



CONEXIÓN CON PINCHING REDUCIDO PARA MUROS DE CORTE DE CLT

PINCHING-REDUCED CONNECTION FOR CLT SHEAR WALLS

Araya, Raúl ^{(1)*}; Guindos, Pablo ^(2,3)

⁽¹⁾ Licenciado en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile

⁽²⁾ Dr. Ingeniero. Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile

⁽³⁾ Centro UC de Innovación en Madera. Santiago, Chile

* Contacto: roaraya@uc.cl

CÓDIGO: 4620232

Resumen

El comportamiento global de una estructura es el reflejo del comportamiento de las conexiones entre los distintos elementos que la componen. Para el caso de muros de corte, el comportamiento vertical asociado al levantamiento está controlado por los elementos de anclaje tipo hold-down. Si bien estos elementos han probado su eficiencia a lo largo de su reiterado uso en sistemas marco plataforma o CLT, presentan ineficiencias en cuanto a su comportamiento cíclico, ya que su enfoque de diseño no considera impedir el aplastamiento que se produce en la madera. Mediante la incorporación de placas de acero en el diseño, la conexión presentada se enfoca en evitar el aplastamiento en la madera generado frente a cargas cíclicas. En esencia, el mecanismo de la conexión consiste en forzar a que las rótulas plásticas de los conectores mecánicos se generen en espacios específicos libres de madera, permitiendo de esta forma obtener un comportamiento histerético más predecible y homogéneo. Los resultados experimentales de las pruebas de concepto han mostrado que, si bien no se ha eliminado la totalidad del pinching, este logra reducirse considerablemente sin alterar negativamente la capacidad y ductilidad de la conexión. Los resultados aún no han sido validados en ensayos de muros, sin embargo, la evidencia entregada por las pruebas realizadas permite inferir que esta metodología de diseño de conexiones enfocada en el desplazamiento de las rótulas plásticas que se forman en los conectores mecánicos es efectiva.

Palabras-clave: Conexión, CLT, pinching, comportamiento cíclico.

Abstract

The overall behavior of a structure reflects the behavior of the connections between the different elements that make it up. In the case of shear walls elements, the vertical behavior associated with the lifting is controlled by the hold-down anchoring elements. Although these elements have proven their efficiency throughout their repeated use in light timber frame or CLT constructions, they present inefficiencies in terms of their cyclical behavior, since their design approach does not consider preventing the crushing that occurs in wood. By incorporating steel plates in the design. The presented connection focuses on preventing crushing in the wood generated against cyclic loads. The mechanism of the designed connection consists in forcing the plastic hinge of the connectors to be generated in specific spaces free of wood, allowing in this way to obtain a more predictable and homogeneous hysteretic behavior. The experimental results of the proofs of concept have shown that, although the entire pinching has not been eliminated, it is considerably reduced without negatively altering the capacity and ductility of the connection. The results have not yet been validated in shear wall tests, however, the evidence provided by the preliminary tests allows us to infer that this connection design methodology focused on the displacement of the plastic hinge that are formed in the connectors is effective.

Keywords: Connection, CLT, pinching, cyclic behavior.



1. INTRODUCCIÓN

Durante la última década, las construcciones en madera han ido en aumento producto del constante desarrollo de sistemas constructivos en la industria, enfocados principalmente a la edificación en altura (Kuzmanovska et al. 2018). Uno de estos sistemas es el CLT, sistema constructivo ideal para muros de corte, producto de los grandes valores de resistencia y rigidez en el plano que logra alcanzar (Schmidt and Blass 2018a). En estos elementos, el comportamiento vertical asociado al levantamiento suele estar controlado por elementos de anclaje tipo hold-down, como los de la Fig. 1.

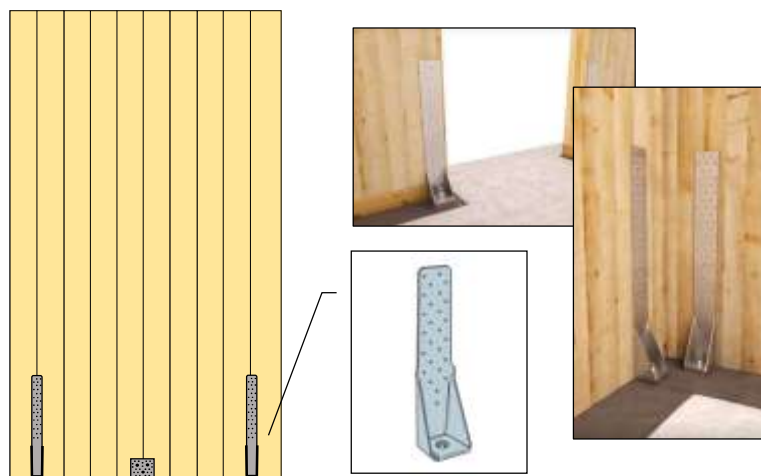


Figura 1: Muros de CLT con sistema hold-down (Simpson Strong Tie and Rothoblaas).

Si bien estos elementos han probado su eficiencia a lo largo de su reiterado uso en sistemas marco plataforma o CLT, presentan ineficiencias en cuanto a su comportamiento cíclico, ya que su enfoque de diseño no considera impedir el aplastamiento que se produce en la madera de la conexión. Este aplastamiento es el responsable de generar el fenómeno de pinching en la conexión, el cual se traduce en una pérdida en la capacidad de disipación de energía producto de tener lazos de histéresis más estrechos en cada repetición de carga. Para atenuar este efecto, algunos autores proponen realizar cambios en las configuraciones de tal forma que el comportamiento y mecanismos de falla, sean más controlables. Uno de estos cambios es el estudiado por Schmidt and Blass (2018b), que se basa en modificar la ubicación del espacio físico donde se generan las rótulas plásticas de los conectores frente a una falla dúctil.

Cuando la falla del conector es dúctil, la rótula plástica se genera en la zona del conector que se encuentra en contacto con la madera. Sin embargo, la incorporación de un espacio físico adicional (gap) entre las superficies que definen el plano de falla del conector, permitiría que las rótulas se formasen en esta zona. Si bien se observan ciclos de carga más uniformes que eliminan el pinching, la capacidad de los conectores se ve notoriamente reducida (hasta un 30% de la original), producto de que el momento sobre el conector se ve incrementado por este brazo adicional proporcionado por el gap, generando que el momento plástico del conector se alcance antes. De esta forma, se plantea un *trade-off* entre capacidad y disipación energética, dependiente del gap.



El dispositivo propuesto busca aprovechar esta dependencia del gap y compensar la pérdida de capacidad por medio de la utilización de placas de acero de refuerzo. El uso de este refuerzo no solo beneficia la capacidad resistente de la conexión, sino que también favorece el desarrollo de un comportamiento dúctil de acuerdo con lo visto por Blass et al. (2000). Esto abriría la posibilidad de una nueva metodología de diseño similar a la elaborada para las conexiones de acero post Northridge (Popov et al. 1998), donde el enfoque sería el desplazamiento de rótulas plásticas, pero esta vez a nivel de conectores.

2. METODOLOGÍA

2.1. Diseño del sistema propuesto

La capacidad del sistema dependerá de la cantidad de medios de fijación que este disponga. Es por ello, que para un diseño preliminar se consideraron los conectores suficientes para igualar las capacidades de diseño de los sistemas hold-down disponibles en el mercado, en su mayoría elaborados por las empresas Rothoblaas y Simpson Strong Tie. Tomando como referencia las capacidades de diseño de los catálogos de esta última, se tiene que los hold-down HTT22 y HTT5 alcanzan valores de diseño de 15,92 kN y 19,46 kN, respectivamente. Estos valores corresponderían a capacidades con un factor de seguridad aproximado de 4 al ser comparados con los ensayos realizados por Hummel (2016) y Liu and Lam (2019) a estos elementos; donde estos anclajes fueron capaces de soportar cargas últimas de 64,5 kN y 79,2 kN, respectivamente. Por lo tanto, el sistema propuesto deberá soportar al menos los 20 kN.

El sistema propuesto se muestra en la Fig. 2 y está compuesto por 2 conjuntos de elementos dispuestos a cada uno de los lados del panel de madera. Los componentes principales de cada conjunto son:

- Placas exteriores que simulan un hold-down
- Pernos de anclaje para las placas exteriores
- Pernos de fijación a la madera
- Placas interiores de refuerzo (adheridas a la madera)
- Elementos divisores de acero entre placas (adheridos a las placas exteriores)

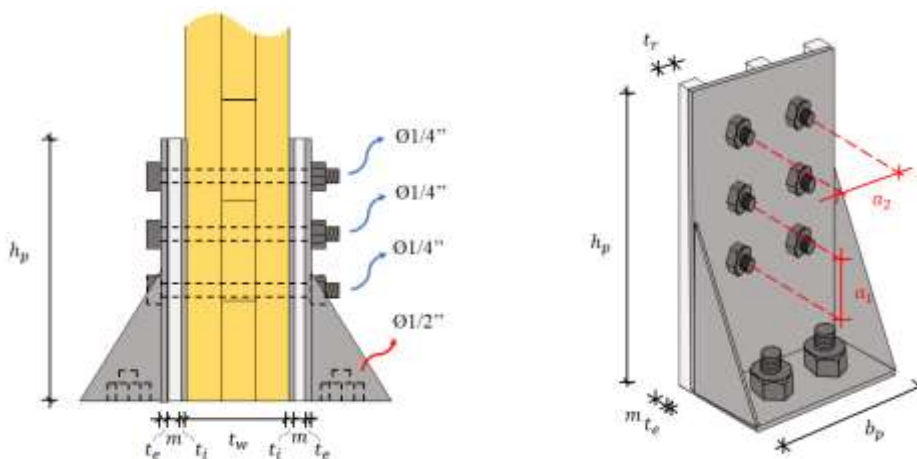


Figura 2: Esquema del sistema propuesto en reemplazo del hold-down.

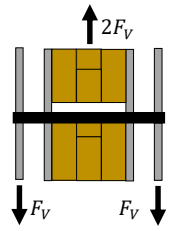
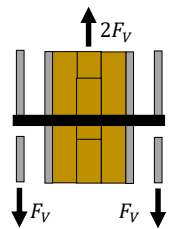
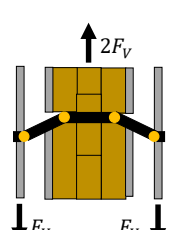
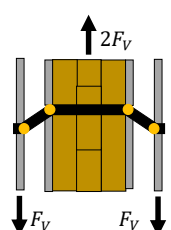


El dimensionamiento se realiza a partir de las expresiones analíticas que serán presentadas en la siguiente sección, a partir de las cuales se obtiene que la capacidad requerida por los medios de fijación se logra con el uso de 6 pernos $\varnothing 1/4''$, 2 pernos de anclaje $\varnothing 1/2''$, elementos divisores de $t_r = 15$ mm y placas de $h_p = 200$ mm, $b_p = 120$ mm. Finalmente, los espaciamientos entre conectores (a_1, a_2) y espaciamientos a bordes de placa se estiman según el Eurocode 5 (CEN 2010).

2.1.1. Estimación Analítica de la Capacidad

En base a la teoría de fluencia desarrollada por Johansen (1949), se analizan los posibles casos de falla en los conectores de la Tabla 1, considerando las propiedades plásticas (estimadas según las expresiones de diseño en Eurocode 5) involucradas en la formación de las rótulas según el equilibrio estático. De forma conservadora, no se consideran las componentes de fuerza que vienen por el efecto cuerda según el tipo de conector utilizado.

Tabla 1: Tipos de falla y capacidades en Newton considerados para la configuración propuesta

Modo I		$F_V = \frac{f_w d t_w}{2}$	(1)
Modo II		$F_V = f_{s,e} d t_e$	(2)
Modo III		$F_V = f_{s,i} d t_i + f_w d \left\{ \sqrt{\frac{4M_y}{f_w d} - (t_i^2 + 2m t_i) \left(\frac{f_{s,i}}{f_w} - 1\right) + m^2} - (t_i + m) \right\}$	(3)
Modo IV		$F_V = f_{s,i} d \left\{ \sqrt{\frac{4M_y}{f_{s,i} d} + m^2} - m \right\}$	(4)



donde:

- f_w es la tensión de aplastamiento longitudinal en la madera, en MPa.
- $f_{s,i}$ es la tensión de aplastamiento del refuerzo interior, en MPa.
- $f_{s,e}$ es la tensión de aplastamiento de la placa exterior, en MPa.
- t_w es el espesor del tablero de CLT, en mm.
- t_i es el espesor del refuerzo interior, en mm.
- t_e es el espesor de la placa exterior, en mm.
- M_y es el momento de fluencia plástica del conector, en Nmm.
- d es el diámetro del conector, en mm.
- m es el gap entre el refuerzo interior y la placa exterior, en mm.

2.1.2. Estimación Numérica de la Capacidad

Dado que la placa exterior e interior actúan como refuerzo en los extremos del gap, se modela la formación de rótulas plásticas en las zonas más próximas a estos elementos. Al aplicar un desplazamiento en la placa interna como se muestra en la Fig. 3, bajo un supuesto de adherencia total de la placa con la madera, se obtiene la capacidad del sistema mediante el cálculo de la reacción en la placa externa, así como el corte en los conectores.

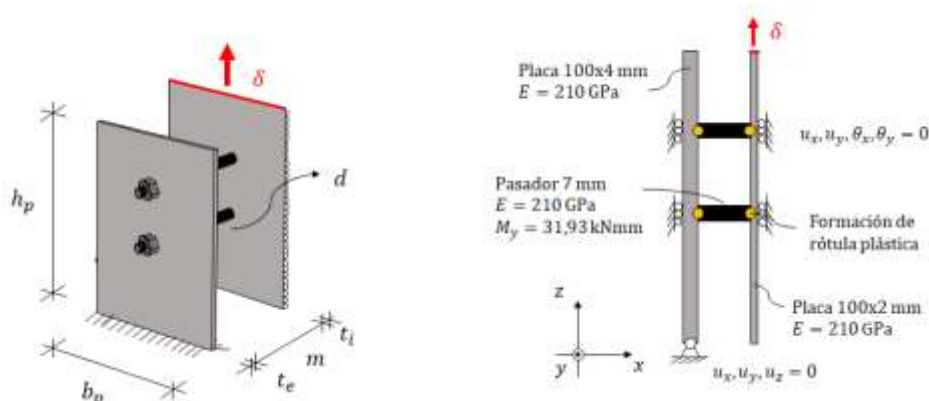


Figura 3: Modelación del concepto incorporando comportamiento plástico en las rótulas.

2.2. Prueba del concepto y validación experimental

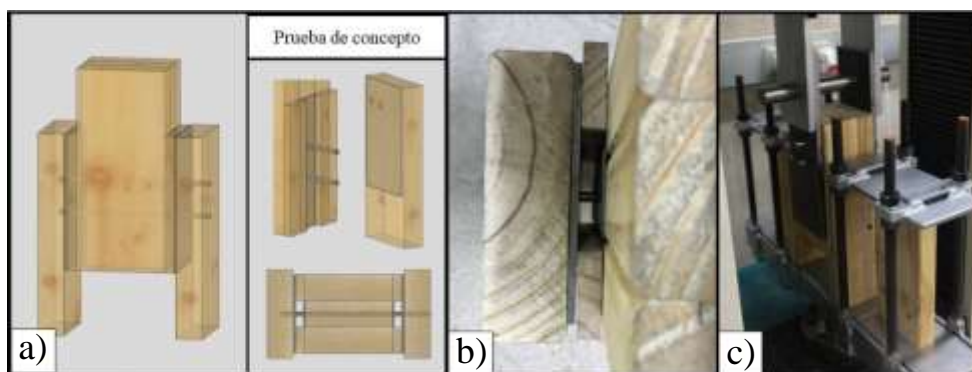


Figura 4: a) Esquema de la probeta; b) Gap entre placas; c) Set up ensayos cíclicos.



Para la validación del concepto se realizaron pruebas experimentales en probetas como las de la Fig. 4a; los materiales empleados corresponden a piezas de madera de entramado ligero de pino radiata 2x6" calidad C24, placas de refuerzo interno de espesor $t_i = 2$ mm, placas externas de espesor $t_e = 4$ mm y un gap (Fig. 4b) de 10 mm. Para analizar exclusivamente la componente de corte en los conectores, se utilizaron pasadores lisos de 7 mm en lugar de pernos, ya que con los pasadores no habría influencia alguna del efecto cuerda. La adhesión de las placas a la madera se lleva a cabo por medio de epóxicos de resistencia es de 320 kg/cm^2 y tornillos #6x1". El set up de los ensayos (Fig. 4c) consiste en fijar las piezas laterales, simulando un empotramiento de estas, mientras que la pieza central es desplazada verticalmente por la prensa.

Se realizaron 3 ensayos:

- 1) Ensayo de Control Monotónico (Ensayo CM): Probeta con gap nulo, removiendo los elementos divisores. El ensayo se usará para la calibración del ensayo cíclico.
- 2) Ensayo de Control Cíclico (Ensayo CC): Probeta con gap nulo. Este ensayo será comparado con el sistema propuesto para evaluar la mejora obtenida.
- 3) Ensayo Propuesto Cíclico (Ensayo PC): Probeta con gap de 10 mm, proporcionado mediante la incorporación de los elementos divisores.

El procedimiento de carga y medición de parámetros para los ensayos cíclicos se llevó a cabo según las especificaciones de la normativa europea EN 12512 (CEN 2006), considerando velocidades de carga de 0,2 mm/s para los ensayos.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Resultados Estimación Analítica

Se calculan los parámetros según el Eurocode 5 y se reemplazan los valores obtenidos (Tabla 2) en las expresiones analíticas de los distintos mecanismos de falla.

Tabla 2: Parámetros utilizados para estimar la capacidad de la conexión propuesta.

f_w [MPa]	$f_{s,i} = f_{s,e}$ [MPa]	t_w [mm]	d [mm]	t_i [mm]	t_e [mm]	M_y [Nmm]	f_u [MPa]	ρ [kg/m ³]
34,32	235	138	7	2	4	19560	414	450

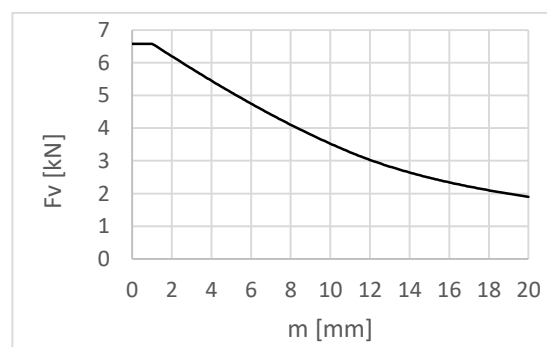
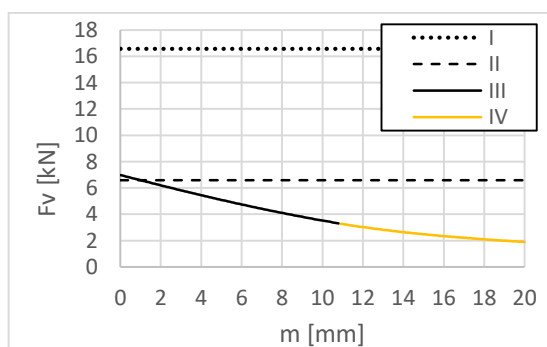


Figura 5: Modos de falla en función del gap (izquierda). Envolvente de falla (derecha).



Como se ve en la Fig. 5, para un gap de 10 mm se obtiene que la carga es 3,52 kN para el Modo III, correspondiente al aplastamiento de la placa de acero y madera. Luego, como las expresiones corresponden a la carga por plano de corte tendremos que la configuración realizada para la prueba de concepto resistirá $3,52 \text{ kN} \times 4 \text{ planos}$, es decir 14,08 kN.

3.2. Resultados Estimación Numérica

Al aplicar un desplazamiento de 0,049 mm; se obtiene el desarrollo de las rótulas plásticas en el primer conector. Luego, incrementando levemente este valor a 0,050 mm; se obtiene el desarrollo de las rótulas del conector restante. En la Fig. 6 se puede apreciar el estado final de carga, donde los conectores han plastificado y el esfuerzo cortante en cada uno de ellos es de 5,84 kN y 5,80 kN; respectivamente, lo cual implica una reacción en la placa exterior de 11,64 kN. Finalmente, dada la simetría del problema, se tendrá que la configuración para la prueba de concepto resistirá el doble, es decir 23,28 kN.

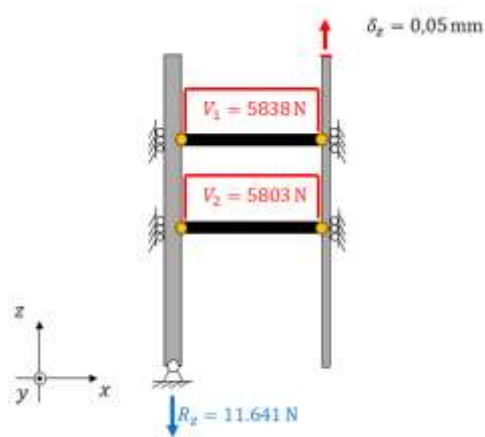


Figura 6: Esfuerzos de Corte y Reacciones modelo numérico.

3.3. Resultados Experimentales

A partir de los ensayos y mediciones realizadas, se tiene que la curva monotónica presenta un desplazamiento de fluencia de 2,32 mm y una capacidad máxima de 17,88 kN. Considerando 2 mm, se calibró el patrón de desplazamientos hasta los 16 mm.

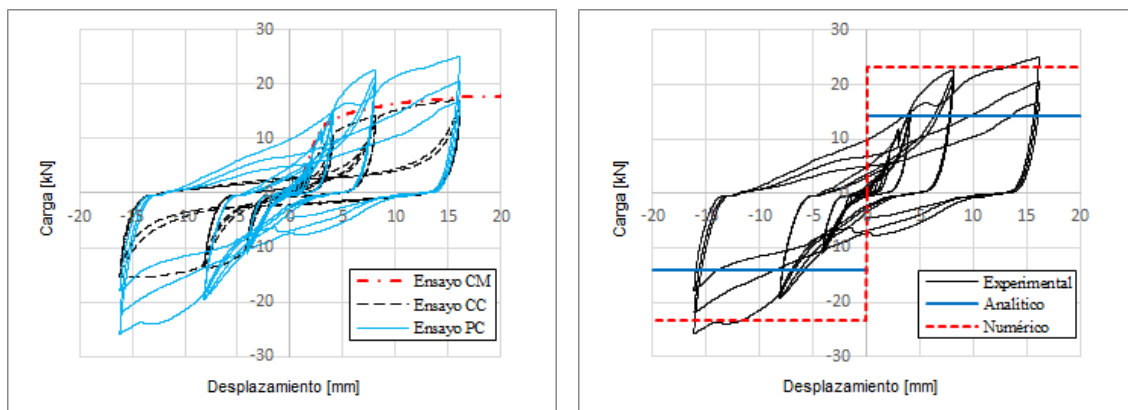


Figura 7: Resultados monotónico y cíclicos ensayos experimentales (izquierda). Comparación experimental, analítica y numérica (derecha).



En la Fig. 7 se puede apreciar cómo el ensayo de la prueba de concepto muestra un comportamiento cíclico más uniforme que el ensayo de control. Además, se aprecia que, para un mismo nivel de deformación, los resultados de la prueba de concepto siempre se encuentran por sobre el ensayo de control.

La falla observada durante el ensayo fue el aplastamiento de las placas de acero (Fig. 8), lo cual se corresponde con lo esperado según la estimación analítica de la capacidad. Además, se pudo apreciar un leve pandeo local en la placa interior (Fig. 8c) para los niveles de deformación de 16 mm. Finalmente, llevando la deformación a valores de ciclos superiores (32 mm), el sistema presentó fallas por desprendimiento de las placas internas con la madera y falla frágil del conector en la zona de la placa externa (Fig. 8b).

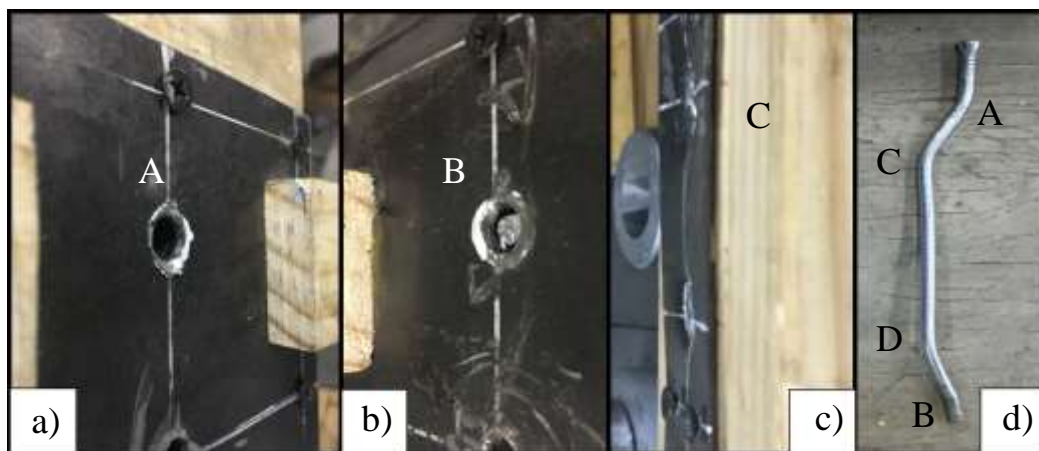
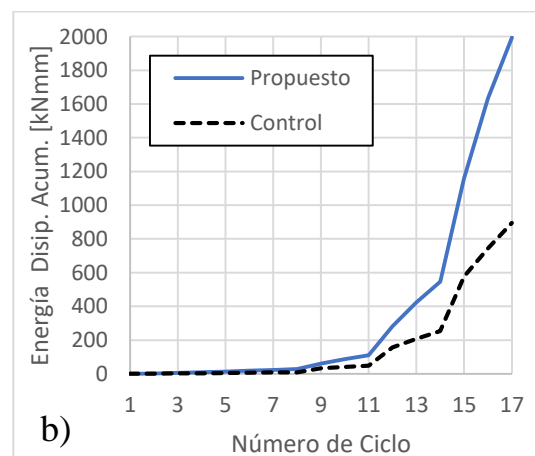
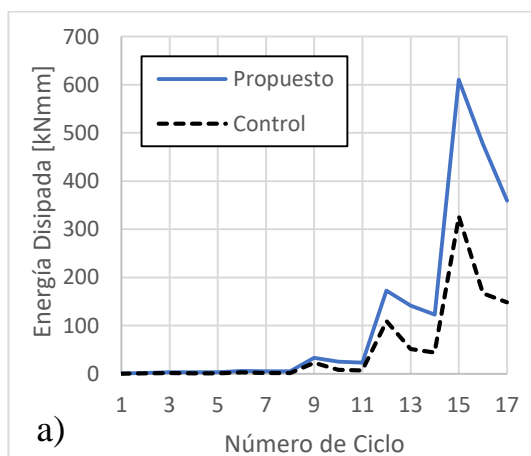


Figura 8: a) Aplastamiento placa externa izquierda (A); b) Aplastamiento placa externa derecha y rotura del pasador (B); c) Aplastamiento y pandeo placa interna izquierda (C); d) Rótula plástica (A, C, D) y rotura (B).

De acuerdo con los parámetros cíclicos calculados según la norma EN 12512, el sistema propuesto no solo presenta una mayor capacidad resistente, sino que también presenta una mayor capacidad de disipación de energía, tal como se muestra en la Fig. 9a y Fig. 9b; además de una mayor rigidez (Fig. 9c) y amortiguamiento equivalente (Fig. 9d) respecto al ensayo de control.



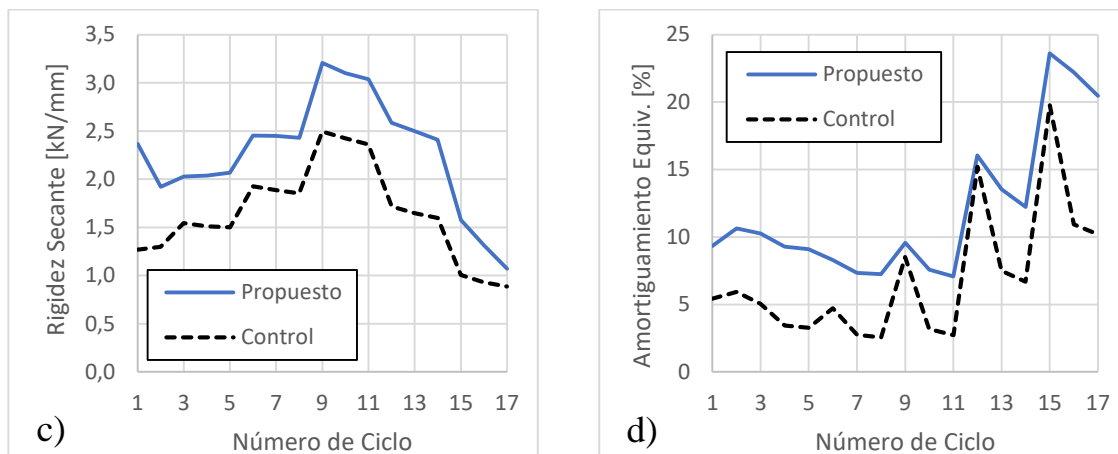


Figura 9: Gráficos según ciclos realizados: (a) Energía disipada; (b) Energía disipada acumulada; (c) Rigidez secante; (d) Amortiguamiento viscoso equivalente.

En la Tabla 3 se muestra un resumen de los parámetros registrados para cada ensayo cíclico. El sistema propuesto muestra una mejora en la capacidad resistente de un 40,6%, lo cual se debe al uso de las placas como refuerzo en los planos de corte, lo cual a su vez se ve reflejado en el incremento de rigidez del sistema en un 30,9%. Sin embargo, la mejora más notable es la capacidad de disipación de energía, donde esta es 2,23 veces la observada en el ensayo de control. Esto se debe a que los ciclos registrados para un mismo nivel de deformación son mucho más uniformes, dado que la falla queda controlada por el aplastamiento del acero en vez de la madera.

Tabla 3: Parámetros cíclicos según EN 12512 para los ensayos de control y propuesto.

	Capacidad máx. [kN]	Energía disipada Acum. (ciclo 17) [kNmm]	Rigidez Secante (ciclo 9) [kN/mm]
Control	17,88	894	2,49
Propuesto	25,13	1994	3,21
Diferencia [%]	40,55	123,04	30,92

4. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta la validación experimental de un concepto de diseño enfocado al desplazamiento de rótulas plásticas aplicado a conectores en uniones de madera, donde se ha demostrado que, mediante la aplicación de un gap en el plano de corte, complementado con refuerzos en sus extremos, es posible forzar la formación de las rótulas dentro del gap o en los límites de los refuerzos. Para asegurar este tipo de falla, es muy importante que la fijación entre el refuerzo interno y la madera sea lo suficientemente resistente para que este se comporte como un elemento compuesto; esto se asegura mediante el uso de adhesivos de grandes capacidades (relativos a los tamaños de placas de refuerzos utilizados) o una cantidad adecuada de medios de fijación (como tornillos). La estimación analítica realizada permite predecir de buena forma el tipo de falla que se observa en los ensayos del sistema propuesto. Además, la capacidad estimada con la



normativa europea vigente entrega cargas de diseño que para el caso estudiado presentan un factor de seguridad de 1,78. Por otro lado, el modelo numérico si bien no representa bien la rigidez de la conexión producto de las restricciones implementadas, logra estimar de buena forma la capacidad, ya que para el caso de estudio se vio que los valores solo eran un 8% superiores. El efecto del pinching se ve notoriamente reducido producto del uso de refuerzos. Para este caso en particular, se observó que con espesores de refuerzos pequeños (2 mm) hay una mejora considerable traducida en lazos de histéresis más uniformes, por lo que es de esperar que para espesores mayores (4 mm) esta mejora sea aún mayor. A partir de lo anterior, es factible afirmar que el dispositivo diseñado presenta un buen desempeño cíclico en comparación a los dispositivos hold-down tradicionales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero del Proyecto Fondecyt 11170863 y de la Pontificia Universidad Católica de Chile, mediante la Beca de Asistencia a Congresos Internacionales para Alumnos de Magíster en Ciencias de la Ingeniería 2019.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Blass, H., Schmid, M., Litze, H. & Wagner, B. (2000). Nail plate reinforced joints with dowel-type fasteners. *Proceeding of World Conference on Timber Engineering*. Whistler, British Columbia, Canada, 2000.

European Committee for Standardization (CEN) (2006). EN 12512:2006. Timber structures-test methods-cyclic testing of joints made with mechanical fasteners. Brussels.

European Committee for Standardization (CEN) (2010). EN 1995-1-1: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. Brussels.

Hummel, J. (2016). Displacement-based seismic design for multi-storey cross laminated timber buildings. Ph.D. Dissertation, Kassel University, Germany.

Johansen, K.W. (1949). Theory of timber connections. *IABSE*, Vol.9, 249-262.

Kuzmanovska, I., Gasparri, E., Tapias, D., Aitchison, M. (2018). Tall timber buildings: Emerging trends and typologies. *Proceeding of World Conference on Timber Engineering*. Seoul, Republic of Korea, 2018.

Liu, J., Lam, F. (2019). Experimental test of coupling effect on CLT hold-down connections. *Engineering Structures*, Vol.178, 586-602.

Popov, E., Tzong, Y., Shih, C. (1998). Design of steel MRF connections before and after 1994 Northridge earthquake. *Engineering Structures*, Vol.20, Issue 12, 1030-1038.

Schmidt, T., Blass, H. (2018). Recent development in CLT connections part I: In-plane shear connection for CLT bracing elements under static loads. *Wood and Fiber Science*, Vol.50 Special issue, 48-57.

Schmidt, T., Blass, H. (2018). Recent development in CLT connections part II: In-plane shear connection for CLT bracing elements under static loads. *Wood and Fiber Science*, Vol.50 Special issue, 58-67.