



*Evaluación paramétrica del desempeño de conexiones empernadas madera-acero-madera en configuración de doble cortante según el Eurocódigo 5*

*Parametric evaluation of the performance of bolted wood-steel-wood connections in double shear configuration according to Eurocode*

*Avaliação paramétrica do desempenho de ligações aparafusadas madeira-aço-madeira em configuração de duplo cisalhamento segundo o Eurocode*

Luis Enrique Chávez-Rubio <sup>I</sup>

[le.chavez@uta.edu.ec](mailto:le.chavez@uta.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0001-9063-3968>

Verónica Carolina Obando-Navas <sup>II</sup>

[vc.obando@uta.edu.ec](mailto:vc.obando@uta.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0008-4775-4885>

Richard Esteban Sarzosa-Soto <sup>III</sup>

[re.sarzosa@uta.edu.ec](mailto:re.sarzosa@uta.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0001-2733-5738>

Mauricio Rodrigo Llerena-Tamayo <sup>IV</sup>

[mr.llerena@uta.edu.ec](mailto:mr.llerena@uta.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0002-9144-4947>

**Correspondencia:** [le.chavez@uta.edu.ec](mailto:le.chavez@uta.edu.ec)

Ciencias Técnicas y Aplicadas  
Artículo de Investigación

\* **Recibido:** 11 de mayo de 2025 \* **Aceptado:** 12 de junio de 2025 \* **Publicado:** 01 de julio de 2025

- I. Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.
- II. Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.
- III. Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.
- IV. Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

## Resumen

El presente estudio realiza un análisis comparativo del comportamiento estructural de conexiones emperradas madera-acero en configuración de doble cortante, evaluadas conforme a los lineamientos del Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1:2022). Se aplicó un diseño experimental factorial y un análisis paramétrico mediante hojas de cálculo programadas, considerando las variables más influyentes en la capacidad portante: tipo de conector, clase resistente de la madera, clase de servicio, ángulo de carga, espesor de la placa de acero y número de pernos. Los resultados demuestran que los pernos de diámetros intermedios (M7–M10) alcanzan el mejor equilibrio entre eficiencia estructural y constructiva. Las condiciones ambientales adversas (clase de servicio 3) y la orientación diagonal de la carga ( $45^\circ$ ) generan reducciones superiores al 75% en la capacidad portante. Este estudio ofrece lineamientos técnicos para el diseño optimizado de conexiones híbridas madera-acero con base en principios normativos y comportamiento estructural real.

**Palabras clave:** conexiones emperradas madera-acero; Eurocódigo 5; capacidad de conexión; análisis paramétrico; diseño estructural híbrido.

## Abstract

This study performs a comparative analysis of the structural behavior of bolted timber-steel connections in a double-shear configuration, evaluated according to the guidelines of Eurocode 5 (EN 1995-1-1:2022). A factorial experimental design and parametric analysis using programmed spreadsheets were applied, considering the most influential variables in bearing capacity: connector type, timber strength class, service class, loading angle, steel plate thickness, and number of bolts. The results demonstrate that bolts with intermediate diameters (M7–M10) achieve the best balance between structural and construction efficiency. Adverse environmental conditions (service class 3) and diagonal load orientation ( $45^\circ$ ) generate reductions in bearing capacity of more than 75%. This study offers technical guidelines for the optimized design of hybrid timber-steel connections based on normative principles and actual structural behavior.

**Keywords:** bolted timber-steel connections; Eurocode 5; connection capacity; parametric analysis; hybrid structural design.

## Resumo

Este estudo realiza uma análise comparativa do comportamento estrutural de ligações aparafusadas madeira-aço em configuração de duplo cisalhamento, avaliadas de acordo com as orientações do Eurocode 5 (EN 1995-1-1:2022). Aplicou-se um planejamento experimental fatorial e uma análise paramétrica utilizando folhas de cálculo programadas, considerando as variáveis mais influentes na capacidade de suporte: tipo de conector, classe de resistência da madeira, classe de serviço, ângulo de carregamento, espessura da chapa de aço e número de parafusos. Os resultados demonstram que os parafusos com diâmetros intermédios (M7-M10) conseguem o melhor equilíbrio entre a eficiência estrutural e construtiva. Condições ambientais adversas (classe de serviço 3) e orientação diagonal da carga ( $45^\circ$ ) geram reduções na capacidade de suporte de mais de 75%. Este estudo oferece orientações técnicas para o projeto otimizado de ligações híbridas madeira-aço com base em princípios normativos e no comportamento estrutural real.

**Palavras-chave:** ligações aparafusadas madeira-aço; Eurocódigo 5; capacidade de ligação; análise paramétrica; projeto estrutural híbrido.

## Introducción

La construcción con madera ha experimentado un resurgimiento significativo en las últimas décadas, posicionándose como una alternativa sostenible y estructuralmente viable frente a los materiales tradicionales de construcción (Tupenaite et al., 2023). Este renovado interés se fundamenta no solo en las propiedades mecánicas favorables de la madera, sino también en su capacidad para contribuir a la reducción de la huella de carbono en el sector de la construcción (Qian et al., 2025). En este contexto, las conexiones madera-acero emergen como elementos críticos que determinan el comportamiento estructural y la viabilidad de sistemas híbridos, requiriendo un análisis detallado de su desempeño bajo diferentes condiciones de carga y configuraciones geométricas (Jurkiewicz et al., 2022).

Las conexiones empernadas representan uno de los sistemas de unión más utilizados en estructuras híbridas madera-acero debido a su capacidad para transmitir cargas elevadas y su comportamiento predecible bajo diferentes condiciones de carga (Dias et al., 2010). Los pernos, como conectores tipo pasador, funcionan principalmente como articulaciones que permiten ligeros movimientos bajo carga mientras mantienen una alta resistencia a fuerzas cortantes, características que las hacen

especialmente adecuadas para aplicaciones donde los elementos estructurales experimentan fuerzas laterales considerables (Ataei et al., 2019). La efectividad de estas conexiones depende de múltiples factores, incluyendo las propiedades geométricas de los conectores (diámetro, número y posición) y las características mecánicas de los materiales involucrados y las condiciones de instalación (pre-torsión, tolerancias), tal como evidencian Wang et al. (2021).

El Eurocódigo 5 (EN 1995) constituye el marco normativo fundamental para el diseño de estructuras de madera en Europa, estableciendo principios y metodologías que gobiernan diversos aspectos del comportamiento y seguridad de las conexiones (European Committee for Standardization, 2022). Esta normativa emplea principios de Diseño por Estados Límite (DEL), enfatizando la necesidad de que los diseñadores garanticen la seguridad tanto contra estados límite últimos (ELU) como estados límite de servicio (ELS) en sus diseños (Jockwer et al., 2022). La aplicación del Eurocódigo 5 a conexiones híbridas madera-acero presenta desafíos particulares debido a la naturaleza anisotrófica de la madera y la interacción compleja entre materiales con propiedades mecánicas significativamente diferentes (Ottenhaus et al., 2021)

La investigación contemporánea en conexiones empernadas madera-acero se centra en múltiples aspectos críticos que determinan su desempeño estructural. Los modos de fallo constituyen un área de estudio fundamental, donde se identifican cinco categorías predominantes: fallo por aplastamiento (bearing), fallo por hendidura (splitting), fallo por cortante en fila (row shear), fallo por cizalladura en bloque (block shear) y fallo por tracción neta (net tension). Entre estos, el fallo por aplastamiento es considerado el más deseable al indicar un modo de fallo dúctil, mientras que los fallos por hendidura y cortante pueden conducir a fallos frágiles que requieren consideración especial en el diseño de conexiones empernadas (Quenneville & Mohammad, 2000).

El análisis del comportamiento mecánico de las conexiones empernadas revela que factores como el diámetro del perno, la calidad del acero y las tolerancias de fabricación influyen significativamente en su desempeño. Las conexiones empernadas tradicionales presentan limitaciones en cuanto a rigidez rotacional y capacidad resistente a momento debido a las holguras existentes entre los pernos y los agujeros pretaladrados (Z. Li et al., 2021). La investigación indica que estas limitaciones pueden mitigarse mediante el uso de pernos de alta resistencia y técnicas de instalación optimizadas que minimicen las holguras (Loss & Davison, 2017)

La capacidad portante de las conexiones empernadas madera-acero constituye un parámetro crítico que influye en la integridad estructural general de las estructuras de madera. El Eurocódigo 5

proporciona un marco específico para evaluar esta capacidad en conexiones con pernos, incorporando enfoques tanto experimentales como teóricos que consideran la resistencia al aplastamiento de la madera, la resistencia a flexión del perno y efectos como el efecto cuerda, que impacta significativamente en la capacidad portante final de la conexión empernada (Dobes et al., 2022). La evaluación precisa de estos parámetros requiere modelos analíticos refinados capaces de predecir el comportamiento de las conexiones bajo carga.

Los factores ambientales presentan consideraciones adicionales en el diseño de conexiones empernadas madera-acero. La exposición a la humedad puede conducir a la corrosión de los pernos y degradación de la madera circundante, particularmente en aplicaciones exteriores (Poletti et al., 2019). Para mitigar estos riesgos, se recomienda el uso de pernos de acero inoxidable o galvanizado, junto con tratamientos apropiados de la madera para mejorar la durabilidad (Zelinka et al., 2010). Las fluctuaciones de temperatura y humedad pueden inducir expansión y contracción en la madera, afectando la tensión de apriete de los pernos y potencialmente conduciendo al aflojamiento de las conexiones empernadas (Lachowicz & Lachowicz, 2021).

El análisis comparativo de conexiones empernadas revela ventajas y limitaciones específicas de este sistema de unión. Los pernos proporcionan excelente capacidad para transmitir cargas elevadas tanto en tracción como en cortante, pero requieren consideraciones especiales para minimizar las holguras que pueden afectar la rigidez de la conexión (Sawata, 2015). Las conexiones empernadas se caracterizan por su comportamiento predecible y su capacidad para redistribuir cargas en sistemas redundantes, aunque requieren ingeniería precisa para optimizar su desempeño estructural (Wang et al., 2021b).

Los desafíos en conexiones empernadas híbridas se manifiestan particularmente en la aplicación del método de componentes propuesto por el Eurocódigo para determinar la rigidez rotacional. Las asunciones conservadoras del método pueden resultar en soluciones de conexión empernada sobredimensionadas, destacando la necesidad de enfoques analíticos más refinados específicos para pernos (Tsalkatidis et al., 2018). El desempeño de las conexiones empernadas madera-acero está fuertemente influenciado por la resistencia a flexión de los pernos y las resistencias de aplastamiento de la madera, parámetros que deben modelarse con precisión para predecir el comportamiento estructural bajo diferentes condiciones de carga (Y. Li et al., 2024).

La investigación futura en optimización de diseños de conexiones empernadas es necesaria para mejorar el desempeño y reducir el uso de materiales. Estudios recientes indican que

configuraciones específicas de pernos, incluyendo arreglos en múltiples filas y el uso de arandelas optimizadas, pueden incrementar significativamente la capacidad portante de las conexiones emperradas mientras mejoran la distribución de tensiones (Pyykkö & Svensson, 2024). A medida que el campo de la construcción con madera continúa evolucionando, las investigaciones en curso proporcionarán conocimientos más profundos y soluciones innovadoras para diseños efectivos de conexiones emperradas madera-acero.

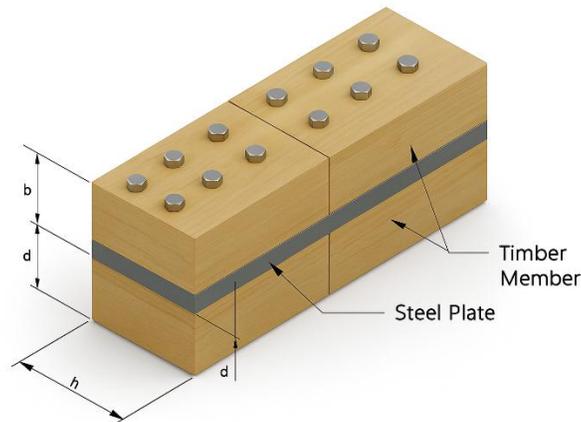
En este contexto, el presente estudio se propone realizar un análisis comparativo integral de conexiones emperradas madera-acero basado en las especificaciones del Eurocódigo 5, evaluando diferentes configuraciones de pernos, modos de fallo específicos de este tipo de conexión y estrategias de optimización que contribuyan al avance del conocimiento en el diseño de estructuras híbridas madera-acero y proporcionen directrices prácticas para la implementación de sistemas emperrados en la práctica ingenieril contemporánea.

## **Metodología**

Se desarrolló un estudio cuantitativo comparativo mediante análisis paramétrico de conexiones emperradas madera-acero-madera, fundamentado en los principios normativos del Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1:2022). La investigación se estructuró como un diseño experimental factorial completo, lo que permitió evaluar de forma sistemática el efecto de múltiples variables independientes sobre la capacidad portante de las conexiones emperradas en configuración de doble cortante. Esta aproximación metodológica garantizó una cobertura integral del espacio de diseño y facilitó la identificación de interacciones entre factores críticos que influyen en el comportamiento estructural de las uniones híbridas.

La implementación técnica de la metodología se llevó a cabo mediante el desarrollo de hojas de cálculo programadas en Microsoft Excel. Estas herramientas computacionales fueron diseñadas específicamente para integrar de forma automatizada las ecuaciones del modelo de Johansen, conforme a las disposiciones del Eurocódigo 5. Gracias a esta programación, se logró sistematizar los cálculos de capacidad portante y evaluar con eficiencia un amplio conjunto de configuraciones geométricas y materiales bajo diversas condiciones de carga. La validación de dichas hojas de cálculo se realizó mediante comparación con resultados documentados en la literatura técnica especializada, garantizando la fiabilidad y precisión de los valores obtenidos.

El estudio se centró exclusivamente en conexiones en doble cortante, donde una placa metálica de acero se ubicó entre dos elementos de madera maciza, conformando el arreglo simétrico madera-acero-madera (Figura 01). Esta configuración fue seleccionada por su amplia aplicabilidad en la práctica ingenieril contemporánea y por representar un caso de estudio prototípico en estructuras híbridas.



**Figura 01.** Conexión Emperrada Madera – Acero - Madera

Para asegurar la representatividad de los resultados, se definieron variables independientes que abarcaron un espectro amplio de condiciones constructivas reales. Entre ellas, se consideraron cuatro clases resistentes de madera (C18, C20, C24 y C35), seleccionadas por su uso frecuente en aplicaciones estructurales según el Eurocódigo 5. Las secciones de los elementos de madera se establecieron en dimensiones uniformes de 100 mm × 100 mm, lo cual representa un tamaño estándar empleado en conexiones de mediana escala.

En cuanto a los elementos metálicos, se tomó en cuenta una placa de 5 mm fabricada con acero estructural S275 ( $f_y = 275$  MPa). Los pernos empleados fueron de diámetros nominales M4, M5, M6, M7, M8, M10, M12, M14 y M16, todos de clase de resistencia 4.6 ( $f_y = 240$  MPa,  $f_u = 400$  MPa). La cantidad de pernos por conexión fue determinada a partir de los requerimientos de espaciado mínimo estipulados en el Eurocódigo 5, considerando tanto el diámetro del conector como las restricciones geométricas impuestas por las dimensiones del elemento de madera. Adicionalmente, se evaluaron tres ángulos de aplicación de carga:  $0^\circ$  (paralela a la fibra),  $45^\circ$

(diagonal) y  $90^\circ$  (perpendicular a la fibra), con el objetivo de analizar la influencia de la orientación de la carga sobre la resistencia de la conexión, dada la naturaleza anisotrópica de la madera.

Se incluyeron también las condiciones ambientales de exposición mediante el análisis de las tres clases de servicio definidas por la normativa: Clase 1 (ambiente seco), Clase 2 (humedad moderada) y Clase 3 (exposición exterior). Para cada clase se aplicó el correspondiente coeficiente de modificación  $k_{mod}$ , con el fin de ajustar los valores de resistencia en función de la humedad y la duración de la carga. En todos los casos, se adoptó una hipótesis de carga permanente para la evaluación del estado límite último (ELU), tal como lo exige el Eurocódigo 5 en condiciones de diseño conservador.

La variable dependiente principal fue la capacidad portante de la conexión, expresada en newtons (N), determinada a partir de la aplicación de las ecuaciones analíticas del modelo de Johansen para conexiones tipo pasador en doble cortante. Cada combinación de parámetros fue evaluada en función de los tres modos de fallo característicos del modelo: aplastamiento en la madera, flexión del perno y, cuando correspondía, el efecto cuerdo (rope effect). Esta evaluación sistemática permitió generar una base de datos amplia y robusta sobre el comportamiento mecánico de las conexiones estudiadas.

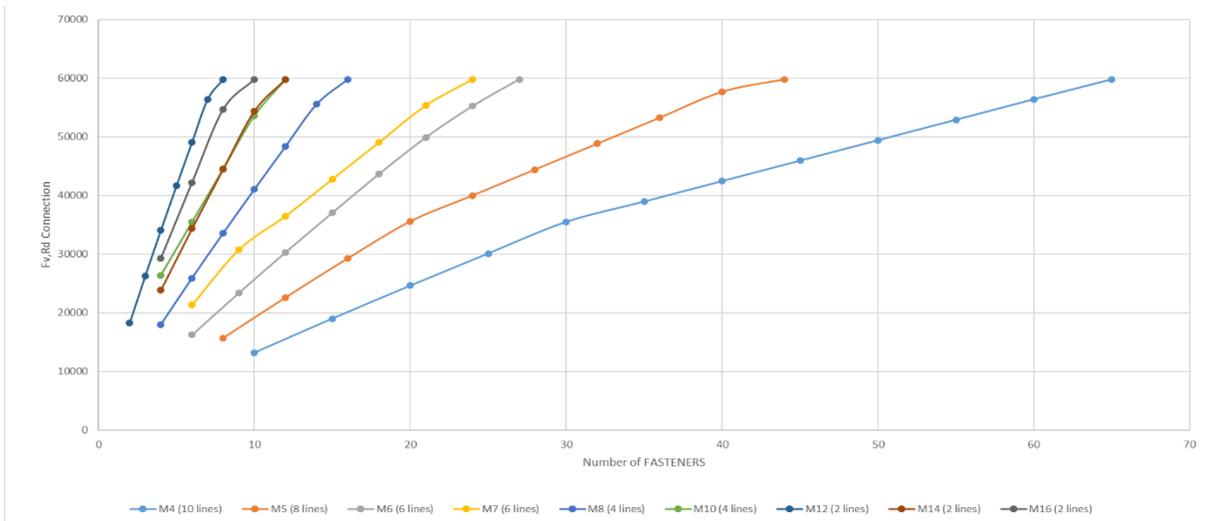
Finalmente, los datos obtenidos fueron procesados mediante análisis estadístico descriptivo, incluyendo medidas de tendencia central y dispersión. Se aplicó análisis de varianza (ANOVA) con el propósito de determinar la significancia estadística de cada variable independiente sobre la capacidad portante. Los resultados se visualizaron mediante gráficos comparativos y tablas de resumen, lo que facilitó la interpretación de tendencias, la identificación de configuraciones óptimas y la formulación de recomendaciones prácticas para el diseño eficiente de conexiones emperradas en estructuras híbridas madera-acero.

## **Resultados y Discusión**

### **Capacidad portante influenciada por el diámetro del perno**

En la Figura 02, se muestra la relación entre el número de pernos utilizados en una conexión emperrada madera-acero-madera y la capacidad de la conexión, expresada en Newtons (N), según diferentes diámetros de perno que van desde M4 hasta M16. Cada curva representa una configuración específica con una cantidad determinada de líneas de pernos, lo cual influye directamente en la capacidad máxima alcanzable por la conexión. A medida que aumenta el número

de pernos, la capacidad portante se incrementa de forma progresiva, aunque este crecimiento varía según el diámetro del perno, debido a las limitaciones geométricas y a la eficiencia estructural propia de cada tamaño.



**Figura 02.** Valores de capacidad de la conexión emperrada madera – acero – madera con una placa de 5 mm de espesor.

Los resultados evidencian una fuerte dependencia entre el número de pernos, su diámetro y la capacidad portante total de la conexión madera-acero. En configuraciones con pernos de mayor diámetro como M14 y M16 (2 líneas), se alcanzaron capacidades portantes máximas de aproximadamente 62.000 N con tan solo 20 pernos, lo que indica un alto rendimiento por conector. Esta eficiencia estructural es particularmente valiosa en aplicaciones donde se requiere limitar la cantidad de perforaciones en el elemento de madera o donde el espacio disponible es reducido. El perno M12, por ejemplo, logra una capacidad de alrededor de 55.000 N con únicamente 16 pernos, lo que lo convierte en una opción práctica para conexiones compactas de alto desempeño.

Por otro lado, configuraciones con diámetros intermedios como M7, M8 y M10 muestran un comportamiento balanceado entre resistencia y cantidad de pernos. El perno M7 (6 líneas) alcanzó una capacidad portante de 62.000 N utilizando 30 pernos, superando a M8, que necesita al menos 60 pernos para llegar al mismo nivel. M10, con 16 pernos, logra más de 45.000 N, mostrando un excelente compromiso entre resistencia y economía de conectores. Estas configuraciones resultan especialmente adecuadas para estructuras de escala media que requieren eficiencia tanto estructural como constructiva.

En contraste, los pernos de menor diámetro como M4 y M5, a pesar de permitir más líneas de disposición (10 y 8 respectivamente), requieren un número significativamente mayor de conectores para alcanzar niveles similares de capacidad portante. M4, por ejemplo, necesitó 66 pernos para superar los 60.000 N, lo que implica mayor densidad de perforaciones, más tiempo de montaje y un posible debilitamiento de la madera por acumulación de agujeros. Aunque estas configuraciones pueden ser útiles en estructuras ligeras o de bajo requerimiento mecánico, su uso en sistemas estructurales exigentes se vuelve menos recomendable.

En términos de eficiencia estructural, se concluye que los pernos de diámetros intermedios como M7 a M10 ofrecen el mejor equilibrio entre capacidad portante, número de conectores y practicidad constructiva. Además, al comparar los resultados con las exigencias normativas del Eurocódigo 5 respecto a espaciamientos mínimos y resistencia de los materiales, estas configuraciones permiten un diseño seguro, optimizado y racional desde el punto de vista estructural. Esto refuerza la idea de que la selección del diámetro de perno debe basarse no solo en la capacidad individual, sino también en la interacción entre el número total de pernos, la geometría disponible y la eficiencia global de la conexión.

La tabla 01 presentada resume el comportamiento porcentual relativo de la capacidad portante de conexiones emperradas madera–acero con placa de acero central (doble cortante), bajo diferentes combinaciones de variables: diámetro del perno, clase resistente de la madera, clase de servicio, y ángulo de aplicación de la carga. Los valores indican el incremento o reducción porcentual con respecto a una condición base, permitiendo interpretar la sensibilidad del sistema frente a variaciones de diseño.

**Tabla 01.** Variación Porcentual de la Capacidad Portante en Conexiones Emperradas Madera–Acero con Placa Central, según Eurocódigo 5

Ángulo	Clase de resistencia	Clase de servicio	Diámetros de Pernos			
			4-7 mm MAX	4-7 mm MIN	>7 mm MAX	>7 mm MIN
0°	C18	SC1 / SC2	-1.4%	-5.6%	-1.6%	-5.6%
	C20	SC1 / SC2	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	C24	SC1 / SC2	11.1%	2.9%	11.1%	3.0%
	C35	SC1 / SC2	25.3%	10.0%	18.9%	-10.1%
	C18	SC3	-17.8%	-21.3%	-18.0%	-21.3%
	C20	SC3	-16.7%	-16.7%	-16.7%	-16.7%
	C24	SC3	-7.4%	-14.2%	-7.4%	-14.2%
45°	C18	SC1 / SC2	-11.3%	-57.4%	-12.8%	-74.6%

	C20	SC1 / SC2	-6.2%	-54.5%	-11.3%	-73.1%
	C24	SC1 / SC2	0.1%	-46.9%	0.1%	-70.1%
	C35	SC1 / SC2	14.2%	-36.4%	-2.5%	-70.1%
	C18	SC3	-26.1%	-64.5%	-27.4%	-78.8%
	C20	SC3	-21.8%	-62.1%	-26.1%	-77.6%
	C24	SC3	-16.5%	-55.8%	-23.9%	-75.1%
	C35	SC3	-4.8%	-47.0%	-18.7%	-70.1%
90°	C18	SC1 / SC2	21.0%	-25.9%	10.5%	-17.5%
	C20	SC1 / SC2	22.7%	-24.8%	12.1%	-23.8%
	C24	SC1 / SC2	29.2%	-22.7%	20.9%	-21.6%
	C35	SC1 / SC2	47.9%	-17.2%	28.6%	-16.4%
	C18	SC3	0.9%	-38.3%	-8.0%	-37.6%
	C20	SC3	2.3%	-37.4%	-6.6%	-36.5%
	C24	SC3	7.6%	-35.6%	-4.0%	-34.7%

*Nota: Elaborado por autor*

### **Influencia del ángulo de carga**

El ángulo de aplicación de carga (0°, 45°, 90°) influye significativamente en la capacidad portante. En general, los valores más altos de capacidad se alcanzan cuando la carga se aplica perpendicular a la fibra (Figura 03), especialmente en maderas de clase resistente alta como C35, donde se observa un aumento de hasta +47.9% en condiciones de servicio seco (SC1/SC2) para pernos con diámetro menor o igual a 7 mm. En contraste, cuando la carga se aplica en ángulo de 45°, los resultados reflejan mayores reducciones de capacidad, llegando hasta -78.8% en madera C18, clase de servicio 3, y diámetros grandes ( $D > 7$  mm), lo que evidencia el efecto combinado negativo de la anisotropía y la humedad sobre la resistencia.

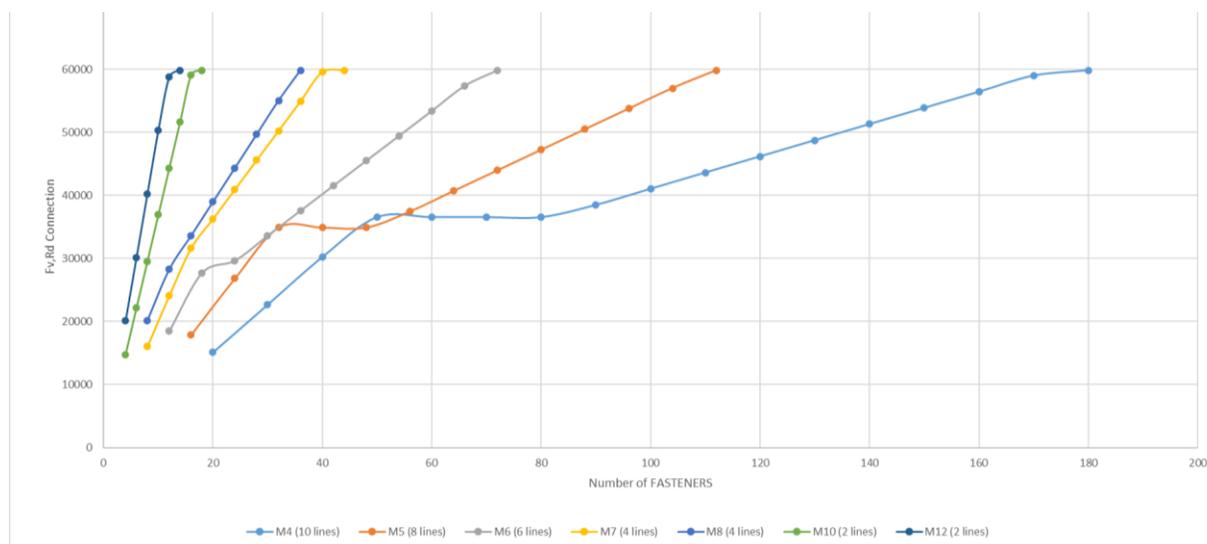


Figura 03. Valores de capacidad de la conexión emperrada madera – acero – madera con una placa de 5 mm de espesor con un ángulo de aplicación de la carga a 90° de la dirección de las fibras de la madera

### Influencia del diámetro del perno

El comportamiento difiere según el rango del diámetro. Para pernos de menor diámetro ( $4 \text{ mm} \leq D \leq 7 \text{ mm}$ ), los valores de capacidad portante suelen ser más sensibles a las condiciones ambientales, presentando mayores reducciones cuando se combinan con clases de servicio severas (SC3). Por ejemplo, en madera C20 a  $45^\circ$  y SC3, la capacidad cae hasta -62.1%, mientras que en pernos más grandes ( $D > 7 \text{ mm}$ ) el descenso es aún mayor (-77.6%). Sin embargo, en condiciones secas, los diámetros grandes tienden a mantener o incluso mejorar la capacidad portante: en C35 a  $90^\circ$  y SC1/SC2, se alcanza un +28.6%.

### Influencia de la clase resistente de la madera

La clase de resistencia de la madera tiene un efecto determinante. Las maderas de clase alta (C35) mantienen mejor su capacidad, incluso bajo condiciones desfavorables. Por ejemplo, a  $0^\circ$  y SC1/SC2, la madera C35 presenta incrementos de hasta +25.3% ( $D \leq 7 \text{ mm}$ ) y +18.9% ( $D > 7 \text{ mm}$ ). En cambio, la madera de clase baja C18 exhibe pérdidas críticas en condiciones húmedas: en SC3 y  $45^\circ$ , la pérdida alcanza -64.5% para diámetros pequeños y hasta -78.8% para diámetros grandes.

### Influencia de la clase de servicio

Las clases de servicio tienen una marcada influencia negativa, especialmente la clase 3 (SC3) que representa ambientes exteriores o con alta humedad. En todos los casos, se observan reducciones significativas de capacidad portante bajo SC3, con caídas típicas entre -20% y -75%, dependiendo

del ángulo, la madera y el diámetro del perno. Por ejemplo, en C24 a 45° con SC3 y pernos grandes, la capacidad se reduce en -75.1%, lo que demuestra la necesidad de utilizar tratamientos protectores o limitar la exposición en este tipo de conexiones.

## Conclusiones

Este estudio permitió realizar un análisis comparativo detallado del comportamiento estructural de conexiones empernadas madera–acero, basado en los principios del Eurocódigo 5 y sustentado en un enfoque paramétrico de evaluación multivariable. Las simulaciones permitieron identificar cómo la interacción entre variables geométricas, materiales y ambientales influye decisivamente en la capacidad portante y el desempeño global de las uniones.

Se evidenció que las configuraciones que emplean pernos de diámetros intermedios, particularmente entre M7 y M10, ofrecen un equilibrio altamente eficiente entre resistencia mecánica y practicidad constructiva. Estas configuraciones lograron capacidades superiores a 60 kN con un número moderado de pernos, lo cual las posiciona como alternativas óptimas para estructuras híbridas de mediana escala que requieren rigidez, seguridad y facilidad de montaje.

El ángulo de aplicación de carga resultó ser un factor crítico. Las conexiones sometidas a cargas perpendiculares a la fibra (90°) demostraron incrementos significativos de resistencia —alcanzando hasta un 47.9%—, mientras que los ángulos diagonales (45°) condujeron a reducciones marcadas, en especial en maderas de baja resistencia y condiciones de exposición desfavorables, donde se registraron pérdidas de hasta el 78.8% de capacidad portante.

Las condiciones ambientales, modeladas mediante las clases de servicio del Eurocódigo, demostraron tener un impacto severo en el desempeño de las uniones. En particular, la clase de servicio 3 (SC3), correspondiente a ambientes húmedos o exteriores, provocó reducciones estructurales significativas, lo cual reafirma la necesidad de diseñar con criterios de durabilidad, considerando protección de conectores, sellado de penetraciones y selección de materiales resistentes a la degradación.

Asimismo, se observó que la clase resistente de la madera influye de manera determinante. Las especies clasificadas como C24 y especialmente C35 permitieron mitigar las pérdidas por humedad y orientación de carga, manteniendo comportamientos mecánicos estables incluso en condiciones desfavorables. Estas maderas presentan ventajas no solo en capacidad portante, sino también en estabilidad dimensional y resistencia a fallos frágiles.

Finalmente, la utilización de hojas de cálculo programadas demostró ser una herramienta eficaz y replicable para la evaluación estructural de conexiones complejas bajo marcos normativos. Esta metodología permitió explorar combinaciones imposibles de abordar experimentalmente a gran escala, generando un cuerpo de datos confiable que contribuye tanto a la práctica profesional como a la investigación académica.

Los resultados aquí obtenidos aportan evidencia concreta para mejorar los criterios de diseño de conexiones híbridas madera-acero, promoviendo soluciones más eficientes, seguras y adaptadas a las exigencias de sostenibilidad, durabilidad y rendimiento estructural que caracterizan a la construcción contemporánea.

## Referencias

1. Ataei, A., Chiniforush, A. A., Bradford, M., & Valipour, H. (2019). Cyclic behaviour of bolt and screw shear connectors in steel-timber composite (STC) beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 161, 328–340. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2019.05.048>
2. Dias, A. M. P. G., Cruz, H. M. P., Lopes, S. M. R., & van de Kuilen, J. W. (2010). Stiffness of dowel-type fasteners in timber-concrete joints. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 163(4), 257–266. <https://doi.org/10.1680/STBU.2010.163.4.257>
3. Dobes, P., Lokaj, A., & Mikolasek, D. (2022). Load-Carrying Capacity of Double-Shear Bolted Connections with Slotted-In Steel Plates in Squared and Round Timber Based on the Experimental Testing, European Yield Model, and Linear Elastic Fracture Mechanics. *Materials* 2022, Vol. 15, Page 2720, 15(8), 2720. <https://doi.org/10.3390/MA15082720>
4. European Committee for Standardization. (2022). Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings (EN 1995-1-1:2022). .
5. Jockwer, R., Caprio, D., & Jorissen, A. (2022). Evaluation of parameters influencing the load-deformation behaviour of connections with laterally loaded dowel-type fasteners. *Wood Material Science and Engineering*, 17(1), 6–19. <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1955297>;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:S WOO20;WGROU:STRING:PUBLICATION

6. Jurkiewicz, B., Durif, S., Bouchair, A., & Grazide, C. (2022). Experimental and analytical study of hybrid steel-timber beams in bending. *Structures*, 39, 1231–1248. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2022.03.055>
7. Lachowicz, M. B., & Lachowicz, M. M. (2021). Influence of Corrosion on Fatigue of the Fastening Bolts. *Materials*, 14(6), 1485. <https://doi.org/10.3390/MA14061485>
8. Li, Y., Wang, Y., Zhong, Y., Wei, W., Su, H., & Gao, T. (2024). Finite Element Modeling of Beam-to-Column Steel Timber Composite Joints with Different Parameters. *Buildings*, 14(9), 2858. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS14092858>
9. Li, Z., Feng, W., Ou, J., Liang, F., & He, M. (2021). Experimental investigations into the mechanical performance of glulam dowel-type connections with either bolts or screws as fasteners. *Journal of Wood Science*, 67(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/S10086-021-02002-5/FIGURES/11>
10. Loss, C., & Davison, B. (2017). Innovative composite steel-timber floors with prefabricated modular components. *Engineering Structures*, 132, 695–713. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2016.11.062>
11. Ottenhaus, L. M., Jockwer, R., van Drimmelen, D., & Crews, K. (2021). Designing timber connections for ductility – A review and discussion. *Construction and Building Materials*, 304. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124621>
12. Poletti, E., Vasconcelos, G., Branco, J. M., & Isopescu, B. (2019). Effects of extreme environmental exposure conditions on the mechanical behaviour of traditional carpentry joints. *Construction and Building Materials*, 213, 61–78. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.04.030>
13. Pyykkö, J., & Svensson, S. (2024). Load-bearing capacity of slender dowel-type fasteners in Timber-Concrete Composite connections. *Engineering Structures*, 316, 118556. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2024.118556>
14. Qian, Y., Gunawardena, T., Mendis, P., & Aye, L. (2025). Carbon Footprint Variability in Engineered Wood Products for Timber Buildings: A Systematic Review of Carbon Accounting Methodologies. *Sustainability (Switzerland)*, 17(11), 4804. <https://doi.org/10.3390/SU17114804/S1>

15. Quenneville, J. H. P., & Mohammad, M. (2000). On the failure modes and strength of steel-wood-steel bolted timber connections loaded parallel-to-grain. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(4), 761–773. <https://doi.org/10.1139/CJCE-27-4-761>
16. Sawata, K. (2015). Strength of bolted timber joints subjected to lateral force. *Journal of Wood Science*, 61(3), 221–229. <https://doi.org/10.1007/S10086-015-1469-8/FIGURES/5>
17. Tsalkatidis, T., Amara, Y., Embaye, S., & Nathan, E. (2018). Numerical investigation of bolted hybrid steel-timber connections. *Frontiers in Built Environment*, 4, 411855. <https://doi.org/10.3389/FBUIL.2018.00048/BIBTEX>
18. Tupenaite, L., Kanapeckiene, L., Naimaviciene, J., Kaklauskas, A., & Gecys, T. (2023). Timber Construction as a Solution to Climate Change: A Systematic Literature Review. *Buildings* 2023, Vol. 13, Page 976, 13(4), 976. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS13040976>
19. Wang, X. T., Zhu, E. C., Niu, S., & Wang, H. J. (2021a). Analysis and test of stiffness of bolted connections in timber structures. *Construction and Building Materials*, 303. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124495>
20. Wang, X. T., Zhu, E. C., Niu, S., & Wang, H. J. (2021b). Analysis and test of stiffness of bolted connections in timber structures. *Construction and Building Materials*, 303. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124495>
21. Zelinka, S. L., Sichel, R. J., & Stone, D. S. (2010). Exposure testing of fasteners in preservative treated wood: Gravimetric corrosion rates and corrosion product analyses. *Corrosion Science*, 52(12), 3943–3948. <https://doi.org/10.1016/J.CORSCI.2010.08.014>