

CARACTERIZACIÓN DE MUROS DE CORTE DE ENTRAMADO LIGERO ARRIOSTRADOS CON PLACAS DE CONTRACHAPADO FRENTE A CARGAS LATERALES CÍCLICAS REVERSIBLES

Eduardo Andrés Vargas Hurtubia¹, Javiera Padilla Reyes² y Nelson Maureira Carsalade³

RESUMEN

Actualmente, en Chile no existe un estudio extenso sobre ensayos en muros arriostrados con tableros de contrachapado, debido a que en general las construcciones utilizan OSB, por su menor costo y por la seguridad que proveen, ya que la mayoría de estas placas están certificadas.

No existe una norma obligatoria en Chile que señale que los tableros estructurales deben indicar las características físico-mecánicas, pero debido a las exportaciones, que en su mayoría son de tableros OSB a países como EEUU y Canadá, se exige una estandarización del producto desde su elaboración. Eso hace que la comercialización de estos tableros dentro del mercado nacional incluyan en su mayoría este sello de calidad basado en el desempeño estructural.

Es por esta razón que la importancia de estos ensayos radica en caracterizar el comportamiento de los muros arriostrados con contrachapado frente a cargas laterales cíclicas reversibles, para determinar y cuantificar el efecto de una carga lateral cortante aplicada en la parte superior del muro.

Esta investigación presenta los resultados de 10 ensayos de muros de corte en entramado ligero arriostrados con placas de contrachapado de 12 mm de espesor en una de sus caras. Los especímenes ensayados fueron de 1.22 x 2.44 m, 3 pernos de anclaje grado 8 de 5/8", anclajes Hold Down modelo HTT4 de Simpson Strong - Tie. Se configuraron dos tipos de muros en relación al espaciamiento de clavos, 75 y 100 mm en la zona perimetral, 150 y 200 mm en la zona interior del muro, respectivamente. Los especímenes fueron sometidos a 43 ciclos globales, basándose en el protocolo básico de carga CUREE normado por la ASTM E2126 - 11 para métodos de pruebas estándar de cargas cíclicas reversibles.

Se obtuvo que la disminución del espaciamiento de clavado perimetral del muro genera un aumento de la resistencia frente a las cargas horizontales de un 17%, así también, el aumento del desplazamiento límite de fluencia en un 32%. No se observan variaciones en los desplazamientos a la carga máxima y cargas al momento del fallo de la estructura. El modo de fallo principal corresponde a la rotura por tracción de los pies derechos de borde a la altura del anclaje Hold – Down, desclavado y aplastamiento del revestimiento. El coeficiente de viscosidad (ξ) promedio de ambas tipologías varía entre 13% y 14%.

PALABRAS CLAVE: Muros de corte; Contrachapado; Cargas Cíclicas; Método CUREE; Estructuras de madera.

¹Estudiante pregrado, Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile, evargash@ing.ucsc.cl.

²Profesor guía, M.Sc, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile, javiera.padilla@ucsc.cl.

³Profesor informante, Ph.D. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile, nmaureira@ucsc.cl.

ABSTRACT

Currently, in Chile there is no extensive study on tests on walls braced with plywood, due to the fact that in general the constructions use oriented strand board (OSB), because of its lower cost in relation to plywood boards, as well as the safety provided by these, since most of them are certified, providing the physical-mechanical properties to whoever will design their use.

There is no mandatory standard or quality seal in Chile that indicates the structural characteristics of wood siding, but due to exports, which are mostly of oriented strand board (OSB) to countries such as the USA and Canada, leaders in wood construction, a quality seal is required, therefore, The APA (The Engineered Wood Association, 2022) and CSA (Canadian Standards Association, 2022) standards, the PS2 "Performance Standard for Structural Use Wood Boards", corresponding to a common criteria agreement of the national standards of the USA and Canada based on structural performance, are followed for its elaboration.

The importance of these tests lies in characterizing the behavior of the walls against reversible cyclic lateral loads, which are assimilated to load patterns such as wind and earthquakes, since the tests implement loads in phases covering both directions.

This paper presents the results of a series of 10 tests of light-framed shear walls braced with 12 mm (15/32") thick plywood plates on one side to determine and quantify the effect of a lateral shear load applied to the top of the wall.

Reversible cyclic tests were performed on 1.22 x 2.44 m (4 x 8') specimens using three 5/8" diameter, grade 8 anchor bolts with Simpson Strong - Tie model HTT4 steel timber connectors at each right foot of wall edge. Two types of walls were configured in relation to nail spacing, 75 and 100 mm in the perimeter zone, 150 and 200 mm in the interior zone of the wall, respectively.

The specimens were subjected to 43 global cycles reaching mostly failure, based on the basic CUREE loading protocol standardized by ASTM E2126 - 11 for standard reversible cyclic loading test methods.

It was obtained that the decrease in the perimeter nailing spacing of the wall generates an increase in the resistance to horizontal loads of 17%, as well as an increase in the creep limit displacement by 32%. No considerable variations are observed in the displacements at maximum load and loads at failure of the structure. The main failure mode corresponds to tensile rupture of the right edge footings at the Hold-Down anchorage, debonding and crushing of the cladding. The average coefficient of viscosity (ξ) of both typologies varies between 13% and 14%.

Finally, information necessary to make a comparison with oriented strand board (OSB), a material homologous to plywood panels, is provided. It should also be emphasized that, according to other authors, plywood panels achieve similar strengths to oriented strand boards, but higher deformations, a feature of great importance at the time of seismic design of a wall.

KEYWORDS: Shear walls; Plywood; Cyclic loads; CUREE method; Wooden structures.

1. INTRODUCCIÓN

En Chile, la industria forestal es importante en el ámbito económico y social, siendo una de las actividades industriales más relevantes del país, *“es el segundo en importancia en términos de valor agregado, solo detrás de la minería del cobre”* (PROGEA, 2014). La región del Biobío constituye una de las regiones que predominan en producción forestal total del país, *“representa el 60% del Producto Interno Bruto Forestal”* (BCN, 2021).

Las exportaciones de productos de la madera se concentran en envíos a China y Estados Unidos, *“Principalmente el producto enviado a China es la pulpa de la madera, mientras que a Estados Unidos se concentra en productos de la madera y manufacturas”* (INFOR, 2022).

Los beneficios constructivos que entrega la madera abarcan el ámbito térmico, económico, sustentable y de eficiencia constructiva, llegando a generar ahorro de costos de operación relacionados con la calefacción de hasta un 53% y reducción de uso de materiales por metro cúbico de 48% comparado con el hormigón (Banco Mundial, 2020) entregando las mismas propiedades resistentes.

En los países norteamericanos como Estados Unidos y Canadá la mayoría de las viviendas están construidas con estructuras de madera alcanzando un total de 85% (Schmidt, 2013) y 95% (Canadian Wood Council, 2020) del total de viviendas respectivamente, esto se debe a las consideraciones propias en el contexto regulatorio, procedente de estudios de investigación y posteriores actualizaciones en sus códigos de construcción que logran promover la utilización de la madera.

Una vivienda de madera está compuesta por estructuras de madera, tales como muros, los cuales resisten las cargas laterales correspondientes a movimientos sísmicos o aerodinámicos, cargas verticales, como el peso de otros pisos, techumbres, entre otros, además de transmitir las diferentes cargas al cimiento y están las cerchas los que corresponden a un envigado que soporta las cargas de peso de techumbre, viento y en algunos casos de nieve.

Actualmente, en Chile existen diferentes códigos de construcción que rigen el diseño estructural de la construcción en madera, entre ellas se encuentran la NCh 1198 of 2014 que guía el cálculo estructural en madera basado en sus partes singulares, la NCh 1990 of 1986, que estipula las tensiones admisibles para la madera estructural tomando características como la especie de procedencia, la humedad, el grado de clasificación, entre otros. También está la NCh 2151 of 2009 y 2165 of 1991 que indica las tensiones admisibles del diseño de la madera laminada encolada. Sin embargo, no existe un método analítico que estudie la capacidad de muros estructurales frente a cargas laterales continuas, solo se define un método de ensayo para determinar el comportamiento frente a cargas laterales considerando sus parámetros límites correspondiente a la NCh 802 of 2017. También se debe compatibilizar el diseño sísmico con lo regido por la NCh 433 of 1996 modificada el año 2011 por el decreto supremo N°61 (DS61 of 2011), logrando cumplir con la resistencia y serviciabilidad de todo tipo de construcciones.

Existe una disyuntiva entre los ensayos que se realizan a algunos materiales, debido a que no siempre suelen replicar la realidad y pueden ser contraproducente al momento de diseñar. Por ello en este trabajo se implementa un ensayo que busca simular la condiciones que se encuentra un muro de corte de entramado ligero arriostrado con placas de contrachapado frente a cargas laterales.

Esta investigación tiene como objetivo caracterizar el comportamiento de muros de corte de entramado ligero arriostrados con placas de contrachapado frente a cargas laterales cíclicas reversibles, evaluando la degradación del material, mediante el movimiento generado por las cargas de manera prolongada y en fases secuenciales, utilizando el método de ensayo propuesto por el

Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering (CUREE) normado como método C por la ASTM E2126 - 11. Los parámetros determinados proporcionarían más información para futuros ensayos a realizar con el material, buscando formar una base de datos que contribuya caracterizar este tipo de estructuras. Los estudios de placas contrachapadas en Chile referentes a muros de corte, es muy limitada, debido a que el papel que cumple el contrachapado como material arriostrado y regulador de deformaciones lo realizan los tableros de fibras orientadas (OSB) usados en mayor cantidad debido a su bajo costo. Además, este estudio logra verificar la calidad de los tableros de contrachapado, ya que las materias primas que lo componen tienden a variar algunas de sus características debido al lugar de procedencia y tipo de especie usada.

Otros autores han investigado los muros de corte de madera buscando comparar diferentes características y materiales con el objetivo de tener una mayor base de datos de esta estructura constructiva. Guíñez et al., (2019) presentaron un total de diecisiete ensayos de corte monotónicos y cíclicos, con muros de diferentes longitudes (1.2, 2.4 y 3.6 m) y altura de 2.44 m utilizando tableros de fibras orientadas de 11.1 mm de espesor en ambas caras, con espaciamiento de clavos de 50 y 100 mm, concluyendo que el fallo común ocurre entre las uniones del revestimiento y el marco, correspondiente al aplastamiento y corte de los clavos, sugiere una modificación al código sísmico chileno referente al límite de deriva de un aumento a 0.4%. Gatto & Uang, (2003) ensayaron un total de 20 muros de 2.4 x 2.4 m usando tanto tableros de contrachapado como tablero de fibras orientadas en ambas caras, mediante cinco secuencias de cargas diferentes (Monotónica, CUREE, ISO, SPD, NF), concluyendo que el protocolo CUREE produce resistencias comparables a la de los ensayos monotónicos con una reducción media del 16% de resistencia, en comparación con los otros métodos que expresan estimaciones más conservadoras, también sugiere utilizar la energía absorbida como método de diseño, Aranda, (2020) realiza 6 ensayos cíclicos en muros de 2.4 x 2.4 m revestidos con tableros de fibras orientadas con diferentes patrones de grapado y clavado, buscando caracterizar un método constructivo más económico y alternativo, concluyendo que los muros de corte clavados y grapados tienen un rendimiento de bastidor similar y están por encima de los valores mínimos normados. Dolan & Madsen, (1991) realizan once ensayos con el objetivo de comparar las diferencias entre muros de tableros de contrachapado y de fibras orientadas (OSB) de 2.4 x 2.4 m mediante ensayos monotónicos y cíclicos lentos, concluyendo que no hay diferencia significativa entre los comportamientos de madera contrachapada y paredes de corte revestidas con fibras orientadas en el rango de tensión de trabajo o en las capacidades últimas y señala que los muros revestidos con contrachapado tienen deflexiones más altas que las paredes de fibras orientadas cuando la carga está en el 50% superior de la capacidad de carga.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GENERALES

- Caracterizar el comportamiento de muros de corte de entramado ligero con placa contrachapada frente a cargas laterales cíclicas reversibles.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar ensayos experimentales de cargas laterales cíclicas reversibles a los muros de corte según normativa ASTM E2126 – 11.
- Determinar parámetros básicos estipulados por norma y definir estados límites de los muros a partir de las curvas de histéresis obtenidas de los ensayos.

- Obtener los coeficientes de viscosidad equivalente asociados a la energía obtenida por los ciclos de histéresis.

3. METODOLOGÍA

3.1. MUESTRAS DE ENSAYO

Las placas de arriostre corresponden a placas contrachapadas de 12 mm (15/32") de espesor, fijadas con pistola neumática marca BOSTTCH con clavos de 3" de largo, diámetro de 3 mm, distanciados en las zonas de borde en dos configuraciones, 75 y 100 mm, en la zona central a 150 y 200 mm respectivamente. Cabe destacar que los tableros de contrachapado no se encuentran bajo ningún sello de grado o calidad y fueron adquiridos directamente del retail nacional.

Las piezas de madera que conforman el entramado corresponden a madera aserrada de pino radiata, grado estructural G1 (según NCh 1970/2 of 2017), secada en cámara, de escuadría de 41 x 90 mm (2 x 4"), y los pies derechos están distanciados a 406 mm.

Los anclajes corresponden a pernos de grado 8, de 5/8" de diámetro, con conectores de acero modelo HTT4 de Simpson Strong - Tie para madera en cada pie derecho de borde del muro.

En la figura n°1 se detalla el esquema general del muro estudiado.

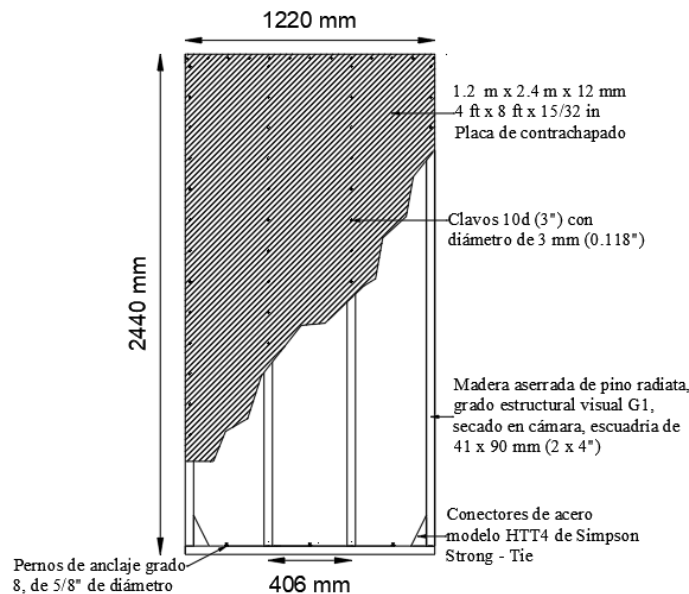


Figura n°1. Detalle de muro de corte estudiado.

Fuente: Elaboración propia.

Se ensayaron diez muros de corte bajo cargas cíclicas reversibles, cinco por configuración de clavado. Los ensayos monotónicos requeridos por la norma ASTM E2126 – 11 corresponden a ensayos realizados con anterioridad por el Laboratorio de Madera Estructural del Instituto Forestal sede Biobío (INFOR, 2021), a especímenes de la misma tipología. En la tabla n°1 se detallan los especímenes ensayados.

Tabla n°1. Lista de tipologías.

N° Ensayos	Tipología	Tipo ensayo	Dimensiones (mm)	Distancia entre clavos interior (mm)	Distancia entre clavos exterior (mm)
1	MP-100	Monotónico	1220 x 2440	200	100
5	MP-100	Cíclico	1220 x 2440	200	100
1	MP-75	Monotónico	1220 x 2440	150	75
5	MP-75	Cíclico	1220 x 2440	150	75

Fuente: Elaboración propia

3.2. PREPARACIÓN DE LA PRUEBA

Los ensayos se realizaron en las dependencias del Laboratorio de Madera Estructural del Instituto Forestal (LME-INFOR) sede Biobío, Chile, en un marco de carga compuesto de vigas de acero, donde se sujetaron mediante pernos de anclaje los diferentes muros a ensayar. La parte inferior fue anclada a una viga de acero, representando la cimentación, buscando evitar el volcamiento del muro, la parte superior del muro se atornilló a una placa de acero que funciona como conector hacia un actuador hidráulico que aplicara las cargas, mediante rodillos se limita el desplazamiento correspondiente al eje débil, a solo los horizontales resistentes.

Las deformaciones del muro de corte son medidos por tres sensores, el primero está ubicado en la esquina inferior (1), midiendo el desplazamiento vertical correspondiente a las deformaciones provocadas por las fuerzas volcantes, el segundo se encuentra en el mismo punto pero mide los desplazamientos horizontales inferiores (2) y por último está el sensor ubicado en la esquina superior que medirá los desplazamientos superiores del muro y que son utilizados para obtener los gráficos de histéresis estudiados (3), esto se puede observar figura n°2.

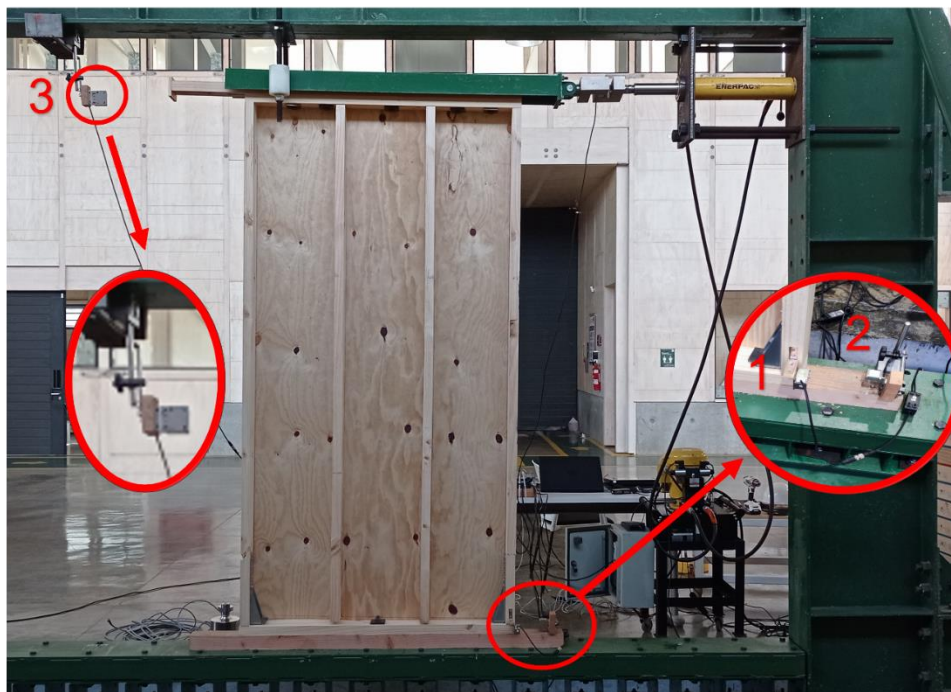


Figura n°2. Posición de sensores de desplazamiento.

Fuente: Elaboración propia

3.3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Se utilizó en todos los ensayos cíclicos el protocolo de carga CUREE, correspondiente al Método C de la norma norteamericana ASTM E2126 - 11.

El desplazamiento de este procedimiento de carga implica ciclos de desplazamiento en fases crecientes, iniciando con una carga inicial de seis ciclos de igual amplitud a baja escala, hasta comenzar con un ciclo primario con una amplitud correspondiente a un porcentaje de la deformación de referencia (Δ). Esta puede ser obtenida mediante los desplazamientos últimos de ensayos monotónicos (Δ_m) correspondiente a un 60% de este, esta cifra no puede superar 0.025 veces la altura del muro. Para ambas tipologías se utilizó este límite de desplazamiento de referencia, luego de cada ciclo primario le prosiguen ciclos secundarios correspondientes a un 75% de desplazamiento de ciclo primario, con el objetivo de degradar el material hasta los siguientes ciclos.

El desplazamiento cíclico del actuador sigue el procedimiento descrito por la tabla n°2.

Tabla n°2. Amplitud de ciclos primarios para el método C.

Patrón	Fase	N° mínimo de ciclos	Amplitud del ciclo primario % Δ
1	1	6	5
2	2	7	7.5
	3	7	10
3	4	4	20
	5	4	30
4	6	3	40
	7	3	70
	8	3	100
	9	3	$100 + 100 \alpha$
	10	3	Incrementos adicionales de $100 \alpha^*$ (hasta que la muestra falle)

* $\alpha \leq 0.5$

Fuente: ASTM E2126 -11.

Con cada ciclo efectuado se forman curvas de histéresis, luego se generan curvas envolventes negativas y positivas, correspondientes a los valores de carga máxima de cada ciclo primario (Ver gráfico n°1). Ambas curvas envolventes deben ser promediadas para poder obtener los parámetros en base a la norma, también se permite realizar un análisis utilizando ambas curvas envolventes por separado.

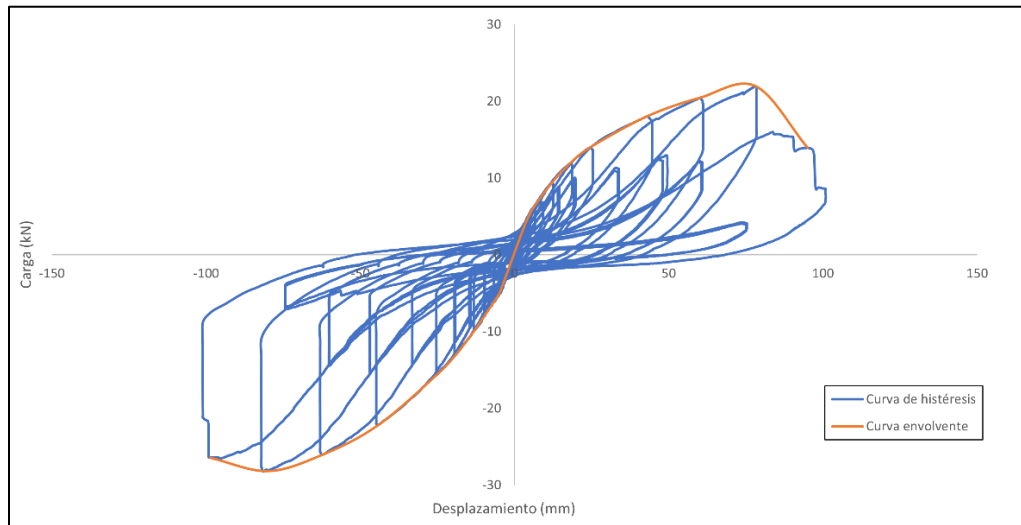


Gráfico n°1. Ejemplo de curva de histéresis y envolvente.

Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros esbozados por la norma corresponden a el esfuerzo cortante (V_{peak}) usando ec. (1), la razón de ductilidad cíclica (μ) usando ec. (2), módulo cortante secante (G') en la carga máxima (P_{peak}) y al 40% de esta, usando ec. (3). Si la rigidez frente al módulo cortante es $0.4 P_{peak}$ es mayor que en P_{peak} se debe generar la curva de energía elástico – plástica equivalente (EEEEP), indicación que se cumplió en todos los ensayos. También se requiere obtener la rigidez frente a la cortante elástica (k_e) con los parámetros P_{yield} , Δ_{yield} , que se obtienen luego de calcular la energía total de la envolvente, que corresponde a el área bajo la curva de la envolvente promedio (A), usando ec. (4 y 5), ver gráfico n°2.

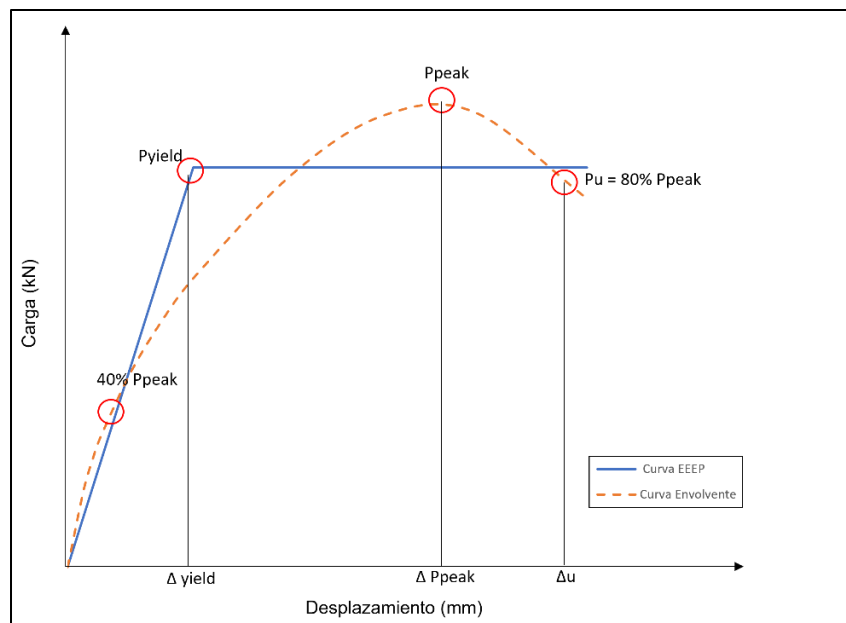


Gráfico n°2. Parámetros de muestra.

Fuente: Elaboración propia.

$$V_{peak} = \frac{P_{peak}}{l} \quad \text{ec. (1)}$$

$$\mu = \frac{\Delta u}{\Delta_{yield}} \quad \text{ec.(2)}$$

$$G'_{P_{peak}} = \frac{P_{peak}}{\Delta P_{peak}} * \frac{h}{l} \quad \& \quad G'_{0.4P_{peak}} = \frac{0.4P_{peak}}{\Delta P_{peak}} * \frac{h}{l} \quad \text{ec.(3)}$$

$$P_{yield} = \left(\Delta u - \sqrt{\Delta u^2 - \frac{2 * A}{k_e}} \right) * k_e; \text{ Si } \Delta u^2 < \frac{2 * A}{k_e} \text{ se permite asumir } P_{yield} = 0.85 * P_{peak} \quad \text{ec.(4)}$$

$$k_e = \frac{0.4 P_{peak}}{\Delta 0.4 P_{peak}} = \frac{P_{yield}}{\Delta_{yield}} \quad \text{ec.(5)}$$

3.4. AMORTIGUACIÓN VISCOSA EQUIVALENTE

“El método más común para definir el amortiguamiento viscoso equivalente consiste en igualar la energía disipada en un ciclo de vibración de la estructura real y un sistema viscoso equivalente” (Chopra, 2012).

Esta comparación se implementa linealizando la curva histerética en una elipse, logrando aproximar la energía disipada en un modelo elástico lineal con la energía disipada correspondiente al área encerrada por el ciclo estudiado en cuestión, esto se puede apreciar en la figura n°3.

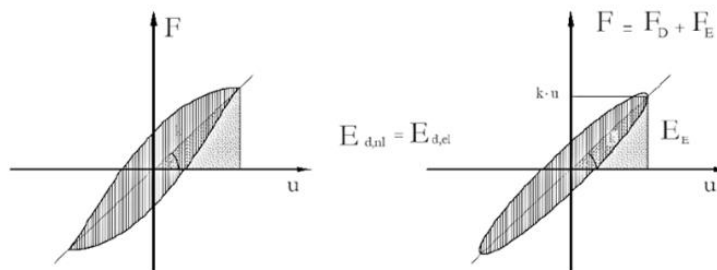


Figura n°3. Linealización de la histéresis inelástica en una elipse equivalente.

Fuente: Guindos, 2019

La energía correspondiente al modelo con forma triangular denotada como energía potencial (E_p) es aquella energía máxima que se puede obtener suponiendo que el sistema corresponde a un resorte completamente elástico, esto se puede representar en el gráfico de Fuerza v/s Deformación por la ec. (6).

$$F = k * \delta \quad \text{ec. (6)}$$

De igual manera la energía asociada a dicho sistema elástico se puede obtener mediante el área encerrada bajo la curva o triángulo constituido por ella, denotado por la ec. (7).

$$A = \frac{F * \delta}{2} = \frac{k * \delta^2}{2} = E_p \quad \text{ec. (7)}$$

Donde:

F: Fuerza ejercida (N)

k: Constante de elasticidad

δ : Desplazamiento (mm)

E_p : Energía elástica (N*mm)

Aplicando este concepto, en esta investigación se obtiene la fracción de amortiguamiento equivalente (ξ_{eq}), la cual puede obtenerse con la ec. (8) (Chopra, 1995).

$$\xi_{eq} = \frac{E_d}{4 * \pi * E_p} \quad \text{ec. (8)}$$

Donde:

ξ_{eq} : Fracción de amortiguamiento

E_d : Energía disipada por ciclo, correspondiente al área de ciclo de histéresis encerrada obtenida

E_p : Energía potencial máxima, correspondiente a la energía liberada por un resorte completamente elástico.

Se hicieron algunas consideraciones para una mejor obtención de información, para ello se tomaron los datos de todos ciclos primarios en carga y descarga despreciando los sub - ciclos, debido a que estos son lo que conforman la curva envolvente estudiada. También se limitaron los desplazamientos de balanceo provocados por el actuador hidráulico o inercia del muro propiamente tal, a los desplazamientos propuestos por el método para cada ciclo principal. Se consideraron las áreas de los triángulos obtenidos en los ejes positivos (E_{p+}) y negativos (E_{p-}) correspondientes a la compresión y tracción del muro, lo cual se puede apreciar en la grafico n°3.

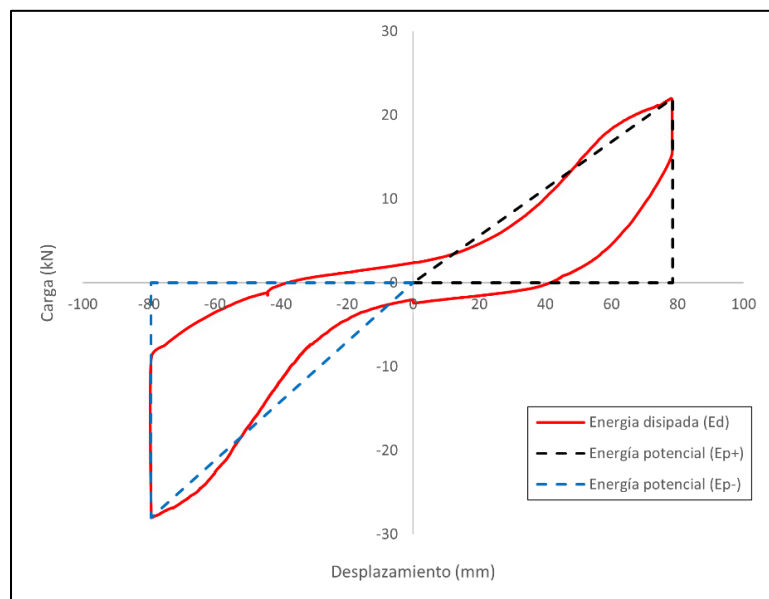


Gráfico n°3. Áreas de estudio que implican diferentes energías.

Fuente: Elaboración propia.

Para ello se debe realizar un arreglo en la ecuación de fracción de amortiguamiento, donde la energía potencial (E_p) se obtiene solo de un lado del gráfico de histéresis, considerando la energía potencial (E_{p+} y E_{p-}) de ambos lados del muro por separado, obteniendo la siguiente ec. (9).

$$\xi_{eq} = \frac{E_d}{2 * \pi * (E_{p+} + E_{p-})} \quad \text{ec. (9)}$$

4. RESULTADOS

4.1. MODOS DE FALLA

Los modos de falla ocasionados por fuerzas horizontales son aquellas que se producen en las uniones clavadas, especialmente en la unión marco – tablero de arriostramiento y la deformación de soleras y pies derechos, estas están gobernadas por la adición de fuerzas de corte, flexión y momentos volcantes producidos por las cargas horizontales.

En los ensayos se presentaron modos de fallos similares a autores como Guíñez et al., (2019) y Dolan & Madsen, (1991) correspondientes a el corte y arranque de clavos de revestimiento, no se observó en ningún caso de desgarramiento de la placa de contrachapado. El fallo ocurría primero en el tablero de revestimiento, debido al aplastamiento producido por el movimiento de los clavos, provocando un “pinching” y perdiendo rigidez la estructura, para posteriormente transmitir un excesivo desplazamiento al marco, teniendo como falla última los pies derechos de borde a esfuerzos de tracción, todos a nivel de los conectores de acero modelo HTT4 de Simpson Strong - Tie. Ver figura n° 4.



Figura n°4. Modos de falla
Fuente: Elaboración propia

4.2. ANÁLISIS DE DATOS

4.2.1. ENSAYOS MONOTÓNICOS

Los ensayos monotónicos fueron realizados en el Laboratorio de Madera Estructural del Instituto Forestal (LME- INFOR) sede Biobío, Chile, estos ensayos conforman una base de datos correspondiente a la tipología estudiada. Para etiquetar los muros se referirá a ellos como M

“espaciamiento de borde” – “espaciamiento interior”. A continuación, se detallan las curvas envolventes monotónicas para las dos tipologías estudiadas.

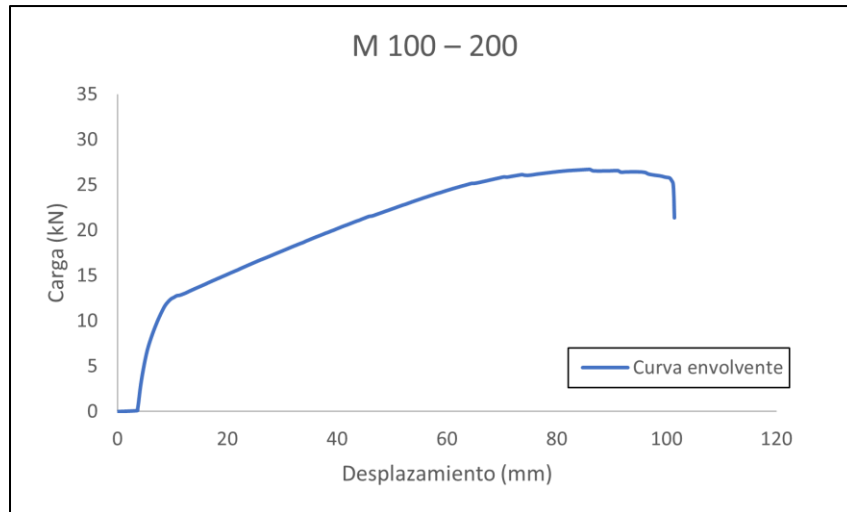


Gráfico n°4. Curva envolvente de ensayo monotónico M 100 - 200
Fuente: Elaboración propia

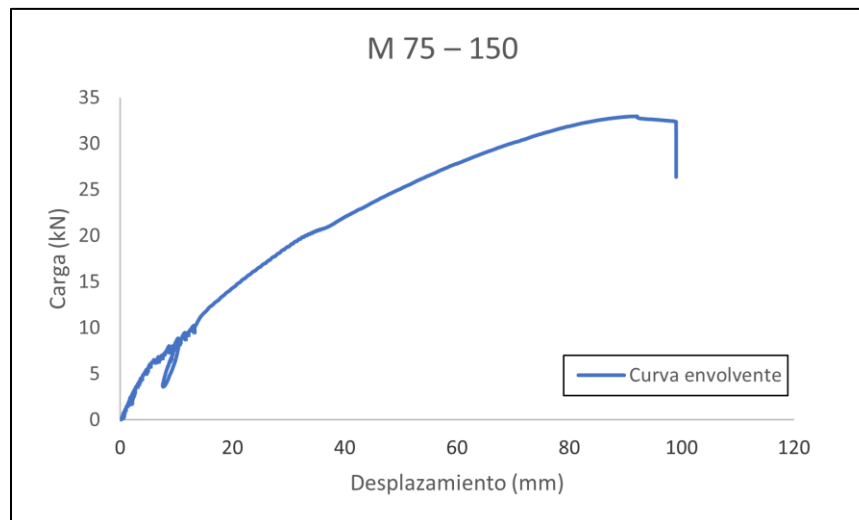


Gráfico n°5. Curva envolvente de ensayo monotónico M 75 - 150
Fuente: Elaboración propia

Tabla n°3. Parámetros de muros de las dos tipologías ensayadas con ensayos monotónicos

Número ensayo	Tipología	Tipo ensayo	P_{peak} (kN)	ΔP_{peak} (mm)	$G' 0.4 P_{peak}$ (kN/mm)	k_e	Δu (mm)	Δy (mm)	μ
1	M 100 – 200	Monotónico	26.72	86	2.74	1.37	101	16	6.3
2	MP 75 – 150	Monotónico	32.98	92	1.48	0.74	99	38	2.6

Fuente: Elaboración propia

Se observa en la tabla n°3 un aumento aproximado de 23% y 7% en la carga máxima (P_{peak}) y desplazamiento en la carga máxima (ΔP_{peak}) respectivamente. Se registro una disminución de 2 mm en el desplazamiento último (Δu), 142% en la relación de ductilidad (μ) y un 154% en el módulo de corte al 40% de la carga máxima ($G' 0.4 P_{peak}$). También aumento un 138% el desplazamiento de límite de fluencia (Δy), debido a la disminución del espaciamiento entre clavos de 100 a 75 mm en el borde y de 200 a 150 mm en el interior del muro respectivamente.

4.2.2. ENSAYOS CÍCLICOS REVERSIBLES

Para etiquetar los muros se referirá a ellos como M “espaciamiento de borde” – “espaciamiento interior” – “número de ensayo”. A continuación, se detallan las curvas de histéresis y envolventes para la tipología con espaciamiento de clavos de borde de 100 mm y de interior de 200 mm.

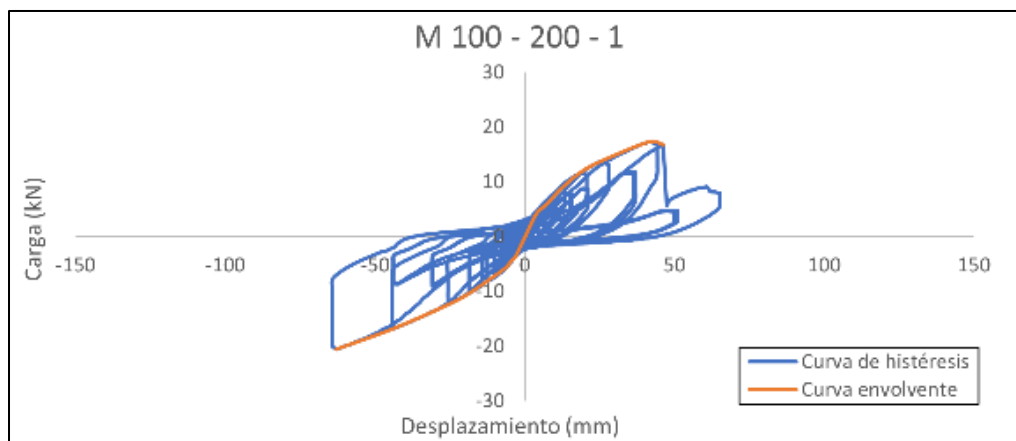


Gráfico n°6. Curvas de histéresis y envolvente para tipología M 100 – 200.

Fuente: Elaboración propia.

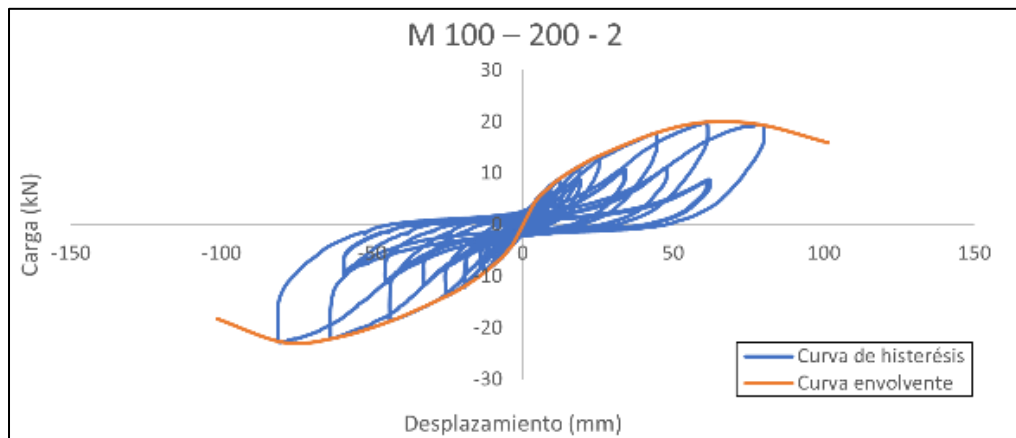


Gráfico n°7. Curvas de histéresis y envolvente para tipología M 100 – 200.

Fuente: Elaboración propia.

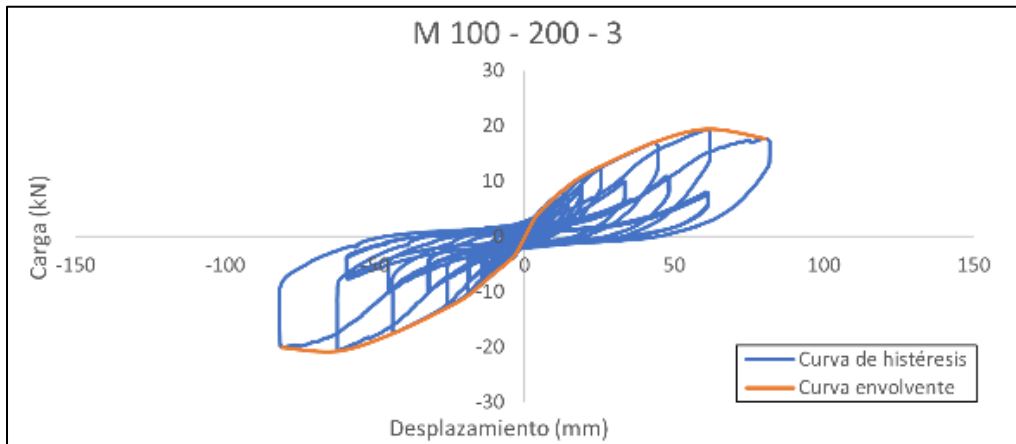


Gráfico n°8. Curvas de histéresis y envolvente para tipología M 100 – 200.

Fuente: Elaboración propia.

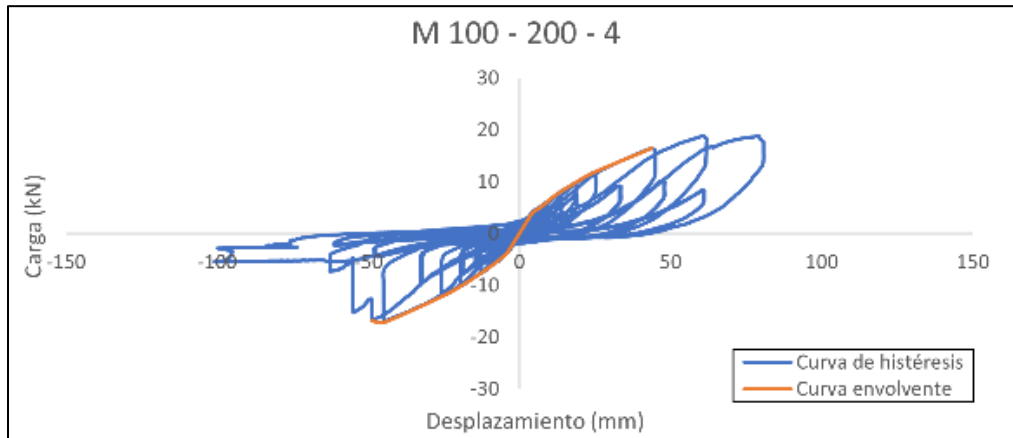


Gráfico n°9. Curvas de histéresis y envolvente para tipología M 100 – 200.

Fuente: Elaboración propia.

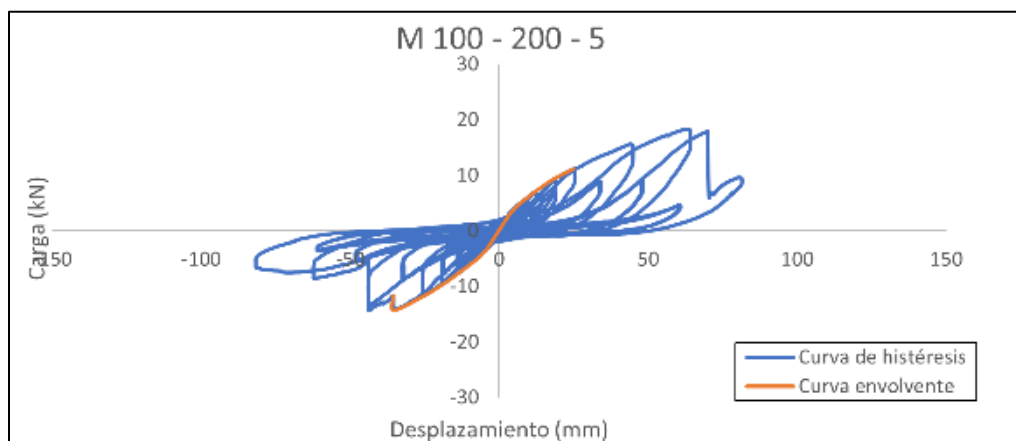


Gráfico n°10. Curvas de histéresis y envolvente para tipología M 100 – 200.

Fuente: Elaboración propia.

Para los gráficos del n°6 al 10 se consideró una curva envolvente trazada hasta el fallo de la muestra, correspondiente al 80% de la carga máxima obtenida (P_{peak}) o denotada como carga última (P_u). Los especímenes M 100-200-1, M 100-200-4 y M 100-200-5 tuvieron un fallo prematuro, no alcanzando a demostrar degradación del material.

Cabe recalcar que, para entendimiento de los gráficos del n°6 al n°10, el orden de los ciclos tenía como inicio la parte negativa del gráfico, para luego repetirse en la parte positiva. También se analizaron para estos casos, las curvas envolventes positivas y negativas por separado, debido a que el fallo se producía en los pies derechos de borde de ambos lados. Considerando el fallo según corresponda, se dejó como curva envolvente representativa la menos favorable, ya que se considera el muro como una unidad constructiva compuesta.

En el caso de M 100-200-2, durante la exposición a los ciclos no llegó al fallo, se apreció un leve desgaste que no alcanzó el 80% de la carga máxima obtenida. Por ello, la normativa ASTM E2126 – 11 permite utilizar el desplazamiento último (Δu) obtenido en el ensayo monotónico correspondiente a la misma tipología.

Tabla n°4. Parámetros de muros con espaciamiento de clavos a los bordes de 100 mm y 200 al interior

N° Ensayo	Tipología	Tipo ensayo	P_{peak} (kN)	ΔP_{peak} (mm)	$G' 0.4 P_{peak}$ (kN/mm)	k_e	Δu (mm)	Δy (mm)	μ	ξ
1	M 100 – 200	Cíclico	17.32	41	1.55	0.77	46	19	2.4	-
2	M 100 – 200	Cíclico	22.82	79	1.51	0.76	101	25	4.1	0.13
3	M 100 – 200	Cíclico	20.75	62	1.27	0.63	81	28	2.9	0.14
4	M 100 – 200	Cíclico	17.06	45	1.26	0.63	49	23	2.2	0.15
5	M 100 – 200	Cíclico	14.28	35	1.26	0.63	35	18	1.9	0.12
	Media		18.45	53	1.37	0.68	63	22	2.7	0.14
	Desviación estándar		3.35	17.94	0.15	0.07	27.54	3.85	0.88	0.01
	Coefficiente de variación		0.18	0.34	0.11	0.11	0.44	0.17	0.32	0.10

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla n°4, en promedio, la configuración M 100 – 200 obtuvo una resistencia a carga lateral de 18.45 kN y un desplazamiento de 53 mm en las cargas máximas. El rango de carga lateral corresponde a 8.54 kN y el de desplazamiento a 44 mm, la media del módulo de corte al 40% de la carga máxima ($G' 0.4 P_{peak}$) es de 1.37 kN/mm.

El coeficiente de viscosidad equivalente (ξ), no fue considerado para el ensayo N° 1, debido a que como primer ensayo realizado fue utilizado para calibrar los instrumentos de medición. Se presentaron algunos desfases notorios en los desplazamientos correspondientes a los ciclos primarios, datos de mayor relevancia para la obtención de los parámetros.

En las gráficas n°11 a la 15 se muestran las curvas de histéresis y envolventes para la tipología con espaciamiento de clavos de borde de 75 mm y 150 mm de interior.

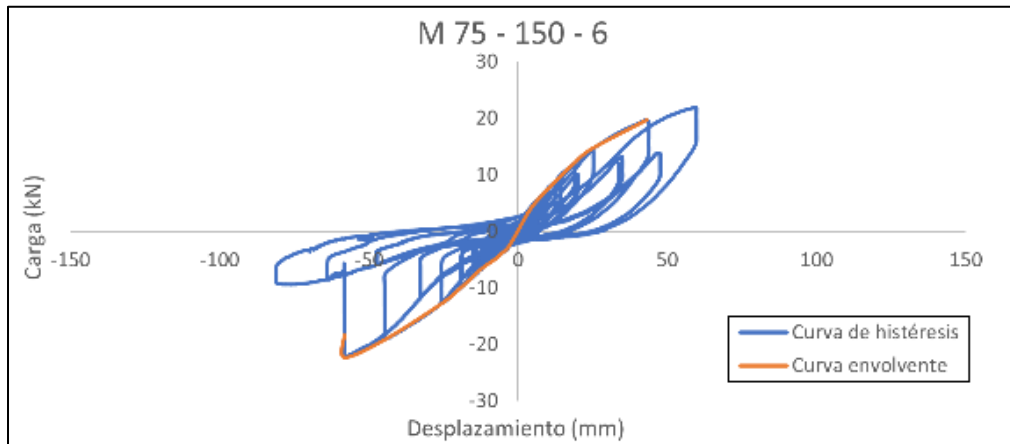


Gráfico n°11. Curvas de histéresis y envolvente para tipología M 75 – 150.

Fuente: Elaboración propia.

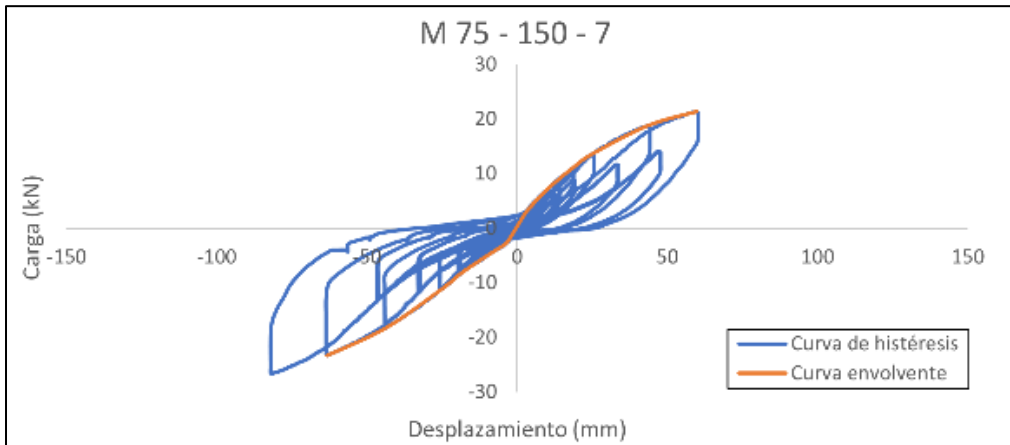


Gráfico n°12. Curvas de histéresis y envolvente para tipología M 75 – 150.

Fuente: Elaboración propia.

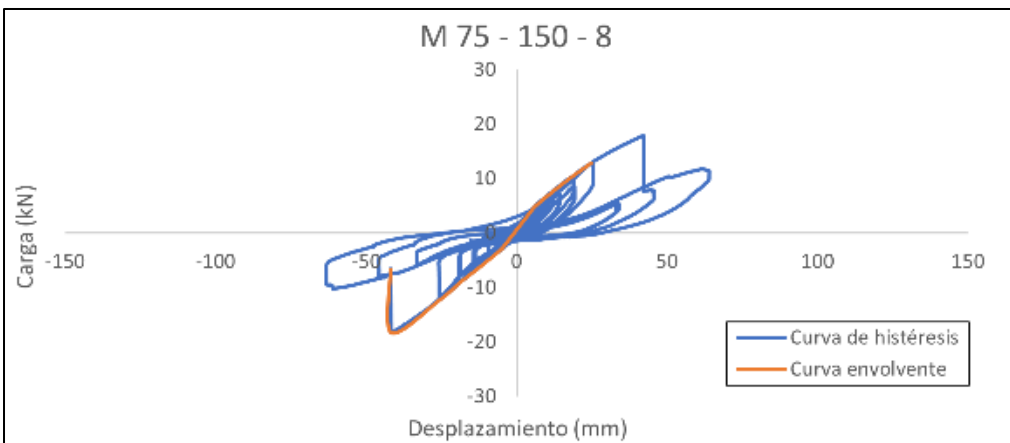


Gráfico n°13. Curvas de histéresis y envolvente para tipología M 75 – 150.

Fuente: Elaboración propia.

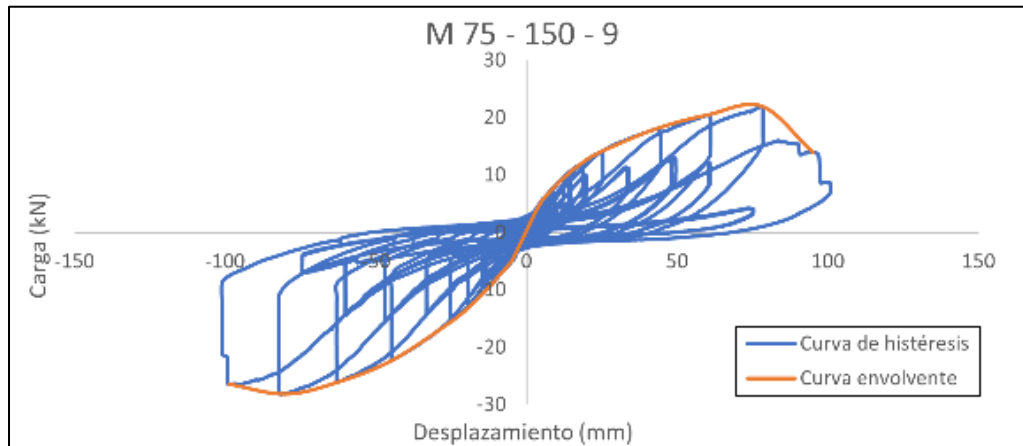


Gráfico n°14. Curvas de histéresis y envolvente para tipología M 75 – 150.
Fuente: Elaboración propia.

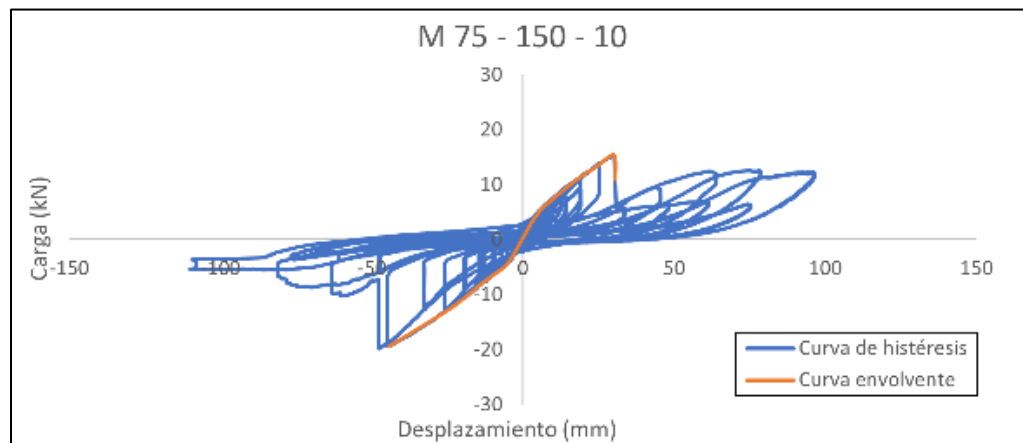


Gráfico n°15. Curvas de histéresis y envolvente para tipología M 75 – 150.
Fuente: Elaboración propia.

Para esta tipología se utilizaron las mismas consideraciones anteriores, con excepción del gráfico M 75-150-7, el cual tuvo un error instrumental, no alcanzando a efectuar todo el recorrido de la curva de histéresis. Debido a que sus datos de carga y desplazamiento máximo son representativos con relación a los demás ensayos se consideró usar los parámetros máximos.

Tabla n°5. Parámetros de muros con espaciamiento de clavos a los bordes de 75 y 150 mm al interior

Nº Ensayo	Tipología	Tipo ensayo	P_{peak} (kN)	ΔP_{peak} (mm)	$G' 0.4 P_{peak}$ (kN/mm)	k_c	Δu (mm)	Δy (mm)	μ	ξ
6	M 75 – 150	Cíclico	22.29	58	1.04	0.52	58	37	1.6	0.13
7	M 75 – 150	Cíclico	23.32	61	1.06	0.53	-	-	-	0.12
8	M 75 – 150	Cíclico	18.30	42	1.00	0.50	42	32	1.3	0.13
9	M 75 – 150	Cíclico	28.24	79	1.50	0.75	97	29	3.4	0.14
10	M 75 – 150	Cíclico	15.33	30	1.02	0.84	30	17	1.8	0.13
	Media		21.50	54	1.12	0.63	57	29	2.0	0.13
	Desviación estándar		4.94	18.88	0.21	0.16	29.06	8.23	0.94	0.01
	Coefficiente de variación		0.23	0.35	0.19	0.25	0.51	0.29	0.47	0.05

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla n°5, la configuración M 75 - 150 en promedio, obtuvo una carga máxima (P_{peak}) de 21.5 kN, un desplazamiento a la misma carga de 54 mm (ΔP_{peak}), un módulo de corte al 40% de la carga máxima ($G' 0.4 P_{peak}$) de 1.12 kN/mm, un desplazamiento de fluencia (Δy) de 29 mm y un rango de cargas máximas de los ensayos corresponde a 12.91 kN. En comparación a la configuración M 100 - 200, al disminuir el espaciamiento de clavos se observa que la carga máxima (P_{peak}) aumenta un 17% y el desplazamiento (ΔP_{peak}) 1 mm, el módulo de corte al 40% de la carga máxima ($G' 0.4 P_{peak}$) disminuye un 18%, el desplazamiento último (Δu) disminuye 6 mm aproximadamente, el desplazamiento de límite de fluencia (Δy) aumenta un 32% y la relación de ductilidad cíclica (μ) disminuye un 26%.

4.2.3. MÓDULO DE CORTE

El módulo de corte (G') corresponde un parámetro entregado por el Special Design Provisions for Wind and Seismic (SDPWS, 2015), para diseño de muros de corte de madera bajo cargas laterales. En las gráficas n°16 y 17 se presentan las variaciones del módulo de corte a lo largo del desplazamiento obtenido de cada ensayo para ambas tipologías.

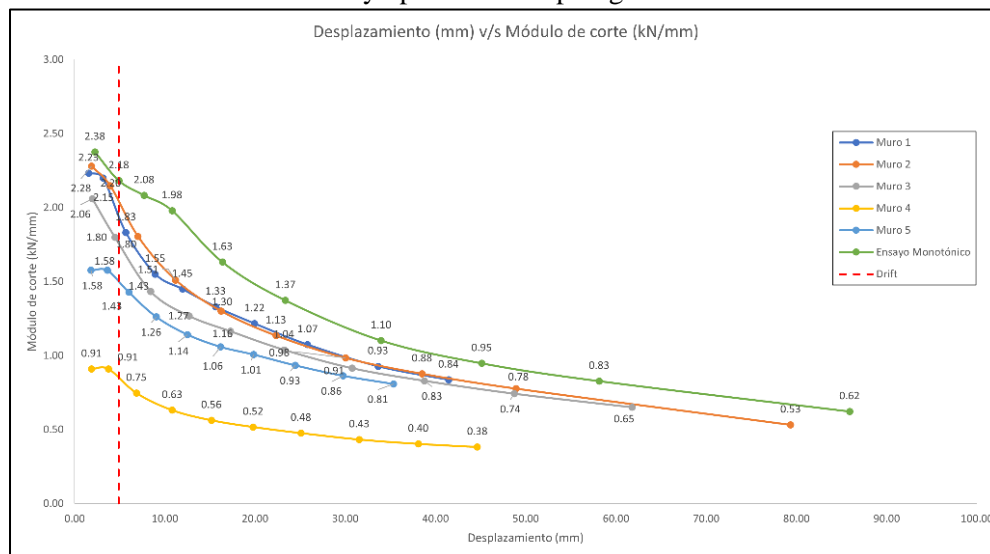


Gráfico n°16. Variación del módulo de corte (G') para tipología M 100 – 200.

Fuente: Elaboración propia

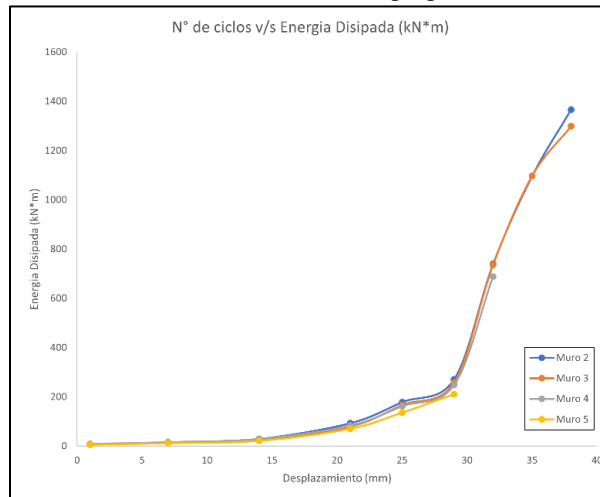


Gráfico n°18. Energía disipada por ciclos principales para tipología M 100 - 200.

Fuente: Elaboración propia

Tabla n°7. Energía disipada para tipología M 75 – 150 considerando ciclos primarios.

%Δ	Amplitud primaria por ciclo (mm)	Energía de histéresis disipada (kN*m)							
		N° Ensayo					Variación estadística		
		6	7	8	9	10	Media	Desviación estándar	Coficiente de variación
5	3.05	6.2	6.0	7.2	9.6	7.2	7.24	1.45	0.20
7.5	4.575	14.1	11.5	11.0	18.8	15.0	14.09	3.13	0.22
10	6.1	25.1	19.9	20.9	33.5	27.2	25.33	5.47	0.22
20	12.2	71.2	61.7	67.9	102.0	87.1	77.99	16.37	0.21
30	18.3	147.7	123.4	137.1	197.9	172.7	155.75	29.72	0.19
40	24.4	246.0	201.5	229.5	313.3	275.8	253.22	43.03	0.17
70	42.7	751.3	662.8	-	853.5	-	755.85	95.42	0.13
100	61	-	1095.3	-	1303.5	-	1199.43	147.22	0.12
130	79.3	-	-	-	1665.3	-	1665.26	-	-
160	97.6	-	-	-	1877.7	-	1877.70	-	-

Fuente: Elaboración propia

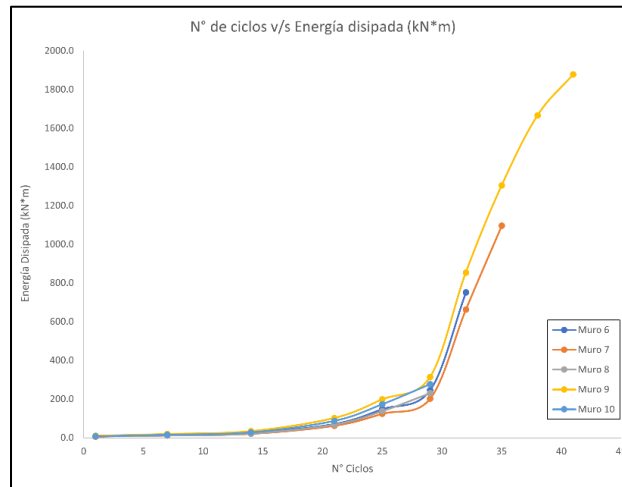


Gráfico n°19. Energía disipada por ciclos principales para tipología M 75 – 150
Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en las tablas n°6 y 7, todos los especímenes de ambas tipologías alcanzan a concretar el ciclo número 29 correspondiente a los 24.4 mm de desplazamiento, sin llegar al fallo. También se observa que en promedio la energía disipada por la tipología M 100 – 200 es mayor que la energía disipada por el mismo ciclo efectuado en la tipología M 75 - 150. A medida que aumenta el desplazamiento, la cantidad de energía sufre una variación menor respecto su promedio, esto se ve en mayor tendencia para la tipología M 100 – 200. En promedio, al disminuir el espaciamiento de clavos hubo un decrecimiento de aproximadamente 5% de energía disipada considerando los ciclos con todas las muestras estudiadas hasta el 40% del desplazamiento base (Δ).

4.3.2. COEFICIENTE DE VISCOSIDAD EQUIVALENTE

En las tablas n°8 y 9 se entregan los valores del coeficiente de viscosidad para ambas tipologías en base a cada ciclo primario y en el gráfico n°20 se comparan gráficamente.

Tabla n°8. Viscosidad equivalente por ciclo primario tipología M 100 – 200

Espécimen	Coeficiente de viscosidad equivalente (ξ)									
	Ciclo									
	1	7	14	21	25	29	32	35	38	41
	Desplazamiento (mm)									
	3.05	4.575	6.1	12.2	18.3	24.4	42.7	61	79.3	97.6
Muro 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Muro 2	0.10	0.11	0.13	0.13	0.14	0.13	0.15	0.14	0.13	-
Muro 3	0.13	0.14	0.14	0.13	0.14	0.14	0.16	0.14	0.14	-
Muro 4	0.16	0.14	0.16	0.14	0.14	0.14	0.16	-	-	-
Muro 5	0.13	0.11	0.12	0.13	0.13	0.12	-	-	-	-
Media	0.13	0.13	0.14	0.14	0.13	0.13	0.16	0.14	0.14	-
Desviación estándar	0.024	0.014	0.015	0.007	0.008	0.007	0.004	0.004	0.006	-
Coeficiente de variación	0.18	0.11	0.11	0.05	0.06	0.05	0.02	0.03	0.05	-

Fuente: Elaboración propia

De la tabla n°8, se observa que el coeficiente de viscosidad equivalente (ξ) por ciclo para la tipología M 100 – 200, tiene una variación promedio entre 13% y 16%, con un valor medio de los Muros 2,3,4 y 5 de 14%, con una desviación estándar de un 1%.

Tabla n°9. Viscosidad equivalente por ciclo primario tipología M 75 – 150

Especimen	Coeficiente de viscosidad equivalente (ξ)									
	Ciclo									
	1	7	14	21	25	29	32	35	38	41
	Desplazamiento (mm)									
	3.05	4.575	6.1	12.2	18.3	24.4	42.7	61	79.3	97.6
Muro 6	0.11	0.12	0.13	0.12	0.12	0.12	0.15	-	-	-
Muro 7	0.11	0.11	0.12	0.11	0.11	0.11	0.14	0.13	-	-
Muro 8	0.15	0.12	0.13	0.13	0.12	0.12	-	-	-	-
Muro 9	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.16	0.15	0.13	0.14
Muro 10	0.13	0.12	0.14	0.14	0.14	0.14	-	-	-	-
Media	0.13	0.12	0.13	0.13	0.13	0.13	0.15	0.14	0.13	0.14
Desviación estándar	0.016	0.009	0.010	0.012	0.013	0.014	0.012	0.012	-	-
Coeficiente de variación	0.12	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.08	0.09	-	-

Fuente: Elaboración propia

La tabla n°9 muestra que el coeficiente de viscosidad equivalente (ξ) por ciclo para la tipología M 75 – 150, tiene una variación promedio entre 12% y 15%, con un valor medio de todos los ensayos de 13%, con una desviación estándar de un 1%.

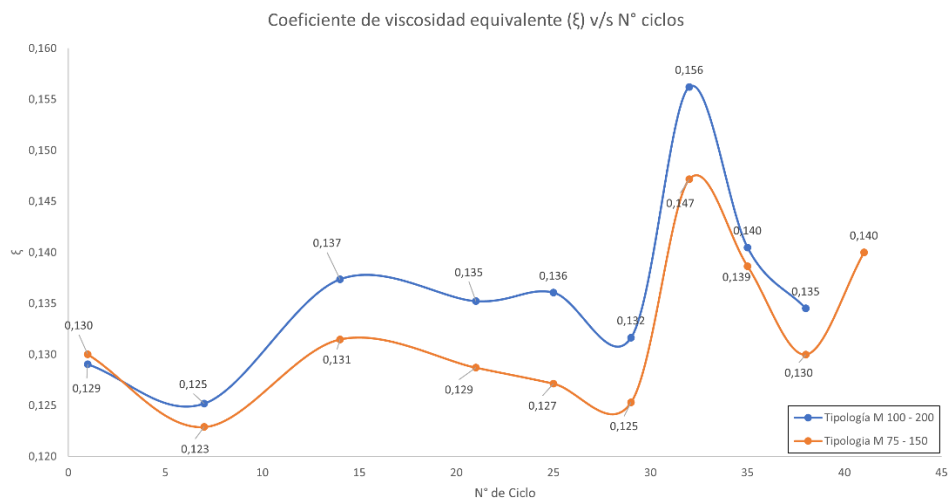


Gráfico n°20. Coeficiente de viscosidad equivalente (ξ) en cada ciclo primario de ambas tipologías

Fuente: Elaboración propia

Se observa en el gráfico n°20 un patrón en el coeficiente de viscosidad equivalente (ξ) de ambas tipologías a través de los diferentes ciclos, teniendo un coeficiente de amortiguación mayor la configuración M 100 – 200. Ambas tipologías muestran valores mayores en el ciclo número 32 correspondiente a un desplazamiento de 42.7 mm, que es donde los ciclos primarios empiezan a aumentar en mayor cantidad los desplazamientos objetivos.

4.4. SPECIAL DESIGN PROVISIONS FOR WIND AND SEISMIC (SDPWS)

El Consejo Americano de la Madera (AWC), propone resistencias para muros de entramado ligero considerando el espaciamiento de los clavos, para la unión de revestimiento – marco, tanto de borde como de interior. Se consideró el valor de espaciamiento de borde de 75 y 100 mm para realizar la comparación. También el manual de diseño no presenta resistencias diferentes entre contrachapado y tableros de fibras orientadas (OSB). Los valores entregados corresponden al esfuerzo cortante (V) y módulo de corte (G'), correspondientes a la tabla 4.3A del SPECIAL DESIGN PROVISIONS FOR WIND AND SEISMIC (SDPWS, 2015). A continuación, en las tablas n°10 y 11, se realiza la comparación.

Tabla n°10. Comparación manual de diseño de muros de corte (SDPWS) tipología M 100 - 200

N° Ensayo	Tipología	Tipo ensayo	V_{exp} (kN/m)	V_{SDPWS} (kN/m)	Relación V_{exp}/V_{SDPWS}	G'_{exp} (kN/mm)	$G_{a SDPWS}$ (kN/mm)	Relación $G'_{exp}/G_{a SDPWS}$
M1	M 100 - 200	Monotónico	21.90	13.43	1.63	2.74	2.98	0.92
1	M 100 - 200	Cíclico	14.20	13.43	1.06	1.55	2.98	0.52
2	M 100 - 200	Cíclico	17.30	13.43	1.29	1.51	2.98	0.51
3	M 100 - 200	Cíclico	16.47	13.43	1.23	1.27	2.98	0.43
4	M 100 - 200	Cíclico	13.98	13.43	1.04	1.26	2.98	0.42
5	M 100 - 200	Cíclico	11.71	13.43	0.87	1.26	2.98	0.42
	Promedio		15.93		1.19	1.60		0.54
	Desviación estándar		3.53		0.26	0.57		0.19
	Coefficiente de variación		0.22		0.22	0.36		0.36

Fuente: Elaboración propia

Para la tipología M 100 - 200, se observa que la resistencia al esfuerzo de corte experimental (V_{exp}) correspondiente al cociente de la carga máxima (P_{peak}) y el largo del muro estudiado, es en promedio un 19% mayor que la resistencia de diseño. El módulo de corte (G'_{exp}) obtenido al 40% de la carga máxima es inferior en un 46% al módulo de corte de diseño ($G_{a SDPWS}$).

Tabla n°11. Comparación manual de diseño de muros de corte (SDPWS) tipología M 75 - 150

N° Ensayo	Tipología	Tipo ensayo	V_{exp} (kN/m)	V_{SDPWS} (kN/m)	Relación V_{exp}/V_{SDPWS}	G'_{exp} (kN/mm)	$G_{a_{SDPWS}}$ (kN/mm)	Relación $G'_{exp}/G_{a_{SDPWS}}$
M2	M 75 - 150	Monotónico	27.03	17.51	1.54	1.48	3.33	0.44
6	M 75 - 150	Cíclico	18.27	17.51	1.04	1.04	3.33	0.31
7	M 75 - 150	Cíclico	18.31	17.51	1.05	1.06	3.33	0.32
8	M 75 - 150	Cíclico	15.00	17.51	0.86	1.00	3.33	0.30
9	M 75 - 150	Cíclico	20.55	17.51	1.17	1.50	3.33	0.45
10	M 75 - 150	Cíclico	12.57	17.51	0.72	1.68	3.33	0.50
	Promedio		18.62		1.06	1.29		0.39
	Desviación estándar		4.99		0.28	0.29		0.09
	Coefficiente de variación		0.27		0.27	0.23		0.23

Fuente: Elaboración propia

Para la tipología M 75-150, se observa que la resistencia al esfuerzo de corte experimental (V_{exp}), es en promedio un 6% mayor que la resistencia de diseño. El módulo de corte (G'_{exp}) que corresponde al obtenido al 40% de la carga máxima en promedio es inferior en un 61% al módulo de corte de diseño ($G_{a_{SDPWS}}$).

5. CONCLUSIONES

Este estudio presenta los resultados de los ensayos de carga cíclica reversible de dos tipos de configuraciones de muros de entramado ligero arriostrados por placas de contrachapado. Cabe recalcar que el contrachapado no se encuentra bajo un sello de calidad, por ello, las resistencias entregadas pueden variar significativamente en cada ensayo.

Utilizando diferentes distancias de clavado interior y de borde, se realizan un total de 10 ensayos cíclicos reversibles mediante el método C de la norma norteamericana ASTM E2126 – 11. Además, se utilizan datos de muestras en ensayos monotónicos anteriores realizados a los mismos tipos de muros con placas de contrachapado como revestimiento para su comparación obteniendo las siguientes conclusiones:

- Los ensayos monotónicos demuestran que tienen una resistencia mayor en capacidad de carga lateral, desplazamientos a la carga máxima (ΔP_{peak}), carga ultima (P_u), de fluencia (Δy) y módulo de corte ($G' 0.4P_{peak}$) que los ensayos cíclicos reversibles.
- Los modos de fallas principales se deben a la transmisión de fuerzas generadas por las uniones (clavos) revestimiento – marco, obteniendo como falla la rotura por tracción de los pies derechos de borde a la altura de los hold – down. Esto se debe al desgaste que generan los ciclos repetitivos en el revestimiento y a los tornillos que unen los anclajes con la madera, disminuyendo el área efectiva de la pieza.
- Al disminuir el espaciamiento de clavos de 100 mm de borde y 200 mm de interior (M 100-200) a 75 mm de borde y 150 mm de interior (M 75-150), se observa un aumento de la resistencia frente a carga laterales de un 17%, el módulo de corte obtiene una disminución de un 18%, no hubo una variación importante en el desplazamiento a la carga máxima (ΔP_{peak}), ni al desplazamiento último (Δu), pero si un aumento en el desplazamiento de fluencia de

aproximadamente un 32%. Basándose en la NCh 433 of 1996 donde se exige un desplazamiento lateral máximo no superior a 0.002 veces la altura de la edificación, para este caso el muro de estudio (4.88 mm) los módulos de corte mínimos obtenidos a esos desplazamientos son de 0.85 kN/mm y 1.15 kN/mm para la tipología M 100-200 y M 75-150 respectivamente.

- Todos los ensayos alcanzan a completar al menos hasta el ciclo número 29 correspondiente a un desplazamiento de 24.4 mm, utilizado para realizar una comparación con mayores datos en el ámbito de la energía tanto disipada, como el coeficiente de viscosidad equivalente (ξ), se observa que al disminuir el espaciamiento de clavos la energía disipada es menor en aproximadamente un 5% respecto a la tipología M 75-150. El coeficiente de viscosidad equivalente (ξ), para las tipologías M 100-200 y M 75-150 es en promedio de un 14% y 13%, respectivamente.
- El manual de diseño de muros de madera (SDPWS), subestima en gran medida la capacidad de los módulos de corte (G') tanto para los ensayos cíclicos como los monotónicos, también es algo más análogo en resistencias laterales a los ensayos cíclicos.

6. AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por el Instituto Forestal (INFOR), los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Madera Estructural del Instituto Forestal (LME-INFOR) sede Biobío.

El autor agradece a todo el equipo del Laboratorio de Madera Estructural del Instituto Forestal durante la colaboración de la construcción, la realización de los ensayos de las muestras y apoyo durante el desarrollo de la tesis. También agradece a su profesor guía que presto apoyo durante este proceso.

7. REFERENCIAS

1. American Society of Civil Engineers (2012). *ASTM E2126-11 Standard test methods for cyclic (reversed) load test for shear resistance of vertical elements of the lateral force resisting systems for buildings*. <https://doi.org/10.1520/E2126-11.2>
2. American Wood Council (2015). *Special design provisions for wind and seismic*; p. 1–32.
3. Aranda, R. (2020). *Caracterización del desempeño de muros clavados y engrapados de madera en sistema tipo marco plataforma*. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción. <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/520>
4. Banco Mundial (2020). *La construcción de viviendas en madera en Chile un pilar para el desarrollo sostenible y la agenda de la reactivación*.
5. BCN (2021). Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, *Industria Forestal en Chile*; Serie Minutas N° 68-21, 29/07/2021.
6. Canadian Wood Council. (2020). *Building Codes & Standards - The Canadian Wood Council - CWC: The Canadian Wood Council*. <https://cwc.ca/how-to-build-with-wood/codes-standards/>
7. Chopra, A. K. (1995) *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, New Jersey.
8. Chopra, A. K. (2012). *Dinamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering* (4.a ed.; Pearson Education, Ed.). Pearson Education/Prentice Hall.
9. Dolan, J. D. & Madsen, B. (1991). *Monotonic and cyclic tests of timber shear walls*. Canadian Journal of Civil Engineering. <https://doi.org/10.1139/192-050>

10. Gatto, K., & Uang, C.-M. (2002). *Cyclic Response of Woodframe Shearwalls: Loading Protocol and Rate of Loading Effects*. En *CUREE - Caltech Woodframe Project*.
11. Guindos, P. (2019). *Conceptos Avanzados del Diseño Estructural con Madera. Parte I: Uniones, Refuerzos, Elementos Compuestos y Diseño Antisísmico*.
12. Guíñez, F., Santa María, H., & Almazán, J. L. (2019). *Monotonic and cyclic behaviour of wood frame shear walls for mid-height timber buildings*. *Engineering Structures*, 189 (March), 100-110. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.043>
13. Instituto Forestal (INFOR, 2021). *Caracterización mecánica de tipologías de muros fabricados con madera aserrada estructural de pino radiata y sometidos a carga lateral*; Informe técnico N° 245.
14. Instituto Forestal (INFOR, 2022). *Anuario Forestal 2022*; Boletín estadístico N° 187.
15. Instituto Nacional de Normalización (1986). NCh 1990: *Madera – Tensiones admisibles para madera estructural*.
16. Instituto Nacional de Normalización (1991). NCh 2165: *Tensiones admisibles para la madera laminada encolada estructural de pino radiata*.
17. Instituto Nacional de Normalización (1996). NCh 433: *Diseño Sísmico de Edificios*.
18. Instituto Nacional de Normalización (2009) NCh 2151: *Madera laminada encolada estructural – Vocabulario*.
19. Instituto Nacional de Normalización (2014). NCh 1198: *Madera - Construcciones en Madera - Cálculo*.
20. Instituto Nacional de Normalización (2017). NCh 802: *Elementos de construcción - Segmentos de muro - Ensayo de carga horizontal*.
21. Instituto Nacional de Normalización (2017). NCh 1970/2: *Maderas - Parte 2: Especies coníferas - Clasificación visual para uso estructural - Especificaciones de los grados de calidad*.
22. PROGEA (2014). *Aporte económico y social del sector forestal en Chile y análisis de encadenamientos*, Programa de Gestión y Economía Ambiental, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile.
23. Schmidt, J., & Griffin, C. T. (2013). *Barriers to the design and use of cross-laminated timber structures in high-rise multi-family housing in the United States. Structures and Architecture: Concepts, Applications and Challenges - Proceedings of the 2nd International Conference on Structures and Architecture*, ICSA 2013, 2225–2231. <https://doi.org/10.1201/b15267-304>
24. Simpson StrongTie (2021). *Wood construction connectors C-C-2021* p. 54-55.