

PUENTE CLT: MADERA ESTRUCTURAL MASIVA

INTRODUCCIÓN

Este proyecto se enfoca en el desarrollo de la ingeniería estructural para la construcción de puentes de madera masiva, que incluyen un tablero de CLT y vigas de MLE. La oportunidad surgió a partir de una solicitud de la Municipalidad de Pucón, que identificó la necesidad de reemplazar puentes no enrolados por el Ministerio de Obras Públicas. Por lo tanto, se presentaron dos puentes al CIM UC que, debido a su edad y desgaste, necesitan ser reemplazados.



1. LEVANTAMIENTO

El proyecto comenzó con la identificación de las condiciones del terreno para dos puentes: uno cerca de Caburgua y otro en la ciudad de Pucón. El objetivo era determinar las luces y los anchos exactos para los puentes, así como examinar las condiciones de los estribos de hormigón armado, con la idea de mantenerlos intactos si su condición lo permitía. Todo este proceso fue fundamental para garantizar la seguridad y funcionalidad de los nuevos puentes y asegurar que cumplan con los requisitos técnicos necesarios, sismorresistentes que sean competitivas con otros materiales como el acero y el hormigón armado.

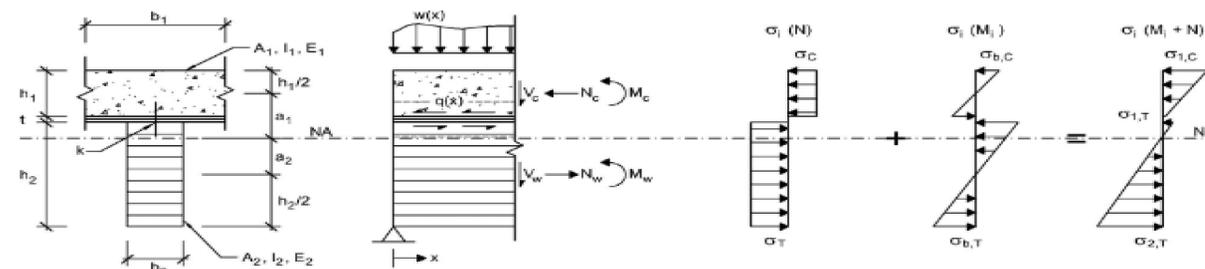


2. PREDISEÑO

Durante la etapa de diseño, se consideraron diversos criterios para garantizar la seguridad y eficiencia del puente de madera.

Se siguieron las normativas establecidas por el Manual de Carreteras Volumen 3 del MOP, los métodos de diseño de puentes de la AASHTO y las especificaciones de diseño para madera de las normas NCh1998 y NCh2148, a fin de garantizar que la estructura cumpla con los estándares necesarios. Se decidió que la longitud de diseño estructural sería de 12 m, lo que permitiría abarcar varios puentes menores que necesitan ser reemplazados en la Región de la Araucanía en un futuro cercano.

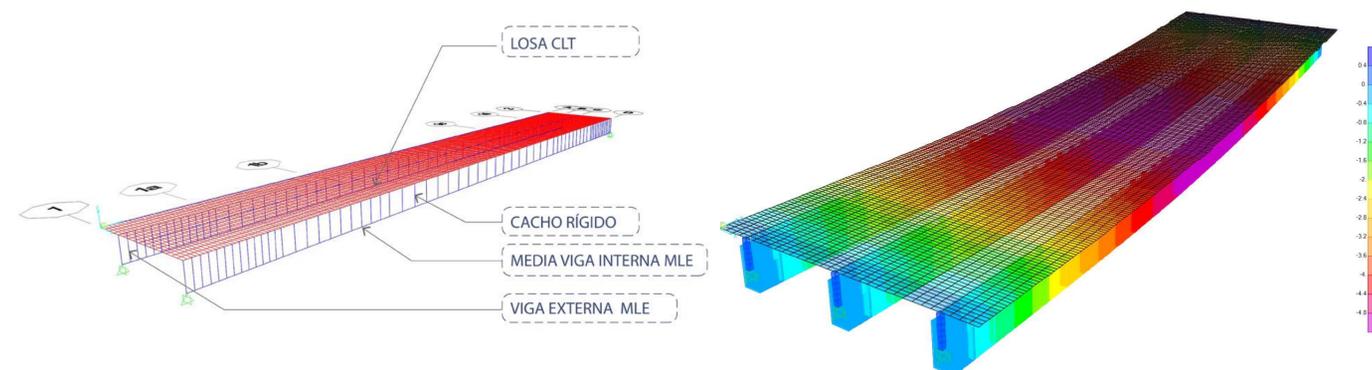
Para la pre-estructuración del puente, se optó por una plataforma de CLT que trabajaría de forma colaborativa con vigas de MLE. Para eso, se utilizó el método gamma que permitiera capturar el efecto que la rigidez del conector tiene en el deslizamiento entre el tablero y la viga, y así determinar la inercia efectiva de la sección colaborativa, la distribución de los esfuerzos internos y el nivel de deformaciones.



3. ANALISIS ESTRUCTURAL

Se llevó a cabo un modelado más preciso del puente en el programa de elementos finitos SAP2000 para obtener un diseño más detallado. En este proceso, se modeló el comportamiento del CLT utilizando elementos multilayer shell y se utilizó un modelo isotrópico transversal para el material de la madera, donde las propiedades radiales y transversales se igualaron. En cuanto a las vigas, se modelaron mediante elementos frame y se siguió un modelo isotrópico en el material, ya que su trabajo se realiza principalmente en una dirección. Se dispuso de un apoyo fijo y otro móvil en cada extremo de las vigas.

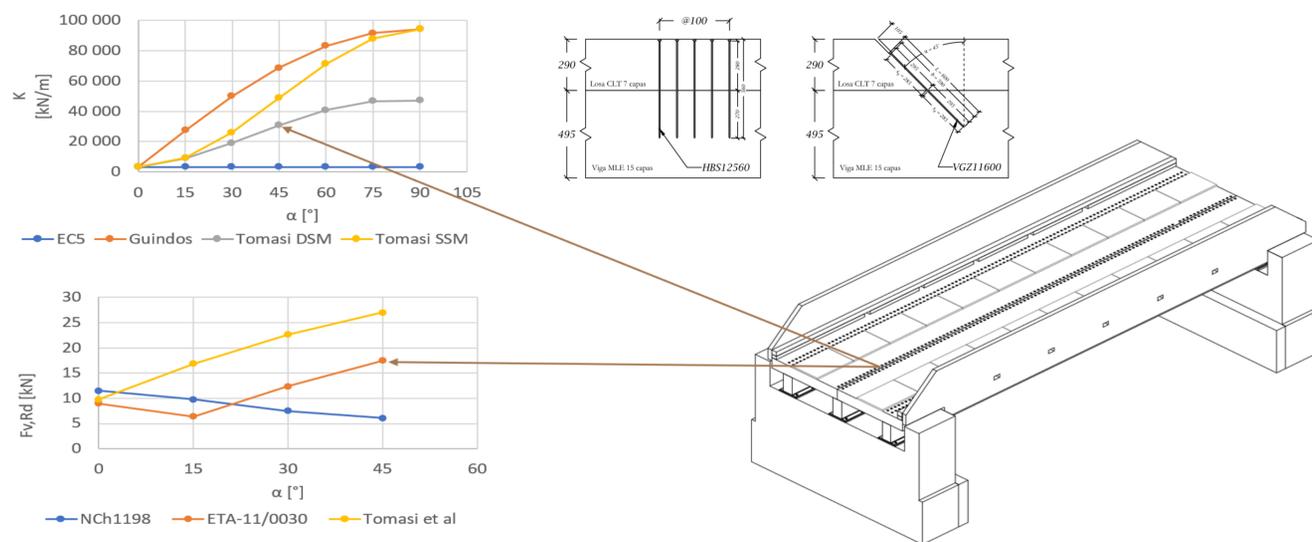
Para capturar los efectos del trabajo colaborativo de la sección compuesta, se calculó el ancho efectivo del tablero de CLT según Augustin (2017) y se incluyó geoméricamente el desfase entre los centroides del tablero y de las vigas mediante "cachos rígidos". Además, para aprovechar la inclusión de estos elementos, se modeló la rigidez al deslizamiento de los conectores definiendo partial fixity igual al Kser (o Ku cuando corresponde) en uno de los nodos de los "cachos rígidos".



4. INVESTIGACION APLICADA: PERFORMANCE ESTRUCTURAL Y OPTIMIZACION ECONOMICA

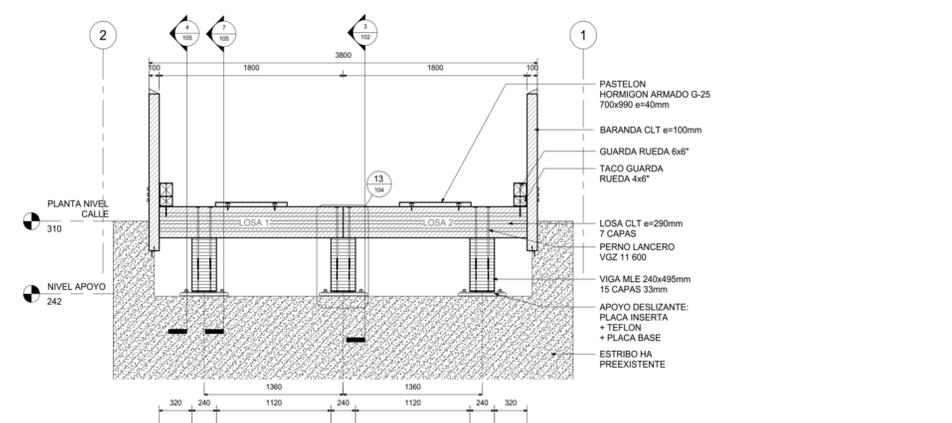
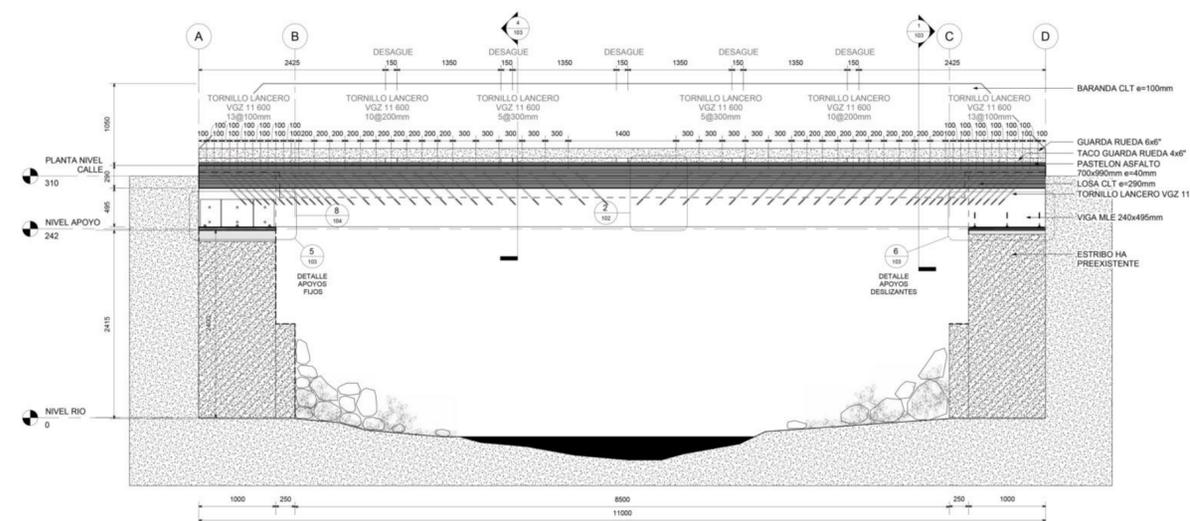
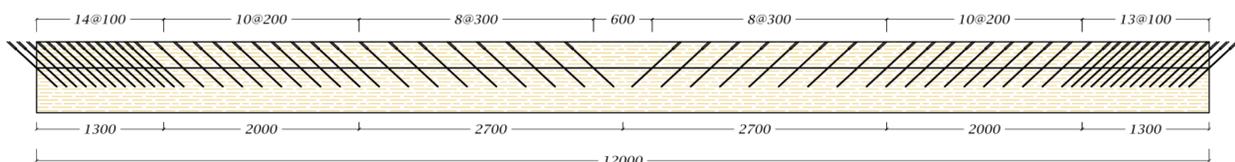
Una tarea importante dentro del proyecto consistió en reducir la cantidad de tornillos utilizados para conectar el tablero de CLT con las vigas MLE, debido a que representaban un costo proporcional elevado y su alta densidad complicaba el proceso de montaje en terreno. Según una investigación de Tomasi et al. (2010), el uso de tornillos de rosca completa y dispuestos de manera inclinada ofrece ventajas en comparación con su disposición transversal a la fibra. La nueva disposición permite que el mecanismo de transferencia de carga no solo dependa de la resistencia lateral, sino que también involucre la resistencia axial del conector y la fricción del efecto cuerda entre las piezas de madera.

Se realizó una comparación exhaustiva entre las disposiciones normativas (NCh1998 y EC5), las notas técnicas de los proveedores (Rothoblaas, ETA-11/0030) y las expresiones propuestas por diferentes autores para caracterizar de manera más precisa el desempeño y resistencia de los tornillos inclinados (Bejtka y Blaß, Tomasi et al.). Los resultados mostraron que las expresiones propuestas por Tomasi, junto con los resultados de ensayos realizados por la empresa Rothoblaas para sus productos, fueron capaces de caracterizar de manera más precisa la rigidez y la resistencia de los tornillos inclinados. Estas expresiones fueron más adecuadas en comparación con las que proponen las normas y conservadoras en línea con los resultados obtenidos en las campañas experimentales.



La implementación de tornillos inclinados en el proyecto mejoró significativamente el trabajo colaborativo entre el tablero CLT y las vigas, gracias al aumento de la rigidez al deslizamiento. Además, se ha logrado reducir la cantidad total de tornillos necesarios gracias a la mejora en la resistencia de los conectores, lo que ha tenido un impacto directo en la reducción de los costos del proyecto.

Se logra reducir de **720** tornillos verticales a **384** tornillos inclinados.



CONCLUSIONES

Como resultado, se obtuvo un puente compuesto por dos tableros de CLT de 1,8 metros cada uno. Las luces dependerán de cada puente a intervenir, pero siempre serán inferiores a 12 metros. Cada tablero de CLT está compuesto por siete capas, lo que da un espesor total de 290 mm, y se apoya en tres vigas de MLE de 240x495 mm. En cada extremo del puente se disponen dos tipos de apoyos: un apoyo fijo en un extremo y un apoyo móvil en el otro extremo.

La cubicación material del proyecto demostró que es factible desarrollar este tipo de puentes **por menos de \$50MM**, clasificando al puente como una obra económica. Además, la alta capacidad de prefabricación, la facilidad de transporte y montaje típicos de la madera, resulta en **un producto altamente competitivo y de rápida implementación** que contribuye a mantener y mejorar la conectividad en zonas rurales.

De este modo, los puentes estructurados en madera masiva ofrecen una **atractiva alternativa de baja inversión** que permite su ejecución y financiamiento a nivel municipal, evitando trámites burocráticos a través de gobiernos regionales o ministerios.

REFERENCIAS

- [1] Manual de carreteras – Volumen 2. (2019). Ministerio de Obras Públicas.
- [2] NCh1198.of2014 – Madera - Construcción en Madera - Cálculo.
- [3] NCh2165.of1991 – Tensiones Admisibles para la Madera Laminada Encolada Estructural de Pino Radiata.
- [4] Tomasi, R., et al. (2010). Theoretical and experimental analysis of timber-to-timber joints connected with inclined screws.
- [5] Rothoblaas (2023). Tornillos y conectores para madera – Carpintería, estructuras y exteriores.