



Ciencia y Tecnología
Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA DE LA MADERA
Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera

EVALUACIÓN MECÁNICA DE UNIONES DE MADERA
PARA ESTRUCTURAS EN EDIFICACIONES
HISTÓRICAS

Tesis Para obtener el grado de Maestra en Ciencias y Tecnología de la Madera

Presenta:

Arq. María Alejandra López Vivanco

Directores de tesis:

Dr. Raúl Espinoza Herrera

Dra. Mayra Irery Carrillo Gómez

Sinodales:

Dra. Nancy Eloísa Rodríguez Olalde

M. C. Abril Munro Rojas

Dr. Luis Rafael Olmos Navarrete

Morelia, Michoacán. Abril de 2026.

AGRADECIMIENTOS

Dicen que el éxito es donde converge la preparación y una buena oportunidad; considero que mi preparación esta apenas iniciando, y que el destino me ha dado la oportunidad de conocer a grandes maestros no sólo académicos, sino de vida.

Me honra el tener la presencia de grandes figuras femeninas en el mundo de la ciencia e investigación, que han sobresalido por su gran conocimiento y perseverancia. Dra. Mayra Carrillo, Mtra. Abril Munro, Dra. Nancy Olalde, Dra. Laura Ibarra, un gran ejemplo de fuerza, poder y liderazgo, mujeres que siempre admiraré, no sólo por sus grandes trayectorias, sino por su gran bondad y corazón.

Dr. Raul Espinoza y el Dr. Luis Olmos, grandes maestros, que me abrieron en conjunto una puerta más allá de mis expectativas. Quienes no conocen límites y me contagian de su constante búsqueda sobre conocimiento y trascendencia.

A todos mis amigos y compañeros que amenizaron esta etapa. A la gran familia que me espera después de todo.

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	6
R E S U M E N	10
A B S T R A C T	11
1. I N T R O D U C C I Ó N	12
2. M A R C O T E Ó R I C O	15
2.1. F A C T O R E S D E D E G R A D A C I Ó N D E L A M A D E R A	15
2.1.1. B I Ó T I C O S	15
2.1.2. A B I Ó T I C O S	20
2.2. M A T E R I A L E S Y T É C N I C A S D E R E S T A U R A C I Ó N E N M A D E R A	24
2.3. I M P O R T A N C I A D E L A C O N S E R V A C I Ó N D E E S T R U C T U R A S D E M A D E R A	35
3. A N T E C E D E N T E S	37
4. J U S T I F I C A C I Ó N	43
5. H I P Ó T E S I S	43
6. O B J E T I V O S	43
7. M A T E R I A L E S Y M É T O D O S	44
7.1. C A R A C T E R I Z A C I Ó N D E M A D E R A	44
7.2. A D H E S I V O S	47
7.3. P R U E B A D E A D H E S I Ó N	50
7.4. E L A B O R A C I Ó N D E U N I O N E S	54
7.5. P R U E B A D E F L E X I Ó N E N U N I O N E S	58
7.6. T O M O G R A F Í A D E L A U N I Ó N A D H E S I V A	59
8. R E S U L T A D O S Y D I S C U S I Ó N	61
8.1. C A R A C T E R I Z A C I Ó N D E M A D E R A	61

8.2.	ADHESIVOS	65
8.3.	PRUEBA DE ADHESIÓN.....	67
8.4.	PRUEBA DE FLEXIÓN EN UNIONES.....	70
8.5.	TOMOGRAFÍA DE LA UNIÓN ADHESIVA.....	72
9.	CONCLUSIONES	79
10.	REFERENCIAS.....	81
	ANEXOS	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de hongos xilófagos.	19
Tabla 2. Reacción de la madera ante la temperatura.	21
Tabla 3. Características de los adhesivos Acetato de polivinilo, Colágeno animal y Diisocianato de Metileno, correspondientes a las fichas técnicas del fabricante... 47	
Tabla 4. Promedios de las probetas utilizadas en la prueba de adhesión, madera sana.	51
Tabla 5. Promedios de las probetas utilizadas en la prueba de adhesión, madera sana húmeda.	52
Tabla 6. Promedios de las probetas utilizadas en la prueba de adhesión, madera de recuperación.	53
Tabla 7. Diseño para elaboración de uniones de madera; (MS) madera sana; (MR) madera de recuperación.	55
Tabla 8. Características de la madera utilizada para pruebas físico mecánicas. ...	61
Tabla 9. Clasificación para MOR y MOE con base a Echenique, 1994.	64
Tabla 10. Caracterización mecánica de las uniones. (MS) Madera Sana; (MR) Madera de Recuperación.	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Estructuras de madera restauradas por daños antrópicos; (a) Secado de maíz sobre vigas de madera, Sevina, Michoacán; (b) Restauración de la cubierta de madera de la Parroquia de Santiago Apóstol, Nurio, Michoacán; (c) Degradación de cubierta y retablo por falta de mantenimiento en la capilla de San Nicolás Obispo, Michoacán.	23
Fig. 2. Principales uniones en madera; (a) Distribución de esfuerzos mecánicos en un empalme; (b) Empalme; (c) Ensamble; (d) Acoplamiento.	26
Fig. 3. Uniones oblicuas adicionadas con clavijas, de acuerdo con Landa, 2019b.	28
Fig. 4. Preparación de madera sana.	44

Fig. 5. Material obtenido después del maquinado de las vigas de madera de recuperación.....	45
Fig. 6. Clasificación visual de las probetas tipo 1, de acuerdo a la densidad de anillos de crecimiento y la presencia de signos de degradación.	46
Fig. 7. Prueba de flexión estática en madera de recuperación.....	46
Fig. 8. Determinación de contenido de sólidos; (a) tarado de crisoles; (b) desecado de muestras; (c) sólidos restantes.....	48
Fig. 9. Determinación de viscosidad; (a) viscosímetro; (b) husillos o agujas rotacionales, (c) procedimiento para controlar la temperatura del fluido; (d) muestra de colágeno animal.	49
Fig. 10. Diseño de probeta para prueba de adhesión.	50
Fig. 11. Aplicación de adhesivo en probetas; (a) superficie de contracto y colocación de adhesivo; (b) prensado de probetas.	51
Fig. 12. Metodología de inmersión para prueba de adhesión; (a) llenado de agua dentro del balde de prueba; (b) rejilla metálica que permitió la inmovilización de las probetas.	52
Fig. 13. Material para la elaboración de uniones; (a) Clasificación de madera sana y de recuperación.....	54
Fig. 14. Elaboración de uniones de madera; (a) cortes en la sierra de mesa; (b) cortes de con router; (c) uso de formol; (d) Uniones elaboradas.....	56
Fig. 15. Detalle de pernos y cuña.....	57
Fig. 16. Detalle de brocas para elaboración de perforaciones.	57
Fig. 17. Detalle de los orificios y bastones de madera.	58
Fig. 18. Prueba de flexión, explicación gráfica, probeta de unión cuña central antes de aplicar una carga.....	58
Fig. 19. Elaboración de probeta para μ -CT; (a) corte transversal en la probeta; (b) tablillas transversales obtenidas después del corte; (c) muestras en formato cubico; (d) se utilizó un roto martillo para afinar las caras de las muestras, y estas quedaran cilíndricas; (e) muestra final para tomógrafo.	60
Fig. 20. Fallas presentes durante la prueba de flexión.....	62
Fig. 21. Variabilidad en las fallas por flexión presentes en la prueba.....	63

Fig. 22. Comportamiento reológico de diversos materiales viscosos; (a) efecto del tiempo sobre el esfuerzo aplicado; (b) velocidad de deformación; (dθ) Diferencia de ángulo; (dt) Diferencia de tiempo.	66
Fig. 23. Diferencia adhesiva de los pegamentos evaluados; (PVA) Acetato de Polivinilo; (MDI) Diisocianato de metileno.	67
Fig. 24. Resistencia adhesiva de cada pegamento en condiciones húmedas; (PVA) Acetato de Polivinilo; (MDI) Diisocianato de metileno.	68
Fig. 25. Prueba de adhesión utilizando madera de recuperación, en condiciones secas; (PVA) Acetato de Polivinilo; (MDI) Diisocianato de metileno.	69
Fig. 26. a. MOR; b. MOE. MS: Madera Sana; MR: Madera de Recuperación. Los valores con letras similares no son significativamente diferentes según el Test de rango múltiple de Duncan ($\alpha = 0.05$).	71
Fig. 27. Reconstrucción tridimensional de la unión adhesiva; (a) Superficie transversal; (b) Volumen de la muestra de madera, superficie transversal.....	73
Fig. 28. Aislamiento de elementos en micrografía; (a) Volumen tridimensional; (b) Aislamiento de adhesivo dentro de la estructura de madera.....	74
Fig. 29. Reconstrucción tridimensional de la unión adhesiva en madera de recuperación. (a) Muestra sin adhesivo; (b) Muestra con adhesivo.	76
Fig. 30. Reconstrucción tridimensional de madera; (a) Estructura anatómica; (b) impregnación del adhesivo.....	77
Fig. 31. Reconstrucción tridimensional de las superficies de madera. (a) Madera sin adhesivo; (b) impregnación del adhesivo en la madera.	78

RESUMEN

La degradación progresiva en las estructuras de madera en edificaciones históricas, causada por factores bióticos, abióticos y antrópicos, compromete la capacidad mecánica de las uniones, por lo que resulta indispensable desarrollar técnicas compatibles que permitan su conservación estructural y valor patrimonial. La presente investigación tuvo como objetivo la evaluación mecánica de uniones elaboradas a partir de madera sana y madera de recuperación, considerando la anatomía, el tipo de empalme, la influencia del número de pernos y el uso de adhesivos comerciales. Se diseñaron empalmes tipo Rayo de Júpiter con uno, dos y cuatro pernos, empleando como adhesivo el diisocianato de metileno (MDI). Las uniones fueron sometidas a ensayos de flexión estática conforme a la norma ASTM D143, a partir de los cuales se determinaron el módulo de ruptura (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE). De manera complementaria, se realizaron pruebas sobre la caracterización de adhesivos, incluyendo viscosidad y contenido de sólidos, así como el análisis mediante microtomografía computarizada de rayos X (μ CT), lo que permitió evaluar de forma no destructiva la impregnación y distribución del adhesivo dentro de la estructura anatómica de la madera de recuperación. Los resultados arrojaron que, pese al deterioro microestructural, la madera de recuperación presenta un desempeño mecánico compatible cuando se emplean uniones adecuadamente diseñadas. El análisis estadístico mediante el test de rango múltiple de Duncan, con un nivel de confianza del 95%, mostró diferencias significativas entre los tratamientos, destacando el empalme con cuatro pernos como el de mejor comportamiento mecánico, al proporcionar mayor rigidez y limitar el desplazamiento horizontal de la unión. En conjunto, los resultados aseguran la viabilidad de integrar empalmes tradicionales, adhesivos compatibles y técnicas avanzadas de caracterización para la rehabilitación estructural del patrimonio construido en madera.

Palabras clave: Empalmes, MDI, Rayo de Júpiter, Micro-tomografía, Flexión.

ABSTRACT

The progressive degradation of wooden structures in historic buildings, caused by biotic, abiotic, and anthropogenic factors, compromises the mechanical capacity of the joints. Therefore, it is essential to develop compatible techniques that allow for their structural preservation and heritage value. This research aimed to evaluate the mechanical properties of joints made from sound wood and reclaimed wood, considering the anatomy, the type of joint, the influence of the number of bolts, and the use of commercial adhesives. Jupiter-beam joints were designed with one, two, and four bolts, using methylene diisocyanate (MDI) as the adhesive. The joints were subjected to static bending tests according to ASTM D143, from which the modulus of rupture (MOR) and the modulus of elasticity (MOE) were determined. Additionally, tests were conducted to characterize the adhesives, including viscosity and solids content, as well as analysis using X-ray micro-computed tomography (μ CT). This allowed for the non-destructive evaluation of the adhesive's impregnation and distribution within the anatomical structure of the reclaimed wood. The results showed that, despite microstructural deterioration, the reclaimed wood exhibits compatible mechanical performance when properly designed joints are used. Statistical analysis using Duncan's multiple range test, with a 95% confidence level, revealed significant differences between the treatments. The four-bolt joint stood out as having the best mechanical performance, providing greater rigidity and limiting horizontal displacement of the joint. Overall, the results confirm the feasibility of integrating traditional joints, compatible adhesives, and advanced characterization techniques for the structural rehabilitation of timber heritage buildings.

Keywords: Joins, Methylene diisocyanate, Jupiter Beam, Micro-tomography, Flexion.

1. INTRODUCCIÓN

La madera es un material de origen biológico, que se ha utilizado para diversas aplicaciones como en la construcción, el arte y la combustión (Wiemann, 2021). Sin embargo, al ser un biomaterial es susceptible a la degradación, los bienes históricos elaborados de madera requieren de una buena conservación y protección que asegure su valor cultural para las generaciones futuras (Broda *et. al.*, 2022).

La degradación biológica de la madera provoca principalmente la pérdida gradual de las hemicelulosas y celulosa, reduciendo su grado de cristalinidad; mientras que la lignina sufre una modificación en su composición química; en consecuencia, la microestructura de la pared celular aumenta en superficie y volumen total de poros, debilitando su resistencia mecánica (Broda *et. al.*, 2022). Sin embargo, existen especies de madera que contienen altos porcentajes de componentes secundarios químicos como son taninos o resinas, los cuales evitan que la madera sea menos susceptible al daño por insectos y hongos xilófagos (Avram *et. al.*, 2022).

La madera antigua se ha identificado, como propuesta de restauración en edificaciones, especies como *Pseudotsuga menziesii* (Sakuno y Schniewind, 1990), *Juglans regia*, *Abies alba* en combinación con un material compuesto se utilizó para fortalecer su soporte en objetos patrimoniales (Cataldi *et. al.*, 2015a; Cataldi *et. al.*, 2015b); se detectó el uso de madera de *Tilia cordata*, en uno de estos elementos patrimoniales, al ser consolidada con una resina acrílica presento una retención de nivel medio (Mankowski *et. al.*, 2015). Además, se encontraron vestigios del uso de madera de *Ulmus spp.* y *Pteroceltis tatarinowii* en el periodo de la antigua China, por su gran capacidad mecánica y resistencia a la degradación (Wang *et. al.*, 2023).

Timar *et. al.*, (2014), estudiaron la penetración y distribución de consolidantes y adhesivos de origen sintético y orgánico dentro de la estructura anatómica de la madera, concluyen que las ceras y parafinas de origen natural, tienen una mayor retención en comparación con la resina acrílica. Es necesario el uso de métodos no destructivos que permitan conocer la retención y penetración de los fluidos utilizados para consolidar la madera degradada. Schniewind y Eastman (1994), utilizan la Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) para cuantificar el porcentaje de células

en la madera que retiene a los consolidantes. Existen otro tipo de técnicas que permiten analizar el grado de deterioro de madera utilizada en elementos patrimoniales, como la tomografía electrónica (Deng *et. al.*, 2016). Además, estas técnicas son fundamentales para la evaluación de la seguridad estructural en edificaciones históricas elaboradas a base de madera, al permitir una inspección detallada sobre el edificio y sus distintos niveles de degradación, daños en la microestructura y cambios en las propiedades físicas de la madera (Rodríguez *et. al.*, 2011). Se ha demostrado que la degradación biológica ocasiona una pérdida heterogénea de masa en los componentes anatómicos (traqueídas, radios leñosos, fibras y vasos) al ser un material anisotrópico, lo que genera aumento en la porosidad y una redistribución de los caminos de flujo internos (Carrillo *et. al.*, 2021). Frente a ello, la Microtomografía Computarizada de Rayos X (micro-CT) ofrece ventajas significativas, permite obtener representaciones tridimensionales del sistema poroso de la madera y visualizar, sin alterar la muestra, la distribución del adhesivo dentro de la estructura anatómica. Esta técnica permite evaluar variables críticas como profundidad de penetración, continuidad de la unión y trayectorias de flujo, siendo particularmente útil en materiales anisotrópicos como la madera, donde la dirección de fibras y la densidad celular condicionan la respuesta estructural.

Los elementos de madera que permanecen estructuralmente íntegros pero han sufrido desplazamientos debido al impacto o movimiento, pueden ser cuidadosamente desmontados y re ensamblados, con el fin de restablecer la conectividad estructural y las rutas de transmisión de cargas (Sviatoslav *et. al.*, 2022). Es importante señalar que las soluciones adoptadas en cada intervención están determinadas por condiciones específicas del lugar, el grado de deterioro y los medios técnicos disponibles (Gomon *et. al.*, 2024). Desde la perspectiva patrimonial, este principio es clave para garantizar la conservación y funcionalidad de los bienes patrimoniales edificados, ya que la intervención debe respetar tanto la estructura como el valor histórico del material (ICOMOS, 2017). Por ello, la correcta identificación y clasificación de estos deterioros resulta indispensable para definir tratamientos específicos que aseguren la estabilidad de la estructura (Chen *et. al.*, 2023; Ehtisham *et. al.*, 2023). Entre las acciones necesarias para la conservación

del patrimonio en madera, la restauración mediante uniones o empalmes representan una estrategia fundamental, pues permite sustituir o reforzar secciones dañadas por factores bióticos y abióticos, manteniendo la estabilidad en total de la estructura (Basterra *et. al.*, 2009). Los ensayos mecánicos y de adhesión han demostrado que este tipo de refuerzo reduce la deformación angular, mejora la disipación de energía y preserva la integridad de las uniones, cumpliendo con los principios de mínima intervención, reversibilidad y compatibilidad material establecidos por el Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (ICOMOS) para la conservación del patrimonio arquitectónico en madera (Zhang *et. al.*, 2024).

2. MARCO TEÓRICO

2.1. FACTORES DE DEGRADACIÓN DE LA MADERA

La madera, es una estructura biológica compleja, constituida principalmente por celulosa, hemicelulosas, lignina, sustancias extraíbles y sustancias inorgánicas; elementalmente compuesto por 50% carbono, 43% oxígeno, 6% hidrogeno y 1% nitrógeno y sustancias inorgánicas (Colín y Carrillo, 2023) se encuentra susceptible al deterioro, desde la acción de microorganismos como hongos y bacterias hasta la exposición a condiciones climáticas severas, e incluso el fuego; diversos agentes pueden descomponer la madera, afectando su composición y durabilidad (AITIM, 2020).

Los deterioros son aquellas características físicas que llegan a presentar los materiales constructivos ajenos a su naturaleza, como consecuencia de la acción de distintos agentes patógenos, en el ámbito de la restauración, cuando se habla de deterioros, estos pueden ser bióticos, abióticos y antrópicos (Idrizi *et. al.*, 2022).

2.1.1. BIÓTICOS

INSECTOS

Los organismos terrestres que pueden degradar la madera son hongos, insectos, bacterias y acuáticos, como los taladros marinos. Las termitas son la principal plaga de insectos que dañan la madera, pero se consideran menos grave que los hongos (AITIM, 2020). Dentro de la clasificación de insectos xilófagos se encuentran géneros *Thysánura*, *Isóptera*, *Coleóptera*, *Lepidóptera*, *Himenóptera*. El género *Isóptera* y *Coleóptera* causan mayores daños en bienes muebles y estructuras de madera (Pătrașcu *et. al.*, 2018; CONAFOR, 2010; AITIM, 2020).

a. *Isóptera*: son insectos sociales, lucífugos, muestran polimorfismo de casta, viven en colonias y que se dividen el trabajo de acuerdo a la casta que pertenece (Bartolomé y Mancebón, 2005). Las castas están compuestas generalmente de reina y rey (reproductores), alados (reproductores secundarios), soldados y obreras.

El ataque en un árbol suele comenzar en la zona basal (raíces y tronco inferior) y progresa hacia el interior de la madera, aprovechando condiciones de humedad y debilitamiento del tejido. Dentro de las construcciones elaboradas a base de madera estas se encuentran en cualquier elemento (Feci *et. al.*, 2013).

b. *Coleóptera*: los adultos se aparean durante tres semanas, y ponen los huevecillos en grietas y aberturas de la madera. Su metamorfosis de los se divide en cuatro fases: huevo, larva, pupa y adulto. El tiempo más largo del ciclo de vida corresponde al estado larvario (1-5 años) etapa durante la cual lleva a cabo la destrucción de la madera, los *anóbidos* se alimentan de madera proveniente de coníferas, los *líctidos*, madera de latifoliadas, mientras que los *scolíctidos* de la corteza del árbol (Pătrașcu *et. al.*, 2018; CONAFOR, 2010).

El insecto adulto es menor responsable de los daños, ya que se limita a hacer el agujero de salida (que es el que observamos en la superficie de los objetos), el agujero es sólo la abertura de una galería que a veces tiene más de 10 cm de largo (*anóbidos* o *líctidos*), o incluso más de 50 cm (*cerambícidos*). Las familias como *Cerambycidae*, *Scolytidae* y *Platypodidae*, atacan madera con alto contenido de humedad (> 20%), y la *anobiidae* ataca madera muy seca (C.H. < 15%) (Arango *et. al.*, 2021).

HONGOS

Los hongos son microorganismos formados por filamentos microscópicos llamados hifas, en conjunto forman una estructura llamada micelio (Vaca de Fuentes, 1998). Se alimentan de nutrientes obtenidos de la absorción externa, liberando enzimas que degradan el material orgánico. El crecimiento de estos depende de temperatura, humedad y aire equilibrado (Arango *et. al.*, 2021).

Los hongos al carecer de clorofila, no pueden producir su alimento a partir de la luz solar. Su ciclo de vida comienza con la dispersión de esporas que germinan en condiciones húmedas y templadas. Estas esporas forman hifas, que descomponen

la materia orgánica. Las hifas se multiplican y forman un micelio, que puede crecer dentro o fuera del sustrato. Finalmente, el hongo desarrolla un cuerpo fructífero único para cada especie, visible a simple vista (AITIM, 2020).

Los hongos, de acuerdo a su alimentación pueden ser saprófitos, se alimentan de las sustancias de reserva del interior de las células y segregan enzimas que descomponen la pared celular. Los hongos actúan cuando la madera se encuentra expuesta a altos contenidos de humedad, por ejemplo madera en contacto con el suelo o en tiempo de lluvias; por último, los hongos parásitos, que se alimentan de organismos vivos (AITIM, 2020; Ávila *et. al.*, 2012).

Los hongos xilófagos se clasifican en:

CROMÓGENOS (AZULADO)

Presentes en árboles debilitados en pie o en madera aserrada. Después del secado de la madera se presentan cuando existe una adecuada humedad para su desarrollo. Primeramente invade el tejido parenquimatoso de la albura en madera en rollo o madera aserrada húmeda en forma de mancha color azul verdoso (Casado *et. al.*, 2019).

El azulado aumenta la permeabilidad de la madera al paso de líquidos y su higroscopicidad; este efecto no se limita solo a la superficie, sino que también afecta el interior de la madera. Afectan un 16% la resistencia a tensión, 25% la resistencia a compresión y 17% la resistencia a flexión. Los hongos del azulado pueden sobrevivir a humedades entre 18 – 140% y a temperaturas 5 – 35 °C. Los hongos pueden dañar la madera recién cortada, ya que su límite máximo de humedad es similar al contenido de humedad de la madera recién cortada (140%) (AITIM, 2020; Kamperidou, 2019).

PUDRICIÓN

Parda o cúbica: Son hongos *basidiomicetos* que afectan a la celulosa y dejan a la lignina sin daño. Invaden el tejido parenquimatoso de la albura (pared celular y ocasionalmente en los lúmenes). Coníferas; latifoliadas, como el *Quercus*; árboles

frutales. Madera estructural como vigas y columnas. La madera dañada es de color marrón oscuro y se agrieta perpendicular y transversalmente, formando estructuras prismática o laminar. Afectan entre 10 - 30% la resistencia a tensión, 15 - 40% resistencia a compresión y entre el 20 - 50% resistencia a flexión, 20 - 50% resistencia al cortante, 20% - 50% resistencia a flexión. Es importante tener en cuenta que los valores mencionados en la disminución de resistencia mecánica por la pudrición parda, son aproximados y pueden variar significativamente en función de las condiciones específicas de cada caso (AITIM, 2020; CONAFOR, 2010).

Blanca: Son hongos *basidiomicetos* y en ocasiones *ascomicetos*, se alimentan de carbohidratos y lignina de la pared celular, aunque también pueden dañar a la celulosa como los hongos simultáneos. El daño en la madera inicia en el lumen y termina en la lámina media. Daño mayor en latifoliadas (mayor cantidad de lignina) y menor en coníferas. La madera es de color blanquecino con un aspecto fibroso o incluso harinoso. La resistencia de la madera disminuye considerablemente cuando es afectada por este tipo de hongo. Se le denomina también pudrición fibrosa, pudrición corrosiva o pudrición deslignificante (Ávila *et. al.*, 2012).

Blanda: Hongos *ascomicetes* y *deuteromicetes* (hongos imperfectos). Se produce cuando existe alta humedad, tanto en el ambiente como en la madera y en las zonas muy húmedas en contacto con el muro o la pared. Las hifas se desarrollan no sólo en el lumen sino también en el interior de la pared celular secundaria, provocando cavidades. Parecida a la pudrición parda, se diferencia de ésta porque la madera se siente muy blanda o esponjosa al tacto, y cuando se seca se deshace formando cubos pequeños y la resistencia de la madera disminuye considerablemente (Ávila *et. al.*, 2012; CONAFOR, 2010).

Mohos: Son incapaces de alimentarse de los principales componentes de la pared celular (celulosa y lignina). La temperatura óptima de desarrollo se encuentra 24 - 28 °C, con posibles variaciones, su contenido de humedad oscila entre el 30 - 150%.

Crean las condiciones para el desarrollo de los hongos de pudrición. Los mohos no afectan considerablemente las propiedades físico mecánicas ni pudren a la madera (Arango *et. al.*, 2021; CONAFOR, 2010).

Se elaboró una tabla (tabla 1) para clasificar los hongos xilófagos:

Tabla 1. Clasificación de hongos xilófagos.

Tipo de hongo	Tipo de pudrición	Filo	Género
Cromógenos	Azulado	<i>Ascomycota</i>	<i>Ceratocystis</i> , <i>Ceratostomella</i>
Pudrición	Parda o cúbica	<i>Basidiomycota</i>	<i>Serpula</i> , <i>Poria</i> , <i>Coniophora</i>
	Blanca	<i>Basidiomycota</i>	<i>Trametes</i> , <i>Fomes</i> , <i>Pholiota</i> , <i>Pleurotus</i>
	Blanda	<i>Ascomycota</i>	<i>Chaetomium</i> , <i>Xylaria</i> , <i>Hypoxylon</i> <i>Alternaria</i> , <i>Coniothyrium</i> , <i>Humicola</i> , <i>Stemphylium</i> y <i>Stysanus</i>
Mohos	-	<i>Ascomycota</i>	<i>Penicillium</i> , <i>Trichoderma</i> , <i>Fusarium</i> y <i>Aspergillus</i> .

Fuente: (AITIM, 2020; Ávila *et. al.*, 2012; CONAFOR, 2010).

VEGETACIÓN

La vegetación representa un alto riesgo en las estructuras de madera, estas especies vegetales pueden causar daños estructurales al penetrar las raíces en las uniones de la cantería, facilitando la filtración de agua de lluvia. Esta filtración incrementa la humedad en la madera, lo que eventualmente conduce a la degradación y pudrición de la misma (Arango *et. al.*, 2021). La naturaleza invasiva y capacidad para esparcirse rápidamente sobre las superficies de la construcción la convierten en una amenaza seria para la seguridad estructural; además de las enredaderas y los árboles cercanos a los edificios (AITIM, 2020).

Las especies como el *Fraxinus uhdei*, *Ceiba pentandra* y *Ficus benjamina l.*, pueden desarrollar raíces que se extienden por debajo del suelo e invadir las estructuras; provocando el levantamiento de los pisos, agrietamiento de los muros y otros

deterioros estructurales, lo que compromete la estabilidad y seguridad del edificio (CONAFOR, 2010). La planta de *Nicotiana glauca*, presenta una gran capacidad de germinación y habilidad para esparcirse en cualquier fisura de las azoteas y paredes; con una altura de hasta cuatro metros, esta planta encuentra fácilmente las condiciones ideales para su desarrollo en edificaciones con falta de mantenimiento (CONAFOR, 2010). Es fundamental llevar a cabo un mantenimiento regular y tomar medidas para prevenir la proliferación de estas plantas alrededor de los edificios con el fin de preservar su durabilidad y seguridad a largo plazo.

2.1.2. ABIÓTICOS

La madera sufre deterioro debido a la exposición a una variedad de agentes climáticos, cuya acción combinada conduce a su desgaste progresivo. Las fluctuaciones periódicas de temperatura y humedad causan contracción y expansión en las capas superficiales de la madera, resultando en la formación de micro fisuras y su posterior desquebrajamiento (AITIM, 2020; Ávila *et. al.*, 2012).

La degradación climática expone nuevas capas de madera a condiciones ambientales adversas, perpetuando el ciclo de deterioro. Además, el impacto de partículas de polvo y arena transportadas por el viento contribuye al desgaste físico de la madera. De manera simultánea, la acción química, que involucra la interacción del oxígeno y la radiación solar, afecta significativamente la composición estructural de la madera, acelerando su degradación (Vaca, 1998).

FUEGO

La madera es valiosa y versátil, pero es un material con un riesgo inherente, su combustibilidad, la ignición del material comienza a partir de los 200°, mientras que a los 400° la madera sufre un proceso de inflamación (tabla 2). Sin embargo, resulta interesante cómo, en el proceso de ignición y propagación del fuego, la madera suele desempeñar un papel secundario (Pereira *et. al.*, 2024). Con frecuencia, son otros materiales mucho más inflamables los que inician el proceso. Sin una llama

física, la madera necesita una temperatura en la superficie mayor a 400°C, la madera con un bajo contenido de humedad enciende más facilidad que una húmeda, y la que se encuentra en estado de pudrición arde más rápido que la sana (AITIM, 2020).

Tabla 2. Reacción de la madera ante la temperatura.

Temperatura		
≈200°C	250°C	400°C
Ignición del material.	Reacción exotérmica, elevación de temperatura que favorece la combustión y la formación de gases que contribuyen a la propagación del fuego.	Todas las maderas se inflaman.
Velocidad de carbonización en coníferas		
Valor real: 0.67 mm/min*		
Valor eficaz: 0.8 mm/min		

*El efecto del fuego será en radio (por ejemplo, después de 30 min el radio de afectación será de 20 mm). Fuente: (AITIM, 2020; Vaca, 1998).

El fuego, al entrar en contacto con la madera, provoca la formación de tres capas distintas. La capa más externa, en contacto directo con el fuego, se carboniza debido a la combustión, esta capa adquiere la propiedad de ser seis veces más aislante a la temperatura, que una madera en buen estado; debajo de esta se encuentra una segunda capa, donde ocurre la pirolisis, un proceso de descomposición térmica en ausencia de oxígeno. La tercera y última capa está compuesta por madera intacta, que aún no ha sido afectada por el calor (White y Nordheim, 1992).

Las uniones representan un punto débil en las estructuras de madera, cuyo fallo se debe al agotamiento de estos puntos de intersección.

AITIM (2002) nos dice:

[...] mayor número de carbonizaciones se darán en las uniones de las piezas, debido a que existen juntas que facilitan la penetración o porque se han utilizado elementos metálicos que conducen el calor hacía el interior.

En conclusión, cuando la madera es afectada por el fuego, la capacidad de soportar cargas disminuye debido a la reducción de su sección transversal, no a una pérdida de resistencia del material. La madera tiene un contenido de humedad del 8 - 15% y existen tres modos de transferencia de calor (conducción, convección y radiación) por lo tanto, antes de que pueda comenzar a arder, deben evaporarse entre 80 y 150 kg de agua por metro cúbico (Ezekoye, 2016; AITIM, 2020).

AGENTES ATMOSFÉRICOS

Los principales agentes atmosféricos son el sol y la lluvia, actuando sobre la superficie de la madera que se encuentre expuesta. El agua de lluvia que se deposita sobre la superficie externa de la madera sin protección es rápidamente absorbida por el material; este proceso implica que el agua penetre y se distribuya uniformemente dentro de la estructura interna de la madera; seguido, ocurre un proceso de adsorción en las paredes celulares, donde las moléculas de agua se adhieren a la superficie interna de las células de la madera (Vaca de Fuentes, 1998).

El vapor de agua presente en el ambiente es directamente adsorbido por las paredes celulares de la madera. En este caso, las moléculas de vapor se adhieren a la estructura celular, incrementando el contenido de humedad en la madera. Este fenómeno es importante para entender los mecanismos de degradación y conservación de la madera expuesta a condiciones ambientales variables, ya que tanto la absorción como la adsorción contribuyen significativamente a la dinámica que provoca curvaturas, alabeos, y fendas (AITIM, 2020).

La radiación solar afecta a la madera principalmente a través de los rayos ultravioleta (UV) e infrarrojos (IR). Los rayos ultravioleta inducen cambios fotodegradativos en la superficie de la madera, comenzando con una decoloración hacia tonos marrones, evolucionando hacia un color grisáceo debido a la descomposición de la lignina (Evans *et. al.*, 2005). La acción química del oxígeno presente en el aire también contribuye a la degradación de la madera; este proceso

oxidativo afecta la estructura molecular de la madera, acelerando su envejecimiento y deterioro (Reinprecht, 2016).

La degradación de la madera debido a factores ambientales es un proceso lento, con una tasa estimada de pérdida de material superficial que varía entre 1 y 13 milímetros por siglo, esta degradación tendera a ser distinta de acuerdo a la orientación de la superficie de la madera, la especie y ubicación del elemento constructivo (Brischke, 2020).

ANTRÓPICOS

Los daños antrópicos están conformados por las actividades humanas, ya sean culturales o ideológicas. Además, las construcciones históricas están sujetas a condiciones de uso; esto quiere decir, la madera se encuentra en constante deterioro y riesgo (fig. 1).

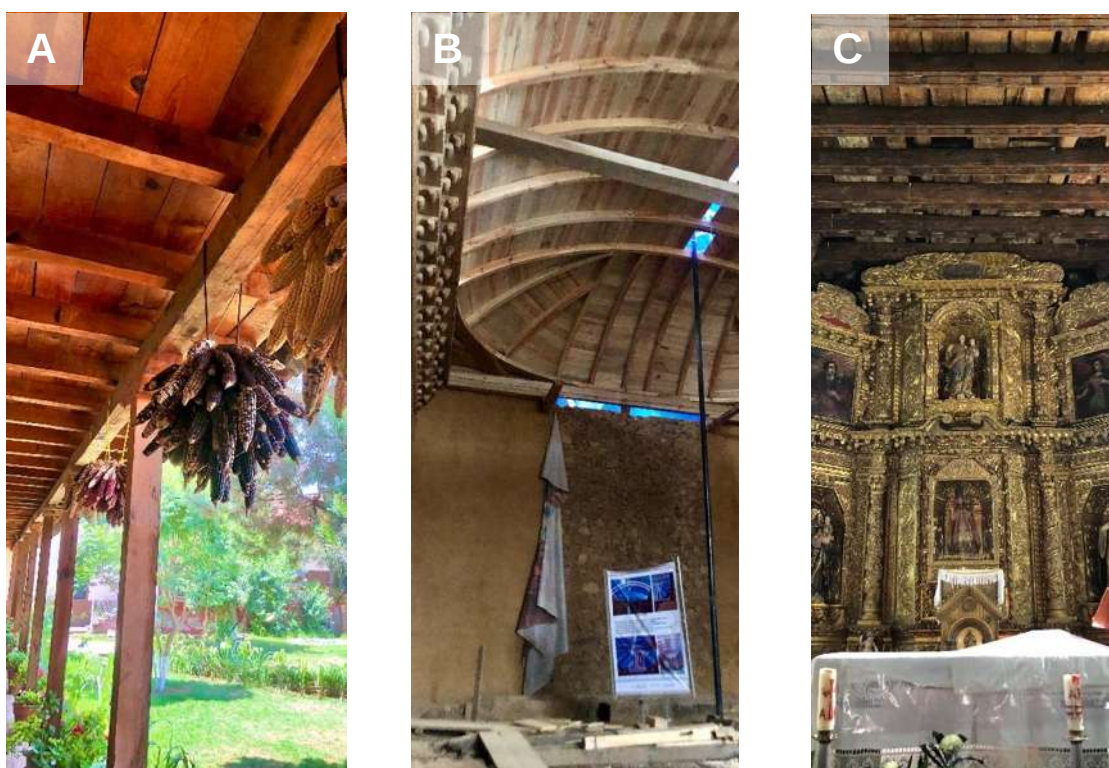


Fig. 1. Estructuras de madera restauradas por daños antrópicos; (a) Secado de maíz sobre vigas de madera, Sevina, Michoacán; (b) Restauración de la cubierta de madera de la Parroquia de Santiago Apóstol, Nurio, Michoacán; (c) Degradación de cubierta y retablo por falta de mantenimiento en la capilla de San Nicolás Obispo, Michoacán.

2.2. MATERIALES Y TÉCNICAS DE RESTAURACIÓN EN MADERA

La degradación de los elementos de madera en las estructuras comienza por la falta de reparación y mantenimiento continuo, adecuado y especializado (Mackiewics, 2024). Los miembros dañados se reemplazan con la misma especie de madera, y se trata de conservar los ya existentes tanto como sea posible; además, se utilizan métodos tradicionales al cortar y ensamblar los nuevos elementos de la estructura (Moon, 2024). El nombre que engloba esta sustitución de material, es conocido como injertos, definido como una reparación o refuerzo, mediante alguna tecnica de union o encolado (Landa, 2016). El encolado es otro metodo de restauración que consiste en el uso de adhesivos para reparar piezas de madera, el cual conyeva una serie de características como son, determinar el contenido de humedad de la madera, la presión del encolado, el tiempo de encolado; además de la preparación de la atmósfera donde se realizará la restauración.

2.2.1. UNIONES

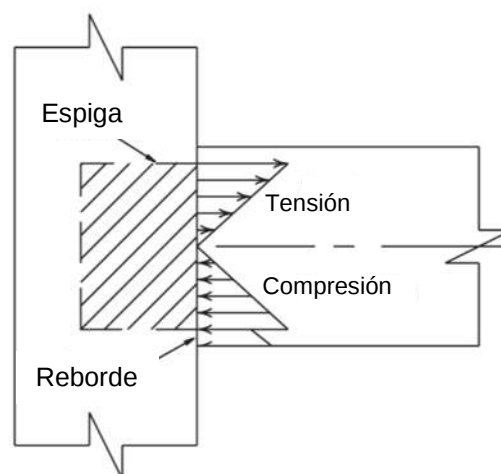
La investigación se realizó con base a las principales técnicas de restauración a nivel internacional; generalmente, cuando la pérdida de una sección no es significativa, se opta por medidas protectoras sin restaurar la geometría original. Sin embargo, si la geometría está comprometida, se deben utilizar materiales similares a los originales (Uysal y Haviarova, 2018). En caso de emplear un material nuevo, es crucial examinar su compatibilidad con el material original en términos de resistencia, estabilidad dimensional y permeabilidad, entre otros factores importantes.

Existe una gran variedad de uniones en el mundo de la carpintería tradicional. Siendo la cultura japonés los de mayor impacto, por su gran estética y capacidad mecánica. El uso de la unión llamada “Rayo de Júpiter”, fue identificado en visitas de campo realizadas durante la investigación, en la estructura del tapanco de la Basílica de Nuestra Señora de la Salud en Pátzcuaro, Michoacán y en la Capilla de Nuestro Señor del Perdón, en Zirahuén, Michoacán, en la bóveda de la cubierta principal.

La reparación de madera puede incluir la unión de segmentos degradados o perdidos, el uso de sujetadores insertados o externos, así como la aplicación de prótesis o injertos, inyección y consolidación con resina sintética (Landa, 2019a). Cuando la reducción es significativa para las secciones transversales de la madera, las estructuras pueden ser reforzadas con miembros adicionales, considerando el reemplazo completo sólo como último recurso.

Existen dos tipos de esfuerzos mecánicos que actúan principalmente sobre las uniones de madera, tensión y compresión (fig. 2-a), suelen reflejarse ya que la madera trabaja en dirección a la fibra (AITIM, 2015). Los autores Berrio y Orive (1984), Moreno (2018), mencionan que los métodos de intervención para el área de restauración de bienes inmuebles patrimoniales son liberación, consolidación, integración, reintegración, restitución. Los nodos donde se encuentran ubicados algún tipo de unión, y han sido reforzados, representan un punto débil en la estructura de madera (Zhang *et. al.*, 2024). Existen técnicas que permiten reforzar y reintegrar elementos en las construcciones de madera, asegurando su durabilidad y funcionalidad, como son las uniones (fig. 2-b,c,d). Además, los miembros de madera que se encuentran intactos pero desplazados debido al impacto o movimiento, pueden ser desmantelados y reensamblados para restaurar la conectividad estructural y las rutas de carga (Landa, 1993).

A



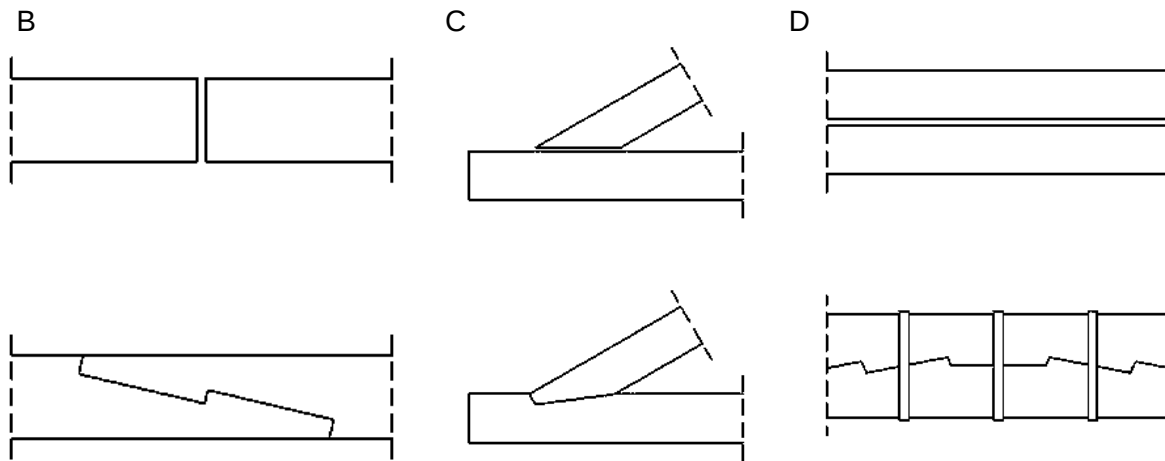


Fig. 2. Principales uniones en madera; (a) Distribución de esfuerzos mecánicos en un empalme; (b) Empalme; (c) Ensamble; (d) Acoplamiento.

Los empalmes son dos piezas de madera enlazadas por las testas, con el fin de alargar su longitud. En las vigas el empalme queda reducido normalmente a las zonas de apoyo, ya que es difícil conseguir la continuidad en flexión.

El empalme de piezas sometidas a esfuerzos axiales transmite mejor los esfuerzos en compresión que en tensión. En cambio, los empalmes en piezas sometidas a flexión generalmente sólo aseguran la continuidad geométrica, pero no suelen transmitir los momentos flectores.

Los ensambles son piezas que se encuentran formando un ángulo. Existe un gran número de ensambles, que de acuerdo a su geometría son capaces de soportar distintos tipos de esfuerzos.

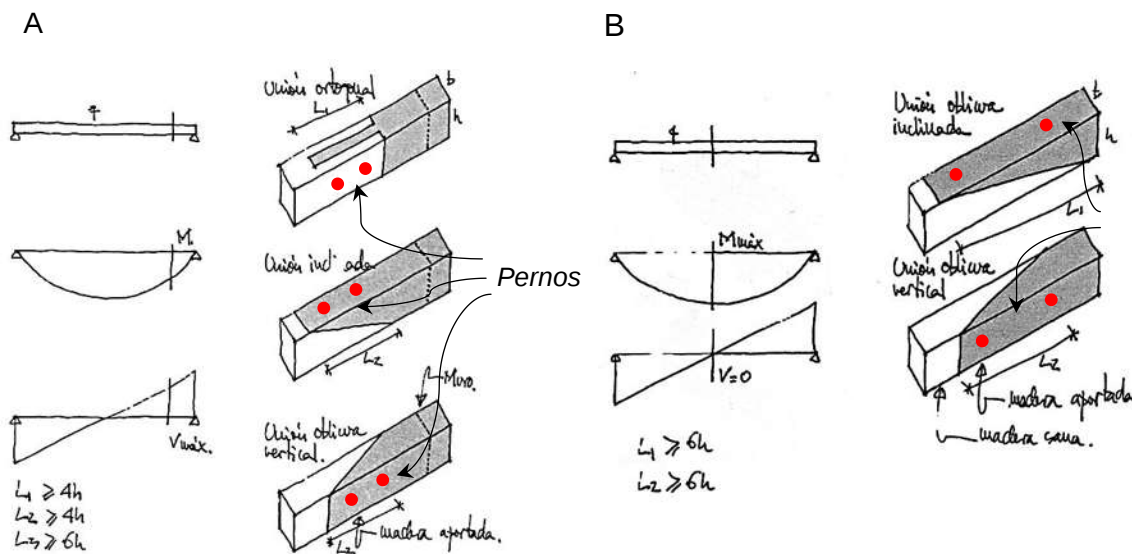
Los acoplamientos son piezas que se unen por sus caras, para aumentar la sección transversal. Este sistema de unión se utilizaba para fabricar vigas de gran luz con secciones que no se podían obtener mediante aserrado directo. Sin embargo, debido a los inevitables deslizamientos entre las piezas, la sección resultante no alcanza el momento de inercia teórico en los cálculos estructurales (AITIM, 2020; Landa, 1993).

2.2.2. PERNOS, CLAVIJAS Y CUÑAS

Los pernos son elementos pequeños de forma cilíndrica elaborados a base de madera sólida, colocados en ángulo recto dentro de la unión de dos partes de madera, zona donde se produce mayor tensión. Provocando que la unión sea casi un 80% más eficaz en su resistencia a la rotura, esto se logra cuando la longitud de la unión es cuatro veces el espesor de la pieza de madera (Landa, 2019b).

Distintos estudios han descubierto que aumentar la longitud y profundidad del perno tiene como beneficio el incremento de la resistencia en las uniones en donde se ubican estas piezas. Las estructuras de madera cumplen con la característica de ser isostáticas, esto quiere decir que cada elemento en la composición de una estructura de madera es independiente de los demás, y solo se relacionan gracias a la transmisión de esfuerzos (Landa y Ochandiano, 2016), por ello, un elemento que forma parte de un conjunto dentro de la estructura, puede llegar a ser reparado o sustituido sin su modificación en conjunto.

Las uniones oblicuas, como son el “Rayo de Júpiter”, no son paralelas a ninguna de las caras del elemento de madera a reparar; por ello, se tiene la necesidad de añadir apoyo en la zona inferior de tensión (tracción), ya que este esfuerzo produce una separación en los planos unidos (fig. 3-a, b, c). Sin estos pernos la rotura de las piezas de madera se eleva a un 30% de lo correspondiente a una madera sólida en estado sano.



C

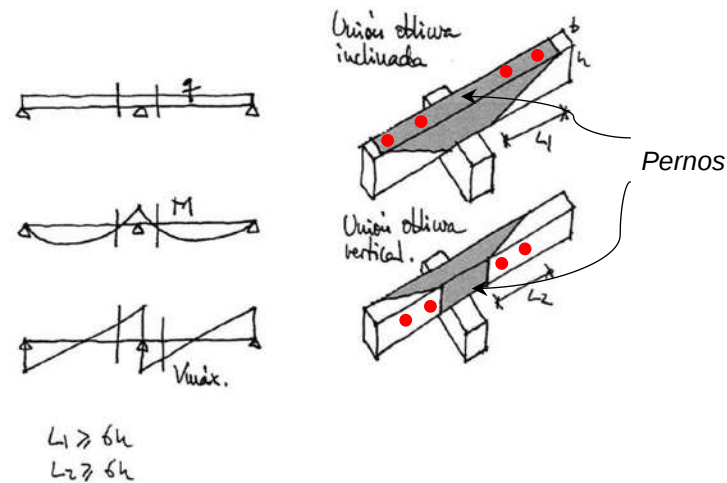


Fig. 3. Uniones oblicuas adicionadas con clavijas, de acuerdo con Landa, 2019b.

Zhang *et. al.*, (2024), reportan que el refuerzo con clavijas de madera en un marco de madera, controlan eficazmente el desplazamiento lateral, lo que significa una reducción de rotura del 50-62% en comparación con un marco sin refuerzos. Aplicándolos en columnas exteriores, estas clavijas redujeron un 31.5% el desplazamiento en dirección X, un 5% en dirección Y, y un 25.8% en dirección Z.

Por lo que, el uso de pernos se resume en:

Incremento de la capacidad resistente, aumentando la capacidad portante de las uniones un 11.3% aproximado. Incrementa el momento flector, especialmente en uniones reforzadas. Mejora la capacidad en zonas críticas de tensión y flexión.

Mejora significativa del comportamiento sísmico, mejorando la ductilidad de las uniones; reduce la probabilidad de daño estructural durante sismos; disminuye desplazamientos, aceleraciones, vibraciones y fuerzas internas de la estructura de madera (menor amplificación de movimiento).

Aumento de rigidez estructural, disminuyendo su frecuencia natural (ritmo a la que oscila libremente); mayor control del movimiento horizontal.

Reduce la separación entre las dos partes de la unión; disminuye la deformación interna de la geometría de la unión; evita la aparición de grietas en la zona de ensamblaje.

Redistribución y concentración de esfuerzos con mayor control, ya que los pernos absorben parte del esfuerzo y redistribuyendo tensiones; disminuye la torsión estructural; el perno actúa como elemento donde se concentran los esfuerzos, por lo que antes del colapso de la estructura, el perno falla.

Conserva el sistema constructivo original, ya que no altera significativamente la apariencia original y es compatible con el material original de la estructura de madera.

2.2.3. ADHESIVOS

Un adhesivo se define como una sustancia capaz de sujetar dos cuerpos mediante la unión de sus superficies (INSHT, 1986). El principal adhesivo durante la prehistoria estaba conformado por una sustancia pegajosa obtenida de la savia de los árboles y ocre rojo, esto se conoce gracias a algunos vestigios encontrados en Sudáfrica. Durante el siglo XVIII a.C. los egipcios crean un adherente de origen animal; seguido los griegos y romanos desarrollan una técnica para la correcta adhesión de enchapado y marquetería. Los taninos han llegado a ser utilizados como adhesivos, mientras que los carbohidratos no llegan a ser tan utilizados debido a su activación con el agua (Del Valle *et. al.*, 2021).

La sangre, gomas, brea, y el látex del árbol de caucho (*Hevea brasilienses*), no requerían de un tratamiento previo, a comparación de los adhesivos obtenidos a partir de la proteína de soja (*Glycine max.*), caseína de leche y colágeno. Si bien es claro, hasta ese momento el tema de la adhesión estaba resuelto a partir de materiales orgánicos, que procedían de plantas y animales (Del Valle *et. al.*, 2021).

Durante los siglos XIX y XX con el origen de la revolución industrial, surge la invención de los adhesivos sintéticos; el fenol formaldehído fue uno de los

principales adhesivos, que permitió el origen de la madera contrachapada para uso exterior. Los taninos, cuya función es meramente de protección vegetal, eran utilizados como mecanismo de adhesión en lugares donde los compuestos fenólicos son de difícil acceso a la población por el costo que implicaban. La urea formaldehído, tuvo un gran auge durante esta época, ya que elevó la producción de elementos de madera para uso interior a un bajo costo (Koksal y Kelleci, 2021).

La Segunda Guerra Mundial, propició el origen de nuevos procesos y técnicas que ayudaron a desarrollar nuevos polímeros sintéticos, por ejemplo el acetato de polivinilo y el poliuretano, teniendo como ventaja el poder modificar su estructura química para adquirir nuevas propiedades mecánicas (Del Valle *et. al.*, 2021).

COMPOSICIÓN DE LOS ADHESIVOS

El componente principal (resina) es el material que actúa como ligante, actualmente se corresponden con productos orgánicos de síntesis. Los endurecedores son sustancias que se añaden para acelerar el fraguado. Las cargas o harinas se añaden para mejorar las características del adhesivo, como la elasticidad de la resina e incluso disminuir costos. Pueden ser insecticidas, fungicidas, ignífugas, etc. El solvente es el vehículo en que va disuelto el adhesivo, pueden ser acuosos, orgánicos, hidrodispersables, espumas, entre otros (Sedano *et. al.*, 2021).

Los adhesivos, son fluidos. Un fluido es una sustancia que puede fluir y adaptarse a la forma del recipiente que lo contiene, incluyendo líquidos y gases. Sus moléculas tienen una atracción débil, lo que les permite moverse libremente unas respecto a otras. Los fluidos no poseen una forma fija, sus propiedades físicas influyen en cómo se comportan al ser sometidos a fuerzas externas (De Nevers, 2006). Algunas de las características de mayor importancia en los fluidos son la viscosidad, que es la resistencia al flujo; la densidad, es la relación entre la masa y volumen; tensión superficial, cuya propiedad permite resistir fuerzas externas y compresibilidad, es la capacidad de cambiar de volumen ante presión (White, 2008).

Existen fluidos newtonianos, todos los gases son de tipo newtonianos; los líquidos que se pueden representar con una fórmula química simple son de este tipo, el agua, benceno, alcohol etílico, tetracloruro de carbono y el hexano. Soluciones diluidas compuestas de moléculas simples en agua o solventes orgánicos como las soluciones de sales inorgánicas o el azúcar en agua. Los fluidos cuya viscosidad es constante y no cambia con la velocidad de deformación o la fuerza aplicada. Su comportamiento sigue la Ley de la viscosidad de Newton, establece que la tensión cortante es proporcional al gradiente de velocidad (De Nevers, 2006). Y los *fluidos no newtonianos*, que son de mayor complejidad, cuya viscosidad varía dependiendo de la fuerza aplicada o la velocidad de deformación. Estas son mezclas cuyos constituyentes varían de tamaño; la pasta dental está compuesta de partículas sólidas suspendidas en una solución acuosa de varios polímeros (White, 2008).

VISCOSIDAD (μ)

La viscosidad se puede definir como la medida de resistencia interna, por fricción al flujo. Esta se calcula a partir de la ecuación 1. Y la unidad de medición es el cP (*centipoise*).

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{dV}{dy}}$$

donde:

μ : Viscosidad dinámica

τ : Esfuerzo cortante

dV : Diferencia de velocidad

dy : Diferencia de distancia

Ecuación 1. Viscosidad.

MECANISMOS DE UNIÓN

Existen tres mecanismos principales de adhesión unión mecánica, física y química (Sedano *et. al.*, 2021; Krystofiak *et. al.*, 2022). La unión mecánica es un proceso físico mecánico entre la morfología del sustrato y la permeabilidad de la madera (la madera es un material polar). Este mecanismo se da mediante la relación adhesivo-sustrato, por las características de la superficie como la porosidad, e incluso la topografía. Una mayor difusión en la microestructura aumenta el área de contacto

de la superficie entre el adhesivo y la madera, para mayor resistencia. Además, se cree que la unión mejora cuando el adhesivo penetra por todos los vacíos de la pared celular. La unión física consta de tres fuerzas de atracción intermolecular. Fuerza de Van der Waal, fuerza de London y enlace de hidrógeno (unión específica). La unión de mayor adhesión es por atracción química (afinidad madera-adhesivo) entre los grupos activos polares del sustrato y del adhesivo (Sedano *et. al.*, 2021).

Las condiciones de la superficie de la madera pueden dificultar la correcta penetración del adhesivo, lo que afecta a nivel microscópico. Esto provoca la formación de concentraciones de tensión una vez que el adhesivo se ha secado por completo (Koksal y Kelleci, 2021). Para evitar este problema, la superficie de la madera debe ser plana, lisa y estar libre de irregularidades causadas por el proceso de maquinado, como los bruñidos, aceites, suciedad, astillas u otros contaminantes. La aplicación de presión sobre el adhesivo permite que se distribuya de manera uniforme y delgada, lo que mejora la humectabilidad, factor clave para la buena adhesión (Krystofiak *et. al.*, 2022). Además, ayuda a eliminar el aire atrapado, asegura el contacto directo entre el adhesivo y la madera, permite que el adhesivo se esparza en la estructura del material para una mejor adhesión mecánica y forma una capa delgada de adhesivo. Sin embargo, si se aplica demasiada presión, el adhesivo puede penetrar demasiado en los poros de la madera, lo que debilita la unión final (Del Valle *et. al.*, 2021).

Los adhesivos pueden dividirse por su forma de aplicación, los cuales son termoplásticos, termoestables, de contacto, de fusión en caliente, sensibles a la presión, rehumectables.

Por su origen y composición:

NATURALES

Las colas animales, preparadas a partir de colágeno de mamíferos, principal proteína del cuero, huesos y tendones; cola de pescado, se obtiene por extracción de pieles de pescado; cola de caseína, obtenida a partir de caseína, proteína procedente de la leche; cola de albumina de sangre, se prepara a partir de sangre fresca de matadero o de polvo seco de sangre soluble y agua; cola de soja, de naturaleza proteica y se obtiene a partir de harina de soja en solución alcalina; dextrinas, obtenidas por hidrólisis a partir del almidón; látex, sabia obtenida del árbol del caucho; goma arábica, obtenida por exudación del tronco y ramas de árboles de acacia (Del Valle *et. al.*, 2021). Las colas animales son un material versátil de fácil aplicación, pero al mismo tiempo desconocido, en el ámbito de la restauración se utiliza a modo de adhesivo, aglutinante y consolidante. Estas provienen de queratina como cuernos, pesuñas, pelo, uñas, lana y plumas (Flores *et. al.*, 2016; Schellmann, 2009). Distintas investigaciones mencionan algunas ventajas sobre el uso de colas animales, como su naturaleza hidrofóbica que proporciona una mejor resistencia al agua; la queratina por ser una proteína fibrosa, es más fácil de hidrolizar; posee componentes naturales anti moho; presentan una actividad antioxidante y una reducción en las emisiones de formaldehído (Bailach *et. al.*, 2011).

Las desventajas de estos adhesivos provocan hinchamiento cuando tienen contacto con el agua, disolviéndose cuando entran en contacto con alguna fuente de calor, incluso después de siglos (Schellmann, 2007). La re solubilidad de las colas animales puede disminuir en los casos en que la proteína haya encontrado iones metálicos o con ciertos pigmentos o taninos orgánicos, antes, durante o después de su aplicación (Del Valle *et. al.*, 2021).

SINTÉTICOS

Las resinas de urea-formaldehído son resultado de la condensación de urea no sustituida y formaldehído; resinas de melamina-formaldehído, formadas por condensación de melamina no sustituida y formaldehído; resinas de fenol-

formaldehído, constituidas por condensación de formaldehído y un fenol monohídrico (fenol, cresoles o xilenoles); resinas de resorcina-formaldehído, resultan por condensación de resorcina y formaldehído; resinas epoxi, se presentan en dos partes; una resina conteniendo un grupo epoxi y un catalizador tipo amina u otro compuesto que actúa como agente curado (INSHT, 1991; Kelleci y Koksai, 2023).

Los poliisocianatos, se obtiene a partir de isocianato alifáticos o aromáticos con dos o más grupos isocianato en su molécula, reaccionan a compuestos que contienen hidrógenos activos. Cuando la reacción se produce con un poliol se forman poliuretanos (Del Valle *et. al.*, 2021). Las resinas de poliéster son polímeros cuyas moléculas contienen varios grupos éster. Las resinas vinílicas, contienen en su molécula un grupo vinílico como acetato de polivinilo (PVA), polivinil acoiales, alcohol polivinílico, polivinil éteres, poliestireno (Koksai y Kelleci, 2021). Las resinas acrílicas (derivadas del ácido acrílico, acrilonitrilo, acrilamida). Los cauchos sintéticos son polímeros obtenidos a partir del isobutileno, del butadieno-acrilonitrilo, estireno-butadieno, neopreno. Los adhesivos derivados del tratamiento químico de la celulosa son la nitrocelulosa y el acetato de celulosa.

2.3. IMPORTANCIA DE LA CONSERVACIÓN DE ESTRUCTURAS DE MADERA

Los inmuebles de valor patrimonial dentro del territorio mexicano, de acuerdo al Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) son alrededor de 86,698 catalogados como monumento histórico (INAH, 2024), estos son construcciones de entre los siglos XVI-XVIII, de los cuales más del 95% han sido objeto de intervención (INAH, 2024). En Michoacán se tiene registrado 1,089 bienes inmuebles patrimoniales (INAH, 2024).

El ICOMOS (2017) como organismo internacional, define al patrimonio construido en madera como:

“[...] toda tipología de edificios y estructuras de madera que guardan significado cultural o forman parte de lugares históricos, incluye estructuras temporales, móviles y evolutivas”.

El propósito de este órgano es difundir y aplicar los principios fundamentales abordados en varios documentos históricos, como la Carta de Venecia (1964), la Declaración de Ámsterdam (1975), la Carta de Burra (1979), el Documento de Nara sobre la Autenticidad (1994) y las directrices de la UNESCO, relacionadas con la protección y conservación del patrimonio edificado en madera (ICOMOS, 2017). A medida que la percepción del patrimonio cultural evolucionó se introdujeron conceptos específicos de madera. Los ejemplos notables incluyen la Carta sobre el Patrimonio Vernáculo Construido, los Principios para la Conservación de Estructuras de Madera Históricas, la Carta ICOMOS: Principios para el Análisis, la Conservación y la Reparación Estructural del Patrimonio Arquitectónico, y los Principios para la Conservación del Patrimonio de Construcción de Madera (Moon y An, 2024; ICOMOS, 2003).

La conservación del patrimonio construido en madera, enfrenta diversos desafíos, entre los cuales la urbanización y el desarrollo moderno representan uno de los más significativos. En la ciudad de Kyoto, Japón, se puede observar sus tradicionales

casas de madera del siglo XVII construidas por la comunidad *Chonin*, conocidas como *machiya*, son testimonio del patrimonio de la ciudad. Sin embargo, con el auge de la urbanización y la modernización, muchas de estas estructuras han sido demolidas para dar paso a edificios modernos y con mayor rentabilidad (Sato y Nakahara, 1995). En Michoacán, México, la comunidad Purépecha desarrolló su vivienda tradicional desde la época prehispánica en el siglo XII llamada troje (De Alcalá, 2018), se puede observar el reemplazo gradual debido al uso de nuevos materiales constructivos como el concreto y acero.

Los principios establecidos por estas instituciones destacan la importancia de respetar las tradiciones locales y los enfoques de conservación de las comunidades, como son los sistemas constructivos y técnicas tradicionales, ser técnicamente reversible, dar acceso a la información sobre la intervención efectuada, si es necesario un trabajo posterior; además, de la participación ciudadana en la protección del patrimonio. La falta de comprensión sobre las necesidades socioculturales y la cosmovisión de estas comunidades pueden llevar a la pérdida de estructuras históricas de madera, como se ha observado en Japón y Michoacán.

3. ANTECEDENTES

Zhang *et. al.*, (2024), reportan una de las técnicas que más antigüedad ha manifestado, es la edificación en la zona Oriental, como China, la cual se basa en un método llamado Yingzao Fashi, antiguo tratado Chino del siglo XII, sobre arquitectura y construcción, proporciona una visión detallada de la planificación urbana, la construcción de palacios, templos, pagodas, residencias y otros tipos de edificios tradicionales chinos; menciona el uso del pino en la construcción debido a su resistencia, durabilidad y disponibilidad. En el tratado, se describen técnicas específicas para seleccionar, preparar y trabajar la madera de pino en la construcción; esto incluye la elección de pinos de alta calidad, el proceso de secado de la madera para mejorar su resistencia y estabilidad, y las técnicas de ensamblaje y unión utilizadas en las estructuras de madera.

Sato y Nakahara, (1995), mencionan el uso de técnicas tradicionales, como el *Kiwari*, se puede entender como una relación matemática entre las distintas partes que conforman la estructura de madera, para lograr una armonía estética y estructural. Este método ayuda a dimensionar los componentes como vigas y columnas.

Pereira *et. al.*, (2024), reportan una investigación basada en un modelo numérico, el cual valida con una prueba experimental, para conocer la reacción del fuego ante un elemento de madera, mediante el uso del método de elementos finitos, los resultados se basan en la evolución del campo de temperatura, la formación de la capa de carbón, su sección residual, y el aislamiento térmico.

Moon y An, (2024), analizaron el Santuario de Sungryeoljeon en Namhansanseong, Corea del Sur, monitoreando el desplazamiento de puntos clave antes y después de la reparación de la estructura de madera, en un intervalo de cuatro años. Se revelaron alteraciones mínimas durante este periodo. Registros antiguos indican que se realizaron reparaciones en 1763, 1976, 1986 y 1995. Esta investigación se

centra en la restauración de 2017 y consta de tres partes: una evaluación justo antes de la reparación; la segunda, justo al terminar la restauración, y por último, cuatro años después; con el objetivo de analizar los cambios a través del tiempo. Se utilizó un escáner 3D para identificar cambios, especialmente en las columnas, los componentes estructurales más grandes. Se analizaron dos puntos de la cumbrera del techo, cuatro puntos en las vigas, y se midió la parte superior de la esquina del estilóbato, conocida por su estabilidad, sirviendo como referencia frente a las zonas de mayor deformación.

Zhang, H., *et. al.* (2024). Reportan el uso de pernos elaborado a base de madera de *Pinus spp.* alcanforado para la rehabilitación de uniones entre columnas y vigas utilizadas en el salón Daxiong del templo Xingguo, en la provincia de Henan en China.

Chen *et. al.*, (2023), mencionan el hecho de la inexistencia de un sistema que contenga las propiedades deseadas de un compuesto a base de resinas epoxi, poliéter aminas y fibras de madera de álamo, mezcla que adquiere las propiedades hidrofóbicas de las hojas de loto y la adhesión de las proteínas del mejillón. Las propiedades mecánicas al reparar una estructura dañada, alcanzaron el 97% de las de una madera no dañada.

Koksal y Kelleci (2021), reportan la preparación y caracterización adhesivos para madera a base de poliestireno y almidón como una alternativa al pegamento convencional de acetato de polivinilo; el primero, consta de la fundición de espuma de poliestireno en acetona, llevándolo a una consistencia en gel; el segundo, se realizó mezclando harina de trigo, azúcar, almidón, agua y vinagre, posteriormente se calentaron y se preparó un adhesivo tipo gel. Se sometieron a una prueba de flexión y tracción con 200 kg/cm² durante dos horas, para conocer su MOR (Módulo de Ruptura) y MOE (Módulo de elasticidad); llegando a la conclusión de que ambas alternativas no son adecuadas como adhesivos que pretendan sustituir al PVA.

Idrizi *et. al.*, (2021), mencionan el hecho de llevar a cabo una inspección para identificar la causa, tipo, grado y alcance del daño, el cual puede ser causado por factores microbiológicos, ambientales (calor, luz, condensación, ataque químico, etc.), alteraciones y reparaciones inadecuadas, daños mecánicos, incendios e inundaciones. Utilizando materiales como madera, hierro, acero, hormigón, resinas epoxi y polímeros reforzados con fibras. Las intervenciones en las estructuras pueden variar desde el mantenimiento simple hasta la rehabilitación profunda, y se dividen en dos categorías principales, la primera es la reparación, que consiste en restaurar la capacidad portante de los elementos estructurales, con algunos daños como grietas, pérdida de sección y degradación de materiales; la segunda, son los refuerzos, los cuales aumentan la capacidad de carga en respuesta al deterioro general o cambios en el uso del edificio. Reportan la existencia de varios métodos para la reparación de estructuras de madera, como remoción y reposición, eliminación y sustitución de elementos dañados; adición de elementos, incorporación de componentes adicionales para reforzar la estructura; sellado/relleno, aplicación de materiales para llenar grietas y huecos; reparación de grietas, tratamiento de fracturas en la madera; reparación protésica, uso de prótesis de madera para reemplazar segmentos degradados o perdidos; inyección y consolidación con resina sintética, inyección de resinas para consolidar la estructura; empalme de segmentos degradados, unión de partes dañadas con segmentos nuevos; uso de sujetadores insertados o externos, aplicación de elementos de fijación para asegurar la estabilidad; reemplazo de miembros significativamente dañados, reemplazo de componentes solo como último recurso; desmantelamiento y re ensamblaje, desmontar y volver a ensamblar miembros desplazados para restaurar la conectividad estructural y las rutas de carga.

Jiang y Sun (2022), analizan tres métodos de reparación en roturas comunes en vigas de madera. Se probaron y simulaban numéricamente cuatro vigas de madera sin daños iniciales y seis vigas reparadas en un marco de madera plano, evaluando los fenómenos de ensayo, la capacidad portante y la rigidez de todas las vigas. Los

resultados mostraron que, en comparación con las vigas sin daño inicial, las vigas reparadas con los métodos de incrustación superior, restauración en núcleo superior, espiga parcial y núcleo inferior aumentaron su capacidad de carga en 38.93%, 13.06%, 5.08% y 3.94%, respectivamente. Los experimentos y simulaciones indicaron que las partes superior e inferior de las vigas dañadas pueden repararse eficazmente mediante métodos de incrustación y núcleo. En casos de daño parcial en la espiga, las propiedades mecánicas de la viga mejoraron tras la reparación. La simulación de la reparación con incrustaciones inferiores mostró que la capacidad portante de la viga es inversamente proporcional a la altura de reparación y la distancia entre la posición de reparación y el tramo. De acuerdo a lo reportado, se propone una técnica de reparación con incrustaciones en cola de milano, la cual fue verificada numéricamente para reducir efectivamente la concentración de tensión.

Del Valle, *et al.* (2021), reportan la toxicidad del uso del formaldehído para la formulación de adhesivos de tipo estructural por su alto rendimiento y la capacidad permeable que otorga; debido a esto, su investigación gira en torno al desarrollo de un nuevo adhesivo de tipo industrial con menor toxicidad a base del uso de proteínas globulares para formular nuevos adhesivos de madera, apoyándose de la reticulación de cadenas polipeptídicas después del curado a altas temperaturas y alta presión que refuerza la unión y la resistencia al agua. Algunos de estos compuestos son los grupos carboxílicos, aminos, hidroxilos y sulfonamidas, que entrecruzan las cadenas polipeptídicas. En pocas palabras, estudian el uso del gluten de trigo, la proteína de soja, proteína de algodón, proteína de colza, proteína de ceína, el uso de la caseína, la sangre, queratina y colágeno.

Carrillo y Raya (2020), realizaron una inspección de vigas de madera mediante el uso de métodos no destructivos para la identificación de patologías en la estructura de la antigua sede INAH Michoacán, utilizando la transmisión de ondas ultrasónicas, como método para la inspección y evaluación *in situ*; además, de que menciona la

metodología en la cual se basan los trabajos de restauración de madera, que son inspección y clasificación visual, así como peritaje estructural mediante el cual se detectan los deterioros en las piezas de madera. Como conclusión, reporta la necesidad de conocer el contenido de humedad y el módulo de Young, para confirmar de manera cuantitativa, lo reportado en las prospecciones iniciales; sugiere utilizar tecnología avanzada para la detección de estos daños, ya que además de confirmar, se logran descubrir nuevas patologías, que a simple vista no son perceptibles.

Landa, (2019b), habla de una reparación de estructuras de madera, para la recuperación de elementos traccionados, donde el caso de estudio fue la cubierta principal de la Iglesia de Santa María de Salvatierra en Álava. La intervención planteo eliminar exceso de carga, sustituyendo mediante injertos, el tirante de una de las cerchas utilizando la unión llamada diente de perro.

Gómez *et. al.*, (2014), toman como caso de estudio la Estancia Jesuítica de Santa Catalina del siglo XVII, que presenta una serie de deterioros en elementos de madera que cuentan con una antigüedad de más de 360 años, en uno de sus patios, la detección de estas patologías se llevó a cabo mediante un análisis visual en pares, tirantes y apoyos; además, se realizó un estudio sobre la tipología de estos edificios religiosos y sus sistemas constructivos; la caracterización anatómica, física y mecánica de la madera utilizada en vigas y columnas, utilizando la norma brasilera BR7190; un análisis de cargas, donde se hace uso de un software llamado Strap.

Feci *et. al.*, (2013), realizan una evaluación exhaustiva sobre el ataque de insectos xilófagos en diversas estructuras de madera en Italia, formulando un protocolo de inspección *in situ*. Identifican la presencia de *Bostrichus capucinus* (familia *Bostrichidae*), *Lyctus spp.* (Familia *Lyctidae*) y *Lymexylon navale* (familia *Lymexylonidae*), especies que se encuentran comúnmente en maderas latifoliadas. El estudio describe una técnica detallada para evaluar los ataques de estos

insectos, empleando métodos como la inspección visual y la detección acústica. Estas técnicas permiten una intervención temprana en las primeras etapas de infestación, facilitando la detección de rastros de polvo de perforaciones y agujeros de enjambres. El diagnóstico de la pudrición causada por insectos se realizó conforme a la norma italiana UNI 11119, que permite la evaluación visual y el uso de técnicas no destructivas.

Kloiber *et. al.*, (2012), reporta varias herramientas y técnicas utilizadas para medir la resistencia mecánica de la madera, entre las cuales se encuentran los métodos de resistencia, que miden esta propiedad contra la penetración de un instrumento en la madera, correlacionada con su densidad, una propiedad física básica del material. Se emplea el Pilodyn 6J Forest, una herramienta que mide la profundidad de la penetración de un pin en la madera, impulsado por un resorte calibrado con una energía constante de 6J, aunque sólo evalúa las partes superficiales de las muestras. Otra técnica es la microperforación de resistencia, ejemplificada por el Resistógrafo, que mide la resistencia del material contra la penetración de una broca pequeña, registrando el consumo de energía o la resistencia relativa, permitiendo un análisis detallado de la estructura interna de la madera. Adicionalmente, la prueba de retiro de tornillos utiliza una herramienta manual para retirar un tornillo estándar insertado a una profundidad de 18 mm, y sus resultados se combinan con otros métodos no destructivos para derivar propiedades mecánicas básicas. Los resultados obtenidos demuestran una buena correlación entre la fuerza media necesaria para la penetración del pin y la densidad de la madera, así como con la fuerza de compresión paralela al grano de la fibra. Además, se evaluaron diferentes especies de madera, como abeto, pino y abeto rojo, analizando sus propiedades físicas y mecánicas después de ser seccionados. El estudio valida el uso de una nueva herramienta para la evaluación *in situ* de la resistencia mecánica de la madera, demostrando su efectividad y correlación con la densidad y otras propiedades mecánicas importantes.

4. JUSTIFICACIÓN

El presente estudio, pretende evitar la pérdida gradual de la arquitectura histórica elaborada a base de madera, manteniendo la autenticidad histórica y la integridad del conjunto arquitectónico, conservando al máximo la estructura y su función, así como revelar su valor cultural mejorando la percepción histórica, de sus estadios anteriores y de su concepción original. Conservando al máximo los materiales existentes, e intervenir lo menos posible en el entramado estructural histórico.

5. HIPÓTESIS

Las uniones Rayo de Júpiter en combinación con un adhesivo resistente a un alto contenido de humedad, adicionado con pernos, cumplen con los estándares de resistencia mecánica necesarios para su aplicación sobre la propia edificación.

6. OBJETIVOS

GENERAL

Probar que algunas maderas patrimoniales retiradas durante intervenciones previas, pueden ser recuperadas para la restauración del mismo edificio histórico. Demostrando que la unión Rayo de Júpiter en combinación con un adhesivo y pernos cumplirán con los estándares de resistencia mecánica necesarios para su aplicación sobre la propia edificación.

PARTICULARES

1. Caracterizar material experimental (madera sana y de recuperación).
2. Evaluar diferentes adhesivos para determinar el contenido de sólidos, viscosidad, y resistencia adhesiva.
3. Evaluar a flexión las uniones Rayo de Júpiter con dos y cuatro pernos, cuña central.
4. Realizar estudios tomográficos sobre la unión adhesiva.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1. CARACTERIZACIÓN DE MADERA

Para fines de esta investigación, en adelante se utilizará el término *madera sana* (MS) a todo aquel material lignocelulósico empleado para las pruebas correspondientes adquirido en la maderería, que no presentaba mayor deterioro físico y *Madera de recuperación* (MR) para referirse al material proveniente de una estructura previamente en uso, que presenta signos visibles de deterioro. En el presente estudio, dicho material corresponde específicamente a las piezas obtenidas de la donación oficial de un particular, bajo el expediente *DIE/IRE/FAM-MS-4A/01/2023*, correspondiente a material sobrante del mantenimiento de la vigería del Colegio Primitivo y Nacional de San Nicolás de Hidalgo (C.C.T. 16UBH0019C), localizado en Morelia, Michoacán (véase anexo A).

7.1.1. MADERA SANA (MS)

Los tablones de madera que se utilizaron son de pino estufado de segunda calidad, con dimensiones 0.019 x 0.10 x 2.43 m para la elaboración de las probetas que se utilizaron para las pruebas de adhesión; mientras que tablas de 0.03 x 0.20 x 2.43 m para la elaboración de los empalmes. Las piezas de madera se cepillaron y cantearon, como parte del procedimiento de maquinado, después se cortaron en piezas de 0.12 x 0.03 x 0.38 m, para un manejo ágil y eficiente (fig. 4).



Fig. 4. Preparación de madera sana.

7.1.2. MADERA DE RECUPERACIÓN (MR)

Las vigas se cortaron en piezas con dimensiones de 0.12 x 0.03 x 0.38 m (fig. 5). Se clasificó visualmente (tipo A, tipo B, tipo C y tipo D, siendo esta última la que presenta mayor número de deterioros físicos). Por último, se obtuvieron cubos de 0.05 x 0.05 x 0.05 m para la determinación del contenido de humedad y densidad de esta madera proveniente de una plantación comercial.



Fig. 5. Material obtenido después del maquinado de las vigas de madera de recuperación.

7.2.1. PRUEBAS DE FLEXIÓN

La prueba de flexión utilizó un total de 35 probetas de madera de recuperación, cuyas dimensiones fueron de 0.025 x 0.025 x 0.41 m, de acuerdo a las especificaciones de la norma ASTM D-143, para la determinación de las propiedades mecánicas de la madera, a las cuales se les denominará probetas *tipo 1*. Posterior, se clasificaron visualmente, para obtener un mejor control sobre la relación entre el tipo de madera y su MOR (fig. 6).

Las probetas fueron colocadas sobre apoyos fijos con una separación de 0.35 m (con una pestaña de 0.025 m para evitar que la pieza salga de los apoyos), posteriormente se sometieron a un ensayo de flexión estática en una máquina universal marca Shimadzu, la cual aplicó una carga concentrada al centro de la pieza a una velocidad de 6 mm/min hasta provocar la ruptura del material (fig. 7).

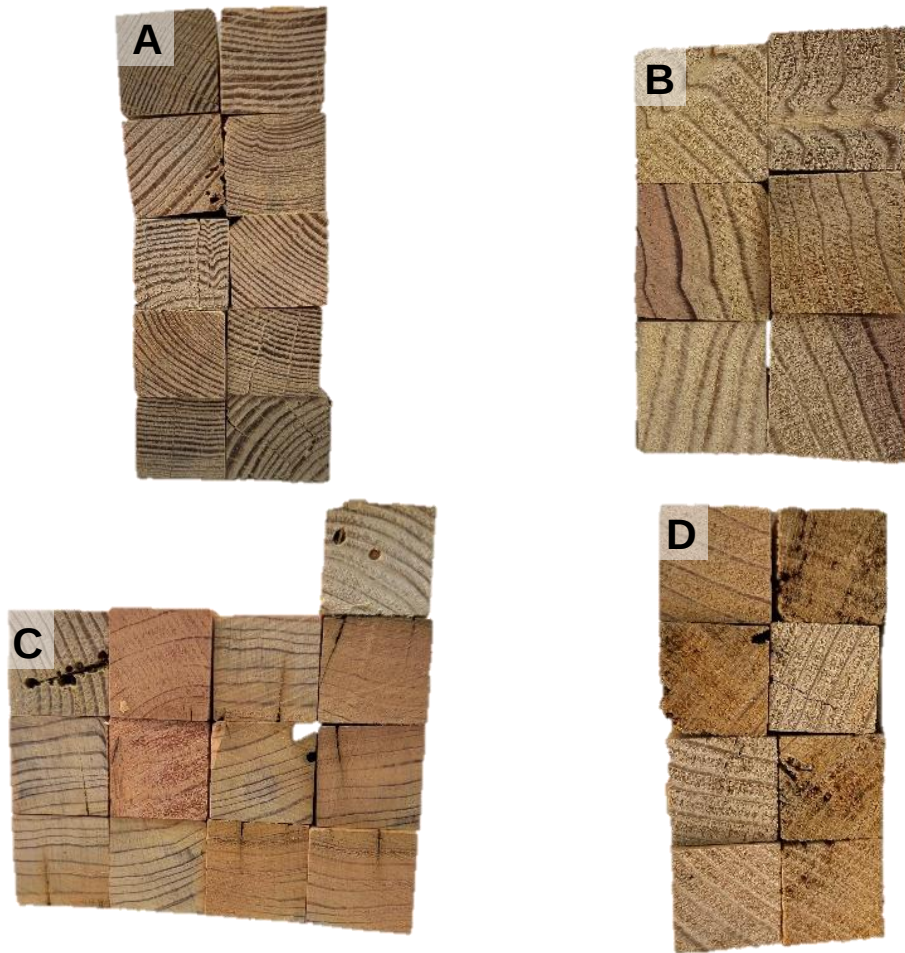


Fig. 6. Clasificación visual de las probetas tipo 1, de acuerdo a la densidad de anillos de crecimiento y la presencia de signos de degradación.

La prueba permitió obtener los valores del Módulo de Ruptura (MOR) y del Módulo de Elasticidad (MOE), características mecánicas de la madera para determinar la posibilidad de reutilizar el material para la fabricación de las uniones de madera.



Fig. 7. Prueba de flexión estática en madera de recuperación.

7.2. ADHESIVOS

Los adhesivos seleccionados para esta investigación fueron tres, de uso común y acceso comercial. El primero fue el acetato de polivinilo (PVA), empleado en la industria de la carpintería debido a su bajo costo, facilidad de aplicación y buena adherencia en condiciones normales. El segundo fue un adhesivo de colágeno animal, que requiere una preparación previa a su aplicación y cuya utilización se remonta a prácticas tradicionales de restauración de bienes inmuebles. Finalmente, se incluyó el diisocianato de metileno (MDI), un adhesivo con propiedades impermeables en condiciones de humedad elevada (tabla 3).

Tabla 3. Características de los adhesivos Acetato de polivinilo, Colágeno animal y Diisocianato de Metileno, correspondientes a las fichas técnicas del fabricante.

Adhesivo	Características
Acetato de Polivinilo 	Adherencia final mínima: 100 kg/cm² Resistente a lacas y barnices. Sujetar las superficies adheridas durante 30-40 min. Color: amarillo lechoso. Densidad: 1.009-1.090 g/cm³ Viscosidad: 8500-9500 cP Contenido de sólidos: 45 - 50% Rendimiento: 4 - 5 m²/L (Propiedades descritas en condiciones controladas de 23 - 25 °C y 50% de humedad relativa).
Colágeno animal 	Elaborar gelatina clase B, siguiendo la proporción colágeno en grano-agua 1:1, dejando reposar la mezcla durante 24 h en un ambiente frío. Para la formulación de la cola, se empleó una proporción colágeno - agua 2:3, la cual se lleva a una placa térmica, para recibir un proceso de transferencia de calor indirecto hasta que se solubilice por completo, este proceso se encuentra entre los 55 y 63 °C sin llegar a la ebullición, evitando la desnaturalización y pérdida de adhesión.

Diisocianato de Metileno 	Humedecer ligeramente la superficie donde se aplicará. Color: varios. Contenido de sólidos: 0% Contenido en disolventes: 100% Rendimiento: 15 ml / 0.1 m² Sujetar las superficies adheridas durante 1-2 h. Producción de espuma 3 - 4 veces su volumen. (Densidad y viscosidad no determinadas).
---	---

7.2.1. CONTENIDO DE SÓLIDOS

El contenido de sólidos se determinó siguiendo la metodología establecida en la norma ASTM D4426-01-2021. Para ello, se depositaron muestras de 5 g de cada adhesivo en crisoles previamente tarados a 270 °C ± 1 durante 10 min ± 3 (fig. 8-a), posteriormente se introdujeron al desecador durante 5 min; se prosiguió con la colocación de 1 g de resina por cada capsula, las cuales estuvieron dentro del horno a 125 °C ± 1 durante 105 min ± 3 hasta alcanzar peso constante. Por último, las muestras se enfriaron dentro de un desecador (fig. 8-b) y se registró el peso final (fig. 8-c). El porcentaje de sólidos se calculó mediante la relación entre el peso seco y peso inicial del adhesivo (cada ensayo se realizó por triplicado para garantizar precisión). La prueba sólo se realizó para el PVA y el colágeno animal, ya que el MDI contiene solventes volátiles.



Fig. 8. Determinación de contenido de sólidos; (a) tarado de crisoles; (b) desecado de muestras; (c) sólidos restantes.

7.2.2. VISCOSIDAD

La viscosidad se determinó utilizando un viscosímetro rotacional marca Brookfield modelo RVDV-II+Pro (fig. 8-a), ubicado en el laboratorio de físicoquímica a cargo de la Dra. Laura Ibarra, Jefa de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

Las muestras que se utilizaron fueron de 500 ml (fig. 9-b) a una temperatura controlada de 29 ± 0.5 °C (fig. 9-c), con ayuda de una placa térmica de calentamiento. Se utilizó el husillo número 62 en rotación continua para el adhesivo colágeno animal, mientras que el no. 64, para el PVA y MDI (fig. 9-d), registrando la resistencia que oponía cada adhesivo al giro.

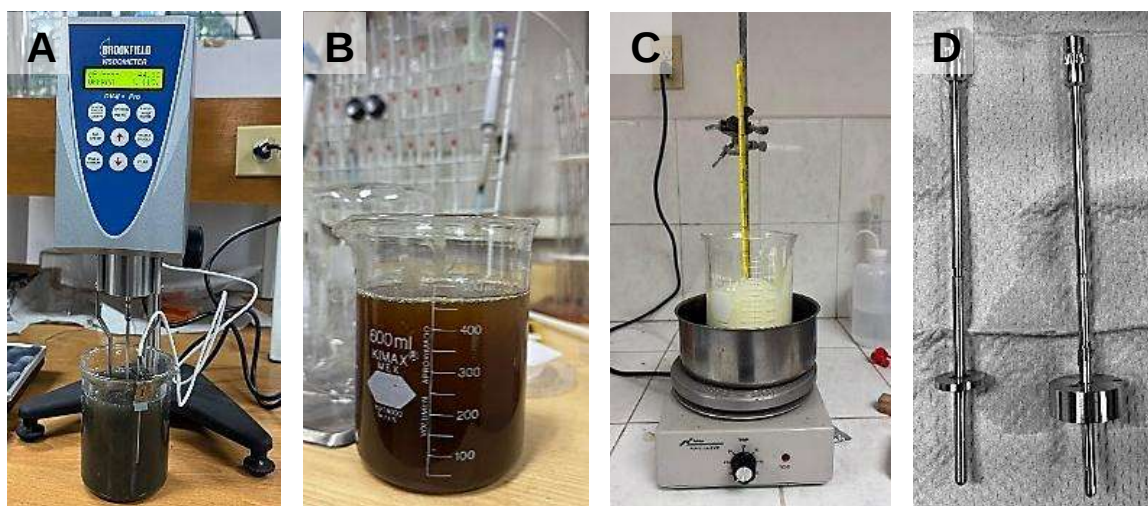


Fig. 9. Determinación de viscosidad; (a) viscosímetro; (b) husillos o agujas rotacionales, (c) procedimiento para controlar la temperatura del fluido; (d) muestra de colágeno animal.

7.3. PRUEBA DE ADHESIÓN

La resistencia adhesiva se calculó a partir de una probeta de madera, constituida por tres tablillas de madera con dimensiones de 0.02 x 0.04 x 0.08 m, con el fin de elaborar probetas para los ensayos en condiciones secas y húmedas (fig. 10). Para la aplicación de los adhesivos analizados, se diseñó una probeta de madera sana, conformada por tres tablillas unidas mediante los distintos adhesivos seleccionados (PVA, colágeno animal y MDI). Además, estas tablillas fueron clasificadas en tres categorías, de acuerdo a la homogeneidad y orientación de los anillos de crecimiento. La tablilla central correspondió a madera de primera calidad, la cual presentaba un acomodo con mayor verticalidad de anillos, esta fue la encargada de recibir la carga durante el ensayo.

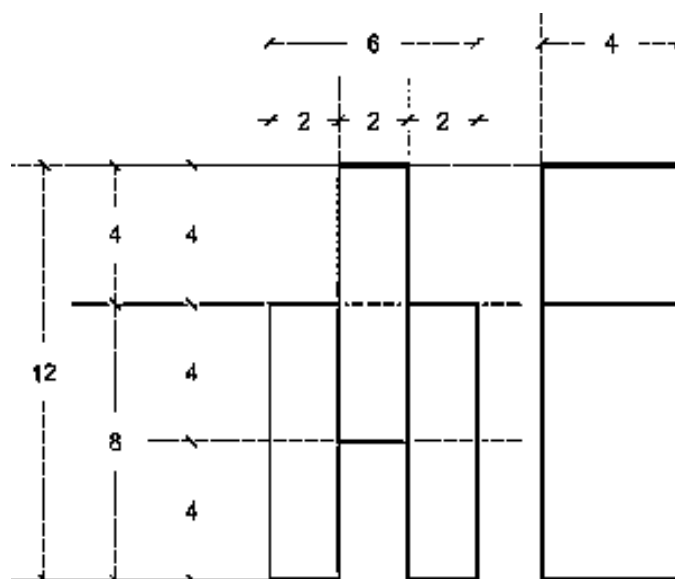


Fig. 10. Diseño de probeta para prueba de adhesión.

7.3.1. MADERA SANA SECA

El material utilizado para esta prueba fueron tres lotes de probetas (uno por cada adhesivo) para los ensayos mecánicos en condiciones secas, con un contenido de humedad en equilibrio del 12% (tabla 4).

Tabla 4. Promedios de las probetas utilizadas en la prueba de adhesión, madera sana.

Acetato de polivinilo	
Densidad (g/cm ³)	Número de anillos
0.52	6.57
Colágeno animal	
Densidad (g/cm ³)	Número de anillos
0.50	5.53
Diisocianato de metileno	
Densidad (g/cm ³)	Número de anillos
0.53	6.52

La dosificación del adhesivo fue por medio de una jeringa, utilizando 1 ml por cada superficie de contacto (4 superficies en total por cada probeta), el pegamento se esparció con una brocha de cerdas duras para homogeneizar el adhesivo sobre la superficie (fig. 11-a). Finalmente, se prensaron durante 24 h (fig. 11-b). Pasado el tiempo, fueron evaluados en la máquina universal, marca Shimadzu con una capacidad máxima de 10 ton aplicando una carga central a una velocidad de 6 mm/min.

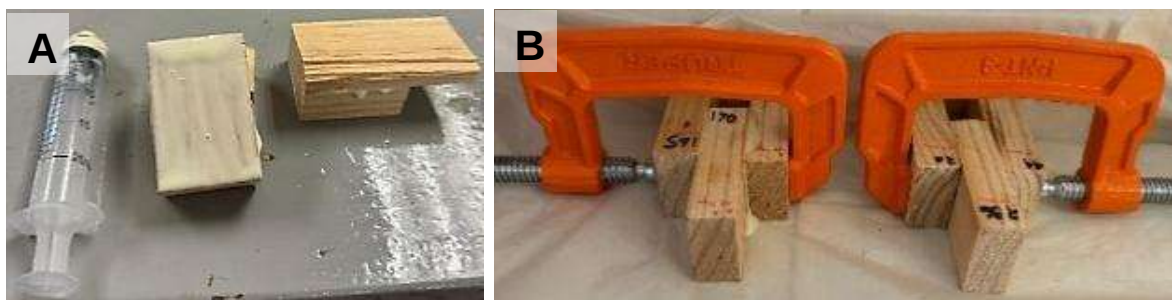


Fig. 11. Aplicación de adhesivo en probetas; (a) superficie de contacto y colocación de adhesivo; (b) prensado de probetas.

7.3.2. MADERA SANA HÚMEDA

Las probetas se separaron en tres lotes (uno por cada adhesivo) con las características correspondientes (tabla 5).

Tabla 5. Promedios de las probetas utilizadas en la prueba de adhesión, madera sana húmeda.

Acetato de polivinilo	
Densidad (g/cm ³)	Número de anillos
0.50	5.73
Colágeno animal	
Densidad (g/cm ³)	Número de anillos
0.51	6.40
Diisocianato de metileno	
Densidad (g/cm ³)	Número de anillos
0.51	5.73

El contenido de humedad de las probetas se llevó a su punto de saturación sumergiéndolas en agua durante 24 h dentro de un recipiente diseñado específicamente para mantener las piezas completamente bajo el agua, con el objetivo de garantizar una saturación uniforme en cuanto al contenido de humedad en la madera (fig. 12-a, b).

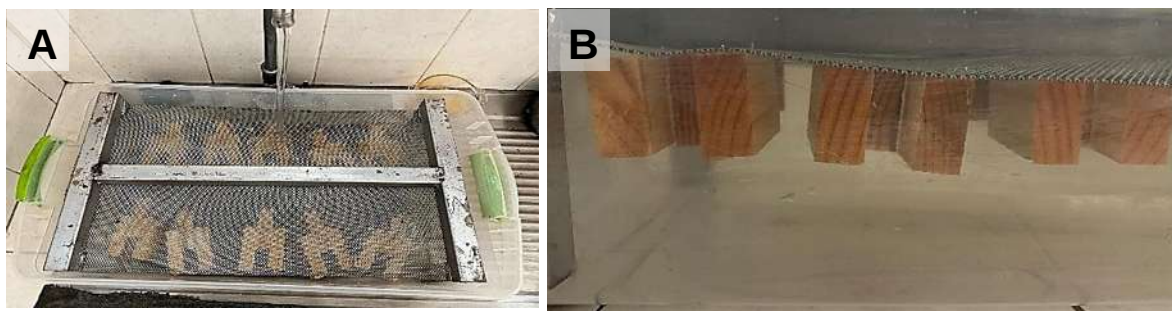


Fig. 12. Metodología de inmersión para prueba de adhesión; (a) llenado de agua dentro del balde de prueba; (b) rejilla metálica que permitió la inmovilización de las probetas.

7.3.3. MADERA DE RECUPERACIÓN SECA

La prueba de adhesión con madera de recuperación inició con la elaboración de nueve probetas (tres por cada adhesivo), con el fin de conocer la capacidad de adhesión sobre un sustrato que mostraba signos de degradación e imperfecciones, el objetivo fue analizar el uso de madera que ha tenido un uso previo y conocer la interacción con el adhesivo (tabla 6).

Tabla 6. Promedios de las probetas utilizadas en la prueba de adhesión, madera de recuperación.

Acetato de polivinilo	
Densidad (g/cm ³)	Número de anillos
0.55	6
Colágeno animal	
Densidad (g/cm ³)	Número de anillos
0.53	9
Diisocianato de metileno	
Densidad (g/cm ³)	Número de anillos
0.54	6

7.4. ELABORACIÓN DE UNIONES

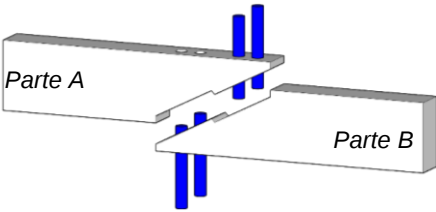
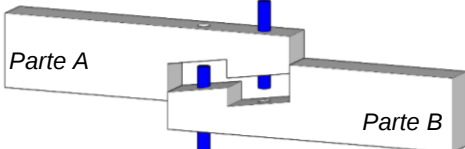
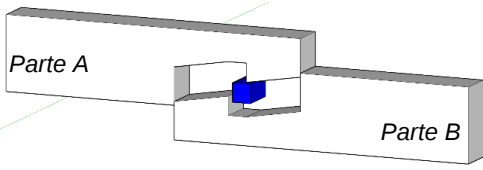
La elaboración de las uniones se realizó con madera de recuperación, como primer paso se eliminaron los fragmentos de los extremos de las vigas donadas, ya que presentaban mayor número de deterioros. Las piezas obtenidas se clasificaron, de acuerdo a los daños visibles, con el fin de homogeneizar la combinación de las partes A y B, correspondientes a cada tipo de unión (fig. 13).



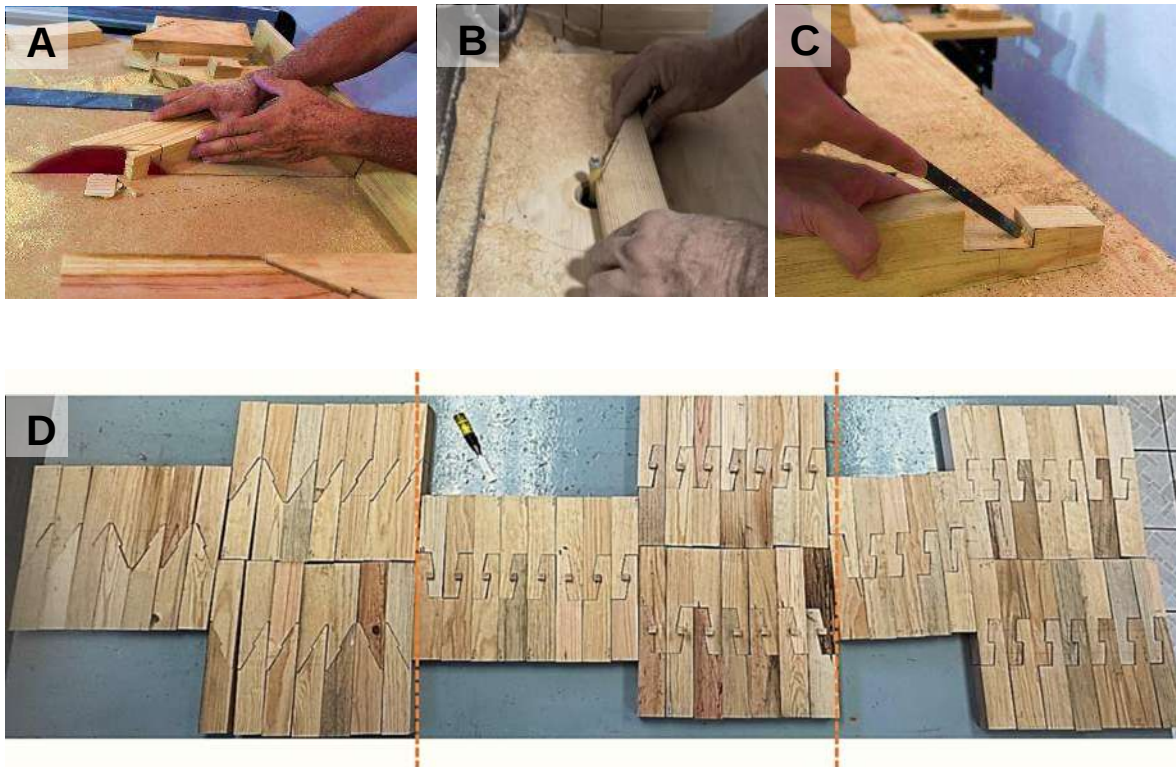
Fig. 13. Material para la elaboración de uniones; (a) Clasificación de madera sana y de recuperación.

El diseño de las uniones estuvo acompañado de un dispositivo experimental, que permitió identificar las condiciones iniciales de la madera sana y de recuperación utilizada, registrando la densidad y el contenido de humedad de cada pieza (Tabla 7).

Tabla 7. Diseño para elaboración de uniones de madera; (MS) madera sana; (MR) madera de recuperación.

Unión	Madera		Densidad g/cm ³	C.H. %
	Parte A	Parte B		
a. Cuatro pernos 	MS-MS		0.74	11.23
	MS-MR		0.73	11.19
	MR-MR		0.76	10.16
b. Dos pernos 	MS-MS		0.72	11.51
	MS-MR		0.78	11.91
	MR-MR		0.72	12.01
c. Cuña central 	MS-MS		0.72	11.11
	MS-MR		0.71	11.46
	MR-MR		0.73	11.50

La unión Rayo de Júpiter se elaboró con dimensiones de 0.02 x 0.06 x 0.40 m, con el objetivo de evaluar la influencia de los nueve tratamientos, y el número de pernos (4, 2, 1). Se utilizó maquinaria y herramienta manual para realizar cortes precisos (fig. 14-a, b, c); además, se utilizó el adhesivo MDI. Las dimensiones se obtuvieron gracias al pre dimensionamiento con base a un claro de 0.40 m, ya que el accesorio utilizado para la prueba de flexión tiene una abertura máxima de 0.50 m (fig. 14-d).



Cuatro pernos

Cuña central

Dos pernos

Fig. 14. Elaboración de uniones de madera; (a) cortes en la sierra de mesa; (b) cortes de con router; (c) uso de formol; (d) Uniones elaboradas.

Los pernos de madera se colocaron en cada variante de las uniones para disminuir el desplazamiento horizontal de las piezas (fig. 15), siguiendo la técnica japonesa descrita por Sato y Nakahara (1995).

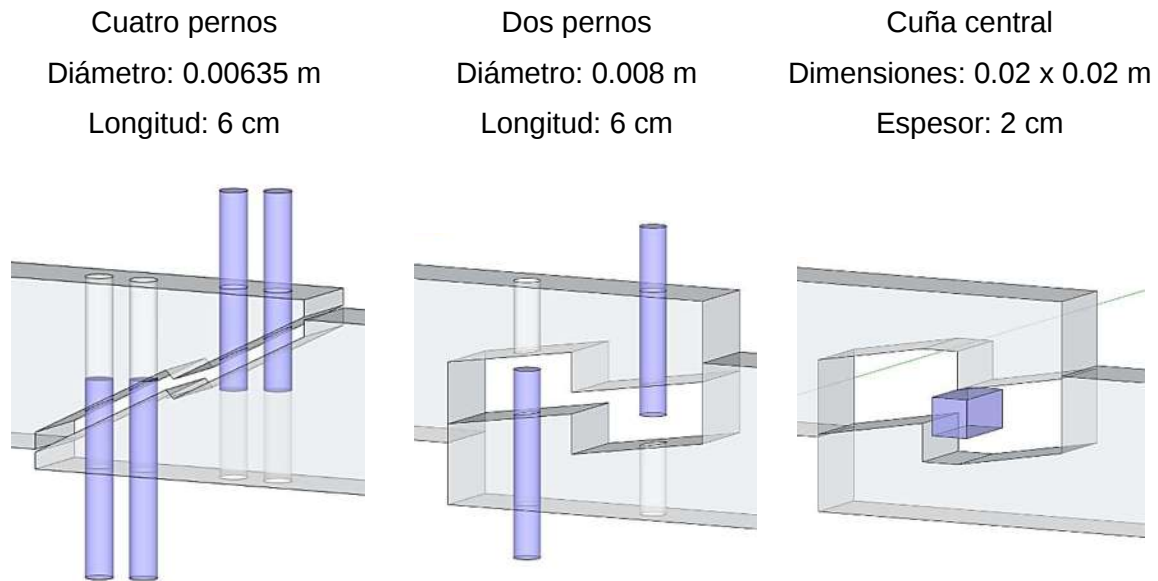


Fig. 15. Detalle de pernos y cuña.

Se utilizó un taladro para realizar las perforaciones en las piezas de las uniones; utilizando dos brocas de diámetros distintos, una broca de 0.00635 m para las uniones de cuatro pernos y una de 0.008 m para las uniones de dos pernos (fig. 16).



Fig. 16. Detalle de brocas para elaboración de perforaciones.

Los pernos fueron elaborados a partir de bastones de madera sólida sana, provenientes de la maderería. La elección individual de estos elementos permitió garantizar una homogeneidad en sus dimensiones y densidad, esto para reducir las variantes de error durante los ensayos mecánicos (fig. 17).



Fig. 17. Detalle de los orificios y bastones de madera.

7.5. PRUEBA DE FLEXIÓN EN UNIONES

La prueba se realizó con ayuda de la maquina universal marca *Shimadzu*, aplicando una carga central a una velocidad de 6 mm/min (fig. 18).

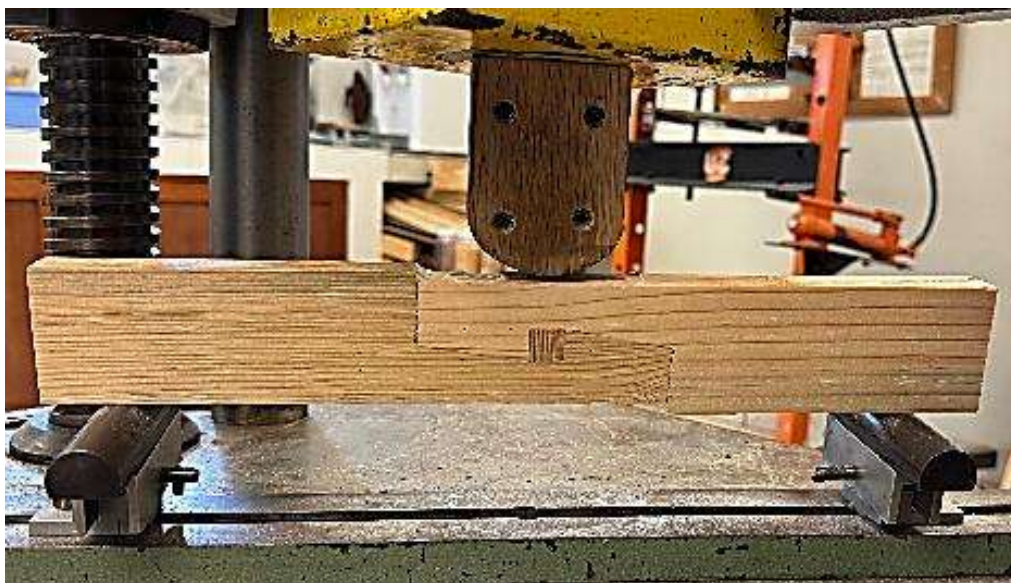


Fig. 18. Prueba de flexión, explicación gráfica, probeta de unión cuña central antes de aplicar una carga.

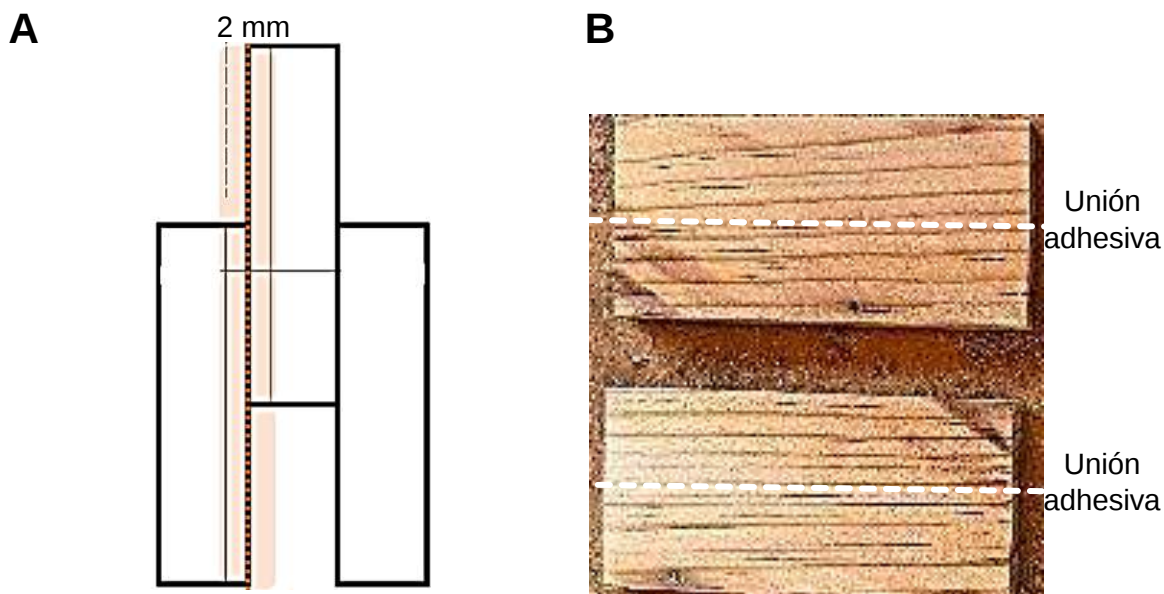
7.6. TOMOGRAFÍA DE LA UNIÓN ADHESIVA

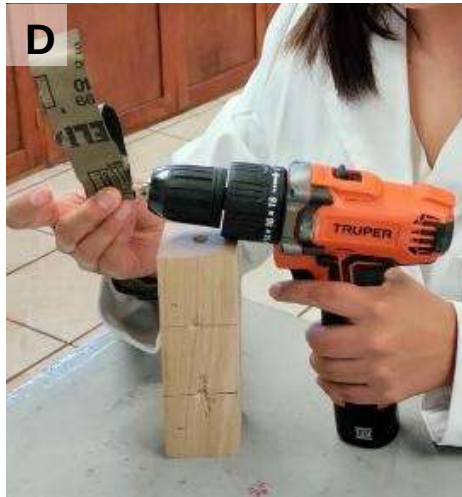
La Microtomografía computarizada de rayos X (μ -CT), se realizó en probetas cilíndricas de 2 mm de diámetro y 1 cm de longitud, con el objetivo de permitir una adecuada penetración y resolución del haz de rayos X.

Las muestras fueron obtenidas de las probetas que se utilizaron para la prueba de adhesión, se realizó un corte horizontal, que permitiera observar la dispersión del adhesivo (fig. 19-a). Una vez obtenidas las tablillas (fig. 18-b), estas se cortaron en dimensiones de 2 x 2 mm (fig. 19-c); por último, se utilizó un taladro para perfeccionar la forma cilíndrica de las muestras (fig. 18-d) y que estas presentaran una superficie lisa y homogénea (fig. 19-e).

Las imágenes se adquirieron mediante un escáner de μ -CT marca Zeiss, modelo Xradia 510 Versa, operado a 60 kV y 80 μ A, con un tiempo de exposición de 2 s por proyección y una resolución de voxel isotrópico cercano a 1 μ m.

Cada muestra fue girada 360° sobre su eje longitudinal para adquirir 1600 proyecciones, lo cual permitió la reconstrucción volumétrica tridimensional de la estructura anatómica de la madera, diferenciando elementos celulares como traqueídas y lúmenes.





Unión
adhesiva

Fig. 19. Elaboración de probeta para μ -CT; (a) corte transversal en la probeta; (b) tablillas transversales obtenidas después del corte; (c) muestras en formato cubico; (d) se utilizó un roto martillo para afinar las caras de las muestras, y estas quedaran cilíndricas; (e) muestra final para tomógrafo.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1. CARACTERIZACIÓN DE MADERA

Los resultados de la caracterización de madera sana y madera de recuperación, se muestran en la tabla 8. De acuerdo a la mayoría de los autores consultados durante esta investigación, la madera puede presentar variaciones en sus propiedades físicas y mecánicas, aun tratándose de un sólo elemento, pues es un material anisotrópico e higroscópico (Wiedenhoeft y Eberhardt, 2021).

León (2010), nos dice que a mayor densidad mayor es su resistencia mecánica y energética, debido al contenido de celulosa; además, se tiene una relación lineal entre el MOR y la densidad. La densidad dependerá principalmente de tres factores, aun tratándose de madera de recuperación, tamaño de las células, espesor de sus paredes y la interacción entre el número de células de distintos tipos (Wiedenhoeft y Eberhardt, 2021).

Tabla 8. Características de la madera utilizada para pruebas físico mecánicas.

Material	C.H.	Densidad
Madera sana (tablones) para pruebas de adhesión.	11.41%	0.48 g/cm ³
Madera sana (tablas) para elaboración de uniones.	11.77%	0.64 g/cm ³
Madera de recuperación para prueba de flexión (ASTM D-143).	9.75%	0.62 g/cm ³
Madera de recuperación para elaboración de uniones.	13.75%	0.55 g/cm ³

Carrillo y Raya (2020), reportan el análisis de 31 vigas de madera colocados en tres pasillos colindantes a un patio de servicio, las cuales presentaron un estado de servicio que oscilaba entre los 50 años, estas vigas arrojaron un contenido máximo de humedad promedio que variaba de entre los 10% a los 13.9%, demostrando que el módulo de Young es independiente de las zonas con un contenido de humedad elevado. Por lo que existe la posibilidad de poder reutilizar madera envejecida para la restauración en secciones donde se necesite.

8.1.1. PRUEBA DE FLEXIÓN

Los ensayos mecánicos de compresión paralela a la fibra sobre las probetas *tipo 1*, muestran la presencia repetida de fallas asociadas a esfuerzos de flexión (fig. 20), debido a la variabilidad en su anatomía como se ha mencionado anteriormente. Entre los daños más frecuentes se identificó daño por desviación de fibra, corte horizontal, astillamiento, tensión Brash y tensión simple.



Desviación de la fibra



Corte horizontal



Astillamiento



Tensión Brash



Tensión simple

Fig. 20. Fallas presentes durante la prueba de flexión.

El patrón de fractura presente con mayor repetición en las 35 probetas ensayadas fue daño por desviación de fibra, esto quiere decir que la capacidad de carga de la madera de recuperación no llegó a su máximo, el fallo se originó debido a la anatomía de la madera, las fibras no son exactamente paralelas al eje longitudinal lo que provocó su separación.

El daño de menor recreación fue el daño por tensión Brash, este daño es provocado por degradación celular, esto quiere decir, que la madera de recuperación aún mantiene cierto grado de elasticidad. Por lo tanto el principal inconveniente de utilizar madera de recuperación para realizar restauraciones en estructuras de madera, no es la degradación de la madera, sino la orientación de las fibras y su estructura a nivel anatómico (fig. 21).

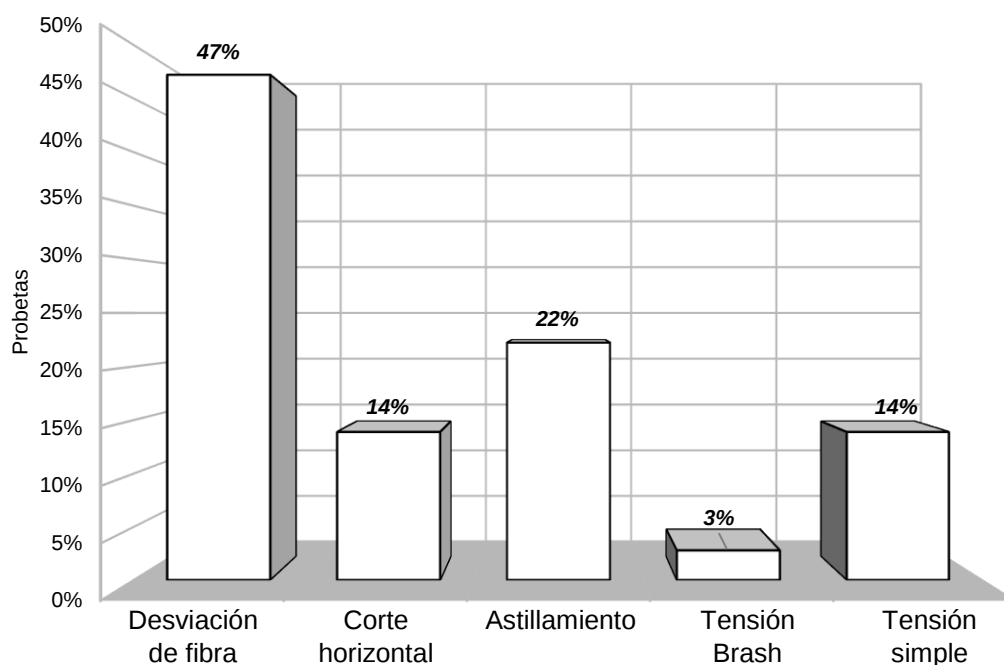


Fig. 21. Variabilidad en las fallas por flexión presentes en la prueba.

Las probetas presentaron una densidad promedio de 0.62 g / cm^3 y 11.11 anillos. Además, se obtuvieron los valores correspondientes al MOR con un promedio de 70.05 MPa y un MOE de 9.80 GPa (fig. 21). Estos valores permitieron conocer la

resistencia última del material y su capacidad de deformación elástica antes de alcanzar una fractura.

Las propiedades de la madera de recuperación se acercan a las del Pino Amarillo de Sur, cuya caracterización menciona alta densidad, y desempeño estructural (MOR: 77 MPa, MOE: 9.8 GPa, densidad: 0.44 g / cm³) (Senalik y Farber, 2021). Echenique (1994), realiza una clasificación, de acuerdo a una serie de valores recopilados de distintas pruebas mecánicas reportadas por distintos autores. En base a los resultados obtenidos, los valores se encuentran en el parámetro bajo (tabla 9).

Tabla 9. Clasificación para MOR y MOE con base a Echenique, 1994.

	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
MOR (MPa)	<39.23	39.33-88.26	88.36-132.39	132.49-176.52	>176.52
MOE (GPa)	<6.86	6.96-9.81	9.90-14.71	14.81-19.61	>19.61

Carrillo y Carreón (2020), reporta que los valores conocidos como Modulo de Young, son independientes de las zonas con mayor contenido de humedad. Sin embargo, la sustitución de la madera es necesaria al presentar un alto nivel de degradación y exponer visiblemente la sección transversal de la madera. Es importante considerar que el material evaluado corresponde a madera de recuperación, es decir, madera que previamente ha sido parte de una estructura. Aunque presentó ligeros deterioros visibles, los resultados obtenidos muestran que mantiene una resistencia mecánica significativamente alta en comparación con clasificaciones normadas en madera sana. Estos resultados sugieren, que pese a su desgaste superficial, la composición interna del material aún es suficiente para su reutilización.

8.2. ADHESIVOS

8.2.1. CONTENIDO DE SÓLIDOS

La prueba realizada mostró diferencias notables en los adhesivos, el PVA presentó un total de contenido de sólidos promedio del 68.01%, conteniendo un 18.01% más de sólidos, que lo reportado por la marca Resistol, este incremento puede atribuirse a una mayor concentración de polímeros activos o variaciones en el proceso de almacenamiento, lo que influye en su capacidad de adhesión.

El colágeno animal mostró un promedio de 38.25% en contenido de sólidos, que de acuerdo a la literatura se traduce en mayor fluidez, pero también en menor estabilidad estructural tras el secado.

8.2.2. VISCOSIDAD

La viscosidad de los tres adhesivos se evaluó mostrando un resultado promedio de 1895 cP para el PVA; 107.08 cP para el colágeno animal y el diisocianato de metileno (MDI) 3816.29 cP. El colágeno animal al presentar el valor mínimo, favoreciendo la penetración en la microestructura de la madera; por otra parte, el MDI quien presentará la mayor viscosidad, tiene la desventaja de presentar una limitación en su absorción y penetración, además de que la película de adhesión es de mayor espesor.

La curva sobre el comportamiento reológico de los fluidos no newtonianos (fig. 22) de acuerdo a White (2008), el PVA y el colágeno animal se consideran fluidos de naturaleza *Plástico Bingham* con un efecto transitorio *reopéctico*, debido al aumento gradual en el esfuerzo cortante, para mantener constante la velocidad en su deformación, quiere decir que la viscosidad aumentó con el paso del tiempo; presentando mayor cohesión interna, favoreciendo a una mejor adherencia superficial en condiciones controladas. Mientras que el PVI tiene comportamiento.

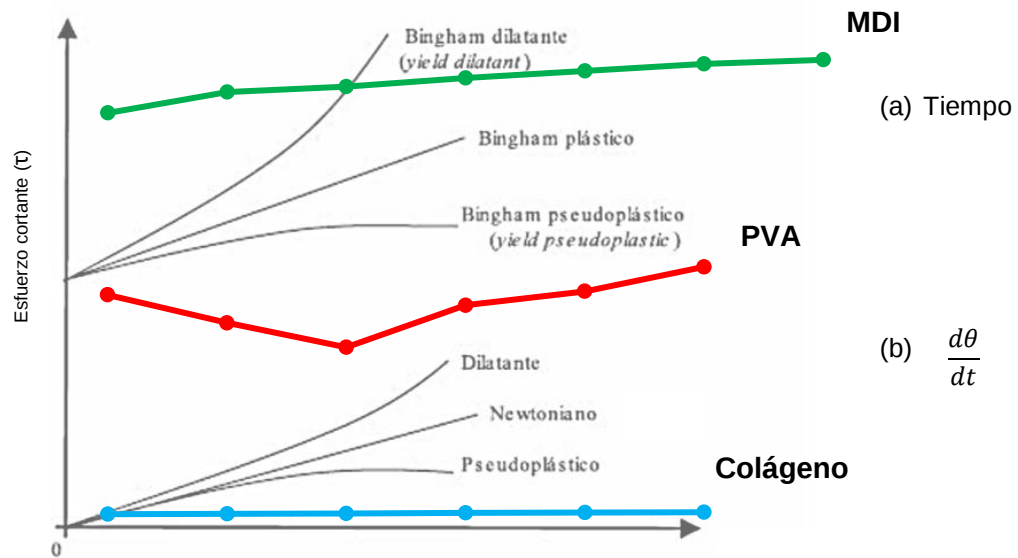


Fig. 22. Comportamiento reológico de diversos materiales viscosos; (a) efecto del tiempo sobre el esfuerzo aplicado; (b) velocidad de deformación; ($d\theta$) Diferencia de ángulo; (dt) Diferencia de tiempo.

El MDI se considera un fluido no newtoniano de comportamiento *Bingham dilatante*, esto quiere decir que disminuye su resistencia al aumentar el esfuerzo, lo que indica un alta estabilidad y menor fluidez inicial, favoreciendo la formación de enlaces químicos. Es importante conocer la viscosidad de un adhesivo, ya que permite determinar la calidad de la unión adhesiva, el tipo de impregnación, anclaje y cohesión dentro de la estructura anatómica de la madera.

8.3. PRUEBA DE ADHESIÓN

8.3.1. MADERA SANA SECA

Los resultados obtenidos después de la prueba, arrojaron que el pegamento con mayor resistencia en condiciones secas, es el PVA, seguido del colágeno animal, y por último el MDI. Las resistencias promedios a la carga se encontraron entre los 2639 y 1539 kg/cm² (fig. 23).

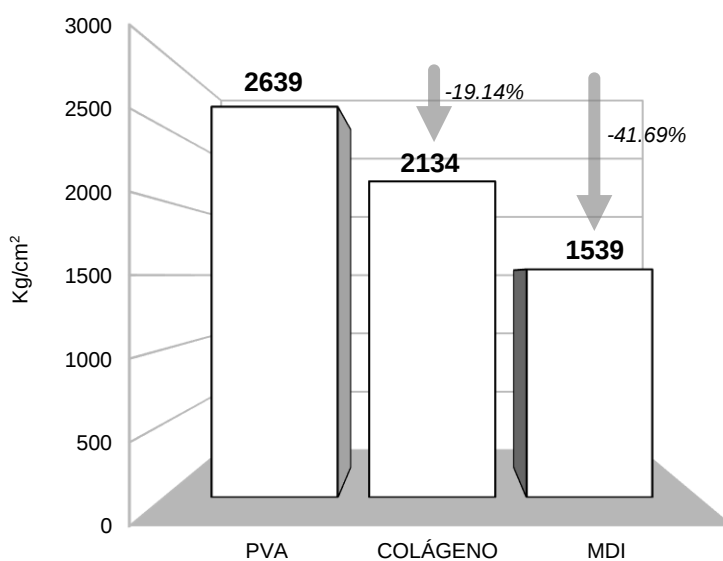


Fig. 23. Diferencia adhesiva de los pegamentos evaluados; (PVA) Acetato de Polivinilo; (MDI) Diisocianato de metileno.

8.3.2. MADERA SANA HÚMEDA

Las características de las probetas utilizadas para las pruebas en condiciones húmedas demostraron que el colágeno animal perdió completamente su capacidad adhesiva (fig. 24).

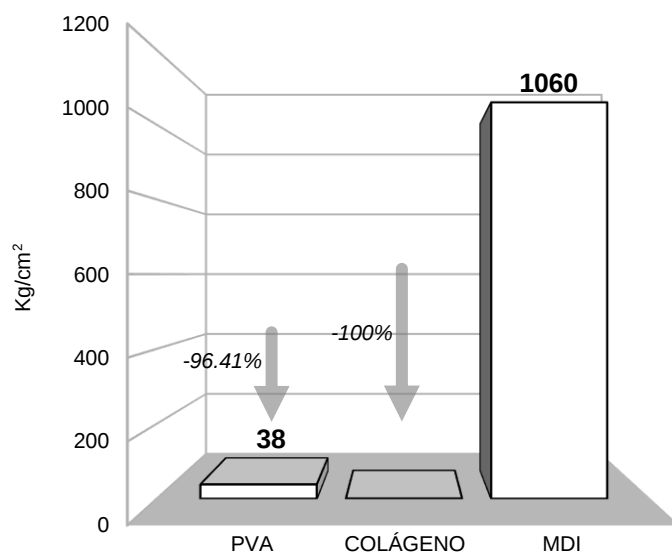


Fig. 24. Resistencia adhesiva de cada pegamento en condiciones húmedas; (PVA) Acetato de Polivinilo; (MDI) Diisocianato de metileno.

El adhesivo que mejores resultados arrojó durante la prueba fue el diisocianato de metileno (MDI), mientras que el colágeno animal perdió completamente su capacidad adhesiva, al mostrar signos de re humectación.

8.3.3. MADERA DE RECUPERACIÓN SECA

Las características de las probetas utilizadas para las pruebas en condiciones secas utilizando madera de recuperación mostraron que el PVA presento mayor capacidad adhesiva (fig. 25).

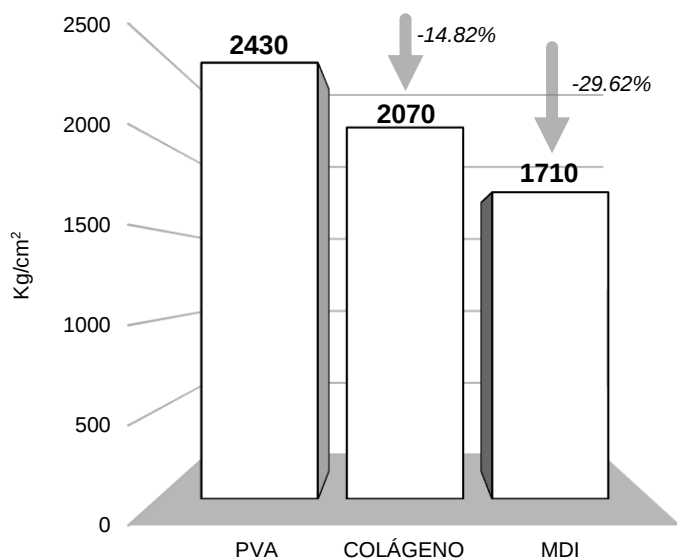


Fig. 25. Prueba de adhesión utilizando madera de recuperación, en condiciones secas; (PVA) Acetato de Polivinilo; (MDI) Diisocianato de metileno.

8.4. PRUEBA DE FLEXIÓN EN UNIONES

La prueba de flexión se realizó permitió encontrar los valores del MOR y MOE (tabla 10) en las uniones con la madera sana y madera de recuperación en sus respectivas combinaciones.

Tabla 10. Caracterización mecánica de las uniones. (MS) Madera Sana; (MR) Madera de Recuperación.

Cuatro pernos		
MS-MS	MS-MR	MR-MR
MOR: 33.50 MPa MOE: 7.58 GPa	MOR: 30.26 MPa MOE: 8.74 GPa	MOR: 37.43 MPa MOE: 10.09 GPa
Dos pernos		
MS-MS	MS-MR	MR-MR
MOR: 34.48 MPa MOE: 7.92 GPa	MOR: 31.37 MPa MOE: 7.24 GPa	MOR: 30.90 MPa MOE: 4.44 GPa
Cuña central		
MS-MS	MS-MR	MR-MR
MOR: 30.53 MPa MOE: 5.38 GPa	MOR: 25.51 MPa MOE: 6.18 GPa	MOR: 26.62 MPa MOE: 3.20 GPa

8.4.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El diagrama de bloques (fig. 26), presenta el análisis estadístico de los valores para el MOR y MOE. En el cual se puede observar que con un nivel de confianza del 95%, el tratamiento con cuatro pernos fue la mejor unión, presentando la mayor calificación de acuerdo al *Test de Duncan*. Ya que al tener un mayor número de pernos evita que la unión de madera experimente un desplazamiento horizontal, lo que resulta en una mayor rigidez (Zhang, 2024).

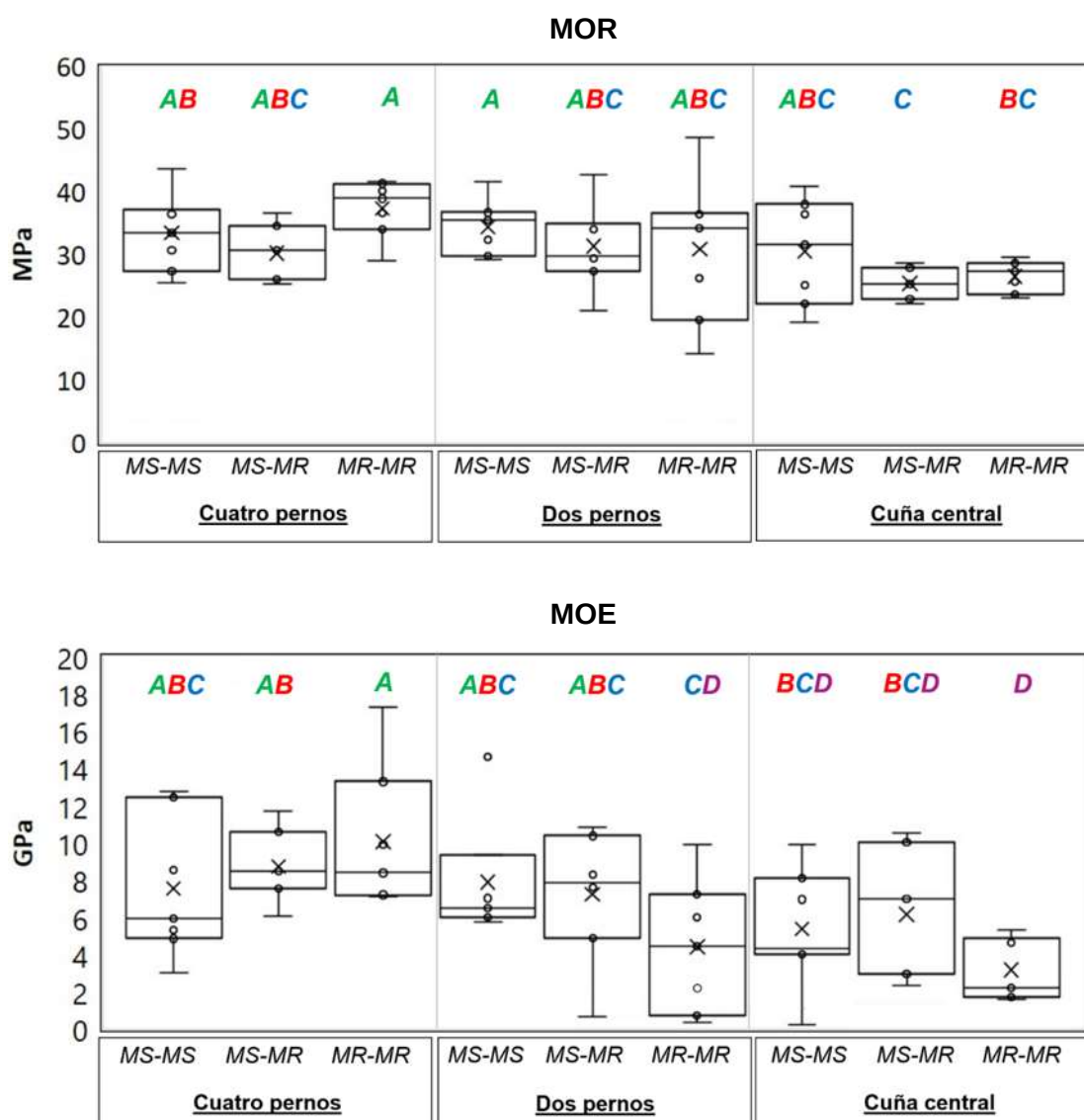


Fig. 26. a. MOR; b. MOE. MS: Madera Sana; MR: Madera de Recuperación. Los valores con letras similares no son significativamente diferentes según el Test de rango múltiple de Duncan ($\alpha = 0.05$).

Las uniones permiten observar que los tratamientos con madera completamente sana y con madera de recuperación no mostraron diferencias estadísticamente significativas. Esto podría indicar que la madera recuperada puede usarse en la construcción. En el tratamiento con dos pernos y las dos partes de madera recuperada, se presentó un rango de valores más amplio, en comparación con la unión de madera sana en ambas piezas. Esto podría deberse a una mayor heterogeneidad en la madera de recuperación debido a su deterioro. Finalmente, el tratamiento de cuña central fue la unión menos recomendada, ya que presentó la menor calificación en el *Test de Duncan*.

8.5. TOMOGRAFÍA DE LA UNIÓN ADHESIVA

La figura 27-a, b, muestra que la madera de la izquierda (I) presenta lúmenes con diámetros menores en comparación con la madera de la derecha (D). Asimismo, la muestra I presenta rayos en filas de traqueídas paralelas a la línea de adhesión. Mientras que las traqueídas de la muestra D presentan una inclinación de aproximadamente 30°.

El canal resinífero debido a su naturaleza anatómica, no permitió que el adhesivo pasara a su interior (fig.28-a, b), permitiendo únicamente la impregnación de su pared celular. Se puede observar que la diferencia en la alineación de las fibras y el diámetro del lumen influyó significativamente en la distribución del adhesivo.

La madera con traqueídas alineadas paralelo a la línea de adhesión, presenta una mayor penetración uniforme, mientras que en la madera con lúmenes angulados, el flujo se desvía, generando patrones menos homogéneos y áreas de acumulación.

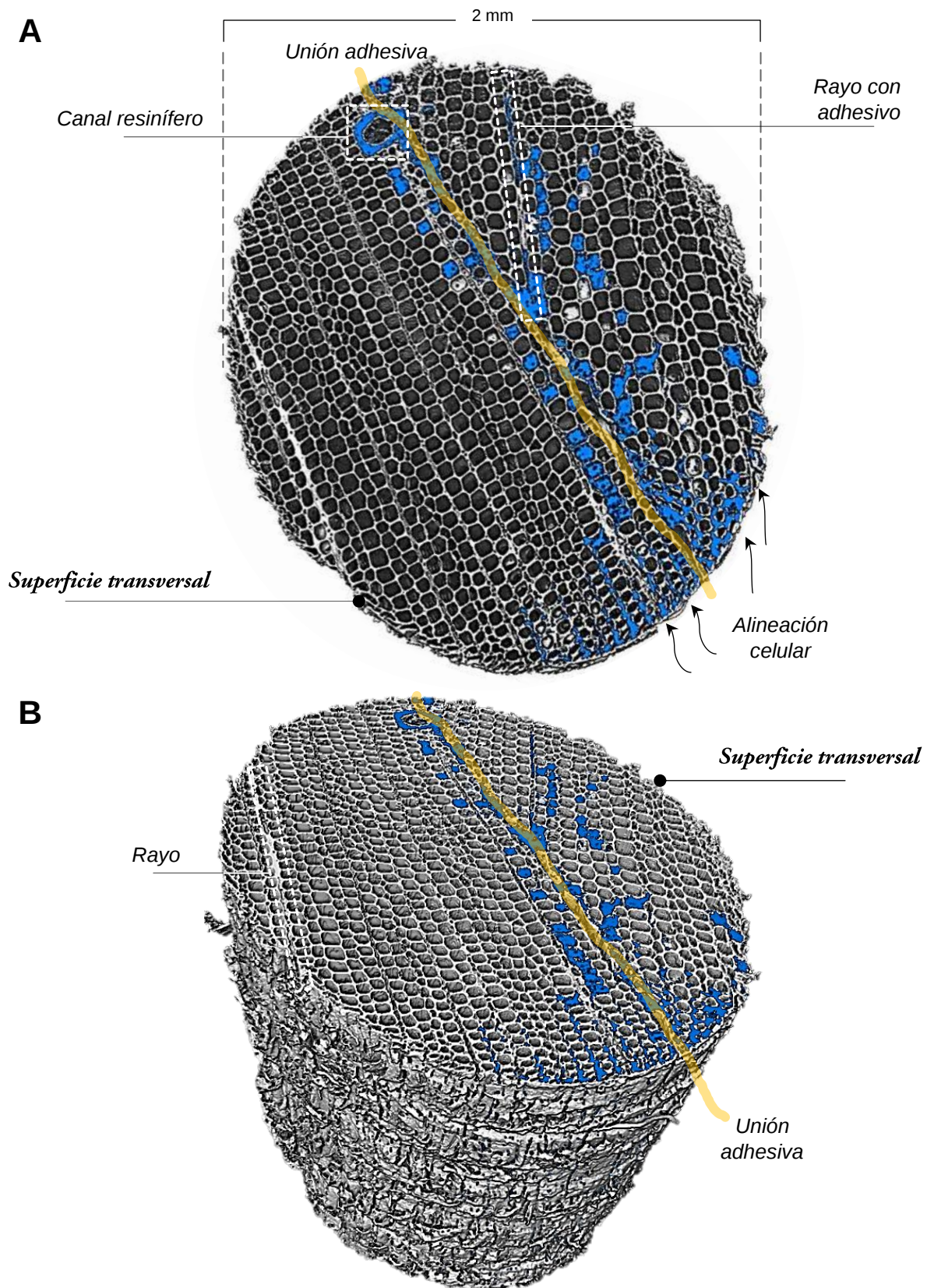


Fig. 27. Reconstrucción tridimensional de la unión adhesiva; (a) Superficie transversal); (b) Volumen de la muestra de madera, superficie transversal.

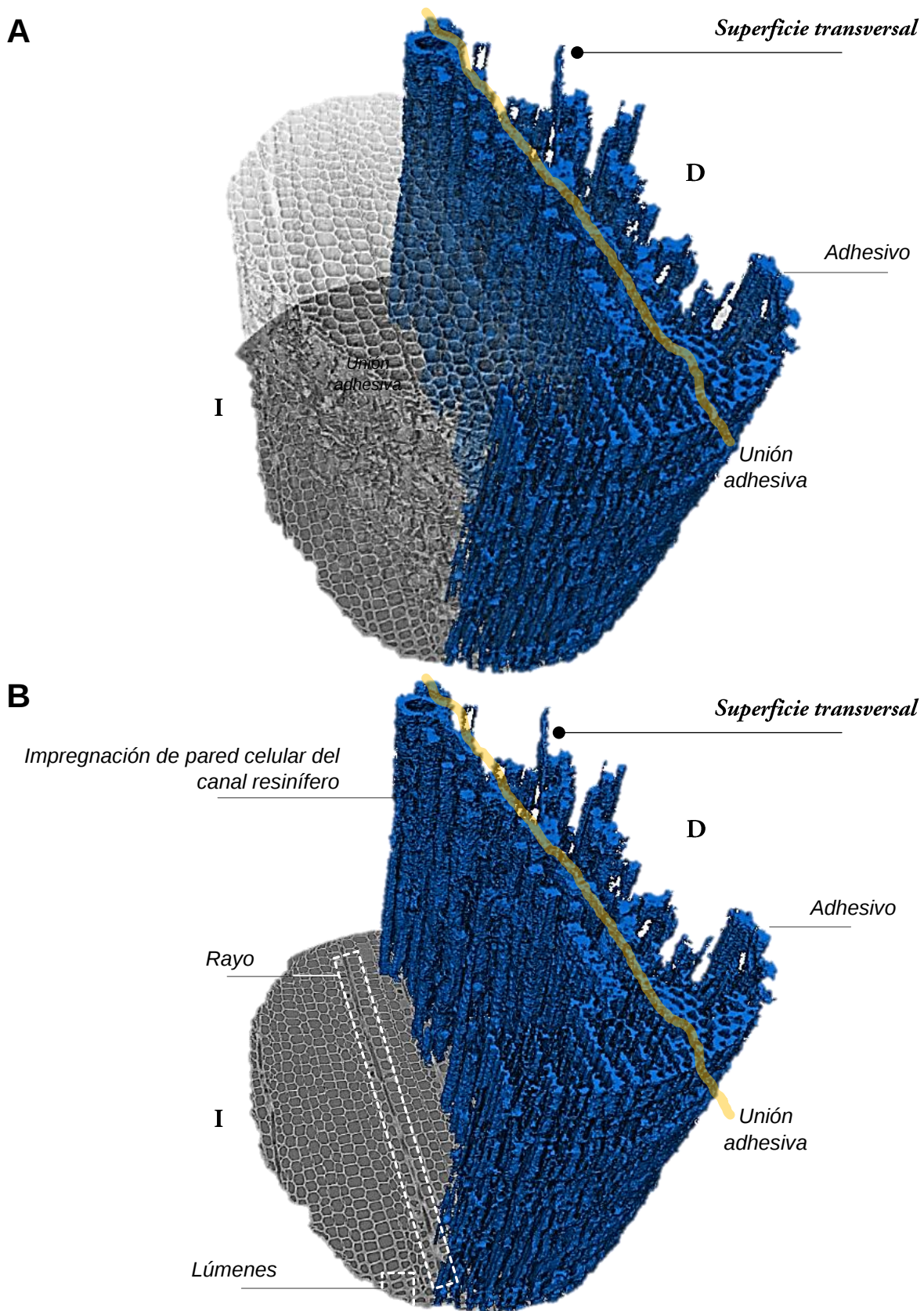


Fig. 28. Aislamiento de elementos en micrografía; (a) Volumen tridimensional; (b) Aislamiento de adhesivo dentro de la estructura de madera.

La μ -CT de la probeta de madera (fig. 29-a) permite observar un corte transversal y tangencial. Donde se observa un canal resinífero axial, delimitado por células epiteliales. Se distinguen traqueídas completas con puntuaciones areoladas en cara tangencial. Además, se distingue un rayo fusiforme el cual corresponde a un canal resinífero radial, acompañado por rayos uniseriados. La muestra al ser impregnada con el adhesivo MDI (fig. 29-b), se observó que el flujo seguía la estructura donde encontraba menor oposición capilar y menor barrera estructural, entrando por los lúmenes de las traqueídas, lo que permitió distintos grados de saturación. Las punteaduras areoladas sirvieron como puente de conexión entre el adhesivo y las traqueídas. En algunas otras zonas la impregnación fue únicamente por adsorción y recubrimiento de paredes celulares, sin llenar por completo el lumen, lo que se asocia a la viscosidad del MDI.

El corte radial (fig. 30-a) muestra tres rayos medulares uniseriados, algunas traqueídas de pared lisa. Puntuaciones radiales areoladas en algunas traqueídas visibles desde el lado del lumen. Una parte de la sección longitudinal del canal resinífero está bordeado de células epiteliales. Se observa la penetración parcial del adhesivo en el canal resinífero axial (fig. 30-b), debido a la presencia de residuos de resina lo que generó zonas ocluidas que impidieron su saturación total. Además, algunos otros lúmenes permitieron una filtración completa del adhesivo a lo largo del cuerpo de la traqueída, evidenciando continuidad estructural y ausencia de obstrucciones significativas.

La figura 31-a, presenta el análisis de las tres superficies anatómicas de la madera. Se observa con mayor claridad el tipo de puntuación areolada, el borde liso de las traqueídas radiales. Además, se puede ver como el flujo de adhesivo utiliza las puntuaciones areoladas para conducirse por las paredes celulares y traqueídas (fig. 31-b).

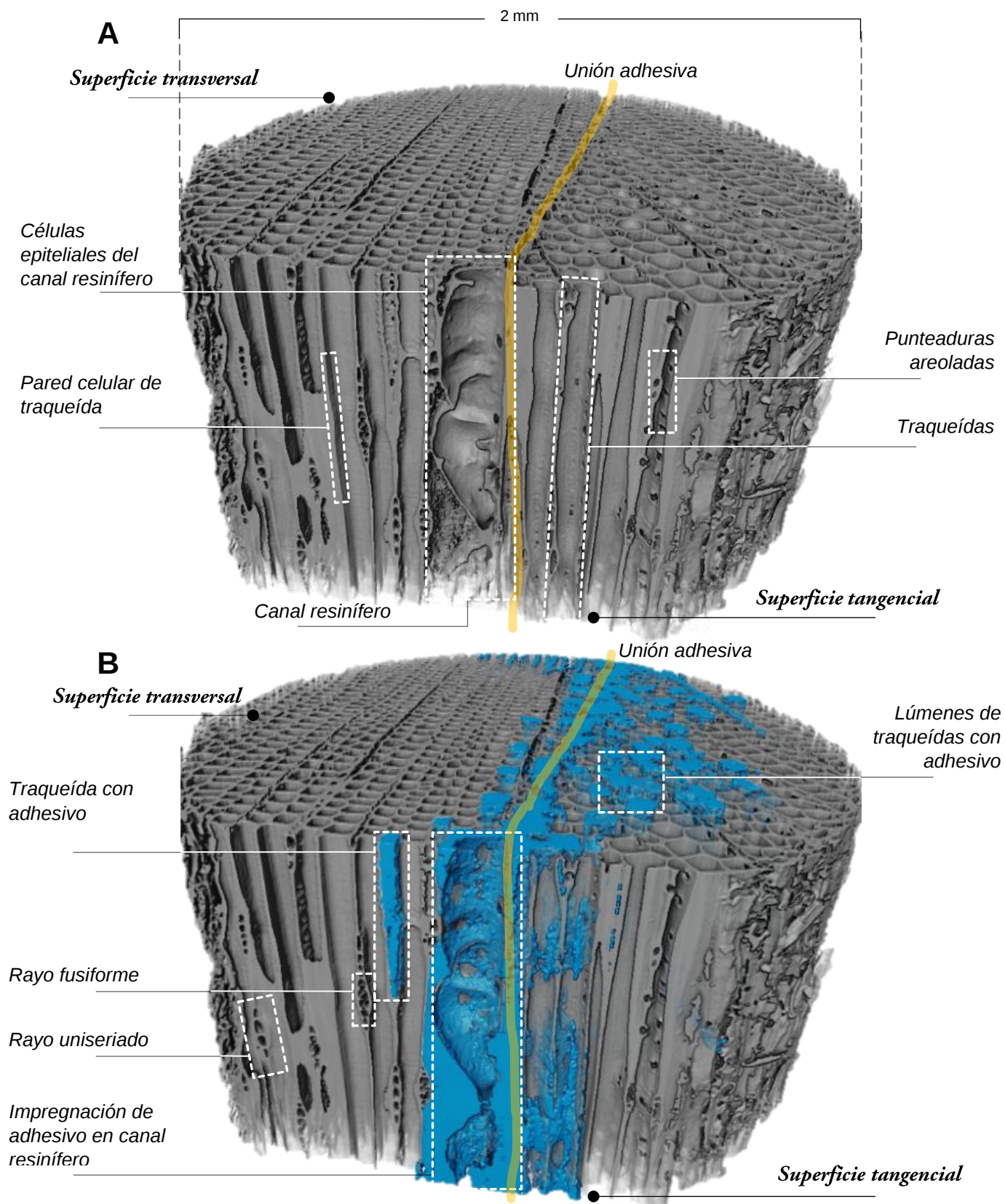


Fig. 29. Reconstrucción tridimensional de la unión adhesiva en madera de recuperación. (a) Muestra sin adhesivo; (b) Muestra con adhesivo.

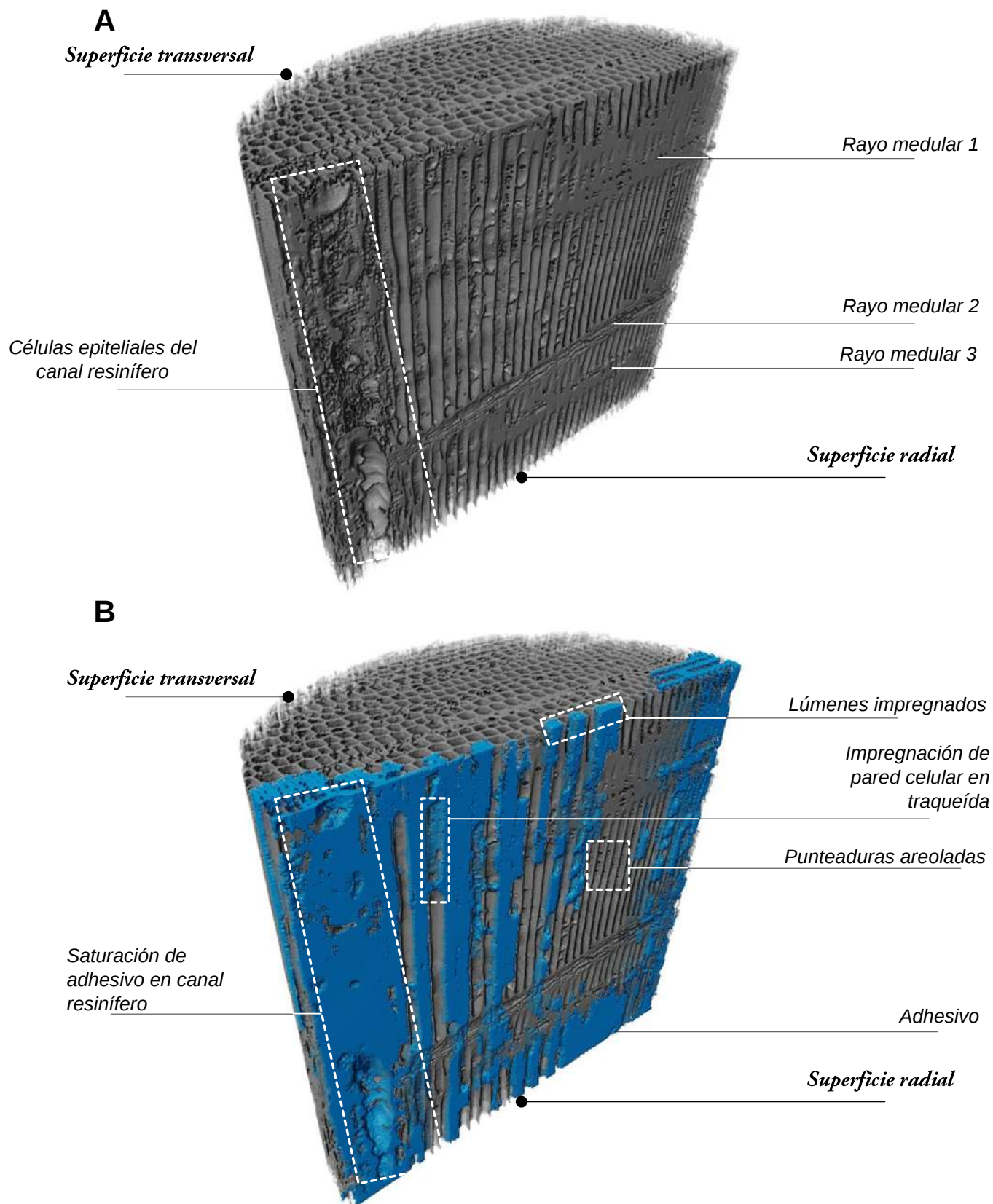


Fig. 30. Reconstrucción tridimensional de madera; (a) Estructura anatómica; (b) impregnación del adhesivo.

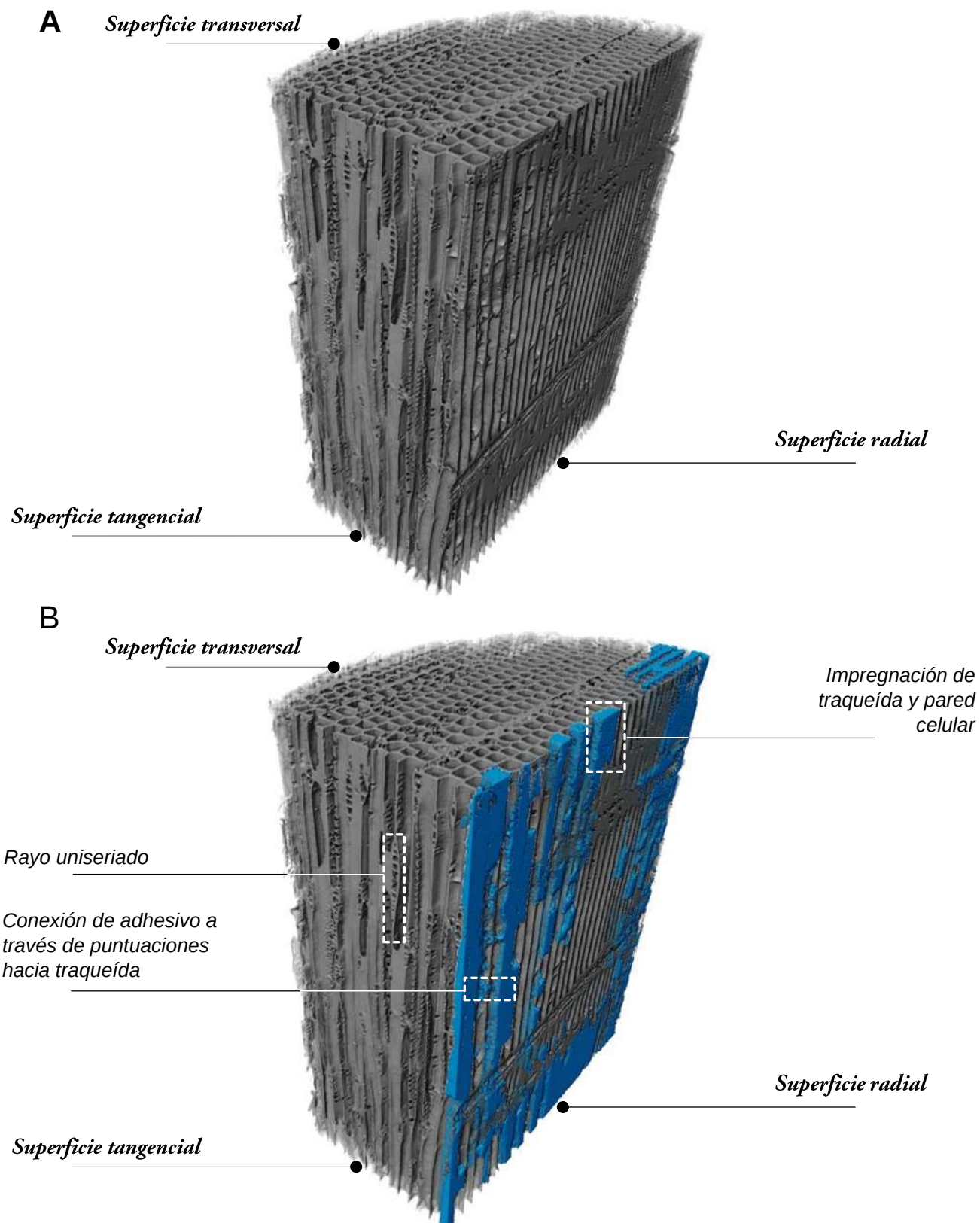


Fig. 31. Reconstrucción tridimensional de las superficies de madera. (a) Madera sin adhesivo; (b) impregnación del adhesivo en la madera.

9. CONCLUSIONES

Caracterización de madera sana y de recuperación:

Las variaciones en las propiedades físico mecánicas de la madera causadas por el envejecimiento son originados por cambios en la microestructura y cambios químicos en los componentes, celulosa, hemicelulosa, lignina.

La caracterización físico-mecánica demuestra que la madera de recuperación presentó densidades de 0.55–0.62 g/cm³ (relacionada con elementos sólidos, principalmente en pared celular, por unidad de volumen, incluyendo espacios vacíos como lúmenes); contenidos de humedad dentro de rangos estructuralmente aceptables. Además, su MOR promedio (70.05 MPa) y MOE (9.80 GPa) son muy próximos a los del Pino Amarillo del Sur. Se presentó con mayor repetición la falla por desviación de fibra en la prueba de flexión, esto debido a que la madera es un material anisotropico, por lo que la carga sigue la orientación interna de fibras.

Contenido de sólidos, viscosidad y resistencia adhesiva:

La resistencia de un adhesivo depende en gran medida a su composición, viscosidad y temperatura a la cual este siendo aplicado. Además de las buenas practicas al momento de ser utilizado; entre mayor espesor tenga la capa de anclaje sobre el sustrato, menor resistencia presentará.

El PVA, demostró mayor resistencia adhesiva en condiciones secas (2639 kg/cm²), su comportamiento Bingham reopéctico implica aumento de viscosidad con el tiempo, favoreciendo una adherencia superficial más que penetración profunda; ademas, mayor contenido de sólidos; sin embargo, la exposición a un contenido de humedad alto, provocó que se re humectara, perdiendo completamente su capacidad adhesiva. El MDI con mayor viscosidad inicial (3816 cP) y comportamiento pseudoplástico, presenta mayor resistencia al agua ya que el anclaje que forma con el sustrato es a través de puentes de uretano, al entrar en contacto con las mleculas de agua, este comienza a su proceso de fraguado.

Prueba de flexión:

La madera recuperada demostró un rendimiento mecánico satisfactorio en las pruebas, lo que indica su potencial como material de reemplazo para elementos con alto nivel de degradación. El empalme estuvo conformada por tres elementos principales, la madera, cuyo MOR se relacionó con la capacidad de carga que resistía; el adhesivo el cual permitió mantener unidas ambas piezas del empalme, favoreciendo el anclaje físico y químico (topografía-puentes de uretano). Por último, los pernos evitaron los desplazamientos laterales que las piezas presentaron al recibir una carga. El análisis estadístico demostró que el número de pernos proporciona mayor rigidez.

Tomografía de la unión adhesiva:

Las imágenes μ -CT mostraron que la alineación de traqueídas y el diámetro de lúmenes condicionaron la penetración del adhesivo. En zonas con alineación paralela a la línea de adhesión, la impregnación fue más uniforme; en lúmenes con cierto ángulo de inclinación se generaron acumulaciones y desviaciones.

Esto confirma principios de flujo capilar en materiales porosos anisotrópicos, la dirección de la fibra y la microestructura condiciona la distribución del adhesivo.

10. REFERENCIAS

- AITIM. (2020). Rehabilitación: Patología, inspección, diagnóstico, tratamientos de protección pasiva o activa y consolidación o refuerzo. En F. Arriaga, F. Peraza, M. Esteban, I. Bobadilla, y F. García (Eds.), *Intervención en estructuras de madera*. Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera.
- Arango, R., Lebow, S., & Glaeser, J. (2021). Biodeterioration of wood. En Forest Products Laboratory (Ed.), *Wood handbook: Wood as an engineering material* (General Technical Report FPL-GTR-282, pp. 14-1–14-19). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- ASTM International. (2021). *Standard test methods for small clear specimens of timber* (ASTM D143-21). <https://www.astm.org/d0143-21.html>
- ASTM International. (2021). *Standard test method for determination of percent nonvolatile content of liquid phenolic resins used for wood laminating* (ASTM D4426-01[2021]). <https://www.astm.org/d4426-01r21.html>
- Ávila, L., Herrera, M., y Raya, D. (2012). *Preservación de la madera en México*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/7868
- Avram, A., Ionescu, C., y Lunguleasa, A. (2022). Some methods for the degradation-fragility degree determination and for the consolidation of treatments with Paraloid B72 of wood panels from icon-type heritage objects. *Forests*, 13(5), 801. <https://doi.org/10.3390/f13050801>
- Bailach, C., Fuster, L., Yusá, J., Talens, P., y Palomino, S. (2011). Gelatinas y colas para el uso en tratamientos de restauración: Estado de la cuestión. *Arché*, (6-7), 163-170.

- Bartolomé, D., y Mancebón, V. (2005). Defensa contra las termitas (Isóptera) en madera de construcción. *Boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa*, (37), 365-367.
- Basterra, A., Acuña, L., Casado, M., Ramón, G., y López, G. (2009). Diagnóstico y análisis de estructuras de madera mediante técnicas no destructivas: Aplicación a la Plaza Mayor de Chinchón (Madrid). *Informes de la Construcción*, 61(516), 21–36. <https://doi.org/10.3989/ic.09.016>
- Berrio, S., y Orive, O. (1984). Terminología general en materia de conservación del patrimonio cultural prehispánico. *Cuadernos de Arquitectura Mesoamericana*, (3). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Brischke, C. (Ed.). (2020). *Wood protection and preservation*. MDPI. <https://doi.org/10.3390/11050549>
- Broda, M., Popescu, C.-M., Curling, S. F., Timpu, D. I., y Ormondroyd, G. A. (2022). Effects of biological and chemical degradation on the properties of Scots pine wood—Part I: Chemical composition and microstructure of the cell wall. *Materials*, 15(7), 2348. <https://doi.org/10.3390/ma15072348>
- Carrillo, I., y Raya, D. (2020). Inspección de vigas de madera en uso del género *Pinus* por medio de métodos no destructivos. En E. A. Aguilar, E. Bedolla, y C. A. León (Eds.), *Foro de Ingeniería e Investigación en Materiales* (Vol. 17, pp. 360-370). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Carrillo, M., y Carreón, H. (2020). Study of the degradation effects on aged wood beams from the Cathedral of Morelia, Mexico by acoustic birefringence measurements. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 55(12), 1042–1049. <https://doi.org/10.1134/S1061830921010034>
- Carrillo, M., Carreón, H., y Raya, D. (2021). Determinación ultrasónica de la anisotropía acústica en madera mexicana del género *Pinus* sana y deteriorada. *Foro de Ingeniería e Investigación en Materiales*, 18, 314-323.

- Casado, M., Silva, I., Ponce, L., Martín, P., Martín, J.; Acuña, L. (2019). White-rot fungi control on *Populus* spp. wood by pressure treatments with silver nanoparticles, chitosan oligomers and propolis. *Forests*, 10(10), 885. <https://doi.org/10.3390/f1010088>
- Cataldi, A., Deflorian, F., y Pegoretti, A. (2015a). Microcrystalline cellulose filled composites for wooden artwork consolidation: Application and physic-mechanical characterization. *Materials & Design*, 83, 611–619. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.037>
- Cataldi, A., Dorigato, A., Deflorian, F., y Pegoretti, A. (2015b). Innovative microcrystalline cellulose composites as lining adhesives for canvas. *Polymer Engineering & Science*, 55(6), 1349–1354. <https://doi.org/10.1002/pen.24074>
- Chen, T., Ma, Q., Li, Y., y Li, G. (2023). Preparation and characterization of wood composites for wood restoration. *Forests*, 14(9), 1743. <https://doi.org/10.3390/f14091743>
- Colín, U., y Carrillo, P. (2023). Caracterización energética: Poder calorífico, compuestos poliméricos. En L. López y M. Morales (Eds.), *Aplicaciones energéticas de la biomasa: Perspectivas para la caracterización local de biocombustibles sólidos* (pp. 195-222). Universidad Intercultural Indígena de Michoacán.
- Comisión Nacional Forestal y Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. (2010). Clasificación taxonómica de insectos. En *Manual para la protección contra el deterioro de la madera* (pp. 8-12). Gobierno de México.
- Consejo Internacional de Monumentos y Sitios. (2017). *Principios para la conservación del patrimonio construido en madera*. ICOMOS. https://www.icomos.org/images/DOCUMENTS/Charters/GA2017_6-3-4_WoodPrinciples_ES_final20180221.pdf
- De Alcalá, J. (2018). *Relación de Michoacán* (R. Tena, Ed.). Instituto Nacional de Antropología e Historia. (Obra original publicada ca. 1540).

- De Nevers, N. (2006). *Mecánica de fluidos para ingenieros químicos* (3.^a ed.). Grupo Editorial Patria.
- Del Valle, N., Leroyer, L., Charrier, B., y Robles, E. (2021). Recent advances on the development of protein-based adhesives for wood composite materials—A review. *Molecules*, 26(24), 7617. <https://doi.org/10.3390/molecules26247617>
- Deng, Y., Chen, Y., Zhang, Y., Wang, S., Zhang, F., y Sun, F. (2016). ICON: 3D reconstruction with ‘missing-information’ restoration in biological electron tomography. *Journal of Structural Biology*, 195(1), 100–112. <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2016.04.004>
- Ehtisham, R., Qayyum, W., Camp, V., Plevris, V., Mir, J., Zaman, Q., y Ahmad, A. (2023). Classification of defects in wooden structures using pre-trained models of convolutional neural network. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02530. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02530>
- Evans, P., Chowdhury, M., Mathews, B., Schmalzl, K., Ayer, S., Kiguchi, M., y Kataoka, Y. (2005). Weathering and surface protection of wood. En M. Kutz (Ed.), *Handbook of environmental degradation of materials* (pp. 277-297). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-081551500-5.50016-1>
- Ezekoye, O. (2016). Conduction of heat in solids. En J. Hurley et al. (Eds.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0_2
- Feci, E., Mannucci, M., y Palanti, S. (2013). Diagnostic evaluation of insect attack on existing timber structures: A review of some case studies. *Advanced Materials Research*, 778, 1020-1027. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.778.1020>
- Flores, L., Simón, M., y Grafiá, V. (2016). Estudio del comportamiento de adhesivos sintéticos y de sus propiedades físico-mecánicas aplicados sobre soporte lúneo. *Arché*, (11-12), 119-126.

- Gómez, L., Fernández, C., y Papalardo, L. (2014). Comportamiento de las estructuras de madera construidas en la Estancia Jesuítica de Santa Catalina en el siglo XVII. *Revista ALCONPAT*, 4(2), 132–142. <https://doi.org/10.21041/ra.v4i2.65>
- Gomon, P., Babych, Y., Polishchuk, M., Kysliuk, Y., Bandura, I., Pakholiuk, O., y Shevchuk, A. (2024). Deformability of a glued wooden beam with pre-stressed composite reinforcement. *Procedia Structural Integrity*, 59, 551-558.
- Idrizi, L., Jashari, B., y Sejdiu, R. (2021). Wood structures repair. En *Proceedings of the 19th International Symposium of Macedonian Association of Structural Engineers*. <https://www.researchgate.net/publication/361462867>
- Instituto Nacional de Antropología e Historia. (2024, mayo 23). *Consulta pública del Catálogo Nacional de Monumentos Históricos Inmuebles*. Secretaría de Cultura. <https://catalogonacionalmhi.inah.gob.mx/consultaPublica>
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (1991). *NTP 266: Adhesivos sintéticos: riesgo higiénico de resinas y otros componentes*. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales.
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (2026, febrero 18). *NTP 164: Colas y adhesivos. Tipos y riesgos higiénicos*. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. https://www.insst.es/documents/94886/326823/ntp_164.pdf
- International Council on Monuments and Sites. (2003). *Principles for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage*. ICOMOS. https://www.icomos.org/charters/structures_e.pdf
- Jiang, Y., y Sun, Q. (2022). Experimental and numerical studies on repaired wooden beam of traditional buildings in Huizhou region, China. *Buildings*, 12(7), 1025. <https://doi.org/10.3390/buildings12071025>

- Kamperidou, V. (2019). The biological durability of thermally- and chemically-modified black pine and poplar wood against basidiomycetes and mold action. *Forests*, 10(12), 1111. <https://doi.org/10.3390/f10121111>
- Kelleci, O., y Koksai, E. (2023). *Foamed phenol formaldehyde (PF) with naturel foaming agent and characterization adhesive properties* [Presentación de documento]. First International Conference on Pioneer and Innovative Studies (ICPIS), Konya, Turquía.
- Kloiber, M., Tippner, J., Praus, L., e Hrivnák, J. (2012). Experimental verification of a new tool for wood mechanical resistance measurement. *Wood Research*, 57(3), 383-398.
- Koksai, E., y Kelleci, O. (2021). *Preparation and characterization of polystyrene and starch based wood glues as alternatives to polyvinyl acetate (PVA) glue* [Presentación de documento]. 2nd International Congress on Engineering and Natural Sciences (ISENAS), Isparta, Turquía.
- Krystofiak, T., Lis, B., Pavlo, S., y Ganev, S. (2022). Researches on influence of wood sanding direction on wood gluing. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 19(2), 103–109. <https://doi.org/10.1007/s13196-022-00297-5>
- Landa Esparza, M. (1993). Madera en rehabilitación: Uniones encoladas. *Revista de Edificación*, (15), 27-32.
- Landa Esparza, M. y Ochandiano, A. (2016). *Patrimonio y madera: Hacia una teoría para su preservación*. Papeles del Partal, (8), 11–33.
- Landa Esparza, M. (2019a). *La conservación de las estructuras de madera*. Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Landa Esparza, M. (2019b). Reparación de estructuras de madera mediante injertos. Recuperación de elementos traccionados. *Arché*, (13-14), 127–133.

- León, J. (2010). Anatomía y densidad o peso específico de la madera. *Revista Forestal Venezolana*, 54(1), 67-76.
- Mackiewicz, M., Zimiński, K., Pawłowicz, J., y Knyziak, P. (2024). Evaluation of the historic wooden structure condition based on the results of non-destructive tests. *Engineering Failure Analysis*, 159, 108116. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108116>
- Mankowski, P., Kozakiewicz, P., y Krzosek, S. (2015). Retention of polymer in lime wood impregnated with Paraloid B-72 solution in butyl acetate. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Forestry and Wood Technology*, 92, 263–267.
- Moon, H., y An, W. (2024). Measuring displacement before and after repair on Korean wooden built heritage: Records for authenticity and sustainability. *Sustainability*, 16(3), 1101. <https://doi.org/10.3390/su16031101>
- Moreno, P. (2018). Rehabilitación de la cubierta de la nave principal de la iglesia de Santiago Apóstol de Jumilla (Murcia). *Anales de Edificación*, 4(4), 25-34. <https://doi.org/10.20868/ade.2018.3850>
- Organización Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2014). *Industria de la construcción-Madera preservada a presión-Clasificación y requisitos* (NMX-C-322-ONNCCE-2014). ONNCCE. <https://www.onncce.org.mx/>
- Pătrașcu, M., Rădoi, M., & Pruna, M. (2018). Microwave treatment for pest control: Coleoptera insects in wooden objects. *Studies in Conservation*, 63(2), 89–97. <https://doi.org/10.1080/00393630.2017.1298305>
- Pereira, D., Fonseca, E., y Osório, M. (2024). Computational analysis for the evaluation of fire resistance in constructive wooden elements with protection. *Applied Sciences*, 14(4), 1477. <https://doi.org/10.3390/app14041477>

- Reinprecht, L. (2016). *Wood deterioration, protection and maintenance*. Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9781119106500>
- Rodríguez, L., Morales, J., Rubio de Hita, P., y Pérez, F. (2011). Inspección mediante técnicas no destructivas de un edificio histórico: Oratorio San Felipe Neri (Cádiz). *Informes de la Construcción*, 63(521), 13-22. <https://doi.org/10.3989/ic.10.032>
- Sakuno, T., y Schniewind, A. P. (1990). Adhesive qualities of consolidants for deteriorated wood. *Journal of the American Institute for Conservation*, 29(1), 33–44. <https://doi.org/10.1179/019713690806046127>
- Sato, H., y Nakahara, Y. (1995). *The complete Japanese joinery* (K. P. Nii, Trad.). Hartley & Marks Publishers.
- Schellmann, N. (2007). Animal glues: A review of their key properties relevant to conservation. *Studies in Conservation*, 52(sup1), 55-66.
<https://doi.org/10.1179/sic.2007.52.Supplement-1.55>
- Schellmann, N. (2009). Animal glues: Their adhesive properties, longevity and suggested use for repairing taxidermy specimens. *NatSCA News*, (16), 36–40.
- Schniewind, A. P., y Eastman, P. Y. (1994). Consolidant distribution in deteriorated wood treated with soluble resins. *Journal of the American Institute for Conservation*, 33(3), 247–255. <https://doi.org/10.1179/019713694806083069>
- Sedano, M., Avila, L., y Jardón, G. (2021). Análisis técnico de tres adhesivos comerciales para la industria de muebles. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 22(4), 1-7. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2021.22.4.029>
- Senalik, A., y Farber, B. (2021). Mechanical properties of wood. En *Wood handbook: Wood as an engineering material* (pp. 5-1 a 5-51). Forest Products Laboratory.

- Svyatoslav, G., Petro, G., Sviatoslav, H., Mykola, P., Tetiana, D., y Leonid, K. (2022). Improving the strength of bending elements of glued wood. *Procedia Structural Integrity*, 36, 217-222. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.027>
- Timar, C., Sandu, A., Beldean, E., y Sandu, I. (2014). FTIR investigation of Paraloid B72 as consolidant for old wooden artefacts: Principle and methods. *Materiale Plastice*, 51(4), 382–387.
- Uysal, M., y Haviarova, E. (2018). Estimating design values for two-pin moment resisting dowel joints with lower tolerance limit approach. *BioResources*, 13(3), 5241-5253.
- Vaca de Fuentes, B. (1998). *Agentes destructores de la madera* (Documento Técnico 65/1998). Universidad Autónoma Juan Misael Saracho. Proyecto BOLFOR–USAID.
- Wang, D., Dong, W., Cao, L., Zhu, C., y Yan, J. (2023). Deterioration mechanisms of archeological wood inside the bronze parts of excavated chariots from the Western Han dynasty. *Journal of Cultural Heritage*, 62, 90-98. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.05.020>
- White, F. M. (2008). *Mecánica de fluidos* (6.^a ed.). McGraw-Hill.
- White, R. H., y Nordheim, E. V. (1992). Charring rate of wood for ASTM E 119 exposure. *Fire Technology*, 28, 5–30. <https://doi.org/10.1007/BF01858049>
- Wiedenhoef, A., y Eberhardt, T. (2021). Structure and function of wood. En *Wood handbook: Wood as an engineering material* (pp. 3-1 a 3-18). Forest Products Laboratory.
- Wiemann, C. M. (2021). Characteristics and Availability of Commercially Important Woods. En Forest Products Laboratory (Ed.), *Wood handbook: Wood as an engineering material* (General Technical Report FPL-GTR-282, pp. 14-1–14-19). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Zhang, H., Gao, W., y Wang, Y. (2024). A wooden pin reinforcement of ancient Chinese wooden temple: A case of Daxiong Hall. *Advances in Civil Engineering*, 2024, 8824310. <https://doi.org/10.1155/2024/8824310>

ANEXOS

María Alejandra López Vivanco

Evaluación Mecánica de Uniones de Madera para Estructuras en Edificaciones Históricas..pdf

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:571671905

Fecha de entrega

26 mar 2026, 11:40 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

26 mar 2026, 12:05 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

Evaluación Mecánica de Uniones de Madera para Estructuras en Edificaciones Históricas..pdf

Tamaño del archivo

4.0 MB

84 páginas

17.690 palabras

100.798 caracteres

María Alejandra López Vivanco

Evaluación Mecánica de Uniones de Madera para Estructuras en Edificaciones Históricas..pdf

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:571671905

Fecha de entrega

26 mar 2026, 11:40 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

26 mar 2026, 12:06 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

Evaluación Mecánica de Uniones de Madera para Estructuras en Edificaciones Históricas..pdf

Tamaño del archivo

4.0 MB

84 páginas

17.690 palabras

100.798 caracteres

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera.	
Título del trabajo	Evaluación Mecánica de Uniones de Madera para Estructuras en Edificaciones Históricas.	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	María Alejandra López Vivanco	1208767k@umich.mx
Director	Dr. Raúl Espinoza Herrera	raul.espinoza@umich.mx
Codirector	Dra. Mayra Irey Carrillo Gómez	mayra.carrillo@umich.mx
Coordinador del programa	Mtra. Abril Munro Rojas	mae.cs.tecnologia.madera@umich.mx

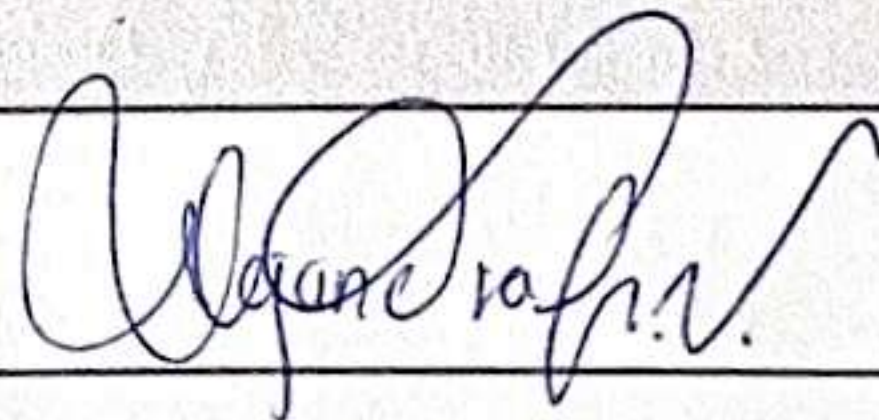
Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	No	-

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	-
Traducción a otra lengua	Si	Corroborar el uso correcto del lenguaje ingles en la redacción del abstract.
Revisión y corrección de estilo	No	-
Análisis de datos	No	-
Búsqueda y organización de información	No	-
Formateo de las referencias bibliográficas	No	-
Generación de contenido multimedia	Si.	Imágenes sobre la interacción molecular en adhesivos.
Otro	No	-

Datos del solicitante	
Nombre y firma	María Alejandra López Vivanco 
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán a 30 de Marzo de 2026.



Morelia, Michoacán a 19 de Mayo de 2025
Oficio: *Material de donación.*

A quien corresponda:

Por medio del presente, hago constar que yo, Juan Manuel González Gervasio, en mi carácter de contratista responsable de la obra pública número DIE/IRE/FAM-MS-4A/01/2023, he donado cinco vigas de madera con dimensiones 0.30 x 0.15 x 6.00 m, para ser utilizadas como material experimental por la alumna María Alejandra López Vivanco, estudiante de la Maestría en Tecnología de la Madera, de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Estas vigas fueron obtenidas durante los trabajos de mantenimiento realizados en los siguientes planteles educativos:

- Colegio Primitivo y Nacional de San Nicolás de Hidalgo (C.C.T. 16UBH0019C), localidad Morelia, municipio Morelia.
- Escuela Preparatoria "Ing. Pascual Ortiz Rubio" (C.C.T. 16UBH0022Q), localidad Morelia, municipio Morelia.
- Escuela Preparatoria "José Ma. Morelos y Pavón" (C.C.T. 16UBH0023P), localidad Morelia, municipio Morelia.
- Escuela Preparatoria "Lic. Eduardo Ruíz" (C.C.T. 16UBH0020S), localidad Uruapan, municipio Uruapan.

El material donado será empleado exclusivamente con fines académicos y de investigación, en el marco de los estudios relacionados con la evaluación de materiales lignocelulósicos históricos. Para mayor claridad y sustento de lo anterior, se adjunta copia del contrato de obra correspondiente al proyecto mencionado.

Sin más por el momento, quedo a su disposición para cualquier información adicional.

Ing. Juan Manuel González
Gervasio



Universidad
de Navarra

CERTIFICADO DE ESTANCIA

La Universidad de Navarra certifica que María Alejandra López Vivanco, estudiante de Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (México) ha completado su estancia en la Universidad de Navarra (España).

El alumno ha estado en la Universidad de Navarra desde el 15 de marzo de 2025 hasta el 15 de abril de 2025.

11 de abril de 2025

Paula Esparza
Responsable de Coordinación Académica





UNIVERSIDAD MICHOCANA
DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO

Foro de Ingeniería e Investigación en Materiales

Cuerpo Académico Consolidado CA-105: Ingeniería y Tecnología de Metales, Cerámicos y Aleaciones



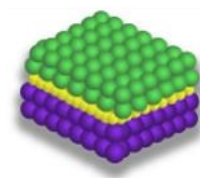
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN
METALURGIA Y MATERIALES

Análisis de Adhesión en Sistemas Poliméricos por Efecto Higroscópico

M.A. LÓPEZ-VIVANCO¹, M.I. CARRILLO-GÓMEZ², R. ESPINOZA-HERRERA¹

¹Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mich., México.

²Facultad de Arquitectura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mich., México.



FORO DE INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN EN MATERIALES. **VOL. 22** (2025) 318-326

Editores: E.A. Aguilar, E. Bedolla, C.A. León, D. Ramírez

® Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la UMSNH
Morelia, MÉXICO.

ISSN 2448-6892





Mechanical evaluation of wood joints with methylene diphenyl diisocyanate and its 3D analysis by computed tomography

María Alejandra López-Vivanco¹ · Mayra Irery Carrillo-Gómez² · Luis Olmos³ · Raúl Espinoza-Herrera¹

Received: 24 September 2025 / Accepted: 20 January 2026
© The Author(s), under exclusive licence to The Materials Research Society 2026

Abstract

Conservation of wooden heritage requires strategies that combine structural stability with respect for historical material value. This study analyzes the mechanical behavior of Jupiter-Ray joints made with healthy and reclaimed wood of pine, and methylene diphenyl diisocyanate adhesive (MDI). Three variants (four, two, and a central pin) were tested under static bending. Additionally, through X-ray microcomputed tomography adhesive distribution, penetration, and continuity within the anatomical structure of the wood were determined. Results showed that four-bolt joints achieved the highest strength even when made exclusively with reclaimed wood, reaching strength values comparable to species traditionally used in construction such as yellow pine. Fiber orientation and lumen diameter drives the penetration of the adhesive throughout the wood at the joints. From 3D images, adhesive infiltration is mainly found inside lumens and damaged cell walls. Overall, MDI enhanced joint stability, ensuring reinforcement aligned with minimal intervention, reversibility, and material compatibility in heritage conservation.

Introduction

In the conservation of wooden heritage, an essential strategy with significant impact is restoration using joints or splices, as it allows for the replacement or reinforcement of sections damaged by biotic and abiotic factors [1]. Wooden elements that remain structurally healthy but have suffered displacements due to impact or movement can be carefully dismantled and reassembled in order to reestablish structural connectivity and load transmission paths [2]. In beams, the splice is usually restricted to the support areas, since continuity in bending is challenging to achieve [3]. Splices in members subjected to axial stresses transmit compressive

forces better than tensile forces. On the other hand, splices in members subjected to bending generally only ensure geometric continuity but usually do not transmit bending moments [4]. It is essential to recognize that the solutions implemented in each intervention depend on specific site conditions, the degree of deterioration, and the technical means available [5]. This is key to ensuring the conservation and functionality of built heritage assets, since the intervention must respect the structure and the historical value of the material from a cultural heritage perspective [6]. So, the correct identification and classification of these deteriorations is essential to define specific treatments that ensure the stability of the structure [7]. Mechanical and adhesion tests have demonstrated that this type of reinforcement reduces angular deformation, improves energy dissipation, and preserves the integrity of the joints, in accordance with the principles of minimal intervention, reversibility, and material compatibility established by the International Council on Monuments and Sites (ICOMOS) for the conservation of architectural wooden heritage [8]. The use of non-destructive techniques has become essential as a tool for the evaluation of structural safety, as they allow for a detailed inspection of different states of degradation, internal defects, and changes in wood properties [9]. It has been shown that progressive biological decay causes a homogeneous mass loss in anatomical components, leading to increased porosity and a

Luis Olmos was an editor of this journal during the review and decision stage. For the MRS Advances policy on review and publication of manuscripts authored by editors, please refer to mrs.org/editor-manuscripts.

✉ Raúl Espinoza-Herrera
raul.espinoza@umich.mx

¹ Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Morelia, Mexico

² Facultad de Arquitectura, Morelia, Mexico

³ Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 58060 Morelia, Michoacán, México