

Modelo Numérico de Diagonal Equivalente no Lineal Aplicable al Estudio de Deformaciones Laterales en Muros de Corte de Madera

Diego A. García ^{a,b}*

^a *Universidad Nacional de Misiones, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Ingeniería Civil, Oberá, Misiones, Argentina.*

^b *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Buenos Aires, Argentina.*
e-mail: diego.garcia@fio.unam.edu.ar

Resumen

En este trabajo se presenta el estudio de las deformaciones ante cargas laterales de muros de corte de madera mediante un modelo de diagonal equivalente no lineal. Estos muros tienen el objetivo de conducir las cargas horizontales 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, de material derivado de la madera, mediante clavos perimetrales y centrales en uno de los lados del bastidor. Para el estudio de las deformaciones laterales se presenta el desarrollo del modelo de diagonal equivalente, el cual es implementado en un código de matlab para estructuras de barras. El comportamiento no lineal de los clavos que unen la placa al bastidor se introduce en la formulación de la diagonal equivalente. Luego, se comparan los resultados numéricos con resultados de ensayos experimentales presentados por otros autores con el objetivo de validar el modelo y así poder, en próximas etapas, introducirlo en el modelado de una construcción completa de madera.

Palabras Clave – *Construcciones con madera, Deformaciones laterales, Modelo numérico.*

1 Introducción

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 viviendas. Estos paneles están constituidos por varios elementos, a saber: una estructura resistente o bastidor, una cubierta la cual puede ser de machimbre o placas de terminación, placas multilaminadas o tableros de virutas (Oriented Strand Board, OSB) que confieren arriostramiento, una aislación hidráulica, una aislación térmica y un revestimiento inferior [1]. El sistema constructivo de entramado ligero de madera ese encuentra dentro de los sistemas constructivos más utilizados en los países productores de madera. Dentro de los atributos de este sistema 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 que desarrollan sus proyectos con este sistema constructivo, es saber aplicar correctamente todas las variables que se involucran en un muro de corte

* diego.garcia@fio.unam.edu.ar

tales como la cantidad de pies derecho, el tipo y espaciamiento de clavos, sistema de anclaje, tipo y espesor de placa a utilizar, etc.

Dentro de este sistema constructivo, es común emplear muros de corte como parte principal del sistema resistente lateral para soportar las cargas horizontales generadas por los movimientos sísmicos y la acción del viento, siendo esta última la de mayor preponderancia para nuestra zona geográfica. Tradicionalmente, un muro de corte consiste en un bastidor de madera compuesto de piezas verticales denominadas pie-derechos, de piezas horizontales denominadas soleras ubicadas en los extremos formando un bastidor en conjunto con los pies derechos. Además, se incluyen anclajes tipo hold-downs convencionales en las esquinas para prevenir el volcamiento. La resistencia lateral es proporcionada mediante tableros de OSB o multilaminados fenólicos de 9 a 12 mm de espesor colocados en un lado del muro, unidos al marco de madera a través de clavos helicoidales espaciados generalmente a 150 mm en los bordes exteriores y a 300 mm en el interior, como configuración tradicional de clavado.

En el presente trabajo se desarrolla un modelo de diagonal equivalente para ser aplicado a un sistema de barras utilizado para el estudio de las deformaciones horizontales de un muro de corte de madera partiendo del desarrollo presentado en [2]. Se introduce al modelo original el comportamiento no lineal de los clavos de fijación de la placa arriostrante al bastidor de madera [3]. Los resultados obtenidos son comparados con resultados experimentales presentados por otros autores, con el objetivo de validar el modelo para luego emplearse, en etapas futuras, en el estudio de la respuesta estructural de una construcción de madera [4]. El modelo se implementa en un código del programa matlab y se aplica utilizando propiedades mecánicas de especies de madera cultivadas en la provincia de Misiones las cuales son aceptadas para el uso estructural en el país a través del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601 [5].

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 [1]. En la Fig. 1, tomada del trabajo de referencia, se observa un muro de corte preparado para ser ensayado en laboratorio ante la acción de cargas horizontales [4]. El mismo está compuesto de por un bastidor de 2400 mm x 1200 mm cuyos elementos horizontales se denominan soleras y los verticales 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 de *Eucalyptus grandis* de 11.2 mm de espesor. La fijación del tablero al bastidor se realizó mediante clavos espiralados de 2.5 mm de diámetro y 65 mm de largo, colocados neumáticamente y 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.



Fig. 1. Imagen del ensayo experimental tomada del trabajo de referencia [4].

Es de interés en el ámbito de estudio de estructuras de madera el poder calcular las deformaciones horizontales de este tipo de muros con un grado de precisión acorde. En este trabajo se obtendrán las mismas a través del modelo de diagonal equivalente no lineal que se describe a continuación.

2.1 Modelo de diagonal equivalente

Este método se utiliza para modelar la respuesta lateral, en términos de deformaciones, del muro de corte ante la acción de cargas horizontales. Se basa en definir un elemento diagonal ficticio, que representa adecuadamente la rigidez lateral de ciertos componentes del muro en cuestión [2]. En este caso la diagonal representa la rigidez que aporta al sistema la placa exterior y los clavos que vinculan la misma al bastidor. El modelo consiste en un marco que representa las piezas de madera que forman el bastidor del muro (montantes y soleras) y contiene una diagonal flexible axialmente a la tracción. Bajo este mecanismo, la diagonal toma la carga lateral y simplemente deben compatibilizarse los desplazamientos axiales de la barra con los desplazamientos laterales del muro. La barra se define como un elemento de reticulado, que solo admite fuerzas a tracción, es isótropa con un módulo de elasticidad y un área efectiva que resulta del análisis de la rigidez que aportan la placa externa y los clavos que vinculan la misma al bastidor. En la Fig. 2 se presenta el esquema del bastidor con su diagonal equivalente, se observa también el elemento de anclaje representado mediante un resorte, el cual se ubica en el extremo inferior izquierdo del marco.

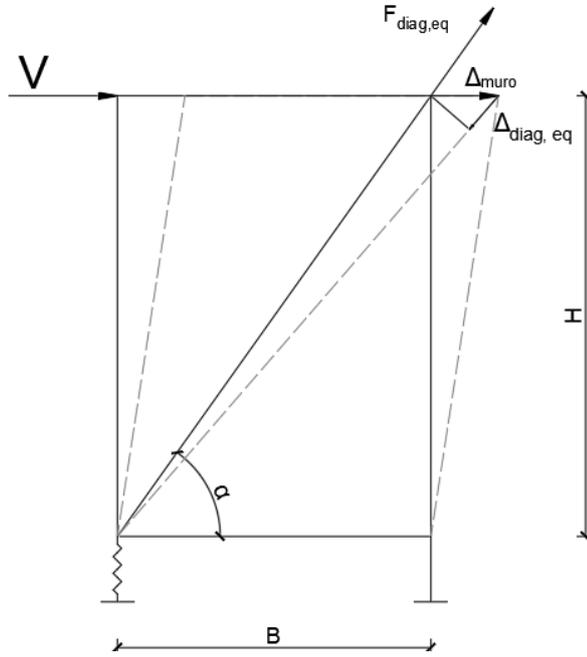


Fig. 2. Modelo de marco de elementos de barra con diagonal equivalente [2].

Para obtener las propiedades efectivas de la diagonal equivalente se deben analizar los componentes de deformación que la misma incluye. Para ello, se consideraran los efectos de la deformación por corte en la placa y en los medios de unión de manera separada [2]. La deformación por corte en la placa se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\Delta_{placa} = \frac{VH}{G_v t_v B} \quad (1)$$

en donde G_v es el módulo de corte de la placa arriostrante, t_v es el espesor de la misma, V es la fuerza horizontal aplicada en el extremo superior, H es la altura del bastidor y B es el ancho del bastidor. Luego, la deformación horizontal producto de la unión con clavos en las líneas horizontales de clavado, sobre las soleras del marco, se obtiene a partir de:

$$\Delta_{clavos\ horizontales} = \frac{V s_h n_h}{K_{ser} B} \quad (2)$$

en donde k_{ser} es el módulo de deslizamiento del elemento unión, s_h es la separación entre clavos en las líneas horizontales de clavado y n_h es el número de líneas horizontales de clavado, en este caso igual a 2. Luego, la deformación horizontal producto de la unión con clavos en las líneas verticales de clavado, sobre los montantes extremos del marco, se obtiene a partir de:

$$\Delta_{clavos\ verticales} = \frac{V s_v n_v}{K_{ser} B} \left(\frac{H}{B} \right) \quad (3)$$

en donde k_{ser} es el módulo de deslizamiento del elemento unión, s_v es la separación entre clavos en las líneas verticales de clavado y n_v es el número de líneas horizontales de clavado, en este caso igual a 2. Finalmente, se puede obtener la deformación total debido a estos tres componentes:

$$\Delta_{muro} = \Delta_{placa} + \Delta_{clavos\ horizontales} + \Delta_{clavos\ verticales} \quad (4)$$

$$\Delta_{muro} = \frac{VH}{B} \left(\frac{1}{G_v t_v} + \frac{1}{K_{ser}} \left(\frac{s_h n_h}{H} + \frac{s_v n_v}{B} \right) \right) \quad (5)$$

$$\Delta_{muro} = \frac{VH}{B} \left(\frac{1}{G_{ef}} \right) \quad (6)$$

en donde G_{ef} es el módulo de corte efectivo del sistema, el cual responde a la siguiente expresión:

$$G_{ef} = \frac{1}{\left(\frac{1}{G_v t_v} + \frac{1}{K_{ser}} \left(\frac{s_h n_h}{H} + \frac{s_v n_v}{B} \right) \right)} \quad (7)$$

Asumiendo pequeñas deformaciones, se puede establecer la relación de rigideces entre muro y diagonal equivalente, compatibilizando desplazamientos por simples relaciones trigonométricas de acuerdo al ángulo de la diagonal (α):

$$\Delta_{diag,eq} = \frac{F_{diag,eq} L}{E_{diag,eq} A_{diag,eq}} = \frac{(V/\cos \alpha)L}{E_{diag,eq} A_{diag,eq}} = \frac{VL^2}{BE_{diag,eq} A_{diag,eq}} \quad (8)$$

en donde $\Delta_{diag,eq}$ es la deformación axial de la diagonal equivalente, $F_{diag,eq}$ es la fuerza axial que actúa sobre ella, $E_{diag,eq}$ es su módulo de elasticidad longitudinal y $A_{diag,eq}$ es el área de la misma. A continuación, igualando (6) con (8), se obtiene la expresión que permite obtener $E_{diag,eq}$:

$$\Delta_{diag,eq} = \frac{VL^2}{BE_{diag,eq} A_{diag,eq}} = \frac{VH}{B} \left(\frac{1}{G_{ef}} \right) \frac{B}{L} \quad (9)$$

$$E_{diag,eq} = \frac{L^3 G_{ef}}{A_{diag,eq} HB} \quad (10)$$

y finalmente, asignando al área de la diagonal equivalente ($A_{diag,eq}$) un valor arbitrario igual a la longitud de la diagonal L , se obtiene la expresión final para el módulo de elasticidad equivalente:

$$E_{diag,eq} = \frac{L^2 G_{ef}}{HB} \quad (11)$$

Este modelo tiene la ventaja respecto de otros, en que puede modelar la respuesta lateral con una precisión aceptable de forma extremadamente eficiente desde el punto de vista del costo computacional.

2.2 Módulo de corte efectivo

Este parámetro concentra la rigidez a corte de la placa exterior y la rigidez de los clavos de unión utilizados para unir la misma al bastidor, tal y como queda expresado en (7). La placa exterior es una parte fundamental del comportamiento mecánico del muro de corte, y en conjunto con la disposición del clavado perimetral, son los principales parámetros involucrados en la resistencia al descuadre ante cargas horizontales. En este trabajo se introduce el comportamiento no lineal de las uniones clavadas entre placa y bastidor a través del módulo de deslizamiento de los medios de unión k_{ser} . Para ello, se parte de las siguientes expresiones, las cuales relacionan la carga F_u y la deformación Δu en el clavo conector entre placa y bastidor [3]:

$$|F_u| = (P_0 + K_2 |\Delta u|) \left(1 - \exp\left(\frac{-K_1 |\Delta u|}{P_0}\right) \right) \quad |\Delta u| \leq |\Delta u|_{max} \quad (12)$$

$$|F_u| = \left[(P_0 + K_2 |\Delta u|_{msx}) \left(1 - \exp\left(\frac{-K_1 |\Delta u|_{msx}}{P_0}\right) \right) \right] - K_3 (|\Delta u| - |\Delta u|_{max}) \quad |\Delta u| > |\Delta u|_{max} \quad (13)$$

en donde P_0 , K_1 , K_2 y K_3 son parámetros obtenidos en forma experimental. El módulo de deslizamiento k_{ser} se obtiene como la pendiente de la curva para cada valor de deformación de los clavos de unión.

2.3 Apoyos del muro de corte

El muro de corte se considera vinculado a su estructura de apoyo mediante un apoyo fijo en su extremo inferior derecho (montante comprimido) y mediante un sistema de anclaje en su extremo inferior izquierdo (montante traccionado). El sistema de anclaje tipo *hold down* se compone de una chapa plegada fijada con tirafondos al montante traccionado y a la fundación, atravesando la solera, mediante una barra de anclaje, Fig. 3 [4]. Este sistema se introduce en el modelo mediante un resorte con rigidez a tracción cuyos parámetros se presentan en [6].

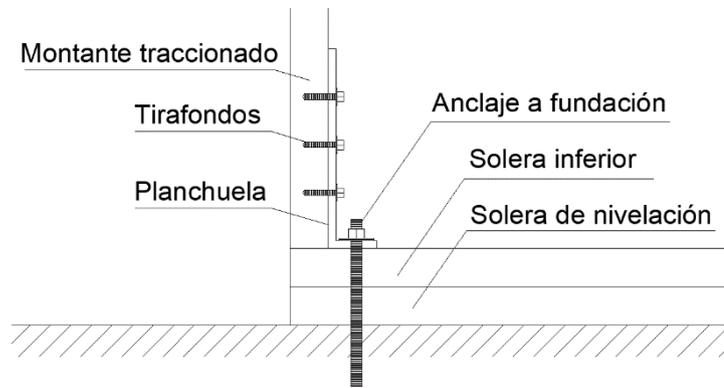


Fig. 3. Esquema del sistema de anclaje hold down sobre el montante traccionado.

3 Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos con el objetivo de validar el modelo numérico. Para ello, se comparan los mismos con los datos reportados de ensayos experimentales en muros de corte [4]. Se toma como base el ensayo reportado en el trabajo de referencia, el cual fue realizado en un muro de corte con un bastidor de 2400 mm x 1200 mm cuyos elementos son de madera aserrada de *Pino taeda/elliottii* con una sección transversal de 40 mm x 90 mm y una densidad promedio de 496 kg/m³. El tablero utilizado es un multilaminado fenólico de *Eucalyptus grandis* de 11.2 mm de espesor con una densidad promedio de 692 kg/m³. La fijación del tablero al bastidor se realizó mediante clavos espiralados de 2.5 mm de diámetro y 65 mm de largo, colocados neumáticamente y 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 [4].

El modelo numérico se realiza en el software *matlab*, modelando el bastidor con elementos uniaxiales con un módulo de elasticidad igual a 13300 N/mm² [5]. Luego, el primer paso para la determinación de las propiedades de la diagonal equivalente consiste en determinar el módulo de deslizamiento de los medios de unión de la placa al bastidor k_{ser} . Para ello se obtiene la relación carga-deformación, Fig. 4, utilizando las expresiones (12) y (13), adoptándose los siguientes valores: 0.8 kN para P_0 , 853.2 N/mm para K_1 , 42 N/mm para K_2 , -87.6 N/mm para K_3 y 12.7 mm para Δu_{max} [3]. Luego, a partir de la relación carga-deformación obtenemos los valores k_{ser} como la tangente a la curva. Una vez definidos los valores del módulo de deslizamiento en función de la deformación de los clavos se obtiene el módulo de corte efectivo G_{ef} mediante la expresión (7). Para ello definimos los siguientes valores para los parámetros de esta última ecuación: 520 N/mm² para G_v [7], 11.2 mm para t_v , 2400 mm para H , 1200 mm para B , 100 mm tanto para s_h como para s_v y 2 para n_h y n_v . En la Fig. 5, se presentan los valores de G_{ef} en función de la deformación en los clavos Δu .

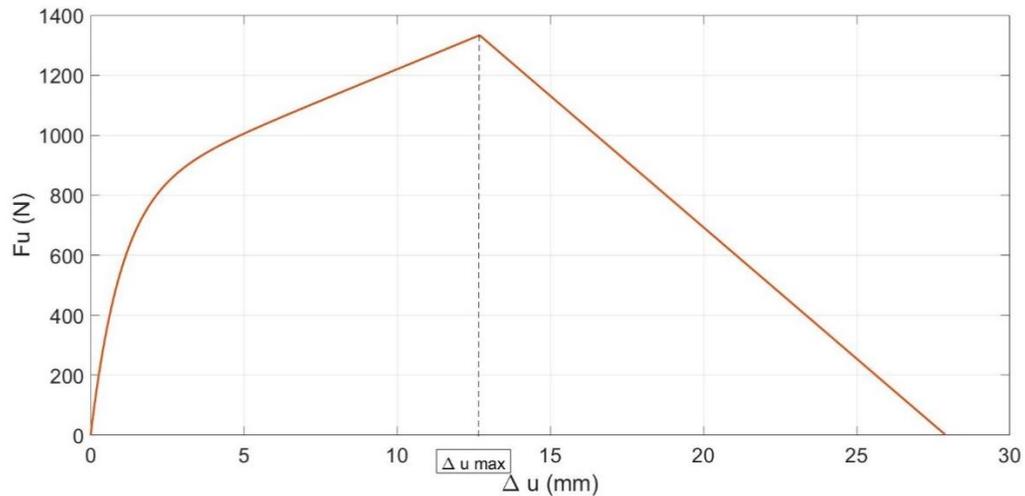


Fig. 4. Relación carga deformación para los clavos de unión entre tablero y bastidor.

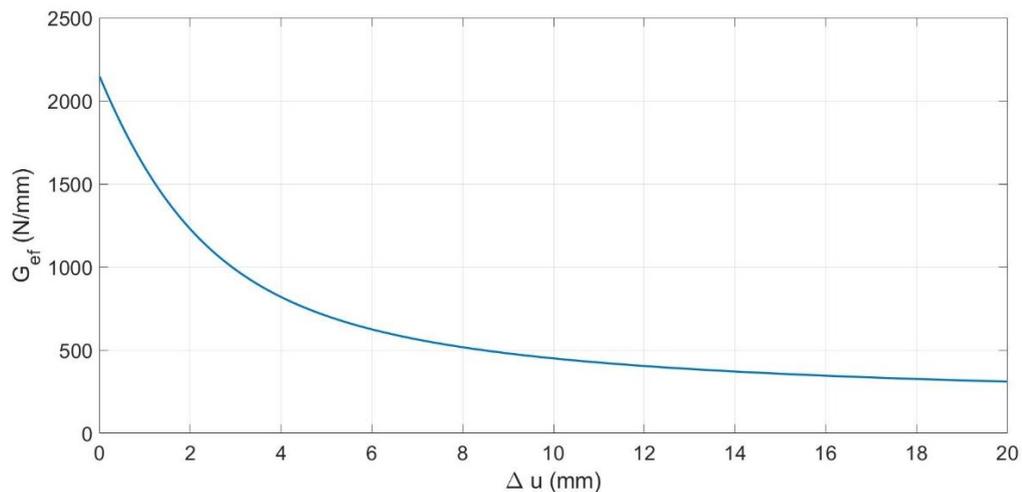


Fig. 5. Relación entre el módulo de corte efectivo y la deformación de los clavos de unión entre tablero y bastidor.

Finalmente, el modelado del anclaje tipo *hold down* se realizó con un elemento resorte cuya rigidez es igual a 17328 N/mm. Este valor considera el aporte de rigidez de todos los componentes del sistema de anclaje, a saber: tirafondos para unión a montante, rigidez de la planchuela, aplastamiento de la madera en zona de contacto y rigidez del anclaje a fundación [6].

A continuación, en la Fig.6, se presenta el resultado de la simulación numérica realizada y la comparación con los datos del ensayo experimental reportado en [4]. En la misma se grafica la relación entre la carga horizontal aplicada en el extremo izquierdo de la solera superior y la deformación horizontal máxima registrada en el extremo superior derecho del muro de corte. La simulación se realizó hasta una carga de 13 kN, siendo 12.6 kN el valor de la máxima carga reportada para el caso estudiado. Puede observarse una buena aproximación respecto a los valores

experimentales reportados. Sin embargo, para las cargas cercanas al valor máximo de carga del ensayo se encuentran mayores diferencias, las cuales pueden ser ajustadas mediante una mejor definición de la relación carga-deformación de los clavos de unión.

El modelo presentado muestra que puede predecir con un buen grado de precisión el comportamiento de muros de corte, teniendo como principal ventaja el bajo costo computacional. Lo cual lo hace interesante para su aplicación en el estudio de estructuras realizadas mediante el sistema de entramado ligero con muros de corte.

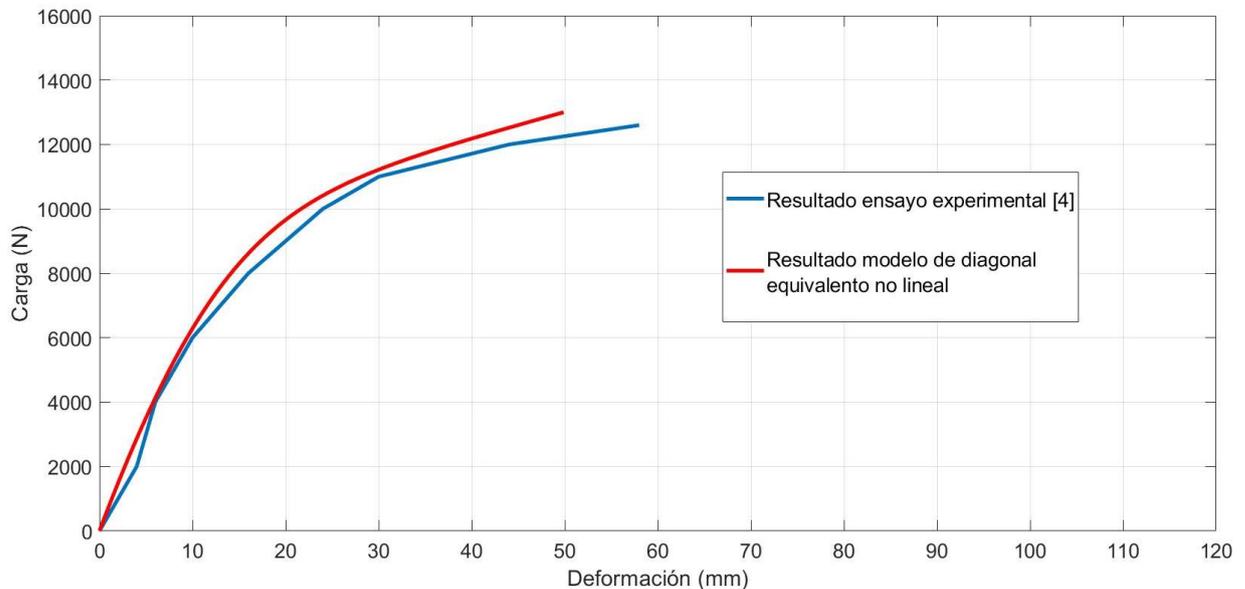


Fig. 6. Comparación de resultados entre ensayo experimental reportado en el trabajo de referencia [4] y el modelo de diagonal equivalente no lineal.

4 Conclusiones

Se ha presentado el desarrollo de un modelo de barras con diagonal equivalente para el estudio de las deformaciones laterales en muros de corte de madera empleados en el sistema constructivo de entramado ligero. El comportamiento no lineal del sistema se ha simulado a través de la inclusión de la relación carga deformación para los clavos que unen las piezas de madera del bastidor y el tablero multilaminado. Los resultados del modelo fueron comparados con resultados experimentales mostrando un grado de ajuste satisfactorio. Este modelo tiene la ventaja, respecto de otros, en que puede modelar la respuesta lateral con una precisión aceptable de forma extremadamente eficiente desde el punto de vista del costo computacional. Lo cual lo hace interesante para su aplicación en el estudio de estructuras realizadas mediante el sistema de entramado ligero con muros de corte.

En etapas futuras, se pretende seguir mejorando el modelo de barras con diagonal equivalente para luego aplicarlo al estudio de una vivienda construida en madera mediante el sistema de entramado

ligero. Se pretende seguir estudiando las uniones entre los componentes del sistema, los cuales son uno de las principales contribuyentes de la deformación final. Se espera que el modelo desarrollado contribuya al estudio estructural de este sistema constructivo y permita consolidar el uso de la madera en el ámbito de la construcción en nuestra región.

Referencias

- [1] Guindos P. “Estabilidad lateral y diseño sismorresistente”, en *Conceptos avanzados del diseño estructural con madera, Parte I*, 1ra edición, Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 2019.
- [2] Moroder D., “Floor diaphragms in multi-storey timber building”, PhD thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2016.
- [3] Dolan J.D., “The dynamic response of timber shear walls”, PhD thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canadá, 1989.
- [4] Ramos M.R., *et al*, “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), Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 2021.
- [5] Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601. Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)-Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, 2016.
- [6] Guindos P. “Modelación numérica”, en *Conceptos avanzados del diseño estructural con madera, Parte II*, 1ra edición, Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 2019.
- [7] Argüelles Álvarez R, *et al*, “Valores característicos de las propiedades de los tableros”, en *Estructuras de madera bases de cálculo*, Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera (AITIM), Madrid, España, 2013.