

Madera Laminada Frente al Fuego: Resistencia Mecánica con Adhesivos EPI y PUR

La madera laminada encolada (**GLT/CLT**) se posiciona como una alternativa fundamental para la edificación sustentable, logrando reducir hasta **3,4 veces las emisiones de CO₂ equivalente** en comparación con soluciones de hormigón. Sin embargo, su consolidación definitiva en la industria exige resolver un desafío crítico: el desempeño del material frente a altas temperaturas. En estas condiciones extremas, la integridad de la línea de adhesivo deja de ser un detalle de fabricación y se convierte en el **factor determinante para evitar el colapso** antes de que la madera alcance una carbonización severa.

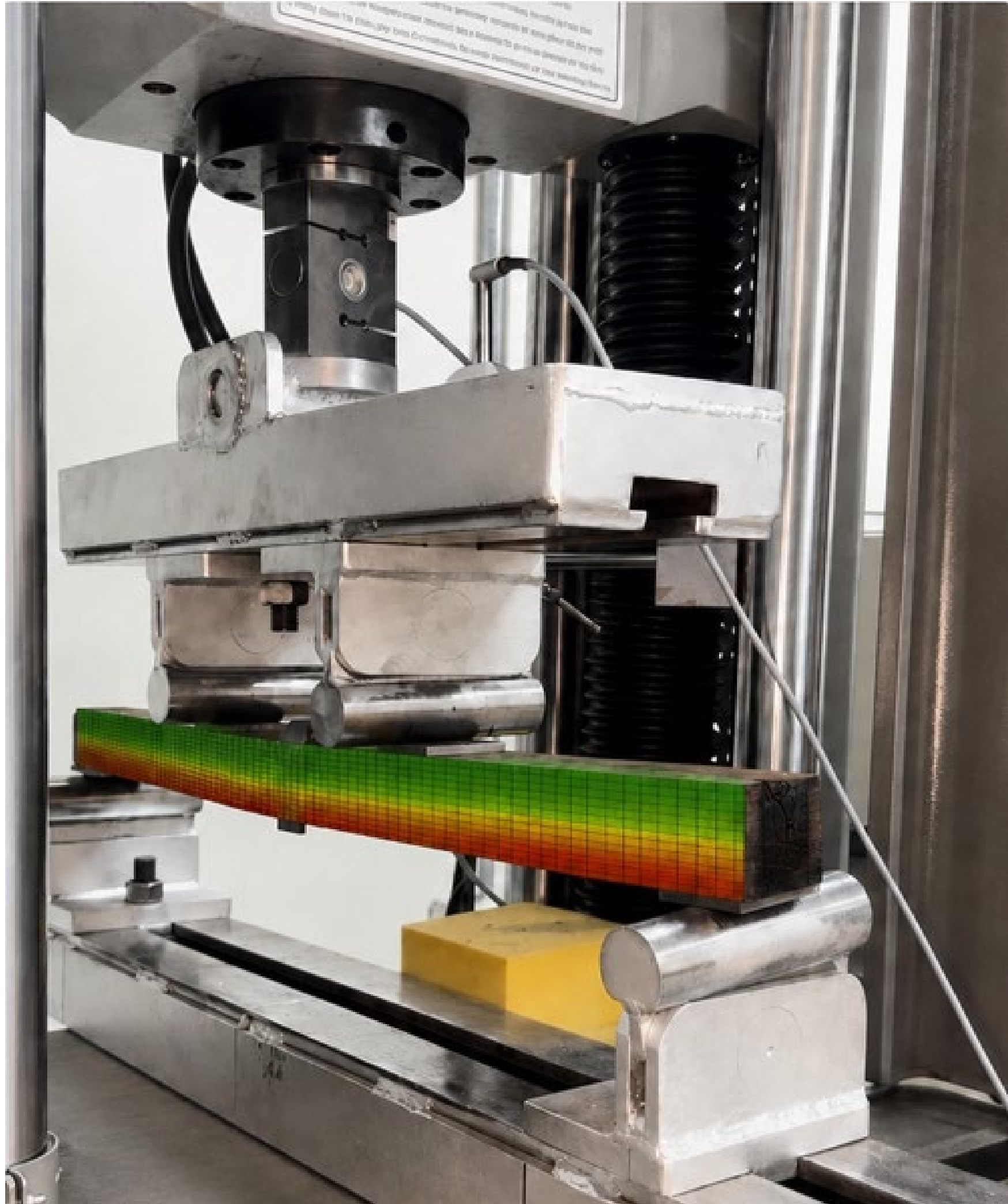


Figura 1. Montaje ensayo de flexión y simulación de tensiones internas.

Resultados: La Prueba de Corte (Cizalle) a 190 °C

- **EPI (Seguridad Estable):** Mantuvo resistencia firme entre **11,32 y 11,82 MPa**. Transferencia de esfuerzos sin degradación relevante.
- **PUR (Falla Crítica):** Al cruzar los 190 °C sufrió una caída drástica a **6,55 MPa** (~50% de pérdida), generando delaminación inducida por calor (**HID**).



Figura 2. Montaje ensayo de cizalle y modos de falla: falla adhesiva en PUR (izquierda) y falla en la madera en EPI (derecha).

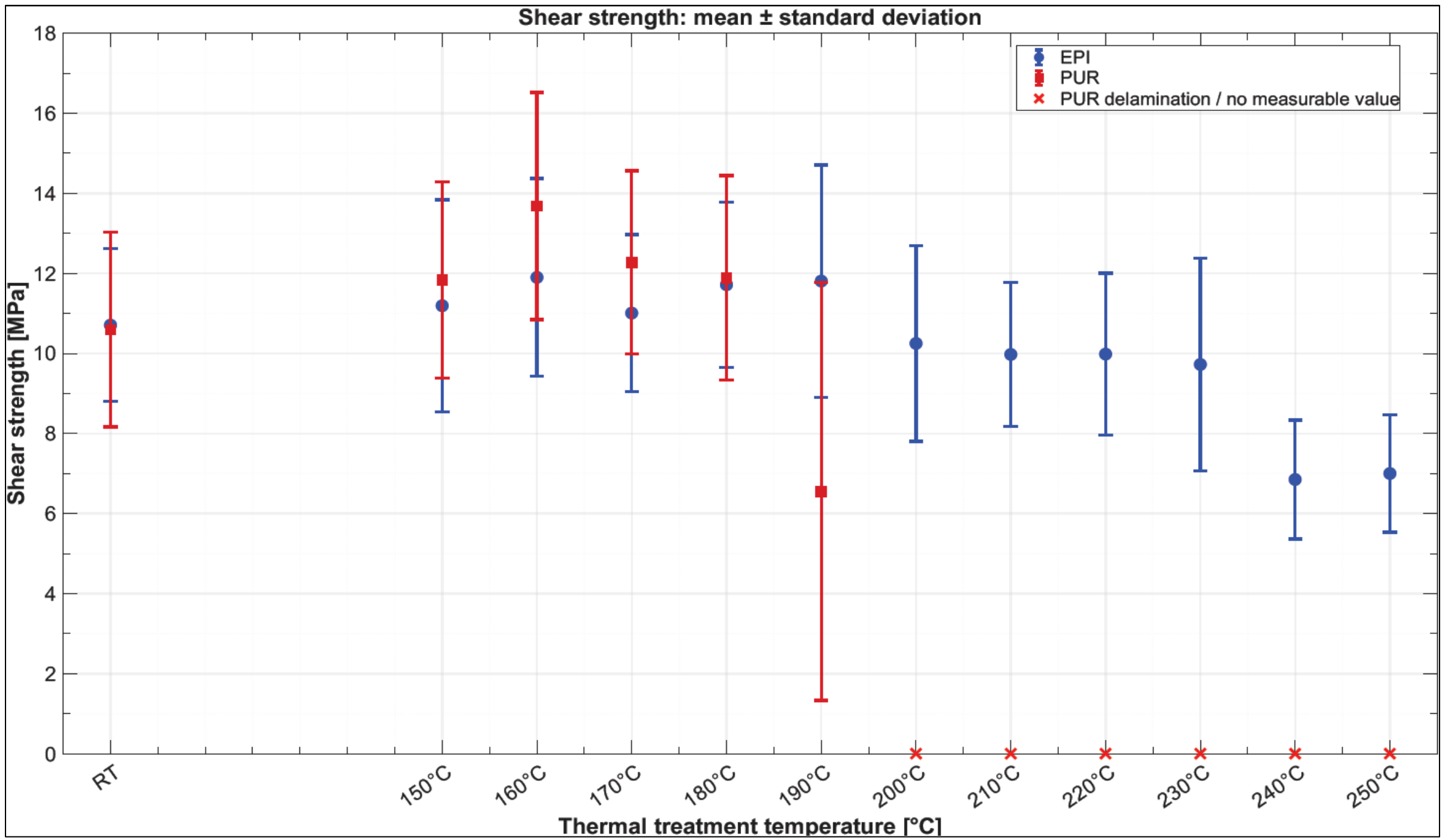


Gráfico 1 – Resistencia al corte: media ± desviación estándar.

El Desafío y Objetivo

Frente a elevadas temperaturas, el **verdadero punto crítico de la estructura es la línea de encolado**.

- **Objetivo:** Evaluar el comportamiento termomecánico real de las uniones para determinar qué adhesivo garantiza la seguridad estructural antes del colapso.

¿Cómo se puso a prueba?

Para obtener resultados aplicables a la realidad de la construcción, se desarrolló la siguiente evaluación:

- **Fabricación:** Probetas de GLT en **Pino radiata** usando adhesivos **EPI** (Emulsión Polímero-Isocianato) y **PUR** (Poliuretano).
- **Tratamiento Térmico:** Exposición a temperaturas entre **150 °C y 250 °C**, monitoreando la temperatura en el núcleo del pegamento.
- **Ensayos postexposición:** De cizalle y flexión estática en 4 puntos para determinar la pérdida de capacidad de carga.

Resultados: La Prueba de Flexión (Capacidad de Carga) posterior a 180 °C

- **EPI (83,33 MPa):** Conservó la unión cohesiva de las láminas, asegurando el comportamiento de sección monolítica.
- **PUR (67,22 MPa):** Ruptura de enlaces uretano y degradación progresiva, causando separación física de capas de madera.



Figura 3. Delaminación en probetas con adhesivo PUR (falla adhesiva)



Figura 4. Fallas en probetas con adhesivo EPI (falla en la madera)

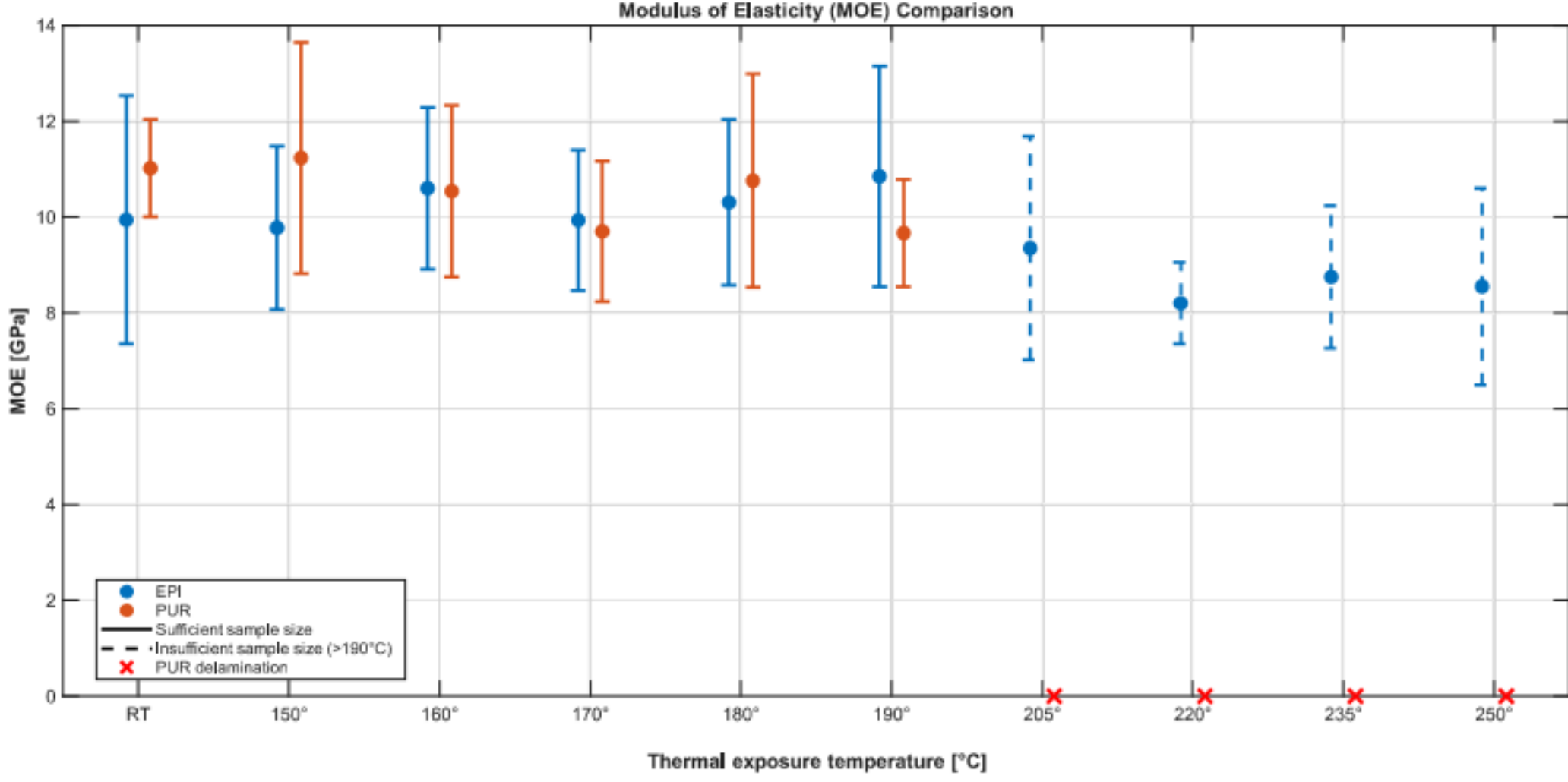


Gráfico 2. Evolución del Módulo de Elasticidad (MOE) en función de la temperatura.

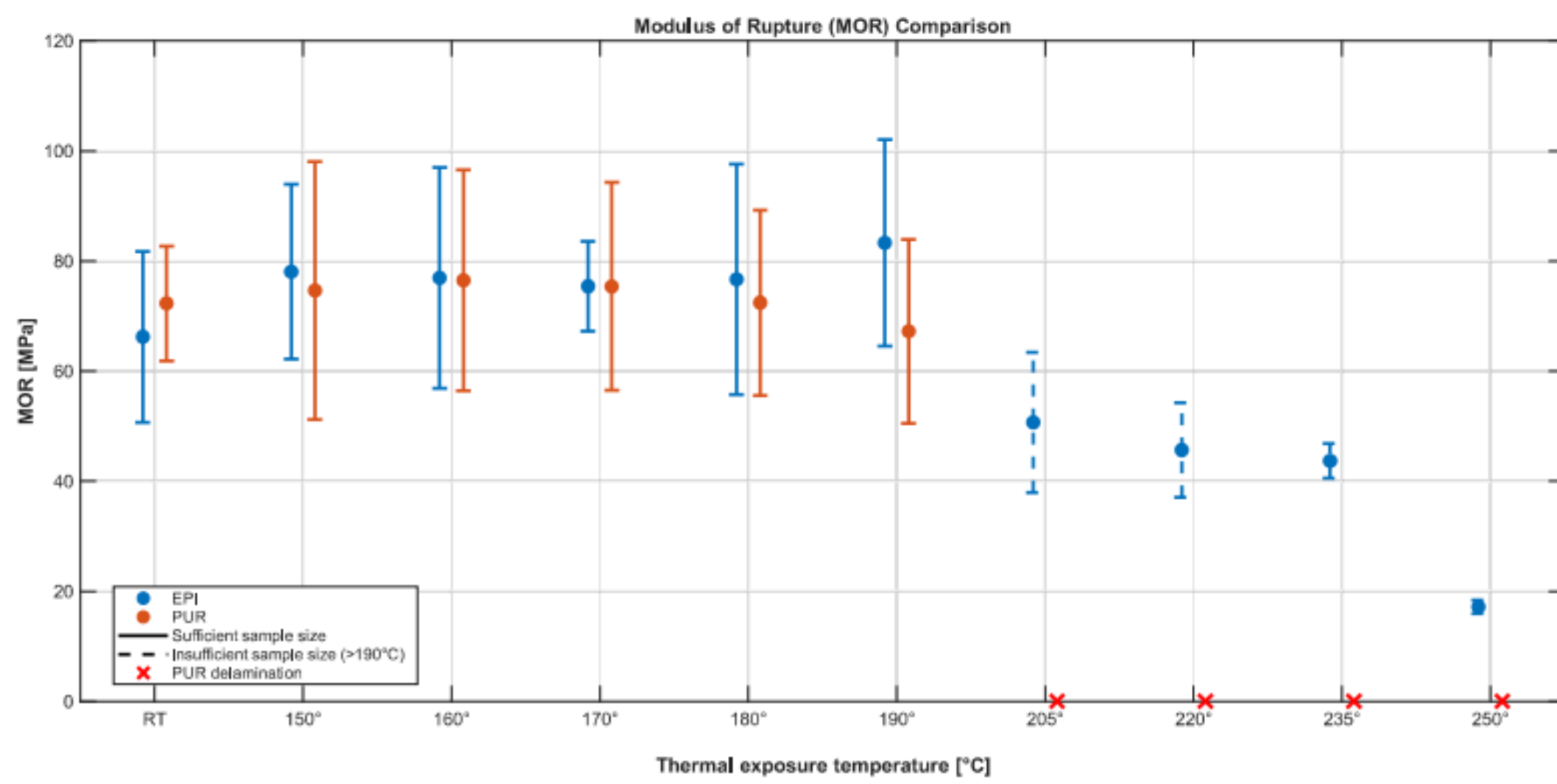


Gráfico 3. Evolución del Módulo de Rotura (MOR) en función de la temperatura.

CRITERIOS DE DISEÑO Y SEGURIDAD ESTRUCTURAL

- **Penetración Térmica a 30 min:** A los 30 minutos de exposición (tiempo normativo de evacuación), la isoterma crítica de colapso para el adhesivo PUR (**190 °C**) alcanza una profundidad de **27 mm bajo norma ISO 834** y hasta **32 mm en fuego real**.
- **Prescripción para Adhesivo PUR:** Todo elemento estructural encolado con PUR debe incluir obligatoriamente una **capa de sacrificio exterior de al menos 32 mm** de madera. Este sobrespesor aísla la primera línea de pegamento y evita la delaminación prematura durante la evacuación.
- **Ventaja Competitiva del Sistema EPI:** Debido a que el adhesivo EPI mantiene la cohesión estructural incluso a **250 °C** (rango donde solo se presenta carbonización natural de la madera), conserva la integridad de la viga y elimina el riesgo de desprendimiento de capas sin requerir sobredimensionamientos.

Escenario de Fuego	Temp. Crítica	30 min (Evacuación)	60 min (Resistencia)
Fuego Real	190 °C	32 mm	52 mm
Fuego Real	250 °C	30 mm	50 mm
Norma ISO 834	190 °C	27 mm	47 mm
Norma ISO 834	250 °C	24 mm	45 mm

Tabla 1. Penetración en mm según la temperatura y tiempo de exposición

CONCLUSIÓN

Los resultados demuestran que la elección del adhesivo es determinante en el comportamiento mecánico residual de elementos GLT de Pino radiata expuestos al fuego. Mientras que el adhesivo PUR presenta un deterioro progresivo al aproximarse a los 190 °C —reflejado en la caída de resistencia al cizalle, alta dispersión y fallas por delaminación—, el sistema EPI mantiene una respuesta superior y homogénea, conservando la continuidad resistente de la interfaz de encolado. En consecuencia, el adhesivo EPI se consolida como la alternativa de mayor estabilidad y seguridad estructural ante eventos térmicos previos a la carbonización severa de la madera.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se ha llevado a cabo gracias al apoyo financiero proporcionado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID) a través del proyecto FONDECYT N.º 1250979 y del proyecto ANILLO TECNOLÓGICO ACT240015.