



4º CONGRESO
LATINOAMERICANO
DE ESTRUCTURAS
DE MADERAS

COMPORTAMIENTO CÍCLICO DE CONEXIONES HÍBRIDAS DE LSL, HORMIGÓN Y ACERO CON CLT

CYCLIC BEHAVIOUR OF HYBRID CONNECTIONS OF CLT WITH LSL, CONCRETE AND STEEL

Tulio Carrero^{1*}, Jairo Montaña^{1,2}, Hernán Santa María^{1,2}, Pablo Guindos^{1,2}

¹Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería. Santiago, Chile.

²Centro UC de Innovación en Madera. Santiago, Chile.

* Contacto: Tulio Carrero: tecarrero@uc.cl

CÓDIGO: 4620237

Resumen

Una de las principales tipologías estructurales para la construcción de edificios de madera de 6 o más pisos consiste, cada vez más, en construir un núcleo capaz de resistir la mayor parte de las fuerzas laterales. Dicho núcleo es a menudo construido con hormigón, aunque también es posible combinarlo con un núcleo conformado por una celosía de acero o estructuras similares. El fructífero empleo de núcleos, y más en general, el empleo de soluciones mixtas en edificios de madera, requiere un conocimiento detallado acerca del comportamiento cíclico de uniones de CLT con otros materiales lo cual es mayormente desconocido. En esta investigación se realizó una campaña experimental de ensayos para caracterizar el comportamiento monotónico y cíclico de uniones híbridas de CLT con elementos de LSL, acero y hormigón. Las conexiones empleadas fueron variables y abarcaron clavos de gran tamaño, pasadorres y tornillos autoperforantes, siempre sometidos a fuerzas de corte lateral. Los resultados indican que estas conexiones se comportan de forma similar a las uniones convencionales madera-madera y madera-metal de las estructuras de madera. Se verificó además que es posible emplear modelos histeréticos actuales tales como el modelo SAWS para replicar adecuadamente el comportamiento cíclico de estas uniones.

Palabras-clave: Conexión, CLT, estructura híbrida, comportamiento cíclico, acero, hormigón, LSL.

Abstract

One of the main structural typologies for mid to high-rise timber construction consists of using structural cores to resist most of the lateral load. Such core is mostly made of concrete, but also it is possible to use steel trusses or similar structures. Successful application of structural cores, or rather hybrid solutions, in timber buildings requires in depth knowledge of the cyclic behavior of CLT connections when joined with distinct materials, which mostly is unknown. In this research, an experimental program of monotonic as well as cyclic hybrid CLT connections mixed with LSL, concrete and Steel was performed. Dowelled-type connections studied ranged from large nails, thru dowels and self-tapping screws but being always subjected to shear forces. Results indicate that such hybrid connections behave similarly to normal Wood-to-wood and Wood-to-Steel timber connections. We also verified that it is possible to use current hysteretic models such as the SAWS model to emulate the cyclic behavior of hybrid CLT laterally loaded connections.

Keywords: Connection, CLT, hybrid structure, cyclic behavior, steel, concrete, LSL.

1. INTRODUCCIÓN

La utilización de estructuras de madera para la construcción de edificaciones ha sido implementada durante más de 100 años en Japón, Canadá, Europa, Estados Unidos, entre otros países. a diferencia de otros materiales, la madera es fácil de manejar, prefabricar y ensamblar. hace 30 años aproximadamente, surge la madera contra laminada (MCL), comúnmente denominada *cross laminated timber* (CLT), según ringhofer, brandner y blaß, (2018) [9]. es un sistema constructivo e innovador, cuya principal característica es que permite la rápida prefabricación de viviendas y edificios. El CLT es usado en muros, losas y techos, con el fin de obtener estructuras más rígidas.

Es importante reconocer las áreas de disipación que ocurren en el comportamiento general de los muros. La disipación de energía ocurre en las conexiones. La ductilidad depende de la cantidad y el tipo de conexiones panel-marco (pasadores, tornillos, pernos y clavos). En relación a conexiones laterales ver Tamagnone y Fragiacomio (2018) [10]. Se prestará especial atención al estrechamiento de los ciclos de una histéresis (efecto *pinching*), y a la degradación de rigidez y resistencia. Ambos efectos son provocados principalmente por aplastamiento de la madera en las conexiones. Es fundamental asegurar que el daño se localice en tales conexiones, para proteger las áreas de los paneles y los elementos del marco que soportan las cargas verticales gravitacionales.

Es conveniente usar sistemas de conexiones reforzadas para reducir costos de rehabilitación posteriormente a un evento en un país de recurrencia sísmica como p.e: Chile. A diferencia de los sistemas de entramado ligero, los pies derechos de los muros a probar en estos ensayos de uniones serían de madera reconstituida (LSL), acero u hormigón, con paneles de CLT, tablero de conglomerado (OSB), entre otros (ver Figura 1). Es esencial avanzar en la reproducción de resultados para el uso de este material (CLT) como una alternativa estructural, mientras se emplee sistemas de conexiones dúctiles con el apoyo de otros materiales. Por otro lado, si se tiene en cuenta el beneficio del incremento en la ductilidad de las conexiones de los muros, este sistema podría competir internacionalmente contra el sistema de muros en CLT.

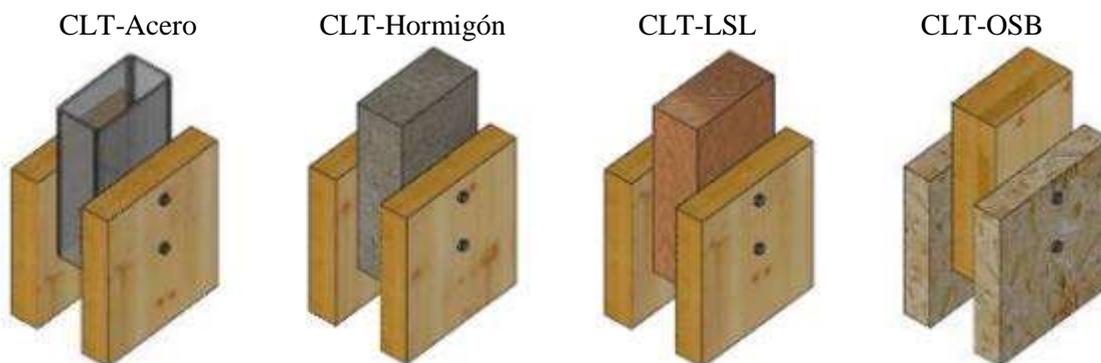


Figura 1: Conexiones preliminares de diseño.

A continuación, se presenta el análisis de las curvas de histéresis carga-desplazamiento de tres diferentes uniones de madera contralaminada (CLT) con acero, hormigón y madera reconstituida (LSL) sometidos a carga cíclica reversible. Estas uniones fueron ensayadas en el Laboratorio de Construcción de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile. La Tabla 1 presenta las características físicas de las uniones antes mencionadas. Todas las indicaciones de medidas se encuentran en la Figura 2.

Tabla 1: Características de las uniones

Uniones	T1(mm)	E1(mm)	T2(mm)	E2(mm)	Separación tornillos (mm)
CLT-Acero	60	290	100	200	100
CLT-Hormigón	60	450	100	400	150
CLT-LSL	60	140	90	240	100

2. METODOLOGÍA

2.1. Diseño preliminar de conexión

Se ejecuta el diseño por capacidad de carga lateral $F_{v,s,R}$ calculada en función del punto E12.1 del documento de Blas et al., (2017) [2], entre junta de acero-madera. Se diseña como una junta de refuerzo en el caso de la unión CLT-Acero, esto entre el perfil de acero (100x200x6mm) y el CLT, en 2 planos de corte.

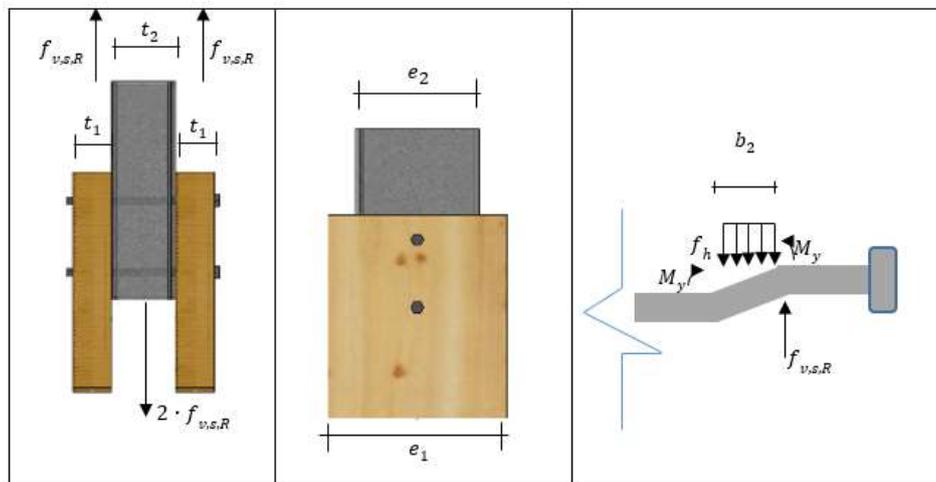


Figura 2: Diseño preliminar conexiones

Se utiliza el Eurocódigo 1995 [5], para obtener los resultados del momento de fluencia de los conectores ($M_{y,Rk}$), la resistencia de aplastamiento de la madera ($f_{h,k}$). Mediante un estudio de diagrama de equilibrio de fuerzas (sumatoria de momentos en el punto A y sumatoria de fuerzas verticales), se obtiene la capacidad de carga lateral.

$$F_{v,s,R} = f_{h,k} \cdot d \cdot b_2 = 2078.55 \text{ kN} \quad (1)$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,k} \cdot d}} = 37.45 \text{ mm} \quad (2)$$

$$M_{y,Rk} = f_{h,k} \cdot d \cdot b_2 \cdot \left(\frac{b_2}{2}\right) = 19460.147 \text{ N.mm} \quad (3)$$

Según el documento Instituto Alemán de Tecnología de la Construcción (IATC), o en siglas alemanas (DIBt), estudio en el cual recomiendan la siguiente ecuación como resistencia al aplastamiento del CLT con conector, ver DIN EN 12512. (2005) [4].

$$f_{h,k} = 9 \cdot (1 - 0,017 \cdot d) = 7.929 \text{ N/mm}^2 \quad (4)$$

donde:

$F_{v,s,R}$ = es la capacidad de carga lateral.

$M_{y,Rk}$ = es el momento de cedencia del conector.

$f_{h,k}$ = es la resistencia al aplastamiento de CLT.
 b_2 = distancia de aplastamiento.
 d = diámetro del conector.

2.2. Programa experimental

Protocolo de Carga

La figura 3 presenta el protocolo de carga empleado para las 3 uniones ensayadas. El desplazamiento máximo entre la prensa y la probeta es de 100mm, es la máxima amplitud del protocolo de carga para la unión.



Figura 3: Protocolo de carga aplicado

Uno de los procedimientos a considerar, son los estándares europeos como ETA (European Technical Approvals), que proporcionan valores relevantes en el diseño de conexiones de CLT (ETA-12/0347, 2017) [4]. El protocolo de carga a usar para los ensayos de uniones será el propuesto en la normativa DIN EN 12512, (2005) [3]. Se utilizará la máquina de ensayo universal (UE34300 UTM) del laboratorio de Construcción UC con una capacidad aproximada de 300 kN (30 tonf) para realizar pruebas monotónicas y cíclicas de todas las configuraciones. La velocidad del protocolo será de 0.2mm/seg en las conexiones. Dentro de este marco de ideas, se debe tener en cuenta la utilidad del enfoque de respuesta cíclica de un conector (resorte no lineal calibrado) en una estructura de marco plataforma presentada por Folz y Filiatrault, (2002) [7] (ver Figura 4). Este método es el que se usará para calcular los parámetros de calibración de las curvas histeréticas de cada conexión a través del MCASHEWFIT, apartado del programa de elementos finitos MCASHEW, Pang et al., (2007) [8].

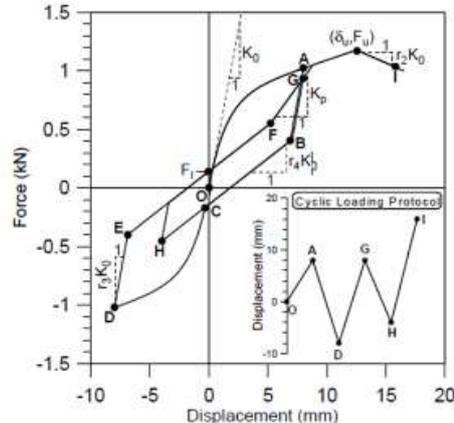


Figura 4: Modelo histerético SAWS

Se utilizará para varios casos de combinaciones híbridas (acero-CLT, OSB-CLT, LSL-CLT, Hormigón CLT) de muros de corte (ver figura 5).

2.3. Materiales e instrumentación.

La instrumentación se desarrollará en base a los desplazamientos verticales de las conexiones, tanto del uso de la celda de carga interna de la prensa como levantamiento con LVDT (*Linear Variable Differential Transformers*) esto en el caso de la conexión CLT-Hormigón. Generalmente, para garantizar que exista ductilidad en la unión, se verifica que no exista falla por aplastamiento de la madera en los ensayos con pasadores. En las mayorías de las normas, la ductilidad está en función de la resistencia por aplastamiento. Los pasadores tipo dovelas dependen por lo general de ciertos parámetros como la geometría de la conexión, espesor de la madera, propiedades mecánicas de la madera, diámetro del pasador y su resistencia de fluencia. Dentro de los pasadores que se usarán están los llamados pasadores autopercutores de 233 mm de largo y 7 mm de diámetro, que pueden penetrar madera y acero. La resistencia al corte lateral de los pasadores es de 23.05 kN. Para los ensayos experimentales estos pasadores se usarán en el caso del ensayo CLT-acero (ver Figura 6).



Figura 6. Pasador metálico TX 40 de 7mm de Rothoblass

En el caso de la conexión de las uniones CLT-Hormigón y CLT-LSL se usará el tornillo llamado conector todo rosca de cabeza cilíndrica TX 30 con diámetro 7 y de longitud 260 mm. La resistencia al corte lateral en este caso es de 15.40 kN (ver Figura 7).



Figura 7. Pasador metálico TX 30 de 7 mm de Rothoblass

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

El procedimiento de la evaluación de concepto se inició por medio de ensayos de uniones marco-conector-panel, por ser éstas las que controlan el comportamiento de un muro. Se ensayaron 3 combinaciones de materiales a nivel de unión (acero-CLT, hormigón-CLT y LVL-CLT), lo que validó que las uniones se comporten independientemente de la combinación de materiales, como una unión lateral convencional de madera, con sus típicas características mecánicas conocidas. Lo anterior, tiene sentido al considerar que, al añadir materiales más rígidos y resistentes, el comportamiento de la unión es gobernado por la componente “madera”. En primer lugar, se emplea la conexión CLT-acero para determinar el comportamiento ante cargas monotónicas (ver figura 8).

3.1. Diagrama de Histéresis

La figura 8 presenta los diagramas de histéresis carga-desplazamiento de la unión CLT-Acero. Se pueden apreciar que existen 13 ciclos de carga. Se puede observar cómo los bucles se van inclinando, lo cual demuestra que la principal respuesta del muro ante cargas reversibles cíclicas es dominada por corte. Se aprecia una reducción de resistencia y de capacidad para disipar energía. Por observación visual, se han identificado también los puntos donde se producen la

primera falla por fluencia. Por el sonido también se pudo notar el esfuerzo y disipación de los conectores. Cabe resaltar que los resultados del ensayo monotónico de la unión CLT-Acero indican alta ductilidad ($D = 4.27$) de la primera configuración ensayada (ver figura 7). También se tiene que los tornillos tuvieron una capacidad máxima de corte de 13,21 kN aproximadamente, esto para 2 ensayos (1 monotónico y 1 cíclicos con la misma configuración). También se obtiene una rigidez inicial de 3.25 kN/mm.

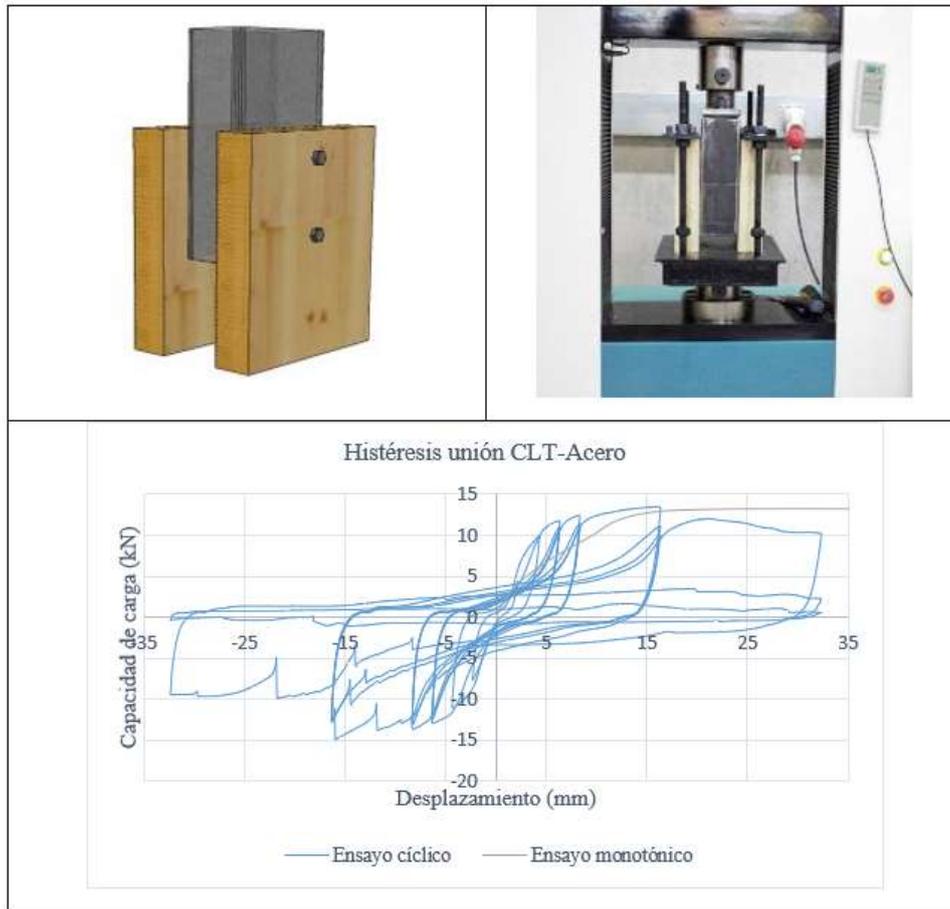


Figura 8. Curva histerética de la unión CLT-Acero e imágenes.

Los resultados del ensayo monotónico de la unión CLT-Hormigón indican alta ductilidad ($D = 5.54$) de la primera configuración ensayada (ver figura 9). También se tiene que los tornillos tuvieron una capacidad máxima de corte de 14.54 kN aproximadamente, esto para 1 ensayo cíclico. En otra parte, se obtiene una rigidez inicial de 4.14 kN/mm.



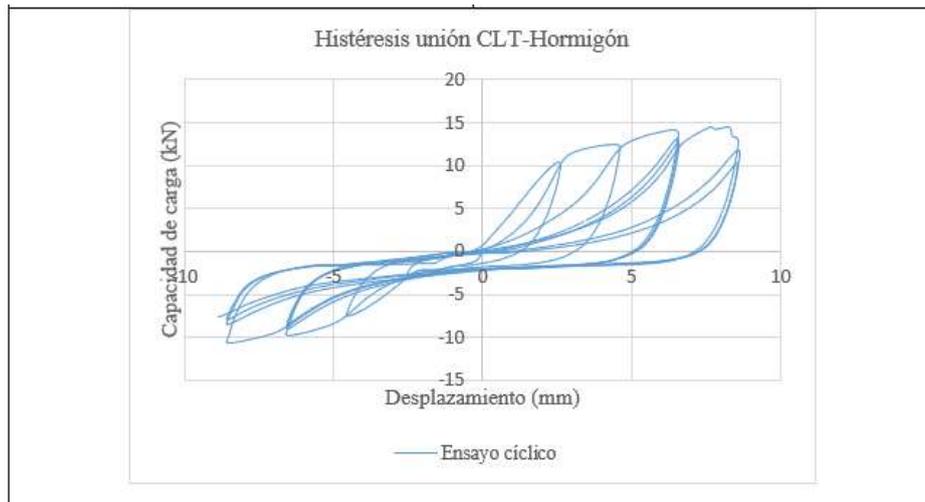


Figura 9. Curva histerética de la unión CLT-Hormigón e imágenes.

En otros resultados, específicamente en el ensayo monotónico de la unión CLT-LSL indican baja ductilidad ($D = 2.61$) de la primera configuración ensayada (ver figura 10). También se tiene que los tornillos tuvieron una capacidad máxima de corte de 15.38 kN aproximadamente, esto para 2 ensayos (1 monotónico y 1 cíclicos con la misma configuración). También se obtiene una rigidez inicial de 1.2kN/mm.

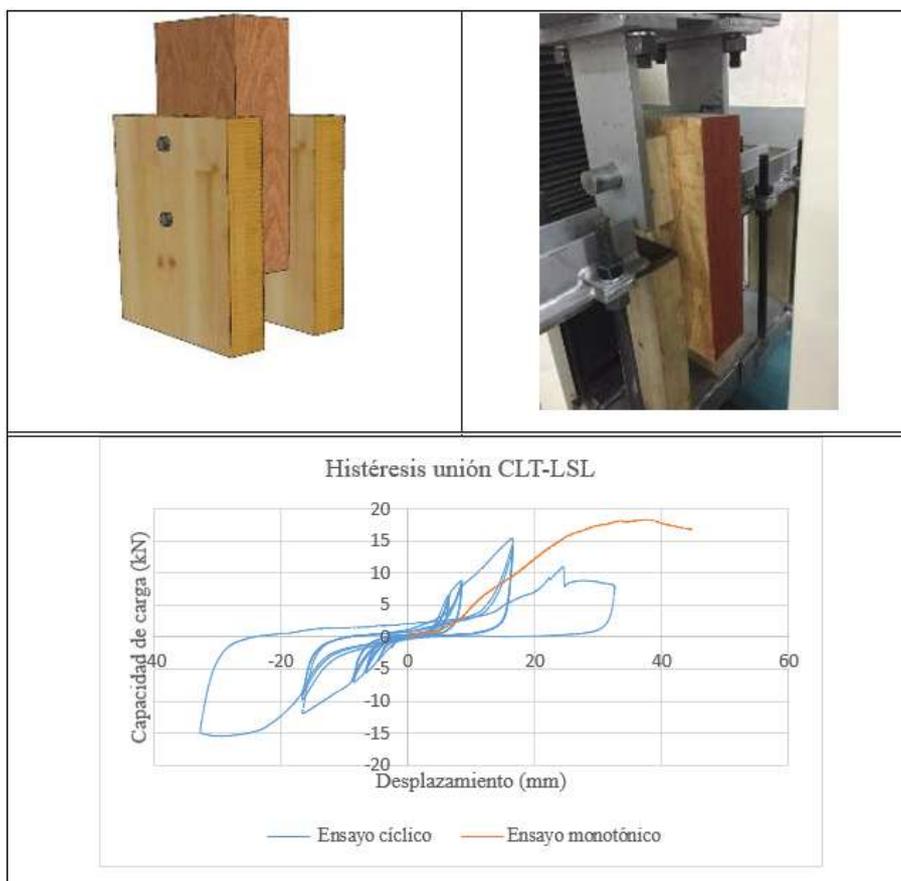


Figura 10. Curva histerética de la unión CLT-LSL e imágenes.

3.2. Modelo EN 12512

La definición del punto de fluencia se establece como el punto de intersección entre dos líneas. Las líneas son las secantes de la curva esquelética definida por puntos al 10% y 40% de carga horizontal y el 1/6 de la tangente del ángulo formado por la primera línea. La capacidad de carga será la máxima (ver Figura 11).

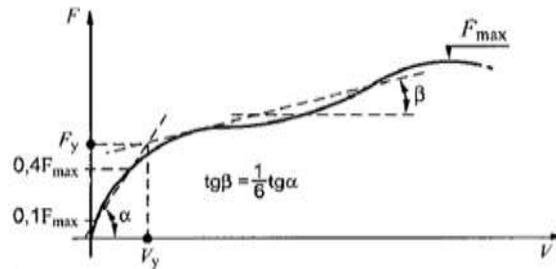


Figura 11. Metodología DIN EN 12512 para cálculo de la ductilidad.

La figura 12 muestra la envolvente de las curvas de histéresis (esquelética) de las uniones, la cual indica claramente un comportamiento semi-dúctil [FEMA 307] [6].

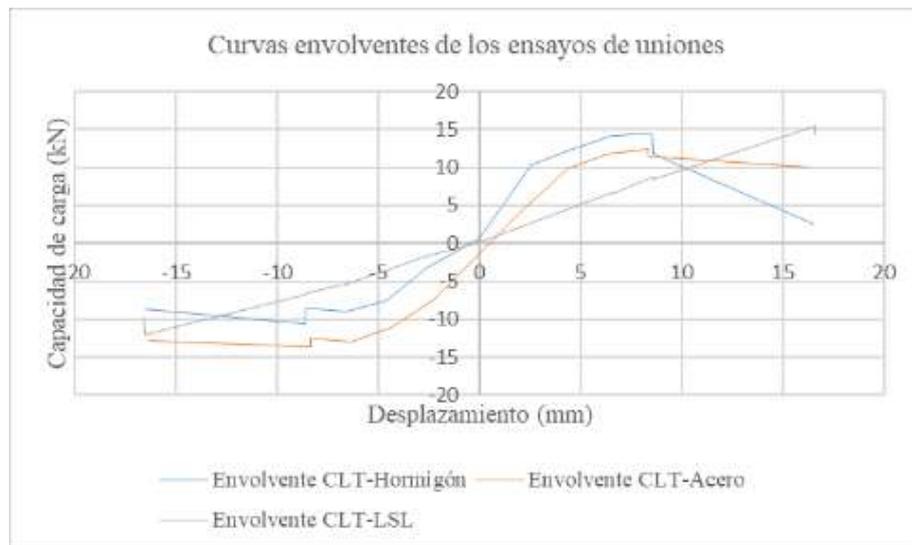


Figura 12. Curvas experimentales (envolventes).

3.3. Comparación disipación de Energía de las uniones.

Para calcular la disipación de energía en cada ciclo de carga se siguió la siguiente metodología:

1. Obtener desde la curva de histéresis, cada uno de los ciclos involucrados en el ensayo de cada unión. Para ello se elaboró una rutina en MATLAB que pudiera identificar el inicio y fin de cada uno.
2. Una vez conocida la relación fuerza – deformación de cada ciclo, se integró numéricamente la energía disipada E_D . Gráficamente este valor corresponde al área encerrada dentro del ciclo de carga.

La figura 13 muestra la disipación de energía por cada ciclo de carga de las uniones #1, #2 y #3. Obsérvese cómo va aumentando el área de los lazos conforme aumenta el ciclo de carga hasta que llega a un punto donde obtiene comportamiento plástico, lo cual indica que las uniones incrementan su disipación de energía conforme cada incremento en desplazamiento lateral hasta llegar a cierto punto. Así mismo, se puede notar cómo los lazos se inclinan mostrando que se trata de un elemento regido por cortante, y con disminución de rigidez y de resistencia. A continuación,

se presentan las curvas de disipación de energía de las tres uniones en estudio, en un mismo grafico para facilitar la comparación:

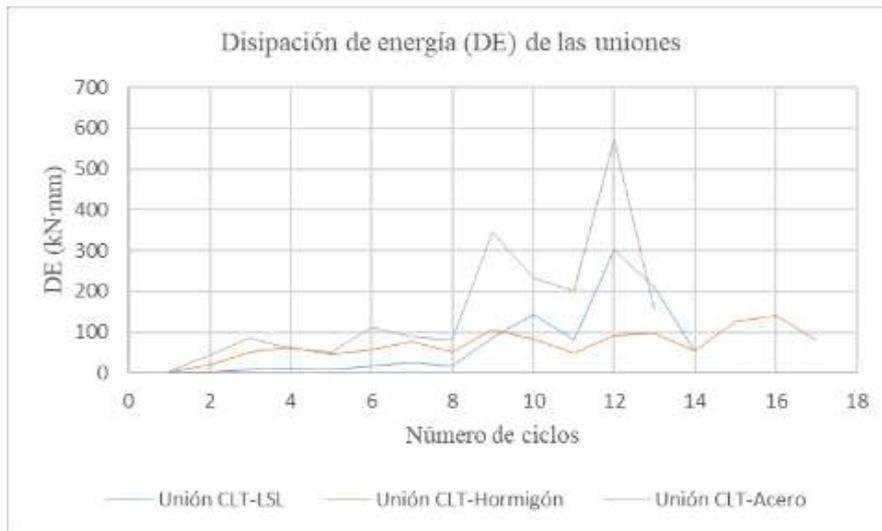


Figura 13: Disipación de energía de las uniones.

3.4. Amortiguamiento viscoso equivalente de las uniones

El método más común para determinar el amortiguamiento viscoso equivalente es igualar la energía que disipada el elemento en estudio durante un ciclo con la energía que disipa un sistema viscoso equivalente. Esta relación nos lleva a la siguiente expresión [Chopra, 2012] [2]:

$$\xi_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{s_o}}$$

Siendo E_{s_o} y u_o la rigidez secante y deformación máxima, respectivamente. Donde E_{s_o} es la energía de deformación. Estos parámetros son los obtenidos experimentalmente en cada ciclo de carga. En la figura 14 se presenta el amortiguamiento viscoso equivalente de las 3 uniones representadas en este artículo en función de los ciclos.

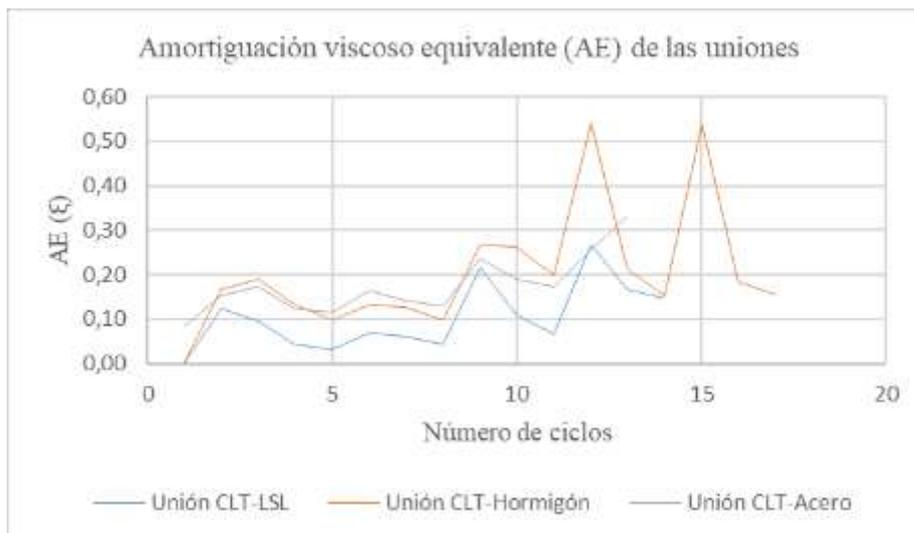


Figura 14: Disipación de energía de las uniones.

Para determinar el amortiguamiento promedio se tomaron solo los ciclos más representativos de comportamiento sísmico, vale decir, aquellos cuya deformación está comprendida entre la

deformación de cedencia d_e y a deformación última d_u . Con ello, el amortiguamiento viscoso obtenido es de:

$$\begin{aligned}\xi_{eq}^{MCLT-Acero} &= 12.5\% \\ \xi_{eq}^{MCLT-Hormigón} &= 13.3\% \\ \xi_{eq}^{MCLT-LSL} &= 9.4\%\end{aligned}$$

3.5. Degradación de rigidez

El procedimiento consistió en obtener la curva de degradación de rigidez de cada unión mediante la rigidez secante de cada ciclo de carga. Para ello se requiere determinar los dos puntos de mayor carga (para desplazamiento negativo y positivo), y las deformaciones máximas obtenidas en los dos puntos extremos del ciclo estudiado. Luego es posible calcular la rigidez secante usando la siguiente expresión:

$$K_{sec} = \frac{\Delta V_{max}}{\Delta \delta_{max}}$$

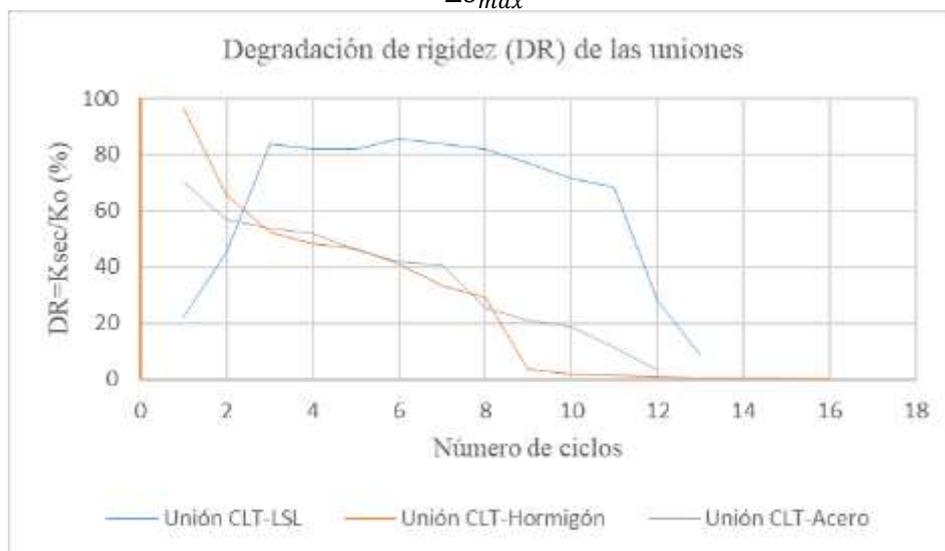


Figura 15: Degradación de rigidez de las uniones.

Es posible notar en las uniones de acero y hormigón una fuerte degradación de rigidez sostenida a medida que aumenta los ciclos (los resultados obtenidos se muestran en la figura 15). Por último, se calibran las curvas según el modelo en MCASHEWFIT mediante una curva numérica desarrollada por análisis estadísticos (ver Tabla 2).

Tabla 2: Parámetros de calibración de las uniones.

Unión	K0	R1	R2	R3	R4	fo	f1	desplaz	ALFA	BETA
CLT-Acero	4.613	0.003	-0.085	1.248	0.010	13.366	2.116	16.096	0.950	1.250
CLT-Hormigón	4.685	0.000	-0.034	1.525	-0.001	11.609	1.624	4.075	0.830	1.120
CLT-LSL	1.153	0.083	-0.411	2.370	0.037	15.490	1.517	20.255	0.242	1.472

4. CONCLUSIONES

Las uniones de CLT-Acero y CLT -Hormigón se comportaron mayormente dúctil que la conexión CLT-LSL, aunque se espera un mejor comportamiento cuando se ensaye a futuro la conexión con clavos. El efecto de fragilidad en la conexión de CLT-Hormigón y CLT-LSL se debe al tornillo empleado. En cambio, el pasador en la conexión CLT-Acero tiene mejores propiedades dúctiles.

La línea de disipación de energía nos permitió identificar claramente los cambios que ocurren debido a la aparición de la primera fisura en la unión. Es interesante mencionar la transferencia que existe (y que se muestra en la curva de disipación de energía) entre la unión CLT-Hormigón y el CLT-Acero, algo que otro gráfico no es capaz de mostrar. La degradación de rigidez es sostenida y severa para las uniones CLT-Acero y CLT-Hormigón.

5. AGRADECIMIENTOS

El autor está completamente agradecido al apoyo por parte del equipo del Laboratorio de Construcción de la Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Blaß, H. J., & Sandhaas, C. (2017). *Timber Engineering Principles for Design*.
- [2] Chopra, A. K. 2012, *Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering*.
- [3] DIN EN 12512. (2005). *Holzbauwerke - Prüfverfahren - Zyklische Prüfungen von Anschlüssen mit mechanischen Verbindungsmitteln [Estructuras de madera métodos de prueba Ensayos cíclicos de conexiones con mecánica]*.
- [4] ETA-12/0347. (2017). *European Technical Assessment*.
- [5] European Committee for Standardization. (2016). *EN 1995-1-1: Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings*. Brussels.
- [6] FEMA 307 “Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings”, ATC, California, 1998.
- [7] Folz, B., & Filiatrault, A. (2002). *A Computer Program for Cyclic Analysis of Shearwalls in Woodframe Structures*.
- [8] Pang, W., Rosowsky, D., Pei, S., & Van De Lindt, J. W. (2007). Evolutionary Parameter Hysteretic Model for Wood Shear Walls.
- [9] Ringhofer, A., Brandner, R., & Blaß, H. J. (2018). Cross laminated timber (CLT): Design approaches for dowel-type fasteners and connections. *Engineering Structures*.
- [10] Tamagnone, G., & Fragiaco, M. (2018). On The Rocking Behavior Of CLT Wall Assemblies. En *World Conference On Timber Engineering*. Seoul, Republic of Korea.