

MODELACIÓN NUMÉRICA NO LINEAL DE MUROS DE CORTE DE MADERA SOMETIDOS A CARGAS LATERALES MONOTÓNICAS

NON-LINEAR NUMERICAL MODELING OF TIMBER SHEAR WALLS UNDER MONOTONIC LATERAL LOADS

Alexander I. Opazo ⁽¹⁾, José L. Lopez ⁽²⁾, Gilda E. Espinoza ⁽³⁾, Franco P. Benedetti ⁽⁴⁾ (P)

(1) Mg. Ing. Civil, Profesor Asistente, Universidad del Bío-Bío, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Concepción, Chile

(2) Ing. Civil, Universidad del Bío-Bío, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Concepción, Chile

(3) Mg. Ing. Civil, Profesor Asistente, Universidad del Bío-Bío, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Concepción, Chile

(4) Mg. Ing. Civil, Profesor Asistente, Universidad del Bío-Bío, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Concepción, Chile

Dirección de contacto: fbenedet@ubiobio.cl; (P) Presentador

Código de identificación: T6-11

Resumen

Este trabajo tiene por objetivo modelar numéricamente el comportamiento de muros de corte de madera sometidos a cargas laterales monotónicas, caracterizando las tipologías de muros más utilizadas en la construcción de viviendas sociales chilenas. Se presentan 5 configuraciones de muros con estructura de madera estructurados en base a pie derechos y revestimiento de paneles de fibras orientadas (OSB) fijada bajo un sistema de clavado específico. Además, se consideran dos sistemas de anclaje a la fundación. Para el ingreso de datos al modelo, se asignaron propiedades específicas a los elementos de conexión tipo clavo, ya sea en la conexión revestimiento-marco y conexión madera-madera, con la finalidad que representen los desplazamientos verticales y horizontales frente a cargas laterales. La validación de los modelos se obtiene a partir de los resultados de ensayos mecánicos de muros de corte de madera publicados por el Instituto Forestal (INFOR). Luego, se determinó que los modelos numéricos son capaces de realizar un análisis estático no lineal. También, se aprecia que al cambiar el sistema de anclaje de fierro estriado a un sistema de pernos y escuadra produce un incremento significativo en la resistencia promedio a la carga lateral. Además, existe un bajo incremento en la capacidad resistente de los muros en sus pies derechos, al pasar de una escuadría menor a una mayor. Por último, no se observa un incremento importante en la resistencia a la carga lateral al aumentar el espesor de la placa de OSB.

Palabras clave: muros de corte de madera; análisis estático no lineal

Abstract

This work numerically model the behavior of timber shear walls subjected to monotonic lateral loads, characterizing the typologies of walls most used in the construction of Chilean social housing. Five configurations of shear walls structured based on studs and OSB panels fixed under a specific nailing pattern. In addition, two systems of anchoring to the foundation are considered. For the modeling, specific properties are assigned to the nail connection elements, in either in the sheathing-to-frame connection and timber-to-timber connection, in order to represent the vertical and horizontal displacements under lateral loads. The validation of the models is done using mechanical tests of timber shear walls published by the Chilean Forestry Institute. Then, it was determined that the numerical models are capable of performing a non-linear static analysis. In addition, it can be seen that changing the grooved iron anchors to a bolt and bracket system, a significant increase in the average resistance to lateral loading is obtained. Besides, there is a low increase in the capacity of the walls on their studs, when moving from a minor to a larger size. Finally, there is no significant increase in lateral load resistance by increasing the thickness of the OSB plate.

Keywords: timber shear walls; non-linear pushover analysis

1. INTRODUCCIÓN

Los muros de corte tienen un rol fundamental en el control de desplazamientos y de daño en los sistemas sismorresistentes. En el caso de las estructuras de marcos de madera, los muros están compuestos por el ensamble de piezas de madera (pies derechos y soleras), un tablero de recubrimiento, y conectores que los vinculan.

Debido a la escasa información existente en Chile respecto del comportamiento mecánico de las viviendas con estructura de madera, particularmente sobre la capacidad de los muros estructurales; el Instituto Forestal, junto con el apoyo de la División Técnica del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, realizaron una serie de ensayos para caracterizar las tipologías de muros de madera más utilizadas en las construcciones de viviendas que cuentan con financiamiento del Estado de Chile [1]. El propósito de estos ensayos fue investigar la influencia de distintas variables asociadas a la resistencia lateral máxima de los muros. De esta forma, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) podría generar recomendaciones constructivas y modificaciones a las especificaciones técnicas de viviendas sociales de madera.

Si bien la forma más rigurosa de caracterizar mecánicamente los elementos estructurales es por medio de ensayos mecánicos, se ha demostrado que el análisis y modelamiento numérico de muros de corte de marcos de madera son capaces de reproducir el comportamiento ni lineal [2, 3], siempre que se disponga de parámetros calibrados con datos experimentales. De esta forma, los modelos numéricos representan una opción viable para ahorrar tiempo y dinero en futuros experimentos mecánicos de muros de corte de marcos de madera.

Este trabajo presenta un procedimiento para el modelamiento numérico de la respuesta no lineal de muros de corte de madera sometido a cargas laterales monotónicas, cuyos resultados son validados respecto de los ensayos experimentales ejecutados en Chile. Los modelos se implementan por medio del método de los elementos finitos en el software SAP2000 [4]. Se logra reproducir el comportamiento no lineal de los muros, obteniendo un buen ajuste entre los resultados experimentales y numéricos, lo que sugiere que se puede lograr un mejor entendimiento de su comportamiento en referencia a la carga-desplazamiento y así poder determinar cuáles son las variables más influyentes en la capacidad de resistir cargas laterales.

2. ENSAYOS EXPERIMENTALES DE MUROS

Los ensayos mecánicos fueron realizados en el Laboratorio del Área de Ingeniería Estructural del Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción de la Universidad del Bío-Bío (CITEC UBB) por solicitud del Instituto Forestal (INFOR) y el Ministerios de Vivienda y Urbanismo de Chile (MINVU) [1].

Se ensayan bajo carga horizontal monotónica cinco configuraciones de muros estructurales utilizadas en la construcción de viviendas sociales en Chile, los que se describen en la Tabla 1. Todos los muros ensayados son de 1,22m de ancho y 2,44m de alto, sin cadenetas y con un espaciamiento de 600mm entre pies derechos. La placa arriostrante de OSB se dispone en una cara del muro y es fijada con clavos helicoidales de 2" distanciados en la zona perimetral a 10cm y en la zona central a 20cm. Los pies derechos y soleras son de madera aserrada de pino radiata impregnado y seco con grado estructural G2. La unión entre pie derecho y solera se realiza por medio de 2 clavos. La configuración general del ensayo se presenta en la Figura 1. Los sistemas de anclaje evaluados se muestran en la Figura 2.

Los ensayos se ejecutan según lo dispuesto en la normativa chilena [5]; considerando además lo siguiente:

- No se restringió el desplazamiento vertical del panel en la zona de aplicación de carga.
- Por cada tipología constructiva se evaluaron 5 probetas, dando un total de 25 ensayos.
- La carga horizontal se aplicó monotónicamente de manera continua hasta la falla.

Tabla 1: Tipologías de muros ensayados

Nombre	Estructura	Placa de revestimiento	Sistema de anclaje
ME-2x3-9	Madera aserrada de 45x69mm (2x3”).	OSB de 9,5mm.	2 Espárragos de barra de acero estriado 8mm.
MP-2x3-9	Madera aserrada 45x69mm (2x3”).	OSB de 9,5mm.	2 Pernos de anclaje zincados de 3/8” grado 2 con escuadra Simpson A66.
MP-2x3-11	Madera aserrada 45x69mm (2x3”).	OSB de 11,1mm.	2 Pernos de anclaje zincados de 3/8” grado 2 con escuadra Simpson A66.
MP-2x4-9	Madera aserrada 45x94mm (2x4”).	OSB de 9,5mm.	2 Pernos de anclaje zincados de 3/8” grado 2 con escuadra Simpson A66.
MP-2x4-11	Madera aserrada 45x94mm (2x4”).	OSB de 11,1mm.	2 Pernos de anclaje zincados de 3/8” grado 2 con escuadra Simpson A66.



Figura 1: Configuración del muro ensayado



a) Anclaje escuadra con perno



b) Anclaje de barra de acero estriado

Figura 2: Sistemas de anclaje evaluados

3. MEF DE LOS MUROS DE CORTE

En esta sección se describe la metodología utilizada para modelar los muros de corte de madera, incluyendo argumentos de discretización, elección de elementos y sus respectivas asignaciones de propiedades. Se construyen 5 modelos con los mismos detalles constructivos que los muros ensayados, para lo cual se utiliza el software comercial SAP2000 [4].

3.1 Construcción del modelo

La Figura 3 muestra un esquema del modelo con sus dimensiones respectivas, se indican los elementos finitos y los elementos de la estructura física del muro, como se mostró en la Figura 1.

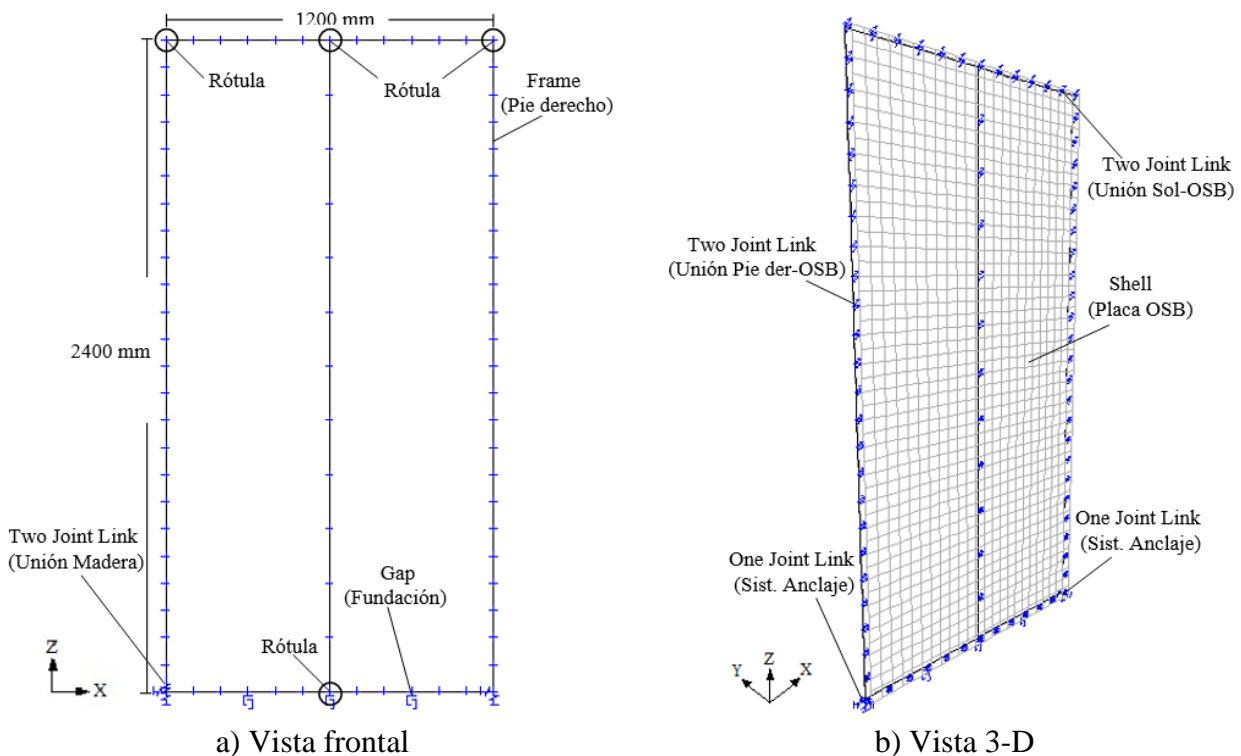


Figura 3: Modelo de elementos finitos

Los elementos físicos que conforman el muro de corte, así como sus respectivos elementos finitos y el detalle de las propiedades no lineales asignadas a cada uno de éstos se resumen en la Tabla 2.

El revestimiento se modela como elemento Shell con propiedades ortotrópicas y consiste en 1152 placas de OSB de 50x50mm. El mallado de placa se utiliza para hacer coincidir los nodos necesarios de cada cuadrilátero con la ubicación de los clavos que lo conectan al bastidor y entregar un análisis de procesos más detallado.

3.2 Conexión entre tablero de revestimiento y madera

La unión entre el revestimiento y el marco de madera es determinante en el comportamiento estructural del muro frente a solicitaciones externas, ya que es ésta unión la que permite que la placa de OSB pueda trabajar en conjunto con el marco o bastidor de madera [6].

Experimentalmente, se ha determinado que los clavos presentan un comportamiento no lineal [7]. Lo anterior debido a que el marco de madera falla en forma frágil, por lo tanto es necesario asegurar la ductilidad del muro revestido mediante apropiados espaciamentos y dimensiones de los clavos que conectan ambos elementos de madera. Con esto se pretende que la falla en el muro se deba al

aflojamiento de los clavos, en lugar que ocurra en la madera y que se puedan producir cortes en la placa de OSB o en el bastidor [8].

La conexión revestimiento-madera fue modelada por elementos Two-Joint Link de tipo Multilinear Elastic. En el modelo se considera que el comportamiento no lineal de los clavos es distinto frente a cargas laterales paralelas y perpendiculares a la fibra de la madera, y que la rigidez rotacional de los clavos es nula.

Tabla 2: Detalles modelo de elementos finitos

Elemento Físico	Tipo	Elemento Finito	Propiedades Mecánicas
Marco de madera (G2)	Pie derecho	Frame	$E = 89000 \text{ kg/cm}^2$; $\nu = 0,3$
	Soleras		
Revestimiento	OSB 9,5 mm	Shell ortotrópico	$E_1 = 14666 \text{ kg/cm}^2$; $E_2 = 37332 \text{ kg/cm}^2$ $\nu = 0,3$; $G = 6200 \text{ kg/cm}^2$
	OSB 11,1 mm		$E_1 = 8396 \text{ kg/cm}^2$; $E_2 = 35264 \text{ kg/cm}^2$ $\nu = 0,3$; $G = 8300 \text{ kg/cm}^2$
Conexión Tablero-Madera	Pie derecho-OSB, Solera-OSB	Two Joint Link	Determinado por curvas carga-desplazamiento
Conexión Madera-Madera	Escuadra	Two Joint Link	Determinado por curvas carga-desplazamiento
	Clavos		
Sistema de Anclaje	Pernos	One Joint Link	Determinado por curvas carga-desplazamiento
	Barra estriada		
Fundación	Fundación	One Joint Link (gap)	$K = 106000 \text{ kg/cm}$

El comportamiento del clavo en dirección perpendicular a la fibra se determina de acuerdo a los ensayos realizados por [9]. La propiedad del resorte que define el comportamiento perpendicular a la fibra de la madera está representada por una curva carga-desplazamiento, como lo muestra el gráfico de la Figura 4. Cabe destacar que la curva de color rojo es una curva representativa de las 10 probetas ensayadas.

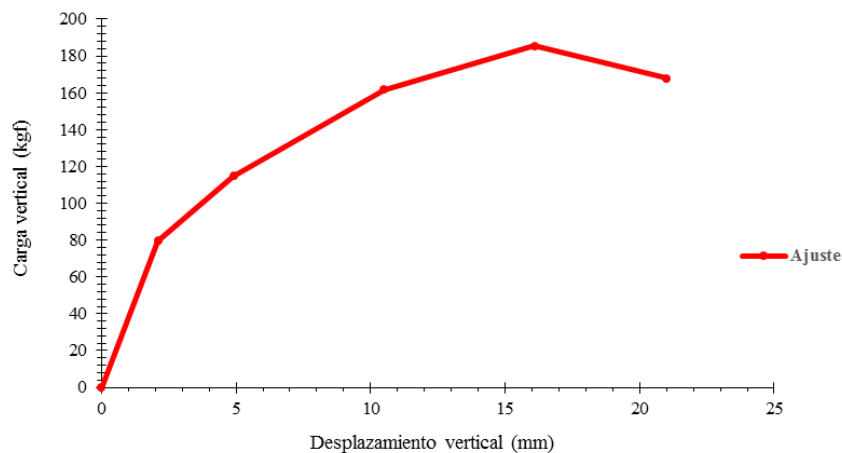


Figura 4: Curva constitutiva para conector tablero OSB-madera en dirección perpendicular a la fibra

La relación fuerza desplazamiento que define su comportamiento del conector revestimiento-madera en dirección paralela a la fibra se determina en base a las pruebas realizadas en [6]. La constitutiva que define el comportamiento paralelo a la fibra de la madera está representada en la Figura 5, la que es representativa del total de las 10 probetas ensayadas.

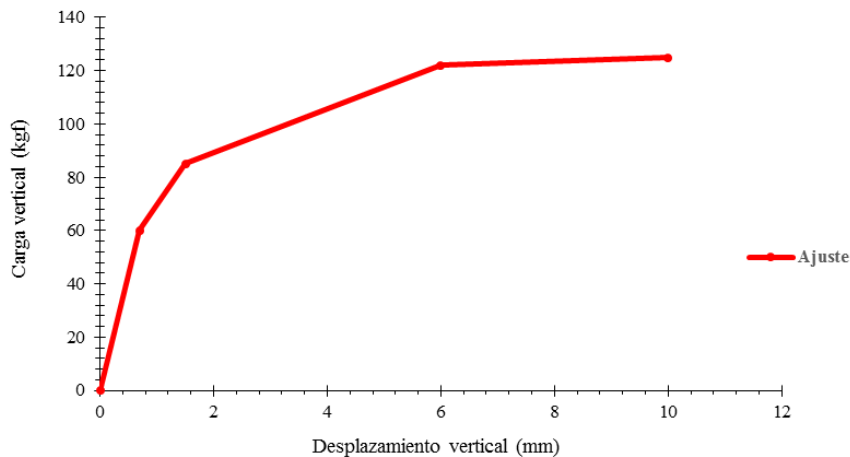


Figura 5: Curva constitutiva para conector tablero OSB-madera en dirección paralela a la fibra.

3.3 Conexión madera-madera

La conexión madera-madera representa la unión entre pies derechos y soleras. Las conexiones madera-madera fueron modeladas aproximadamente a través de uniones tipo rótula por su baja capacidad para transmitir momento y no presentar una gran resistencia al giro de las piezas de madera.

Las conexiones externas entre la solera inferior y los pies derechos se modelan por elementos tipo Two-Joint Link de tipo Multilinear Elastic con propiedades no lineales y consisten en representar el efecto del desclavado del pie derecho exterior con la solera inferior debido a la tracción producida por las cargas laterales.

La asignación de propiedades mecánicas de la unión madera-madera está determinada por el sistema de anclaje al cual está sometido el muro de corte. Si bien en el sistema de barras estriadas y en el sistema de pernos y escuadra los pies derechos y soleras están unidos por dos clavos, en este último sistema de anclaje, es la escuadra la que refuerza la conexión pie derecho-solera sumándose a los clavos, aumentando la rigidez inicial y la capacidad a la extracción directa que en el sistema de barra estriada.

Para el sistema de pernos y escuadra, la constitutiva multilineal queda representada por una curva carga-desplazamiento obtenida en un ensayo de herrajes realizado en la Universidad del Bío-Bío (UBB). De la curva en tracción obtenida por el ensayo, se conservan los desplazamientos y se disminuye la capacidad resistente por un factor de ajuste debido a una diferencia de rigidez en la escuadra ensayada y la implementada en este estudio. Además, se le agrega una curva en compresión que considera el índice de aplastamiento normal a la fibra de la madera. El gráfico de la Figura 6 muestra la propiedad asignada.

Para el sistema de barras estriadas, la respuesta no lineal está representada por una curva carga-desplazamiento obtenida de los ensayos realizados en [2]. Se agrega también una curva en compresión que considera el índice de aplastamiento a la fibra de la madera. La propiedad asignada a la conexión se muestra en la Figura 7.

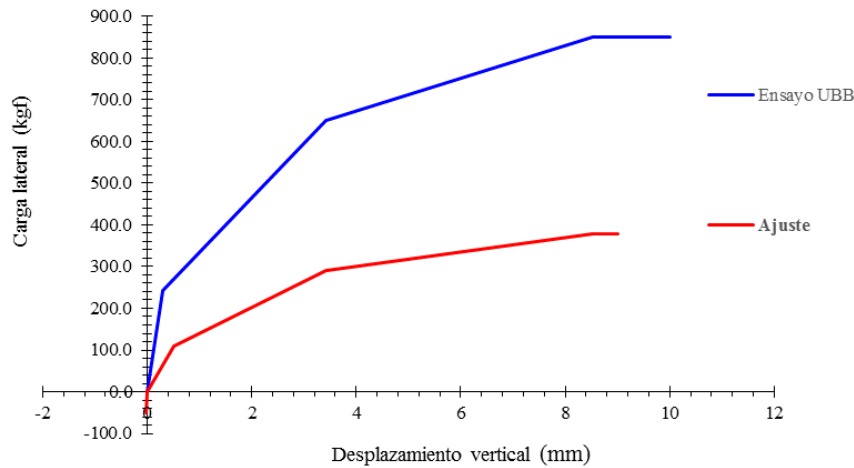


Figura 6: Curva constitutiva para extracción directa de conector madera-madera en sistema de anclaje escuadra-perno

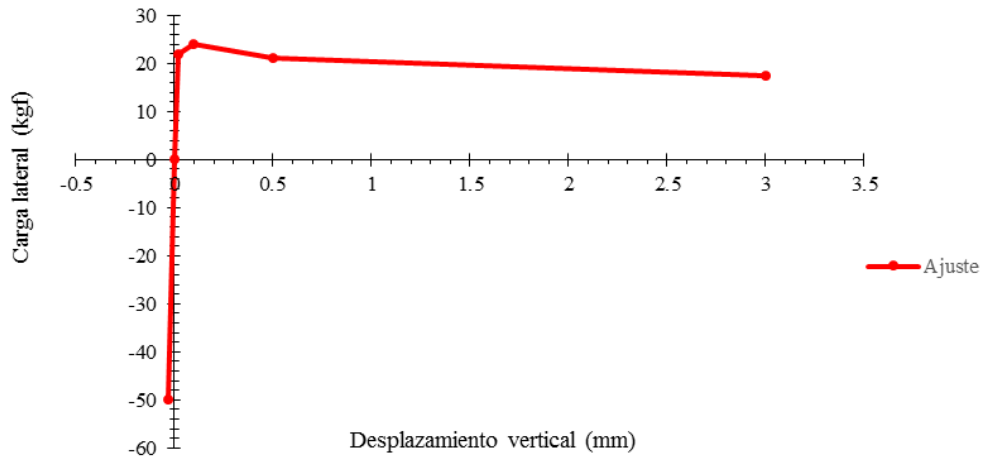


Figura 7: Curva constitutiva para extracción directa de conector madera-madera en sistema de anclaje de barra estriada

3.4 Conexión del sistema de anclaje

El sistema de anclaje del muro a la fundación aporta rigidez al muro al impedir la flexión de la solera inferior y el levantamiento producido por la tracción generada por las cargas laterales.

La conexión sistema de anclaje está modelado por elementos One-Joint Link tipo Multilinear Elastic con propiedades no lineales que definen el comportamiento de deformación de los sistemas de anclajes para el deslizamiento y el levantamiento. Las propiedades del sistema de anclaje de barra estriada y de pernos y escuadra están representadas por curvas carga-desplazamiento que se obtienen directamente de los ensayos de los muros, por medio de un análisis de equilibrio entre la fuerza horizontal y las reacciones horizontales y verticales en los apoyos, y de los registros de desplazamiento.

4. RESULTADOS

En este capítulo se exponen los resultados de los muros de corte de madera modelados y calibrados en el software computacional SAP2000 mediante un análisis estático no lineal de elementos finitos.

4.1 Ajuste de los modelos

La calidad de los modelos es evaluada por medio de su capacidad para reproducir las curvas carga-desplazamiento obtenida en los ensayos mecánicos ejecutados en [1]. La comparativa entre las curvas de capacidad obtenidas por el modelo y los ensayos de cada configuración de muro se presentan desde la Figura 8 a la Figura 12.

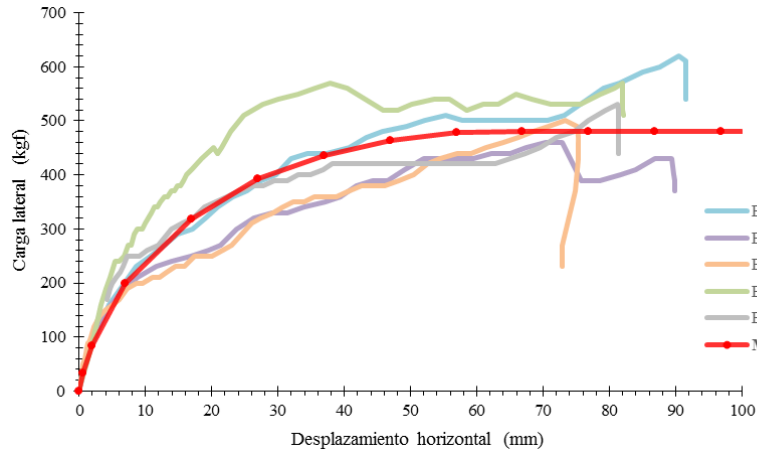


Figura 8: Curva de capacidad para muro ME-2x3-9

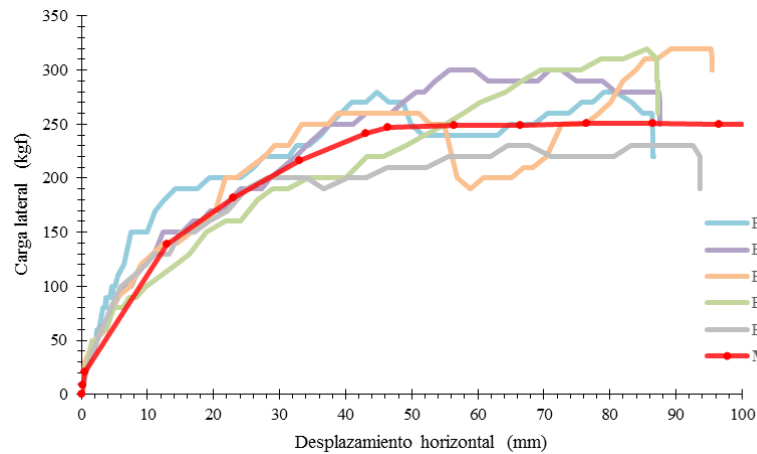


Figura 9: Curva de capacidad para muro MP-2x3-9

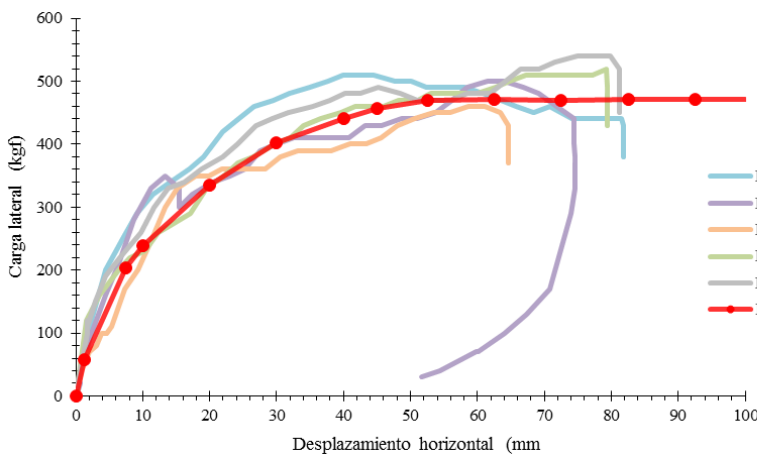


Figura 10: Curva de capacidad para muro MP-2x3-11

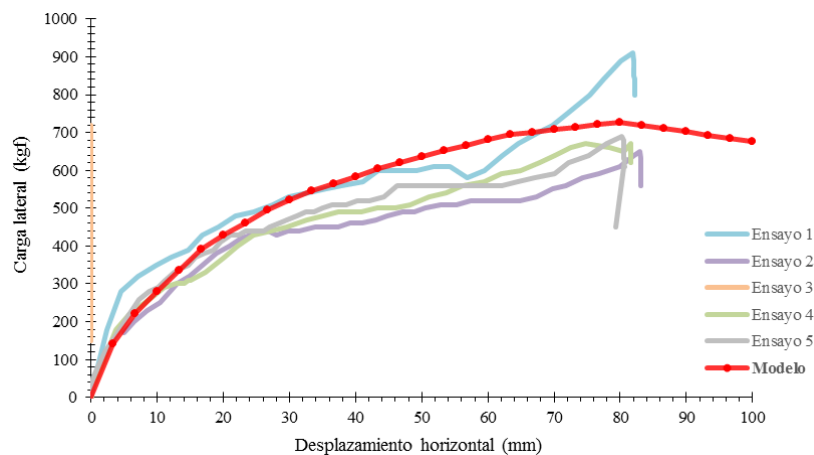


Figura 11: Curva de capacidad para muro MP-2x4-9

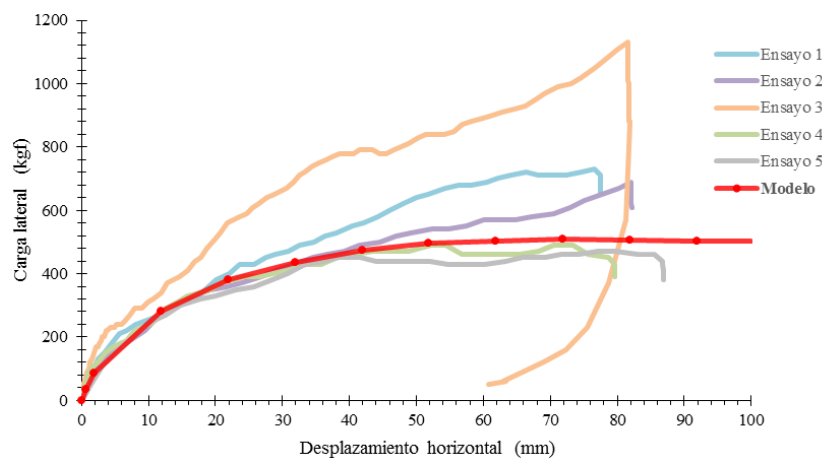


Figura 12: Curva de capacidad para muro MP-2x4-11

Se observa que existe similitud entre las curvas obtenidas del modelo y las curvas de los ensayos, pero para el muro MP-2x4-11 el ajuste es pobre debido a la elevada dispersión de los resultados experimentales.

La Tabla 3 resume las cargas máximas y sus los respectivos desplazamientos obtenidos por los modelos y por los ensayos mecánicos, donde estos últimos corresponde al promedio de las 5 repeticiones de cada ensayo.

Tabla 3: Resumen de comparativa resultados

Configuración de muro	Propiedad	Modelo	Promedio Ensayos	% Diferencia
ME-2x3-9	Carga última (kg)	250.8	290.0	13.5%
	Desplazamiento a Carga última (mm)	76.4	74.3	2.8%
MP-2x3-9	Carga última (kg)	481.0	536.0	10.3%
	Desplazamiento a Carga última (mm)	76.9	78.1	1.5%
MP-2x3-11	Carga última (kg)	470.5	506.0	7.0%
	Desplazamiento a Carga última (mm)	62.5	60.0	4.2%
MP-2x4-9	Carga última (kg)	508.1	702.0	27.6%
	Desplazamiento a Carga última (mm)	71.9	75.6	4.9%
MP-2x4-11	Carga última (kg)	508.7	728.0	30.1%
	Desplazamiento a Carga última (mm)	80.3	79.3	1.3%

En general, se tiene buen ajuste entre los resultados del modelo y de los ensayos, tanto en términos de Carga última como de su desplazamiento, en particular para los muros con escuadrías de 2x3, mientras que, para los muros con piezas de mayor sección, la calidad del ajuste se hace menor, lo que se debe a la validez de las condiciones de modelación, particularmente para las conexiones maderamadera.

4.2 Análisis de resultados

Según la información entregada por los modelos numéricos, al comparar la tipología de muro ME-2x3-9 con MP-2x3-9 se puede apreciar una diferencia significativa, ya que el cambio de sistema de anclaje de fierros estriados a un sistema de anclaje de pernos y escuadra permitió un incremento del 92% en la resistencia promedio a la carga lateral, mientras que en los ensayos mecánicos se observa un incremento de 85%. La Tabla 4 resume lo anterior e indica el porcentaje de diferencia entre las capacidades de los muros modelados y los ensayados.

Tabla 4: Influencia del sistema de anclaje en la capacidad última

Método	Tipología	Carga última (kg)	Incremento	Diferencia
Ensayo	ME-2x3-9	290.0	85%	7%
	MP-2x3-9	536.0		
Modelo	ME-2x3-9	250.8	92%	
	MP-2x3-9	481.0		

Por otro lado, en los resultados obtenidos por los modelos se observan los valores de las tipologías con sistema de anclaje de pernos y escuadras (MP-2x3-9, MP-2x3-11, MP-2x4-9 y MP-2x4-11) y se aprecia una pequeña influencia de la escuadría de los pies derechos en la capacidad resistente de los muros, donde la escuadría 2x4 (45x94 mm.) presenta valores entre un 6% y 8% mayores a las tipologías con escuadría de 2x3 (45x69 mm.). En cambio, en los ensayos mecánicos se nota una clara influencia de la escuadría de mayor dimensión, con valores entre 31% y 44% superiores a la escuadría menor. La Tabla 5 indica la influencia en la capacidad de resistencia al cambio de escuadría

Tabla 5: Influencia de la escuadría de los pies derechos en la capacidad última

Método	Tipología	Carga última (kg)	Incremento	Diferencia
Ensayo	MP-2x3-9	536.0	31%	25%
	MP-2x4-9	702.0		
Modelo	MP-2x3-9	481.0	6%	
	MP-2x4-9	508.1		
Ensayo	MP-2x3-11	506.0	44%	36%
	MP-2x4-11	728.0		
Modelo	MP-2x3-11	470.6	8%	
	MP-2x4-11	508.7		

Además, tanto para los muros modelados como para los ensayados se determina que al aumentar el espesor de la placa de OSB de 9,5 mm. a 11,1 mm. no se observa un incremento importante en la resistencia a la carga lateral entre las tipologías de muros de una misma escuadría. La Tabla 6 indica la influencia en el comportamiento del muro al cambiar de espesor de placa OSB.

Tabla 6: Influencia del espesor de la placa de revestimiento de OSB en la capacidad última

Método	Tipología	Carga última (kg)	Incremento	Diferencia
Ensayo	MP-2x3-9	536.0	6%	4%
	MP-2x3-11	506.0		
Modelo	MP-2x3-9	481.0	2%	
	MP-2x3-11	470.6		
Ensayo	MP-2x4-9	702.0	4%	4%
	MP-2x4-11	728.0		
Modelo	MP-2x4-9	508.1	0%	
	MP-2x4-11	508.7		

Finalmente, en los modelos numéricos se observa que los desplazamientos máximos horizontales asociados a las cargas máximas horizontales no presentaron diferencias significativas entre las configuraciones de muro modeladas. Se observaron valores que variaron entre los 63 mm y 80mm. Similares valores se obtuvieron en los ensayos, cuyos desplazamientos varían entre 60 mm y 79mm.

5. CONCLUSIONES

El modelo de elementos finitos desarrollado puede realizar un análisis estructural estático no lineal de muros de corte de madera y predecir un comportamiento mostrado por los muros de corte ensayados.

Los resultados sugieren que el modelo logra capturar el efecto de cambio de sistema de anclaje de barra estriada a un sistema de pernos y escuadra, ya que se registra un incremento de un 92% en la resistencia promedio a la carga lateral, en comparación al 85% de incremento en la resistencia que arrojaron los ensayos mecánicos. Por el contrario, el modelo no logra representar de forma correcta el efecto de pasar de una escuadría de 2x3” a una de 2x4”, ya que mientras los ensayos mecánicos registran un 31% y un 44% de incremento en la capacidad resistente de los muros en cada caso, el modelo sólo alcanza a generar un incremento del 6% y 8%.

La baja similitud entre los ensayos y los modelos se debe principalmente a que la unión entre pies derechos y solera fue modelada como rótula, lo cual en la realidad no es válido. El modelo al no tener rigides en los encuentros madera-madera actúa como un mecanismo con articulaciones, por lo que frente a la carga lateral actuante, no se replica adecuadamente la influencia del tamaño de las secciones de las piezas de madera.

Durante la etapa de calibración se logró determinar que la propiedad no lineal asignada a la conexión tablero-madera afecta fuertemente a la respuesta del muro de corte. La conexión tablero-madera influye directamente en la capacidad última, pudiendo controlar la carga y el desplazamiento máximo del muro, por lo que para una mayor precisión en la predicción de los modelos, mayor precisión tiene que asignarse a la propiedad. No obstante, el estado último del muro está más controlado por el sistema de anclaje que por el conector tablero-madera.

Por último, no se observa un incremento importante en la resistencia a la carga lateral al aumentar el espesor de la placa de OSB.

REFERENCIAS

- [1] Vásquez, L., Hernández, G., Campos, R. y González, M. ‘Caracterización mecánica de muros estructurales de madera’, Informe técnico N°191, Instituto Forestal (INFOR), Chile (2012).
- [2] Mi, H. ‘Behavior of unblocked wood shearwalls’. Tesis para obtener el grado de Magíster en Ciencias, The University of New Brunswick, Canada (2004).
- [3] Yuen Loo, W., Quenneville, P. y Chouw, N. ‘A numerical approach for simulating the behaviour of timber shear walls’. Informe técnico. Departament of Civil and Environmental Engineering, The University of Auckland, Nueva Zelanda (2012).
- [4] ‘SAP2000, versión 14.0: *Analysis reference manual*’. Computer and Estructures, Inc. (2009).
- [5] Instituto Nacional de Normalización. ‘Arquitectura y construcción. Paneles prefabricados. Ensayo de carga horizontal’ Norma chilena NCh. 802.Eof 71, Chile (1971).
- [6] Rademacher, F. ‘Análisis de vulnerabilidad estructural de muros en base a paneles de madera, reforzados con placa OSB, frente a cargas horizontales en su plano’. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil en Obras Civiles, Universidad Austral de Chile, Chile (2006).
- [7] Canales, V. y Gutiérrez, G. ‘Análisis no lineal de muros de madera mediante modelos de elementos finitos’. Memoria para obtener el título de Ingeniero Civil en Obras Civiles. Universidad de Santiago de Chile, Chile (1994).
- [8] Carvallo, V. ‘Antecedentes Básicos sobre el comportamiento estructural de diafragmas verticales solicitados por cargas horizontales inducidas en su Plano’. Instituto Forestal (INFOR), Chile (1989).
- [9] Leiva, J. y Vilches P. ‘Comportamiento de muros de corte de madera rigidizados mediante tablero de contrachapado bajo la acción de carga horizontal estática y cíclica combinada con carga vertical en su propio plano’. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias, Universidad de Santiago de Chile, Chile (1996).