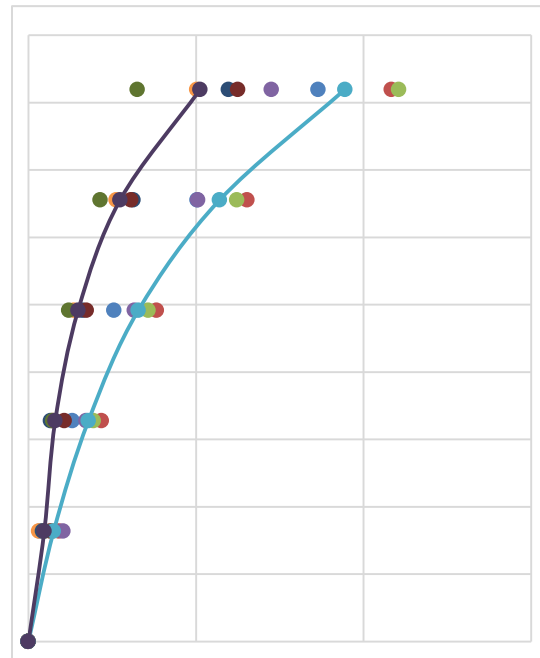


CARACTERIZACIÓN MECÁNICA Y DISEÑO ANALÍTICO DE MUROS ESTRUCTURALES DE MADERA SOMETIDOS A CARGAS LATERALES



**INSTITUTO FORESTAL
2016**

INSTITUTO FORESTAL
ÁREA DE TECNOLOGÍA Y PRODUCTOS DE LA MADERA

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA Y DISEÑO ANALÍTICO DE MUROS ESTRUCTURALES DE MADERA SOMETIDOS A CARGAS LATERALES

Autores

Luis Vásquez V.¹
Gonzalo Hernández C.²
Raúl Campos P.³
Patricio Elgueta M.⁴
Marcelo González R.⁵
Jorge Catalán L.⁶

¹ Instituto Forestal. luis.vasquez@infor.cl

² Instituto Forestal. gonzalo.hernandez@infor.cl

³ Instituto Forestal. raul.campos@infor.cl

⁴ Instituto Forestal. patricio.elgueta@infor.cl

⁵ Instituto Forestal. marcelo.gonzalez@infor.cl

⁶ Instituto Forestal. jorge.catalan@infor.cl



INFOR

INSTITUTO FORESTAL - Chile 2016

Caracterización mecánica y diseño analítico de muros estructurales
de madera sometidos a cargas laterales

Informe Técnico N°210

Área Tecnología y Productos de la Madera, INFOR, Sede Bio Bio.

Estudio financiado por el Contrato de Desempeño INFOR-MINAGRI 2016.

www.infor.cl

www.construccionenmadera.cl

PRÓLOGO

Debido a la poca información existente en el país sobre el comportamiento mecánico de las viviendas con estructura de madera, particularmente sobre la capacidad de los muros estructurales; el Instituto Forestal ha venido ejecutando una serie de ensayos mecánicos en esta línea.

En este informe se exponen los resultados de los ensayos mecánicos de carga lateral aplicados a 8 tipologías de muros utilizados en el sistema constructivo plataforma. Estas tipologías contemplan 2 configuraciones de clavado exterior (100mm y 150mm), 2 espesores de la placa OSB (9,5 y 11,1 mm) y 2 grados visuales estructurales (G1 y G2).

Se incluye una comparación entre el promedio de las cargas máximas obtenidas en los ensayos mecánicos con las capacidades admisibles generadas a partir de una metodología analítica basada en el Código Europeo 5, método A, y NCh1198 para la capacidad a extracción lateral de uniones cilíndricas para la conexión placa madera.

Todos los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Madera Estructural del Instituto Forestal (LME-INFOR), que cuenta con un sistema de gestión acreditado bajo la norma NCh-ISO 17025.

Los antecedentes entregados en el informe técnico tienen por objetivo ser un texto de consulta para arquitectos, ingenieros, constructores y estudiantes de carreras técnicas y universitarias relacionadas con el área de la construcción.

La presente publicación “Caracterización mecánica y diseño analítico de muros estructurales de madera sometidos a cargas laterales”, fue financiada con recursos provenientes de convenio 2016, suscrito entre Ministerio de Agricultura (MINAGRI) y el Instituto Forestal (INFOR).

Participaron en este estudio los profesionales y técnicos del Área de Tecnología y Productos de la Madera del INFOR señores Luís Vásquez Valenzuela, Gonzalo Hernández Careaga, Patricio Elgueta Muñoz, Raúl Campos Pous, Marcelo González Retamal, y Jorge Catalán Linco.

ÍNDICE

1. METODOLOGÍA.....	1
1.1 Tipologías de muros con estructura de madera	1
1.2 Metodología de ensayo a carga horizontal.....	2
1.3 Metodología analítica para estimar la capacidad a carga lateral de muros de madera	3
1.3.1 Capacidad a carga lateral de muros, basado en Código Europeo 5, método A	3
1.3.2 Capacidad a la extracción lateral de la unión placa-madera, mediante NCh1198	5
2. RESULTADOS	9
2.1 Ensayo de carga horizontal en muros con estructura de madera G1	9
2.2 Ensayo de carga horizontal en muros con estructura de madera G2	13
2.3 Fallas características en los muros de madera ensayados.....	17
2.4 Diseño analítico de muros de madera arriostrados con placa estructural OSB	19
2.4.1 Diseño analítico: Unión placa-madera, según NCh1198.....	19
2.4.2 Diseño analítico: Capacidad a la carga lateral de muros, Código Europeo 5, método A ...	21
2.4.3 Comparación entre la estimación analítica y experimental para la resistencia de carga lateral de muros	22
3. CONCLUSIONES.....	24
4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	25

1. METODOLOGÍA

1.1 Tipologías de muros con estructura de madera

Se sometieron a ensayos de carga horizontal 8 tipologías de muros, considerando 5 repeticiones en cada caso. La descripción de cada una de ellas se presenta en la tabla 1.1.

Las dimensiones de los muros ensayados fue de 1,22 x 2,44 m, considerando 3 pie derechos y 2 soleras (figura 1.1). Todos los muros fueron anclados a una losa de fundación con herraje marca Simpson Strong-Tie modelo HTT4, (figura 1.1).



Figura 1.1: Configuración del muro de madera ensayado y detalle de la conexión muro-fundación.
Fuente: LME INFOR

Tabla 1.1: Tipologías de muros de madera sometidos a ensayos de carga horizontal

Tipología	Estructura	Placa de arriostre	Espaciamiento
M2x4-G1-9-100	Madera 2x4 Pino Radiata estructural G1, aserrada, seca en cámara y pie derechos @600mm	Placa de OSB de 9,5 mm de espesor la zona interior.	Clavos helicoidales de 2", espaciados a 100 mm en el perímetro y 200mm en el interior.
M2x4-G1-11-100	Madera 2x4 Pino Radiata estructural G1, aserrada, seca en cámara y pie derechos @600mm	Placa de OSB de 11,1 mm de espesor la zona interior.	Clavos helicoidales de 2", espaciados a 100 mm en el perímetro y 200mm en el interior.
M2x4-G1-9-150	Madera 2x4 Pino Radiata estructural G1, aserrada, seca en cámara y pie derechos @600mm	Placa de OSB de 9mm de espesor la zona interior.	Clavos helicoidales de 2", espaciados a 150 mm en el perímetro y 300mm en el interior.
M2x4-G1-11-150	Madera 2x4 Pino Radiata estructural G1, aserrada, seca en cámara y pie derechos @600mm	Placa de OSB de 11,1 mm de espesor la zona interior.	Clavos helicoidales de 2", espaciados a 150 mm en el perímetro y 300mm en el interior.
M2x4-G2-9-100	Madera 2x4 Pino Radiata estructural G2, aserrada, seca en cámara y pie derechos @600mm	Placa de OSB de 9mm de espesor la zona interior.	Clavos helicoidales de 2", espaciados a 100 mm en el perímetro y 200mm en el interior.
M2x4-G2-11-100	Madera 2x4 Pino Radiata estructural G2, aserrada, seca en cámara y pie derechos @600mm	Placa de OSB de 11,1 mm de espesor la zona interior.	Clavos helicoidales de 2", espaciados a 100 mm en el perímetro y 200mm en el interior.
M2x4-G2-9-150	Madera 2x4 Pino Radiata estructural G2, aserrada, seca en cámara y pie derechos @600mm	Placa de OSB de 9,5 mm de espesor la zona interior.	Clavos helicoidales de 2", espaciados a 150 mm en el perímetro y 300mm en el interior.
M2x4-G2-11-150	Madera 2x4 Pino Radiata estructural G2, aserrada, seca en cámara y pie derechos @600mm	Placa de OSB de 11,1 mm de espesor la zona interior.	Clavos helicoidales de 2", espaciados a 150 mm en el perímetro y 300mm en el interior.

1.2 Metodología de ensayo a carga horizontal

Todos los ensayos mecánicos de los muros de madera se realizaron en el Laboratorio de Madera Estructural del Instituto Forestal (LME-INFOR). Los equipos utilizados en la ejecución de los ensayos se encuentran incorporados en el sistema de gestión del Laboratorio, acreditado bajo norma NCh-ISO 17025.

El método de ensayo aplicado está descrito en la norma chilena NCh 802.Eof71: Arquitectura y construcción – Paneles prefabricados – Ensayo de carga horizontal; que señala las siguientes consideraciones:

- La restricción horizontal y vertical inferior de los muros se generó a través del anclaje a una viga de fundación.
- Por cada tipología de muro se ensayaron 5 probetas.
- A la primera probeta de cada tipología se le aplicó una carga monotónica hasta la falla, que permite determinar los incrementos de los ciclos de carga en los siguientes ensayos.
- A las cuatro probetas restantes de cada tipología de muro se le aplicaron cargas cíclicas, con un mínimo de 5 incrementos discretos de carga.
- Se registró la deformación bajo carga, la deformación residual permanente que experimentaron los muros una vez retirada la carga, además de la carga de rotura.

1.3 Metodología analítica para estimar la capacidad a carga lateral de muros de madera

La capacidad de carga lateral de un muro de madera puede ser obtenida de manera analítica según el Código Europeo 5, método A. La sección 1.3.1 describe el método de análisis.

1.3.1 Capacidad a carga lateral de muros, basado en Código Europeo 5, método A

El Código Europeo 5, método A, considera los siguientes alcances y supuestos:

a) Alcances

- Los muros deben considerar una placa de arriostre, que se conectan a la fundación por medio de anclajes.
- El espaciamiento de clavos es constante en todo el perímetro de la placa.
- El ancho de cada placa es al menos un cuarto de su altura ($H/4$).

b) Supuestos

- Los muros que contienen una abertura (puerta, ventana) no tienen capacidad de tomar carga lateral o de Racking, solo la transmiten.
- El pandeo por corte corresponde a la tendencia de la placa OSB a doblarse por falta de apoyos a lo largo del muro, que puede evitarse si se cumple la siguiente condición:

$$\frac{b_{net}}{t} \leq 100$$

Dónde:

b_{net} : Distancia entre pie derechos

t : Espesor de la placa de arriostre

El cálculo de la capacidad de carga lateral de un muro de madera ($F_{V,Rd}$) se determina con la siguiente expresión:

|

$$F_{V,Rd} = \sum F_{i,V,Rd}$$

$$F_{i,V,Rd} = \frac{F_{f,Rd} \cdot b_i \cdot C_i}{s}$$

Dónde:

$F_{i,V,Rd}$: Resistencia a la fuerza horizontal de un panel individual
 $F_{f,Rd}$: Capacidad a la extracción lateral de la unión placa madera
 b_i : Ancho del panel individual considerado
 s : Espaciamiento entre conectores
 C_i : Factor de modificación por relación de aspecto

$$C_i = \begin{cases} 1, & b_i \geq \frac{h}{2} \\ \frac{b_i}{b_0}, & b_i < \frac{h}{2} \end{cases}$$

Siendo:

h : Altura del muro
 b_i : Ancho del panel considerado
 b_0 : Ancho total del muro

El Código Europeo 5, método A, señala otras consideraciones que no fueron utilizadas en este estudio, siendo mencionadas a modo informativo:

- $F_{f,Rd}$ podría ser incrementado por un factor de 1.2 si se ubican conectores en todo el perímetro del panel de manera homogénea.
- En muros con diferentes tipos de placas de arriostres en sus caras, se considera $F_{f,Rd} = 75\%$ del lado más débil.

1.3.2 Capacidad a la extracción lateral de la unión placa-madera, mediante NCh1198

La metodología analítica para estimar la capacidad de carga lateral de un muro de madera depende de la capacidad a la extracción lateral de diseño de la unión placa-madera ($F_{f,Rd}$), que se determina mediante indicaciones de la norma chilena de cálculo en madera, NCh1198. La metodología consiste en cuantificar el menor valor del modo de fluencia de la unión de cizalle que condiciona el diseño, que en este caso corresponde a cizalle simple (figura 1.2).

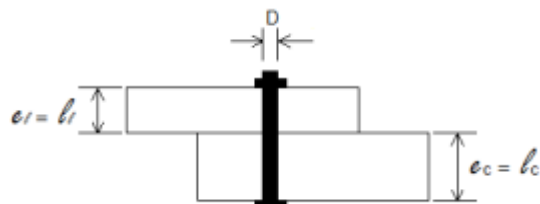
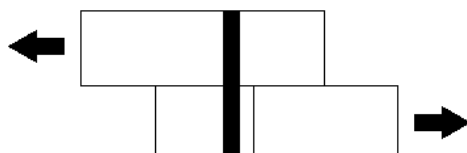


Figura 1.2. Unión de cizalle simple. Fuente: NCh1198

Los modos de fluencia en las uniones a cizalle simple son los siguientes:

- Modo I_c



$$P_{el,ad} = \frac{D \cdot L_c \cdot R_{ap,c}}{FA}$$

- Modo I_l



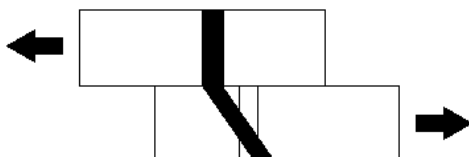
$$P_{el,ad} = \frac{D \cdot L_l \cdot R_{ap,l}}{FA}$$

- Modo II



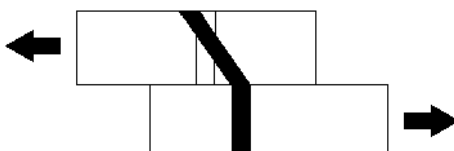
$$P_{el,ad} = \frac{K_1 \cdot D \cdot L_l \cdot R_{ap,l}}{FA}$$

- Modo III_C



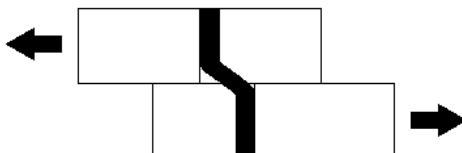
$$P_{el,ad} = \frac{K_2 \cdot D \cdot L_C \cdot R_{ap,c}}{(1 + 2 \cdot R_e) \cdot FA}$$

- Modo III_L



$$P_{el,ad} = \frac{K_3 \cdot D \cdot L_C \cdot R_{ap,c}}{(2 + R_e) \cdot FA}$$

- Modo IV



$$P_{el,ad} = \frac{D^2}{FA} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R_{ap,c} \cdot F_{ff}}{3 \cdot (1 + R_e)}}$$

Dónde:

- $P_{el,ad}$: Capacidad de carga admisible a extracción lateral (N)
- FA : Factor de ajuste
- $R_{ap,c}$: Resistencia al aplastamiento de la pieza central (MPa)
- $R_{ap,l}$: Resistencia al aplastamiento de la pieza lateral, según la tabla 1.4 (MPa)
- F_{ff} : Tensión de fluencia del acero (MPa)
- D : Diámetro del clavo (mm)

La determinación de los factores K se define por las ecuaciones siguientes:

$$K_1 = \frac{\sqrt{R_e + 2R_e^2 \cdot (1 + R_t + R_t^2) + R_t^2 \cdot R_e^3 - R_e \cdot (1 + R_t)}}{1 + R_e}$$

$$K_2 = -1 + \sqrt{2 \cdot (1 + R_e) + \frac{2 \cdot F_{ff} \cdot (1 + 2 \cdot R_e) \cdot D^2}{3 \cdot R_{ap,c} \cdot l_c^2}}$$

$$K_3 = -1 + \sqrt{\frac{2 \cdot (1 + R_e)}{R_e} + \frac{2 \cdot F_{ff} \cdot (2 + R_e) \cdot D^2}{3 \cdot R_{ap,c} \cdot l_c^2}}$$

Dónde R_e y R_t :

$$R_e = \frac{R_{ap,c}}{R_{ap,l}} \quad R_t = \frac{l_c}{l_l}$$

Los factores de ajuste (FA) se definen en la tabla 1.3.

Tabla 1.3: Factores de ajuste (FA)

Diámetro del clavo	Modo de fluencia	FA
6,4 mm ≤ D ≤ 25 mm	I _c , I _L	4K _α
	II	3,6K _α
	III _c , III _L , IV	3,2K _α
D < 6,4mm	I _c , I _L , II, III _c , III _L , IV	K _d

Nota: K_α corresponde a un factor de desangulación de la unión

Según NCh 1198:

- Considerando que el diámetro del clavo utilizado es 2,9 mm, el factor de ajuste para todos los modos de fluencia será $K_d = 2,2$.
- La resistencia al aplastamiento de la pieza central se calcula mediante la siguiente expresión.

$$R_{ap} = 115 \cdot \left(\frac{\rho_0}{1000} \right)^{1.84}$$

Dónde:

ρ_0 : Densidad anhidra media del Pino radiata, 450 kg/m³

- La tensión de fluencia para clavos con D < 6,4 mm se estimada por la siguiente expresión:

$$F_{ff} = 896 - 58D$$

Dónde:

D : Diámetro del clavo utilizado en la unión

Por otra parte, la resistencia al aplastamiento en tableros estructurales, considerado como pieza lateral, se define en la tabla 1.4.

Tabla 1.4: Resistencia al aplastamiento de tableros estructurales

Tablero Estructural	Densidad anhidra media (Ton/m ³)	Resistencia al aplastamiento en pared del agujero (MPa)
Contrachapados Estructural 1, Marino. Otros grados.	0,5	30
	0,42	20
Tableros OSB (todos los grados)	0,5	30

Fuente: Apunte Curso CORFO, Mario Wagner

Como se mencionó previamente, la capacidad a la extracción lateral admisible de la unión placa madera está definida por el menor valor de los modos de fluencia calculados.

$$P_{ad} = \min(I_c, I_l, II, III_c, III_l, IV)$$

La capacidad de diseño de la unión (P_{dis}), equivalente a $F_{f,Rd}$, corresponde a la capacidad admisible, corregida por factores de modificación de resistencia.

$$P_{dis} = P_{ad} \cdot K_D \cdot K_{UH} \cdot K_{UT} \cdot K_u$$

Dónde:

- K_D : Factor de modificación por duración de carga
- K_{UH} : Factor de modificación por contenido de humedad
- K_{UT} : Factor de modificación por temperatura
- K_u : Factor de modificación por longitud de hilera

Para el caso particular de este trabajo, se consideraron unitarios todos los factores de modificación, excepto el de duración de carga (Nota: La madera tiene buen comportamiento frente a cargas de corta duración, como sismo o viento). La norma NCh 1198 permite aumentar la capacidad de carga de la unión por un factor de 1,6. En consecuencia, la capacidad de diseño queda definida de la siguiente manera:

$$P_{dis} = F_{f,Rd} = 1,6 \cdot P_{ad}$$

2. RESULTADOS

2.1 Ensayo de carga horizontal en muros con estructura de madera G1

En la tabla 2.1 se presentan las cargas máximas alcanzadas por las tipologías de muros que ocuparon estructura de madera clasificada G1. La tabla 2.2 registra las deformaciones asociadas a las cargas máximas alcanzadas por los muros.

Las curvas de los ensayos monotónicos realizados a las 4 tipologías de muros se presentan en la figura 2.1. El comportamiento es similar en todos los muros, observando una linealidad en la primera etapa del ensayo, hasta llegar a una zona de fluencia, caracterizada por un aumento progresivo de las deformaciones sin un aumento significativo de la carga. Esto se explica por el trabajo de la unión placa madera, materializada con un clavo de acero.

El rango de resistencia promedio de los muros fabricados con madera G1 varía entre 16.773 (N) y 11.845 (N), atribuido principalmente al espaciamiento entre clavos de la unión placa madera. Esto va en directa relación con el planteamiento del método analítico, que señala que la capacidad y cantidad de uniones es determinante en la capacidad resistente de los muros. Los datos experimentales indican un aumento en la resistencia de los muros al disminuir el espaciamiento de los clavos, de 150 mm a 100 mm, con valores entre un 30 y 40%.

Con respecto a la influencia del espesor de la placa OSB (9,5 y 11,1 mm) en la resistencia del muro, ella no es significativa, independiente del clavado. Por ejemplo, los muros fabricados con espaciamiento de uniones a 100 mm, presentan valores promedio de resistencia de 16.773 (N) y 15.979 (N), respectivamente (4% de diferencia). Análogamente para muros con espaciamiento de uniones a 150 mm, se obtuvo una resistencia promedio de 11.845 y 12.328 (4% de diferencia).

Los resultados de los ensayos cíclicos se muestran en las figuras 2.2 a 2.5. Se observan las deformaciones permanentes experimentadas por los muros para los diferentes estados de carga. Las curvas representan la deformación bajo carga promedio (DBC) y deformación residual promedio (DR), respectivamente.

Tabla 2.1: Carga horizontal máxima, muros G1

Número de ensayo	Carga máxima lateral (N)			
	M2X4-G1-9-100	M2X4-G1-9-150	M2x4-G1-11-100	M2x4-G1-11-150
1	15.439*	12.006	17.265	14.197
2	17.971	12.785	17.484	11.519
3	19.334	11.422	15.630	11.130
4	15.512	10.837	14.757	11.130
5	15.609	12.176	14.757	13.662
Máximo	19.334	12.785	17.484	14.197
Mínimo	15.439	10.837	14.757	11.130
Promedio	16.773	11.845	15.979	12.328
Desviación Estándar	1.783	744	1.325	1.483
Coefficiente de Variación	10,6%	6,3%	8,3%	12,0%

* Muro que presentó falla por tracción en pie derecho

Tabla 2.2: Desplazamiento lateral para la carga horizontal máxima, muros G1

Número de ensayo	Deformaciones máximas (mm)			
	M2X4-G1-9-100	M2X4-G1-9-150	M2x4-G1-11-100	M2x4-G1-11-150
1	55,8	60,03	82,89	78,11
2	77,6	58,59	70,48	59,59
3	91,97	60,15	80,37	59,57
4	73,21	80,22	84,89	61,08
5	89,28	50,73	47,99	60,84
Máximo	91,97	80,22	84,89	78,11
Mínimo	55,8	50,73	47,99	59,57
Promedio	77,6	61,9	73,3	63,8
Desviación Estándar	14,5	10,9	15,2	8,0
Coefficiente de Variación	18,7%	17,6%	20,7%	12,5%

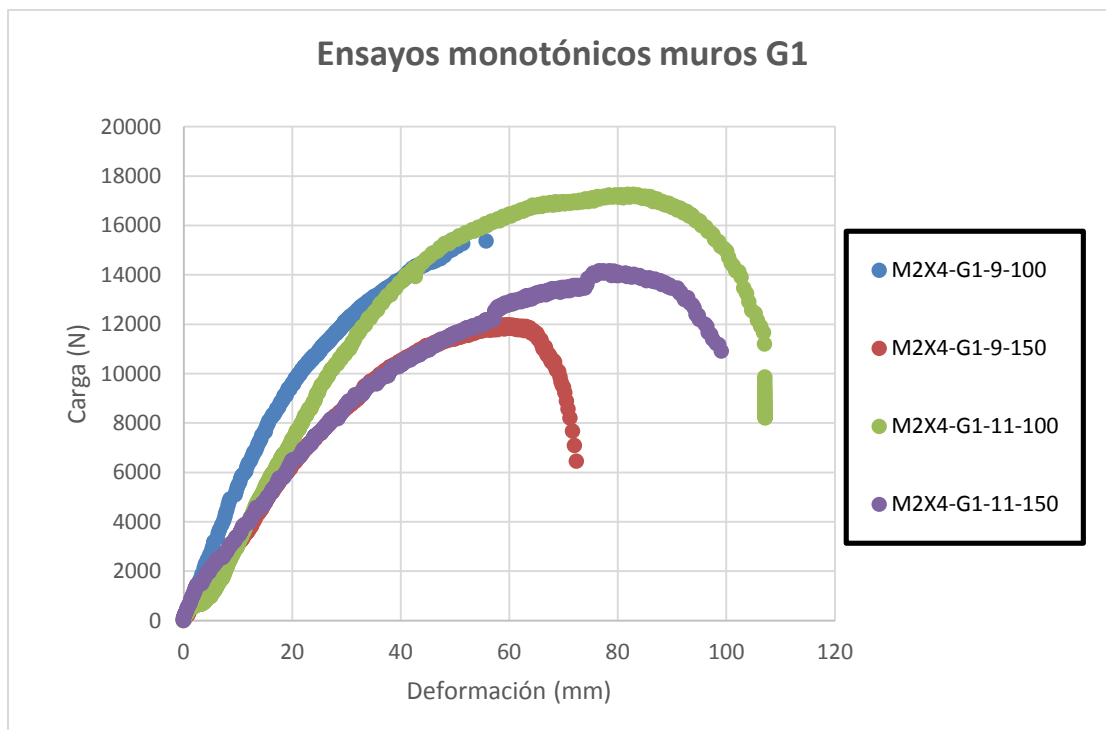


Figura 2.1: Gráfico carga-desplazamiento del ensayo carga horizontal monotónica, muros G1

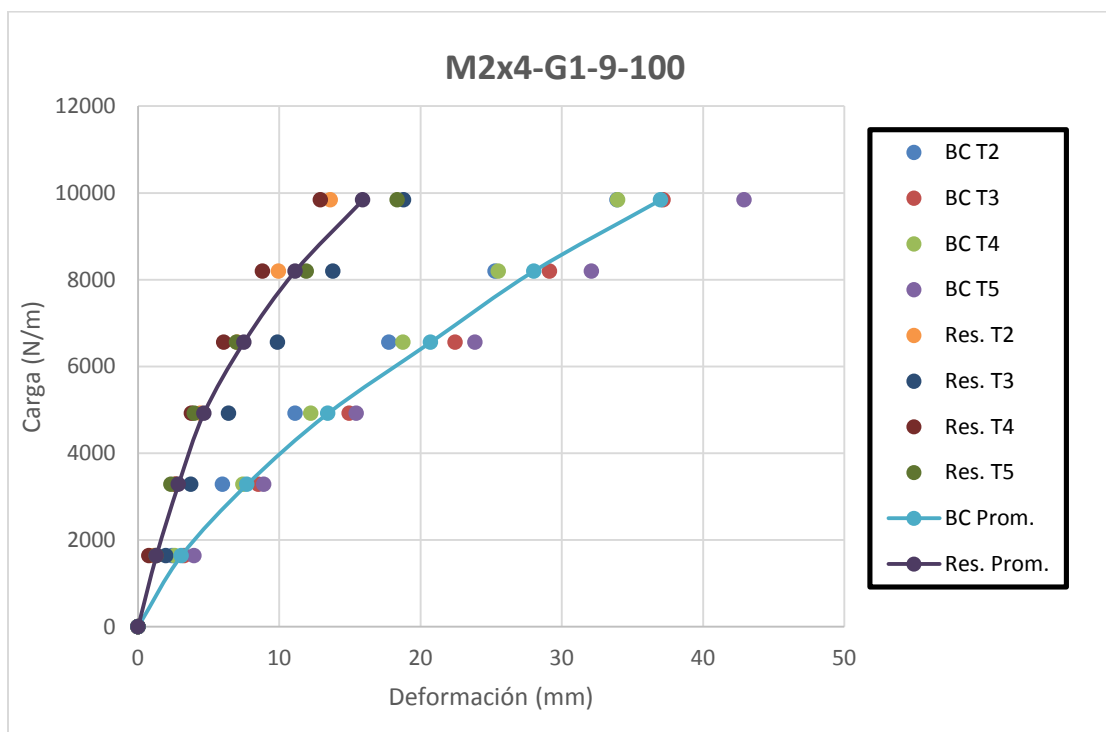


Figura 2.2: Gráfico carga-desplazamiento ensayo carga horizontal cíclico, muro M2X4-G1-9-100

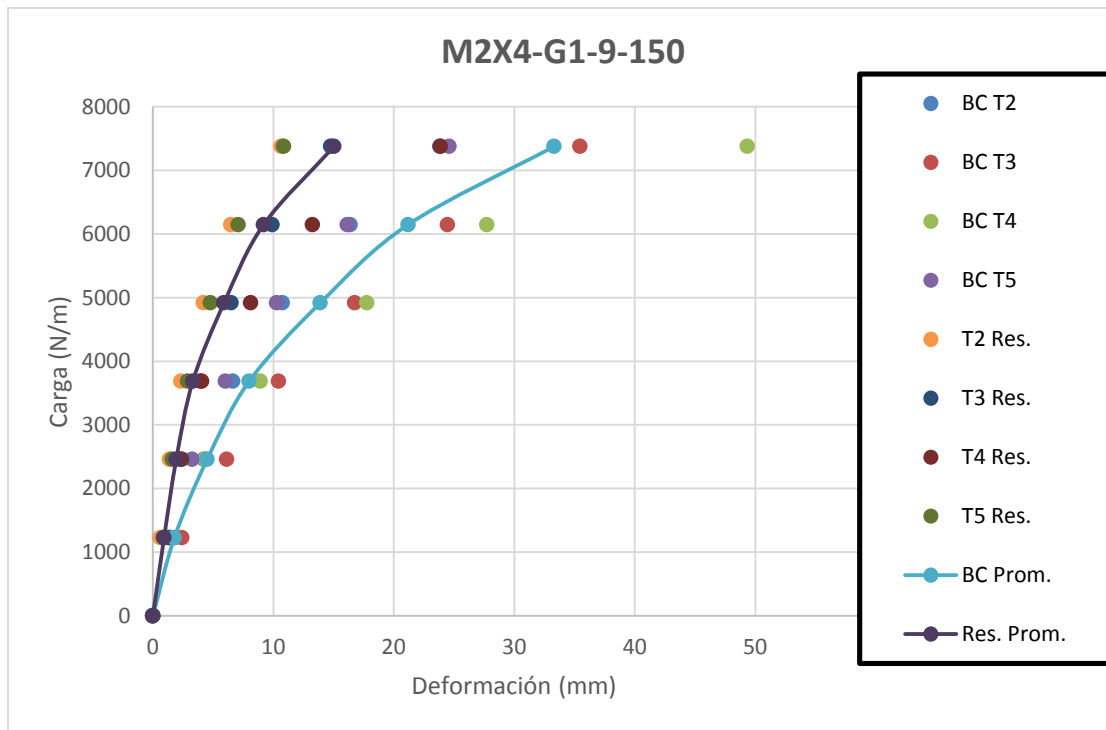


Figura 2.3: Gráfico carga-desplazamiento ensayo carga horizontal cíclico, muro M2X4-G1-9-150

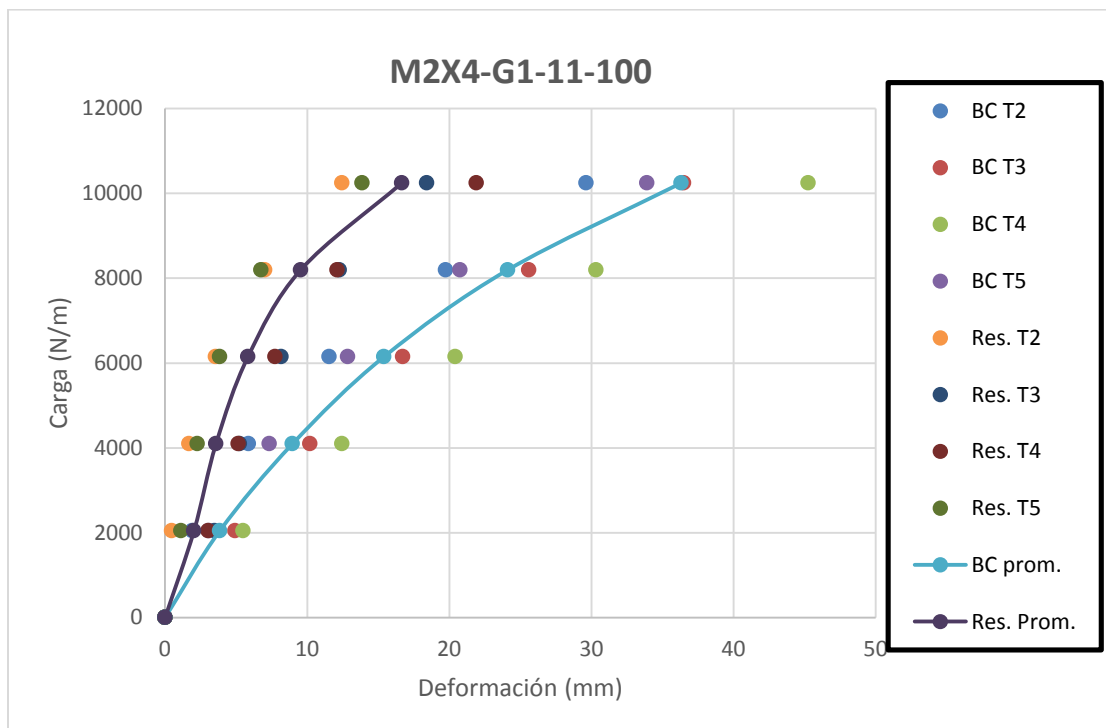


Figura 2.4: Gráfico carga-desplazamiento ensayo carga horizontal cíclico, muro M2X4-G1-11-100

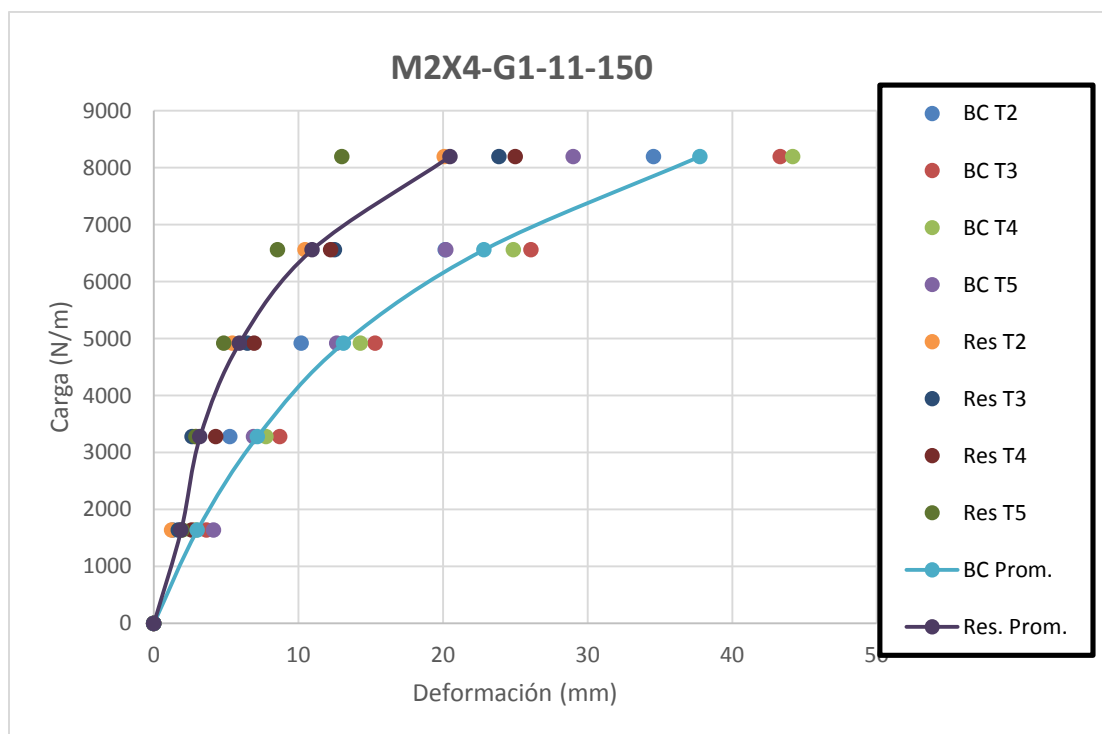


Figura 2.5: Gráfico carga-desplazamiento ensayo carga horizontal cíclico, muro M2X4-G1-11-150

2.2 Ensayo de carga horizontal en muros con estructura de madera G2

En la tabla 2.3 se presentan las cargas máximas alcanzadas por las distintas tipologías de muros ensayados. La tabla 2.4 registra las deformaciones asociadas a las cargas máximas alcanzadas por los muros.

Las curvas de los ensayos monotónicos realizados a las 4 tipologías de muros se presentan en la figura 2.6. El comportamiento es similar en todos los muros y análogo a los resultados expuestos en 2.1, observando linealidad en la primera etapa del ensayo, hasta llegar a una zona de fluencia, caracterizada por un aumento progresivo de las deformaciones sin un aumento significativo de la carga. Esto se explica por el trabajo de la unión placa madera, materializada con un clavo de acero.

El rango de resistencia promedio de los muros fabricados con madera G2 varía entre 15.201 (N) y 11.359 (N), atribuido principalmente al espaciamiento entre clavos de la unión placa madera. Esto va en directa relación con el planteamiento del método analítico, que señala que la capacidad y cantidad de uniones es determinante en la capacidad resistente de los muros. Los datos experimentales indican un aumento en la resistencia de los muros al disminuir el espaciamiento de los clavos, de 150 mm a 100 mm, con valores entre un 30 y 31%.

Con respecto a la influencia del espesor de la placa OSB (9,5 y 11,1 mm) en la resistencia del muro, ella no es significativa, independiente del clavado. Por ejemplo, los muros fabricados con espaciamiento de uniones a 100 mm, presentan valores promedio de resistencia de 14.827 (N) y 15.201 (N), respectivamente (2,5% de diferencia). Análogamente para muros con espaciamiento de uniones a 150 mm, se obtuvo una resistencia promedio de 11.359 y 11.587 (2% de diferencia).

Los resultados de los ensayos cíclicos se muestran en las figuras 2.7 a 2.10. Se observan las deformaciones permanentes experimentadas por los muros para los diferentes estados de carga. Las curvas representan la deformación bajo carga promedio (DBC) y deformación residual promedio (DR), respectivamente.

Tabla 2.3: Carga horizontal máxima, muros G2

Número de ensayo	Carga máxima lateral (N)			
	M2X4-G2-9-100	M2X4-G2-9-150	M2X4-G2-11-100	M2X4-G2-11-150
1	16.812	12.079	18.218	11.422
2	17.094*	13.077	16.218	9.961
3	14.027	10.351	10.643*	12.809
4	14.952*	10.083	16.826*	10.764
5	11.251*	11.203	14.100	12.980
Máximo	17.094	13.077	18.218	12.980
Mínimo	11.251	10.083	10.643	9.961
Promedio	14.827	11.359	15.201	11.587
Desviación Estándar	2.373	1.239	2.948	1.302
Coeficiente de Variación	16,0%	10,9%	19,4%	11,2%

* Muros que presentaron falla por tracción en el pie derecho

Tabla 2.4: Desplazamiento lateral para la carga horizontal máxima, muros G2

Número de ensayo	Deformaciones máximas (mm)			
	M2X4-G2-9-100	M2X4-G2-9-150	M2X4-G2-11-100	M2X4-G2-11-150
1	68,4	54,74	74,62	57,37
2	79,04	60,72	74,12	59,21
3	45,88	65,74	25,4	63,06
4	43,82	65,24	79,3	57,86
5	33,57	62,22	62,89	64,23
Máximo	79,04	65,74	79,3	64,23
Mínimo	33,57	54,74	25,4	57,37
Promedio	54,1	61,7	63,3	60,3
Desviación Estándar	18,8	4,4	22,0	3,1
Coeficiente de Variación	34,8%	7,2%	34,8%	5,2%

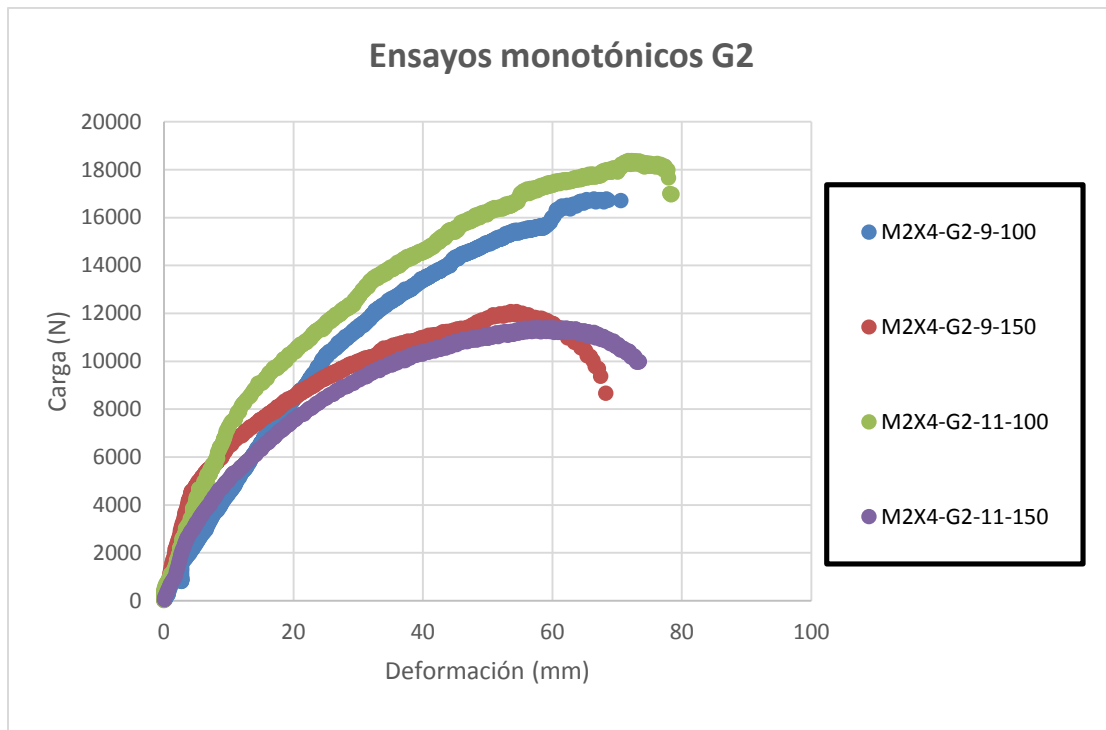


Figura 2.6: Gráfico carga-desplazamiento del ensayo carga horizontal monotónica, muros G2

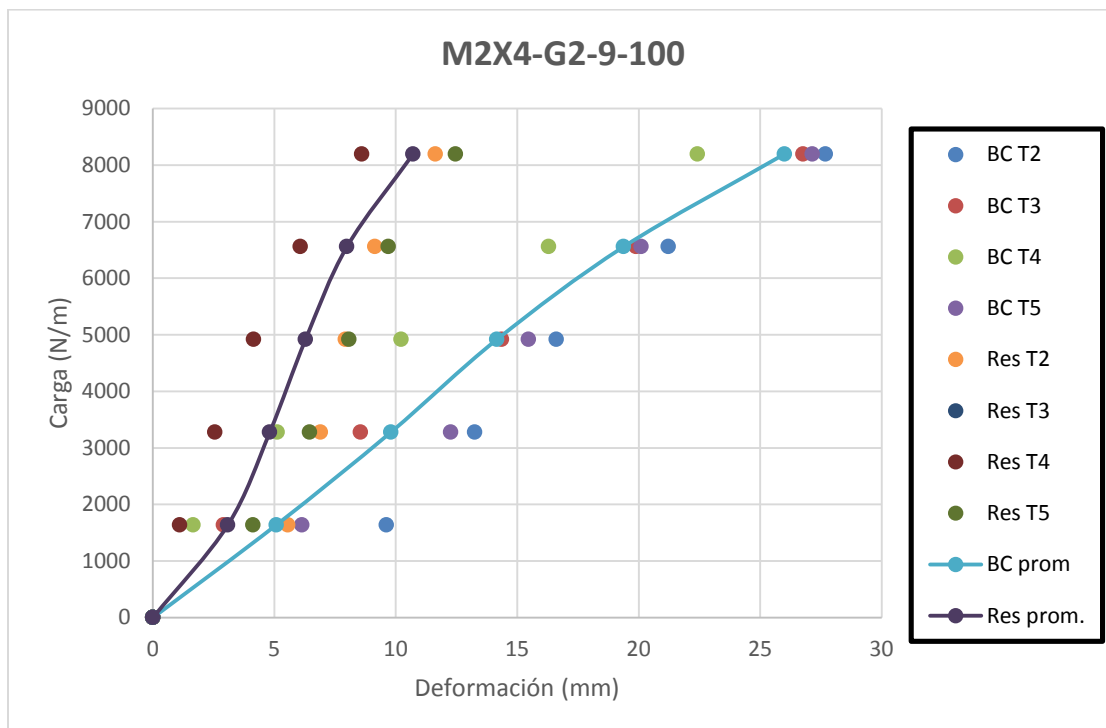


Figura 2.7: Gráfico carga-desplazamiento ensayo carga horizontal cíclico, muro M2X4-G2-9-100

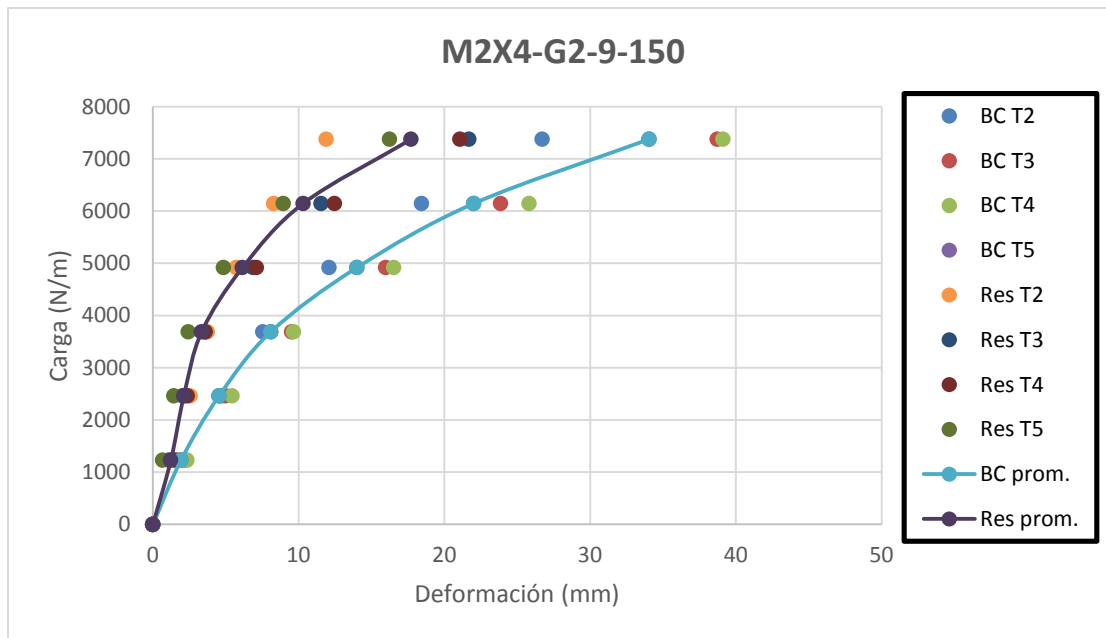


Figura 2.8: Gráfico carga-desplazamiento ensayo carga horizontal cíclico, muro M2X4-G2-9-150

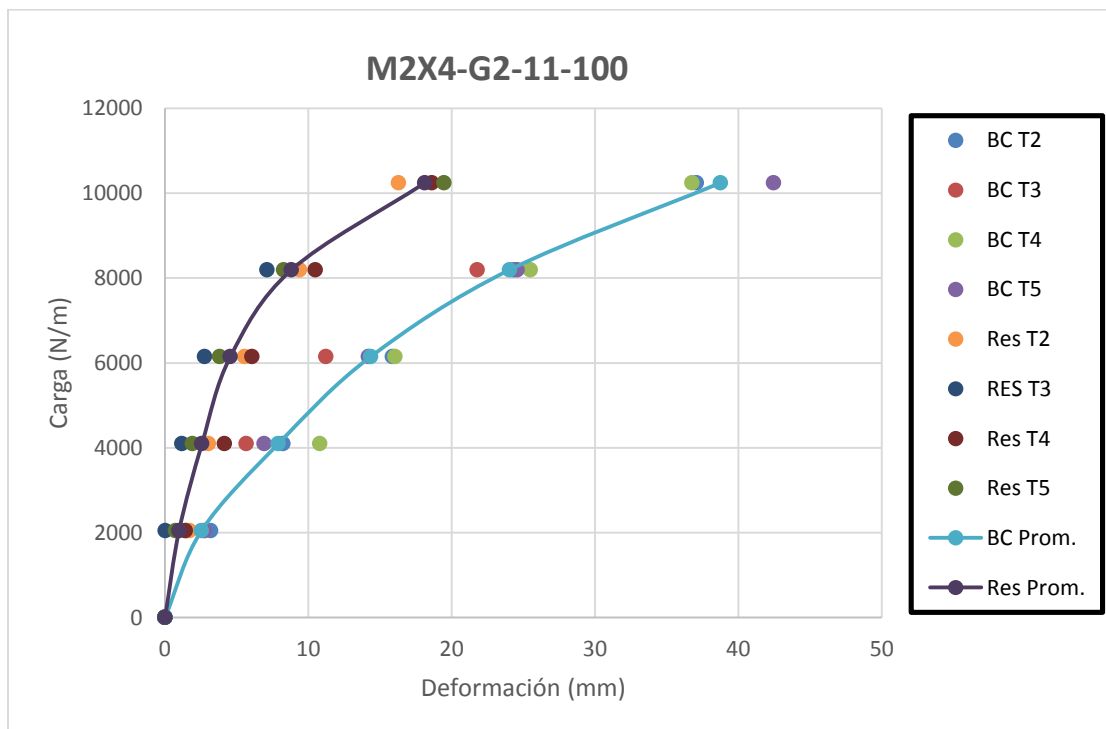


Figura 2.9: Gráfico carga-desplazamiento ensayo carga horizontal cíclico, muro M2X4-G2-11-100

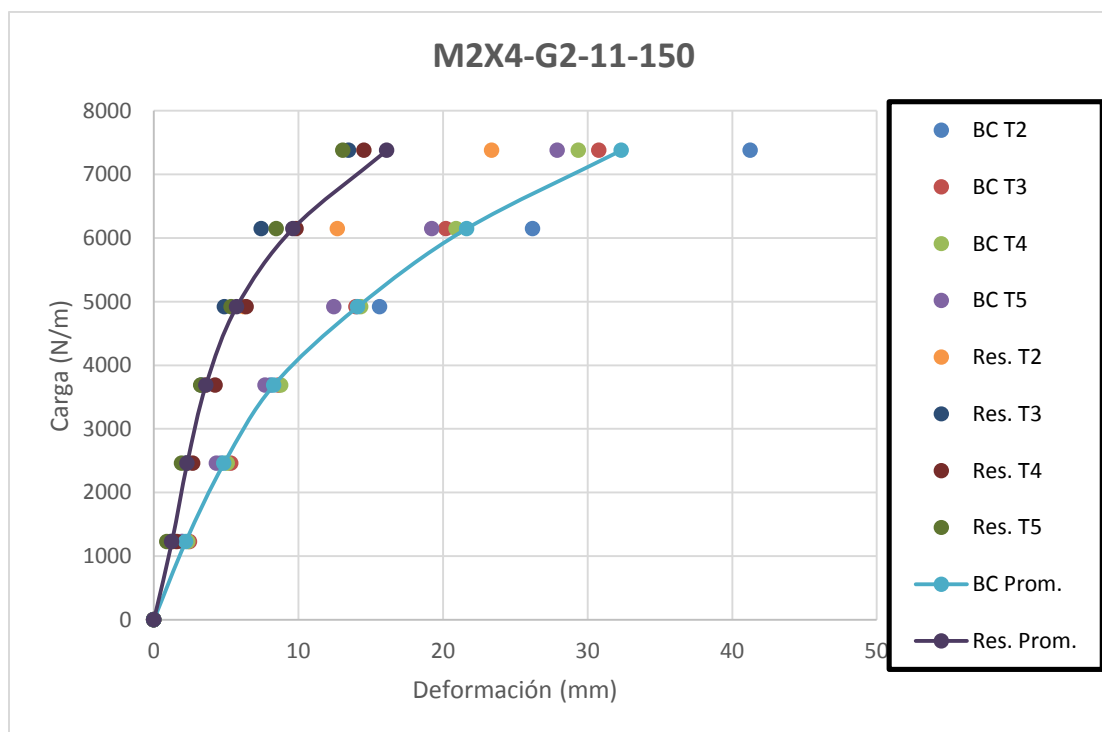


Figura 2.10: Gráfico carga-desplazamiento ensayo carga horizontal cíclico, muro M2X4-G2-11-150

2.3 Fallas características en los muros de madera ensayados

El modo de falla característico en las 8 tipologías de muros ensayados fue similar. Inicialmente se produce una falla dúctil en las uniones perimetrales de OSB-clavo-madera (figura 2.11a), observando en algunos casos que la capacidad en tracción del pie derecho traccionado es superada (figura 2.11b). Cuando la deformación del muro es importante comienza el punzonamiento de la cabeza del clavo en el OSB (figuras 2.11c y 2.11d).

La falla por tensión axial en tracción se presentó en mayor medida en muros con espaciamientos de clavado perimetral cada 100mm y pie derecho con clasificación visual estructural G2 (5 de 20 ensayos). Al aumentar la capacidad de corte en los muros aumenta la sollicitación en tracción del pie derecho, sobrepasando su tensión admisible en tracción.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.11. Fallas características en muros con estructura de madera
Fuente: LME-INFOR.

2.4 Diseño analítico de muros de madera arriostrados con placa estructural OSB

En esta sección se exponen los resultados del diseño analítico de la unión placa-madera, según NCh 1198, y la resistencia a carga lateral de muros, según Código Europeo 5, método A.

2.4.1 Diseño analítico: Unión placa-madera, según NCh1198

Tal como se expuso en la sección 1.3.1, la capacidad a la extracción lateral de la unión placa-madera ($F_{f,Rd}$) es clave en la determinación de la resistencia a la fuerza horizontal de un panel individual. En este trabajo se diseña la unión placa-madera de forma analítica.

El esquema de diseño de la unión placa-madera se presenta en la figura 2.12, donde se consideró como pieza central madera aserrada de Pino radiata de escuadría 2x4". En relación a la pieza lateral, se consideró una placa estructural de OSB de 9,5 o 11,1 mm de espesor. El medio de unión empleado corresponde a un clavo helicoidal común de 2" de largo.

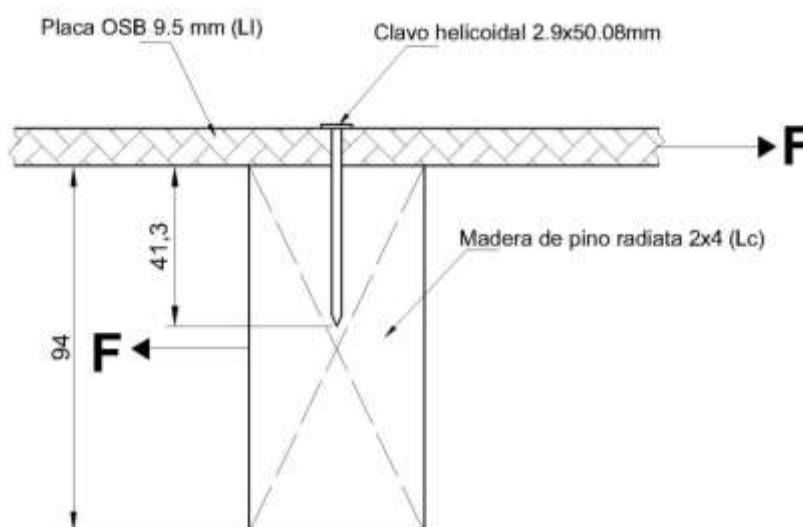


Figura 2.12. Esquema de la unión placa-madera

La tabla 2.5 registra las propiedades de los materiales utilizados en la unión placa-madera.

Tabla 2.5: Datos de entrada unión placa-madera

Datos de entrada	Unidades	
Densidad OSB (9,5 y 11,1 mm)	500	kg/m ³
Densidad Pino	450	kg/m ³
Diámetro clavo	2,9	mm
R_{ap} OSB (Resistencia al aplastamiento)	30	MPa
l_c (Longitud del clavo que penetra pieza central)	41,3*	mm
L_l (Espesor t de placa)	9,5	mm
L_{cl} (Longitud de Clavo)	50,8	mm

$$l_c = L_{cl} - t(\text{placa OSB})$$

* Corresponde a un tablero OSB de 9,5 mm. Para OSB de 11,1 mm corresponde a 39,8

Con los datos de la tabla 2.5 se generaron los parámetros que permiten calcular los distintos modos de fluencia (tablas 2.6 y 2.7).

Tabla 2.6: Parámetros para calcular modos de fluencia con OSB 9,5 mm

Cálculo parámetros principales	Unidad	
R_{ap} Pino radiata (Resistencia al aplastamiento)	26,5	MPa
F_{ff} Acero	727,8	MPa
K_d	2,2	Adimensional
FA	2,2	Adimensional
R_e	0,88	Adimensional
R_t	4,35	Adimensional

Tabla 2.7: Valores coeficientes K

k_1	3,08
k_2	0,95
k_3	2,03

Finalmente, los modos de fluencia de la unión placa-madera 9,5 mm de espesor se registran en la tabla 2.8.

Tabla 2.8: Modos de fluencia unión placa-madera 9,5 mm

$P_{el,ad}$ por modo de falla	Unidad	
Modo Ic	1.569,6	N
Modo I _L	375,7	N
Modo II	537,7	N
Modo IIIc	541,2	N
Modo III _L	264,9	N
Modo IV	1.782,7	N

Por lo tanto, la capacidad admisible de la unión a extracción lateral está condicionada por el modo III_L, equivalente a 264,9 N, que corresponde a una falla combinada entre el aplastamiento de la placa de OSB y la fluencia del clavo.

Los factores de modificación de resistencia (K) utilizados para determinar la capacidad de diseño de la unión placa-madera se indican en la tabla 2.9.

Tabla 2.9. Factores de modificación (K)

K_D	1,6
K_{UH}	1,0
K_{UT}	1,0
K_U	1,0

Por lo tanto, la capacidad de diseño de la unión placa-madera es de 423,8 N, considerando tableros OSB de 9,5 mm de espesor.

El procedimiento para determinar la capacidad de diseño de la unión placa-madera con OSB de 11,1 mm es análogo, y equivale a 439,0 N.

Con los valores de diseño de la unión placa-madera disponibles, se estimó la capacidad a carga lateral o de racking de los muros.

2.4.2 Diseño analítico: Capacidad a la carga lateral de muros, Código Europeo 5, método A

El método A es una expresión simple utilizada para estimar la capacidad de carga lateral de diseño de los muros, que suma la contribución individual de cada uno de los medios de unión placa-madera de forma directa.

De acuerdo a lo expuesto en el Capítulo 1 del presente trabajo, el método A expresa la carga lateral de diseño mediante la siguiente ecuación:

$$F_{l,V,Rd} = \frac{F_{f,Rd} \cdot b_i \cdot C_i}{s}$$

Para el muro con OSB de 9,5 mm de espesor, la capacidad a la extracción lateral de la unión placa-madera ($F_{f,Rd}$) es de 423,8 N.

Los espaciamientos de clavado “s” se fijaron en 150 y 100 mm.

El factor de modificación de resistencia por la relación de aspecto (C_i) es igual a 1, que se obtiene de la manera que se indica.

$$\frac{h}{2} = \frac{2.44}{2} \leq b = 1.22 \rightarrow C = 1$$

Finalmente, para la unión placa-madera con OSB de 9,5 mm de espesor, la capacidad de carga lateral de diseño del muro ($F_{l,V,Rd}$) equivale a 4.238 N/m.

El procedimiento anterior es análogo para las otras configuraciones de muros. En la tabla 2.10 se presenta un resumen con los resultados de capacidad de carga lateral de diseño según espesor de placa y espaciamiento de clavado de muro.

Tabla 2.10: Capacidad de carga lateral de diseño, según tipo de unión placa-madera

Espesor de placa (mm)	Espaciamiento clavos (mm)	Capacidad de Carga lateral de diseño (N/m)
9,5	100	4.220
9,5	150	2.827
11,1	100	4.390
11,1	150	2.927

2.4.3 Comparación entre la estimación analítica y experimental para la resistencia de carga lateral de muros

En la tabla 2.11 se presenta para cada tipología de muro ensayada un resumen de las cargas máximas promedio obtenidas mediante ensayos mecánicos, las capacidades de diseño estimadas mediante el Código Europeo, método A, y las capacidades de diseño extraídas del texto Design of Wood Structures (DWS), que permiten una comparación entre ellas.

La tabla 2.12 registra los factores de seguridad calculados a partir de dividir la carga máxima promedio de los muros ensayados con los valores obtenidos por el Código Europeo, método A, y el DWS.

Los datos permiten determinar que el método A del Código Europeo (en conjunto con la NCh1198 para el diseño de la unión) entrega capacidades de diseño con un factor de seguridad promedio de 3,2, mientras que DWS alcanza un factor de seguridad de 3,1, que permite capacidades moderadas de diseño de muros y con pequeñas deformaciones permanentes asociadas.

Tabla 2.11. Comparación entre resultados experimentales, método analítico A y DWS

Tipología	Carga máxima Promedio (N)	Carga máxima Promedio (N/m)	Método A (N/m)	DWS (N/m)
M2X4-G1-9-100	16.773	13.748	4.220	4.377
M2X4-G1-9-150	11.845	9.709	2.827	2.918
M2x4-G1-11-100	15.979	13.097	4.390	4.377
M2x4-G1-11-150	12.328	10.105	2.927	2.918
M2X4-G2-9-100	14.827	12.153	4.220	4.377
M2X4-G2-9-150	11.359	9.310	2.827	2.918
M2X4-G2-11-100	15.201	12.460	4.390	4.377
M2X4-G2-11-150	11.587	9.498	2.927	2.918

Tabla 2.12. Factores de seguridad estimadas para cada tipología

Tipología	Método A	DWS (N/m)
M2X4-G1-9-100	3,3	3,1
M2X4-G1-9-150	3,4	3,3
M2x4-G1-11-100	3,0	3,0
M2x4-G1-11-150	3,5	3,5
M2X4-G2-9-100	2,9	2,8
M2X4-G2-9-150	3,3	3,2
M2X4-G2-11-100	2,8	2,8
M2X4-G2-11-150	3,2	3,3
Promedio	3,2	3,1

Al verificar la deformación aceptada por el método A para la tipología M2x4-G1-9-100, la deformación para la carga de diseño 4.220 N/m es de aproximadamente 11 mm y de 4 mm para la deformación residual (figura 2.13).

Los criterios de deformación admisible establecidos por la norma chilena NCh433 permiten una deformación máxima de $H/500$, mientras que la ASCE-07 (American Society of Civil Engineers) permite una deformación máxima de $H/200$, donde H es la altura del muro. En atención a lo anterior, es difícil que los métodos analíticos cumplan con la normativa chilena, ya que es muy restrictiva para estructuras de madera. Ella está pensada para estructuras de hormigón armado, que presentan un comportamiento muy diferente a la madera.

La tabla 2.13 registra las deformaciones máximas permitidas para muros de 2,44 metros de altura, considerando la determinada por el método analítico y las permitidas por NCh 433 y ASCE-07. El método analítico cumple con el criterio estadounidense, pero no el criterio nacional. Para cumplir con la normativa nacional, la capacidad de diseño analítica de los muros de madera tendría que ser castigada 2,25 veces, lo que implica un factor de seguridad extremadamente alto.

Tabla 2.13. Criterios de deformación bajo carga, tipología M2X4-G1-9-100

Exigencia	Criterio	Valor[mm]
NCh433	$H/500$	4,9
ASCE-07	$H/200$	12,2
Analítico	Valor extraído de grafico para carga de 4.220[N/m]	11

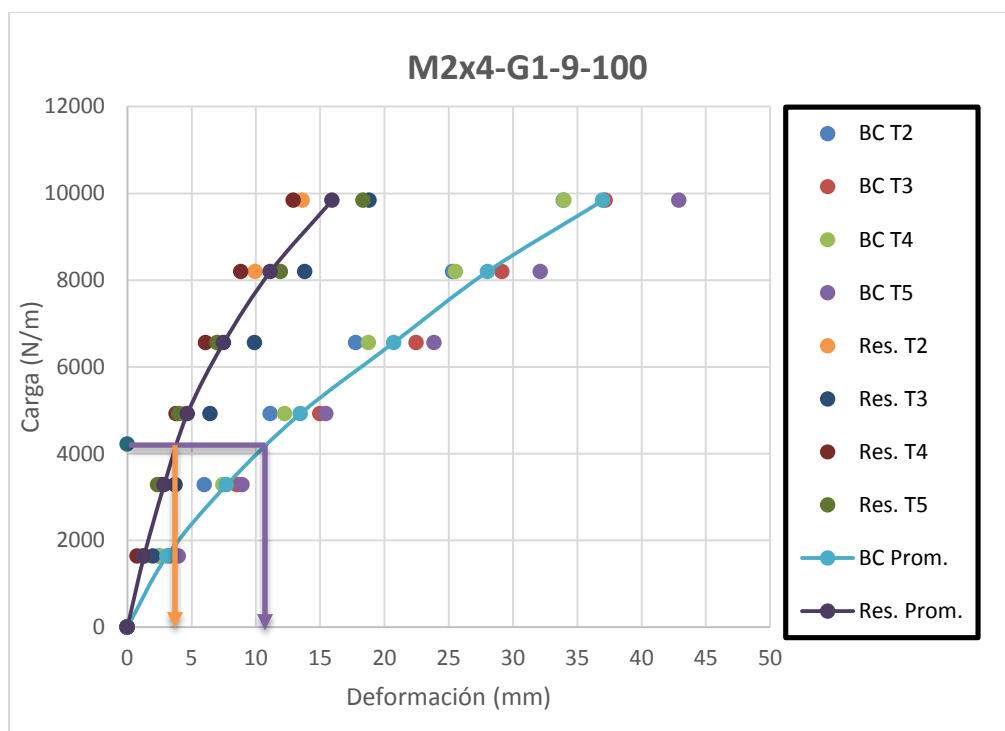


Figura 2.13: Verificación de deformaciones para muro M2X4-G2-11-150

3. CONCLUSIONES

De los ensayos se puede concluir que al variar el espaciamiento de 150mm a 100mm se genera un incremento en la capacidad a corte de al menos 30%.

No se evidenciaron variaciones importantes en la capacidad al corte de los muros cuando se modifica el espesor de la placa OSB de 9,5mm a 11,1mm. Si bien se aprecia aplastamiento del OSB en la unión, no hay un incremento significativo al aumentar el espesor de la placa. Esto puede atribuirse a que no hay mayor deferencia en los espesores de los tableros.

En cuanto a la variable del grado visual estructural de la madera, se concluye que no afecta notoriamente la capacidad de carga lateral de muro o la rigidez en etapas iniciales pero si su mecanismo de falla última. Los muros con pies derechos clasificados G2 fallaron a tracción en mayor cantidad que los G1, ya que un G2 tiene menor tensión admisible de tracción que un G1.

Al utilizar la norma chilena NCh 1198 en el diseño analítico de la unión placa-madera y el método analítico del Código Europeo 5, método A, se obtienen estimaciones aceptables de la capacidad de diseño de carga lateral de muros. Se puede identificar un factor de seguridad promedio 3,2 al compararlo con los resultados empíricos. Este valor es comúnmente utilizado para determinar valores admisibles a partir de ensayos mecánicos.

Como información adicional comparó el nivel de carga que implica deformaciones máximas permitidas por la norma chilena sísmica NCh433. Esto permite ajustar el método analítico al cumplimiento de la normativa nacional.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM, 2012. ASTM E564-06: Standard practice for static load test for shear resistance of framed walls for buildings. American Society for Testing Materials, EE.UU.

INN, 1971. NCh 802: Arquitectura y construcción – Paneles prefabricados – Ensayo de carga horizontal. Instituto de Normalización Nacional, Chile.

INN, 1996. NCh 433: Diseño sísmico de edificios. Instituto de Normalización Nacional, Chile.

INN, 1996. NCh 1198: Madera-Construcciones en Madera- Cálculo. Instituto de Normalización Nacional, Chile.

Labonnote, N., 2013. Timber Stiffening Plates- State of the Art. SINTEF, Technical Note.

CEN, 2004. Use of Structural Eurocode 5 – EN 1995 (Design of Timber Structures) Companion Document to EN1995-1-1. European Committee for Standardization. London, England.

ASCE 07-05, 2005. Minimum Design Loads for Buildings and other Structures. American Society of Civil Engineers, EE.UU.

Catalán, J., 2016. Comportamiento estructural y diseño analítico de muros de madera frente a cargas laterales. Memoria para optar al título de ingeniero civil. Universidad Católica de la Santísima Concepción. Concepción, Chile.

Breyer, D., 2006. Design of Wood Structures –ASD LFDR 6th Edition.

OFICINA DIAGUITAS

Km 5 costado aeródromo La Florida, La Serena

Fono / Fax: (56-51) 543627

SEDE METROPOLITANA

Sucre 2397, Ñuñoa, Santiago

Fono: (56-2) 23667100. Fax: (56-2) 23667131

SEDE BIO BIO

Camino a Coronel km 7,5, San Pedro de la Paz, Concepción

Fono / Fax: (56-41) 2853260

SEDE VALDIVIA

Fundo Teja Norte s/n, Valdivia

Fono: (56-63) 218968

OFICINA PATAGONIA

Camino Coyhaique Alto km 4, Coyhaique

Fono: (56) 98831860



INFOR

www.infor.cl

www.construccionenmadera.cl