



**UNIVERSIDAD  
SAN SEBASTIAN**  
VOCACIÓN POR LA EXCELENCIA

**FACULTAD DE INGENIERIA  
INGENIERÍA CIVIL  
SEDE CONCEPCIÓN**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO NO LINEAL DE MUROS DE  
CLT ACOPLADOS CON DINTELES DE ACERO**

Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil

Profesor tutor: Dr. Ramón David Mata Lemus  
Estudiante: Manuel Ignacio Sandoval Contreras

© Manuel Ignacio Sandoval Contreras

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya la cita bibliográfica del documento.

Concepción, Chile

2025

## HOJA DE CALIFICACIÓN

En \_\_\_\_\_, el \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ los de abajo firmante dejan constancia que el (la) estudiante \_\_\_\_\_ de la carrera o programa de \_\_\_\_\_ ha aprobado la tesis para optar al título o grado académico de \_\_\_\_\_ con una nota de \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Profesor Evaluador

\_\_\_\_\_

Profesor Evaluador

\_\_\_\_\_

Profesor Evaluador

## **DEDICATORIA**

Con amor y gratitud, le dedico esto a quienes han sido mi mayor fuente de inspiración en este camino.

A mis padres, por ser un pilar fundamental en todos mis procesos, por su amor incondicional y por enseñarme con su ejemplo acerca del esfuerzo, la perseverancia y la honestidad.

Y, con un cariño muy especial a la Angelito, agradecerle por acompañarme a lo largo de gran parte de la carrera universitaria, por tu paciencia infinita, por darme ánimo y por creer en mi cuando yo lo dudaba. Agradecer por tu amor y apoyo incondicional durante este proceso y lo que hoy celebro es también un reflejo de todos los momentos que hemos compartido juntos.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al finalizar esta etapa, quiero agradecer a todas las personas que de una u otra forma hicieron este logro posible.

En primera instancia agradecerle al profesor Ramón Mata Lemus, por acompañarme en este proceso final, agradecerle por la preocupación en todo momento, por resolverme las dudas que iban surgiendo durante este último proceso, por explicarme cada concepto que no lograba comprender que de alguna u otra forma me lo explicaba.

Agradecerles a todos los profesores que han aportado a mi crecimiento como profesional, que con sus conocimientos han sido fundamental en mi formación.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION .....	3
Objetivos generales .....	3
Objetivos específicos .....	3
ALCANCES DE CADA CAPITULO.....	3
CAPITULO 1: FORMULACION DEL PROBLEMA.....	4
1.1 Descripción del problema .....	4
1.2 Delimitación del estudio .....	6
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO .....	7
2.1 Introducción al CLT y su Aplicación en Ingeniería Estructural.....	7
2.2 Comportamiento Estructural de los Muros de CLT.....	7
2.3 Sistemas de Acoplamiento con Dinteles de Acero .....	9
2.4 Métodos de Modelación Numérica en OpenSeesPy.....	10
2.5 Diseño Sísmico de Muros de CLT Acoplados .....	11
2.6 Estudios Experimentales y Validación de Modelos .....	12
2.7 Resumen y Brechas en la Investigación .....	12
CAPITULO 3: METODOLOGÍA.....	13
3.1 Enfoque Metodológico .....	13
3.2 Tipo de Investigación .....	13
3.3 Métodos y Técnicas .....	13
3.4 Población y Muestra.....	14
3.5 Procedimiento .....	14
3.5.2 Inicialización del modelo:.....	14
3.5.3 Definición del material CLT: .....	15
3.5.4 Definición de la sección estructural del CLT: .....	16
3.5.5 Geometría del modelo: .....	16
3.5.6 Definición de nodos y asignación de masas:.....	16
3.5.7 Generación de elementos estructurales: .....	16
3.5.8 Definición de propiedades del acero y modelado de los dinteles: .....	17
3.5.9 Modelado de conexiones y restricciones: .....	19
3.5.10 Visualización del modelo: .....	19
CAPITULO 4: Resultados.....	20
4.1 Calibración asociado a muro de CLT .....	20

4.2 Calibración asociado a dintel ..... 23

4.3 Validación de modelo completo..... 25

CONCLUSIÓN..... 33

REFERENCIAS ..... 35

ANEXO ..... 37

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo utilizado para calibración de muro de CLT .....	9
Figura 2. Modelo considerando plasticidad concentrada en el elemento de acero .....	17
Figura 3. Comportamiento visualizado desde “Cyclic Testing and Repair of Coupled CLT Walls with Steel Link Beams” .....	18
Figura 4. Restricciones en la base del muro donde la figura se obtiene desde “Cyclic Testing and Repair of Coupled CLT Walls with Steel Link Beams” .....	19
Figura 5. Visualización del modelo de 2 muros de CLT acoplados con dinteles de acero .....	20
Figura 6. Valor asociado al Modo 1 del modelo desarrollado .....	21
Figura 7. Modos asociados al artículo que se utilizó para calibrar el muro de CLT .....	21
Figura 8. Modos correspondientes al modelo desarrollado en OpenSeesPy .....	22
Figura 9. Deformada del modelo considerando una rotula plástica en el centro del elemento de acero.....	23
Figura 10. Deformada del modelo considerando la zona plástica distribuida a lo largo del elemento de acero .....	24
Figura 11. Geometría inicial del modelo .....	25
Figura 12. Curva Capacidad.....	27
Figura 13. Validación del modelo en OpenSeesPy frente a Resultados Experimentales .....	27
Figura 14. Geometría del sistema estructural modelado en OpenSeesPy, considerando altura entre piso de 3 metros.....	28
Figura 15. Curvas fuerza-desplazamiento para diferentes números de pisos. Longitud del dintel: 0,75 m. ....	30
Figura 16. Curvas fuerza-desplazamiento para diferentes números de pisos. Longitud del dintel: 1,00 m. ....	30
Figura 17. Curvas fuerza-desplazamiento para diferentes números de pisos. Longitud del dintel: 1,25 m. ....	30
Figura 18. Curvas fuerza-desplazamiento para diferente longitud de dintel, considerando números de pisos 2.....	32
Figura 19. Curvas fuerza-desplazamiento para diferente longitud de dintel, considerando números de pisos 3.....	32

## ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1. Valores de módulos de elasticidad.....	15
Tabla 2. Valores de coeficiente de poisson.....	16
Tabla 3: Valores de módulo de corte y densidad a utilizar .....	16
Tabla 4. Valores asociados a frecuencia experimental vs numérica .....	22
Tabla 5. Valores asociados a los nodos de acoplamiento entre elemento de CLT y elemento de acero.....	26

## **RESUMEN**

Este estudio aborda la modelación numérica de muros de CLT acoplados con dinteles de acero, destacando la necesidad de un enfoque más preciso para mejorar su representación estructural. En primer lugar, se establece el contexto de la investigación, identificando las limitaciones de los modelos existentes y definiendo los objetivos generales y específicos del estudio. Posteriormente, se presentan los fundamentos teóricos relacionados con el CLT, su comportamiento ante cargas laterales y el rol de los dinteles de acero en el sistema de acoplamiento. Además, se revisan metodologías previas de modelación numérica en OpenSeesPy y estudios relevantes para la validación del modelo.

En cuanto a la metodología, se describe el proceso de modelación en OpenSeesPy, detallando la selección de parámetros estructurales, las condiciones de análisis y los procedimientos de calibración y validación basados en datos experimentales. Finalmente, se presentan y analizan los resultados obtenidos, comparando la respuesta estructural del sistema con ensayos experimentales. Se incluyen gráficos de deformación, curvas de capacidad y parámetros de validación, discutiendo los principales factores que afectan el comportamiento estructural del sistema y sus implicaciones en el diseño sismorresistente.

## **ABSTRACT**

This study focuses on the numerical modeling of Cross-Laminated Timber (CLT) walls coupled with steel lintels, emphasizing the need for a more accurate approach to improve their structural representation. First, the research context is established by identifying the limitations of existing models and defining the general and specific objectives of the study. Then, the theoretical framework is presented, discussing the mechanical behavior of CLT, its response to lateral loads, and the role of steel lintels in the coupling system. Additionally, previous numerical modeling methodologies in OpenSeesPy and relevant validation studies are reviewed.

Regarding the methodology, the modeling process in OpenSeesPy is described in detail, including the selection of structural parameters, analysis conditions, and calibration and validation procedures based on experimental data. Finally, the results obtained are presented and analyzed, comparing the structural response of the system with experimental tests. Deformation graphs, capacity curves, and validation parameters are included, discussing the key factors affecting the structural behavior of the system and its implications for seismic-resistant design.

## INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la construcción con materiales sostenibles ha cobrado gran importancia a nivel mundial, impulsada por la necesidad de reducir la huella de carbono y mitigar los efectos del cambio climático. En este contexto, la madera contralaminada (CLT) ha surgido como una alternativa eficiente y ecológica a los materiales de construcción tradicionales, como lo es el hormigón y el acero, debido a su capacidad para almacenar carbono y su alto rendimiento estructural (Izzi et al., 2018). Chile es uno de los países con mayor actividad sísmica del planeta, por lo que está expuesto a una constante ocurrencia de terremotos

Si bien el CLT presenta ventajas importantes en cuanto a su capacidad de resistencia y sostenibilidad, su comportamiento estructural puede ser mejorado mediante la incorporación de elementos de acero, como vigas de acoplamiento y conexión metálicas reforzadas. Estudios recientemente han demostrado que los muros de CLT acoplados con vigas de acero presentan una mayor resistencia lateral, validando la disipación de energía y capacidad de recuperación post-sismos en comparación con muros individuales (Moerman et al., 2022). La combinación de estos materiales ha permitido desarrollar sistemas estructurales más eficientes y resilientes, capaces de soportar cargas sísmicas más grandes sin comprometer la seguridad estructural.

En una mirada más global, países como lo es Estados Unidos y Japón han implementados normativas específicas para el diseño y construcción de estructuras híbridas de madera y acero, promoviendo así su uso en edificaciones sostenibles y un alto desempeño.

Sin embargo, en Latinoamérica, la investigación sobre sistemas híbridos de madera y acero aún se encuentra en desarrollo, y la validación experimental y numérica de modelos estructurales son importantes para implementar las metodologías desarrolladas. La adopción del CLT en la región requiere avanzar en su caracterización estructural y normativa. Estudios recientes en Sudamérica (Instituto Argentino de Normalización y Certificación., 2020) han evaluado críticamente la falta de protocolos locales para la producción y clasificación de paneles, proponiendo marcos de referencia basados en

experiencias europeas y norteamericanas. En Argentina, aunque existen iniciativas institucionales para regular el CLT (ej. IRAM 17110), persisten desafíos para armonizar criterios técnicos y garantizar su aplicabilidad en obras de mediana y gran escala.

Asimismo, en Chile, el Centro UC de Innovación en Madera ha promovido estudios sobre edificación en altura con madera, abordando aspectos estructurales como el diseño de uniones y su respuesta ante eventos sísmicos. La búsqueda de sistemas estructurales eficientes para edificaciones de mediana y gran altura ha impulsado investigaciones sobre elementos híbridos que combinan CLT con otros materiales (Ahmed & Asiz, 2017);(Forcael et al., 2025) demostraron que estos sistemas híbridos optimizan las prestaciones mecánicas —como resistencia sísmica y rigidez— frente al CLT tradicional, especialmente en estructuras de varios niveles. Estos hallazgos coinciden con estudios posteriores ((Carrero et al., 2021) ; (Zong et al., 2024)) que destacan su potencial para reducir peso, acelerar construcción y cumplir normativas internacionales (ej. Eurocódigo 5). En el ámbito de las estructuras de madera, la caracterización precisa de su comportamiento sísmico requiere modelos de histéresis avanzados que capturen adecuadamente su respuesta bajo cargas cíclicas. (Elizaga Rus, 2022) desarrolló un modelo numérico que considera el deterioro de rigidez y resistencia en uniones de madera, demostrando su influencia crítica en la capacidad de disipación energética de estructuras de entramado ligero. Estos hallazgos han sido validados por investigaciones posteriores (Loss et al., 2018), que destacan la necesidad de incorporar no linealidades geométricas y daño acumulativo en las simulaciones para predecir con exactitud el desempeño de viviendas de madera ante sismos severos. Estos avances evidencian la creciente necesidad de validación experimental y numérica, lo que permitiría optimizar el diseño estructural de sistemas híbridos de CLT y acero y garantizar su adecuado desempeño en zonas de alta actividad sísmica.

En este contexto, se hace cada vez más evidente la necesidad de una validación rigurosa tanto experimental como numérica, que no solo fortalezca la comprensión de la respuesta estructural, sino que también facilite el desarrollo y la optimización de diseños más eficientes y resilientes.

## **OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION**

### **Objetivos generales**

- Implementar un modelo no lineal de muros de CLT acoplados con dinteles de acero

### **Objetivos específicos**

1. Desarrollar la modelación numérica de elementos de muros de CLT en OpenSeesPy.
2. Analizar distintas configuraciones de dinteles de aceros para el acoplamiento de los muros de CLT.
3. Validar un modelo numérico mediante la comparación de los resultados obtenidos con ensayos experimentales disponibles en literaturas.

## **ALCANCES DE CADA CAPITULO**

### **Capítulo 1: Formulación del Problema**

Este capítulo establece el contexto de la investigación, describiendo la problemática asociada con la modelación numérica de muros de CLT acoplados con dinteles de acero. Se identifican las limitaciones de los modelos existentes y se justifica la necesidad de un enfoque más preciso. Además, se define el problema central y se presentan los objetivos generales y específicos que guían el desarrollo del estudio.

### **Capítulo 2: Marco Teórico**

Se presentan los fundamentos teóricos relevantes para la investigación. Se introduce el CLT y su aplicación en ingeniería estructural, explicando su comportamiento mecánico y su desempeño ante cargas laterales. Se analiza el sistema de acoplamiento mediante dinteles de acero y se revisan metodologías de modelación numérica en OpenSeesPy. También se incluyen estudios previos sobre modelación y validación de estructuras similares, proporcionando un respaldo teórico a la metodología empleada en la investigación.

### **Capítulo 3: Metodología**

El enfoque metodológico adoptado en la investigación, especificando el tipo de estudio y los métodos utilizados para desarrollar el modelo numérico. Se describe el proceso de modelación en OpenSeesPy, los criterios de selección de parámetros estructurales y las condiciones de análisis. Además, se explican los procedimientos seguidos para la calibración del modelo y su posterior validación con datos experimentales reportados en la literatura.

## **Capítulo 4: Resultados**

Aquí se presentan los hallazgos obtenidos a partir de la modelación numérica. Se analiza la respuesta estructural del muro de CLT y se comparan los resultados con ensayos experimentales. Se incluyen gráficos de deformación, curvas de capacidad y parámetros de validación. Además, se discuten los principales factores que afectan el comportamiento estructural del sistema y se evalúan sus implicaciones en el diseño sismorresistente.

## **CAPITULO 1: FORMULACION DEL PROBLEMA**

### **1.1 Descripción del problema**

La modelación numérica de sistemas de muros de **madera contralaminada (CLT)** es esencial para representar el comportamiento de sus elementos estructurales. Sin embargo, los modelos estructurales basados en elementos tipo *frame* (marco) han sido ampliamente utilizados para analizar muros de CLT debido a su simplicidad computacional (Huang et al., 2023). Sin embargo, esta aproximación presenta limitaciones significativas, ya que no captura adecuadamente: los efectos combinados de flexión y cortante en paneles de mediana y gran altura, la interacción no lineal entre paneles adyacentes, y el comportamiento diafragmático de los forjados. Estudios recientes (Pacchioli, 2021), demuestran que los modelos tridimensionales detallados, que incorporan propiedades ortotrópicas y conexiones semirrígidas, pueden predecir con mayor precisión (hasta un 25% más exactitud) la respuesta estructural global bajo cargas sísmicas y laterales, particularmente en edificios de mediana altura.

Para abordar estas limitaciones, se propone el uso de elementos Shell, en la representación de los muros de CLT. Esto permite una representación más detallada de las propiedades del material, mejorando la precisión de comportamiento real de la estructura. En el análisis estático de edificios híbridos que combinan hormigón armado y elementos de madera laminada y contralaminada, la utilización de elementos tipo shell ha facilitado la determinación de factores de modificación de la respuesta sísmica, proporcionando una comprensión más completa del desempeño estructural (Badini et al., 2022).

Además, estudios han demostrado que la implementación de elementos tipo Shell en la modelación de muros de CLT permite capturar de manera más realista la respuesta no lineal de las estructuras bajo cargas laterales, lo cual es esencial para el diseño sismorresistente (Benedetti Leonelli & Neira Rodríguez, 2018). Esta metodología también facilita la evaluación de diferentes configuraciones de muros y conexiones (Wilson et al., 2021).

Asimismo, (Guindos, 2019) establece un marco innovador para el diseño de estructuras CLT mediante un enfoque escalonado que integra modelos analíticos simplificados en etapas conceptuales basados en el Eurocódigo 5 con análisis numéricos no lineales avanzados (validados experimentalmente) para fases ejecutivas, destacando mediante análisis de sensibilidad, la influencia crítica de parámetros como la rigidez rotacional de conexiones y el módulo de cortante  $G_p$ .

El Comité Europeo de Normalización, a través del CEN/TEC 250, ha trabajado en la segunda generación de los Eurocódigos, con el objetivo de incorporar métodos, materiales y requisitos regulatorios y de mercado. Esta actualización busca promover una mayor armonización y mejorar la utilidad práctica de los Eurocódigos para los cálculos diarios, introduciendo requisitos para la evaluación, reutilización y rehabilitación de estructuras existentes, y fortaleciendo las exigencias estructurales (CEN/TC 250, 2023).

Un ejemplo destacado de la aplicación de estas normativas es el Edificio HAUT en Ámsterdam, un rascacielos de 21 pisos que combina madera contralaminada (CLT) y hormigón. Este proyecto ha demostrado la viabilidad de las estructuras híbridas de madera en altura, destacándose por su diseño sostenible y eficiente. La construcción del

HAUT ha sido reconocida internacionalmente, obteniendo una certificación BREEAM Outstanding y el Premio Estructural 2023 otorgado por la Institución de Ingenieros Estructurales (Madera21, 2024).

La incorporación de elementos tipo *shell* en la modelación de muros de madera contralaminada (CLT) mejora significativamente la precisión en la simulación del comportamiento estructural. Esta técnica permite una representación detallada de las propiedades del material y de la interacción entre componentes, lo que es crucial para el análisis sísmico en regiones de alta actividad sísmica, como Chile. Por ejemplo, Investigaciones como la de (Monsalve Fica, 2019) han empleado modelos de elementos tipo *shell* ortotrópicos en SAP2000 para evaluar el comportamiento sísmico de estructuras de CLT en zonas de alta sismicidad. No obstante, este enfoque presenta limitaciones reconocidas, particularmente en la idealización de conexiones mecánicas (pernos, clavos), que SAP2000 simplifica como condiciones de borde rígidas o articuladas, y la imposibilidad de capturar efectos no lineales locales en uniones híbridas (CLT- Acero/Hormigón). Alternativas como Abaqus (con modelos de daño progresivo) o OpenSees (con *macroelements* para madera) han demostrado mayor precisión en estudios comparativos, reduciendo las discrepancias entre simulaciones y ensayos experimentales en estructuras de mediana altura.

## 1.2 Delimitación del estudio

**Tipo de estructura:** El estudio se centra en muros de CLT acoplados con dinteles de acero, donde se descartó otras configuraciones estructurales como muros de hormigón, entramados de madera u otras combinaciones híbridas. Además, el estudio considera modelos de muros a escala real, considerando el comportamiento de estructuras con múltiples niveles.

- **Enfoque metodológico:** La investigación se basa en la modelación numérica utilizando OpenSeesPy, donde se representan mediante elementos de área tipo Shell para los muros de CLT y elementos de plasticidad distribuida con respecto al desplazamiento para los dinteles de acero. Además, es importante mencionar que no se consideraran elementos finitos sólidos, ya que el objetivo final es comparar los resultados del modelo numérico con resultados experimentales.

- **Alcance temporal:** El estudio se centra en el comportamiento inmediato del sistema estructural ante cargas laterales, sin analizar los efectos a largo plazo como la degradación por humedad, la fluencia de la madera o la fatiga en las conexiones de acero. Además, no se consideran los efectos en la respuesta sísmica ya que nos enfocaremos en un análisis estático no lineal.

A partir de estas limitaciones, se busca que el estudio sea lo suficientemente específico para aportar conocimientos aplicables a la ingeniería estructural, pero sin perder de vista su relevancia en el contexto sísmico y constructivo actual.

## **CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Introducción al CLT y su Aplicación en Ingeniería Estructural**

La Madera Contra Laminada, conocida como CLT por sus siglas en inglés (Cross Laminated Timber), es un material de construcción compuesto por varias capas de madera ensambladas de manera que cada una se sitúa perpendicular a la anterior. Este método de construcción confiere al CLT propiedades destacadas de estabilidad dimensional, permitiendo una resistencia superior tanto a cargas verticales como horizontales, lo que lo diferencia de otros tipos de sistemas constructivos en madera utilizados en la ingeniería.

Su configuración lo hace ideal para distintos usos en la construcción como por ejemplo muros y losas. La prefabricación de los paneles de CLT posibilita construcciones rápidas y eficientes, acortando significativamente los plazos de obra y disminuyendo el impacto ambiental asociado.

El CLT es madera prefabricada que consta de al menos tres capas de madera donde las capas adyacentes están orientadas transversalmente y unidas con adhesivo estructural para formar un elemento (American Wood Council (AWC), 2024).

### **2.2 Comportamiento Estructural de los Muros de CLT**

La composición multicapa de la madera contralaminada (CLT), con láminas dispuestas perpendicularmente entre sí, permite que los muros de CLT soporten cargas más elevadas y presenten un buen comportamiento ante fuerzas laterales. Esta configuración

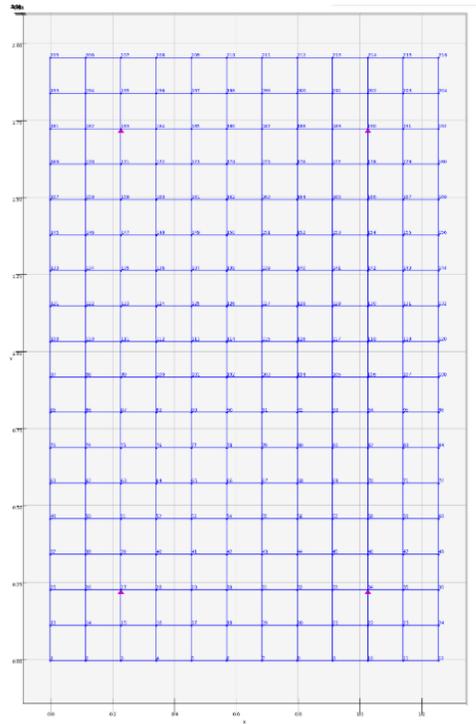
estructural mejora la rigidez y resistencia del elemento, lo que la hace adecuada para aplicaciones en edificaciones expuestas a cargas sísmicas o de viento. Estudios han demostrado que configuraciones no convencionales, como el uso de capas en  $\pm 45^\circ$ , incrementan la resistencia a la flexión, debido a una distribución más eficiente de las tensiones (Buck et al., 2016). Asimismo, investigaciones recientes sobre CLT fabricado con álamo revelan que disposiciones como 0/30/0 o 0/45/0 superan en módulo de elasticidad (MOE) y módulo de ruptura (MOR) a la configuración tradicional de 0/90/0, confirmando su mejor desempeño frente a cargas laterales (Rostampour Haftkhani & Hematabadi, 2022), transformando la madera desde un material isotrópico, a un muro de CLT de material ortotrópico. La combinación del bajo peso propio del CLT (aproximadamente 1/5 del peso del hormigón armado para sistemas equivalentes) con su capacidad de disipación de energía mediante conexiones dúctiles, lo posiciona como una solución óptima para zonas sísmicas.

Investigaciones recientes han profundizado en estos beneficios. Por ejemplo, Sustainable Cross-Laminated Timber Structures in a Seismic Area analiza el comportamiento sísmico del CLT y su capacidad de disipación de energía mediante conexiones dúctiles (Sandoli et al., 2021). Asimismo, Seismic Performance of CLT Shear Wall Infilled Hybrid Steel Frames examina el desempeño sísmico de muros de corte de CLT en estructuras híbridas con acero (Je Too & Isoda, 2023).

Esta ventaja se ha validado en proyectos reales, como el Treet Building en Noruega, donde el uso de CLT permitió lograr una relación peso-resistencia sísmica un 40% más eficiente que soluciones convencionales

Diversos estudios han analizado la respuesta estructural de los muros de CLT ante cargas estáticas y dinámicas. Ensayos experimentales han demostrado que la disposición de las capas y la configuración de las uniones afectan directamente la rigidez y resistencia de los paneles, optimizando su comportamiento estructural. Por otro lado, investigaciones sobre el comportamiento cíclico de muros híbridos de CLT han indicado que la combinación con otros materiales puede mejorar sustancialmente su capacidad de disipación de energía, aumentando la ductilidad del sistema (Madera21, 2024)

En la Figura 1 se puede visualizar la configuración del muro extraído desde el modelo de opensees.py que representa las mismas condiciones iniciales del estudio que utilizo para realizar la calibración.



**Figura 1.** Modelo utilizado para calibración de muro de CLT

Fuente: Elaboración propia basado en la configuración de modelado propuesta por (Xin et al., 2022)

### 2.3 Sistemas de Acoplamiento con Dinteles de Acero

El acoplamiento entre muros de madera contralaminada (CLT) y dinteles de acero es fundamental para garantizar la integridad estructural y el desempeño sísmico de edificaciones híbridas. Las conexiones entre estos elementos deben diseñarse cuidadosamente para asegurar una transferencia eficiente de cargas y mantener la estabilidad de la estructura.

Las uniones entre elementos de CLT y otros materiales, como el acero, requieren soluciones específicas que consideren aspectos como la corrosión y la transmisión acústica. Estas conexiones suelen realizarse mediante placas, escuadras, flejes o tornillos, dependiendo de la configuración de la construcción y las exigencias estructurales.

Investigaciones recientes han analizado el comportamiento de estas conexiones en estructuras híbridas. Por ejemplo, Paneles estructurales estandarizados de CLT examina la flexibilidad de diseño y la integración de nuevos programas en edificios de mediana altura, considerando aspectos estructurales y constructivos (Illanes Troncoso, 2022) Asimismo, Propiedades físico-mecánicas de madera contralaminada CLT analiza el desempeño de diferentes tipos de adhesivos y su impacto en la resistencia mecánica de los paneles CLT (Sánchez-Machado et al., 2022).

Por otro lado, estudios destacan que los sistemas híbridos que combinan muros de entramado ligero con losas de CLT y madera laminada encolada (MLE) simplifican el proceso constructivo y permiten dejar la madera a la vista, mejorando la estética y funcionalidad de la edificación (Brandner et al., 2016). Este enfoque combina la ductilidad de los muros de entramado ligero con la rigidez y resistencia de los elementos de CLT y acero, optimizando el comportamiento estructural. Asimismo, estudios experimentales demuestran que esta sinergia es clave para resistir cargas laterales, como las sísmicas, donde los marcos ligeros disipan energía mientras el CLT proporciona estabilidad (Gavric et al., 2015).

Además, La versatilidad del CLT facilita su integración con otros materiales, como el acero, en sistemas híbridos que mejoran el rendimiento estructural y la eficiencia constructiva.

En resumen, el diseño adecuado de las conexiones entre muros de CLT y dinteles de acero es esencial para el éxito de las estructuras híbridas, asegurando una transferencia eficiente de cargas y un comportamiento óptimo bajo condiciones de servicio y eventos sísmicos.

## **2.4 Métodos de Modelación Numérica en OpenSeesPy**

La modelación numérica es fundamental en la ingeniería estructural para predecir el comportamiento de sistemas bajo diversas condiciones de carga. OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation) es un software de código abierto ampliamente utilizado para este propósito, desarrollado por el Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). Esta plataforma permite la simulación avanzada de estructuras y sistemas geotécnicos, facilitando el análisis de su respuesta ante cargas

estáticas y dinámicas. Una de sus principales ventajas es su capacidad para realizar análisis no lineales y su flexibilidad para definir modelos estructurales personalizados mediante el lenguaje Tcl.

Dentro de sus aplicaciones, OpenSees ha sido empleado en la modelación de estructuras de hormigón armado con aislación en la base, utilizando elementos de barra discretizados en fibras y elementos especializados para la simulación de aisladores sísmicos. Estos modelos han permitido evaluar el desempeño estructural bajo la acción simultánea de múltiples componentes de acelerogramas registrados, proporcionando información valiosa para el diseño sismorresistente. Además, se ha aplicado en el análisis de estructuras apertadas en concreto reforzado mediante análisis Pushover, permitiendo identificar modos de falla plástica y evaluar cambios en las propiedades modales numéricas (Argyroudis & Kaynia, 2015). Estos estudios han mejorado la comprensión del comportamiento dinámico de las estructuras después de superar su límite elástico, lo que resulta clave para la evaluación de daños estructurales y la calibración de metodologías de monitoreo basadas en la variación de frecuencias de vibración

Gracias a su versatilidad y robustez, OpenSees sigue siendo una herramienta invaluable en la comunidad de ingeniería estructural, permitiendo abordar desafíos complejos en la evaluación y diseño de estructuras sometidas a cargas extremas, como los eventos sísmicos.

## **2.5 Diseño Sísmico de Muros de CLT Acoplados**

En los modelos numéricos en OpenSees han demostrado ser herramientas importantes para predecir el comportamiento estructural de sistemas híbridos de CLT y acero, su precisión depende de la adecuada representación de las propiedades de los materiales, las conexiones y la interacción entre los elementos estructurales. Estudios como los de (Aguilera, José., 2020) han desarrollado modelos en OpenSees para evaluar la respuesta sísmica de muros de CLT, encontrando que la variabilidad en la rigidez de las conexiones influye significativamente en la disipación de energía. Sin embargo, estos modelos solo fueron validados con datos provenientes de ensayos previos, sin una campaña experimental complementaria. Asimismo, (Moerman et al., 2024) analizaron la respuesta dinámica de sistemas híbridos de CLT y acero mediante simulaciones

numéricas en OpenSees, destacando la necesidad de ajustar los modelos con resultados experimentales para mejorar la predicción de la capacidad de carga y la ductilidad de las conexiones. De manera similar, estudiaron el desempeño de muros de CLT bajo cargas laterales mediante un enfoque híbrido de experimentación y modelación numérica, resaltando que, sin una validación experimental adecuada, las simulaciones pueden sobrestimar o subestimar la resistencia estructural del sistema. En este sentido (Loss et al., 2018), enfatizan que la comparación de resultados numéricos con datos experimentales es fundamental para mejorar la confiabilidad de los modelos en el diseño de estructuras de madera contralaminada en zonas de alta actividad sísmica. Estos estudios reflejan que, aunque la modelación numérica en OpenSees es una herramienta valiosa para la simulación de estructuras híbridas de CLT y acero, es imprescindible la validación experimental para garantizar la precisión de los resultados y su aplicabilidad en la ingeniería estructural.

## **2.6 Estudios Experimentales y Validación de Modelos**

Los estudios experimentales han sido clave para la validación de modelos numéricos en CLT. Investigaciones previas han evaluado el comportamiento de muros de CLT bajo cargas cíclicas y monotónicas, identificando que el tipo de conexión es un factor determinante en la respuesta estructural. En estudios recientes, se han realizado pruebas en estructuras de mediana altura para analizar la evolución de sus propiedades modales durante el montaje, utilizando mediciones de vibraciones ambientales para la calibración de modelos numéricos (Zong et al., 2024);(Xin et al., 2022).

## **2.7 Resumen y Brechas en la Investigación**

Si bien la modelación numérica ha permitido avanzar en la comprensión del comportamiento estructural de muros de CLT acoplados con acero, existen brechas en la literatura relacionadas con la validación experimental de estos modelos y la influencia de distintos parámetros en la respuesta sísmica. En particular, se requiere mayor investigación sobre la influencia de la variabilidad en las conexiones y la interacción entre los elementos estructurales en la disipación de energía.

Este estudio busca contribuir a la reducción de estas brechas mediante el desarrollo de un modelo numérico detallado en OpenSeesPy, permitiendo evaluar distintas

configuraciones de dinteles de acero de una forma más práctica y rápida, y comparando los resultados obtenidos con datos experimentales disponibles.

## **CAPITULO 3: METODOLOGÍA**

### **3.1 Enfoque Metodológico**

Este estudio adopta un enfoque cuantitativo, donde se desarrolla un modelo numérico que represente el comportamiento estructural de un sistema híbrido. A través de la modelación en OpenSeesPy, se busca comprender mejor la interacción entre estos elementos y evaluar su desempeño ante un patrón de cargas laterales.

Más allá de una simple simulación, este trabajo tiene un propósito claro: generar conocimiento aplicable al diseño estructural de sistemas híbridos, proporcionando información valiosa para la optimización de su respuesta. Para lograrlo, los resultados obtenidos serán comparados con datos experimentales reportados en la literatura, permitiendo evaluar la precisión del modelo y su capacidad para replicar la realidad.

Este enfoque metodológico no solo permite explorar el potencial de la modelación numérica en la ingeniería estructural, sino que también contribuye a la búsqueda de soluciones más eficientes y seguras para la construcción con CLT, especialmente en regiones de alta sismicidad. La combinación de materiales, como la madera y el acero, presenta desafíos únicos en términos de comportamiento estructural, y este estudio pretende aportar un análisis detallado que ayude a resolver algunas de estas incógnitas.

### **3.2 Tipo de Investigación**

La investigación es de tipo aplicada, ya que busca generar conocimiento útil para el diseño estructural de muros de CLT en zonas sísmicas. Además, tiene un carácter exploratorio y correlacional, ya que se analizan diversas configuraciones estructurales con el objetivo de identificar patrones de comportamiento y relaciones entre variables relacionadas a las propiedades mecánicas de los materiales.

### **3.3 Métodos y Técnicas**

Para alcanzar los objetivos del estudio, se utilizarán las siguientes técnicas y metodologías:

- **Modelación numérica:** Implementación de un modelo en OpenSeesPy para representar el comportamiento de los muros de CLT con dinteles de acero.
- **Análisis no lineal:** Se aplicarán simulaciones considerando materialidades no lineales, comportamiento histerético y efectos de deformaciones.
- **Validación de resultados:** Comparación de los resultados numéricos con datos experimentales disponibles en la literatura, asegurando la precisión del modelo.

### 3.4 Población y Muestra

Dado que la investigación es de carácter numérico y no experimental en laboratorio, no se trabajará con una población de estudio tradicional. Sin embargo, se tomarán como referencia estudios previos en los que se realizaron ensayos físicos de muros de CLT acoplados con acero, los cuales servirán como base para la calibración del modelo numérico.

### 3.5 Procedimiento

Este código modela dos muros de CLT acoplados con dinteles de acero utilizando el software OpenSees.py. A continuación, se describe las principales etapas del modelo:

#### 3.5.1 Definición de unidades y constantes:

Se establecen como unidades principales el metro (m), kilogramo (kg) y segundo (s). Además, se incorporan unidades auxiliares como el milímetro (mm), centímetro (cm), pascal (Pa) y megapascal (MPa), junto con constantes físicas como la gravedad ( $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ), para que así pueda realizar la asignación de los valores a cada unidad de medida secundarias que se pueden encontrar a lo largo del modelo, y así no se presenten inconsistencia en el modelo.

#### 3.5.2 Inicialización del modelo:

Se limpia cualquier configuración anterior mediante `ops.wipe()` y se define el modelo con tres dimensiones (`ndm=3`) y seis grados de libertad por nodo (`ndf=6`), permitiendo capturar movimientos tanto en traslación como en rotación.

### 3.5.3 Definición del material CLT:

Debido a que OpenSees no cuenta con un material específico predefinido para representar el comportamiento de la madera, se evaluaron distintas alternativas de modelación. Un criterio fundamental para la selección fue la capacidad del material de replicar la curva fuerza-deformación (histerética) observada experimentalmente en paneles de CLT, la cual captura su respuesta no lineal bajo cargas cíclicas. En una etapa inicial, se consideró el uso del material PlasticDamageConcretePlaneStress, ya que permitía introducir un mayor número de propiedades mecánicas y ofrecía cierto potencial para aproximar el comportamiento del CLT, incluyendo la degradación de rigidez y resistencia. Sin embargo, se observó que dicho material está optimizado para análisis bidimensionales (2D), lo que limitaba su aplicabilidad dentro del modelo tridimensional (3D) propuesto en esta investigación. Por ello, se exploraron alternativas que, además de ser compatibles con modelaciones 3D, pudieran ajustarse a la curva histerética característica del material mediante parámetros calibrados.

Por esta razón, se optó por representar la madera como un material ortotrópico elástico, utilizando el comando `ops.nDMaterial('ElasticOrthotropic')`. Esta elección permite capturar el comportamiento anisotrópico del CLT dentro del rango lineal, lo cual es coherente con el enfoque del estudio.

Con respecto a los valores utilizados en el modelo, en la Tabla 1, se asignan los valores asociados a los módulos de elasticidad en las direcciones principales ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ ), en la Tabla 2 los valores con respecto al coeficientes de Poisson ( $\nu_{xy}$ ,  $\nu_{yz}$ ,  $\nu_{xz}$ ) y finalmente en la Tabla 3 módulos de corte ( $G_{xy}$ ,  $G_{yz}$ ,  $G_{xz}$ ) y además, se especifica el valor de densidad ( $\rho$ ) para la madera contralaminada (CLT).

**Tabla 1.** Valores de módulos de elasticidad

$E_x = 11300 * MPa$
$E_y = 520 * MPa$
$E_z = 520 * MPa$

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de (Xin et al., 2022)

**Tabla 2.** Valores de coeficiente de poisson

$\nu_{xy} = 0.35$
$\nu_{yz} = 0.35$
$\nu_{xz} = 0.35$

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de (Xin et al., 2022)

**Tabla 3:** Valores de módulo de corte y densidad a utilizar

$G_{xy} = 300 * MPa$
$G_{yz} = 130 * MPa$
$G_{xz} = 130 * MPa$
$Densidad (\rho) = 484 * \frac{kg}{m^3}$

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de (Xin et al., 2022)

#### **3.5.4 Definición de la sección estructural del CLT:**

Para el modelo se define una sección LayeredShell, la cual modela el CLT como una estructura de capas, asignando un espesor total de 0.205 m dividido en cinco capas de igual grosor.

#### **3.5.5 Geometría del modelo:**

El modelo representa dos muros de CLT con tres niveles o pisos, cada uno con una altura de 2 m, dando una altura total de 6 m. La longitud del muro en dirección X es de 2 m y se emplea un mallado estructural con elementos de tamaño 0.5 m × 0.5 m.

#### **3.5.6 Definición de nodos y asignación de masas:**

Se generan nodos distribuidos en la malla del muro, asignando masas nodales equivalentes al peso total de la estructura dividido entre el número de nodos. Además, se crean nodos adicionales desplazados en el eje x para modelar el segundo muro acoplado.

#### **3.5.7 Generación de elementos estructurales:**

Se implementan los muros como elementos ShellNLDKGQ, asignando la sección LayeredShell definida anteriormente. Se establecen conexiones entre los pisos para capturar el comportamiento global de la estructura.

### 3.5.8 Definición de propiedades del acero y modelado de los dinteles:

En una primera aproximación en el proceso de modelación, se optó por representar el comportamiento no lineal del dintel mediante una formulación con plasticidad concentrada. Para esto, se idealizó la zona plástica en el centro del dintel, mediante la creación de dos nodos superpuestos, para así unirlos mediante un elemento zeroLength, al que se le asignó un material no lineal que capturara el comportamiento histerético deseado.

Este sistema permitió concentrar las no linealidades en un punto específico del modelo, facilitando el control sobre el comportamiento plástico. Los extremos del dintel se consideró un elemento de acero rígido mediante un elemento 'elasticBeamColumn' que unía los nodos del elemento de CLT y los nodos del zeroLength. El modelo considerando el dintel con plasticidad concentrada se puede visualizar en la Figura 2

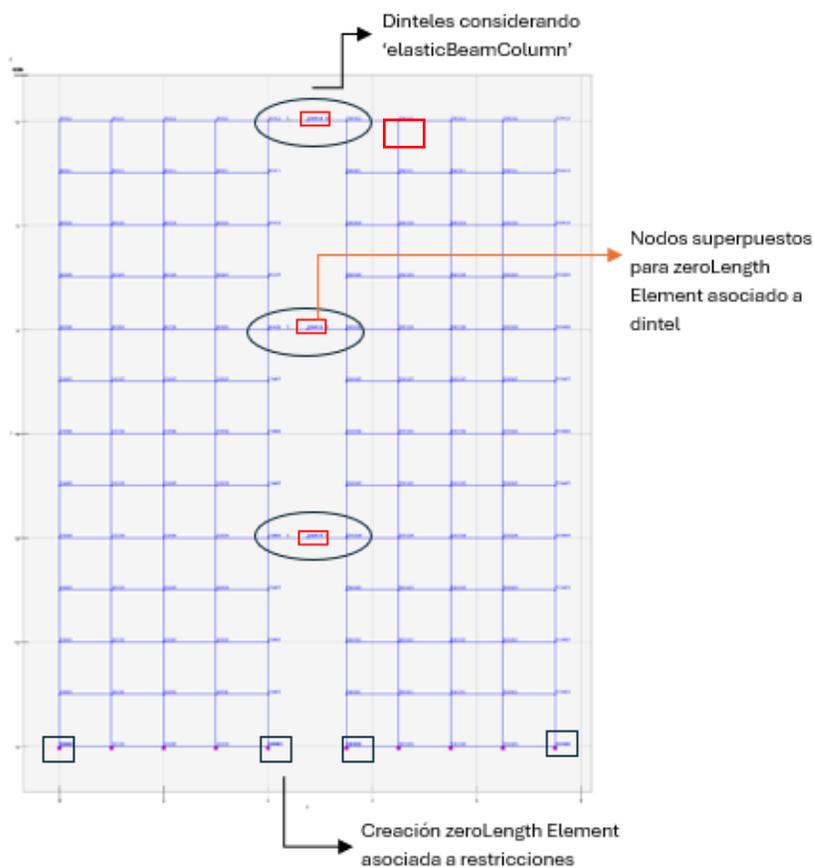
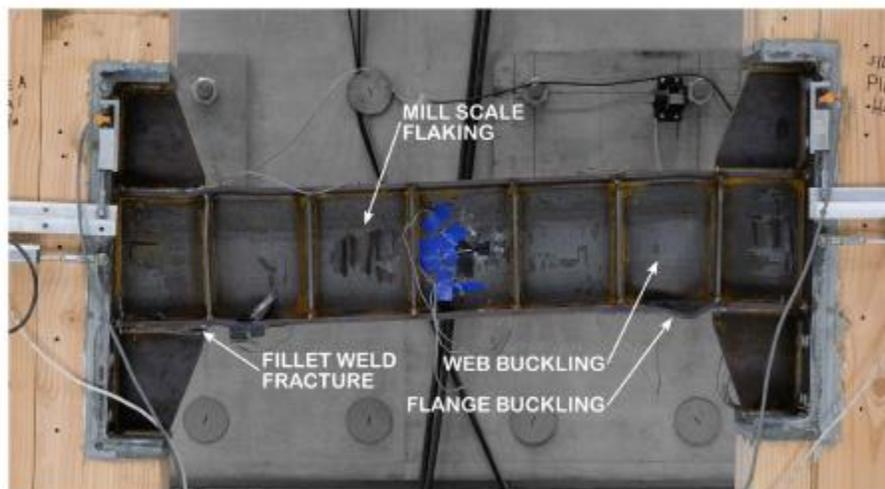


Figura 2. Modelo considerando plasticidad concentrada en el elemento de acero

Fuente: Elaboración propia (2025)

Sin embargo, tras revisar el estudio realizado por (Moerman et al., 2022), se identificó que la demanda relacionada a la zona inelástica no se centra en una única zona específica, sino que se distribuye a lo largo de toda la longitud del dintel, esto producto de la identificación de la rótula plástica. Esta observación permitió replantear el elemento de modelado, optando por un elemento que pudiera capturar de una manera más realista la respuesta no lineal del elemento.

Por lo tanto, los dinteles de acero se modelarán utilizando un material Steel02, el cual incluye endurecimiento cinemático. Donde se asignan parámetros estructurales como el límite de fluencia ( $F_y = 300 \text{ MPa}$ ) y el módulo de elasticidad del acero ( $E = 210.000 \text{ MPa}$ ). Posteriormente, se crean elementos dispBeamColumn para representar los dinteles que acoplan ambos muros, ya que mediante la investigación se pudo visualizar que los elementos se diseñaban por corte, sin embargo, se podía visualizar una falla combinada en elemento (corte más flexión) como se puede visualizar en la Figura 3.



**Figura 3.** Comportamiento del dintel bajo cargas cíclicas

Fuente: (Moerman et al., 2024)

Además, cabe mencionar que, para una modelación más acotada en cuanto al comportamiento del acero, se le agrega un material llamado Min Max, que lo que realiza es entregarle parámetros de deformaciones máximas en compresión (-8%) y deformaciones máximas en tracción (+8%), por otro lado, debemos considerar la

orientación del dintel considerando su ejes locales y globales mediante un comando en OpenSees.py llamado GeomTransf.

### 3.5.9 Modelado de conexiones y restricciones:

Para modelar las conexiones en la base de los muros, se crean nodos superpuestos en las esquinas de los muros y se vinculan mediante elementos zerolength, los cuales simulan el comportamiento de muelles elásticos, donde esto representaría los elementos que restringen los desplazamientos (Hold-down). Se aplican restricciones en la base para evitar traslaciones en todas las direcciones y se emplean equalDOF para garantizar compatibilidad en los desplazamientos entre los muros y los elementos de acoplamiento, además los nodos del centro se empotran completamente para representar un comportamiento más rígido en la base de los muros, como se muestra en la Figura 4

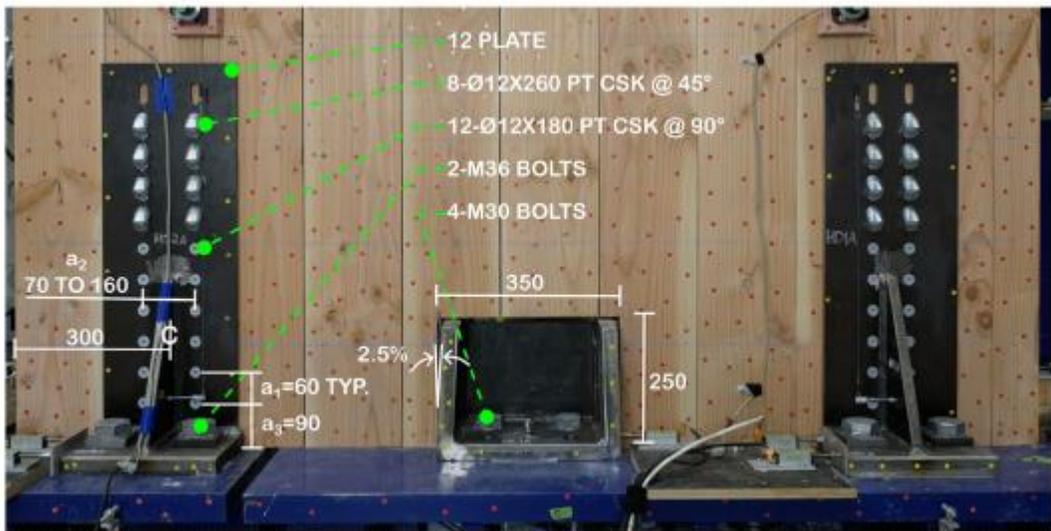


Figura 4. Restricciones en la base del muro

Fuente: (Moerman et al., 2024)

### 3.5.10 Visualización del modelo:

Finalmente, se utiliza `opsv.plot_model()` para graficar la estructura, permitiendo visualizar la distribución de los nodos y elementos como se presenta en la Figura 5

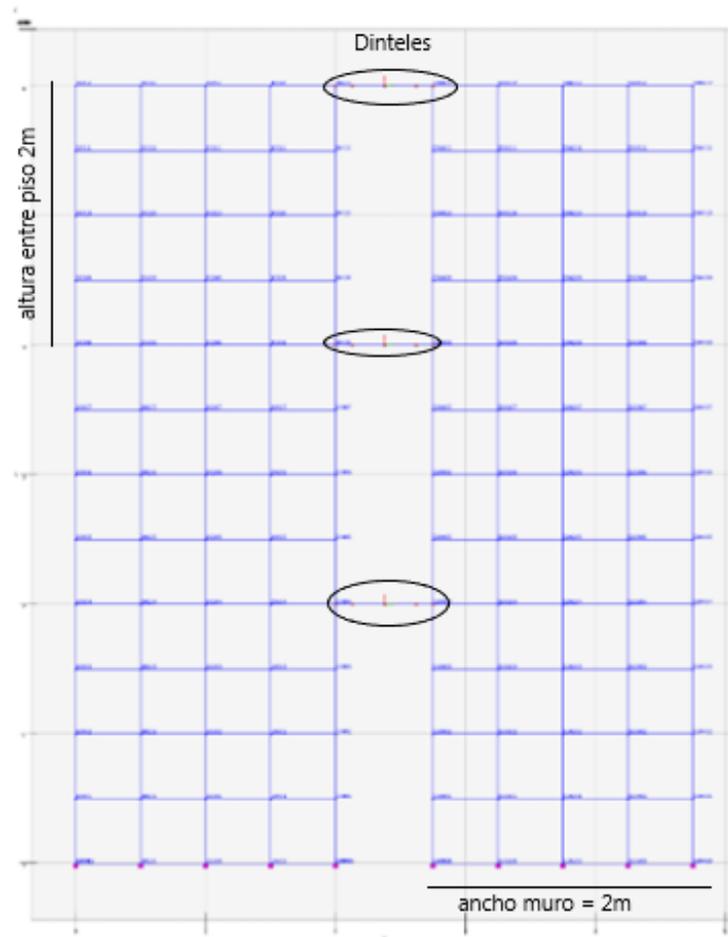


Figura 5. Visualización del modelo de 2 muros de CLT acoplados con dinteles de acero

Fuente: Elaboración propia (2025)

## CAPITULO 4: Resultados

### 4.1 Calibración asociado a muro de CLT

Para evaluar la precisión del modelo numérico desarrollado en OpenSeesPy, se realizó un proceso de calibración basado en la comparación de las frecuencias naturales obtenidas numéricamente con los valores experimentales reportados en la literatura. La referencia utilizada para la validación fue el estudio de (Xin et al., 2022) el cual proporciona los módulos de elasticidad  $E_x$ ,  $E_y$  y el módulo de corte  $G_{xy}$ , de paneles CLT a través de métodos de vibración.

El análisis modal numérico permitió obtener los primeros modos de vibración del sistema, los cuales fueron comparados con los valores experimentales del estudio de referencia. En la siguiente tabla se resumen los resultados de la comparación asociadas al Modo 1 donde se presenta un comportamiento en la Figura 6.

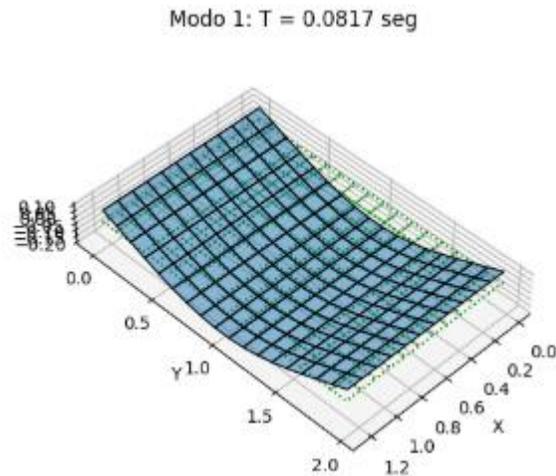


Figura 6. Valor asociado al Modo 1 del modelo desarrollado

Fuente: Elaboración propia (2025)

En la comparativa se puede visualizar que el modo (2,0) y (0,2) corresponde a los modos de flexión pura en las direcciones principales, mientras que en el modo (1,1) se puede visualizar una flexión combinada en ambas direcciones y el modo (1,2) y (2,1) representa con torsión como se puede ver en la Figura 7, sin embargo, en el modelo numérico se puede visualizar que en el Modo 1 y Modo 2. Corresponden a un comportamiento de flexión pura, mientras que los otros 2 modos representan un comportamiento combinado, entre flexión y torsión.

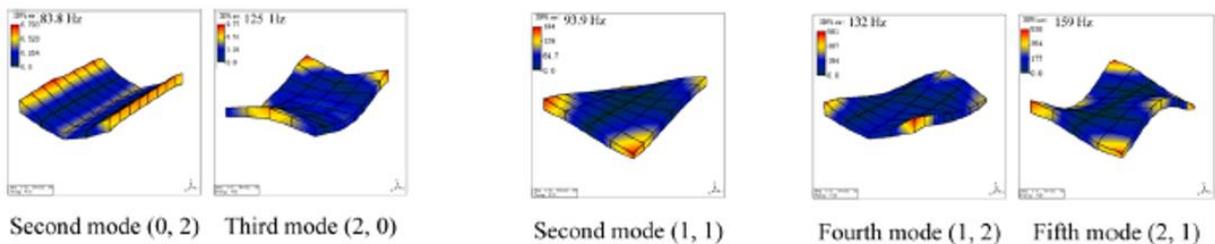
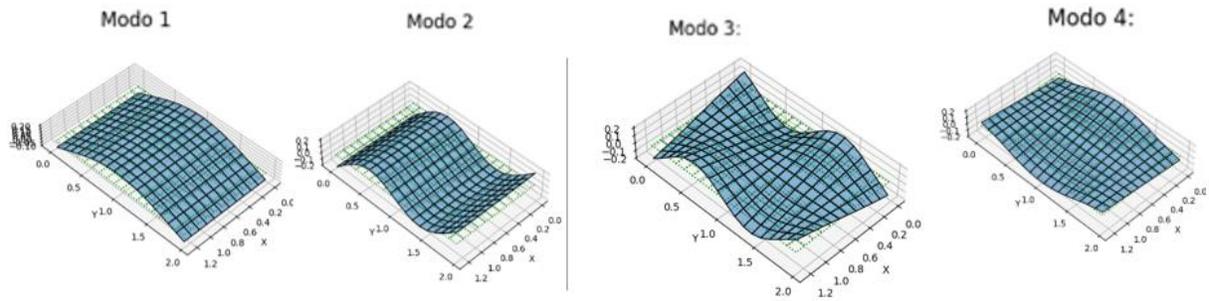


Figura 7. Modos asociados al artículo que se utilizó para calibrar el muro de CLT

Fuente: (Xin et al., 2022)



**Figura 8.** Modos correspondientes al modelo desarrollado en OpenSeesPy

Fuente: Elaboración propia, 2025

En la Tabla 4 se puede visualizar la frecuencia obtenida, en el modelo numérico, donde se encuentra dentro del rango de tolerancia aceptable, con una diferencia inferior al 10% respecto del modelo experimental. Esta variación se puede atribuir a diferentes condiciones de apoyos ya que en el estudio que se utilizó para la calibración del muro de CLT de forma experimental, donde consideraba una restricción a una distancia en razón de 0.224 el ancho y largo del muro como se visualiza en la Figura 1 y en los valores asociados a las propiedades mecánicas del material.

**Tabla 4.** Valores asociados a frecuencia experimental vs numérica

Modo	Frecuencia modelo	Frecuencia experimental	Diferencia (%)
1	7.69	10.6 – 11.27	(-) 5 – 10 %
2	30	32.60	(-) 5 %

Fuente: Elaboración propia, 2025

Para alcanzar una adecuada calibración del modelo, se realizaron los siguientes ajustes:

1. Reducción del módulo de elasticidad ( $E_x$ ,  $E_y$ ) y del módulo de corte ( $G_{xy}$ ) en un 15%.
2. Análisis de sensibilidad de los modos de vibración, donde se observó que la rigidez inicial del modelo generaba sobreestimaciones en las frecuencias naturales.
3. Ajuste en las condiciones de apoyo, permitiendo mayor flexibilidad en la base para capturar de manera más realista la respuesta dinámica del sistema.

Los resultados obtenidos confirman que el modelo numérico representa de manera adecuada el comportamiento vibratorio del sistema de muros CLT acoplados con dintel de acero. Se logró una coincidencia aceptable entre los modos de vibración y sus frecuencias naturales en comparación con los datos experimentales. Por lo tanto, el modelo calibrado puede considerarse válido para su aplicación en el análisis de estructuras CLT y en estudios posteriores de respuesta dinámica.

#### 4.2 Calibración asociado a dintel

Inicialmente, el dintel de acero fue modelado en OpenSeesPy utilizando un elemento *elasticBeamColumn*, bajo la hipótesis de que el mecanismo de falla dominante sería el esfuerzo cortante. En este esquema, se asumía un comportamiento predominantemente elástico con una distribución uniforme de esfuerzos a lo largo del elemento, que sería concentrada en el centro del dintel, donde la deformada de esta hipótesis se muestra en la Figura 9, donde se puede visualizar que existe una rotula de corte definida mediante un zerolength que tiene como definición un resorte en y, que plantea la correcta activación producto de la falla del elemento asociado al dintel.

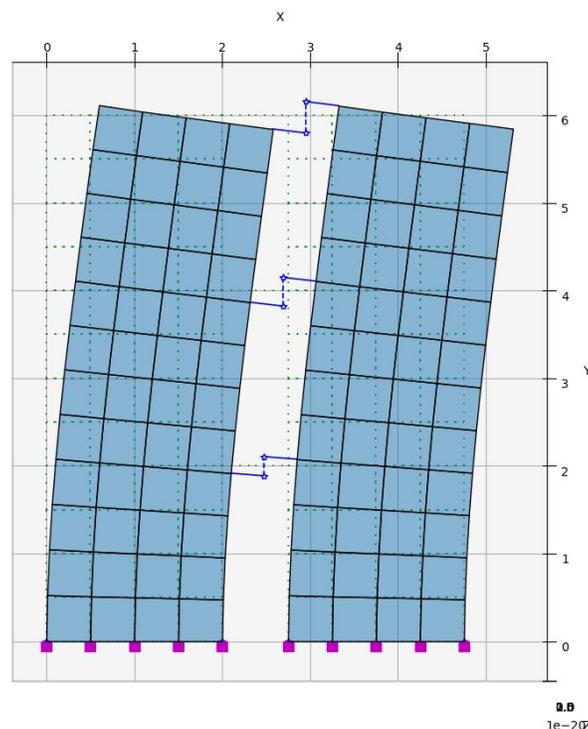
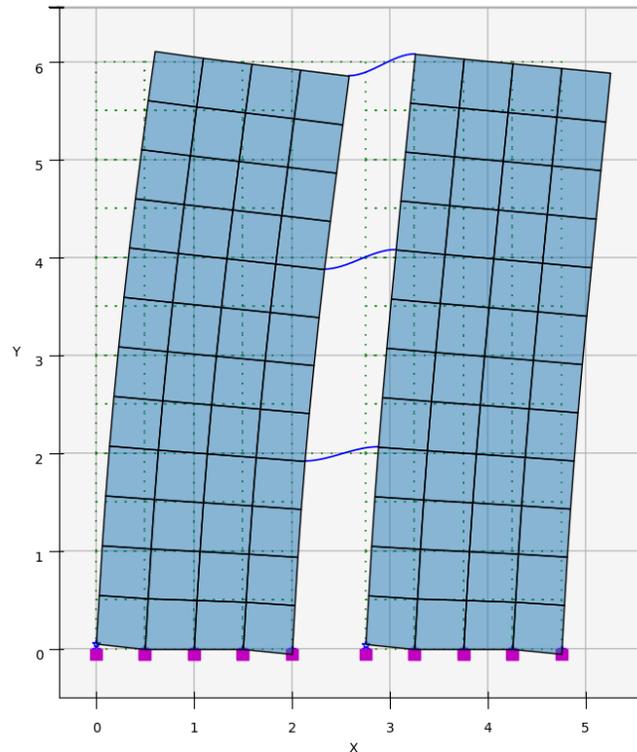


Figura 9. Deformada del modelo considerando una rotula plástica en el centro del elemento de acero

Fuente: Elaboración propia, 2025

Sin embargo, tras revisar la evidencia experimental presentada en el estudio de (Moerman et al., 2024), se identificó que el mecanismo de falla del dintel no se limitaba únicamente al corte, sino que presentaba una combinación de plastificación por flexión y esfuerzo cortante. Esta situación llevó a modificar la estrategia de modelado, reemplazando `elasticBeamColumn` por un elemento `dispBeamColumn`, permitiendo así representar de mejor forma la no linealidad a lo largo de la longitud del dintel.



**Figura 10.** Deformada del modelo considerando la zona plástica distribuida a lo largo del elemento de acero

Fuente: Elaboración propia, 2025

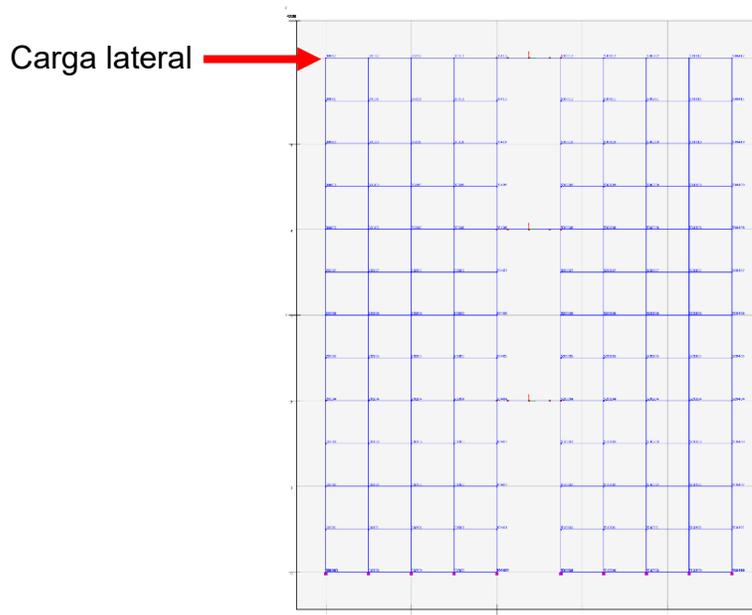
Para garantizar la precisión del modelo se realizaron las siguientes tareas:

- Definir el material que implementara una curva que fuera capaz de capturar la plastificación progresiva del acero, que finalmente el material que se utilizó fue un `steel02`, considerando los máximos y mínimos.
- Para la longitud de plasticidad se ajustó la cantidad de stage en elemento, asegurando una correcta distribución de plasticidad en el dintel.

Para verificar la precisión del modelo calibrado, se realizó un análisis comparativo entre los resultados numéricos y experimentales.

### 4.3 Validación de modelo completo

Para evaluar la respuesta estructural del sistema de muros CLT acoplados, se llevó a cabo un análisis pushover en OpenSeesPy. Donde se aplicó una carga lateral al modelo, en último nodo de la primera fila del muro, la cual esta carga corresponde al peso de la estructura. La Figura 11 muestra la geometría inicial del modelo antes de la aplicación de cargas laterales. En la Figura 10 presentada anteriormente, se observa la deformación del sistema ante la aplicación de una carga lateral, evidenciando la interacción entre los muros y el dintel. La comparación entre ambas imágenes permite visualizar los mecanismos de deformación y la transferencia de esfuerzos en el sistema.



**Figura 11.** Geometría inicial del modelo

Fuente: Elaboración propia, 2025

Como se observa, el comportamiento global del sistema se visualiza un desplazamiento predominantemente traslacional, con una inclinación lateral homogénea en ambos muros. Además, se aprecia que el dintel de acero transmite los esfuerzos entre los muros, lo que indica que la interacción estructural entre los elementos fue correctamente representada en el modelo numérico.

Los valores obtenidos en los nodos de conexión entre los dinteles de acero y los muros de CLT se representan en la Tabla 5. Estos resultados corresponden a las fuerzas

$(F_x, F_y, F_z)$  y momentos  $(M_x, M_y, M_z)$  en ambos extremos de cada dintel, expresada en *Newton (N)* y *Newton – metro (N x m)*.

**Tabla 5.** Valores asociados a los nodos de acoplamiento entre elemento de CLT y elemento de acero

Dintel	Extremo	$F_x$ (N)	$F_y$ (N)	$F_z$ (N)	$M_x$ (N x m)	$M_y$ (N x m)	$M_z$ (N x m)
Link 1	A	7667.62	-152648.37	-7.3E-11	0	2.72E+11	-57243.1
	B	-7667.62	152648.37	7.27E-11	0	2.72E+11	-57243.1
Link2	A	258004.1	-24619.31	-5.2E-14	0	-2E+14	-9232.24
	B	-258004	24619.31	-5.2E-14	0	5.89E+14	-9232.24
Link 3	A	338454	-14185.34	-3.9E-11	0	2.14E+11	-5319.5
	B	-338454	14185.34	-3.9E-11	0	8.11E+11	-5319.5

Fuente: Elaboración propia, 2025

Para verificar la correcta implementación de las restricciones y condiciones de borde:

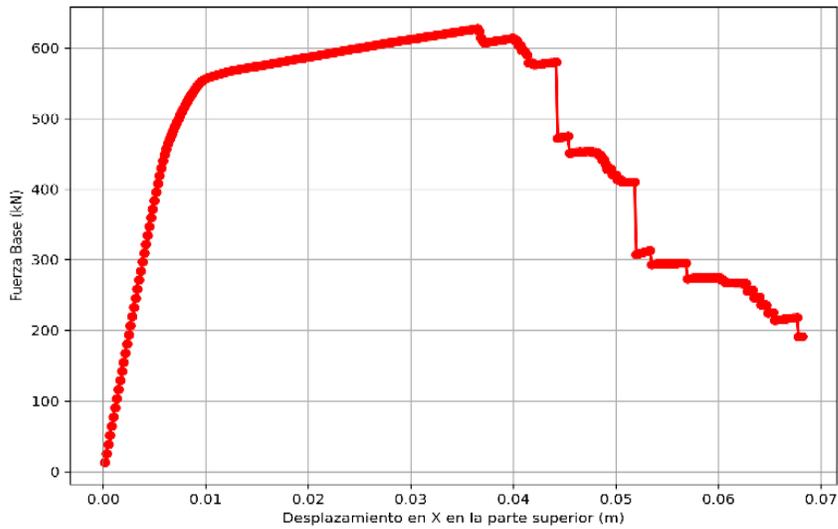
- Se asignaron restricciones empotradas en la base de los muros, las cuales están representadas con símbolos en color magenta en la figura.
- Se modelaron las conexiones de la base del muro con elementos zerolength en los extremos del muro, buscando capturar adecuadamente la disipación de energía en la interfaz muro-base

El patrón de deformación obtenido es coherente con el comportamiento reportado en la literatura, validando la capacidad del modelo para representar la respuesta lateral del sistema.

Para analizar la evolución de la resistencia estructural del sistema bajo cargas laterales se generó la curva capacidad, mostrada en la Figura 12 .

A partir de esta figura se deben tener las siguientes consideraciones:

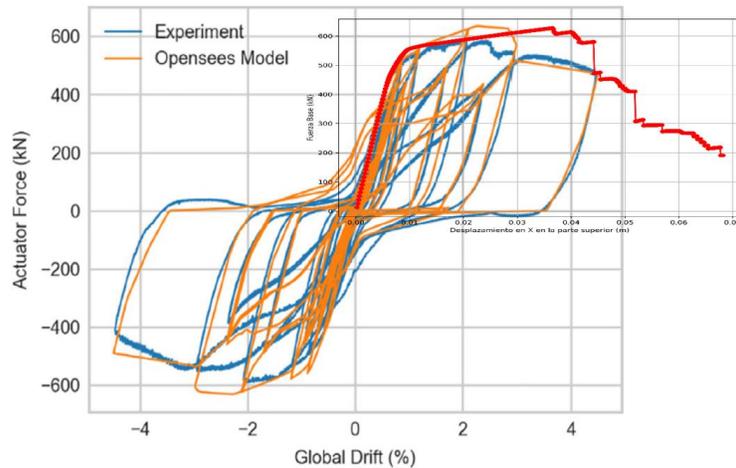
1. El muro se diseña para que trabaje en zona elástica, lo cual la zona inelástica del modelo esta influenciada principalmente por elemento de acero
2. La plastificación en el dintel y las zonas de conexión en comparación a la rigidez del muro son muy bajas
3. La rigidez del sistema se mantiene constante dentro del rango de desplazamientos analizados.



**Figura 12.** Curva Capacidad

Fuente: Elaboración propia, 2025

Con la finalidad de complementar el proceso de validación del modelo desarrollado en OpenSeesPy, se utilizó el gráfico experimental extraído desde el artículo empleado para la calibración. Sobre este se sobre puso la envolvente obtenida del modelo numérico, lo que permitió evaluar visualmente. Tal como se observa en la Figura 13, la curva generada por el modelo presenta un buen ajuste respecto al comportamiento histerético reportado en el ensayo experimental, reproduciendo adecuadamente tanto la rigidez inicial como la degradación de resistencia y la amplitud de los ciclos.

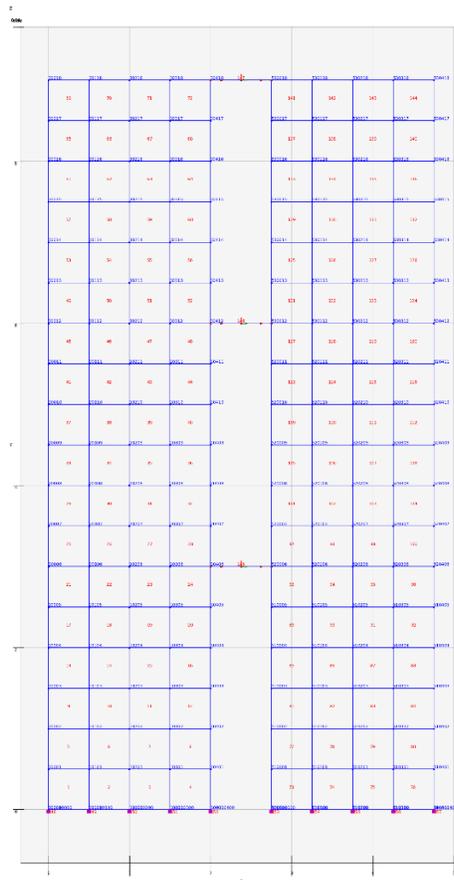


**Figura 13.** Validación del modelo en OpenSeesPy frente a Resultados Experimentales

Fuente: Elaboración propia, 2025

Con el propósito de validar el modelo numérico, inicialmente se modeló un sistema compuesto por un muro de tres pisos con una altura entre niveles de 2 metros, replicando las condiciones del ensayo experimental utilizado como referencia. Este modelo sirvió como base para la calibración de los parámetros de los materiales y geometría del modelo.

Posteriormente, con el objetivo de representar condiciones más realistas y aplicables a edificaciones de mayor escala, se modificó la altura entre pisos a 3 metros como se muestra en la Figura 15. A partir de esta configuración, se desarrolló un análisis paramétrico que permitió estudiar el efecto del número de niveles y de la longitud del dintel de acero en la respuesta estructural del sistema acoplado.



**Figura 14.** Geometría del sistema estructural modelado en OpenSeesPy, considerando altura entre piso de 3 metros

Fuente: Elaboración propia, 2025

Se generaron diversas curvas de comportamiento histerético para diferentes configuraciones, lo que permitió visualizar de forma clara cómo influyen estas variables

(número de pisos y longitud del dintel) en el desempeño global del sistema de muros de CLT acoplados con dinteles de aceros. Estas variaciones aportan una visión más integral del comportamiento del modelo bajo distintas condiciones geométricas y contribuyen al entendimiento del efecto del acoplamiento en sistemas multicapa.

Con el objetivo de evaluar la influencia de las dimensiones geométricas sobre el comportamiento del sistema acoplado CLT-acero, se realizó un análisis paramétrico considerando variaciones tanto en el número de pisos (NP) como en el largo del dintel. En particular, se analizaron configuraciones con NP = 2, 3, 4, 6, 8 y 10, combinadas con dos longitudes de dintel: 0.75 m -1.00 m y 1.25.

Las Figura 15, Figura 16 y Figura 17 presentan las curvas fuerza-desplazamiento obtenidas para cada configuración. En general, se observa que a medida que aumenta el número de niveles, la rigidez global del sistema tiende a reducirse, mientras que la capacidad resistente presenta un comportamiento no lineal con respecto a esta variable.

Asimismo, al comparar las dos longitudes de dintel, se aprecia que un incremento en el largo del elemento de acoplamiento genera una redistribución más eficiente de esfuerzos entre los muros, lo cual se traduce en una respuesta más estable y dúctil, especialmente en configuraciones con mayor número de pisos.

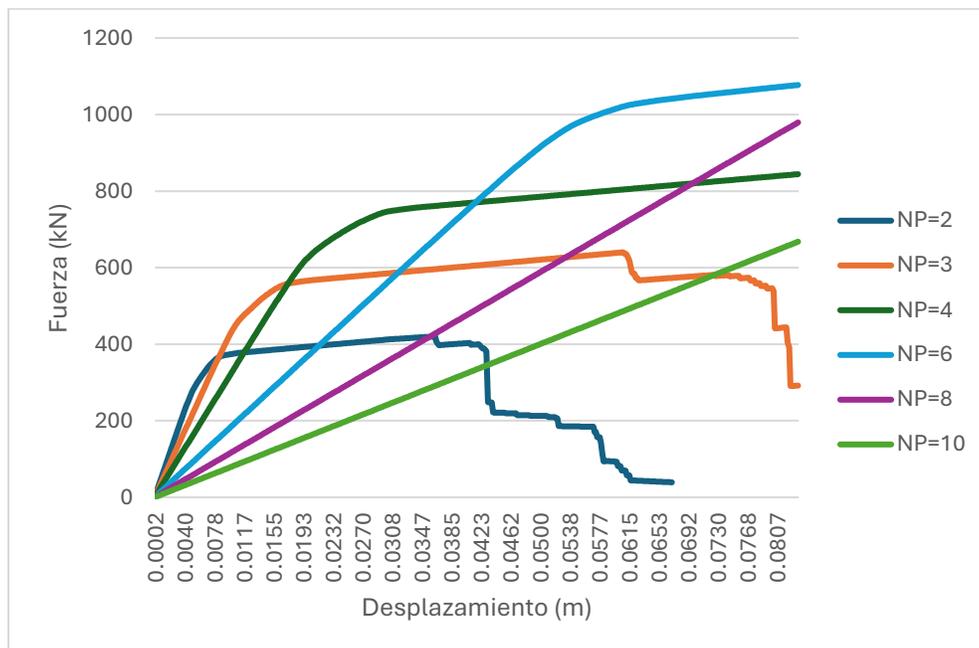


Figura 15. Curvas fuerza-desplazamiento para diferentes números de pisos. Longitud del dintel: 0,75 m.

Fuente: Elaboración propia, 2025

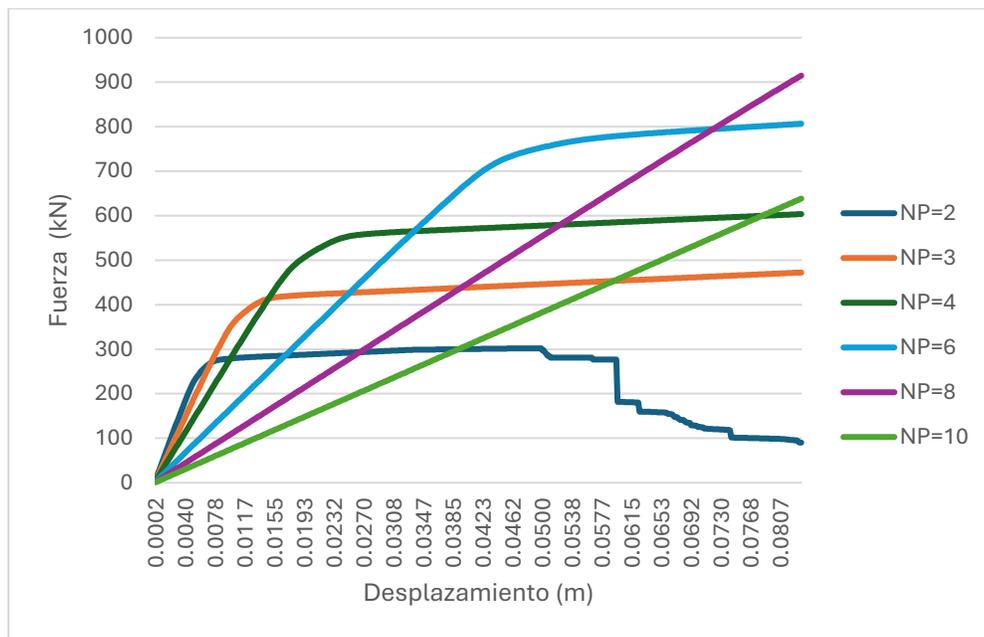


Figura 16. Curvas fuerza-desplazamiento para diferentes números de pisos. Longitud del dintel: 1,00 m.

Fuente: Elaboración propia, 2025

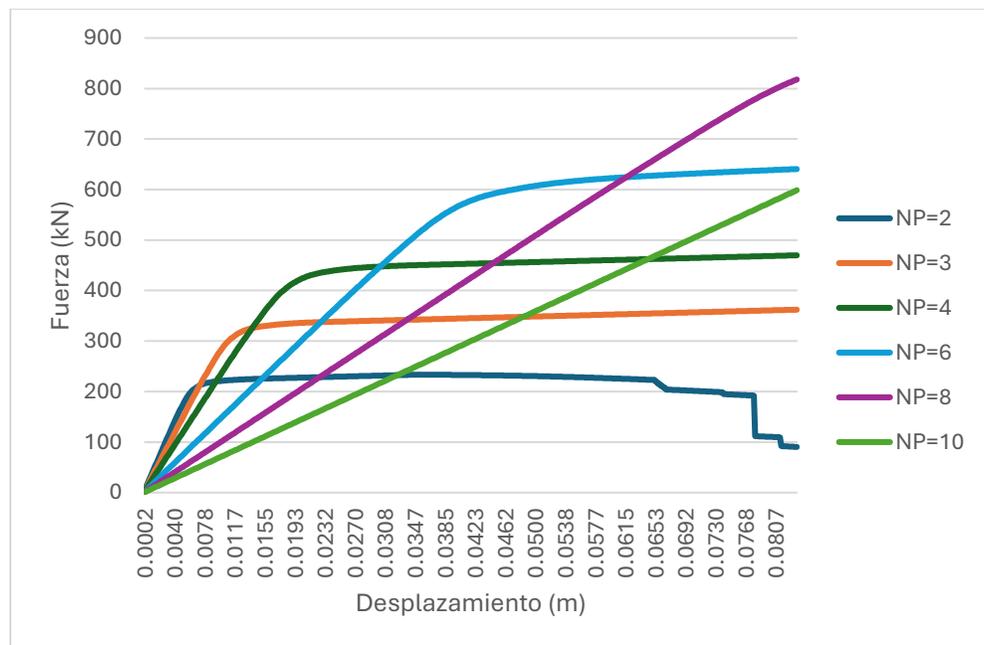


Figura 17. Curvas fuerza-desplazamiento para diferentes números de pisos. Longitud del dintel: 1,25 m.

Fuente: Elaboración propia, 2025

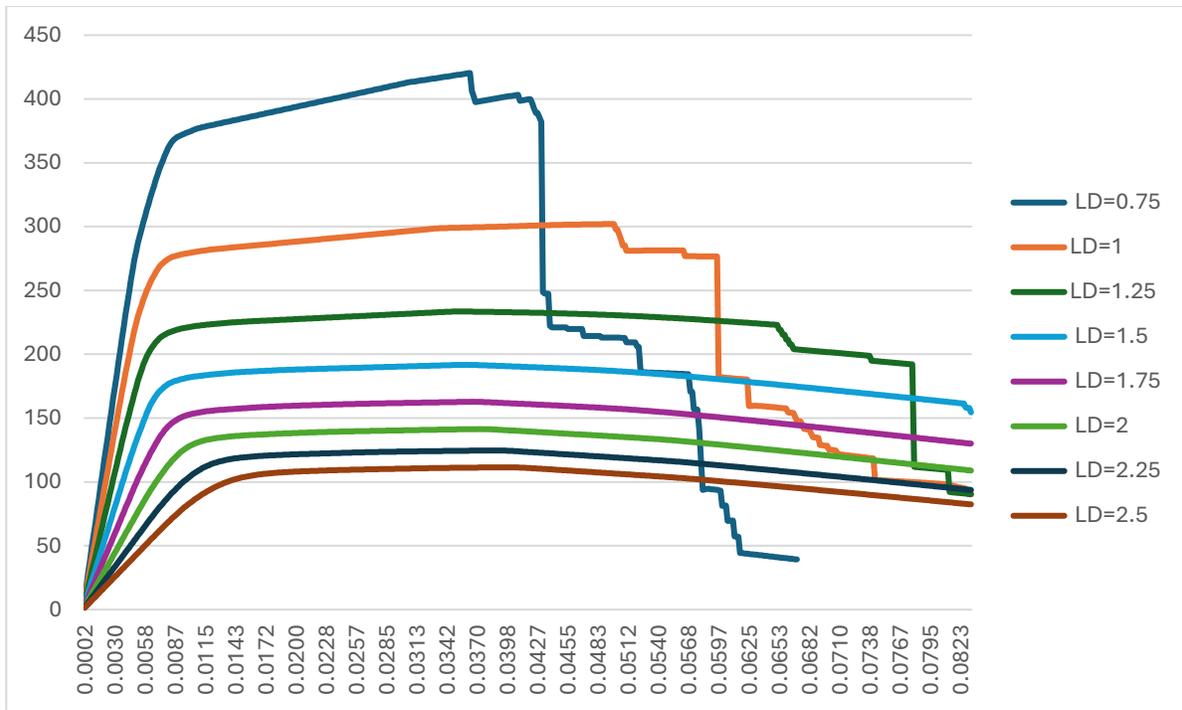
Para longitudes de dintel más reducidas (0,75 m), la respuesta del sistema presenta una mayor rigidez inicial, pero también una pérdida de capacidad más abrupta al superar el punto de máxima carga, especialmente en modelos con  $NP \geq 6$ . En contraste, al aumentar la longitud del dintel a 1,00 m, se logra una mejor disipación de energía y un retardo en la degradación de resistencia, lo que indica un mejor desempeño global ante cargas laterales.

Estas observaciones permiten concluir que tanto el número de pisos como la longitud del dintel son parámetros clave en el diseño de sistemas acoplados de CLT con acero, y su adecuada combinación puede mejorar significativamente el comportamiento estructural frente a acciones sísmicas.

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis complementario en el cual se mantuvo constante el número de pisos (NP) y se variaron las longitudes del dintel de acero. Este enfoque permitió estudiar de forma aislada el efecto del largo del elemento de acoplamiento sobre la respuesta estructural del sistema.

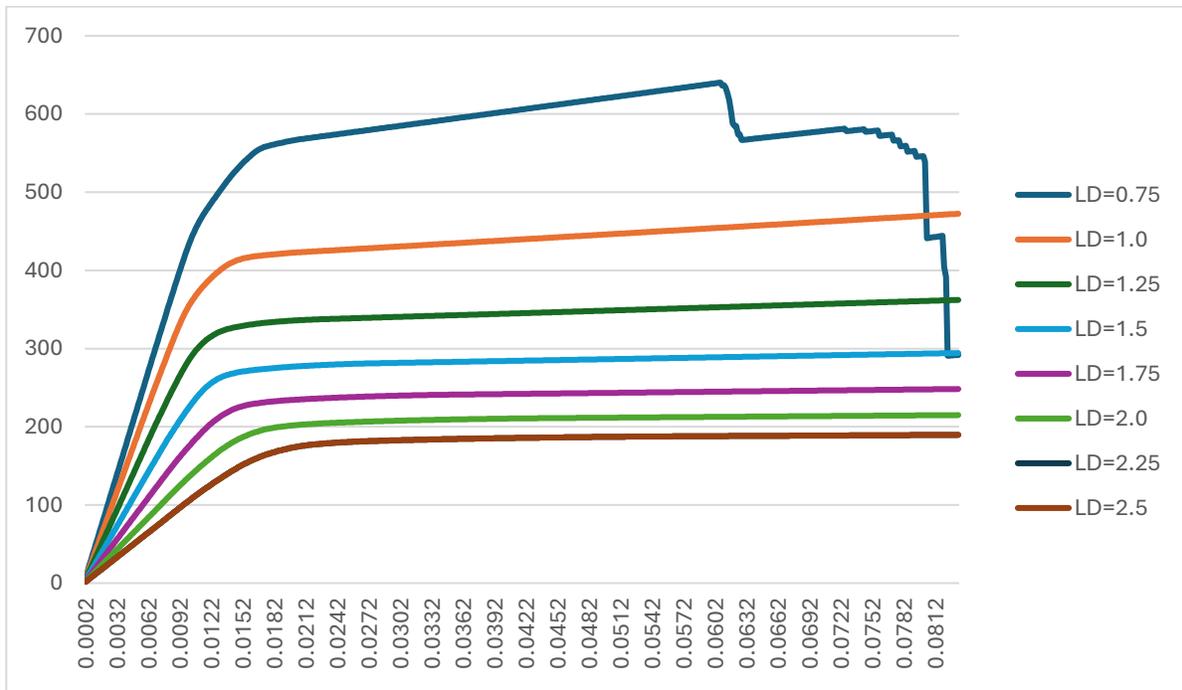
Para cada valor de NP seleccionado, se analizaron diferentes configuraciones de dinteles, abarcando longitudes representativas que permitieran observar tendencias claras en el comportamiento. Las curvas fuerza-desplazamiento obtenidas en la Figura 18 y Figura 19 mostraron que a medida que aumenta la longitud del dintel, el sistema presenta una mayor capacidad de redistribución de cargas entre los muros acoplados, lo que se traduce en una mejora de la ductilidad y una reducción en la pérdida repentina de resistencia.

Este análisis refuerza la importancia del diseño adecuado del dintel de conexión, ya que su rigidez y longitud influyen significativamente en la interacción entre los muros y en el desempeño global del sistema frente a cargas laterales.



**Figura 18.** Curvas fuerza-desplazamiento para diferente longitud de dintel, considerando números de pisos 2

Fuente: Elaboración propia, 2025



**Figura 19.** Curvas fuerza-desplazamiento para diferente longitud de dintel, considerando números de pisos 3

Fuente: Elaboración propia, 2025

## CONCLUSIÓN

En el presente trabajo se logró implementar un modelo no lineal de muros de CLT acoplados con dinteles de acero, cumpliendo con los objetivos planteados.

En primer lugar, se desarrolló la modelación numérica de los elementos de muros de CLT en el entorno de OpenSeesPy, utilizando elementos tipo Shell para representar su comportamiento estructural. La calibración del muro se realizó ajustando sus propiedades mecánicas con base al estudio realizado por (Xin et al., 2022), lo que otorga una base confiable para la definición de propiedades elásticas representativas

En cuanto a la calibración del dintel, se revisaron y analizaron estudios con la finalidad de caracterizar correctamente su comportamiento dentro del sistema de acoplamiento. A partir de esta revisión, se definió que elemento adecuado a utilizar bajo la librería de OpenSeesPy fue el element dispBeamColumn que permitió capturar los efectos de no linealidad asociados a la flexión y la interacción con los muros de CLT.

Además, el modelo numérico fue validado por la comparación de resultados experimentales reportado en la literatura de (Moerman, Li, Palermo, Smith, & Lim, 2023), mostrando una buena correlación y confirmando la capacidad del modelo para representar la no linealidad del sistema de CLT-ACERO.

Finalmente, se estudiaron distintas configuraciones del sistema variando la cantidad de piso y la longitud del dintel, para visualizar de mejor forma el desempeño global del sistema.

Los resultados obtenidos en este trabajo son relevantes desde una perspectiva académica como práctica. Desde el punto de vista técnico, la implementación de un modelo no lineal en OpenSeesPy permite simular con mayor realismo el comportamiento de sistemas híbridos de madera ya acero. Este tipo de herramientas es fundamental para la evaluación sísmica de estructuras innovadoras, especialmente en contexto donde se busca aprovechar las ventajas sostenibles del CLT sin comprometer la seguridad estructural.

Este trabajo también abre las puertas a futuras investigaciones que busquen acercarse aun mas a las condiciones reales de una estructura, incorporando aspectos como la respuesta sísmica, el efecto de factores ambientales y un modelo mas detalladas de las conexiones estructurales.

El objetivo general fue alcanzado con éxito mediante la implementación de un modelo no lineal en OpenSeesPy, capaz de representar el comportamiento de muros de CLT acoplados con dinteles de acero. El modelo mostró buenos resultados al compararse con datos experimentales, lo que demuestra su utilidad como herramienta para el análisis y diseño de este tipo de sistemas estructurales, promoviendo el uso de materiales sustentables en la ingeniería actual.

A pesar de los avances logrados, este trabajo presenta algunas limitaciones que se debieran considerar.

Si bien el modelo se desarrolló en un entorno tridimensional (3D) y se utilizaron elementos *shell* para representar los muros, la configuración analizada corresponde a un sistema simplificado compuesto por únicamente dos muros conectados mediante un dintel. No se consideraron elementos adicionales que formarían parte de una estructura real, como losas de entrepiso, muros en dirección ortogonal, diafragmas, o la interacción con otros sistemas estructurales. En investigaciones futuras, sería valioso ampliar el modelo para incluir una representación más completa del sistema estructural de un edificio.

El modelo no considera los efectos de factores ambientales como la temperatura o la humedad, lo cuales puede influir significativamente en el comportamiento del CLT a lo largo del tiempo.

Como línea de investigación, se recomienda realizar análisis sísmicos que incluyan excitaciones reales y múltiples registros sísmicos, con la finalidad de evaluar el desempeño del sistema frente a demandas sísmicas y realizar la comparativa frente a otro software de modelación.

## REFERENCIAS

- Aguilera Aguilera, J. I. (2020). *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE UNA EDIFICACIÓN DE MEDIANA ALTURA EN CLT*. UNIVERSIDAD DEL BIO-BIO.
- Ahmed, D., & Asiz, A. (2017). Structural performance of hybrid multistorey buildings with massive timber-based floor elements loaded under extreme lateral loads. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 5(6), 905–916. <https://doi.org/10.2495/CMEM-V5-N6-905-916>
- Argyroudis, S., & Kaynia, A. M. (2015). Analytical seismic fragility functions for highway and railway embankments and cuts. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(11), 1863–1879. <https://doi.org/10.1002/eqe.2563>
- Badini, L., Ott, S., Aondio, P., & Winter, S. (2022). Seismic strengthening of existing RC buildings with external cross-laminated timber (CLT) walls hosting an integrated energetic and architectural renovation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(11), 5963–6006. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01407-x>
- Benedetti Leonelli, F. P., & Neira Rodríguez, M. A. (2018). *Análisis del comportamiento estructural de una edificación prototipo de mediana altura en base a madera contralaminada* [Memoria (Ingeniero Civil)]. Universidad del Bío-Bío.
- Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G., & Thiel, A. (2016). Cross laminated timber (CLT): overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(3), 331–351. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>
- Buck, D., Wang, X. (Alice), Hagman, O., & Gustafsson, A. (2016). Bending Properties of Cross Laminated Timber (CLT) with a 45° Alternating Layer Configuration. *BioResources*, 11(2). <https://doi.org/10.15376/biores.11.2.4633-4644>
- Carrero, T., Montaña, J., Berwart, S., Santa María, H., & Guindos, P. (2021). Seismic behavior of innovative hybrid CLT-steel shear wall for mid-rise buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(14), 5917–5951. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01204-y>
- CEN/TC 250. (2023). *Second generation of the Eurocodes: what is new?* <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/2nd-generation/second-generation-eurocodes-what-new>
- Forcael, E., Mata, R., González, B., Opazo-Vega, A., García-Alvarado, R., González, M., Núñez, E., & Padilla, J. (2025). Enhanced robotic cross-laminated timber panel assembly process. *Developments in the Built Environment*, 22, 100667. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2025.100667>

- Gavric, I., Fragiacom, M., & Ceccotti, A. (2015). Cyclic Behavior of CLT Wall Systems: Experimental Tests and Analytical Prediction Models. *Journal of Structural Engineering*, 141(11). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001246](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001246)
- Guindos, P. (2019). *Conceptos avanzados del diseño estructural con madera. Parte II: CLT, modelación numérica, diseño anti-incendios y ayudas al cálculo*. Ediciones UC.
- Huang, Z., Jiang, L., Ni, C., & Chen, Z. (2023). The appropriacy of the analytical models for calculating the shear capacity of cross-laminated timber (CLT) under out-of-plane bending. *Journal of Wood Science*, 69(1), 14. <https://doi.org/10.1186/s10086-023-02089-y>
- Illanes Troncoso, J. (2022). *Paneles estructurales estandarizados de CLT : flexibilidad de diseño en sus configuraciones para la integración de nuevos programas de edificios residenciales de mediana altura* [Magister en Arquitectura Sustentable y Energía, Pontificia Universidad Católica de Chile]. <https://doi.org/10.7764/tesisUC/ARQ/63629>
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2020). *Madera laminada encolada transversalmente (CLT) – Requisitos y métodos de ensayo*. .
- Izzi, M., Casagrande, D., Bezzi, S., Pasca, D., Follesa, M., & Tomasi, R. (2018). Seismic behaviour of Cross-Laminated Timber structures: A state-of-the-art review. In *Engineering Structures* (Vol. 170, pp. 42–52). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.060>
- Je Too, R. Y., & Isoda, H. (2023). Seismic Performance of CLT Shear Wall Infilled Hybrid Steel Frames with Concealed Steel Plates and Drift Pin Connections. *Journal of Structural Engineering*, 149(9). <https://doi.org/10.1061/JSENDH.STENG-12074>
- Loss, C., Pacchioli, S., Polastri, A., Casagrande, D., Pozza, L., & Smith, I. (2018). Numerical Study of Alternative Seismic-Resisting Systems for CLT Buildings. *Buildings*, 8(11), 162. <https://doi.org/10.3390/buildings8110162>
- Madera21. (2024). *Edificio HAUT en Ámsterdam: Nuevo estándar para el diseño y la construcción de madera en altura*. <https://www.madera21.cl/blog/2024/04/30/edificio-haut-en-amsterdam-nuevo-estandar-para-el-diseno-y-la-construccion-de-madera-en-altura/>
- Moerman, B., Li, M., Palermo, A., & Liu, A. (2022). Moment-resisting self-drilling dowel connections between steel link beams and CLT for coupled walls. *Structures*, 41, 365–374. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.05.017>
- Moerman, B., Li, M., Palermo, A., Smith, T., & Lim, H. (2024). Cyclic Testing and Repair of Coupled CLT Walls with Steel Link Beams. *Journal of Structural Engineering*, 150(2). <https://doi.org/10.1061/JSENDH.STENG-12498>

- Monsalve Fica, N. Antonio. (2019). *Análisis del desempeño sísmico de estructura de mediana altura en base a madera contra laminada con sistema de aislamiento basal*. Universidad del Bio-Bio.
- Pacchioli, S. (2021). *Cross-laminated timber buildings: numerical analysis of multi-storey structures* [Tesi di dottorato]. Alma Mater Studiorum Università di Bologna.
- Rostampour Haftkhani, A., & Hematabadi, H. (2022). Effect of Layer Arrangement on Bending Strength of Cross-Laminated Timber (CLT) Manufactured from Poplar (*Populus deltoides* L.). *Buildings*, 12(5), 608. <https://doi.org/10.3390/buildings12050608>
- Sánchez-Machado, J. D., Muñoz, F., Moya, R., & Tenorio, C. (2022). Propiedades físico-mecánicas de madera contralaminada CLT fabricados con *Tectona grandis* y *Gmelina arborea*, procedente de plantaciones forestales en Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 19, 44. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/kuru/v19n44/2215-2504-kuru-19-44-29.pdf>
- Sandoli, A., D'Ambra, C., Ceraldi, C., Calderoni, B., & Prota, A. (2021). Sustainable Cross-Laminated Timber Structures in a Seismic Area: Overview and Future Trends. *Applied Sciences*, 11(5), 2078. <https://doi.org/10.3390/app11052078>
- Wilson, A. W., Phillips, A. R., Motter, C. J., Lee, J. Y., & Dolan, J. D. (2021). Seismic loss analysis of buildings with post-tensioned cross-laminated timber walls. *Earthquake Spectra*, 37(1), 324–345. <https://doi.org/10.1177/8755293020944188>
- Xin, Z., Zhang, H., Guan, C., Liu, J., Liu, F., Gong, Y., Li, H., & Shen, Y. (2022). Determining elastic constants of full-size cross laminated timber panel supported on four nodes using a vibration method. *Construction and Building Materials*, 323, 126513. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126513>
- Zong, C., Zhai, J., Sun, X., Liu, X., Cheng, X., & Wang, S. (2024). Analysis of Seismic Responses and Vibration Serviceability in a High-Rise Timber–Concrete Hybrid Building. *Buildings*, 14(9), 2614. <https://doi.org/10.3390/buildings14092614>

## ANEXO

```
%pip install openseespy
%pip install opsvis
```

m = 1

kg = 1

```

s = 1
# Otras Unidades
mm = 0.001*m
cm = 0.01*m
N = 1*kg*m/s**2
kgf = 9.81*N
tonf = 1000*kgf
ton= 1000*kg
Pa = N/m**2
MPa = 10**6*Pa
inch = 2.54*cm
ft = 12*inch
ksi = 6894757.2932*Pa
kip = ksi*inch**2
psi = 6894.76*Pa
# Constantes Físicas
g = 9.81*m/s**2

from pickle import EMPTY_SET
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import openseespy.opensees as ops
import opsviz as opsv

## Inicialización del modelo
ops.wipe()
ops.model('basic', '-ndm', 3, '-ndf', 6)

# Conversión de las propiedades del material a unidades compatibles en kPa

r= 2.5          #Factor de calibracion modelo
Ex = 11300 * r * 0.85 * MPa # Módulo de elasticidad en dirección 1 en kgf/cm2
Ey = 520 * r * 0.85 * MPa  # Módulo de elasticidad en dirección 2 en kgf/cm2
Ez = 520 * r * 0.85 * MPa  # Módulo de elasticidad en dirección 3 en kgf/cm2
(aproximación para CLT)

nu_xy = 0.35 # Coeficiente de Poisson entre las direcciones 1 y 2
nu_yz = 0.35 # Coeficiente de Poisson entre las direcciones 1 y 3 (se puede ajustar
según datos experimentales)
nu_zx = 0.35 # Coeficiente de Poisson entre las direcciones 2 y 3 (aproximación)

```

```

# Cálculo de los módulos de corte en los tres planos principales
Gxy = 300 * 0.85 * MPa # Módulo de corte en el plano 1-2
Gyz = 130 * 0.85 # Módulo de corte en el plano 1-3
Gzx = 130 * 0.85 * MPa # Módulo de corte en el plano 2-3

densidad = 484 *kg/m**3
# Material para las placas
matTagH = 1
ops.nDMaterial('ElasticOrthotropic', matTagH, Ex, Ey, Ez, nu_xy, nu_yz, nu_zx, Gxy, Gyz,
Gzx, densidad)
# ## Materiales y secciones
matTagM=2
ops.nDMaterial('PlateFromPlaneStress' , matTagM, matTagH, Ez )

# Espesor de la placa
# Np = 1 #Numero de pisos
espesor = 0.205 * m # Espesor de la placa (en las unidades del modelo)
nLayers = 5 # Número de capas
thickness_per_layer = espesor / nLayers # Espesor de cada capa

# Crear una sección LayeredShell con capas usando nDMaterial
sectag= 1
ops.section('LayeredShell', sectag, nLayers,
            matTagM , thickness_per_layer,
            matTagM , thickness_per_layer,
            matTagM , thickness_per_layer,
            matTagM , thickness_per_layer,
            matTagM , thickness_per_layer)

Np = 10 # Numero de pisos
Hpiso = 3 * m # Altura entre piso      ###Altura 6.6m

Lx = 2 * m # Longitud en X Muro
Ly = Np * Hpiso # Longitud en Y Muro
# Dimensiones de la malla
Mesh_sizeX = 0.5 * m # Tamaño del elemento
Mesh_sizeY = 0.5 * m # Tamaño del elemento
Nx = int(Lx / Mesh_sizeX) # Número de elementos en X
Ny = int(Ly / Mesh_sizeY) # Número de elementos en Y

```

```

dx = Lx / Nx
dy = Ly / Ny

# Agregar masa a los nodos
# Parámetros
volumen_estructura = Lx * Ly * espesor # Volumen de la estructura (ajustar si es
diferente)
peso_estructura = densidad * volumen_estructura * g # Peso total de la estructura

# Calcular masa por nodo
total_nodos = (Nx + 1) * (Ny + 1) # Número total de nodos
masa_por_nodo = peso_estructura / (g * total_nodos) # Masa por nodo

# Desplazamiento del segundo muro en X
# Ld = 0.75 * m # Largo Dintel original
Ld = 1.25 * m # Largo Dintel original
offset_x = Lx + Ld # Espacio entre los muros

# Crear nodos para los elementos SHELL
nodos = {} # Diccionario para almacenar nodos creados
nodosbase1=[]
for j in range(Ny + 1):
    piso = min(j // (Ny // Np) + 1, Np) # Determinar el nivel del nodo correctamente
    for i in range(Nx + 1):
        x = i * dx
        y = j * dy
        tag = piso * 10000 + i * 100 + j # Generar tag único por nivel, X e Y
        if y==0:
            nodosbase1.append(tag)
            ops.node(tag, x, y, 0)
            ops.mass(tag, masa_por_nodo, masa_por_nodo, masa_por_nodo, 0, 0, 0)
            nodos[(piso, i, j)] = tag # Guardar nodo en el diccionario

# Crear nodos para el segundo muro desplazado
nodos_2 = {}
nodosbase2=[]
for j in range(Ny + 1):
    piso = min(j // (Ny // Np) + 1, Np)
    for i in range(Nx + 1):
        x = i * dx + offset_x # Desplazamiento en X

```

```

y = j * dy
tag = piso * 10000 + i * 100 + j + 500000 # Evitar colisión con muro principal
if y==0:
    nodosbase2.append(tag)
    ops.node(tag, x, y, 0)
    ops.mass(tag, masa_por_nodo, masa_por_nodo, masa_por_nodo, 0, 0, 0)
    nodos_2[(piso, i, j)] = tag

```

# Crear elementos SHELL para el primer muro

```

element_id = 1

```

```

for j in range(Ny):

```

```

    piso_actual = min(j // (Ny // Np) + 1, Np)

```

```

    piso_superior = min(piso_actual + 1, Np)

```

```

    for i in range(Nx):

```

```

        if (piso_actual, i, j) in nodos and (piso_actual, i+1, j) in nodos and (piso_actual, i, j+1)
in nodos and (piso_actual, i+1, j+1) in nodos:

```

```

            n1 = nodos[(piso_actual, i, j)]

```

```

            n2 = nodos[(piso_actual, i+1, j)]

```

```

            n4 = nodos[(piso_actual, i, j+1)]

```

```

            n3 = nodos[(piso_actual, i+1, j+1)]

```

```

            ops.element('ShellNLDKGQ', element_id, n1, n2, n3, n4, sectag)

```

```

            element_id += 1

```

# Conectar entre pisos en el primer muro

```

if piso_actual < Np and (piso_superior, i, j+1) in nodos and (piso_superior, i+1, j+1)
in nodos:

```

```

    n1 = nodos[(piso_actual, i, j)]

```

```

    n2 = nodos[(piso_actual, i+1, j)]

```

```

    n4 = nodos[(piso_superior, i, j+1)]

```

```

    n3 = nodos[(piso_superior, i+1, j+1)]

```

```

    ops.element('ShellNLDKGQ', element_id, n1, n2, n3, n4, sectag)

```

```

    element_id += 1

```

# Crear elementos SHELL para el segundo muro

```

element_id_2 = element_id

```

```

for j in range(Ny):

```

```

    piso_actual = min(j // (Ny // Np) + 1, Np)

```

```

    piso_superior = min(piso_actual + 1, Np)

```

```

    for i in range(Nx):

```

```

if (piso_actual, i, j) in nodos_2 and (piso_actual, i+1, j) in nodos_2 and (piso_actual,
i, j+1) in nodos_2 and (piso_actual, i+1, j+1) in nodos_2:
    n1 = nodos_2[(piso_actual, i, j)]
    n2 = nodos_2[(piso_actual, i+1, j)]
    n4 = nodos_2[(piso_actual, i, j+1)]
    n3 = nodos_2[(piso_actual, i+1, j+1)]
    ops.element('ShellINLDKGQ', element_id_2, n1, n2, n3, n4, sectag)
    element_id_2 += 1

```

```

# Conectar entre pisos en el segundo muro

```

```

if piso_actual < Np and (piso_superior, i, j+1) in nodos_2 and (piso_superior, i+1, j+1)
in nodos_2:
    n1 = nodos_2[(piso_actual, i, j)]
    n2 = nodos_2[(piso_actual, i+1, j)]
    n4 = nodos_2[(piso_superior, i, j+1)]
    n3 = nodos_2[(piso_superior, i+1, j+1)]
    ops.element('ShellINLDKGQ', element_id_2, n1, n2, n3, n4, sectag)
    element_id_2 += 1

```

```

# Definir material de acero

```

```

Fy = 300 * MPa # Límite de fluencia del acero 200MPa
E_steel = 200000 * MPa # Módulo de elasticidad del acero
G_steel = E_steel / (2 * (1.3)) # Módulo de corte (G = E / (2(1+v))), usando v ≈ 0.3)
b = 0.005 # Factor de endurecimiento (postfluencia/elastica)
# b = 0.001 # Factor de endurecimiento (postfluencia/elastica)

```

```

A_dintel = 23.18 * cm**2 # Área de la sección transversal en m²
# Iy_dintel = 1582 * cm**4 # Momento de inercia en el eje Y en m⁴ real
Iy_dintel = 2040 * cm**4 # Momento de inercia en el eje Y en m⁴
Iz_dintel = 113.6 * cm**4 # Momento de inercia en el eje Z en m⁴ 142cm²
# Iz_dintel = 113.6 * cm**4 # Momento de inercia en el eje Z en m⁴ 142cm²
J_dintel = 2290 * cm ** 4 # Momento polar de inercia en m⁴

```

```

# Parámetros del modelo de endurecimiento cinemático

```

```

R0 = 18
cR1 = 0.925
cR2 = 0.15

```

```

matTagSteel = 2323

```

```

ops.uniaxialMaterial('Steel02', matTagSteel, Fy, E_steel, b, R0,cR1,cR2 , 0, 1, 0, 1, 0)

```

```

# Definir el material MinMax con Steel02
matTagMinMax = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
minStrain = -0.08 # Deformación máxima en compresión (-5%)
maxStrain = 0.08 # Deformación máxima en tracción (+5%)

ops.uniaxialMaterial('MinMax', matTagMinMax, matTagSteel, '-min', minStrain, '-max',
maxStrain)

# Definir transformación de coordenadas (lineal)
geomTransfID = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
# ops.geomTransf('Linear', geomTransfID, 0, 1, 0)
ops.geomTransf('Linear', geomTransfID, 0, 1, 0)

# Definir integración de sección para elementos tipo beam-column
bf= 99 * mm
tf= 7 * mm
d= 198 * mm
tw= 4.5* mm
nf=5
nw=5
sectionTag= max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
numIntgrPts = 5
beamIntID=1111111

fib_sec_1 = [['section', 'Fiber', sectionTag, '-torsion', matTagSteel],
             ['patch','quad',sectionTag,nf,nw,bf/2,d/2,-bf/2,d/2,-bf/2,(d/2)-tf,bf/2,(d/2)-tf], #
noqa: DEFINIDOS EN SENTIDO ANTI HORARIO
             ['patch','quad',sectionTag,nf,nw,bf/2,-d/2,bf/2,-d/2+tf,-bf/2,-(d/2)+tf,-bf/2,-(d/2)], #
noqa: E501
             ['patch','quad',sectionTag,nf,nw,tw/2,d/2-tf,-tw/2,d/2-tf,-tw/2,-d/2+tf,tw/2,-d/2+tf] #
noqa: E501
            ]

opsv.fib_sec_list_to_cmds(fib_sec_1)
ops.beamIntegration('Lobatto', beamIntID, sectionTag, numIntgrPts) # 5 puntos de
integración para elementos beam-column
# matcolor = ['r', 'lightgrey', 'gold', 'w', 'w', 'w']
# opsv.plot_fiber_section(fib_sec_1, 1,matcolor=matcolor)
# plt.axis('equal')

```

```

## plt.savefig('fibsec_rc.png')
# plt.show()

# Definir material de acero
Fy = 300 * MPa # Límite de fluencia del acero 200MPa
E_steel = 200000 * MPa # Módulo de elasticidad del acero
G_steel = E_steel / (2 * (1.3)) # Módulo de corte (G = E / (2(1+v))), usando v ≈ 0.3)
b = 0.005 # Factor de endurecimiento (postfluencia/elastica)
# b = 0.001 # Factor de endurecimiento (postfluencia/elastica)

A_dintel = 23.18 * cm**2 # Área de la sección transversal en m²
# Iy_dintel = 1582 * cm**4 # Momento de inercia en el eje Y en m⁴ real
Iy_dintel = 2040 * cm**4 # Momento de inercia en el eje Y en m⁴
Iz_dintel = 113.6 * cm**4 # Momento de inercia en el eje Z en m⁴ 142cm²
# Iz_dintel = 113.6 * cm**4 # Momento de inercia en el eje Z en m⁴ 142cm²
J_dintel = 2290 * cm ** 4 # Momento polar de inercia en m⁴

# Parámetros del modelo de endurecimiento cinemático
R0 = 18
cR1 = 0.925
cR2 = 0.15

matTagSteel = 2323
ops.uniaxialMaterial('Steel02', matTagSteel, Fy, E_steel, b, R0,cR1,cR2 , 0, 1, 0, 1, 0)

# Definir el material MinMax con Steel02
matTagMinMax = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
minStrain = -0.08 # Deformación máxima en compresión (-5%)
maxStrain = 0.08 # Deformación máxima en tracción (+5%)

ops.uniaxialMaterial('MinMax', matTagMinMax, matTagSteel, '-min', minStrain, '-max',
maxStrain)

# Definir transformación de coordenadas (lineal)
geomTransfID = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
# ops.geomTransf('Linear', geomTransfID, 0, 1, 0)
ops.geomTransf('Linear', geomTransfID, 0, 1, 0)

# Definir integración de sección para elementos tipo beam-column
bf= 99 * mm

```

```

tf= 7 * mm
d= 198 * mm
tw= 4.5* mm
nf=5
nw=5
sectionTag= max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
numIntgrPts = 5
beamIntID=1111111

fib_sec_1 = [['section', 'Fiber', sectionTag, '-torsion', matTagSteel],
             ['patch','quad',sectionTag,nf,nw,bf/2,d/2,-bf/2,d/2,-bf/2,(d/2)-tf,bf/2,(d/2)-tf], #
noqa: DEFINIDOS EN SENTIDO ANTI HORARIO
             ['patch','quad',sectionTag,nf,nw,bf/2,-d/2,bf/2,-d/2+tf,-bf/2,-(d/2)+tf,-bf/2,-(d/2)], #
noqa: E501
             ['patch','quad',sectionTag,nf,nw,tw/2,d/2-tf,-tw/2,d/2-tf,-tw/2,-d/2+tf,tw/2,-d/2+tf] #
noqa: E501
             ]

opsv.fib_sec_list_to_cmds(fib_sec_1)
ops.beamIntegration('Lobatto', beamIntID, sectionTag, numIntgrPts) # 5 puntos de
integración para elementos beam-column
# matcolor = ['r', 'lightgrey', 'gold', 'w', 'w', 'w']
# opsv.plot_fiber_section(fib_sec_1, 1,matcolor=matcolor)
# plt.axis('equal')
# # plt.savefig('fibsec_rc.png')
# plt.show()

# #Parna NP=2
# node1 = 20406
# node2 = 520006
# node3 = 20412
# node4 = 520012
# ops.fix(node1 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node2 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node3 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node4 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# beamID1 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
# ops.element('dispBeamColumn',beamID1, node1, node2,geomTransfID, beamIntID)
# beamID2 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
# ops.element('dispBeamColumn',beamID2, node3, node4,geomTransfID, beamIntID)

```

```

## Para NP=3

# node1 = 20406
# node2 = 520006
# ops.fix(node1 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node2 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)

# node3 = 30412
# node4 = 530012
# ops.fix(node3 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node4 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)

# node5 = 30418
# node6 = 530018
# ops.fix(node5 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node6 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)

# beamID1 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
# # ops.element('nonlinearBeamColumn', beamID1, node1, node2, numIntgrPts,
sectionTag, geomTransfID)
# ops.element('dispBeamColumn',beamID1, node1, node2,geomTransfID, beamIntID)

# beamID2 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
# # ops.element('nonlinearBeamColumn', beamID2, node3, node4, numIntgrPts,
sectionTag, geomTransfID)
# ops.element('dispBeamColumn',beamID2, node3, node4,geomTransfID, beamIntID)

# beamID3 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
# # ops.element('nonlinearBeamColumn', beamID3, node5, node6, numIntgrPts,
sectionTag, geomTransfID)
# ops.element('dispBeamColumn',beamID3, node5, node6,geomTransfID, beamIntID)

##Parna NP= 4
# node1 = 20406
# node2 = 520006
# node3 = 30412
# node4 = 530012
# node5 = 40418

```

```

# node6 = 540018
# node7 = 40424
# node8 = 540024

# ops.fix(node1 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node2 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node3 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node4 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node5 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node6 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node7 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node8 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)

# beamID1 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
# ops.element('dispBeamColumn',beamID1, node1, node2,geomTransfID, beamIntID)
# beamID2 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
# ops.element('dispBeamColumn',beamID2, node3, node4,geomTransfID, beamIntID)
# beamID3 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
# ops.element('dispBeamColumn',beamID3, node5, node6,geomTransfID, beamIntID)
# beamID4 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
# ops.element('dispBeamColumn',beamID4, node7, node8,geomTransfID, beamIntID)

# #Parna NP=6
# node1 = 20406
# node2 = 520006
# node3 = 30412
# node4 = 530012
# node5 = 40418
# node6 = 540018
# node7 = 50424
# node8 = 550024
# node9 = 60430
# node10 = 560030
# node11 = 60436
# node12 = 560036

# ops.fix(node1 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node2 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node3 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node4 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)

```

```

# ops.fix(node5 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node6 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node7 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node8 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node9 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node10 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node11 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)

# beamID1 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
# ops.element('dispBeamColumn',beamID1, node1, node2,geomTransfID, beamIntID)
# beamID2 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
# ops.element('dispBeamColumn',beamID2, node3, node4,geomTransfID, beamIntID)
# beamID3 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
# ops.element('dispBeamColumn',beamID3, node5, node6,geomTransfID, beamIntID)
# beamID4 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
# ops.element('dispBeamColumn',beamID4, node7, node8,geomTransfID, beamIntID)
# beamID5 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
# ops.element('dispBeamColumn',beamID5, node9, node10,geomTransfID, beamIntID)
# beamID6 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
# ops.element('dispBeamColumn',beamID6, node11, node12,geomTransfID, beamIntID)

# #Parna NP=8
# node1 = 20406
# node2 = 520006
# node3 = 30412
# node4 = 530012
# node5 = 40418
# node6 = 540018
# node7 = 50424
# node8 = 550024
# node9 = 60430
# node10 = 560030
# node11 = 70436
# node12 = 570036
# node13 = 80442
# node14 = 580042
# node15 = 80448
# node16 = 580048

# ops.fix(node1 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)

```

```

# ops.fix(node2 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node3 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node4 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node5 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node6 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node7 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node8 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node9 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node10 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node11 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node12 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node13 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node14 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node15 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)
# ops.fix(node16 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)

# beamID1 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
# ops.element('dispBeamColumn',beamID1, node1, node2,geomTransfID, beamIntID)
# beamID2 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
# ops.element('dispBeamColumn',beamID2, node3, node4,geomTransfID, beamIntID)
# beamID3 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
# ops.element('dispBeamColumn',beamID3, node5, node6,geomTransfID, beamIntID)
# beamID4 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
# ops.element('dispBeamColumn',beamID4, node7, node8,geomTransfID, beamIntID)
# beamID5 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
# ops.element('dispBeamColumn',beamID5, node9, node10,geomTransfID, beamIntID)
# beamID6 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
# ops.element('dispBeamColumn',beamID6, node11, node12,geomTransfID, beamIntID)
# beamID7 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
# ops.element('dispBeamColumn',beamID7, node13, node14,geomTransfID, beamIntID)
# beamID8 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
# ops.element('dispBeamColumn',beamID8, node15, node16,geomTransfID, beamIntID)

#Parna NP=10
node1 = 20406
node2 = 520006
node3 = 30412
node4 = 530012
node5 = 40418
node6 = 540018

```

node7 = 50424  
node8 = 550024  
node9 = 60430  
node10 = 560030  
node11 = 70436  
node12 = 570036  
node13 = 80442  
node14 = 580042  
node15 = 90448  
node16 = 590048  
node17 = 100454  
node18 = 600054  
node19 = 100460  
node20 = 600060

ops.fix(node1 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)  
ops.fix(node2 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)  
ops.fix(node3 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)  
ops.fix(node4 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)  
ops.fix(node5 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)  
ops.fix(node6 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)  
ops.fix(node7 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)  
ops.fix(node8 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)  
ops.fix(node9 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)  
ops.fix(node10 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)  
ops.fix(node11 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)  
ops.fix(node12 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)  
ops.fix(node13 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)  
ops.fix(node14 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)  
ops.fix(node15 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)  
ops.fix(node16 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)  
ops.fix(node17 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)  
ops.fix(node18 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)  
ops.fix(node19 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)  
ops.fix(node20 , 0, 0, 0, 1, 1, 1)

beamID1 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1  
ops.element('dispBeamColumn',beamID1, node1, node2,geomTransfID, beamIntID)  
beamID2 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1  
ops.element('dispBeamColumn',beamID2, node3, node4,geomTransfID, beamIntID)

```

beamID3 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
ops.element('dispBeamColumn',beamID3, node5, node6,geomTransfID, beamIntID)
beamID4 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
ops.element('dispBeamColumn',beamID4, node7, node8,geomTransfID, beamIntID)
beamID5 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
ops.element('dispBeamColumn',beamID5, node9, node10,geomTransfID, beamIntID)
beamID6 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
ops.element('dispBeamColumn',beamID6, node11, node12,geomTransfID, beamIntID)
beamID7 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
ops.element('dispBeamColumn',beamID7, node13, node14,geomTransfID, beamIntID)
beamID8 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
ops.element('dispBeamColumn',beamID8, node15, node16,geomTransfID, beamIntID)
beamID9 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
ops.element('dispBeamColumn',beamID9, node17, node18,geomTransfID, beamIntID)
beamID10 = max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
ops.element('dispBeamColumn',beamID10, node19, node20,geomTransfID, beamIntID)

```

```
# ##### CONSIDERANDO ZERO LENGTH EN X E Y
```

```

# Crear nodos superpuestos en la base del muro SOLO para los nodos externos
nodos_superpuestos = {}
mat_tags_global = set() # Conjunto para almacenar etiquetas de materiales ya creados
nododuplicado1=[]
nododuplicado2=[]
Nodosrestringidos=[]

```

```

# Crear los materiales base para Parallel solo si no han sido creados
ptoflu = 0.0008
lr=1.9286*(10*15) * N/m
fir =lr* ptoflu
mat_id= max(ops.getEleTags(), default=0) + 1
ops.uniaxialMaterial('ElasticBilin', mat_id, lr, 0.01*lr, 0.00056868) # Calibrado Y
zerolength base

```

```

matXID=95976980
ops.uniaxialMaterial('Elastic', matXID, 8.0286*(10**12) * N/m ) # Calibrado x zerolength
base

```

```

zerolengthList=[]
zeroLengthID1=max(ops.getEleTags(), default=0) + 1

```

```

for i in nodosbase1:
    x,y,z= ops.nodeCoord(i)
    if x==0 or x==Lx:
        tagduplicado=int(100000000)+i
        nododuplicado1.append(tagduplicado)
        ops.node(tagduplicado,x,y,0)
        ops.fix(tagduplicado,1,1,1,1,1,1)
        Nodosrestringidos.append(tagduplicado)
        ops.equalDOF(tagduplicado, i, 3, 4, 5, 6)
        ops.element('zeroLength', zeroLengthID1, tagduplicado, i, '-mat', matXID, mat_id, '-dir',
1, 2)
        zerolengthList.append(zeroLengthID1)
        zeroLengthID1+=1
    else:
        tagduplicado=int(100000000)+i
        nododuplicado1.append(tagduplicado)
        ops.node(tagduplicado,x,y,0)
        ops.fix(tagduplicado,1,1,1,1,1,1)
        ops.fix(i,1,1,1,1,1,1)
        ops.equalDOF(tagduplicado, i, 2,3, 4, 5, 6)
        ops.element('zeroLength', zeroLengthID1, tagduplicado, i, '-mat', matXID, '-dir', 1)
        zerolengthList.append(zeroLengthID1)
        zeroLengthID1+=1

for i in nodosbase2:
    x,y,z = ops.nodeCoord(i)
    if x==offset_x or x==Lx+offset_x:
        tagduplicado=int(100000000)+i
        nododuplicado2.append(tagduplicado)
        ops.node(tagduplicado,x,y,0)
        ops.fix(tagduplicado,1,1,1,1,1,1)
        Nodosrestringidos.append(tagduplicado)
        ops.equalDOF(tagduplicado, i, 3, 4, 5, 6)
        ops.element('zeroLength', zeroLengthID1, tagduplicado, i, '-mat', matXID, mat_id , '-
dir', 1, 2)
        zerolengthList.append(zeroLengthID1)
        zeroLengthID1+=1
    else:
        tagduplicado=int(100000)+i
        nododuplicado2.append(tagduplicado)

```

```

ops.node(tagduplicado,x,y,0)
ops.fix(tagduplicado,1,1,1,1,1,1)
ops.fix(i,1,1,1,1,1,1)
ops.equalDOF(tagduplicado, i, 2, 3, 4, 5, 6)
ops.element('zeroLength', zeroLengthID1, tagduplicado, i, '-mat', matXID, '-dir', 1)
zerolengthList.append(zeroLengthID1)
zeroLengthID1+=1

print(nododuplicado1,nododuplicado2, Nodosrestringidos)

# Aplicar restricciones en el eje Z a todos los nodos excepto los de la base
for piso, i, j in nodos.keys():
    if j > 0:
        ops.fix(nodos[(piso, i, j)], 0, 0, 1, 0, 0, 0) # Restringir solo en Z
for piso, i, j in nodos_2.keys():
    if j > 0:
        ops.fix(nodos_2[(piso, i, j)], 0, 0, 1, 0, 0, 0)

## Aplicar restricciones a los nodos de la base
# for i in range(Nx + 1):
#     ops.fix(nodos[(1, i, 0)], 1, 1, 1, 0, 0, 1) # Base del primer muro
#     ops.fix(nodos_2[(1, i, 0)], 1, 1, 1, 0, 0, 1) # Base del segundo muro

#### Restriccion de los nodos superpuestos en la base
## Aplicar restricciones a los nodos superpuestos en la base
# for key, nodo_id in nodos_superpuestos.items():
#     ops.fix(nodo_id, 1, 1, 1, 1, 1, 1) # Restringe en X, Y, Z, permite rotación en X, Y y
# restringe en Z

#     print(f" Nodo {nodo_id} restringido con fix(1,1,1,0,0,1)")

#####
#####
print(f'Volumen estructura: {volumen_estructura} m3')
print(f'Peso estructura: {peso_estructura}')
print(f'Total de nodos: {total_nodos}')
print(f'Masa por nodo: {masa_por_nodo}')
opsv.plot_model(node_labels=1, element_labels=1, fig_wi_he=(100, 100), az_el=(-90,
90))

```

```

# ◆ Reiniciar el análisis antes de comenzar
ops.wipeAnalysis()

# ◆ Parámetros del Análisis Pushover
IDctrlDOF = 1 # Dirección del desplazamiento (X)
Dincr_steps = 0.001 # Incremento de desplazamiento
Despl_max = 0.5 * m #Desplazamiento maximo
Numbersteps=int(Despl_max/Dincr_steps)
# base_nodes =[10100, 10200, 10300, 510100, 510200, 510300]

# ◆ Definir carga estructural base (ajustar según modelo)
pest = peso_estructura # 🔥 Ajustar este valor según la estructura

# ◆ Definir la carga lateral en OpenSees
ops.timeSeries('Linear', 200)
ops.pattern('Plain', 200, 200)

# ops.load(20012, 3/3 , 0, 0, 0, 0, 0) #PARA NP=2
# ops.load(30018, 3/3 , 0, 0, 0, 0, 0) #PARA NP=3
# ops.load(40024, 3/3 , 0, 0, 0, 0, 0) #PARA NP=4
# ops.load(60036, 3/3 , 0, 0, 0, 0, 0) #PARA NP=6
# ops.load(80048, 3/3 , 0, 0, 0, 0, 0) #PARA NP=8
ops.load(100060, 3/3 , 0, 0, 0, 0, 0) #PARA NP=10

# nodectrl= 520212 # Para NP 2
# nodectrl= 530218 # Para NP 3
# nodectrl= 540224 # Para NP 4
# nodectrl= 560236 # Para NP 6
# nodectrl= 580248 # Para NP 8
nodectrl= 600260 # Para NP 8

# ◆ Configurar el análisis antes de la ejecución
ops.system('BandGeneral')
ops.constraints('Transformation')
ops.numberer('RCM')
ops.test('NormDisplIncr', 1e-5, 1000, 0, 2)
ops.algorithm('ModifiedNewton')

```

```
ops.integrator('DisplacementControl', nodectrl, IDctrlDOF, Dincr_steps)
ops.analysis('Static')
```

```
# ◆ Ejecutar el análisis pushover
```

```
D, V = [], []
```

```
V3=[]
```

```
for step in range(Numbersteps):
```

```
    currentDisp = ops.nodeDisp(nodectrl, IDctrlDOF)
```

```
    if currentDisp >= Despl_max:
```

```
        print(f"✅ Se alcanzó el desplazamiento máximo de {Despl_max} m en el paso {step}")
```

```
        break # 🛑 Detener el análisis si se supera el límite
```

```
if ops.analyze(1) != 0:
```

```
    ops.algorithm('Newton', '-initial')
```

```
if ops.analyze(1) != 0:
```

```
    ops.algorithm('BFGS')
```

```
if ops.analyze(1) != 0:
```

```
    print(f"⚠️ Fallo en la convergencia en el paso {step}")
```

```
    break
```

```
# Capturar desplazamiento y fuerza base
```

```
currentDisp = ops.nodeDisp(nodectrl, IDctrlDOF)
```

```
D.append(currentDisp/6)
```

```
    base_force3 = ops.eleForce(beamID1,2)+ops.eleForce(beamID2,2)
+ops.eleForce(beamID3,2) +ops.eleForce(beamID4,2) +ops.eleForce(beamID5,2)
+ops.eleForce(beamID6,2) +ops.eleForce(beamID7,2) +ops.eleForce(beamID8,2)
+ops.eleForce(beamID9,2) +ops.eleForce(beamID10,2) # for node in Nodosrestringidos:
    V3.append(-base_force3 /1000)
```

```
plt.figure(figsize=(8, 6))
```

```
plt.plot(D, V3, linewidth=2, color='red', marker='o', linestyle='-')
```

```
plt.axhline(0, color='grey', linewidth=1, alpha=0.6)
```

```
plt.axvline(0, color='grey', linewidth=1, alpha=0.6)
```

```
plt.xlabel('Desplazamiento en X en la parte superior (m)')
```

```
plt.ylabel('Fuerza Base (kN)')
```

```
plt.title('Curva Pushover con Distribución Triangular de Cargas')
```

```
plt.grid(True)
```

```
plt.tight_layout()
```

```
plt.savefig('pushover3.png', dpi=300, transparent=True)
```

```

plt.show()

# Todas las curvas juntas
plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.plot(D, V3, linewidth=2, color='green', marker='^', linestyle='-.', label='Fuerza Base
(sum eleForce - beam)')
plt.axhline(0, color='grey', linewidth=1, alpha=0.6)
plt.axvline(0, color='grey', linewidth=1, alpha=0.6)
plt.xlabel('Desplazamiento en X en la parte superior (m)')
plt.ylabel('Fuerza Base (kN)')
plt.title('Comparación de Curvas Pushover con Distribución Triangular de Cargas')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.savefig('pushover.png', dpi=300, transparent=True)
plt.show()

import pandas as pd

# Crear DataFrame con desplazamiento y fuerza en los links (V3)
df_resultados = pd.DataFrame({
    'Desplazamiento (m)': D,
    'Fuerza Links (kN)': V3
})

# Nombre del archivo según un parámetro variable
# Supongamos que estás variando el número de pisos: NP = 6
df_resultados.to_csv(f'NP=10, Ld= 1.25 .csv', index=False)

#Visualizar la deformada
# plt.figure(figsize=(8, 6)) # Ajustar el tamaño de la figura
opsv.plot_defo( fig_wi_he=(60, 30), az_el=(-90, 90)) # Modifica 'scale' según la magnitud
de desplazamientoS
# plt.title("Deformada del Modelo - Pushover")
# plt.show()

```