



MODELADO NUMÉRICO DE LA CONEXIÓN POR MEDIO DE ENTALLES EN LAS PLACAS DE CLT Y HORMIGÓN

NUMERICAL MODEL OF NOTCHES CONNECTIONS IN CLT AND CONCRETE PLATES

Amorim, Sílvia
UFMG, Brazil

CÓDIGO: 4619613

Resumen

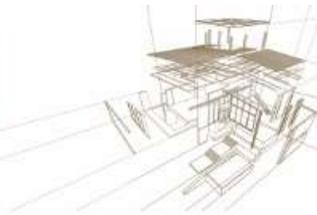
La construcción de edificaciones de múltiples alturas en madera es posible a partir de los paneles estructurales de CLT- *Cross Laminated Timber* o madera laminada encolada empleada como forjados y paredes estructurales. Se constituyen con tablas de madera unidas con adhesivo estructural formando capas sobrepuestas ortogonalmente. La combinación de los forjados de CLT combinados con una capa de hormigón en ese tipo de edificaciones presentan ventajas para la eficiencia estructural, como mejorar la rigidez a la flexión y la dinámica de la estructura, además de mejorar la eficiencia en cuanto a los requisitos constructivos como aislamiento térmico, acústica en el caso de impacto y seguridad en situaciones de incendio. En ese trabajo, se estudia la conexión entre el hormigón y el CLT por medio de entalles circulares en la madera a partir de simulación numérica en el programa ANSYS del ensayo de *pushout* de la conexión, obteniéndose la resistencia y comparándola a los valores analíticos. Para las propiedades mecánicas del CLT, se utilizó la clase de resistencia C20 y C30 de acuerdo con la norma EN 338. A partir de los resultados obtenidos, se considera necesario realizar el análisis experimental.

Palabras-clave: CLT-hormigón, conexión CLT-hormigón, pushout, entalle en la madera.

Abstract

Multi-storey buildings can be constructed using timber panels for slabs or walls, which are stable and self-supporting, by using CLT panels - Cross Laminated Timber. They consist of several layers of timber boards glued with structural adhesive and arranged orthogonally. The slabs of CLT when combined with a concrete layer on the upper surface have their structural performance optimized for flexural stiffness, structure dynamics, as well as the best efficiency in meeting the requirements of the construction system such as thermal, acoustic and the fire behaviour. This work studies the connection between the concrete and the CLT by circular notches in the timber through numerical simulation of the pushout test in the ANSYS software and comparing it to the analytical values. For the mechanical properties of the CLT strength classes C20 and C30 according to EN 338 were used.

Keywords: CLT-concrete, CLT-concrete connection, pushout, timber notches



1. INTRODUCCIÓN

La construcción con madera de edificaciones de múltiples alturas puede hacerse utilizando paneles estructurales de madera contralaminada (CLT, del inglés *Cross Laminated Timber*) para forjados y paredes (Brandner et al., 2016). Se constituyen de tablas de madera unidas con adhesivo estructural formando láminas sobrepuestas ortogonalmente.

Los forjados de CLT combinados con una capa de hormigón en este tipo de edificaciones presentan ventajas para la eficiencia estructural, como la mejora de la rigidez a flexión, la relación peso/resistencia y la dinámica de la estructura; además de mejorar la eficiencia en cuanto a los requisitos constructivos como aislamiento térmico, acústica frente al impacto y seguridad en situaciones de incendio (Thilén, 2017) y (Loebus et al., 2016).

En la conexión entre el CLT y el hormigón se utilizan para las mismas conexiones empleadas en otras estructuras mixtas, como vigas de madera laminada encolada y hormigón, bastante empleadas en las situaciones prácticas de acuerdo con (Ceccotti, 2002). Lo que difiere con respecto a estas en el caso de los paneles CLT y hormigón es que la dirección del esfuerzo en la conexión que es bidireccional y no unidireccional.

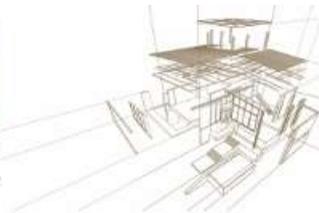
El presente trabajo es una parte de la tesis doctoral respecto a la investigación del comportamiento bidireccional de placas compuestas CLT-hormigón, conectados por medio de entalles circulares en la madera. El objetivo del presente trabajo es definir el modelo numérico del ensayo de cortante de la unión, o *pushout*, con el fin de determinar la eficiencia de esas conexiones y se comparan los primeros resultados con un análisis analítico.

1.1. Conexiones madera-hormigón por medio de entalles

Es la conexión por medio de entalles es una alternativa competitiva en comparación a otras conexiones comunes entre madera y hormigón, por su simplicidad de ejecución, rigidez y resistencia, (Ceccotti, 2002).

El comportamiento de los entalles para el caso unidireccional en elementos estructurales de madera y hormigón está bastante estudiado y parametrizado considerando la profundidad del entalle en la madera, la separación entre entalles y el largo en el caso de entalles continuos. (Kudla, 2015), (Wood solutions - design and build, 2016).

Según Boccadoro et al. (2017), en las estructuras compuestas de madera-hormigón conectados por medio de entalles en la madera ocurren los siguientes modos de rotura: cizalladura en la madera, en el hormigón o la apertura de brecha entre los materiales, como muestra la Figura 1.



En el cálculo teórico de la rotura de la madera delante del entalle, se puede considerar un modelo simplificado cuya distribución de tensiones de cizalladura, τ_{xz} , es constante en esa región, de acuerdo con la

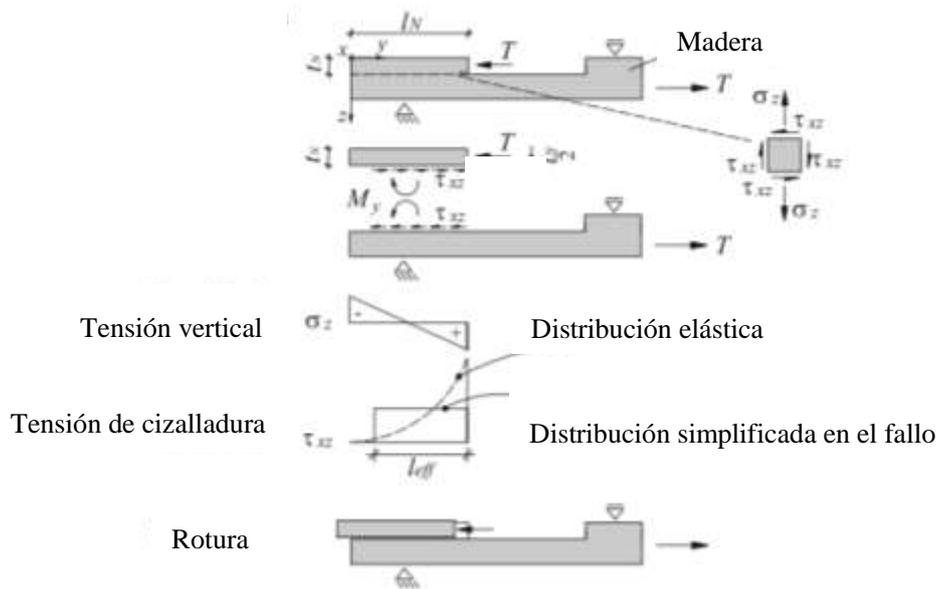


Figura 2. Ese modelo es solamente válido para bajas solicitaciones y en régimen elástico (Boccardo et al., 2017).

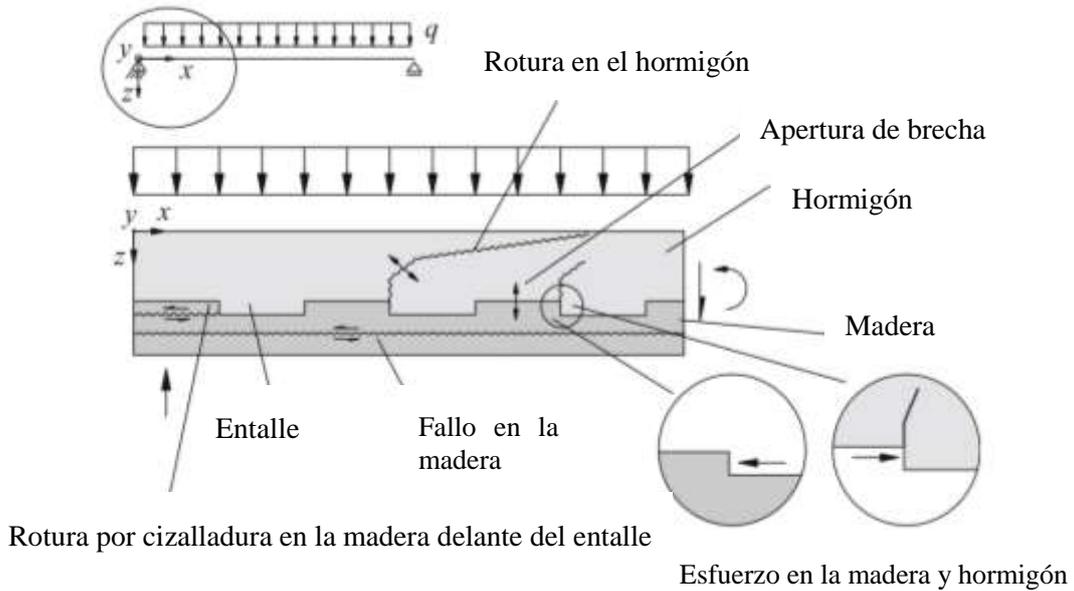
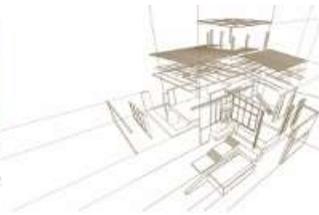


Figura 1: Relación de los modos de ruptura del hormigón-madera de una viga en flexión. Boccadoro et al. (2017)

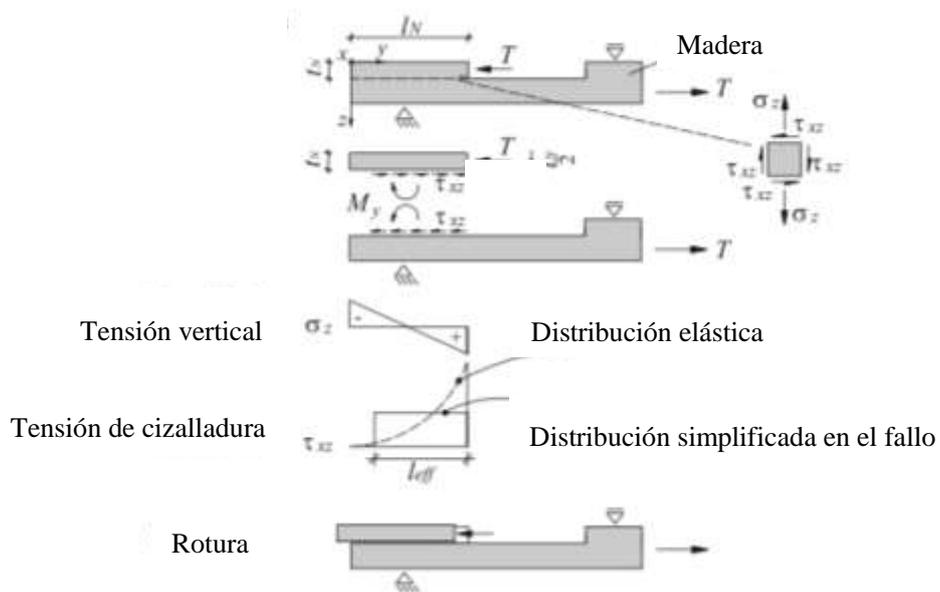


Figura 2: Representación del fallo por cizalladura en la madera en una viga en flexión. Boccadoro et al. (2017)

Además de la tensión de cizalladura delante del entalle, existe una tensión de tracción y compresión, σ_z , provocada por una excentricidad entre el punto de aplicación de la fuerza cortante, T , y el plan de cizalladura, conforme la

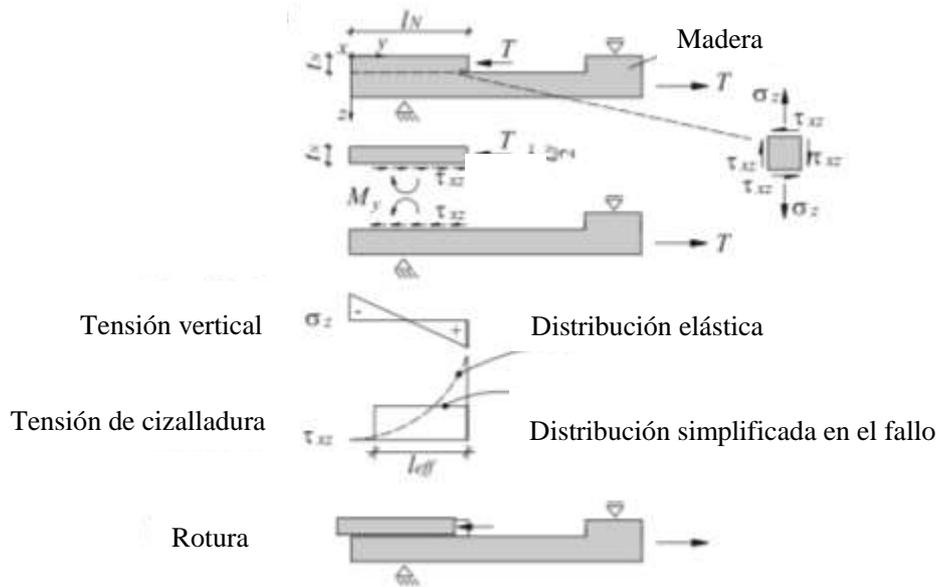
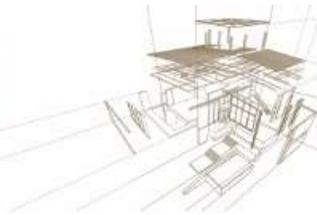


Figura 2. En entalles cortos, esa fuerza no es determinante en el dimensionamiento (Boccardo et al., 2017).

Ocurre la rotura en el hormigón por la tracción en el área superficial del entalle y la resistencia media, f_{ctm} , conforme la norma brasileña NBR 6118:2014 para hormigones de clases de resistencia inferiores a C50 es dada por expresión:

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot (f_{ck})^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

Para se garantizar que no se rompa en el hormigón, se determina un área de entalle suficiente para resistir al cortante.

En una placa compuesta de CLT y hormigón, conectada por medio de entalles longitudinales en la madera (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), la madera y el hormigón deben soportar el cortante en las dos direcciones ortogonales x y y . Según las propiedades mecánicas de la madera, es la resistencia al cortante diferente en las dos direcciones ortogonales, lo que significa que, en la placa de CLT-hormigón, la dirección de la lámina en relación con el esfuerzo cortante presenta valores de resistencia del entalle distintos. Considerando un ángulo α como el ángulo entre la fuerza cortante y la dirección de las fibras de la primera lámina del panel de CLT, para $\alpha=0$, la resistencia al cortante en la madera es mayor que para $\alpha=90^\circ$, donde existiría la cizalladura por rodadura.

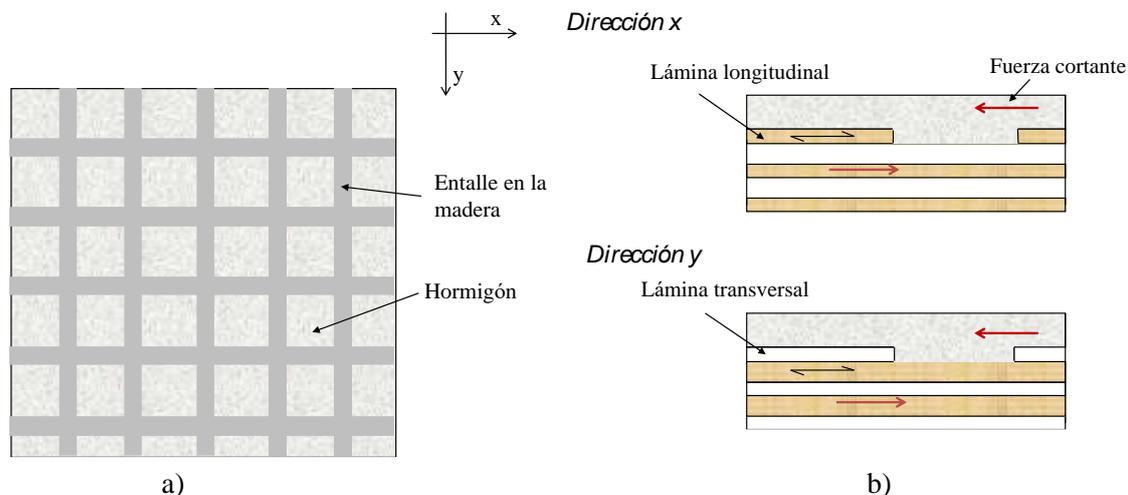


Figura 3: Geometría de la placa de CLT-hormigón con entalladuras longitudinales: a) Vista superior b) Vistas laterales en la dirección x y y .

El trabajo de Loebus et al. (2016) comprueba la afirmación anterior, al estudiar una placa de CLT-hormigón con entalles continuos en las dos direcciones ortogonales. La resistencia de los entalles, para la sollicitación por esfuerzo cortante en el plan de la placa, delante del entalle perpendicular a las fibras de la madera en la 1ª capa del CLT, con $\alpha = 90^\circ$, era tres veces menor que para el entalle en la lámina de madera cuyas direcciones de las fibras eran paralelas al esfuerzo. De hecho, se verificó que el entalle debería alcanzar la capa de madera de fibras paralelas al esfuerzo y entonces los entalles longitudinales tendrían profundidades diferentes en las direcciones ortogonales de la placa y que sería más profundo para la dirección de $\alpha = 90^\circ$. En el caso de $\alpha = 90^\circ$, se disipa la tensión actuante para la capa siguiente que resiste al esfuerzo, una vez que la primera capa se plastifica debido al bajo módulo de elasticidad perpendicular a las fibras.

Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo es el estudio teórico y numérico de una nueva propuesta de entalle circular aislado para la conexión entre paneles CLT y hormigón con el fin de aplicarlo posteriormente al análisis de paneles bidimensionales tipo placa y no vigas.

2. METODOLOGÍA

Para la conexión entre el CLT y el hormigón, se eligió el entalle circular en la madera a partir de un análisis comparativo entre las conexiones usuales en estructuras mistas. La conexión propuesta supone una ventaja en tiempo de ejecución con respecto a las comunes uniones a través de conectores metálicos en cuanto el mecanizado se realiza con máquinas de control numérico. Además, para la placa bidimensional, la realización de entalles circulares aislados en el panel CLT permite que el comportamiento sea similar en las dos direcciones del panel, evitando la realización de entalles longitudinales con profundidades diferentes en las dos direcciones. Se presenta, en la *Figura 4*, el diseño esquemático de la placa de CLT-hormigón propuesta en ese trabajo.

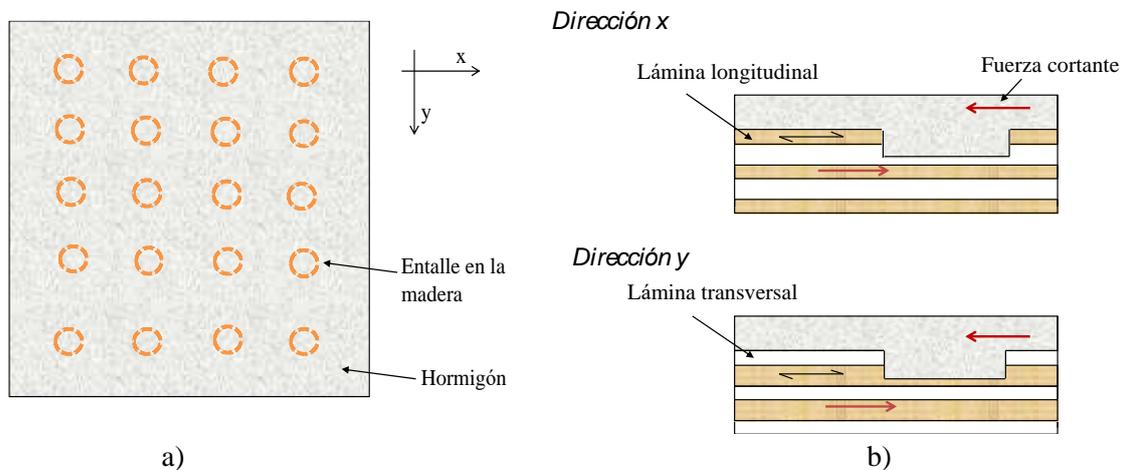
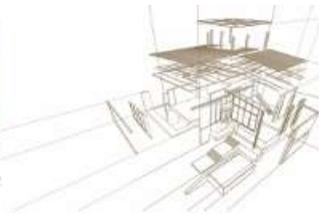
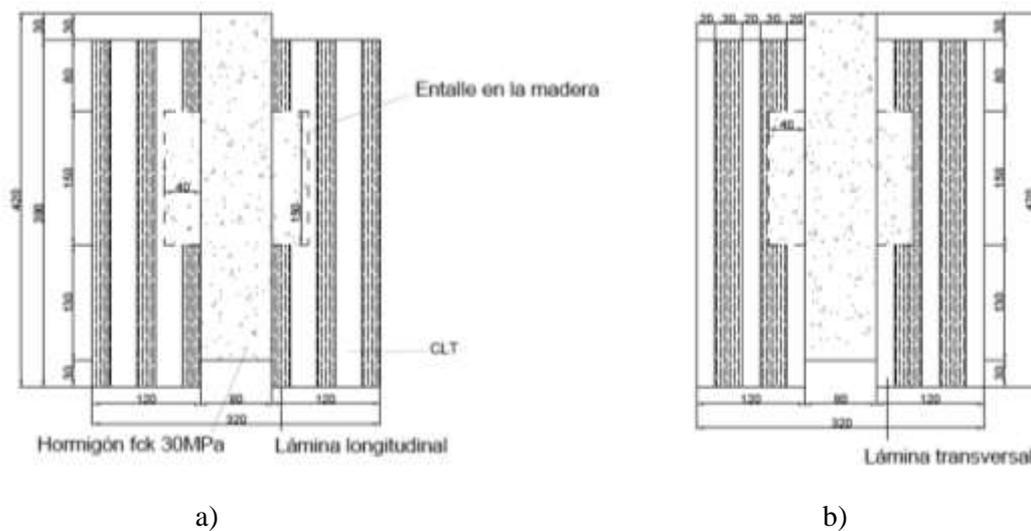


Figura 4: Geometría de la placa de CLT-hormigón propuesta a) Vista superior b) Vistas laterales en la dirección x y y.

En el análisis de la eficiencia de las conexiones por medio de entalles circulares, se determinó la resistencia última, f_u , a partir del diseño de dos tipos de probetas de CLT y hormigón de un ensayo del tipo *pushout* normalizado por en la BS EN 26891(1991), que simulaban las dos direcciones de esfuerzo en la placa compuesta. Para cada una de ellas, se hizo el análisis teórico analítico y simulación numérica del ensayo de cortante.

2.1. Diseño de las probetas

Se simuló el ensayo de *pushout* con probetas simétricas CLT-hormigón-CLT, colocando dos láminas de CLT en las extremidades y hormigón en el medio, conectadas por medio de entalles circulares. Para la placa compuesta, se eligieron los entalles circulares una vez que podrían distribuirse específicamente en las zonas donde hay esfuerzo cortante y acompañar la trayectoria de tensiones en la placa en lugar de utilizar los entalles continuos. Los entalles continuos son los más comunes en las vigas mixtas, presentando una trayectoria de tensiones unidireccional. En la Figura 5, se muestran las dimensiones de las probetas del tipo 1 ($\alpha = 0^\circ$) y tipo 2 ($\alpha = 90^\circ$).



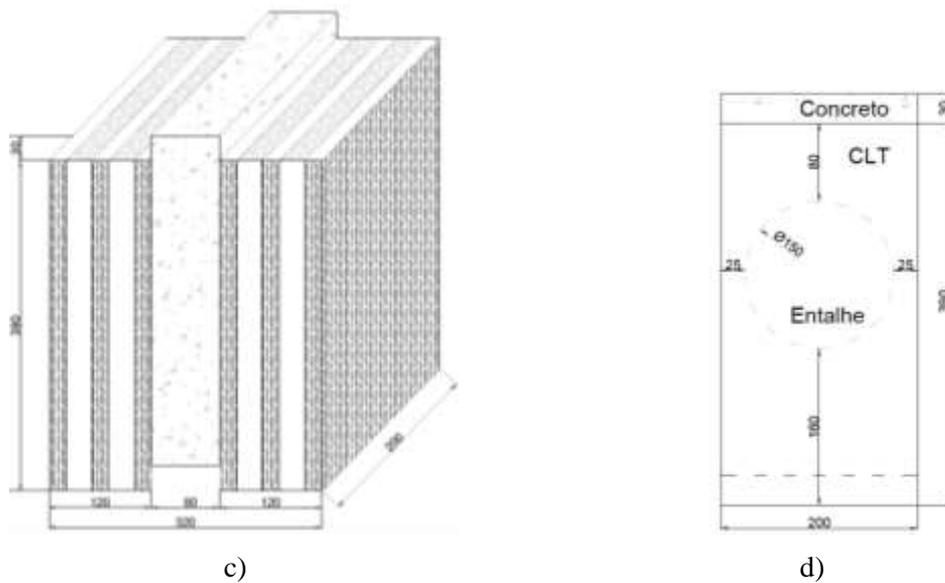
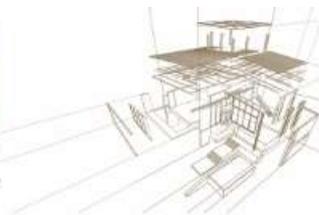


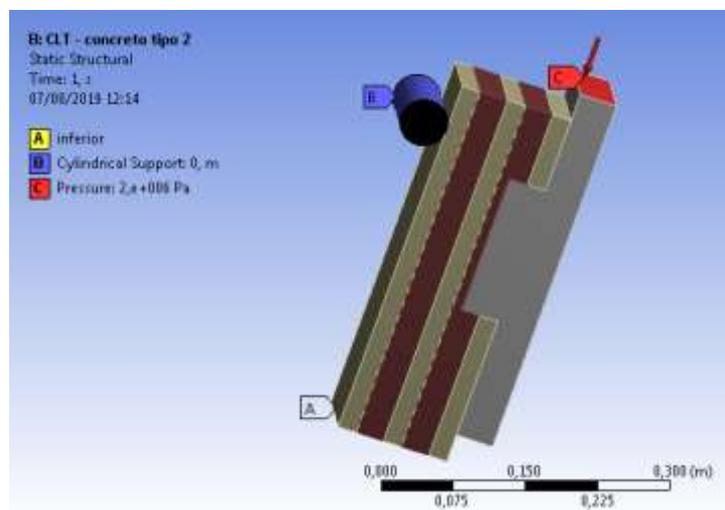
Figura 5: Probetas para el ensayo de pushout de CLT-hormigón-CLT (en mm): a) Tipo 1 - 1ª lámina de CLT en el sentido longitudinal de las fibras; b) Tipo 2 - 1ª lámina de CLT en el sentido transversal de las fibras; c) Vista isométrica; y d) Vista lateral

Se dimensionó el entalfe circular considerando, para su profundidad, las recomendaciones de Loebus et al. (2016), de manera que el entalfe debería alcanzar la 2ª lámina, una vez que para $\alpha = 90^\circ$, la 2ª lámina es la que resistiría al esfuerzo cortante.

Para la distancia delante del entalfe, l_v , que sería la distancia entre entalles en la placa compuesta, se consideró el valor mínimo recomendado por la Instrucción Técnica Wood Solutions - Design and Build (2016) y, conforme Kudla (2015), igual a 160 mm (Figura 5 d).

2.2. Análisis numérico

Se desarrollaron modelos numéricos tridimensionales en elementos finitos para el análisis estructural de las probetas del ensayo de *push out* de CLT-hormigón conectadas por medio de entalles circulares. Se generó el modelo numérico en ANSYS Workbench, versión 19.2, utilizando doble simetría y modelaje de $\frac{1}{4}$ de la probeta, conforme la Figura 6.



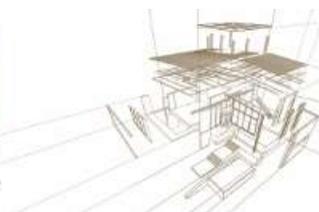


Figura 6: Modelo numérico

El mallado se generó con distintas geometrías de elemento, cuadrados, hexagonales en las regiones rectas y circulares, adecuándose a la geometría de la probeta. Se utilizaron en la interface de los materiales elementos de contacto del tipo *frictionless*, para permitir el desplazamiento relativo entre el CLT y el hormigón, mientras que se consideraron las capas de CLT como perfectamente unidas.

En cuanto a los materiales utilizados en el modelo de simulación, en las dos láminas exteriores de la placa de CLT se utilizó la clase de resistencia C30 de la norma UNE-EN 338 (2019). Para las tres interiores, se eligió la madera de clase C20, una vez que en el proceso de fabricación del panel se posicionan los tablonces menos resistentes en el medio del panel. Además, se consideró la madera como lineal y ortotrópica. Para los coeficientes de Poisson, se emplearon los valores de Bodig y Benjamin A. (1993).

Se estimaron el módulo de elasticidad perpendicular a las fibras, E_{90} y el módulo de elasticidad transversal, G , conforme a las ecuaciones de la normativa europea UNE-EN 384 (2016), que los relaciona con el módulo de elasticidad paralelo a las fibras de la madera, E , según las ecuaciones:

$$E_{90} = E/30 \quad (2)$$

$$G = E/16 \quad (3)$$

Para el módulo de elasticidad transversal de rodadura, G_R , que tiene gran variabilidad debido a la orientación de los dos anillos de la madera, se estimó, conforme Christovasilis et al. (2016), por la relación:

$$G_R = G/10 \quad (4)$$

Tabla 1: Características de las maderas empleadas

Madera	E (MPa)	E_{90} (MPa)	G (MPa)	G_R (MPa)	$f_{v,k}$ (MPa)	$f_{v,R}$ (MPa)
C30	12.000	400	750	75	4,0	1,7
C20	9.500	316	593	59	3,6	1,7

Para la resistencia al cortante de rodadura, $f_{v,R}$, presentado en la Tabla 1, se tomaron valores de la literatura, conforme Christovasilis et al. (2016) e (Ehrhart et al., 2015)

El hormigón empleado tenía una resistencia característica, $f_{c,k}$, de 30MPa y el módulo de elasticidad calculado conforme la norma brasileña (NBR 6118, 2014), módulo de rigidez y coeficiente de Poisson mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2: Características del hormigón

Concreto	E (MPa)	$f_{c,k}$ (MPa)	G (MPa)	ν
	26.072	30	10.863	0,2

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este tópico se discuten los resultados del cálculo teórico y los obtenidos en el modelo numérico descritos anteriormente para el entalle en la probeta de CLT y hormigón en el ensayo de *pushout*.



En el cálculo teórico analítico, se consideró, para la determinación de la resistencia del entalle, el menor valor para la fuerza última para el fallo por cizalladura en el hormigón y en la madera. Para la probeta diseñada el fallo se daría en el hormigón para la carga última de 51,2 kN, como muestra la Tabla 3, considerando la resistencia a tracción, f_{ctm} , de 2,9 MPa y considerando que la lámina de CLT con el sentido de la lámina longitudinal y paralela al cortante, siendo $\alpha = 0^\circ$ es la que resiste al esfuerzo de cizalladura, independientemente de su posición, siendo la 1ª o 2ª lámina del CLT.

Tabla 3: Cálculo teórico

Lámina del CLT	Madera C30		Madera C20		Hormigón C30	
	$f_{v,k}$ (MPa)	f_u (kN) Cizalladura	$f_{v,k}$ (MPa)	f_u (kN) Cizalladura	f_{ctm} (MPa)	f_u (kN) Cizalladura
$\alpha=0^\circ$	4	96,0	3,6	86,4	2,9	51,2
$\alpha=90^\circ$	1,7	28,8	1,7	28,8		

A partir del modelo numérico, se pudo observar que para una tensión aplicada de 2 MPa y la carga de 32 kN aproximadamente, la ruptura se daría también en el hormigón, como se indica en la Figura 7 y en la Figura 8. La tensión de cizalladura en el hormigón fue de 3,15 MPa y en la madera de 3,57 MPa como indicados por flechas en la Figura 7 y Figura 8. Así, para que la ruptura no ocurra en el hormigón, es conveniente aumentar el diámetro del entalle.

Comparándose los valores del cálculo analítico y numérico, se verificó que los valores para las fuerzas últimas son distintas para la probeta del tipo uno cuanto para la del tipo dos. Tanto el valor numérico cuanto el analítico, que considera la distribución de tensiones lineal, son aproximaciones y, en ese caso, se recomienda refinar la malla del modelado numérico que podrá posteriormente ser validado por los datos experimentales.

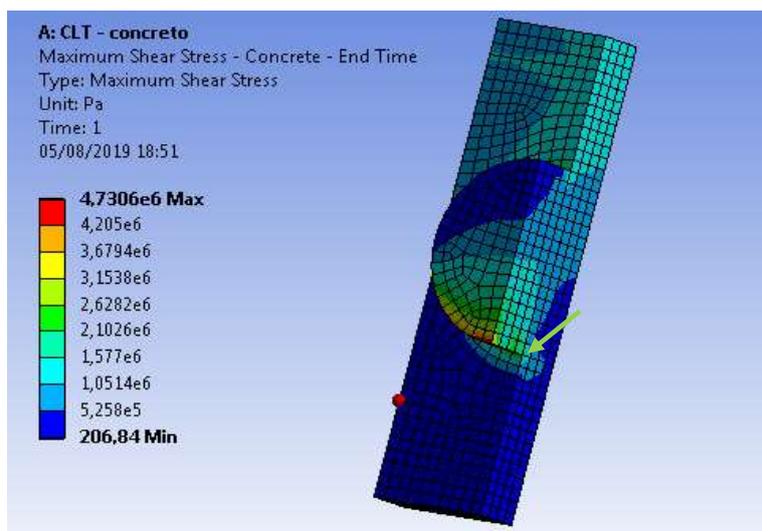


Figura 7: Tensión de cizalladura en el hormigón

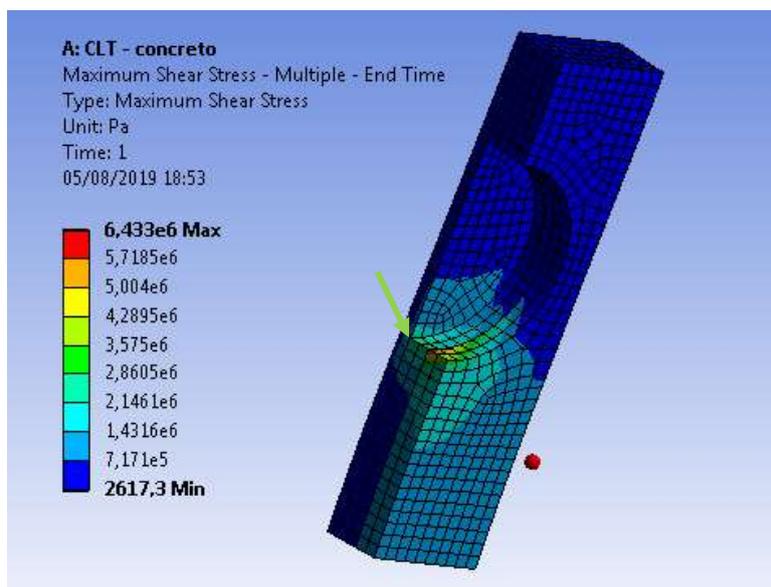


Figura 8: Tensión de cizalladura en la madera.

A partir de los valores de la resistencia de los entalles es posible proyectar la placa compuesta de CLT-hormigón con los entalles circulares para soportar la fuerza cortante en los dos sentidos ortogonales.

4. CONCLUSIONES

En el trabajo se hizo un modelo numérico de las probetas del ensayo de *pushout* de CLT y hormigón conectados por medio de entalles circulares para determinar la resistencia de la conexión.

El presente trabajo supone una primera aproximación al estudio del comportamiento estructural de esta novedosa forma de entalle entre el hormigón y la madera, que supondría una ventaja en tiempo de ejecución con respecto a las comunes uniones a través de conectores metálicos en cuanto el mecanizado se realiza con máquinas de control numérico. Asimismo, la realización de entalles circulares aislados en el panel CLT permite que el comportamiento sea similar en las dos direcciones del panel bidimensional, evitando la realización de entalles longitudinales con profundidades diferentes en las dos direcciones.

Los resultados numéricos comparados a los analíticos fueron coherentes con relación al tipo de rotura, que sería por cizalladura del hormigón, pero los valores encontrados para la fuerza última fueron distintos. Por lo tanto, es recomendable que se realicen ensayos en laboratorio y que se refine la malla del modelo numérico.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo financiero de CAPES - Brasil para la investigación del trabajo de tesis doctoral.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Boccardo, L. et al. Analysis of shear transfer and gap opening in timber – concrete composite



members with notched connections. *Materials and structures*, v. 50, p. 1–15, 2017.

Bodig, J. y Benjamin A., J. *Mechanics of wood and wood composites*. Malabar, florida: krieger publishing company, 1993.

Brandner, R. et al. Cross laminated timber (CLT): Overview and development. *European journal of wood and wood products*, v. 74, n. 3, p. 331–351, 2016.

BS EN 26891. Timber structures — joints made with mechanical fasteners — general principles for the determination of strength and deformation characteristics british standard - bsi, , 1991.

Ceccotti, A. Composite concrete-timber structures. *Progress in structural engineering and materials*, v. 4, n. 3, p. 264–275, 2002.

Christovasilis, I. P. et al. Evaluation of the mechanical properties of cross laminated timber with elementary beam theories. *Construction and building materials*, v. 122, p. 202–213, 2016.

Ehrhart, T. et al. Rolling shear properties of some european timber species with focus on cross laminated timber (clt): test configuration and parameter study. *International network on timber engineering research*. Anais..Sibenik, Croacia: 2015

Kudla, K. Notched connections for tcc structures as part of the standardcost action fp1402 short term scientific mission. Coimbra, Portugal: universidade de coimbra, 2015.

Loebus, S.; Dietsch, P.; Winter, S. Two way spanning clt concrete composite slabstechnical University of Munich, , 2016.

NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento, 2014.

Thilén, J. Testing of clt-concrete composite decks. Lund, Sweden: University of Lund, 2017.

UNE-EN 338. Estructuras de madera - Clases resistentes.aenor , 2016.

UNE-EN 384. Madera estructural - determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidadmadrid, 2016.

Wood solutions - Design and build. Timber concrete composite floors. Australia, 2016.