vinculadas a deslizamientos y aplastamientos de la madera en las superficies de contacto del ensamble. Debido a la alta disipación de energía, se presenció una separación de juntas que se atribuyó a la concentración de esfuerzos y la pérdida de rigidez en el nudo estructural.

Adicionalmente, en la Ilustración (b) perteneciente a PCM2, se observó fisuras de origen vertical en la columna, que se desarrollaron en paralelo a las fibras de la madera, lo que indica que hubo esfuerzos de tracción en la misma dirección. Además, se pudo notar una separación en la superficie de contacto en la conexión, que mostró una concentración de esfuerzos intensa y localizada, producto de la pérdida de contacto en los componentes de la unión, lo que concuerda con la capacidad de resistencia reducida, la escasa disipación energética y una respuesta menos estable observada en esta muestra.

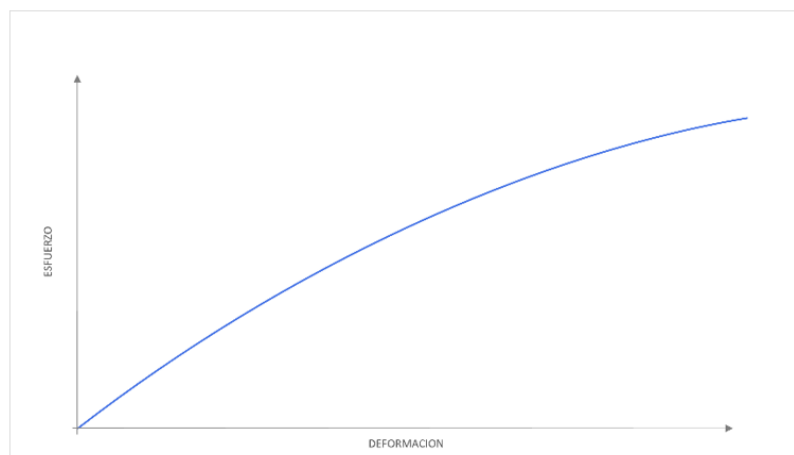
Por último, en la Figura (c), que corresponde a PCM3 se identificó que las áreas de contacto experimentaron una ligera separación junto con pequeñas fisuras superficiales, sin que estas se propagaran significativamente hacia los componentes estructurales. La poca presencia de daños en los elementos indica una mejor redistribución de esfuerzos y una baja concentración de daños. Por lo tanto, la respuesta histerética del sistema mostró un comportamiento estructural que se destacó por disipar energía durante los ciclos de carga. Esto señala que los ensambles experimentaron deformaciones graduales sin mostrar fallas, lo cual posibilitó la conservación de una respuesta mecánica ante las demandas laterales cíclicas.

### 3.2 Resultados de deformaciones

Con el propósito de evaluar el comportamiento de las uniones viga-columna, se analizó las deformaciones registradas durante los ensayos cíclicos mediante los strain gauges. A partir del rendimiento general observado en las muestras ensayadas, la Figura 10 presenta una curva de esfuerzo-deformación representativa.

**Figura 10.**

*Curva representativa esfuerzo – deformación de los pórticos ensayados.*



En esta grafica se aprecia una respuesta inicialmente lineal, correspondiente a la etapa elástica del sistema estructural, donde el incremento de esfuerzos es proporcional al aumento de la deformación.

La curva presenta variaciones correspondientes a un comportamiento no lineal debido al incremento de los ciclos de cargas, revelando disminución progresiva de la rigidez en el sistema estructural. La presencia de daños localizados y deformaciones inelásticas se vinculan a estas alteraciones en la pendiente de la curva.

Así mismo la disminución progresiva de rigidez observada en la parte final de la curva refleja el deterioro mecánico de la conexión durante los ciclos de carga reversibles, comportamiento coherente con las curvas de histéresis y los patrones de fisuración observados experimentalmente en los pórticos analizados.

En términos generales, los datos indican que las deformaciones considerables se presentaron en el nudo, lo cual confirmó que esta zona representa la sección crítica en cuanto a la respuesta del sistema expuesto a cargas cíclicas.

### 3.3 Comparación de parámetros estructurales

Con el fin de comparar el comportamiento estructural de los pórticos analizados, se resumen en la Tabla 1 los principales parámetros obtenidos a partir de las curvas.

**Tabla 1.**

*Comparación de parámetros estructurales de los pórticos analizados.*

| Parámetros                            | PCM1                         | PCM2                                     | PCM3                                 |
|---------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Carga máxima (kN)</b>              | 2,63                         | 1,27                                     | 1,03                                 |
| <b>Desplazamiento máximo (mm)</b>     | 15,78                        | 18,785                                   | 18,042                               |
| <b>Rigidez inicial</b>                | Alta                         | Media-Baja                               | Media                                |
| <b>Disipación de energía</b>          | Alta                         | Media                                    | Baja                                 |
| <b>Respuesta esfuerzo-deformación</b> | Progresiva y continua        | Gradual con menor desarrollo de esfuerzo | Intermedia con variaciones moderadas |
| <b>Respuesta de strain gauges</b>     | Mayor deformación registrada | Menor deformación registrada             | Deformación moderada y estable       |

El pórtico PCM1 manifiesta capacidad resistente y disipación de energía más alta, en contraste con el PCM2,

que revela mayor acumulación de daño en la región del nudo estructural y una respuesta menos eficaz. En cuanto al PCM3, este exhibe estabilidad en su comportamiento, con una distribución de esfuerzos uniforme y fisuras menos concentradas. Del mismo modo los datos obtenidos a través de strain gauges mostraron que PCM1 experimentó deformaciones significativas, el PCM2 mostró deformaciones más reducidas y el PCM3 mantuvo una respuesta moderada y estable a lo largo de los ciclos de carga.

En conjunto, los resultados evidencian que la configuración de la unión tipo cola de milano influye directamente en la transferencia de esfuerzos, la disipación de energía, el patrón de daños en los pórticos analizados y la evolución de las deformaciones registradas mediante instrumentación experimental.

### 3.4 Discusión

Las curvas de histéresis y el diagrama esfuerzo-deformación obtenidos permitieron evaluar el comportamiento estructural de las conexiones cola de milano en uniones viga-columna de pórticos de madera sometidos a cargas cíclicas. Las respuestas registradas en los especímenes PCM1, PCM2 y PCM3 evidenciaron pérdida progresiva de rigidez, acumulación de deformaciones y variaciones en la capacidad de disipación de energía conforme avanzaron los ciclos de carga. Este comportamiento es característico en conexiones tradicionales de madera sometidas a sollicitaciones cíclicas, donde la interacción mecánica entre superficies ensambladas genera respuestas no lineales debido al aplastamiento local de la fibra y deformaciones acumulada en las zonas de la unión.

Las curvas de histéresis mostraron inicialmente una tendencia cuasi-lineal, asociada al comportamiento elástico inicial de las conexiones y de los elementos estructurales de madera. Sin embargo, conforme aumentaron los desplazamientos y la amplitud de carga, se observó una reducción progresiva de la pendiente y una mayor apertura de los bucles histeréticos, indicando degradación de rigidez y desarrollo de comportamiento no lineal. Bai et al. (2023) reportaron resultados similares en conexiones tradicionales sometidas a cargas pseudoestáticas, donde la reducción de rigidez estuvo asociada a deformaciones acumuladas y pérdida gradual de contacto efectivo entre las superficies de unión.

La comparación de los indicadores estructurales que se mencionan en la Tabla 1 de la sección 3.3, posibilitó el reconocimiento de diferencias significativas entre las probetas evaluadas en estudios relacionados con conexiones tradicionales de tipo dovetail sometidos a cargas pseudoestáticas. Se registró valores de resistencia que oscilan entre 2,0 y 3,5 kN, condicionados por la forma de la unión y del grado de confinamiento de sus elementos (Bai et al., 2023). Los hallazgos de esta investigación reflejan una tendencia parecida, especialmente en el espécimen PCM1, que llegó a un valor máximo de 2,63 kN y presenta un comportamiento estructural similar al documentado en investigaciones recientes para conexiones convencionales de madera. El PCM1 mostró la mayor resistencia, llegando una carga máxima de 2,63 kN. Asimismo, se destacó por su alta capacidad para disipar energía, lo que se evidenció en la amplitud y estabilidad de las curvas histeréticas. Esta respuesta estructural indica que se realiza una transferencia efectiva de esfuerzos entre la columna y la viga, lo que posibilita que las estructuras respondan de manera efectiva cuando se le aplican cargas cíclicas. Al comparar con estudios recientes de conexiones tipo dovetail con los datos obtenidos, se observa que los valores máximos de carga logrados están dentro del rango documentado para las conexiones tradicionales en madera que han sido sometidas a pruebas cíclicas de baja escala. En este caso, la capacidad resistente depende mayormente de la geometría del ensamble y del grado de confinamiento entre las piezas.

También, PCM1 mostró una rigidez inicial más elevada en comparación con los otros dos especímenes, lo que sugiere mayor resistencia inicial a las deformaciones laterales. No obstante, también se observó un deterioro de rigidez acentuado a medida que se incrementaron los ciclos de cargas, lo cual se relaciona con deformaciones acumulativas y daño progresivo en el área de contacto de la conexión. Investigaciones recientes señalan que conexiones con mayor rigidez inicial suelen experimentar una reducción más acelerada de rigidez cuando son sometidas a desplazamientos cíclicos elevados, debido al incremento de esfuerzos localizados en las superficies ensambladas (Wang et al., 2022).

Por otra parte, PCM2 mostró un comportamiento flexible, caracterizado por una menor rigidez inicial y mayores desplazamientos residuales durante el ensayo. Este comportamiento coincide con investigaciones experimentales realizadas por Wang et al. (2022) quienes observaron que conexiones con menos rigidez inicial desarrollan mayores deformaciones y una disipación energética reducida durante la aplicación de carga cíclica. La carga máxima alcanzada por este espécimen fue de 1,27 kN, considerablemente menor

respecto a PCM1, evidenciando una menor capacidad resistente de la conexión y disipación de absorción de energía frente a cargas cíclicas aplicadas. Este comportamiento puede relacionarse con una menor capacidad de transferencia de esfuerzo entre viga y columna con la aparición temprana de deformaciones localizadas en la zona de unión.

La diferencia observada entre PCM1 y PCM2 evidencia la influencia de la rigidez inicial en el comportamiento global de los pórticos. Mientras PCM1 desarrolló una respuesta estructural flexible y con mayor acumulación de deformaciones permanentes. Estudios recientes sobre conexiones tradicionales de madera indican que sistemas con menor rigidez inicial tienden a desarrollar mayores desplazamientos residuales y una degradación más acelerada de la capacidad resistente bajo sollicitaciones cíclicas (Liu et al., 2024).

En el caso del PCM3, las curvas de histéresis presentaron una geometría más estable y uniforme durante los ciclos de cargas, mostrando una degradación de rigidez menor respecto a los demás especímenes. Resultados similares fueron reportados por Liu et al. (2024), quienes identificaron que conexiones tradicionales con una redistribución progresiva de esfuerzos mantienen mayor estabilidad histerética, aun cuando existe degradación gradual de rigidez estructural. Aunque la capacidad resistente fue inferior en comparación con el PCM1, el comportamiento observado evidencia una respuesta estructural más estable frente a las deformaciones impuestas. Los bucles histeréticos conservaron una forma relativamente constante incluso en desplazamientos elevados, indicando una redistribución progresiva de esfuerzos dentro de la conexión.

El PCM3 muestra un comportamiento que puede considerarse de un nivel intermedio entre la alta resistencia que se observó en el PCM1 y la flexibilidad superior que logró el PCM2. La estabilidad histerética registrada indica que, durante el ensayo, la transferencia de esfuerzo entre la viga y la columna fue eficiente, lo cual pospuso la manifestación de mecanismos de falla localizados. Esta respuesta estructural concuerda con estudios recientes sobre caja y espiga lo cuales indican que una redistribución de esfuerzos de forma gradual hace posible que se conserve la estabilidad estructural a pesar de la reducción progresiva de la rigidez.

El PCM1 mostró un comportamiento estructural positivo, logrando tener la capacidad de resistencia más alta (2,63 kN) y la mayor capacidad para disipar energía, lo cual se relaciona a una transferencia eficaz entre la columna y la viga. El espécimen PCM2, por su parte, presentó un rendimiento menos óptimo, caracterizado por una rigidez inicial más baja, una capacidad de resistencia reducida y un mayor grado de deterioro en el nudo estructural, esto se evidenció a través de una fisuración vertical y apertura gradual de la unión. Por el contrario, el PCM3 obtuvo una respuesta constante y uniforme a lo largo de los ciclos de carga, con una disminución de la rigidez más controlado y menos concentración de daño que los otros ejemplares.

Investigaciones recientes sobre estructuras de madera sometidas a cargas cíclicas indican que más del 60 % de la disipación energética puede concentrarse en las uniones viga-columna, controlando directamente la respuesta histerética y la evolución del daño estructural. Investigaciones experimentales han demostrado que las uniones viga-columna concentran gran parte de la deformación estructural y controlan la evolución de daño durante carga cíclica (Liu et al., 2024).

Por otro lado, el análisis de la respuesta local de los elementos estructurales instrumentados fue posible gracias a la curva esfuerzo-deformación obtenida a través de los strain gauges. La tendencia mostrada reveló que el esfuerzo se incrementó de manera gradual a medida que la deformación aumentaba, mostrando primero una respuesta rígida y luego una reducción lenta de la pendiente. Este comportamiento muestra un cambio de un sistema elástico predominante hacia una respuesta no lineal relacionada con la acumulación de deformaciones en las piezas de madera y en la conexión como tal.

La unión viga-columna concentró la atención del análisis estructural, lo que posibilitó detectar patrones en cómo se distribuyen los esfuerzos y en la forma de la respuesta mecánica del ensamble. Los hallazgos mostraron que las conexiones cola de milano pudieron transferir esfuerzos entre los componentes estructurales de manera incremental, conservando la estabilidad durante la mayoría de los ciclos de carga. Además, los strain gauges mostraron reducción de esfuerzos de manera gradual, consecuente retraso fallas y acumulación de cargas en el ensamble.

La curva esfuerzo deformación no mostró un descenso abrupto, lo que señala que la capacidad de resistencia del sistema se mantuvo a pesar de los altos niveles de deformación. Esto indica que las conexiones cola de milano establecieron procedimientos de redistribución de esfuerzos de manera sucesiva antes de llegar a estados críticos, previniendo así fallas durante la prueba. Según Wang et al. (2022), el contacto mecánico

entre superficies ensambladas y deformaciones iniciales, permiten que las conexiones tradicionales transfieran mejor la carga y disipen mejor la energía cuando se le imponen cargas cíclicas.

De manera general, el PCM1, presentó un comportamiento resistente y con mayor capacidad de disipación de energía, el PCM2 mostró una respuesta flexible y con mayor acumulación de deformaciones residuales, mientras que PCM3 evidenció un comportamiento estable durante los ciclos de cargas.

#### 4. Conclusiones

La investigación analizó experimentalmente la respuesta estructural de conexiones entre viga-columna tipo cola de milano en pórticos de madera, cuando son sometidos a cargas laterales cíclicas. Se determinó que estas uniones mostraron un comportamiento semirrígido, evidenciado a través de curvas de histéresis que indicaron pérdida de rigidez, acumulación de deformaciones residuales y disipación de energía con el aumento de ciclos de cargas. Se encontró variaciones importantes en la respuesta estructural de las muestras, resaltando los cambios en la estabilidad histerética, la capacidad resistente y el progreso de daños en el equilibrio de los pórticos frente a estas cargas, además, la geometría como las condiciones del ensamblaje alteraron la rigidez inicial y el progreso de las deformaciones durante los ensayos.

Los registros obtenidos permitieron evaluar las curvas de histéresis y diagramas esfuerzo-deformación, donde se observa una transición de comportamiento lineal a no lineal en los pórticos, lo que implica alteraciones acumulativas y detrimento de las conexiones. La presencia de deformaciones residuales y la apertura de bucles histeréticos señalan que los mecanismos internos en la zona viga-columna están absorbiendo energía. Los strain gauges detectaron que las alteraciones se concentraron en el nudo estructural, que es un elemento crítico en pórticos ante acciones laterales reversibles. Asimismo, los ensambles consiguieron redistribuir esfuerzos, lo que permitió postergar los estados críticos de falla y conservar el equilibrio a lo largo de los ciclos de carga. De esta manera, se destaca lo relevante que resulta el diseño y estudio de conexiones para potenciar la respuesta estructural frente a cargas dinámicas.

Este estudio se enfoca en comparar los resultados experimentales con investigaciones recientes sobre uniones tradicionales de madera, destacando las tendencias de deterioro de la rigidez, disipación energética y daño progresivo a nivel estructural. Los datos indican que el desempeño de los pórticos está condicionado por la capacidad de las conexiones para transmitir esfuerzos durante acciones cíclicas y por el comportamiento mecánico de la unión entre viga y columna. Los ensayos demuestran que las uniones tradicionales de tipo cola de milano reaccionan favorablemente a cargas laterales cíclicas, debido a su capacidad para distribuir energía a través de la deformación gradual, lo cual facilita una redistribución de esfuerzos en el sistema. Así mismo, la investigación proporciona datos fundamentales sobre: el comportamiento histerético, las deformaciones que se desarrollan, los tipos de fisuración y la respuesta de uniones tradicionales de madera. Esta información es valiosa para el análisis estructural de pórticos y para futuros estudios acerca del desempeño sísmico de estructuras construidas con madera.

#### Declaración de disponibilidad de datos

Los autores declaran que los datos utilizados en este estudio se encuentran descritos en el manuscrito y debidamente citados a lo largo del documento. Asimismo, las fuentes de los datos están disponibles en la sección de referencias, con el fin de garantizar la transparencia y la reproducibilidad de los resultados.

#### Declaración sobre el uso de IA generativa y tecnologías asistidas por IA en el proceso de redacción

Durante la preparación de este manuscrito, los autores utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa con el fin de apoyar la mejora de la redacción, el estilo del texto y la organización de algunas secciones del documento. Estas herramientas fueron empleadas únicamente como asistencia en el proceso de elaboración del manuscrito.

Posteriormente, los autores revisaron cuidadosamente todo el contenido generado o sugerido por dichas herramientas, realizaron las correcciones pertinentes y validaron la información presentada para asegurar

su precisión, coherencia académica y rigor científico. Los autores asumen la responsabilidad total por el contenido final del manuscrito.

#### Declaración de contribución de los autores CRediT

**Karina Jamileth Alava Pico:** conceptualización, investigación, redacción – borrador original. **Alisson Nathaly Mendieta Alvarado:** metodología, análisis formal, tabulación o procesamiento de datos. **Alfonso Bernardo Horacio Romero Hidrovo:** supervisión, redacción – revisión y edición.

#### Declaración de conflictos de intereses

Los autores declaran que no tiene ningún interés financiero ni relación personal que pudiera influir en el trabajo descrito en este artículo.

### 5. Referencias

- ASTM International. (2019). *ASTM E2126-19: Standard Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for Buildings*. ASTM International.
- Bai, F., Fan, Z., Xue, J., Wu, C., Hu, C., & Li, J. (2023). Experimental study on seismic performance and deformation damage of loose dovetail-tenon joints in ancient timber structures. *Structures*, 54, 541–555. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2023.05.059>
- Bazurto, I., Vega, R., Míeles, Y., & Alcívar, S. (2022). Estado actual de la calidad de la construcción y reforzamiento en Portoviejo seis años después del terremoto del 16 de abril del 2016. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 27(2), 296–314. <https://doi.org/10.24133/RIIE.V27I2.2882>
- Dong, H., Liang, X., Cao, W., & Jin, Y. (2023). Seismic behavior of mortise–tenon joints reinforced with lightweight steel components. *Journal of Building Engineering*, 65, 105755. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.105755>
- García Vínces, M., Javier, L., Palacios, M., Jorge, R., Molina, E., Monserrate, A., Cevallos, Z., & Dallana, L. (2021). “Análisis Estructural y propuesta de reforzamiento del edificio de Facultad de Ciencias Humanísticas de la Universidad Técnica de Manabí.” *Revista de Investigaciones En Energía, Medio Ambiente y Tecnología (RIEMAT)*, 6(1), 14–25. <https://doi.org/10.33936/RIEMAT.V6I1.3686>
- González, Y. M. V., Navas, M. A. M., & Hidrovo, A. B. H. R. (2025). Caracterización del tipo de conexiones en estructuras tradicionales de madera en Manabí. *South Florida Journal of Development*, 6(8), e5654. <https://doi.org/10.46932/sfjdv6n8-008>
- Han, X., Ye, T., Chen, J., Fang, S., Zhu, J., Mei, Z., & Li, H. (2025). Seismic performance enhancement of timber mortise and tenon joints using replaceable mild steel energy dissipation devices. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 29(11), 100265. <https://doi.org/10.1016/J.KSCEJ.2025.100265>
- Laguna Orive, A. (2024). *Uniones carpinteras en madera: análisis y estudio estructural de modelos in-situ*. <http://hdl.handle.net/10017/62226>
- Liu, K., Zhang, H., Du, Y., Hu, X., Wang, L., Li, L., Liu, H., & Luo, B. (2024). Fatigue and damage evolution in wood T-shaped mortise and tenon joints. *Scientific Reports 2024 14:1*, 14(1), 21515-. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-72874-2>
- Melero Herranz, D. (2020). *Lesiones habituales de las estructuras de madera tradicionales y criterios de intervención* [Universidad de Valladolid]. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/45032>
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI). (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-MD: Estructuras de madera*.
- Pinargote, E. F. R., Balcázar, R. M. S., Vínces, L. J. G., & Lóor, M. G. Z. (2019). Análisis estructural del edificio de docentes N° 1 de la Universidad Técnica de Manabí, comparando los espectros

- sísmicos de la norma ecuatoriana de la construcción NEC 2015, el determinado por el estudio de la microzonificación sísmica de Portoviejo. *Revista de Investigaciones En Energía, Medio Ambiente y Tecnología (RIEMAT)*, 4(2), 21–27. <https://doi.org/10.33936/RIEMAT.V4I2.2190>
- Rodríguez Anda, R., Francisco, J., Natera, Z., Antonio, J., Guzmán, S., Salcedo Pérez, E., & Fuentes Talavera, F. J. (2014). Propiedades físico-mecánicas de madera de teca de plantaciones comerciales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(24), 12–25. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-11322014000400003&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322014000400003&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Sergeev, M. S., Lukin, M. V., Strekalkin, A. A., & Roshchina, S. I. (2021). Mathematical modeling of stress-strain state of the nodal joint of wooden beams. *Journal of Physics: Conference Series*, 2131(3), 032088. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/3/032088>
- Vavrusova, K., Lokaj, A., Mikolasek, D., & Sucharda, O. (2020). Analysis of Longitudinal Timber Beam Joints Loaded with Simple Bending. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 9288, 12(21), 9288. <https://doi.org/10.3390/SU12219288>
- Wang, J., He, J. X., Yuan, Y. J., & Yang, N. (2022). Mechanical Behaviour and Failure Mode Analysis of Penetrated Mortise–Tenon Joint with Neighbouring Gaps Based on Full-Scale Experiments. *Applied Sciences* 2022, Vol. 12, Page 7164, 12(14), 7164. <https://doi.org/10.3390/APP12147164>
- Yang, W., Gao, Y., Su, H., Tao, Z., Lai, Z., & Su, H. (2025). Seismic performance of timber dovetail mortise-tenon joints with different lateral tightness: Experimental tests and hysteresis model parameter identification. *Structures*, 82, 110389. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2025.110389>
- Yu, S., Pan, W., Su, H., & Ye, L. (2024). Experiment and theoretical study on mortise-tenon joints reinforced by support-type viscoelastic damper. *Journal of Building Engineering*, 87, 109049. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2024.109049>