

## SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN MURO DE CORTE DE MADERA NUMERICAL SIMULATION OF A TIMBER SHEAR WALL

Diego A. García<sup>a,b</sup> y Guido M. Alfonso<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Laboratorio de Ingeniería Civil (LIC), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (FI-UNaM), Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Misiones, Argentina.

<sup>b</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Godoy Cruz 2290, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

**Palabras clave:** Simulación Numérica, Método de los Elementos Finitos, Madera Estructural, Muro de Corte.

**Resumen.** En este trabajo se presenta la simulación numérica mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF) del comportamiento mecánico de un muro de corte de madera. Estos muros tienen el objetivo de conducir las cargas horizontales que actúan sobre las edificaciones a la fundación confiriendo un adecuado grado de rigidez al conjunto. Un muro de corte, en su configuración más común, está compuesto de un bastidor de forma rectangular formado por piezas de madera aserrada al cual se le añade una placa arriostrante, mediante clavos perimetrales y centrales en uno de los lados del bastidor. La simulación numérica se realiza en un código de elementos finitos desarrollado en matlab, comparándose las deformaciones laterales máximas con resultados experimentales reportados por otros autores. El modelo incorpora el comportamiento no lineal de los medios de unión entre placa y bastidor permitiendo analizar la importante influencia que los mismos tienen sobre la deformación final del sistema. La validación del modelo numérico permitirá, en etapas futuras de la investigación, estudiar en detalle el comportamiento de los elementos componentes del sistema estructural para poder plantear alternativas de diseño.

**Keywords:** Numerical Simulation, Finite Element Method, Structural Timber, Shear Wall.

**Abstract.** In this work the numerical simulation through the Finite Element Method (FEM) of the mechanical behavior of a timber shear wall is presented. These walls have the objective to conduce the horizontal loads applied on the buildings to its foundation, conferring an adequate degree of rigidity. A shear wall, in its regular configuration, is composed of a rectangular frame of sawn timber pieces to which a bracing sheathing is added, using nails in one of the sides of the frame. The numerical simulation is carried out in a finite element code developed in matlab, comparing the numerical maximum lateral deformations with experimental results reported by other authors. The model includes the non-linear behavior of the nails that join the sheathing and the frame, allowing to analyze its important influence on the final deformation of the system. The validation of the numerical model will allow, in future stages of the research, to study in detail the behavior of the component elements of the structural system in order to propose design alternatives.

## 1. INTRODUCCIÓN

En Argentina, la madera es un material de construcción utilizado desde hace muchos años, particularmente en la actualidad es una tendencia que ha tomado fuerza debido a sus ventajas constructivas, ecológicas, económicas y estéticas. El sistema constructivo en madera de mayor difusión en nuestra región es el denominado de entramado ligero, en el cual, a partir de un bastidor de madera y un sistema de capas, con distintas finalidades (sostén estructural, aislación, arriostramiento, etc.) se obtienen paneles que pueden utilizarse en la ejecución de las paredes de las edificaciones. Los elementos básicos de estos paneles son: una estructura resistente o bastidor, una cubierta la cual puede ser de machimbre o placas de terminación, placas contrachapadas (plywood) o tableros de virutas orientadas (Oriented Strand Board, OSB) que confieren arriostramiento, una aislación hidráulica, una aislación térmica y un revestimiento interior (Guindos, 2019a). Este sistema constructivo es uno de los más utilizados en los países productores de madera, como Canadá y Estados Unidos entre otros. Dentro de sus atributos se encuentran la prefabricación, velocidad de construcción, eficiencia energética y en general su versatilidad ayuda a potenciar soluciones sustentables con el medio ambiente. Uno de los problemas que deben enfrentar los ingenieros cuando desarrollan sus proyectos, es saber aplicar correctamente todas las variables que se involucran en un muro de corte tales como la cantidad de montantes, el tipo y espaciamiento de clavos, sistema de anclaje, tipo y espesor de placa a utilizar, etc.

Los muros de corte constituyen una parte fundamental del sistema resistente de las construcciones ante la acción de las cargas horizontales generadas por los movimientos sísmicos y la acción del viento (Guindos, 2019b). Tradicionalmente están compuestos por un bastidor con piezas verticales denominadas montantes y de piezas horizontales denominadas soleras formando un bastidor. Además, se incluyen sistemas de anclajes, siendo el más común el denominado *hold down*, los cuales se colocan en las esquinas para prevenir el volcamiento. Al bastidor se le proporciona resistencia lateral mediante tableros estructurales colocados, generalmente, en un lado del muro, unidos al marco de madera a través de clavos. En nuestro país, recientemente, en Ramos et al. (2021) y Ramos et al. (2024) se reportan resultados de ensayos experimentales de descuadre realizados según los lineamientos de la norma UNE-EN 594. En dicho ensayo se evalúa la capacidad del muro ante la acción de fuerzas horizontales, obteniéndose las deformaciones de distintos puntos del muro ante la acción de cargas aplicadas sobre la solera superior. El modelado numérico de estos elementos para su posterior aplicación en estructuras más complejas ó el análisis estructural detallado del comportamiento de los mismos, constituye una herramienta de importancia para el desarrollo del sistema constructivo. En Dolan (1989) se presenta un modelo numérico completo de un muro de corte de madera sometido a cargas dinámicas, validando el mismo con resultados experimentales. Luego, en Dolan y Madsen (1992) se presenta el estudio en detalle de las uniones clavadas entre el bastidor y la placa arriostrante, se reportan resultados experimentales los cuales son luego ajustados con una expresión matemática que representa el comportamiento no lineal carga-deformación, la misma es muy conocida y utilizada en trabajos relacionados a la simulación numérica. En Estrella et al. (2020) se presenta un modelo numérico validado con resultados experimentales de muros de corte reforzados que cuentan con montantes extremos formados por dos o más piezas. En este último trabajo se utiliza el modelo de Dolan y Madsen (1992) para la unión del tablero al bastidor, mientras que el anclaje se representa con un modelo con comportamiento lineal. Esto se debe a que la principal fuente de no linealidad en el sistema se presenta en estas uniones realizadas con elementos de menor rigidez. En Loo et al. (2012) se aplican varios modelos de comportamiento de

la uniones a un modelo reducido que simula la respuesta de muros de corte ante cargas estáticas y dinámicas.

En este trabajo se presenta la simulación numérica, mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF) (Reddy, 1993), de un muro de corte frente a la acción de cargas horizontales. El modelo se implementa en el software Matlab (2017) tomando de base los datos del ensayo experimental reportado en Ramos et al. (2021). Se evalúan los resultados de dos modelos utilizados para la simulación de la unión entre tablero y bastidor, un modelo lineal con un valor de rigidez obtenido a partir de los lineamientos de la normativa de cálculo estructural (Argüelles et al., 2013) y el modelo de comportamiento no lineal presentado en Dolan y Madsen (1992). Se presenta la comparación entre las deformaciones máximas obtenidas numéricamente con las reportadas en el trabajo de referencia. Se estudia la influencia de la variación de la rigidez en las uniones entre placa arriostrante y bastidor, siendo la misma una de las principales componentes de la deformación final (Moroder, 2016). La validación del modelo numérico permitirá, en etapas futuras de la investigación, estudiar en detalle el comportamiento de los elementos componentes del muro de corte para así poder plantear alternativas de diseño mediante procesos de optimización.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El muro de corte utilizado en el sistema constructivo de entramado ligero, constituye un elemento estructural, en el cual todas sus partes componentes aportan a la rigidez y resistencia tanto lateral como vertical (Guindos, 2019a). En la Fig. 1 se presenta el esquema de un muro de corte con los elementos componentes del bastidor, a la izquierda, y el tablero contrachapado con la disposición de clavos de unión, a la derecha. El bastidor de 2440 mm x 1220 mm está compuesto de elementos horizontales que se denominan soleras y piezas verticales llamadas montantes. Las piezas del bastidor son de madera aserrada de *Pino taeda/elliottii* con una sección transversal de 40 mm x 90 mm. El tablero utilizado es de madera contrachapada (plywood) de *Eucalyptus grandis* de 11.2 mm de espesor. La fijación del tablero al bastidor se realiza mediante clavos espiralados de 2.5 mm de diámetro y 65 mm de largo, colocados neumáticamente con un espaciamiento de 100 mm en el perímetro del tablero (soleras y montantes externos) y un espaciamiento de 200 mm en el montante central. Todas las características geométricas y datos sobre los componentes del muro se toman a partir del trabajo de referencia presentado por Ramos et al. (2021).

Resulta de interés en el ámbito de estudio de las estructuras de madera el poder obtener las deformaciones horizontales máximas  $U$  de este tipo de muros de corte con un grado de precisión acorde. En este trabajo se obtendrán las mismas a través de un modelo numérico de elementos finitos implementado en el software Matlab (2017) simulando el ensayo experimental presentado en el trabajo de referencia. A continuación se describen los componentes del modelo numérico.

### 2.1. Bastidor de madera aserrada

El bastidor se representa numéricamente utilizando elementos tipo *frame* con dos nodos y tres grados de libertad por cada nodo, dos desplazamientos en el plano, horizontales  $u$  y verticales  $v$ ; y una rotación  $\theta$  (Reddy, 1993). Se definen las propiedades materiales de la madera de *Pinus taeda/elliottii*, cuyo valor medio del módulo de elasticidad ( $E$ ) se adopta igual a 7700 MPa (CIRSOC 601, 2016). Además, se utiliza una densidad media ( $\rho_{M1}$ ) de 496 kg/m<sup>3</sup> de acuerdo a lo reportado en Ramos et al. (2021).

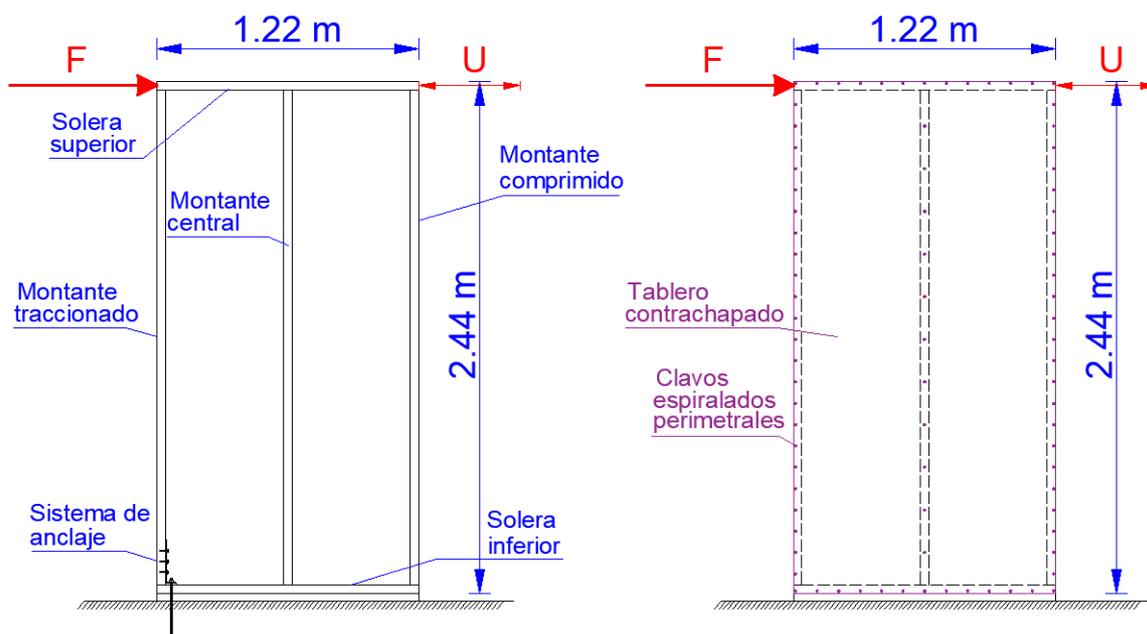


Figura 1: Esquema de un muro de corte con sus elementos componentes. Izquierda: elementos del bastidor. Derecha: tablero contrachapado y disposición de clavos de unión al bastidor.

## 2.2. Tablero contrachapado

El tablero contrachapado (plywood) se representa numéricamente utilizando elementos cuadriláteros con cuatro nodos y dos grados de libertad por nodo, desplazamientos horizontales  $u$  y verticales  $v$  (Reddy, 1993). Se utiliza un modelo de material ortótropo definiendo sus módulos de elasticidad en dos direcciones,  $E_1$  igual a 1000 MPa y  $E_2$  igual a 1600 MPa, para el módulo de corte  $G$  se adopta un valor igual a 520 MPa según lo indicado en Argüelles et al. (2013) para placas de este tipo. Además, se utiliza un valor de densidad media ( $\rho_{M2}$ ) igual a 692 kg/m<sup>3</sup> según lo reportado en Ramos et al. (2021).

## 2.3. Unión entre tablero contrachapado y bastidor

Las uniones entre el tablero contrachapado y el bastidor de madera aserrada realizadas con clavos espiralados se modelan numéricamente utilizando elementos de unión tipo resortes de rigidez  $k$  con dos nodos y un grado de libertad por nodo,  $u$  para los desplazamientos horizontales y  $v$  para los desplazamientos verticales (definidas en el plano del muro de corte). Estos elementos vinculan los nodos de los elementos que representan al bastidor y a la placa contrachapada simulando el comportamiento de las uniones clavadas. Para determinar la rigidez de los medios de unión se utilizan dos modelos para simular el comportamiento de los clavos: un modelo lineal y un modelo no lineal.

### 2.3.1. Modelo lineal

Para este modelo se adopta el módulo de deslizamiento instantáneo del elemento unión o rigidez del medio de unión ( $k_{ser}$ ), aplicable para estimar el deslizamiento del medio de unión ante cargas de servicio, el cual puede obtenerse a partir de la siguiente expresión (Argüelles et al., 2013):

$$k = k_{ser} = \frac{\rho_M^{1,5} D^{0,8}}{30} \quad (1)$$

expresada en unidades de fuerza por unidad de longitud (N/mm), en dónde  $D$  es el diámetro del clavo expresado en mm y  $\rho_M$  es la media geométrica de las densidades de los elementos de madera intervinientes en la unión (bastidor y placa) expresada en kg/m<sup>3</sup>. Esta última se obtiene como:

$$\rho_M = \sqrt{\rho_{M1}\rho_{M2}} \quad (2)$$

en donde  $\rho_{M1}$  es la densidad de las piezas aserradas que forman los bastidores y  $\rho_{M2}$  es la densidad de la placa arriostrante. La aplicación de las expresiones anteriores resultan en un valor de rigidez  $k_{ser}$  igual a 984 N/mm para los clavos utilizados en la unión entre el tablero contrachapado y el bastidor.

### 2.3.2. Modelo no lineal

Para introducir el comportamiento no lineal de los clavos de unión entre el tablero contrachapado y el bastidor se utiliza el modelo de curva carga-deformación de un clavo individual presentado en [Dolan \(1989\)](#):

$$F_u = (P_0 + K_2|\Delta u|) \left( 1 - \exp\left(\frac{-K_1|\Delta u|}{P_0}\right) \right) \quad |\Delta u| \leq |\Delta u|_{max} \quad (3)$$

$$F_u = (P_0 + K_2|\Delta u|_{max}) \left( 1 - \exp\left(\frac{-K_1|\Delta u|_{max}}{P_0}\right) \right) - K_3 (|\Delta u| - |\Delta u|_{max}) \quad |\Delta u| > |\Delta u|_{max} \quad (4)$$

en donde  $F_u$  es la carga lateral en el clavo y  $\Delta u$  la deformación lateral del mismo. Los demás coeficientes:  $P_0$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  y  $K_3$  son parámetros obtenidos en forma experimental. Este modelo de comportamiento no lineal del material se implementa aplicando técnicas numéricas para la determinación de la rigidez  $k$  según la carga actuante en cada clavo para cada iteración del análisis no lineal ([Kim, 2014](#)).

### 2.4. Sistema de anclaje

Los muros de corte se vinculan a la cimentación mediante un sistema de anclaje antivuelco. En este caso se utiliza un sistema de anclaje denominado *hold down*, el cual se compone de una chapa plegada de 7.94 mm de espesor fijada con 6 tirafondos de 7.94 mm de diámetro y 50.8 mm de longitud al montante traccionado y a la fundación, atravesando la solera, mediante un anclaje metálico de expansión de 12.7 mm de diámetro, Fig. 2. El modelado del anclaje se realiza con un elemento resorte de dos nodos y un grado de libertad por nodo (desplazamientos verticales  $v$ ), cuya rigidez se simboliza como  $k_{hd}$  con un valor igual a 17328 N/mm. Este valor se obtuvo considerando el aporte de rigidez de todos los componentes del sistema de anclaje actuando en serie, a saber: tirafondos para unión a montante traccionado, rigidez de la planchuela, aplastamiento de la madera en zona de contacto y rigidez del anclaje a fundación ([Guindos, 2019a](#)).

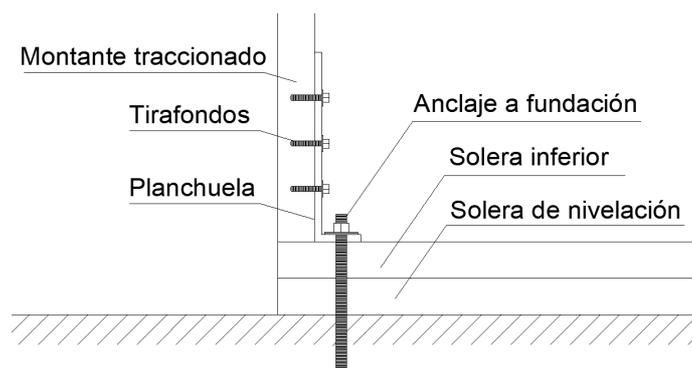


Figura 2: Esquema del sistema de anclaje tipo *Hold down* sobre el montante traccionado.

### 3. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación del modelo numérico. Para la resolución no lineal del sistema se utilizó el método de Newton-Raphson (Reddy, 2014). En la Fig. 3 se muestra un diagrama en donde se presenta, en forma resumida, el procedimiento numérico empleado para cada valor de carga. Para la simulación se han considerado las vinculaciones típicas presentadas por otros autores (Guindos, 2019b). El sistema de anclaje en el extremo inferior izquierdo en la posición del montante traccionado, mientras que en el extremo inferior derecho, en concordancia con el montante comprimido se considera un apoyo fijo, Fig. 4. En la Figura también se puede observar la posición de los clavos de unión entre el tablero contrachapado y el bastidor.

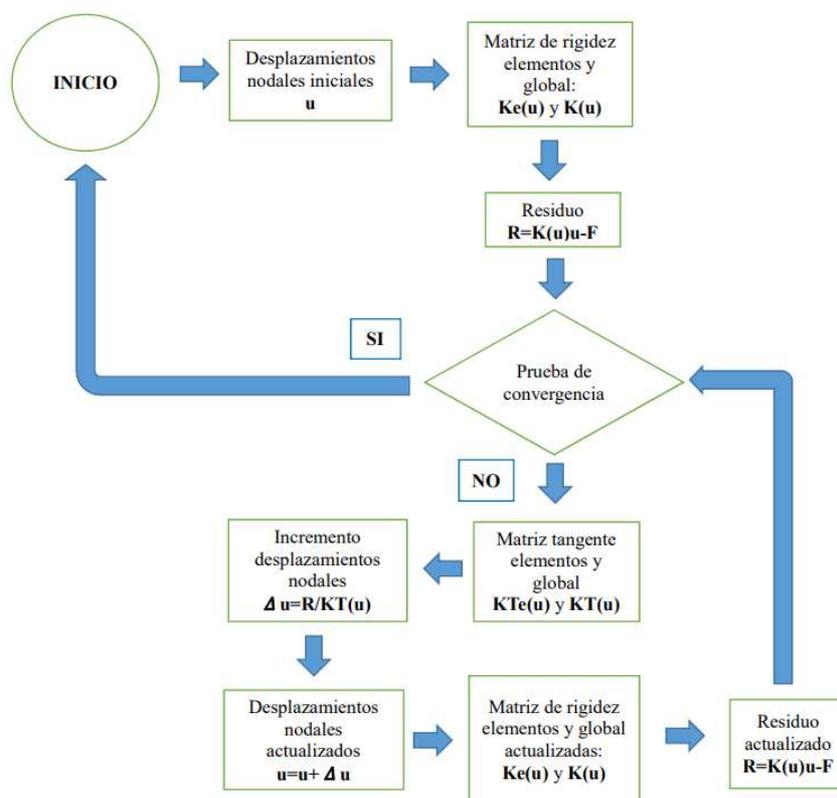


Figura 3: Diagrama del procedimiento numérico empleado para cada valor de carga.

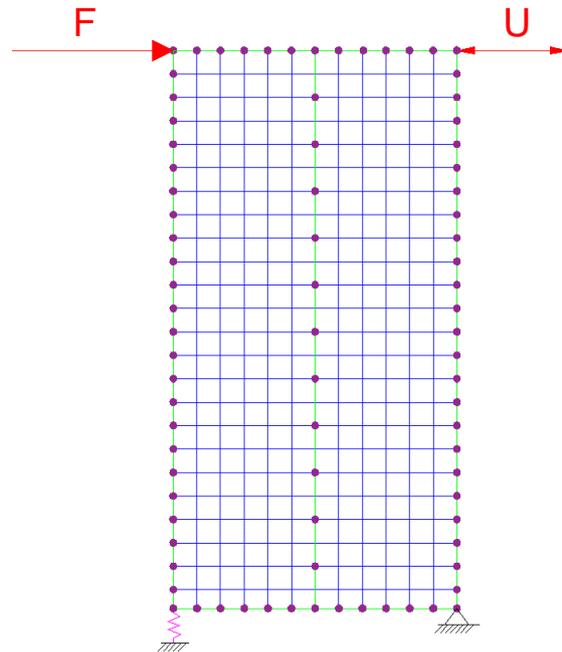


Figura 4: Esquema de discretización del muro de corte.

Como se mencionó anteriormente, el comportamiento no lineal solo fue considerado para las uniones entre la placa y bastidor (Estrella et al., 2020). Para el modelo de comportamiento lineal de las uniones entre placa y bastidor se utilizó un valor de rigidez  $k$  igual a 984 N/mm. Este modelo se analizó dado que es aquel comúnmente empleado en el diseño estructural bajo los lineamientos establecidos por las distintas normas (Guindos, 2019a). Mientras que para la implementación del modelo no lineal se utilizaron los siguientes parámetros para la determinación de la curva carga-deformación de cada clavo individual (Ec. (3)):  $P_0$  igual a 600 N,  $K_1$  igual a 853.2 N/mm,  $K_2$  igual a 20 N/mm,  $\Delta u_{max}$  igual a 12.7 mm y  $K_3$  igual a -87.6 N/mm. Estos valores fueron adoptados a partir de los resultados reportados por Dolan (1989) para uniones de similares características y ajustados mediante el método indicado en Loo et al. (2012).

En la Fig. 5, se presentan los resultados de la simulación numérica y su comparación con los resultados publicados en el trabajo de referencia. En relación al modelo de rigidez lineal, se puede observar que el valor obtenido del módulo de deslizamiento  $k_{ser}$  es aplicable hasta aproximadamente un valor de carga igual al 40% de la carga máxima registrada en el ensayo (12.6 kN) logrando un buen grado de ajuste con los resultados experimentales. Sin embargo, puede observarse que para ese valor de carga, la deformación máxima en el extremo superior del muro de corte es cercana al 13% de la deformación registrada al momento de producirse la falla del mismo (12.6 kN). Esto evidencia la influencia que tienen los componentes no lineales del sistema. En relación al modelo de rigidez no lineal, se puede observar una buena aproximación respecto a los valores experimentales reportados. Sin embargo, para las cargas cercanas al valor máximo de carga registrada en el ensayo se encuentran las mayores diferencias. En la simulación numérica se obtuvo una carga máxima de 13.2 kN con un desplazamiento máximo de 56 mm. Estas diferencias podría reducirse mediante una mejor definición de la relación carga-deformación de los clavos de unión partiendo de ensayos experimentales de los mismos.

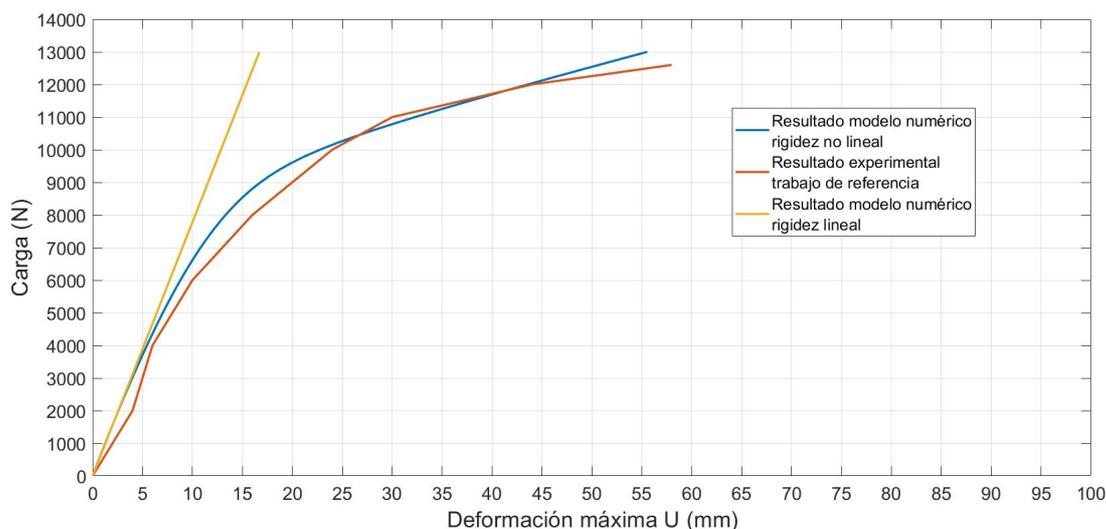


Figura 5: Comparación entre las deformaciones máximas obtenidas numéricamente con el modelo implementado y las deformaciones máximas reportadas en el trabajo de referencia.

#### 4. CONCLUSIONES

Se ha presentado un modelo numérico realizado a través de la aplicación del Método de los Elementos Finitos (MEF) de un muro de corte para el estudio de su comportamiento mecánico ante la acción de cargas laterales. Se han estudiado y definido los distintos componentes del sistema para la generación del mismo. Además, se han analizado dos situaciones relacionadas al modelado de la unión entre el tablero estructural y el bastidor. En el primer caso, aplicando un modelo de comportamiento lineal, se obtiene un buen grado de ajuste hasta un valor de carga de aproximadamente el 40 % de la carga máxima registrada y una deformación cercana al 13 % de la deformación máxima registrada. Esto pone de manifiesto la influencia en las deformaciones totales del sistema que tienen los medios de unión y su comportamiento no lineal. En el segundo caso, aplicando un modelo de comportamiento no lineal, se pudo obtener una buena aproximación respecto a los valores experimentales reportados. Sin embargo, se observan diferencias para la carga máxima cercana a la falla del muro las cuales pueden reducirse mediante el estudio y determinación experimental de una relación carga-deformación para estas uniones. Se pretende, a partir de este modelo, realizar estudios de optimización estructural, y por otro lado, avanzar sobre el estudio de las uniones entre los componentes del sistema, los cuales son uno de las principales contribuyentes de la deformación final. Así como también poder realizar más validaciones con resultados experimentales que contemplen otras configuraciones de muros. Se espera que los resultados de su aplicación contribuyan al estudio estructural de este sistema constructivo, y permitan consolidar el uso de la madera en el ámbito de la construcción en nuestra región.

#### REFERENCIAS

- Argüelles R., Arriaga F., Esteban M., Iñiguez G., y Argüelles R. *Estructuras de madera. Bases de cálculo*. 2013.
- CIRSOC 601. *Argentinean standard of timber structures (In Spanish)*. Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)- Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles (CIRSOC), Buenos Aires., 2016.

- Dolan J. y Madsen B. Monotonic and cyclic nail connection tests. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 19(1):97–104, 1992.
- Dolan J.D. *The dynamic response of timber shear walls*. Tesis de Doctorado, University of British Columbia, 1989.
- Estrella X., Guindos P., Almazán J.L., y Malek S. Efficient nonlinear modeling of strong wood frame shear walls for mid-rise buildings. *Engineering Structures*, 215:110670, 2020.
- Guindos P. *Conceptos avanzados del diseño estructural con madera: Parte I: uniones, refuerzos, elementos compuestos y diseño antisísmico*. Ediciones UC, 2019a.
- Guindos P. *Conceptos avanzados del diseño estructural con madera: Parte II: CLT, modelación numérica, diseño anti-incendios y ayudas al cálculo*. Ediciones UC, 2019b.
- Kim N.H. *Introduction to nonlinear finite element analysis*. Springer Science & Business Media, 2014.
- Loo W.Y., Quenneville P., y Chouw N. A numerical approach for simulating the behaviour of timber shear walls. *Structural Engineering and Mechanics*, 42(3):383–407, 2012.
- Matlab. *R2017b*. Mathworks, 2017.
- Moroder D. *Floor diaphragms in multi-storey timber buildings*. Tesis de Doctorado, 2016.
- Ramos M.d.R., Fank P.Y., Sosa-Zitto M.A., Torrán E.A., y Piter J.C. Comportamiento mecánico de muros de corte: importancia de la relación altura/ancho y del anclaje. *Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira (EMBRAMEM XVII)*, 2021.
- Ramos M.d.R., Fank P.Y., Torrán E.A., Sosa-Zitto M.A., y Piter J.C. Comportamiento mecánico de muros de corte de eucalyptus grandis: Resultados experimentales versus el criterio de las normas europeas. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 26:1–16, 2024.
- Reddy J. *An Introduction to the Finite Element Method*. McGraw-Hill, 1993.
- Reddy J.N. *An Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis Second Edition: with applications to heat transfer, fluid mechanics, and solid mechanics*. OUP Oxford, 2014.