

# Simulación Mediante el Método de los Elementos Finitos de un Muro de Corte de Madera

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

<sup>a</sup> Universidad Nacional de Misiones, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Ingeniería Civil, Oberá, Misiones, Argentina.

<sup>b</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Buenos Aires, Argentina.  
e-mails: diego.garcia@fio.unam.edu.ar, gmalfonso14@gmail.com

---

## Resumen

En este trabajo se presenta la simulación numérica del comportamiento mecánico de un muro de corte de madera. En una edificación, estos muros tienen el objetivo de conducir las cargas horizontales que actúan sobre la misma 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. La simulación se realiza en un software comercial de elementos finitos, comparándose los desplazamientos laterales máximos con resultados experimentales reportados por otros autores. 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.

**Palabras Clave** – Construcciones con madera, Desplazamientos laterales, Elementos finitos.

## 1 Introducción

En Argentina, la madera es un material de construcción utilizado en casas y edificios desde hace muchos años, pero 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 viviendas. 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 multilaminadas o tableros de virutas (Oriented Strand Board, OSB) que confieren arriostramiento, una aislación hidráulica, una aislación térmica y un revestimiento inferior [1]. Desde diversos organismos relacionados con la construcción se plantea la necesidad de evaluar objetivamente el comportamiento mecánico estructural como alternativa competitiva a los sistemas de construcción tradicionales que utilizan distintos tipos de mampuestos. El sistema constructivo de entramado ligero de madera está dentro de los sistemas constructivos más utilizados en los países productores de madera, como Canadá y Estados Unidos entre otros. 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

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

todas las variables que se involucran en un muro de corte 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, 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 individual consiste de un marco o bastidor de madera de 1.2 m de largo y 2.4 m de alto compuesto de piezas verticales denominadas pie-derechos de escuadría 2x4 pulgadas espaciados a 600 mm, de piezas horizontales denominadas soleras formadas por miembros individuales también de 2x4 pulgadas ubicadas en los extremos formando un bastidor en conjunto con los pies derechos, y anclajes tipo hold-downs convencionales en las esquinas para prevenir el volcamiento. La rigidización del bastidor 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 este trabajo se analiza el comportamiento mecánico de un muro de corte frente a la acción de cargas horizontales. El mismo se modela con el software comercial de elementos finitos SAP2000 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 [2]. Como resultado de la simulación numérica se obtienen los desplazamientos máximos los cuales son comparados con resultados experimentales reportados por otros autores [3]. 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 componenetas de la deformacion final. 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 así poder plantear alternativas de diseño.

## 2 Materiales y métodos

El muro de corte utilizado en el sistema constructivo de entramado ligero, constituye en sí un tipo de sistema estructural, en el cual todas sus partes componentes aportan a la rigidez y resistencia tanto lateral como vertical. En este trabajo se hace foco en la rigidez lateral del mismo dado que su principal función es la de trasladar las fuerzas horizontales a la fundación. En la Fig. 1 se observa un muro de corte preparado para ser ensayado en laboratorio ante la acción de cargas horizontales [3]. 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 realiza 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 [3].**

Es de interés en el ámbito de estudio de estructuras de madera el poder calcular los desplazamientos horizontales de este tipo de muros con un grado de precisión acorde. En este trabajo se obtendrán las mismas a través de un modelo numérico desarrollado en el software comercial SAP2000 utilizando elementos finitos tipo *frame* para el bastidor y tipo *shell* para la placa arriostrante [4]. A continuación se describen los componentes del modelo numérico.

### *2.1 Bastidor de madera*

El bastidor se representa utilizando elementos *frame*, definiendo como material la madera de *Pinus taeda* y *Pinus elliottii*, cuyo módulo de elasticidad se adopta igual a 7.700 MPa [2] con una densidad media de 496 kg/m<sup>3</sup> [3]. Estos valores se corresponden con aquellos establecidos para clase 1 (clasificación visual que contempla la presencia de defectos como por ejemplo los nudos) de piezas aserrada de esta especie. El bastidor consta de 3 parantes verticales de 2,40 m de alto espaciadas cada 60 cm, y dos soleras horizontales de 1,2 m de largo. La sección transversal de los elementos que conforman el bastidor es de 40 mm x 90 mm.

### *2.2 Placa multilaminada*

Para simular la placa de corte multilaminada, se utilizan elementos de área tipo *shell* con un espesor de 11,2 mm. Se utiliza un modelo de material ortótropo definiendo sus módulos de elasticidad en dos

direcciones, 1000 MPa y 1600 MPa, para el módulo de corte se adopta 520 MPa [5] y una densidad media de 692 kg/m<sup>3</sup> [3].

### 2.3 Unión entre placa multilaminada y bastidor

Las uniones de la placa multilaminada al bastidor de madera aserrada se modelan utilizando elementos link que vinculan dos nodos, adoptando un módulo de deslizamiento (rigidez del medio de unión). El módulo de deslizamiento instantáneo del elemento unión o rigidez del medio de unión ( $k_{ser}$ ), puede obtenerse con la siguiente ecuación [5]:

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

expresada en unidades de fuerza por unidad de longitud, en donde  $D$  es el diámetro de los clavos y  $\rho_M$  es la media geométrica de las densidades de los elementos de madera intervinientes en la unión. La misma se obtiene como:

$$\rho_M = \sqrt{\rho_{M1} \rho_{M2}} \quad (12)$$

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 da como resultado un valor de  $k_{ser}$  igual a 984 N/mm para los clavos de unión utilizados.

### 2.4 Sistema de anclaje

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. 2. El modelado del anclaje se realiza con un elemento resorte cuya rigidez es igual a 17328 N/mm. Este valor se obtuvo considerando 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 [1].

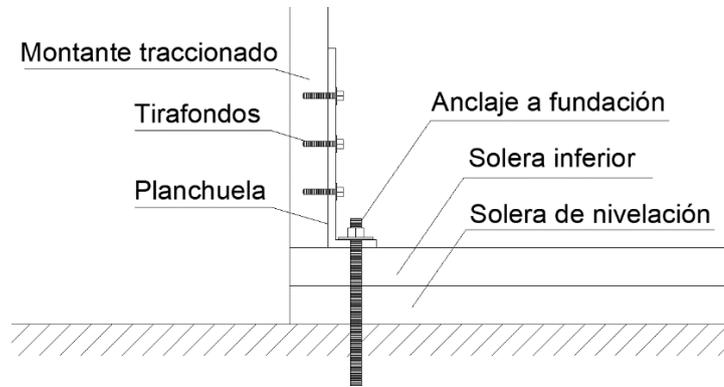


Fig. 2. Esquema del sistema de anclaje hold down sobre el montante traccionado.

### 3 Resultados

En la Fig. 3 se muestran imágenes del modelo numérico generado en el software SAP2000. En las mismas se pueden observar los elementos componentes del sistema y la vinculación de los mismos en las posiciones correspondientes a los montantes y soleras. Además, se puede observar el anclaje para el parante traccionado.

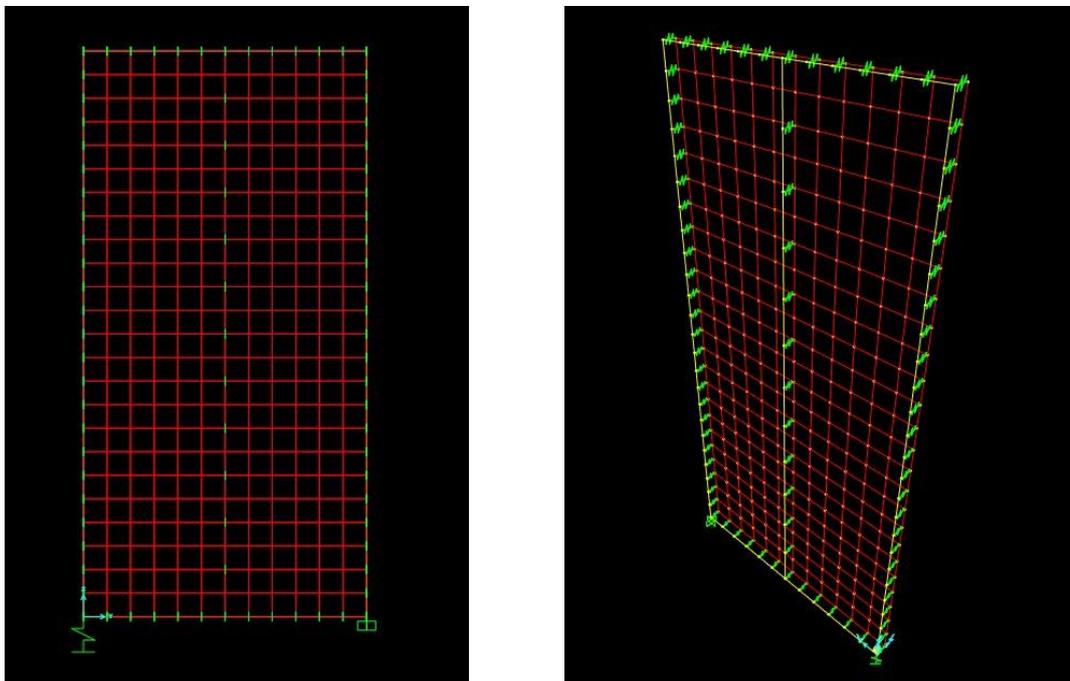
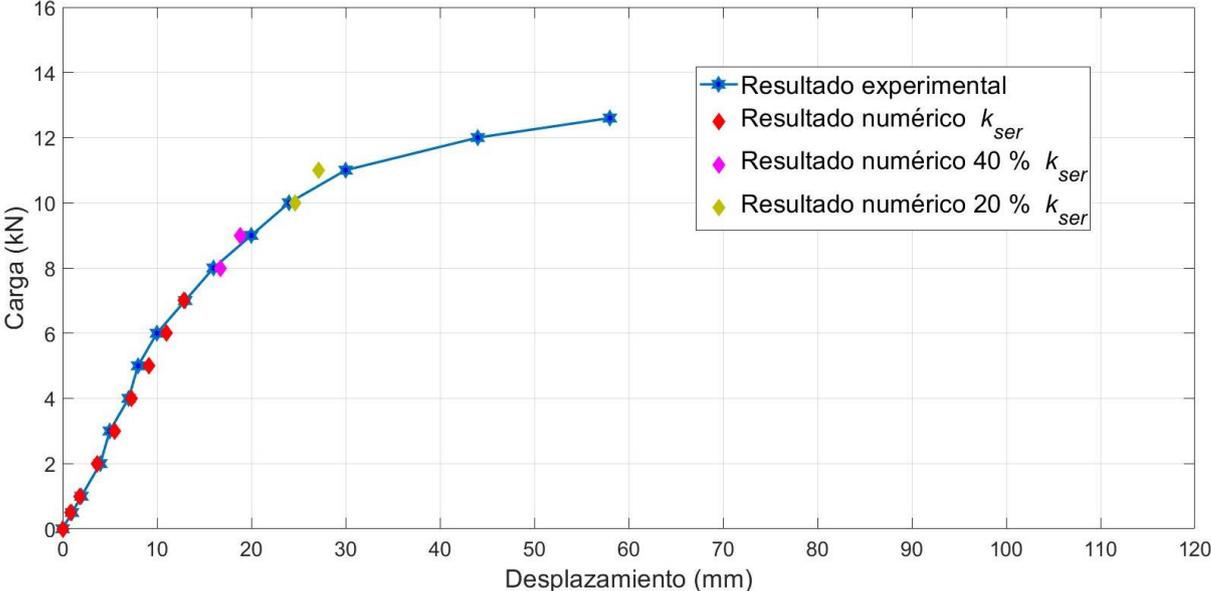


Fig. 3. Modelo numérico desarrollado en software comercial de elementos finitos.

En la Fig. 4, se presentan los resultados de la simulación numérica y su comparación con los resultados publicados en el trabajo de referencia [3]. Para realizar la simulación del mismo, se tomaron intervalos de carga dentro de los cuales se fue variando la rigidez de los clavos de unión que unen la placa multilaminada al bastidor ( $k_{ser}$ ), partiendo del valor de referencia obtenido previamente, hasta lograr el ajuste con los resultados experimentales de carga y desplazamiento. Esto debido al

comportamiento mecánico no lineal de los medios de unión con su consecuente pérdida de rigidez a medida que aumenta la carga. Se puede observar que el valor inicial obtenido del módulo de deslizamiento es aplicable hasta aproximadamente un valor de carga igual al 55% de la carga máxima registrada en el ensayo (12.6 kN), hasta el 71% de la carga máxima se utilizó un 40% del valor de inicial de  $k_{ser}$ , hasta un 87% de la carga máxima se utilizó un 20% del valor inicial de  $k_{ser}$ , y finalmente, un 5% del valor inicial de  $k_{ser}$  hasta llegar al carga máxima registrada que produce la falla del muro de corte. De los resultados se desprende que el valor inicial de  $k_{ser}$  permite una buena predicción en los valores de desplazamiento lateral. Cabe mencionar que criterios similares en cuanto a la variación de la rigidez de los medios de unión son utilizados por diversas normativas para el estudio de desplazamientos en muros de corte y diafragmas horizontales [6].



**Fig. 4. Comparación de resultados entre ensayo experimental reportado en el trabajo de referencia [3] y resultados obtenidos del modelo en elementos finitos considerando la variación de  $k_{ser}$ .**

#### 4 Conclusiones

Se ha presentado un modelo realizado en software comercial de elementos finitos de un muro de corte para el estudio de su comportamiento mecánico ante la acción de cargas laterales. Mediante el estudio de la variación de los valores del módulo de deslizamiento de los clavos de unión se ha logrado un buen grado de ajuste con los resultados experimentales reportados por otros autores en el trabajo de referencia. Los resultados obtenidos muestran que el valor inicial del módulo de deslizamiento pudo utilizarse para la predicción de las deformaciones hasta un valor de carga igual al 55% de la

carga de falla máxima registrada en el ensayo. Es necesario avanzar sobre el estudio de otras configuraciones de muros para evaluar si este resultado podría generalizarse. Luego, a medida que avanza el ensayo y se pone de manifiesto el comportamiento no lineal se adoptó la estrategia de reducir el valor inicial para lograr el ajuste. Este mecanismo es de aplicación en algunas normas de diseño estructural en madera y es de interés el poder calibrarla para extender a los muros de corte construidos en nuestro medio.

Se pretende, a partir de este modelo más detallado, seguir estudiando las uniones entre los componentes del sistema, los cuales son uno de las principales contribuyentes de la deformación final. Se espera que los resultados de su aplicación contribuyan 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] 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.
- [3] 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), Florianopolis, Santa Catarina, Brasil, 2021.
- [4] Guindos P. “Modelación numérica”, en *Conceptos avanzados del diseño estructural con madera, Parte II*, 1ra edición, Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 2019.
- [5] Arguellez 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.
- [6] Moroder D., “Floor diaphragms in multi-storey timber building”, PhD thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2016.