

Estudio de las Deformaciones Laterales en Muros de Corte de Madera Considerando Propiedades Materiales Estocásticas

Diego A. García ^{a,b}*

^a Laboratorio de Ingeniería Civil (LIC), Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Misiones (FI-UNaM), 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 considerando de forma estocástica las propiedades de los materiales intervinientes. 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. Se consideran las propiedades materiales de la madera que forma los bastidores como así también las propiedades de los clavos que unen la placa al bastidor de forma estocástica. Se realizan simulaciones obteniéndose distribuciones de probabilidad para las deformaciones laterales para los diferentes valores de carga considerados.

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

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, arriostamiento, 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 arriostamiento, 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 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 utiliza el modelo de diagonal equivalente presentado en [2] para ser aplicado a un sistema de barras utilizado para el estudio de las deformaciones horizontales introduciendo el modelado estocástico de las propiedades materiales. Particularmente, se modelan de forma aleatoria las propiedades de la madera del bastidor. A su vez, las propiedades materiales que intervienen en el comportamiento no lineal de los clavos de fijación de la placa arriostrante al bastidor de madera [3] también son modeladas de forma estocástica en virtud a la relación que existe entre la rigidez de la madera y la respuesta mecánica de las uniones clavadas [4]. Los resultados obtenidos son comparados con resultados experimentales presentados por otros autores [5], con el objetivo de validar el modelo para luego emplearse en el estudio de las deformaciones laterales considerando las propiedades materiales de forma aleatoria. El modelo numerico-estocastico 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 [6].

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 [5]. 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 [5].

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 presentado en [2].

2.1 Modelo de diagonal equivalente

Este modelo 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 [7]. 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. En [2] se presenta el desarrollo completo del modelo de diagonal equivalente utilizado en este trabajo.

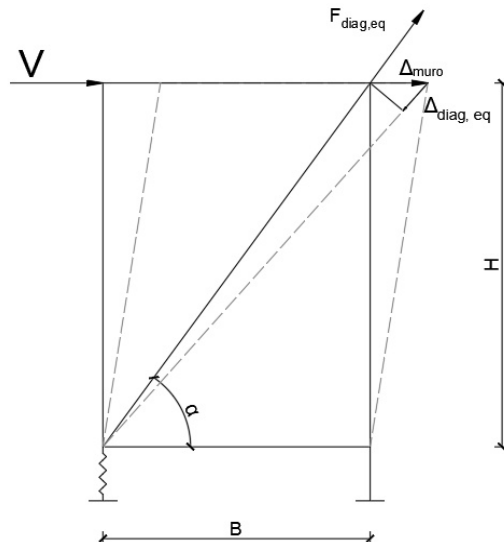


Fig. 2. Modelo de marco de elementos de barra con diagonal equivalente [2].

2.2 Modelado estocástico de propiedades materiales

Uno de los parámetros considerados como estocástico en este trabajo es la densidad de la madera de las piezas aserradas que forman el bastidor. Para ello se utiliza una distribución de probabilidad gamma con valor medio $\mu = 493 \text{ kg/m}^3$, y desvío estándar $\sigma = 73,95 \text{ kg/m}^3$. La otra propiedad material que se considera estocástica es el módulo de elasticidad longitudinal de las piezas aserradas que forman el bastidor (pies derechos y soleras). Para ello se utiliza una distribución de probabilidad gamma con valor medio $\mu = 13300 \text{ MPa}$, y desvío estándar $\sigma = 2770 \text{ MPa}$. Ambas propiedades materiales, la densidad y el módulo de elasticidad fueron seleccionadas considerando madera de *pino taeda/elliotti* cultivado en la provincia de Misiones y aceptada para uso estructural según el Reglamento Argentino de Estructuras de Madera, CIRSOC 601.

Al considerar las propiedades de la madera del bastidor de forma estocástica, se ven influenciadas las propiedades relacionadas a la rigidez de las uniones. Partiendo de las siguientes expresiones, las cuales relacionan la carga F_u y la deformación Δu en el clavo conector entre placa y bastidor [4]:

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

$$|F_u| = \left[(P_0 + K_2 |\Delta u|_{max}) \left(1 - \exp\left(\frac{-K_1 |\Delta u|_{msx}}{P_0}\right) \right) \right] - K_3 (|\Delta u| - |\Delta u|_{max}) |\Delta u| > |\Delta u|_{max} \quad (2)$$

en donde P_0 , K_1 , K_2 y K_3 son parámetros obtenidos en forma experimental. A partir de la densidad de las piezas aserradas del bastidor de madera (ρ_{M1}) y teniendo la densidad de la placa (ρ_{M2}) como dato [8], se puede calcular la media geométrica de la densidad, la cual es utilizada para el cálculo del módulo de deslizamiento:

$$\rho_M = \sqrt{\rho_{M1} \rho_{M2}} \quad (3)$$

En este trabajo el parámetro K_1 , que indica la rigidez inicial de la unión se adopta igual al módulo de deslizamiento instantáneo del elemento de unión, la cual puede obtenerse con la siguiente ecuación [8]:

$$K_1 = \frac{\rho_M^{1.5} D^{0.8}}{30} \quad (4)$$

La cual queda expresada en unidades de fuerza por unidad de longitud (N/mm), en dónde D es el diámetro del clavo. El parámetro K_2 tiene un valor medio de 42 N/mm, K_3 un valor medio de -87,6 N/mm, P_0 un valor medio de 800 N y Δu_{max} un valor medio de 12,7 mm, obtenidos de [4].

3 Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos. En una primera instancia, con el objetivo de validar el modelo numérico, se comparan los resultados obtenidos con los datos reportados de ensayos experimentales en muros de corte [5]. 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 [5].

A continuación, en la Fig.3, se presenta el resultado de la simulación numérica realizada y la comparación con los datos del ensayo experimental reportado en [5]. En la misma figura 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. Puede observarse una buena aproximación respecto a los valores experimentales reportados.

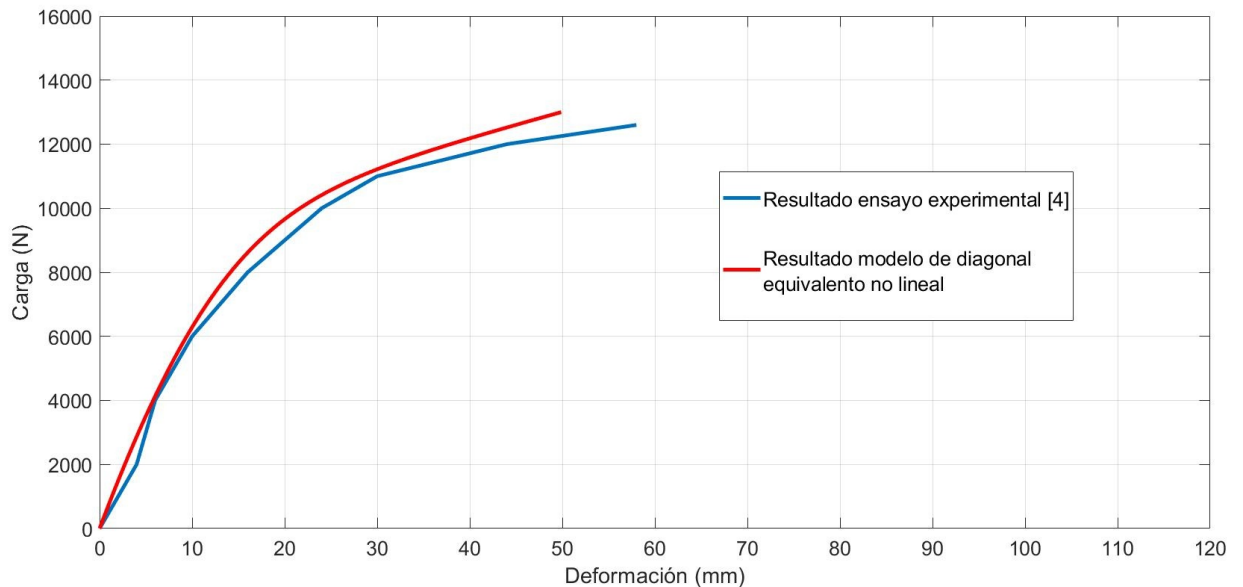


Fig. 3. Comparación de resultados entre ensayo experimental reportado en el trabajo de referencia [5] y el modelo de diagonal equivalente no lineal.

Luego, dado que las propiedades materiales son consideradas en forma estocástica, es necesario en primera instancia determinar la cantidad de simulaciones necesarias para lograr un determinado grado de convergencia de la distribución de probabilidad de la deformación horizontal. Para ello se realizaron hasta 10000 simulaciones de manera progresiva con un paso de 1000 para lograr hallar una convergencia de la distribución de probabilidad de la respuesta a través del estudio de su desvío estándar y de su valor medio. Para el resto de los resultados que se presentan, se realizaron un total de 5000 simulaciones, ya que en este valor logramos una convergencia deseada de la media de deformaciones y el desvío estándar. En la Fig.4, se muestran los histogramas de las deformaciones horizontales obtenidos para diferentes valores de carga. Se puede observar como a medida que aumenta la carga el rango de la respuesta aumenta. Para los primeros valores de carga la deformación horizontal esta gobernada por la flexión del panel, mientras que para las cargas más elevadas se aprecia como el comportamiento no lineal de los medios de unión influye en un mayor rango de respuesta. Predominando las deformaciones de los mismos en la respuesta general del muro.

En la Tabla 1 se presenta un resumen comparativo con los valores estadísticos hallados y los valores de deformación reportados para el ensayo de un muro de corte del trabajo de referencia. Puede observarse que los resultados experimentales se encuentran dentro del rango establecido por el valor medio y el desvío estándar. Además se cuantifican las observaciones enumeradas anteriormente en relación al comportamiento estadístico de los resultados obtenidos.

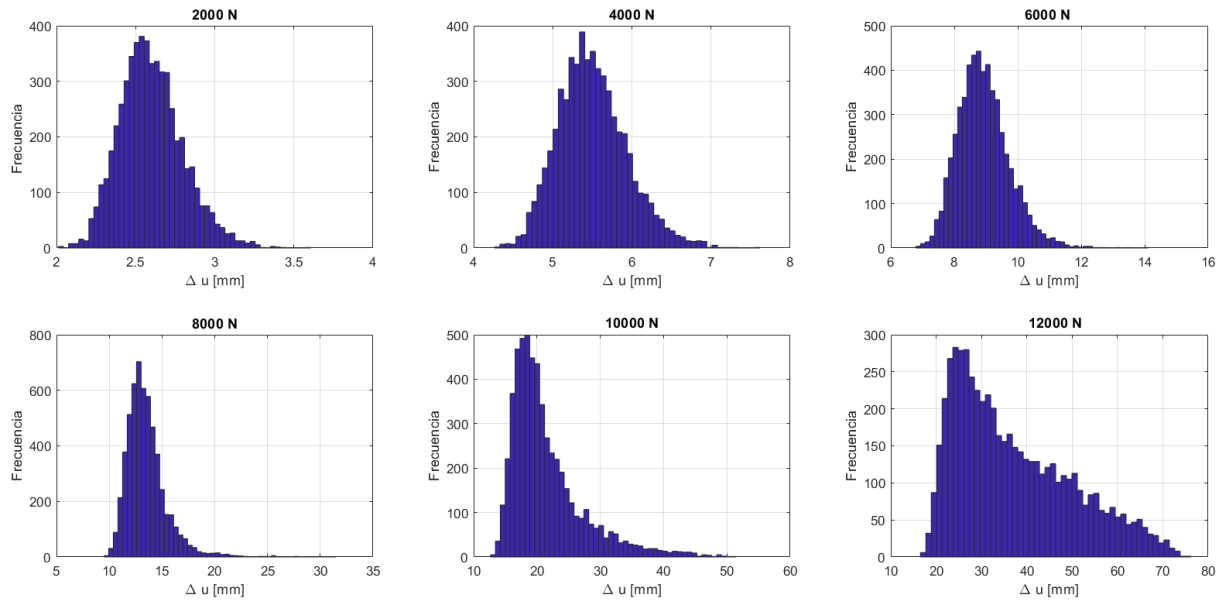


Fig. 4. Histogramas resultantes para cada nivel de carga.

Tabla 1 – Comparación entre valores estadísticos obtenidos en las simulaciones con la deformación experimental reportada en trabajo de referencia para el ensayo de un muro de corte [4].

Carga (N)	Deformación experimental aproximada [4] (mm)	Valor medio simulaciones (mm)	Desvío estándar simulaciones (mm)
2000	4	2,60	0,19
4000	6	5,50	0,43
6000	10	8,92	0,81
8000	16	13,52	1,95
10000	24	21,55	5,84
12000	44	37,16	12,97

4 Conclusiones

Se ha presentado el estudio de las deformaciones horizontales en muros de corte mediante la aplicación del modelo de barras con diagonal equivalente considerando las propiedades materiales de forma estocástica. 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. Los parámetros seleccionados para el

estudio de propagación de incertidumbres son el módulo de elasticidad y la densidad. Ambos están relacionados con la rigidez de los medios de unión utilizados para unir el tablero arriostrante al bastidor del muro. El modelado estocástico de las propiedades materiales permitió aumentar el rango de la respuesta, pudiéndose estimar valores medios y desvíos estándar esperables. Se evidencia que ante niveles elevados de carga las deformaciones tienen un mayor rango de posibles resultados debido a la influencia del comportamiento no lineal de los medios de unión. Mientras que para niveles de cargas bajos la respuesta todavía se encuentra gobernada por la rigidez del bastidor. Se espera aplicar el modelo de barras con propiedades aleatorias a otras configuraciones de diseño de manera tal de contribuir al estudio estructural de este sistema constructivo y permita consolidar el uso de la madera en el ámbito de la construcción en nuestra región. En etapas futuras, se pretende ampliar el rango y la cantidad de variables a ser analizadas de manera tal de optimizar el sistema estructural.

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] García D.A., “Modelo numerico de diagonal equivalente no lineal aplicable al estudio de deformaciones laterales en muros de corte de madera”, XIV Jornadas de Investigación, Desarrollo Tecnológico, Extensión, Vinculación y Muestra de la Producción (JIDETEV), Oberá, Misiones, Argentina, 2024.
- [3] Moroder D., “Floor diaphragms in multi-storey timber building”, PhD thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2016.
- [4] Dolan J.D., “The dynamic response of timber shear walls”, PhD thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canadá, 1989.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Guindos P. “Modelación numérica”, en *Conceptos avanzados del diseño estructural con madera, Parte II*, 1ra edición, Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 2019.
- [8] 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.