

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**“RESISTENCIA AL CIZALLAMIENTO EN LA LÍNEA DE COLA DE
JUNTAS ENCOLADAS DE RESIDUOS DE DOS ESPECIES
TROPICALES”**

TESIS PARA OPTAR TÍTULO DE INGENIERA FORESTAL

SARA ABIGAIL FERREYRA CHUMAN

LIMA – PERÚ

2024

RESISTENCIA AL CIZALLAMIENTO EN LA LÍNEA DE COLA DE JUNTAS ENCOLADAS DE RESIDUOS DE DOS ESPECIES TROPICALES

INFORME DE ORIGINALIDAD

10%

INDICE DE SIMILITUD

9%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	renati.sunedu.gob.pe Fuente de Internet	1%
2	www.prppg.ufpr.br Fuente de Internet	1%
3	Submitted to Universidad Nacional Agraria La Molina Trabajo del estudiante	1%
4	repositorio.unu.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	purl.org Fuente de Internet	1%
6	es.scribd.com Fuente de Internet	1%
7	www.construnario.com Fuente de Internet	1%
8	archive.org Fuente de Internet	1%
9	repositorio.espe.edu.ec Fuente de Internet	<1%
10	recursos.corpoica.org.co Fuente de Internet	<1%

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

**“RESISTENCIA AL CIZALLAMIENTO EN LA LÍNEA DE COLA DE
JUNTAS ENCOLADAS DE RESIDUOS DE DOS ESPECIES
TROPICALES”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERA FORESTAL

SARA ABIGAIL FERREYRA CHUMAN

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

.....
Ing. Héctor Enrique Gonzales Mora, Ph.D
Presidente

.....
Ing. Florencio Teodoro Trujillo Cuellar Dr.
Miembro

.....
Ing. Neptalí Rodolfo Bustamante Guillén
Miembro

.....
Ing. Julio Cesar Canchucaja Rojas, Dr.
Asesor

.....
Ing. Francisco García Fernández, Ph.D
Co asesor

DEDICATORIA

A mí misma por la dedicación, el esfuerzo, la perseverancia y la motivación por alcanzar mi objetivo.

A mi madre Margarita, a mis abuelas Aurora y Leonila por ser mis ejemplos de mujeres valientes y luchadoras.

A toda mi querida familia por su amor incondicional, los momentos de alegría compartidos y la motivación constante que me han brindado a lo largo de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento:

Al Vicerrectorado de Investigación de la UNALM por el financiamiento mediante la subvención de tesis de pregrado según Resolución N° 0351-2021-R-UNALM.

A mi asesor Dr. Julio Cesar Canchucaya Rojas, por la disposición, orientación, apoyo y tiempo brindado en cada etapa del desarrollo de la investigación.

A mi co-asesor Dr. Francisco García Fernández por los consejos y el apoyo en el desarrollo de la investigación.

A los miembros del jurado, el Ph. D. Héctor Enrique Gonzales Mora, el Dr. Florencio Teodoro Trujillo Cuellar y el Ing. Neptalí Rodolfo Bustamante Guillén por las correcciones y aportes brindados para la investigación.

Al profesor Dr. Manuel Chavesta Custodio por la disponibilidad y aportes brindados para la realización de los ensayos desarrollados en el Laboratorio de Anatomía de la Madera.

Al profesor Ph. D. Héctor Enrique Gonzales Mora y a la Mg. Sc. Deysi Rocío Guzmán Loayza por las facilidades brindadas para ejecutar los ensayos en el Laboratorio de Pulpa y Papel.

Al profesor Mg. Sc. Rolando Montenegro Muro por la enseñanzas y aportes para el análisis estadístico de la investigación.

A los técnicos de laboratorio, Jaime Borja Navarro, Vicente Cuba Huamán y David Huamán Cabrera por su apoyo para el desarrollo de la investigación.

Al Sr. Bernardo Huanaco por la paciencia y su apoyo para la preparación de la madera en la fase experimental de la investigación.

A la empresa Postes Wise S.A.C. por las facilidades brindadas en el desarrollo de la investigación.

A Evelin Ignacio, Milagros Mendiola, Ángel Montoya, Renato Ruiz, Christian Clemente y Kevin López, por su apoyo y los preciosos momentos de amistad que hemos compartido juntos.

ACRÓNIMOS

ABIMCI	<i>Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente</i>
AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
ANOVA	Análisis de Varianza
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DAP	Diámetro a la altura del pecho
EGP	<i>Edge Glued Panels</i>
EN	<i>European Norm</i>
EPI	Emulsión Polimérica de Isocianato
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
IAWA	<i>International Association of Wood Anatomists</i>
INACAL	Instituto Nacional de Calidad
JUNAC	Junta del Acuerdo de Cartagena
MDI	Difenilmetanodiisocianato
MUF	Melamina Úrea Formaldehído
NTP	Normas Técnicas Peruanas
PU	Poliuretano

PVA	Acetato de Polivinilo
PMVA	Producto de Mayor Valor Agregado
SERFOR	Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre
SWP	<i>Solid Wood Panel</i>
TAPPI	<i>Technical Association of the Pulp and Paper Industry</i>
UNALM	Universidad Nacional Agraria La Molina
UNE	Una Norma Española
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
VAM	Acetato de Vinilo

ÍNDICE GENERAL

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Situación de la industria maderera en el Perú.....	3
2.2. Especies en estudio.....	5
2.2.1. <i>Caryocar glabrum</i> (Aublet) Persoon.....	5
2.2.2. <i>Guarea guidonia</i> (L.) Sleumer	6
2.3. Adhesivos	8
2.3.1. Acetato de polivinilo (PVA)	8
2.3.2. Emulsión polimérica de isocianato (EPI)	12
2.4. Comportamiento de la madera en el encolado.....	13
2.4.1. Características anatómicas de la madera	13
2.4.2. Propiedades físicas de la madera	13
2.4.3. Propiedades químicas de la madera.....	16
2.5. Influencia de los adhesivos en el encolado.....	18
2.6. Paneles encolados lateralmente (EGP).....	20
2.6.1. Calidad del encolado de listones de madera.....	21
2.6.2. Ensayos de resistencia al encolado lateral.....	22
III. METODOLOGÍA.....	24
3.1. Lugar de ejecución.....	24
3.2. Materiales	24
3.2.1. Material de estudio	24
3.2.2. Adhesivos	25
3.2.3. Materiales adicionales	25

3.2.4. Equipos	26
3.3. Métodos	27
3.3.1. Caracterización anatómica de los residuos de madera	27
3.3.2. Determinación de propiedades físicas de residuos maderables.....	29
3.3.3. Determinación de las propiedades químicas de residuos maderables	31
3.3.4. Determinación de las propiedades de los adhesivos.....	32
3.3.5. Procesamiento de los residuos maderables.....	33
3.3.6. Producción de juntas encoladas.....	34
3.3.7. Preparación de probetas para prueba de cizallamiento.....	36
3.3.8. Ensayos de cizallamiento en la línea de cola.....	37
3.3.9. Diseño experimental y análisis estadístico	39
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
4.1. Caracterización anatómica de los residuos de madera	42
4.2. Propiedades físicas de los residuos de madera	46
4.2.1. Contenido de humedad	46
4.2.2. Densidad básica y aparente.....	47
4.2.3. Variación Dimensional	49
4.3. Propiedades químicas de los residuos de madera.....	51
4.4. Características de los adhesivos	54
4.5. Resistencia de las juntas encoladas al cizallamiento.....	55
4.5.1. Pretratamiento para uso en ambiente seco.....	59
4.5.2. Pretratamiento para uso en ambiente húmedo.....	70
V. CONCLUSIONES	74
VI. RECOMENDACIONES	76
VII. BIBLIOGRAFÍA	77

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1: Propiedades físicas de <i>Caryocar glabrum</i>	6
Tabla 2: Propiedades físicas de <i>Guarea guidonia</i>	7
Tabla 3: Características técnicas del adhesivo PVA	9
Tabla 4: Clasificación de los adhesivos termoplásticos según su durabilidad	11
Tabla 5: Acondicionamiento según uso previsto en ambiente seco y húmedo	37
Tabla 6: Diseño experimental de los ensayos de cizallamiento del encolado lateral	40
Tabla 7: Valores promedio de contenido de humedad de los residuos de madera.....	46
Tabla 8: Valores promedio densidad básica y densidad aparente de los residuos de madera.....	48
Tabla 9: Valores promedio de contracción máxima y relación T/R de los residuos de madera.....	49
Tabla 10: Valores promedio de extractivos totales, pH y contenido de cenizas de los residuos de madera.....	52
Tabla 11: Valores promedio de las propiedades físicas y químicas de los adhesivos utilizados	54
Tabla 12: Resistencia de las juntas encoladas al cizallamiento	56
Tabla 13: Valores promedio de resistencia al cizallamiento en ambiente seco	60
Tabla 14: Resistencia al cizallamiento en ambiente seco	61
Tabla 15: Resistencia al cizallamiento en ambiente húmedo	71

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1: Ablandamiento de muestras de los residuos de madera	28
Figura 2: Láminas histológicas de corte transversal de los residuos madera.....	28
Figura 3: Determinación de la densidad básica y aparente de los residuos de madera.....	30
Figura 4: Determinación de la variación dimensional de los residuos de madera	31
Figura 5: Determinación de propiedades químicas de los residuos de madera.....	32
Figura 6: Determinación de la viscosidad de los adhesivos.....	33
Figura 7: Listones obtenidos a partir de los residuos de madera	34
Figura 8: Encolado y prensado de los listones	35
Figura 9: Flujograma para la elaboración de juntas encoladas lateralmente	36
Figura 10: Listones con juntas laterales encoladas y probetas preparadas para el ensayo de cizallamiento	37
Figura 11: Ensayo de cizallamiento	39
Figura 12: Fotografía de la sección transversal de la madera <i>Caryocar glabrum</i> , de 1 mm ²	43
Figura 13: Fotografía de la sección transversal de la madera <i>Guarea guidonia</i> , de 1 mm ²	44
Figura 14: Diagrama de cajas y bigotes de la resistencia al cizallamiento en relación con las variables en estudio (adhesivos, gramajes y pretratamientos).....	58
Figura 15: Correlación entre la densidad básica y la resistencia al cizallamiento de probetas de <i>Caryocar glabrum</i> encoladas con adhesivo PVA.....	64

Figura 16: Correlación entre la densidad básica y la resistencia al cizallamiento de probetas de <i>Guarea guidonia</i> encoladas con adhesivo PVA	65
Figura 17: Correlación entre la densidad básica y la resistencia al cizallamiento de probetas de <i>Caryocar glabrum</i> encoladas con adhesivo EPI	65
Figura 18: Correlación entre la densidad básica y la resistencia al cizallamiento de probetas de <i>Guarea guidonia</i> encoladas con adhesivo EPI.....	66
Figura 19: Correlación entre el contenido de humedad y la resistencia al cizallamiento de probetas de <i>Caryocar glabrum</i> encoladas con adhesivo PVA.....	67
Figura 20: Correlación entre el contenido de humedad y la resistencia al cizallamiento de probetas de <i>Guarea guidonia</i> encoladas con adhesivo PVA.....	68
Figura 21: Correlación entre el contenido de humedad y la resistencia al cizallamiento de probetas de <i>Caryocar glabrum</i> encoladas con adhesivo EPI	69
Figura 22: Correlación entre el contenido de humedad y la resistencia al cizallamiento de probetas de <i>Guarea guidonia</i> encoladas con adhesivo EPI.....	69

RESUMEN

La industria forestal maderera produce residuos a lo largo de toda la cadena productiva. Principalmente, estos residuos se destinan al uso de leña o simplemente se descartan como desperdicios; sin embargo, es importante destacar que pueden aprovecharse eficientemente en la fabricación de productos de mayor valor agregado (PMVA), como son los paneles encolados lateralmente, conocidos como *Edge Glue Panels* (EGP) en inglés, a fin de maximizar la utilización de los residuos disponibles. En este estudio, se evaluó la resistencia al cizallamiento de juntas encoladas, utilizando residuos de *Caryocar glabrum* (Aublet) Persoon y *Guarea guidonia* (L.) Sleumer, obtenidos de una industria de segunda transformación, con el propósito de emplearlos en la fabricación de paneles EGP. Se evaluaron las características anatómicas (diámetro tangencial de poros y frecuencia de poros), físicas (contenido de humedad, densidad y variación dimensional) y químicas (extractivos totales, pH y cenizas) de los residuos de las especies maderables. Del mismo modo, se analizó la viscosidad, contenido de sólidos y pH de los adhesivos acetato de polivinilo (PVA) y emulsión polimérica de isocianato (EPI). Se elaboraron juntas encoladas lateralmente para cada especie y su combinación, utilizando gramajes de 120, 150 y 180 g/m², bajo una presión específica de 0,8 MPa. Posteriormente, se llevaron a cabo los ensayos de cizallamiento en la línea de cola, aplicando pretratamientos para uso en ambiente seco y húmedo, siguiendo los estándares establecidos por la norma UNE-EN 13354. Los resultados indican que los residuos de las especies estudiadas presentan características anatómicas, físicas y químicas adecuadas para su utilización en la fabricación de paneles EGP para uso no estructural. Además, se encontró que las juntas encoladas con EPI presentan valores de resistencia al cizallamiento superiores a las juntas encoladas con PVA, obteniendo una mayor efectividad con pretratamiento en ambiente seco y manteniendo los estándares establecidos por la norma UNE-EN 13353.

Palabras claves: Residuos de madera, juntas encoladas y resistencia al cizallamiento.

ABSTRACT

The timber industry generates waste throughout the entire production chain. Primarily, these residues are either used as firewood or simply discarded as waste. However, it's important to highlight that they can be efficiently utilized in the manufacturing of higher value-added products (HVAP), such as Edge Glue Panels (EGP), in order to maximize the utilization of available waste. In this study, the shear strength of glued joints was evaluated using residues from *Caryocar glabrum* (Aublet) Persoon and *Guarea guidonia* (L.) Sleumer, obtained from a secondary transformation industry, with the purpose of using them in EGP panel production. The anatomical (tangential pore diameter and pore frequency), physical (moisture content, density, and dimensional variation), and chemical characteristics (total extractives, pH, and ash content) of the timber species residues were assessed. Likewise, the viscosity, solids content, and pH of polyvinyl acetate (PVA) and isocyanate polymer emulsion (EPI) adhesives were analyzed. Side glued joints were prepared for each species and their combination using grammages of 120, 150, and 180 g/m², under a specific pressure of 0.8 MPa. Subsequently, shear tests were carried out on the glue line, applying pre-treatments for use in dry and humid environments, following the standards established by UNE-EN 13354. The results indicate that the residues from the studied species exhibit anatomical, physical, and chemical characteristics suitable for their use in manufacturing EGP panels for non-structural purposes. Additionally, it was found that joints glued with EPI exhibit higher shear strength values than joints glued with PVA, achieving greater effectiveness with pre-treatment in dry conditions while maintaining the standards established by UNE-EN 13353.

Keywords: Wood waste, glued joints and shear strength.

I. INTRODUCCIÓN

La industria forestal se encarga de la fabricación de productos maderables de transformación primaria (madera aserrada, triplay, chapas decorativas, entre otros) y transformación secundaria (industria de muebles, pisos, parihuelas, entre otros). En este contexto, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2004) estimó que en las operaciones de aserrío se produce entre el 45 y 55 por ciento de residuos, mientras que en la fabricación de tableros contrachapados (triplay) se genera entre el 40 y 50 por ciento de residuos. Del mismo modo, según Villar (2011), se estimaron rendimientos para el uso de la madera en la fabricación de muebles y de artesanías, con valores del 75,75 por ciento y 41,58 por ciento, respectivamente; los cuales pueden variar considerablemente dependiendo del tipo de madera a trabajar. Además, Villar (2011) indicó que la generación de residuos maderables será igual o mayor al 25 por ciento.

Según Lu (2014), el mercado valora más la madera comercial larga, mientras que la madera recuperada, conocida como corta y paquetería, tiene poco valor y a menudo se prefiere utilizarla para hacer carbón o descartarla en lugar de agregarle valor. Por ello, el uso de los residuos maderables es muy complejo, especialmente en los países en desarrollo, ya que dependerá de consideraciones económicas, de medios de transporte y políticas sectoriales para impulsar sus usos alternativos, ya que requiere la aplicación de tecnologías y procesos viables que permitan reducir los impactos ambientales (Fernández, 2012).

Una alternativa para el uso de los residuos maderables es la fabricación de paneles encolados lateralmente (EGP), ya que estos requieren de listones con pequeñas dimensiones, los cuales pueden obtenerse a partir de los residuos de la industria maderera. Campelo (2015) señala que la producción de paneles EGP permite el aprovechar piezas que presentan pequeños defectos, así como residuos de aserraderos y otras industrias del sector maderero. Asimismo, la Asociación Brasileña de Industrias de Maderas (ABIMCI, 2008) menciona que los paneles EGP son considerados como productos de mayor valor agregado (PMVA), y son ampliamente

utilizados en la fabricación de muebles, puertas, pisos, así como, en la construcción civil. En base a todo lo expuesto, se busca promover el adecuado uso de residuos maderables mediante la manufactura de paneles EGP, ya que se considera que esto mejorará y ordenará la industria maderera en el Perú. Además, abrirá oportunidades laborales para los actores involucrados en el sector y promoverá el uso de especies forestales poco conocidas en la industria, pero con un amplio potencial para la manufactura de productos maderables, cubriendo así la demanda existente en el país.

El objetivo principal del presente trabajo de investigación fue evaluar la calidad y características de juntas encoladas de residuos maderables de *Caryocar glabrum* y *Guarea guidonia*, obtenidas de una industria de segunda transformación, para la manufactura de paneles EGP, utilizando dos adhesivos (PVA y EPI) y tres gramajes diferentes (120,150 y 180 g/m²).

Los resultados obtenidos indican que los residuos de las especies estudiadas presentan características anatómicas, físicas y químicas adecuadas para su utilización en la fabricación de paneles EGP para uso no estructural, de esta manera se contribuye con la información existente en el tema desarrollado.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Situación de la industria maderera en el Perú

El Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR, 2019), menciona que el Perú posee 73 millones de hectáreas de bosques naturales tropicales, lo que equivale al 56,8 por ciento del territorio nacional; siendo aproximadamente un total de 9,2 millones de hectáreas de bosque categorizados como de producción permanente que se encuentran bajo manejo forestal sostenible, a través de concesiones forestales o permisos otorgados para el aprovechamiento de la madera.

El consumo total de productos maderables en Perú ha experimentado un aumento significativo desde el año 2007 hasta el 2013, incrementándose en 1 millón de metros cúbicos de madera rolliza; este aumento refleja un crecimiento en el consumo desde 0,6 a 0,9 metros cúbicos por persona (UNIQUE, 2015). Según el Centro Nacional de Planeamiento Estratégico (CEPLAN, 2023), en el año 2021, la producción de madera transformada sumó un total de 690,1 mil metros cúbicos, mostrando un fuerte crecimiento del 66 por ciento con respecto al año anterior; siendo los principales productos derivados de la transformación de madera incluyen madera aserrada (624 mil metros cúbicos), madera laminada (1,7 mil metros cúbicos), parquet (20,3 mil metros cúbicos) y carbón vegetal (43,1 mil metros cúbicos). Además, UNIQUE (2015) menciona que a nivel nacional existe una demanda insatisfecha de madera aserrada por los sectores de construcción y muebles, de aproximadamente 100 mil metros cúbicos por año. El desarrollo del sector forestal en el Perú es incipiente y los recursos forestales del país todavía no se están aprovechando de forma óptima; por tanto, se observa una oportunidad para este sector, dado que actualmente no se producen en las cantidades y calidades requeridas por el mercado nacional.

La utilización de madera en la industria forestal peruana está restringida a un cierto número de especies comerciales, las cuales son sobre-explotadas, contribuyendo así a la pérdida de diversidad biológica y deforestación. Sin embargo, existen volúmenes significativos de otras especies "poco conocidas" que se sub-utilizan, principalmente debido a problemas de mercadeo o desconocimiento de sus características y propiedades tecnológicas (Gonzales, 2006).

Los aserraderos en el Perú enfrentan escasez de personal calificado, especializado y estable, lo que ocasiona que la productividad obtenida sea baja, alrededor de 50 por ciento; es decir, se pierde casi la mitad de cada troza recibida en el aserradero (Barrantes & Trivelli, 1996).

Los residuos provenientes de la industria maderera se producen mayormente en aserraderos grandes y medianos, están siendo fiscalizados regularmente, lo que ha llevado a ejercer un control sobre los mismos y a generar prácticas adecuadas para la exportación (López *et al.*, 2017).

En el territorio nacional, hay aproximadamente 18 400 establecimientos dedicados a la transformación secundaria; menos del 3 por ciento de estas pertenecen a empresas grandes y medianas, mientras que el 97 por ciento, son micro y pequeñas empresas (Ccaipane, 2011). Estas últimas, suelen operar de manera informal, principalmente debido a la irregularidad en la entrega de las materias primas y la falta de conocimiento sobre la relación de madera y el entorno, así como la diversidad de las especies y de sus características (Rodríguez & Kometter, 2012).

De acuerdo con Rodríguez & Kometter (2012), los principales desafíos que enfrentan las empresas de segunda transformación incluyen la producción a pequeña escala y la limitada capacidad para manejar pedidos de gran volumen, la carencia de equipos y maquinaria eficientes, deficiencias en el control de calidad, altas tasas de reprocesamiento y rechazo debido a la baja calidad, la falta de normalización en los productos finales (falta de estándares) y la escasez de mano de obra calificada para la producción.

2.2. Especies en estudio

2.2.1. *Caryocar glabrum* (Aublet) Persoon

Según Richter & Dallwitz (2000), la clasificación taxonómica es la siguiente:

Familia: CARYOCARACEAE

Género: *Caryocar*

Especie: *Caryocar glabrum* (Aublet) Persoon

Nombre común: Almendro

Árbol de 60 – 120 cm de diámetro a la altura del pecho (DAP) y de 20 - 35 m de altura total; el tronco es recto y su base presenta aletas pequeñas. La corteza externa de color marrón rojizo y con presencia de grietas. Esta especie es común de selva baja, hasta los 700 m.s.n.m., en bosques primarios (Reynel, T. D. Pennington & R. T. Pennington, 2016).

La madera es de color amarillo, brillo medio, vetado en bandas paralelas, grano entrecruzado y textura media. Su parénquima es visible a simple vista, apotraqueal reticulado y paratraqueal vasicéntrico; con poros solitarios y múltiples radiales; porosidad difusa con presencia de tilosis (Aróstegui *et al.*, 1986). Presenta sustancias minerales, cristales prismáticos, localizados en células de los radios (raramente) o células del parénquima axial; asimismo, no se observa la presencia de sílice (Huaynalaya, 2018).

Carbajal (2012) menciona que *Caryocar glabrum* presenta un diámetro tangencial que varía de 118 a 196 μm y una frecuencia que va de 4 a 9 poros/ mm^2 . Asimismo, Aróstegui *et al.* (1986) señala que el diámetro tangencial promedio de poros es 172 μm (142-202 μm), con una longitud promedio de vasos de 602 μm , longitud promedio de fibras 2532 μm y longitud promedio de radios 501 μm .

Las propiedades físicas de la especie *Caryocar glabrum* se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Propiedades físicas de *Caryocar glabrum*

Densidad básica	0,65 g /cm ³
Densidad aparente	0,77 g /cm ³
Contracción tangencial	11,45 %
Contracción radial	5,51 %
Contracción volumétrica	15,69%
Estabilidad dimensional T/R	2,24

Fuente: Aróstegui *et al.* (1986)

La madera puede ser usada para estructuras (columnas, vigas, viguetas, pilotes, entre otros), obras exteriores, chapas decorativas y compensadas, carrocerías, construcciones pesadas, cajonería para envases pesados y parihuelas (Aróstegui & Acevedo, 1974).

2.2.2. *Guarea guidonia* (L.) Sleumer

Según Sibille & Rodríguez (1996), la clasificación taxonómica es la siguiente:

Familia: MELIACEAE

Género: *Guarea*

Especie: *Guarea guidonia* (L.) Sleumer

Nombre común: Requía

El árbol puede crecer hasta alcanzar una altura total de 25 m y un diámetro a la altura del pecho (DAP) de 90 cm; su tronco es recto, con pequeños aletones. La copa es grande y densa, proporcionalmente mayor que el tronco. La superficie del tronco áspera, de color gris

parduzco, con una apariencia intermedia entre fisurada y agrietada. Esta especie es común de bosques tropicales y subtropicales (Sibille & Rodríguez, 1996).

El tronco recién cortado presenta las capas externas de madera (albura) de color blanco amarillento y las capas internas (duramen) de castaño rosáceo, observándose entre ambas un gran contraste de color (Sibille & Rodríguez, 1996). Las características organolépticas, la madera es de color rojo, tiene un olor característico, brillo medio, presenta un veteado en arcos superpuestos, de grano recto y con una textura media (Aróstegui *et al.*, 1986). Aróstegui *et al.* (1986) mencionan que la especie *Guarea guidonia* presenta porosidad difusa, parénquima paratraqueal aliforme confluyente y presencia de sílice. León (2020) indica que los poros no presentan un patrón definido de disposición; los poros son solitarios y múltiples radiales de 2-3, frecuencia de poros de 4-5 poros/mm² y diámetro tangencial de poros de 141-187 µm.

Aróstegui *et al.* (1986), Valderrama (1993) y Organización Internacional de las maderas tropicales (OIMT, 1992) coinciden que la densidad básica para la especie *Guarea guidonia* es de 0,60 g/cm³.

Las propiedades físicas de la madera se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Propiedades físicas de *Guarea guidonia*

Densidad básica	0,60 g/cm ³
Densidad aparente	0,70 g/cm ³
Contracción tangencial	10,14 %
Contracción radial	5,59 %
Contracción volumétrica	14,96 %
Estabilidad dimensional T/R	1,84

Fuente: Aróstegui *et al.* (1986)

La Confederación Peruana de la Madera (CPM, 2008) indica que la durabilidad natural, no es susceptible al ataque biológico; usualmente utilizada para estructuras, vigas, viguetas, pie derecho, columnas, tijerales; así como también, para carpintería de interiores, tabiquería, puertas, parquet, encofrados, chapas, decorativos, mangos de herramientas, mueblería y ebanistería.

2.3. Adhesivos

Los adhesivos elaborados para el encolado de la madera han desempeñado un papel esencial en el desarrollo y crecimiento de la industria de productos forestales, siendo un factor clave en la utilización eficiente del recurso maderero (Vick, 1999). Asimismo, Iwakiri (2005) menciona que el encolado de la madera contribuye directamente a la conservación de los recursos forestales, ya que permite la utilización integral de la madera mediante la unión de pequeños elementos de madera en formas y dimensiones variadas, y su posterior reconstitución en diversos tipos de productos de madera.

Marra (1992) indica que, en la formación de un enlace, los adhesivos llevan a cabo cinco acciones distintas que son fluir, transferirse, penetrar, mojar y solidificarse. Vick (1999) señala que los adhesivos tienen la capacidad de transferir y distribuir tensiones de manera eficiente, lo que resulta en un aumento de la resistencia y rigidez del material compuesto. Los adhesivos actúan como puentes entre las superficies de los sustratos, ya sea que estén compuestos del mismo material o de materiales diferentes; el mecanismo de unión está determinado por la fuerza con la que une al sustrato (adhesión) y la fuerza interna del adhesivo (cohesión) (Madrid, 1999).

Los adhesivos utilizados para el encolado de las maderas pueden ser clasificados en adhesivos naturales, sintéticos termoplásticos y sintéticos termo-rígidos o termoestables (Iwakiri, 2005).

2.3.1. Acetato de polivinilo (PVA)

Los adhesivos vinílicos son resultantes de la polimerización (en dispersión acuosa) de acetato de vinilo (VAM), convirtiéndose en PVA. Estos adhesivos son normalmente termoplásticos;

es decir, el encolado ocurre por simples evaporaciones del solvente (agua), resultando un encolado de baja resistencia a la temperatura y humedad (Correa, 1997).

El adhesivo PVA presenta un aspecto líquido lechoso de color blanco, viscoso, libre de grumos o materiales extraños, y tiene un olor característico del acetato de vinilo; el aspecto de la película seca es ligeramente blanquecino (Araújo, 2019). Quagliotti (2008) y USDA *et al.* (1999) mencionan que el adhesivo PVA es de naturaleza termoplástica, de aplicación directa, prensado a temperatura ambiente o mediante alta frecuencia. USDA *et al.* (1999) también indica que el producto presenta una alta resistencia mecánica en ambientes secos, pero su punto crítico de uso se produce en ambientes con altas temperaturas y alta humedad.

Los polímeros termoplásticos, como el adhesivo PVA, tienen la capacidad de revertir su proceso de curado; es decir, pueden debilitarse o ablandarse cuando se exponen a altas temperaturas y luego volver a solidificarse al enfriarse. Sin embargo, a largo plazo, muestra una menor resistencia a la humedad y al calor, en comparación con los polímeros termoestables (Fiorelli, 2002).

El adhesivo PVA está constituido por moléculas largas que exhiben una movilidad limitada, lo que les permite penetrar únicamente en los lúmenes de las células, pero no en las paredes celulares (Follrich *et al.*, 2010).

Las características técnicas del adhesivo PVA se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Características técnicas del adhesivo PVA

Contenido de sólidos medios	51 – 55 %
pH	4 – 5
Viscosidad	6 000 – 8 000 cP

Fuente: Iwakiri (2005)

La velocidad de formación de la película adhesiva está directamente relacionada con el contenido de sólidos en la línea de cola; es decir, cuanto mayor sea el contenido de agua en el adhesivo, más lenta será la formación de la película. Según García (2011), esta propiedad se comprende mejor a través del contenido promedio de sólidos del PVA, que generalmente oscila entre el 40 y el 60 por ciento; un contenido del 40 por ciento requerirá más tiempo para formar la película y será necesario realizar ajustes en el proceso de encolado, control del tiempo de prensado y exposición.

Iwakiri (2005) menciona que las ventajas del adhesivo PVA es la practicidad de utilización, el bajo tiempo de procesamiento, la flexibilidad en la unión, la poca abrasividad, la transparencia del material. Así como también, ofrece seguridad al operador y la facilidad de manipuleo, sin olor, no inflamable, de bajo costo, de rápido secado, de limpieza fácil y permite un prolongado tiempo de almacenamiento.

Las uniones encoladas con adhesivo PVA son comunes en la industria del mueble, pero a menudo se realizan sin un respaldo técnico adecuado. Normalmente, no se controlan factores como el gramaje en una o ambas superficies, la presión y el tiempo de prensado; siendo que la calidad del ensamble dependa principalmente de la experiencia del operario (Guerra, 2015). Vignote & Martínez (2006) sugieren que el gramaje suele estar entre 140 y 200 g/m² de superficie a encolar, y una vez aplicado el adhesivo debe considerarse el tiempo de ensamble abierto, tal cual indique en la ficha técnica del fabricante.

La norma UNE-EN 204 (AENOR, 2016) proporciona una clasificación de adhesivos termoplásticos para la madera de uso no estructural, categorizándolos según sus clases de durabilidad, que van desde D1 hasta D4. Esta clasificación se basa en la resistencia de las líneas de cola en condiciones específicas de humedad y secado, con varios tratamientos de acondicionamiento. La Tabla 4 muestra la clasificación de los adhesivos termoplásticos según su durabilidad.

Tabla 4: Clasificación de los adhesivos termoplásticos según su durabilidad

Durabilidad	Condiciones climáticas y campos de aplicación
D1	Uso interior, en el que el contenido de humedad de la madera no excede el 15 por ciento.
D2	Uso interior, con exposiciones cortas ocasionales a agua corriente o condensada y/o a la humedad alta ocasional, de modo que el contenido de humedad de la madera no excede el 18 por ciento.
D3	Uso interior, con exposiciones cortas frecuentes a agua corriente o condensada y/o alta exposición a la alta humedad. Uso exterior no expuesto a la meteorología.
D4	Uso interior, con exposiciones largas frecuentes a agua corriente o condensada. Uso exterior expuesto a la meteorología, pero con la protección de un recubrimiento superficial adecuado.

Fuente: Adaptado de la norma UNE-EN 204 (AENOR, 2016)

El producto PVAc 3339, comercializado por la empresa Akzo Nobel Perú S.A.C. (2016), es un adhesivo de clase D3 que cumple con la norma UNE-EN 204 (AENOR, 2016) y está diseñado específicamente para la industria de segunda transformación de la madera. Se presenta en forma líquida, de color blanco, con una viscosidad de 7000 a 16000 cP a 25°C, un pH de 2 a 4 y un contenido de sólidos en el rango de 55 a 58 por ciento, determinado durante la fabricación. Además, de acuerdo con la ficha técnica del adhesivo se recomienda que el contenido de humedad óptimo para lograr un buen desempeño está en el rango de 5 a 14 por ciento. Después del fraguado, el adhesivo puede soportar altas temperaturas durante cortos periodos de tiempo. Además, se debe tener en cuenta el valor inferior del pH, ya que este se encuentra fuera del rango de 2,5 a 11 indicado por Iwakiri (2005), lo cual podría causar la degradación de las fibras de la madera.

2.3.2. Emulsión polimérica de isocianato (EPI)

Los isocianatos son los adhesivos termorígidos más utilizados para el encolado de la madera (Conner, 2001). Este adhesivo es un bicomponente, constituido por la combinación de una base de VAM y difenilmetanodiisocianato (MDI); este último, tiene como función catalizar la reacción de curado del adhesivo, la cual ocurre por reacción de los grupos isocianatos con los hidroxilos de la madera (Da Fonte, 2016).

La coloración del adhesivo EPI es blanca, pero su catalizador presenta una coloración marrón; ambos componentes forman una línea de cola incolora. Además, para alcanzar una buena calidad de encolado es necesario aplicarlo a una elevada presión (Conner, 2001).

El adhesivo EPI presenta flexibilidad, buena estabilidad, buena resistencia a temperaturas elevadas y a la humedad. El tiempo de curado de la cola es rápido, el cual permite tener un rápido procesamiento y una mayor productividad. Además, el adhesivo EPI genera cero emisiones de formaldehído y otros gases que sean dañinos para el ambiente (Zimmerman, 2006).

El producto EPI 1911, comercializado por la empresa Akzo Nobel Perú S.A.C. (2010), es un adhesivo bicomponente, que se activa con el endurecedor HARDENER 1999 de isocianato, que es usado para el encolado de madera, y su línea de cola presenta una alta resistencia al calor y a los solventes. Se distribuye en forma líquida, de color blanco, con una viscosidad de 8000 a 15000 cP a 25°C, un pH de 7 a 8,5 y un contenido de sólidos de 42 a 46 por ciento, determinado durante la fabricación. Además, de acuerdo con la ficha técnica del adhesivo se recomienda que el contenido de humedad óptimo para lograr un buen desempeño está en el rango de 8 a 15 por ciento.

El adhesivo EPI debido a que es un producto bicomponente, la relación de mezcla recomendada por la empresa Akzo Nobel Perú S.A.C. es de 100:15; es decir, 100 partes por peso de adhesivo EPI 1911 y 15 partes por peso el endurecedor HARDENER 1999. Estos componentes deben ser mezclados durante un tiempo de 30 segundos utilizando un mezclador eléctrico o 2 minutos manualmente, hasta lograr una mezcla homogénea (Akzo Nobel Perú S.A.C., 2010).

2.4. Comportamiento de la madera en el encolado

2.4.1. Características anatómicas de la madera

Marra (1992) menciona que la importancia de la influencia de la madera se centra en los efectos en el movimiento del adhesivo hacia el interior de la estructura de madera, es decir, con relación a la penetración. Tanto Marra (1992) como Iwakiri (2005) coinciden en que la anatomía de la madera desempeña un papel fundamental en la calidad de las uniones de las piezas; esta influencia se debe a las dimensiones, distribución y frecuencia de las células que constituyen la madera que están relacionadas con la porosidad y permeabilidad. Así como también, los anillos de crecimiento (madera temprana y tardía), porcentaje de albura y duramen, madera de reacción, grano, fibras, parénquima, radios y tilosis.

El mayor diámetro tangencial de poros de una madera puede facilitar la entrada del adhesivo en la célula, haciendo que ambas interaccionen, formando una mejor adherencia y resistencia (Albino *et al.*, 2012). Asimismo, Marra (1992) señala que el grano entrecruzado provoca una penetración excesiva, lo que resulta en una línea de cola “débil” en la unión de las juntas.

La porosidad y la permeabilidad de la madera varían según la especie, las piezas y la dirección. Dado que no hay dos piezas de madera iguales, cada una se comportará de manera única y, por ende, no se pegarán de la misma manera. Por lo tanto, los adhesivos deben abordar estas diferencias individuales tanto en la formación como en el rendimiento del enlace (Marra, 1992).

2.4.2. Propiedades físicas de la madera

- *Contenido de humedad*

El contenido de humedad y su distribución, dentro y entre capas individuales de la madera a ser encolada, influyen en la formación y comportamiento del enlace madera-adhesivo. Por lo tanto, cuanto menor sea el contenido de humedad de la madera, mayor será la tasa de absorción, velocidad de curado y solidificación del adhesivo (Iwakiri, 2005).

Bandel (1991) afirma que las maderas con bajo contenido de humedad pueden presentar una absorción excesiva de adhesivo o incluso una deficiente unión de cola, además de requerir tiempos de apertura más cortos. Además, Nock & Richter (1978) mencionan que el adhesivo tiende a curar más rápido cuando el contenido de humedad es bajo, ya que tiende a penetrar más en la madera, alejándose de la línea de cola.

En contraste, las maderas con un alto contenido de humedad pueden obstruir la entrada del adhesivo en la madera, ya que los lúmenes están llenos de agua, lo que resulta en un endurecimiento lento del adhesivo durante el proceso del encolado; esto retrasa la formación de la línea de cola y prolonga el tiempo de prensado, e incluso puede inhibir la adhesión (Bandel, 1991). Además, Selbo (1975) señala que la curación y el secado de la línea de cola serán deficientes y de baja resistencia, lo que puede dar lugar a la formación de burbujas de vapor durante el prensado.

Bandel (1991), menciona que el contenido de humedad ideal de la madera para realizar el encolado debe encontrarse entre 2 a 12 por ciento, siendo recomendado de 8 a 12 por ciento para el prensado en frío. Iwakiri (2005) describe que el contenido de humedad de la madera debe estar por debajo del 20 por ciento para que ocurra la interacción del adhesivo con el sustrato; cuanto menor sea este contenido de humedad, más estable será la línea de cola.

La madera que ha sido secada en horno hasta alcanzar aproximadamente el contenido de humedad promedio previsto para el encolado aún puede presentar diferentes niveles de contenido de humedad entre tablas e incluso dentro de tablas individuales; obteniendo mejores resultados cuando las diferencias no son mayores a aproximadamente el 5 por ciento para especies de menor densidad y al 2 por ciento para especies de alta densidad (Vick, 1999).

- *Densidad básica y aparente*

La densidad de la madera presenta una relación inversa con la porosidad y la capacidad de penetración del adhesivo (Iwakiri, 2005). Pizzi & Mittal (2010) mencionan que, para las densidades bajas, el adhesivo es absorbido completamente por la madera, lo que resulta en la formación de uniones deficientes que son propensas a fallar en la línea de cola, impactando directamente en la resistencia adhesiva. Asimismo, Iwakiri (2005) señala que en maderas de

baja densidad ocurre una mayor penetración del adhesivo, resultando en una línea de cola “débil” (Iwakiri, 2005).

Las maderas de densidad alta son difíciles de encolar debido a que las paredes de las células son gruesas y los lúmenes estrechos, lo que limita la penetración de adhesivos a una o dos células de profundidad (USDA *et al.*, 1999). Marra (1992) señala que a medida que aumenta la densidad de la madera, también aumenta el estrés en la línea de cola. La resistencia de los enlaces adhesivos con la madera aumenta con la densidad hasta un rango de 0,7 a 0,8 g/cm³: sin embargo, por encima de este nivel, la resistencia de la unión comienza a disminuir (Vick, 1999).

Marra (1992) y Glass & Zelinka (2010) mencionan que la densidad de la madera varía entre especies, dentro de una misma especie y en una misma pieza. Esta variación dentro de una especie se debe a características anatómicas como la proporción de albura temprana a albura tardía y duramen a albura, así como la presencia de minerales y sustancias extraíbles que influyen en la densidad. Se considera apropiado un coeficiente de variación de alrededor de 10 por ciento para describir la variabilidad de la densidad en estado seco al horno dentro de especies domésticas comunes (Glass & Zelinka, 2010).

- *Variación dimensional*

La Junta Del Acuerdo de Cartagena (JUNAC, 1979) y Marra (1992), indican que la madera experimenta contracción y expansión en diferentes proporciones en sus tres direcciones principales. En general, la contracción en la dirección tangencial tiende a ser aproximadamente el doble de la contracción en la dirección radial, aunque esta relación puede variar entre especies. Por otro lado, Además, la contracción longitudinal normalmente es insignificante, con un valor que apenas alcanza el 0,1 a 0,2 por ciento, excepto para las maderas de tensión y compresión.

La variación dimensional en la madera se da principalmente en sus tres direcciones, siendo estas longitudinal, radial y tangencial. La contracción longitudinal usualmente oscila de 0,1 a 0,3 por ciento, la contracción radial varía aproximadamente de 3 a 6 por ciento y la contracción

tangencial varia de 6 a 12 por ciento para la mayoría de las maderas en el mismo rango de humedad (Skaar, 1988).

Glass & Zelinka (2010) mencionan que la contracción de la madera se ve influenciada por múltiples variables, indicando que un coeficiente de variación de alrededor de 15 por ciento caracteriza la variabilidad de la contracción de la madera. Asimismo, mencionan que la mayor contracción está vinculada a una mayor densidad de la madera; no obstante, la geometría y la velocidad de secado pueden influir en la contracción de algunas especies.

La JUNAC (1979), mencionan una clasificación para la estabilidad dimensional de la madera en base a la relación T/R, indicando que los valores menores a 1,5 son considerados como Muy bajo (Muy estable), el rango de 1,5 a 2 como Bajo (Estable), el rango de 2,01 a 2,5 como Media (Moderadamente estable), el rango de 2,51 a 3 como Alta (Inestable) y mayores a 3 como Muy Alta (Muy inestable).

2.4.3. Propiedades químicas de la madera

- *Extractivos totales*

Los extractivos ocupan entre 1 a 10 por ciento en la composición química de las maderas latifoliadas, se generan en las células de parénquima conectadas con los vasos y son ricos en componentes alifáticos, las oleorresinas en terpenoides y también en compuestos fenólicos que se acumulan en el duramen (Gonzales, 2013). Estos extractivos incluyen depósitos de minerales como sílice, sales de calcio, fosfatos y oxalatos, junto con una amplia variedad de sustancias orgánicas como aceites, grasas, gomas, flavonoides, antocianinas, taninos, polifenoles, azúcares, almidón, entre otros (Duran, 2014).

Los extractivos ejercen influencia sobre diversas propiedades de la madera, como su color, olor, sabor, fluorescencia, durabilidad, inflamabilidad, relaciones de humedad, pulpeado y otras propiedades (Tsoumis, 1968). Además, los autores Tsoumis (1968) y Fonseca (2006), mencionan que estas variaciones no se limitan únicamente entre especies, sino que también se presentan dentro de un mismo árbol, principalmente entre la albura y duramen; así como en diferentes épocas del año y condiciones de crecimiento, entre otros factores.

La presencia de extractivos en la madera puede interferir en las reacciones de polimerización del adhesivo o provocar una reacción entre el adhesivo y el extractivo, lo que afectará directamente a la calidad del encolado (Lima *et al.*, 2007). La presencia de extractivos en exceso o de extractivos apolares (terpenos y ácidos grasos) y las condiciones superficiales de la madera al ser encolada pueden afectar el contenido de humedad en la madera, lo que dificulta que el adhesivo recubra la superficie sub-microscópica de la madera durante el proceso de encolado (Iwakiri, 2005).

Pizzi & Mittal (2010) recomienda la realización de un lijado en las superficies a encolar, ya que este proceso elimina la presencia de extractivos hidrofóbicos, creando superficies hidrofílicas que favorecen en el proceso de encolado.

- *pH*

El pH de la madera es una característica primordial que influye en el comportamiento de cualquier tipo de adhesivo que sea utilizado para la unión de maderas, ya que la madera tiene una capacidad tampón muy elevada, puede verse afectada por el medio ácido o básico en el cual el adhesivo se fragüe (Rowell, 2005).

Marra (1992) e Iwakiri (2005), menciona que el pH de la madera varía según la especie, generalmente el pH se encuentra en el rango de 3 a 6; sin embargo, dentro de una pieza de madera pueden ocurrir cambios debido a la migración de extractivos de capas más internas hacia capas superficiales, alterando así las condiciones de adhesión.

Iwakiri (2005) destaca que el pH de los extractivos presentes en la madera pueden inhibir las reacciones químicas de endurecimiento del adhesivo, lo que perjudica el desarrollo de la resistencia y cohesión adecuadas en la línea de cola.

- *Contenido de cenizas*

Klock & Sulato (2013) señalan que el material orgánico comúnmente se denomina extractivos, mientras que la parte inorgánica se conoce como ceniza; la cual se analiza mediante la incineración del material orgánico de la madera a 600-850°C. Los principales componentes de

las cenizas de la madera son: K, Ca y Mg, los cuales se obtienen durante la incineración en forma de óxidos (Sjöström, 1993).

El porcentaje de cenizas en maderas de zonas templadas suele oscilar entre 0,1 y 0,5 por ciento, a diferencia de las maderas de zonas tropicales con frecuencia se encuentran valores más altos (Iwakiri, 2005; Klock & Sulato, 2013). Tsoumis (1968) indica que el contenido de cenizas en coníferas varía de 0,2 a 1,1 por ciento, mientras que en latifoliadas oscila entre 0,1 y 5,4 por ciento. Gonzales (2013) respalda esta información al afirmar que el contenido de cenizas en coníferas suele ser generalmente inferior al 2 por ciento, y en latifoliadas, menor al 5 por ciento.

Iwakiri (2005) señala que el contenido de cenizas en la madera no afecta directamente el rendimiento de la unión adhesiva; sin embargo, su influencia se refleja en la formación y rendimiento de la línea de cola, la cual está relacionada principalmente con la exposición de áreas con mayor o menor concentración de extractivos en la superficie de la madera a ser encolada. Además, Iwakiri (2005) aclara que las concentraciones más altas de extractivos pueden afectar al pH y las características de trabajabilidad de la madera debido a la presencia de minerales como sílice y su efecto en el desgaste excesivo de las herramientas de corte.

El coeficiente de variación proporciona una indicación de la precisión del experimento; por lo tanto, al observar los coeficientes de variación comúnmente obtenidos en los ensayos de la madera, se consideran bajos cuando son inferiores al 10 por ciento, medios cuando se sitúan entre 10 a 20 por ciento, altos cuando oscilan entre 20 a 30 por ciento, y muy altos cuando superan el 30 por ciento (Pimentel, 2000).

2.5. Influencia de los adhesivos en el encolado

Las propiedades de los adhesivos que ejercen mayor influencia son: viscosidad, contenido de sólidos, densidad y pH. Sin embargo, la reactividad del adhesivo también puede ser de interés para la caracterización de los adhesivos, ya que determina la velocidad en que la resina se convierte en una estructura sólida de manera irreversible (Bandel, 1991).

Los adhesivos pueden transferir eficientemente las tensiones, aumentando la resistencia y rigidez del compuesto; las fuerzas físicas de atracción, como las fuerzas de Van Der Waals, las fuerzas de London y los enlaces de hidrógeno, son importantes para la formación de enlaces entre polímeros adhesivos y estructuras moleculares de la madera, siendo los enlaces de hidrógeno los más relevantes (Vick, 1999).

- *Viscosidad del adhesivo*

La viscosidad de los adhesivos es una propiedad crucial que sirve como parámetro de calidad del adhesivo para su uso y que influye en el rendimiento del producto encolado; la viscosidad se puede definir como la resistencia al flujo libre entre capas de un material, o como la magnitud que caracteriza la existencia de fricción entre moléculas de un fluido y que se manifiesta a través del flujo (Iwakiri, 2005).

Almeida (2013) señala que una alta viscosidad del adhesivo puede causar dificultades en su distribución sobre la superficie debido a su baja fluidez; y las condiciones inadecuadas de humedad y una baja penetración del adhesivo en la estructura capilar de la madera pueden resultar en una línea de cola más gruesa, lo que lleva a una unión deficiente en el sistema madera – adhesivo y una calidad inferior en el encolado.

Por otro lado, una baja viscosidad puede permitir una mayor penetración del adhesivo y una mayor absorción, lo que podría llevar a la formación de una línea de cola “débil” en situaciones extremas (Iwakiri, 2005). Prata (2010) señala que una baja viscosidad del adhesivo no siempre indica un mayor contenido de agua, ya que existen adhesivos con altos contenidos de sólidos, pero con baja viscosidad.

- *pH del adhesivo*

Iwakiri (2005) indica que el pH del adhesivo debe mantenerse dentro del rango de 2,5 a 11; los valores fuera de este rango pueden provocar la degradación de las fibras de la madera. Por otro lado, el mismo autor menciona que, si el pH es demasiado bajo puede ocasionar la formación de excesiva espuma, lo que perjudica el rendimiento del adhesivo.

El control del pH es esencial, ya que esta propiedad influye en la velocidad, el grado de reacciones y las configuraciones de las moléculas, así como en la vida útil del adhesivo (Marra, 1992). Cada tipo de adhesivo se formula con un pH específico para lograr una solubilidad, velocidad y grado de solidificación particulares (Iwakiri, 2005).

Las maderas con alto contenido de extractivos suelen adherirse mejor con adhesivos altamente alcalinos; esto se debe a que los adhesivos alcalinos tienden a hinchar y abrir la estructura de la pared celular. Por lo tanto, los adhesivos con un alto pH tienen una mayor probabilidad de lograr una fuerte unión con la madera (Marra, 1992).

- *Contenido de sólidos del adhesivo*

Iwakiri *et al.* (2005), mencionaron que el contenido de sólidos está definido como la cantidad de sustancias sólidas que forman la línea de cola propiamente dicha, después de la volatilización de los constituyentes líquidos del adhesivo, siendo la línea de cola responsable de la interacción entre sustratos y transferencia de tensiones generadas en el sistema madera-adhesivo. Además, cuanto mayor es la cantidad de agua, menor será el porcentaje de contenido de sólidos en el adhesivo, y más lenta será la velocidad de formación de la línea de cola, debido al tiempo de evaporación del agua (Bandel, 1991).

Almeida (2013) indica que un bajo contenido de sólidos puede perjudicar la unión de las juntas, no solo debido a la escasez de material sólido en la línea de cola, sino también por el exceso de componentes volátiles que se liberan durante el prensado, lo que podría generar que las uniones se separen.

2.6. Paneles encolados lateralmente (EGP)

Los paneles EGP se fabrican a partir de listones de madera unidos por sus cantos y extremos, estas uniones conforman un elemento que se comporta como una sola unidad estructural, ya que tiene propiedades mecánicas particulares (dependiendo de los materiales y las condiciones del proceso) y superiores a la madera maciza (Londoño & Sepúlveda, 2013).

Los listones para la manufactura de paneles EGP pueden ser enteros, o presentar uniones en sus extremos de tipo finger joint. Normalmente, no se aplica ningún revestimiento a los paneles EGP, pues el efecto decorativo es dado por el propio diseño de la madera y/o por las mismas enmiendas (ABIMCI, 2008). Sin embargo, en la fabricación de muebles, pueden aplicarse selladores, barnices o ceras, tales acabados que mejoren el color natural de la madera (Martins, 2011).

Por la alta demanda de madera, los paneles EGP están ganando un espacio en el mercado, ya que utilizan pedazos de madera provenientes de residuos, de modo que brinda un producto final de gran valor agregado. Asimismo, lo que era inutilizado se transforma en un producto valioso, siendo una técnica bastante ecoeficiente y sustentable (Foelkel, 2008).

2.6.1. Calidad del encolado de listones de madera

Londoño & Sepúlveda (2013) señalan que la unión de la madera con adhesivos es un proceso crítico que influye en la calidad de los paneles EGP; este proceso radica en la determinación de las pruebas a realizar, ya que las condiciones de proceso, como la aplicación de presión y temperatura en tiempos específicos, se llevan a cabo para homogeneizar la junta y acelerar el fraguado del adhesivo.

Tirira & Proaño (2011) explican que este proceso implica unir los listones de madera totalmente saneados para evitar que los productos finales sean de baja calidad. Para la unión de los listones, se utiliza un adhesivo recomendado con un porcentaje de sólidos de aproximadamente 55 por ciento, aplicado en el canto del listón para garantizar una buena adherencia entre ellos.

La falla de la madera se refiere a la ruptura de las fibras de madera durante los ensayos de resistencia de la unión adhesiva de la madera (Vick, 1999). Según Iwakiri (2005), a medida que la resistencia de la línea de cola es mayor que la resistencia de la madera aumenta el porcentaje de falla de la madera en el interfaz con el adhesivo. Además, la norma EN-UNE 13353 (AENOR, 2023) establece que el promedio del porcentaje de falla en la madera en cada panel debe ser superior al 40 por ciento, excepto en el caso de maderas con una densidad superior a 0,60 g/cm³.

El conocimiento del comportamiento del encolado de especies maderables facilitará la incorporación de especies con potencial comercial a la industria forestal; estas especies están presentes en bosques primarios residuales como secundarios, y pueden diversificar la oferta maderable e introducir en el mercado especies poco conocidas (Gonzales, 2006).

2.6.2. Ensayos de resistencia al encolado lateral

Da Fonte (2016), evaluó el potencial de la madera de *Cryptomeria japonica* para en la fabricación de paneles EGP. Se probaron cuatro tipos de adhesivos: PVA D3, PVA D4, EPI y melamina úrea formaldehído (MUF), con diferentes gramajes (100, 120, 140, 160 y 180 g/m²), bajo los estándares las normas UNE-EN 13353 (AENOR, 2023) y UNE-EN 13354 (AENOR, 2009). Los resultados indicaron que los adhesivos EPI y MUF, con gramajes de 120 g/m² y 140 g/m², mostraron los mejores resultados en resistencia al cizallamiento. Se determinó que el adhesivo MUF presentó resistencia, y los gramajes óptimos fueron 140, 160 y 180 g/m², lo que sugiere que se pueden utilizar cantidades menores de adhesivo sin afectar la resistencia de las juntas. Se concluyó que los adhesivos EPI y MUF cumplieron con los requisitos para la fabricación de paneles de madera maciza, para todos los gramajes evaluados (100, 120, 140, 160 y 180 g/m²), según la norma UNE-EN 13353 (AENOR, 2023).

El estudio realizado por Almeida (2013) evaluó el potencial de uso de residuos de madera de seis especies tropicales para la producción de paneles EGP. Se utilizaron adhesivos PVA, EPI y poliuretano (PU) para el encolado lateral de las juntas, con gramajes de 150 y 200 g/m². Los resultados mostraron que los adhesivos EPI y PU son adecuados para la mayoría de las especies, excepto *Tabebuia spp.*, que presentó una resistencia inferior al corte con el adhesivo EPI. Además, todas las especies, excepto *Astronium lecointei* cumplen con las normas UNE-EN 13353 (AENOR, 2023) y UNE-EN 13354 (AENOR, 2009), de resistencia al cizallamiento para uso no estructural en paneles EGP.

Canchucaja (2020) realizó el estudio sobre los residuos de las especies *Cariniana domestica*, *Copaifera paupera* y *Cedrelinga cateniformis*, dónde evaluó sus características anatómicas, físicas y químicas, así como los adhesivos PVA y EPI utilizados en el proceso de encolado. Estos residuos fueron sometidos a ensayos de cizallamiento, flexión estática y tracción paralela. Los resultados sugieren que los residuos de estas especies son adecuados para la

fabricación de paneles EGP con adhesivo EPI para las uniones laterales y PVA para las uniones tipo finger joint, para uso no estructural, conforme a la norma UNE-EN 13353 (AENOR, 2023).

III. METODOLOGÍA

3.1. Lugar de ejecución

La identificación y colección de residuos maderables de las especies *Caryocar glabrum* y *Guarea guidonia*, el habilitado, encolado y prensado de listones de madera para la obtención de juntas encoladas; así como, la preparación de probetas para los ensayos de cizallamiento se realizó en la empresa Postes Wise S.A.C., ubicada en el distrito de Chaclacayo, departamento de Lima-Perú.

La caracterización anatómica de las especies en estudio se realizó en el Laboratorio de Anatomía de la Madera; la determinación de propiedades físicas de los residuos maderables en el Laboratorio de Productos Forestales; la caracterización química de la madera y de los adhesivos en el Laboratorio de Pulpa y Papel, y los ensayos de cizallamiento de las probetas en el Laboratorio de Ensayos Tecnológicos. Los laboratorios mencionados pertenecen a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria de la Molina (UNALM).

3.2. Materiales

3.2.1. Material de estudio

Se utilizaron residuos maderables de transformación secundaria de las especies *Caryocar glabrum* y *Guarea guidonia*; estos residuos presentaron espesores de 1 pulgada, anchos de 2 pulgadas y longitudes de 1 pie aproximadamente. Los residuos maderables fueron obtenidos de la empresa Postes Wise S.A.C.

3.2.2. Adhesivos

Para el encolado de las juntas se utilizaron los adhesivos PVA 3339 y EPI 1911 con el componente HARDENER 1999, ambos adhesivos fueron adquiridos en la empresa Akzo Nobel Perú S.A.C.

3.2.3. Materiales adicionales

- Agua destilada
- Sílica gel
- Lija N° 80
- Lápices de cera
- M-GLAS
- Porta y cubre objetos
- Cuchilla LEICA 819
- Alcohol 95 %
- Vasos descartables
- Espátulas
- Sargentas
- Alcohol isopropílico
- Papel toalla
- Guantes quirúrgicos

- Agua potable (La Molina)
- Otros

3.2.4. Equipos

- Micrómetro Mitutoyo
- Vaso precipitado
- Soporte universal
- Desecador
- Balanza digital
- Cronómetro
- Viscosímetro
- Prensa hidráulica
- Sierra circular
- Despuntadora
- Cepilladora
- Garlopa
- Wincha
- Regla y escuadra

- Lupa 10x
- Cuchilla
- Cámara fotográfica
- Mufla eléctrica Thermolyne 48000 Furnance
- Desecador
- Plancha calefactora Thermo Scientific
- Equipo de baño María
- Medidor de pH
- Prensa Universal “Tinius Olsen” y accesorios de cizallamiento
- Higrómetro de pines marca GANN
- Otros

3.3. Métodos

3.3.1. Caracterización anatómica de los residuos de madera

La caracterización anatómica de la madera se realizó de acuerdo con lo indicado en el manual de prácticas del Laboratorio de Anatomía de la Madera de la Facultad de Ciencias Forestales de la UNALM y en el Boletín de la IAWA-Asociación Internacional de Anatomistas de la Madera (IAWA, 1989), para la cual se prepararon 5 cubos de 2 cm aproximadamente para obtener cortes transversales en cada una de las maderas en estudio.

Se determinó el diámetro tangencial de poros y frecuencia de poros (cantidad de poros por mm^2) a partir de imágenes de los cortes transversales, capturadas con un microscopio Leica

modelo DM750 y una cámara Leica ICC50 W/E, a través del programa LAS EZ v.3.4. En la Figura 1 se muestra el ablandamiento de los residuos de madera y en la Figura 2 se aprecia las láminas histológicas con corte transversal de los residuos de madera.



Figura 1: Ablandamiento de muestras de los residuos de madera



Figura 2: Láminas histológicas de corte transversal de los residuos de madera

3.3.2. Determinación de propiedades físicas de residuos maderables

3.3.2.1. Densidad básica y aparente

Se determinó la densidad básica y aparente de los residuos de las dos especies en estudio siguiendo el procedimiento descrito en la NTP 251.011 (INACAL, 2014a).

Para obtener la densidad básica, se saturaron las probetas de madera sumergiéndolas en agua a temperatura ambiente en un recipiente durante un periodo de 45 días aproximadamente, a fin de que el contenido de humedad de las fibras supere el punto de saturación (30 por ciento). Se utilizaron 12 probetas de cada especie.

Adicionalmente, se determinó la densidad básica de las probetas, previamente sometidas a ensayos de resistencia al cizallamiento con pretratamiento en ambiente seco, a fin de evaluar la correlación entre la densidad básica y la resistencia al cizallamiento con los adhesivos PVA y EPI. La Figura 3 muestra los procesos para la determinación de la densidad básica y aparente de los residuos de madera.

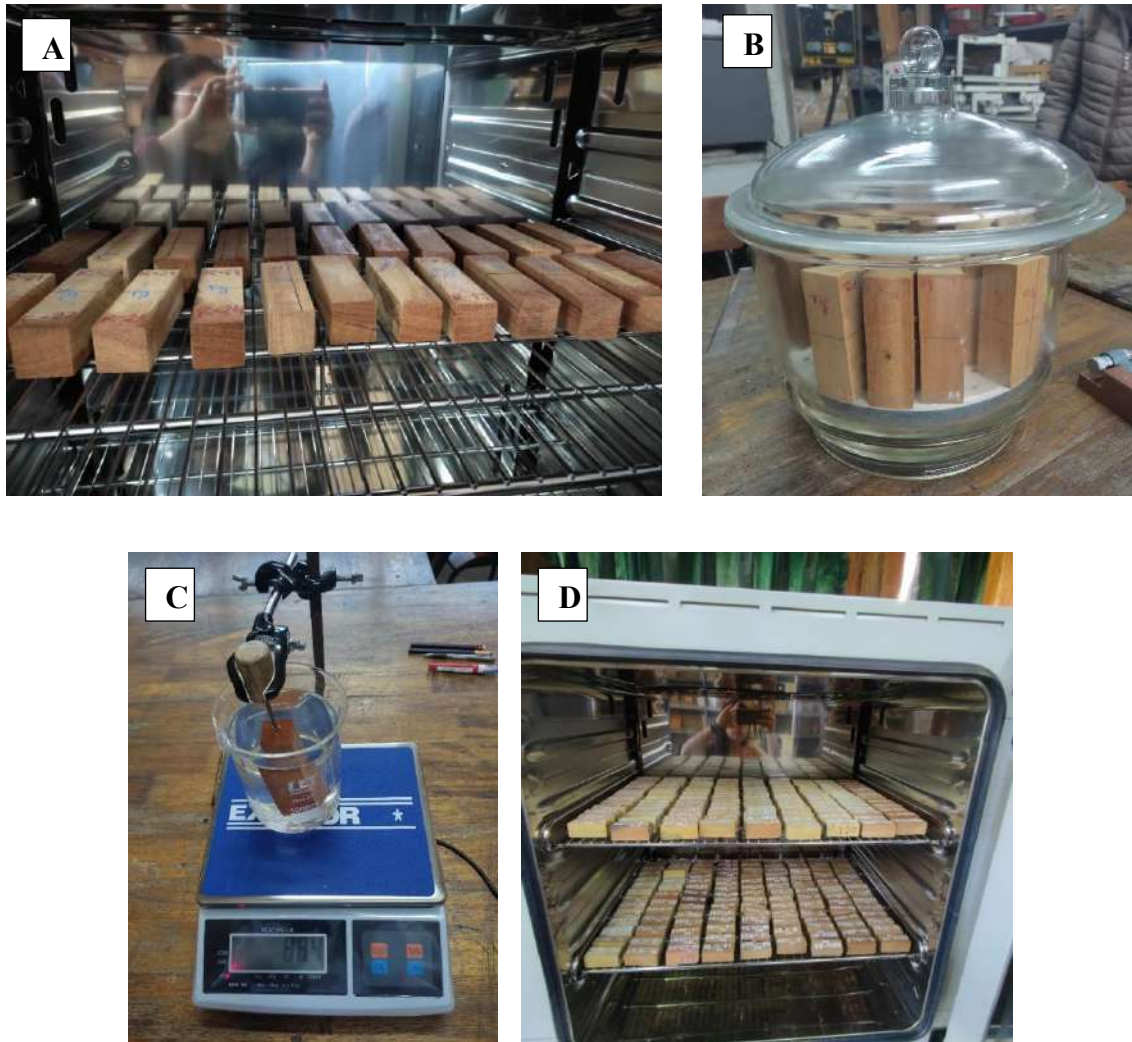


Figura 3: Determinación de la densidad básica y aparente de los residuos de madera

Nota: A-Secado de probetas en estufa; B-Probetas en desecador; C-Determinación del volumen de la probeta;
D- Secado en estufa de probetas previamente sometidas a ensayos de cizallamiento

3.3.2.2. Contenido de humedad

Se determinó el contenido de humedad, utilizando un higrómetro de pines, para verificar que los residuos maderables tuvieran el contenido de humedad adecuado antes del encolado. Adicionalmente a ello, se determinó el contenido de humedad mediante el método gravimétrico en estufa, según lo establecido en la NTP 251.010 (INACAL, 2014b).

Se llevaron a cabo un total de 12 repeticiones por especie, provenientes del mismo lote de listones de residuos maderables almacenados en similares condiciones de humedad relativa y temperatura.

3.3.2.3. Variación dimensional

La determinación de variación dimensional se efectuó en base a lo indicado en la NTP 251.012 (INACAL, 2015). Se utilizaron probetas de residuos maderables de cada especie para medir las contracciones radial, tangencial y longitudinal, así como la variación volumétrica. Además, se calculó la relación T/R. En la Figura 4 se aprecia el procedimiento para determinar la variación dimensional de los residuos de madera.



Figura 4: Determinación de la variación dimensional de los residuos de madera

Nota: A- Probetas para la determinación de la variación dimensional; B- Medición de probeta con micrometro

3.3.3. Determinación de las propiedades químicas de residuos maderables

Para la preparación de las muestras, se colectaron astillas de los residuos de madera, en base a los criterios señalados por las normas TAPPI T 257 sp-12 (TAPPI, 2012) y TAPPI T 264 cm-07 (TAPPI, 2007). Las propiedades analizadas incluyeron el contenido de extractivos totales, el pH y el contenido de cenizas; siguiendo los procedimientos establecidos en las normas TAPPI T 204 cm-17 (TAPPI, 2017), TAPPI T 252 om-16 (TAPPI, 2016a) y TAPPI T 211

om-16 (TAPPI, 2016b), respectivamente. En la Figura 5 se aprecian los procesos para la determinación de propiedades químicas de los residuos de madera.

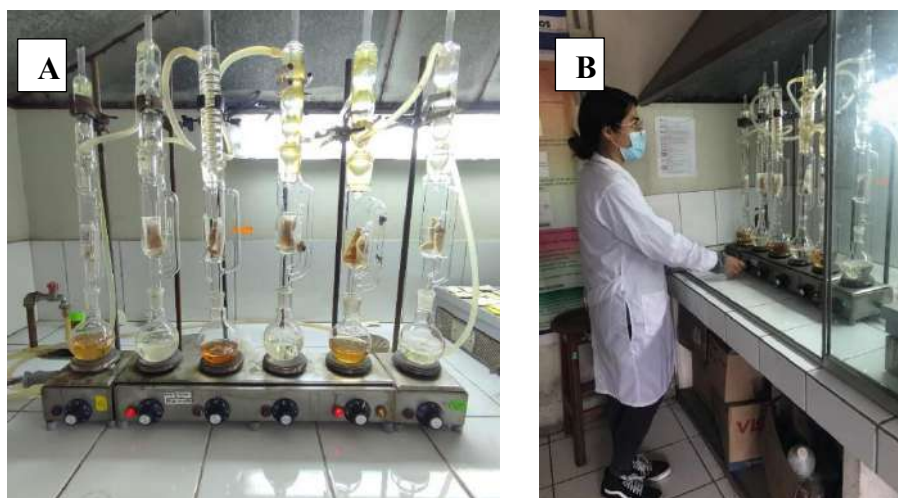


Figura 5: Determinación de propiedades químicas de los residuos de madera

Nota: A- Procedimiento para obtener contenidos de extractivos; B- Regulación de temperatura de la mufla THERMOLYNE

3.3.4. Determinación de las propiedades de los adhesivos

La caracterización de las propiedades de los adhesivos (PVA y EPI), como la viscosidad (Figura 6), contenido de sólidos y pH, fueron determinadas bajo los procedimientos establecidos en las normas ASTM D 1084-97 (ASTM, 1998), UNE-EN 827 (AENOR, 2006) y UNE-EN 1245 (AENOR, 2011), respectivamente.

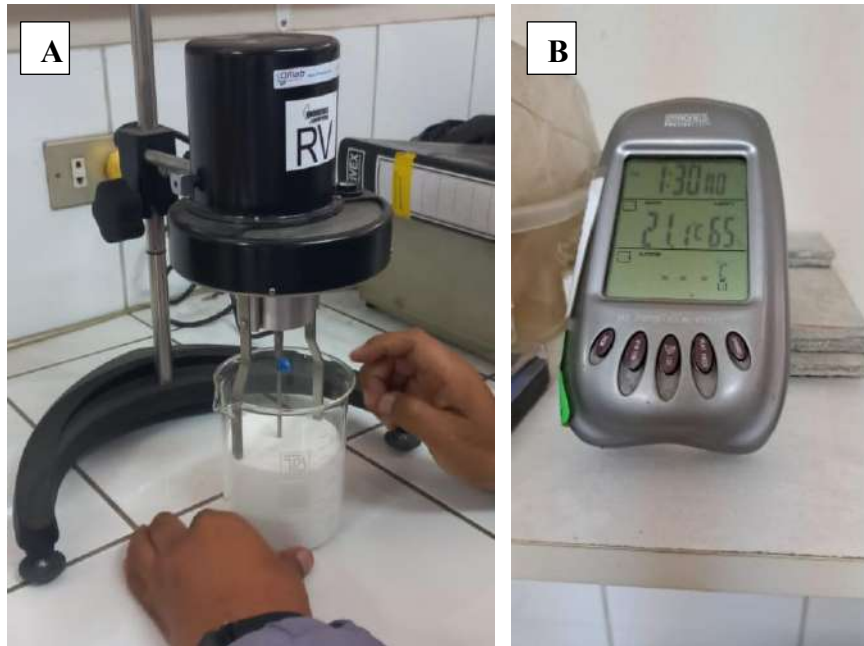


Figura 6: Determinación de la viscosidad de los adhesivos

Nota: A- Viscosímetro Brookfield; B- Registro de condiciones normales del ambiente

3.3.5. Procesamiento de los residuos maderables

Los residuos maderables colectados fueron recortados en listones de 20 mm de espesor, 50 mm de ancho y 300 mm de largo (Figura 7). Durante esta etapa, se eliminaron los defectos estructurales como grietas, rajaduras, trizados, entre otros. Cabe de mencionar que, para la presente investigación, no se consideró la disposición precisa de las caras de corte (tangencial, radial y transversal) de los listones.



Figura 7: Listones obtenidos a partir de los residuos de madera

3.3.6. Producción de juntas encoladas

Los listones de madera fueron cepillados en un canto, máximo 24 horas antes del encolado, para asegurar una superficie adecuada para la adhesión. Posteriormente, se llevó a cabo la medición del contenido de humedad de los listones de madera utilizando un higrómetro de pines antes de proceder al encolado, con el fin de verificar que los listones de madera estuvieran dentro de los rangos permitidos, que son de 5 a 14 por ciento para el adhesivo PVA 3339 (Akzo Nobel Perú S.A.C., 2016) y de 8 a 15 por ciento para el adhesivo EPI 1911 (Akzo Nobel Perú S.A.C., 2010).

Los listones de madera se encolaron lateralmente en pares, para cada especie y la combinación de ambas, se tomó en cuenta los dos adhesivos (PVA y EPI) y tres gramajes (120, 150 y 180 g/m²).

El proceso consistió en aplicar el adhesivo en el canto de uno de los listones que formaban el par, con ayuda de una espátula de metal para distribuir uniformemente el adhesivo sobre el canto del listón. Seguidamente, se realizó un prensado en frío aplicando una presión específica de 0,8 MPa. Asimismo, de acuerdo con lo señalado en las fichas técnicas de los adhesivos utilizados, el tiempo efectivo de prensado para los pares de listones encolados con PVA fue de 5 minutos y de 80 minutos para EPI. Ambos adhesivos tuvieron un tiempo de curado o fraguado de 24 horas. En la Figura 8 se muestra el encolado y prensado de los listones, mientras

que en la Figura 9 se aprecia el flujograma para la elaboración de juntas encoladas lateralmente.



Figura 8: Encolado y prensado de los listones

Notas: A-Pesaje del adhesivo; B-Unión de listones; C-Control de presión; D- Ajuste de brazos hidráulicos de la prensa

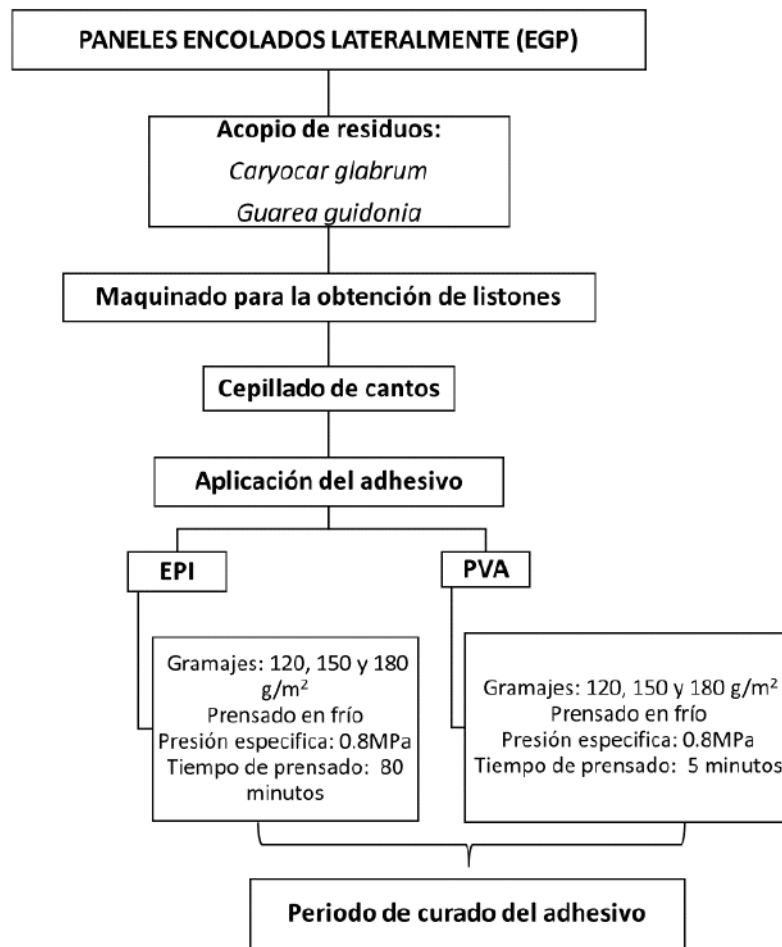


Figura 9: Flujograma para la elaboración de juntas encoladas lateralmente

3.3.7. Preparación de probetas para prueba de cizallamiento

Las juntas encoladas elaboradas fueron maquinadas para obtener probetas, de acuerdo con la norma UNE-EN 13354 (AENOR, 2009), siguiendo la forma y dimensiones establecidas para tableros de madera maciza monocapa, las cuales fueron utilizadas para los ensayos de cizallamiento en la línea de cola. Se prepararon un total de 10 (diez) probetas por cada pretratamiento.

En la Figura 10 se muestran los listones con juntas laterales encoladas y las probetas preparadas para el ensayo de cizallamiento.



Figura 10: Listones con juntas laterales encoladas y probetas preparadas para el ensayo de cizallamiento

Notas: A-Combinaciones de juntas encoladas; B-Revisión de medidas de las probetas

3.3.8. Ensayos de cizallamiento en la línea de cola

Para los ensayos de cizallamiento, se empleó una máquina de ensayos mecánicos TINUS OLSEN, la cual estaba equipada con un dispositivo cortante ajustable a las probetas. Se siguieron los pretratamientos indicados en la norma UNE-EN 13354 (AENOR, 2009), de acuerdo con las condiciones de uso. En la Tabla 5 se muestran las indicaciones para los pretratamientos.

Tabla 5: Acondicionamiento según uso previsto en ambiente seco y húmedo

Acondicionamiento		Descripción
Con Tratamiento	SWP/1 Ambiente seco	24 h de inmersión en agua fría (20±3) °C
	SWP/2 Ambiente húmedo	6 h de inmersión en agua hirviendo, enfriamiento al menos durante 1 h en agua (20±3) °C

Fuente: Norma UNE-EN 13354 (AENOR, 2009)

Los ensayos se llevaron a cabo siguiendo los procedimientos establecidos en la norma UNE-EN 13354 (AENOR, 2009), empleando una velocidad de carga constante para garantizar que la probeta se rompa dentro de un periodo de tiempo de 60 ± 30 segundos. Los valores obtenidos se compararon con los requisitos especificados en la norma UNE-EN 13353(AENOR, 2023).

Para esto, se determinó el 5° percentil inferior de resistencia al cizallamiento de las probetas ensayadas, utilizando el método indicado en la norma UNE-EN 326-1(AENOR, 1995).

Se realizó la evaluación del porcentaje de fibras arrancadas en la superficie encolada de las probetas ensayadas, según la norma UNE-EN 314-1 (AENOR, 2007). Además, según la norma UNE-EN 13353 (AENOR, 2023), se establece como requisito que el porcentaje de falla de madera deberá ser mayor del 40 por ciento, a menos que la densidad aparente de la madera utilizada sea mayor de $0,60 \text{ g/cm}^3$. En la Figura 11 se aprecia el procedimiento realizado para el ensayo de cizallamiento.

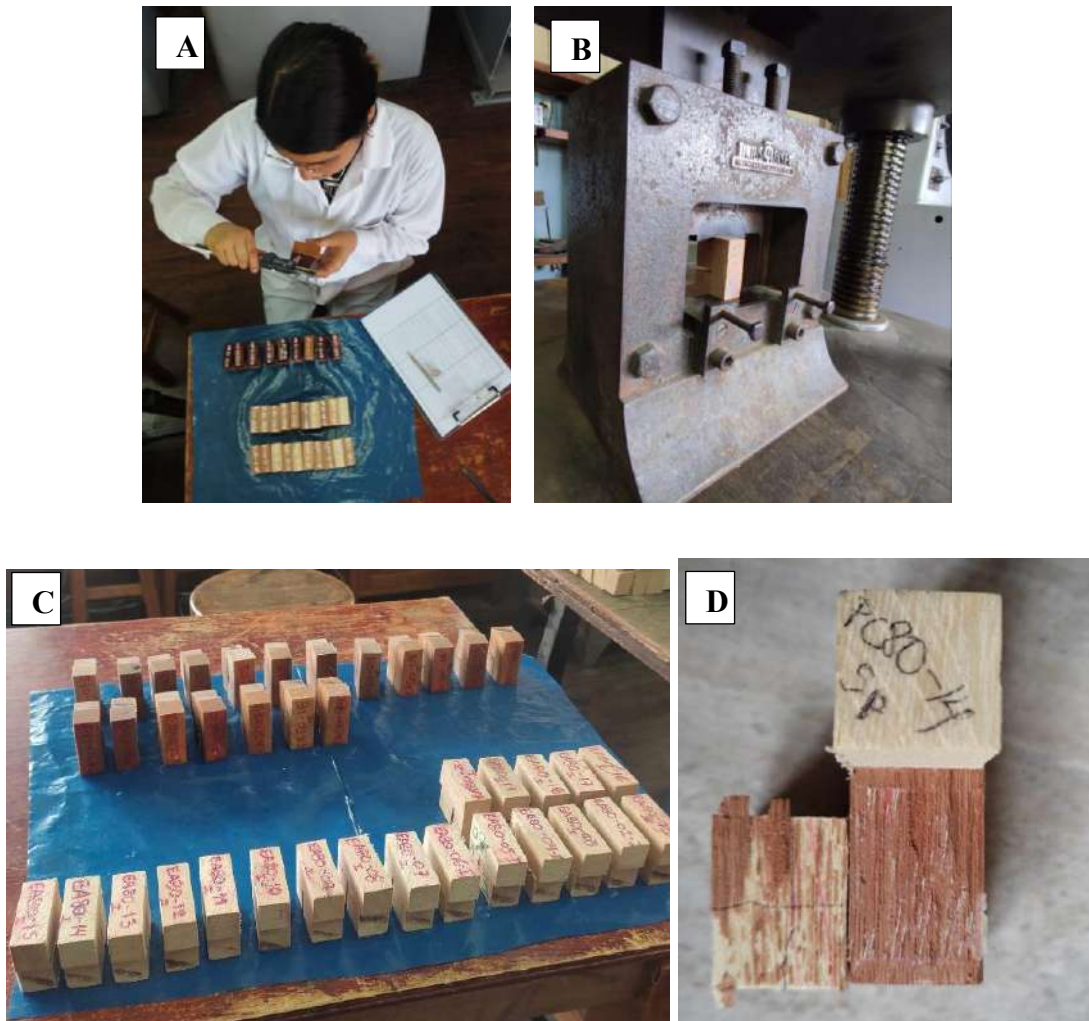


Figura 11: Ensayo de cizallamiento

Notas: A-Medición de dimensiones de probetas; B- Dispositivo cortante ajustable a las probetas; C- Probetas para ensayos de cizallamiento; D- Evaluación de porcentaje de fallas

3.3.9. Diseño experimental y análisis estadístico

En el análisis de las características anatómicas de los residuos de las dos especies estudiadas, para la frecuencia y diámetro tangencial de poros se calcularon los valores promedio y rangos. En cuanto a las propiedades físicas y químicas de los residuos, se calculó el promedio y el coeficiente de variación. Además, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para la comparación de medias entre las especies, seguido de la prueba *Tukey* con un nivel de confianza del 95 por ciento, en los casos en los que se encontraron diferencias significativas

en al menos una media. En relación con los resultados de las propiedades de los adhesivos utilizados, se determinaron los valores promedio y coeficientes de variación correspondientes.

Para el análisis de los resultados de los ensayos de cizallamiento, se determinó el valor promedio, el 5° percentil inferior y el coeficiente de variabilidad. Además, se calculó el valor promedio del porcentaje de falla de la madera. En el caso de los pretratamientos, se realizó un análisis de varianza (ANOVA), utilizando un diseño factorial 3x2x3, considerando los factores de especie, adhesivo y gramaje. Para la comparación de las medias, se empleó la prueba *Tukey* con un nivel de confianza del 95 por ciento, empleando el programa estadístico R versión 4.3.2. El diseño experimental utilizado se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6: Diseño experimental de los ensayos de cizallamiento del encolado lateral

Juntas encoladas	Adhesivo	Gramaje (g/m²)	Pretratamiento	Nro. de probetas/PT
<i>Caryocar glabrum</i>	PVA	120	AS,AH	10
		150	AS,AH	10
		180	AS,AH	10
	EPI	120	AS,AH	10
		150	AS,AH	10
		180	AS,AH	10
<i>Guarea guidonia</i>	PVA	120	AS,AH	10
		150	AS,AH	10
		180	AS,AH	10
	EPI	120	AS,AH	10
		150	AS,AH	10
		180	AS,AH	10
<i>Caryocar glabrum/ Guarea guidonia</i>	PVA	120	AS,AH	10
		150	AS,AH	10
		180	AS,AH	10
	EPI	120	AS,AH	10
		150	AS,AH	10
		180	AS,AH	10

Nota: AS-ambiente seco; AH-ambiente húmedo; PT-pretratamiento

Además, se utilizó el coeficiente de correlación de *Pearson* para determinar el grado de correlación entre la densidad básica y la resistencia al cizallamiento, así como entre el contenido de humedad y la resistencia al cizallamiento; considerando el pretratamiento para uso en ambiente seco. De esta manera, se buscaba comprender cómo estas variables están interrelacionadas y si existen patrones significativos que puedan influir en la resistencia al cizallamiento de los residuos de madera.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización anatómica de los residuos de madera

A continuación, se describen los resultados obtenidos en la caracterización anatómica de los residuos de las especies estudiadas:

- Especie: *Caryocar glabrum* (Aublet) Persoon
 - Latifoliada.
 - Olor típico a almendras.
 - Albura de color amarillo muy pálido y duramen cambia gradualmente a un color amarillo.
 - Grano entrecruzado.
 - Textura media a gruesa.
 - Brillo naturalmente moderado.
 - Porosidad difusa.
 - Poros solitarios y múltiples radiales cortos.
 - Parénquima axial apotraqueal difuso y/o difuso en agregados.
 - Radios heterogéneos y/o radios heterogéneos multiseriados.
 - Tilosis moderada.

- Frecuencia de poros (poros/mm²): promedio 7; mínimo 3 y máximo 10.
- Diámetro tangencial de poros (μm): promedio 194; mínimo 133 y máximo 287.

En la Figura 12 se aprecia la sección transversal de la madera *Caryocar glabrum*, de 1 mm².

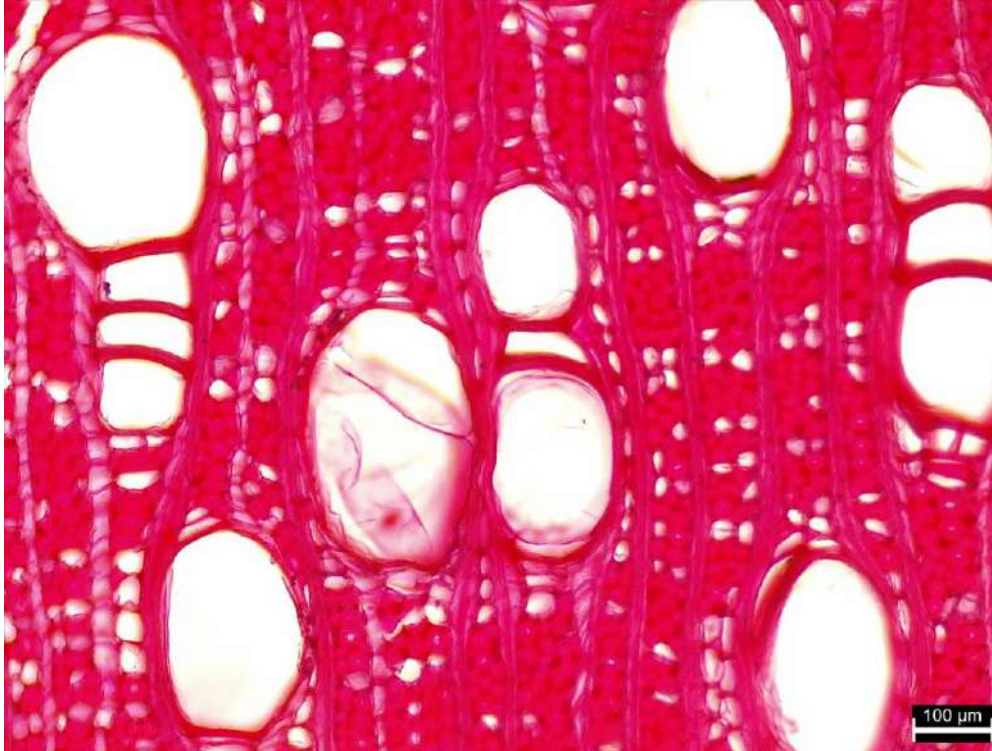


Figura 12: Fotografía de la sección transversal de la madera *Caryocar glabrum*, de 1 mm²

- Especie: *Guarea guidonia* (L.) Sleumer
 - Latifoliada.
 - Olor agradable.
 - Albura de color blanco amarillento y duramen de color castaño rosáceo.
 - Grano mayormente recto.
 - Textura media a gruesa.

- Brillo moderado.
- Porosidad difusa.
- Poros solitarios y múltiples radiales cortos.
- Parénquima axial oblicuo y/o sinuoso.
- Radios exclusivamente uniseriados.
- Presencia de sílice.
- Frecuencia de poros (poros/mm²): promedio 5; mínimo 3 y máximo 9.
- Diámetro tangencial de poros (μm): promedio 187; mínimo 134 y máximo 228.

En la Figura 13 se muestra la sección transversal de la madera *Guarea guidonia*, de 1 mm².

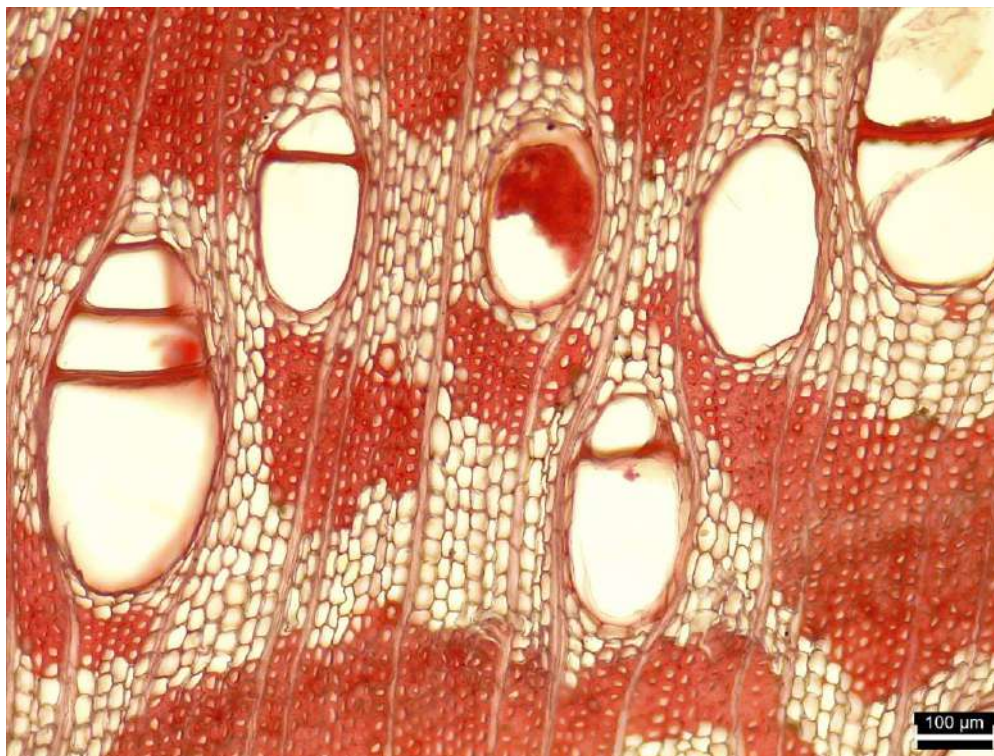


Figura 13: Fotografía de la sección transversal de la madera *Guarea guidonia*, de 1 mm²

La especie *Caryocar glabrum* presenta grano entrecruzado, mientras que *Guarea guidonia* muestra un grano mayormente recto, estas características corroboran lo mencionado por Aróstegui *et al.* (1986) en relación con ambas especies. Además, Marra (1992) señala que la interacción del tipo de grano incide directamente en las propiedades físicas y mecánicas de la madera, así como en el movimiento de la humedad y en el comportamiento del adhesivo en el proceso de encolado; también menciona que afecta las tensiones a lo largo de la línea de cola.

Las dos especies muestran una porosidad difusa, así como poros solitarios y múltiples en disposición radial, características que coinciden con las observaciones de Aróstegui *et al.* (1986), Carbajal (2012) y León (2020). En cuanto al diámetro tangencial promedio de poros, se observa que *Caryocar glabrum* tiene un valor de 194 μm y *Guarea guidonia* de 187 μm , lo que clasifica a ambas especies como “Medianos” (101 μm a $< 200 \mu\text{m}$), según la clasificación del Boletín de la Asociación Internacional de Anatomistas de la Madera (IAWA, 1989).

La frecuencia promedio de poros por milímetro cuadrado, para *Caryocar glabrum* es de 7, clasificándose como “Pocos” (5-20 poros/ mm^2), mientras que para *Guarea guidonia* es de 5, siendo clasificada como “Muy pocos” (≤ 5 poros/ mm^2). Ambas clasificaciones están en línea con lo establecido por el Boletín de la Asociación Internacional de Anatomistas de la Madera (IAWA, 1989).

La especie de *Caryocar glabrum* presenta un valor promedio de la frecuencia de poros de 7 poros/ mm^2 , la cual se encuentra dentro del rango mencionado por Carbajal (2012), que varía de 4 a 9 poros/ mm^2 . Además, el valor promedio del diámetro tangencial de poros (194 μm) también se ubica dentro del rango presentado por Aróstegui *et al.* (1986), que va de 142 a 202 μm . En contraste, para la especie *Guarea guidonia*, los valores promedio de frecuencia de poros (5 poros/ mm^2) y diámetro tangencial de poros (187 μm) se encuentran dentro de los rangos de 4 a 5 poros/ mm^2 y de 141 a 187 μm , mencionados por León (2020).

La especie *Caryocar glabrum* muestra una mayor frecuencia de poros y un diámetro tangencial de poros más grande en comparación con *Guarea guidonia*, que exhibe una menor frecuencia de poros y un diámetro tangencial de poros más pequeño. Además, la especie *Caryocar glabrum* muestra tilosis moderada, mientras que la especie *Guarea guidonia* presenta sílice.

Pizzi & Mittal (2010) y Albino *et al.* (2012) explican que, en la etapa de encolado, cuando la madera tiene menos inclusiones y un diámetro tangencial de poros más grande, los solventes y el adhesivo pueden penetrar mejor, lo que resulta en una línea de cola con una mejor adherencia y resistencia.

4.2. Propiedades físicas de los residuos de madera

4.2.1. Contenido de humedad

Los resultados de la determinación del contenido de humedad promedio de los dos residuos de madera, junto con sus coeficientes de variación se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: Valores promedio de contenido de humedad de los residuos de madera

Especie	Contenido de humedad (%)
<i>Caryocar glabrum</i>	11,60 (5,90)
<i>Guarea guidonia</i>	11,35 (5,23)

Nota: Los valores entre paréntesis son los coeficientes de variación en porcentaje

Los resultados del análisis de varianza (ANOVA), con un valor F de 1,144 y un p-valor de 0,294, indican que no hay diferencias significativas en el contenido de humedad entre los dos tipos de residuos de madera. El contenido de humedad promedio para *Caryocar glabrum* es del 11,60 por ciento, mientras que para *Guarea guidonia* es del 11,35 por ciento. Ambos valores se encuentran dentro de los rangos recomendados en las fichas técnicas de los adhesivos fabricados por la empresa Akzo Nobel Perú S.A.C., que son de 5 a 14 por ciento para el adhesivo PVA 3339 (Akzo Nobel Perú S.A.C., 2016) y de 8 a 15 por ciento para el adhesivo EPI 1911 (Akzo Nobel Perú S.A.C., 2010).

Los coeficientes de variación para ambos residuos de madera fueron bajos, indicando una alta homogeneidad; esto probablemente se deba al proceso previo de selección y maquinado para

eliminar defectos, asegurando así la uniformidad del material. Además, la madera fue secada en hornos industriales y posteriormente acondicionado al aire durante más de un año antes de su utilización.

Los residuos de madera han experimentado ciclos sucesivos de sorción y desorción, según señala García (2021), lo que ha inducido un bucle de histéresis y cambios dimensionales; estos ciclos han contribuido significativamente a la estabilización higroscópica de la madera. Por lo tanto, es posible que las diferencias en el contenido de humedad entre las maderas en estudios sean mínimas, dado que se han estabilizado con el tiempo.

Iwakiri (2005), Bandel (1991) y Nock & Ritcher (1978) concuerdan que, a medida que disminuye el contenido de humedad en la madera, aumenta la tasa de absorción, velocidad de curado y solidificación del adhesivo. Asimismo, consideran que es fundamental mantener el contenido de humedad por debajo del 20 por ciento para facilitar la interacción del adhesivo con la madera; sin embargo, un contenido de humedad excesivamente bajo puede provocar una absorción excesiva o una unión deficiente.

Vick (1999) y Bandel (1991) consideran que los adhesivos se adhieren satisfactoriamente con un contenido de humedad dentro de los rangos de 6 a 14 por ciento y 8 a 12 por ciento, respectivamente; esto se debe a que los adhesivos influyen en el mojado, flujo, penetración y curado del encolado de la madera. Los valores obtenidos en el presente estudio para los residuos de ambas especies se encuentran dentro de los rangos recomendados por los autores mencionados, y además coinciden con las especificaciones técnicas de la empresa Akzo Nobel Perú S.A.C. para los adhesivos utilizados en el estudio.

4.2.2. Densidad básica y aparente

En la Tabla 8 se muestran los valores promedio de densidad básica, densidad aparente y coeficientes de variación de los residuos de madera estudiados.

Tabla 8: Valores promedio densidad básica y densidad aparente de los residuos de madera

Especie	Densidad (g/cm ³)	
	Básica	Aparente
<i>Caryocar glabrum</i>	0,64 a (2,63)	0,71 a (3,13)
<i>Guarea guidonia</i>	0,57 b (9,98)	0,65 b (9,66)

Notas: Las medias seguidas de una misma letra no presentan diferencias significativas, para la prueba de *Tukey* con un nivel de confianza de 95 por ciento. Los valores entre paréntesis son los coeficientes de variación en porcentaje

El análisis *Tukey* muestra que, tanto para la densidad básica como para la densidad aparente de la especie *Caryocar glabrum*, presentan diferencias significativamente mayores en comparación con la especie *Guarea guidonia*.

Los coeficientes de variación de densidad básica fueron de 2,63 por ciento para *Caryocar glabrum* y del 9,98 por ciento para *Guarea guidonia*, mientras que para la densidad aparente fueron de 3,13 y 9,66 por ciento, respectivamente. Estos valores pueden considerarse adecuados, según Glass & Zelinka (2010), quienes indican que un coeficiente de variación de hasta aproximadamente el 10 por ciento es aceptable para describir la variabilidad de la densidad en estado seco al horno.

Los bajos valores del coeficiente de variación sugieren una relativa homogeneidad en los datos, lo cual puede atribuirse al proceso de selección de calidad de los residuos y la eliminación de defectos, lo que contribuye significativamente a la uniformidad de las muestras.

En cuanto a la densidad básica, la especie *Caryocar glabrum* presenta un valor promedio de 0,64 g/cm³, mientras que para *Guarea guidonia*, el valor promedio es de 0,57 g/cm³, lo que las clasifica como alta y media densidad, respectivamente (Aróstegui, 1986). Por otro lado, en lo que respecta a la densidad aparente, la especie *Caryocar glabrum* se clasifica como pesada

(0,71 a 0,95 g/cm³), mientras que *Guarea guidonia* se clasifica como semipesada (0,50 a 0,70 g/cm³), de acuerdo con la norma UNE 56540 (AENOR, 1978).

Los valores promedio de densidad básica para *Caryocar glabrum* y *Guarea guidonia* fueron inferiores a los reportados por Aróstegui *et al.* (1986), con valores de 0,65 y 0,60 g/cm³ respectivamente. Por otro lado, los valores promedio de densidad aparente para *Caryocar glabrum* y *Guarea guidonia* fueron inferiores a los reportados por Aróstegui *et al.* (1986), con 0,77 y 0,70 g/cm³ respectivamente.

Marra (1992) y Vick (1999) señalan que el estrés en la línea de cola aumenta con la densidad de la madera, lo que influye en la resistencia del adhesivo. Este aumento en la resistencia se observa hasta superar el rango de 0,7 a 0,8 g/cm³, ya que por encima de este nivel la resistencia comienza a disminuir. Ambas especies estudiadas se encuentran por debajo de este rango mencionado por los autores.

4.2.3. Variación Dimensional

En la Tabla 9 se encuentran los valores promedio de contracciones máximas tangencial (β_T), radial (β_R), longitudinal (β_L) y volumétrica (β_V), así como la relación T/R (A) de los dos residuos de madera.

Tabla 9: Valores promedio de contracción máxima y relación T/R de los residuos de madera

Especie	β_T (%)	β_R (%)	β_L (%)	β_V (%)	A
<i>Caryocar glabrum</i>	7,48 a (10,75)	3,25 b (14,45)	0,29 a (37,63)	11,01 b (7,67)	2,35 a (18,26)
<i>Guarea guidonia</i>	7,54 a (7,38)	3,81 a (8,65)	0,18 b (34,16)	11,53 a (3,61)	2,00 b (14,79)

Nota: Los valores entre paréntesis son los coeficientes de variación en porcentaje

Los resultados promedio de contracción tangencial, para *Caryocar glabrum* es de 7,48 por ciento y de *Guarea guidonia* es de 7,54 por ciento, en comparación, con la contracción radial se obtuvo los valores promedios de 3,25 por ciento para *Caryocar glabrum* y de 3,81 por ciento para *Guarea guidonia*. De acuerdo con lo observado, se confirma lo mencionado por la JUNAC (1979) y Marra (1992), sobre que la contracción tangencial suele ser mayor a la contracción radial, normalmente esta diferencia suele ser la mitad, debido a la anisotropía de la madera.

Los porcentajes promedios de contracción tangencial no muestran diferencias significativas entre *Caryocar glabrum* y *Guarea guidonia*. Sin embargo, se observan diferencias significativas en la contracción radial entre ambas especies, siendo *Guarea guidonia* la que presenta el mayor porcentaje de contracción radial. A pesar de estas diferencias, los valores obtenidos están dentro de los rangos indicados por Skaar (1988), que van de 6 a 12 por ciento para contracción tangencial y de 3 a 6 por ciento para contracción radial.

Los valores promedio de contracción longitudinal para las especies estudiadas muestran diferencias significativas, siendo *Caryocar glabrum* con un valor de 0,29 por ciento mayor que *Guarea guidonia*, que presenta un valor de 0,18 por ciento. Ambos valores están dentro del rango mencionados por JUNAC (1979) y Marra (1992) de 0,1 a 0,2 por ciento, como también dentro del rango mencionado por Skaar (1988), que oscila de 0,1 a 0,3 por ciento.

Los resultados de la contracción volumétrica presentan diferencias significativas, siendo para la especie *Caryocar glabrum* un valor de 11,01 por ciento menor que el valor de *Guarea guidonia* con 11,53 por ciento, ambos valores se encuentran dentro del rango para maderas latifoliadas de 10,2 a 19,2 por ciento, indicado por Tsoumis (1968).

Para las especies *Caryocar glabrum* y *Guarea guidonia*, los valores promedio de 7,48 por ciento y 7,54 por ciento para la contracción tangencial, 3,25 por ciento y 3,81 por ciento para la contracción radial, así como 11,01 por ciento y 11,53 por ciento para la contracción volumétrica determinados para el presente estudio, los cuales resultan ser menores a los valores obtenidos por Aróstegui *et al.* (1986), siendo estos valores de 11,45 por ciento y 10,14 por ciento para contracción tangencial, 5,51 por ciento y 5,59 por ciento para contracción

radial, así como 15,69 por ciento y 14,96 por ciento para contracción volumétrica, respectivamente.

Los coeficientes de variación para la contracción tangencial, radial y volumétrica están cerca al 15 por ciento, valor señalado por Glass & Zelinka (2010) para describir cómo la contracción de la madera es influenciada por múltiples variables.

La relación T/R obtenida para las especies evaluadas fueron de 2,35 para *Caryocar glabrum* y 2,00 para *Guarea guidonia*, los cuales son ligeramente superiores a los reportados por Aróstegui *et al.* (1986), que fueron de 2,24 y 1,84, respectivamente. Además, la relación T/R, que es un indicador de la anisotropía, para *Caryocar glabrum* se clasifica como moderadamente estable y para *Guarea guidonia* como estable, según la clasificación mencionada de la JUNAC (1979).

Las diferencias encontradas en las variaciones dimensionales de las dos especies estudiadas podrían atribuirse a lo señalado por Tsoumis (1968) y Marra (1992), quienes sugieren que estas diferencias pueden ser causadas por las diferencias en la densidad, estructura anatómica, composición química, entre otros factores. Iwakiri (2005) y Prata (2010) mencionan que la relación T/R de la madera es una característica importante que considerar en la producción de paneles EGP, ya que, si bien no dificulta la movilidad del adhesivo, puede generar tensiones en la línea de cola, afectando así la estabilidad dimensional y las propiedades mecánicas.

4.3. Propiedades químicas de los residuos de madera

En la Tabla 10 se indican los valores promedio de extractivos totales, pH y contenido de cenizas obtenidos de los dos residuos de madera estudiados.

Tabla 10: Valores promedio de extractivos totales, pH y contenido de cenizas de los residuos de madera

Especie	pH	Extractivos totales (%)	Cenizas (%)
<i>Caryocar glabrum</i>	4,11 b (0,49)	7,64 a (4,11)	0,54 b (5,28)
<i>Guarea guidonia</i>	5,19 a (2,48)	3,59 b (3,23)	1,09 a (4,26)

Notas: Las medias seguidas de una misma letra en una misma columna no presentan diferencias significativas, para la prueba *Tukey* con un nivel de confianza de 95 por ciento. Los valores entre paréntesis son los coeficientes de variación en porcentaje

Los resultados de la prueba *Tukey* para el valor promedio de contenido de extractivos totales encontrados en *Caryocar glabrum* fue de 7,64 por ciento, mayor que el obtenido en *Guarea guidonia*, que fue de 3,59 por ciento. Estos valores sugieren que los residuos de madera de las especies estudiadas pueden ser ricos en componentes alifáticos, oleorresinas en terpenoides y compuestos fenólicos, que se acumulan en el duramen, según Gonzales (2013). Además, las variaciones no se limitan únicamente entre especies, sino que también se presentan dentro de un mismo árbol, principalmente entre la albura y duramen; y pueden estar influenciadas por factores como la época del año y las condiciones de crecimiento, según Tsoumis (1968) y Fonseca (2006).

Los extractivos totales encontrados en las dos especies evaluadas muestran valores promedio que se encuentran por debajo del 10 por ciento, confirmando lo mencionado por Sjöström (1993) y Gonzales (2013), para el caso de maderas latifoliadas. Por lo tanto, los porcentajes obtenidos no deberían generar problemas en la interacción entre el adhesivo y la madera. Sin embargo, Pizzi (2010) recomienda el lijado previo al proceso de encolado, para así favorecer las superficies hidrofílicas, lo cual asegura una buena adherencia y la formación de enlaces fuertes.

En cuanto al pH de los residuos de madera, se encontró un valor promedio de 4,11 para *Caryocar glabrum*, que resultó ser menor que el pH promedio encontrado para *Guarea guidonia*, el cual fue de 5,19. Sin embargo, ambos valores están dentro del rango de 3 a 6, como mencionan Marra (1992) e Iwakiri (2005).

Rowell (2005) e Iwakiri (2005), destacan que el pH de la madera es una característica fundamental que influye en el rendimiento de cualquier tipo de adhesivo. También indican que los extractivos presentes en la madera pueden inhibir las reacciones químicas de endurecimiento del adhesivo, lo que afecta negativamente a la resistencia y cohesión adecuadas en la línea de cola.

Cabe señalar que las muestras de maderas utilizadas en la presente investigación fueron sometidas previamente a un proceso de secado en horno; la acción del calor durante este proceso de secado puede haber volatilizado inicialmente los extractivos presentes, lo que podría haber afectado los valores de extractivos y pH obtenidos en este estudio.

Los valores promedio de contenido de cenizas en los residuos de madera fueron de 0,54 por ciento para *Caryocar glabrum*, valor inferior al 1,09 por ciento encontrado para *Guarea guidonia*. Ambos valores se encuentran dentro del rango mencionado por Tsoumis (1968) de 0,1 a 5,4 por ciento para latifoliadas. Además, (Iwakiri, 2005), Klock & Sulato (2013) y Gonzales (2013) respaldan esta afirmación al indicar que las maderas latifoliadas tienden a presentar valores más elevados que las coníferas.

La presencia de cenizas en la madera podría haber influido en la trabajabilidad durante la preparación de los listones de madera, como lo señala Iwakiri (2005). Este autor también destaca que la presencia de cenizas puede afectar el pH, lo cual puede evidenciarse en la formación y rendimiento de la línea de cola.

Los coeficientes de variación de los resultados del pH de las dos especies en estudio, así como los extractivos totales y el contenido de cenizas, son considerados como bajos (<10 por ciento), según lo señalado por Pimentel (2000).

4.4. Características de los adhesivos

En la Tabla 11 se muestran los valores promedio de viscosidad, contenido de sólidos y pH de los adhesivos PVA y EPI empleados en el presente estudio.

Tabla 11: Valores promedio de las propiedades físicas y químicas de los adhesivos utilizados

Característica	PVA	EPI
Viscosidad (cP)	11600 (9,47)	12850 (5,26)
Contenido de sólidos (%)	53,90 (0,18)	45,30 (0,30)
pH	2,89 (0,80)	6,89 (0,52)

Nota: Los valores entre paréntesis son los coeficientes de variación en porcentaje

Los valores de viscosidad obtenidos, que fueron 11600 cP para el PVA y 12850 cP para el EPI, y se encuentran dentro de los rangos indicados en las fichas técnicas de los adhesivos elaborados por una empresa nacional (Akzo Nobel Perú S.A.C., 2016; Akzo Nobel Perú S.A.C., 2010), variando entre 7000 a 16000 cP para el adhesivo PVA y entre 8000 a 15000 cP para EPI.

Los resultados muestran una mayor viscosidad del adhesivo EPI en comparación con PVA, esto pueden deberse a su formulación en la composición química de cada producto, la cual influye en la viscosidad, como lo menciona River & Okkonen (1991). Asimismo, Iwakiri, (2005) indica que las diferencias en la viscosidad resultan en diferentes interacciones con las características de uso.

Almeida (2013) señala que la viscosidad es una propiedad que tiene gran influencia en el encolado, ya que define la movilidad del adhesivo durante su aplicación y fraguado. La viscosidad influye en la calidad de la unión de la madera; es decir, a mayor viscosidad, la penetración del adhesivo en la estructura capilar disminuye, formando una línea de pegamento más espesa, según Iwakiri (2005).

En cuanto al contenido de sólidos, se obtuvieron valores promedio de 53,90 por ciento para el adhesivo PVA y de 45,30 por ciento para EPI. El valor obtenido para PVA se encuentra dentro del rango indicado en la ficha técnica del adhesivo elaborado por la empresa Akzo Nobel Perú S.A.C., que establece un rango de 55 a 58 por ciento para PVA, mientras que para EPI se ubica en el rango de 42 a 46 por ciento.

Iwakiri (2005) y Almeida (2013) mencionan que la línea de cola es responsable de la unión entre los sustratos y la transferencia de tensiones en el sistema madera-adhesivo. Bandel (1991) añade que la cantidad de sólidos en el adhesivo influye en la velocidad de formación de la película adhesiva; es decir, cuando mayor sea la cantidad de agua (menor el contenido de sólidos), más lenta será la formación de la línea de cola, debido al tiempo extendido de evaporación.

Los valores promedio de pH obtenidos fueron de 2,89 para el adhesivo PVA y 6,89 para el EPI, ubicándose ambos dentro de los rangos establecidos en la ficha técnica proporcionada por la empresa Akzo Nobel Perú S.A.C; que son de 2 a 4 para PVA y de 7 a 8,5 para EPI. Sin embargo, el pH de EPI está ligeramente por debajo del rango especificado; lo cual podría deberse a variaciones posteriores a la fabricación del producto, diferencia que podría deberse a que los datos proporcionados por la empresa representan los como el transporte, almacenamiento y las condiciones de uso.

Los valores obtenidos para ambos adhesivos concuerdan con lo mencionado por Iwakiri (2005) que el rango del pH no debe superar el rango de 2,5 a 11 para evitar la degradación de las fibras de madera y la formación excesiva de espuma durante la mezcla, lo cual podría afectar negativamente al proceso de encolado. Además, el pH del adhesivo también influye en la velocidad de curado, ya que un pH más ácido resulta en un curado más rápido (Nock & Ritcher, 1978).

4.5. Resistencia de las juntas encoladas al cizallamiento

En la Tabla 12 se muestran los valores promedio y el 5° percentil inferior de resistencia al cizallamiento de juntas encoladas, las cuales fueron elaboradas con residuos de las dos

especies estudiadas. Las probetas obtenidas fueron previamente sometidas a los pretratamientos para su uso en ambiente seco y húmedo.

Tabla 12: Resistencia de las juntas encoladas al cizallamiento

Junta encolada	Adhesivo	PT	Gramaje (g/m ²)	RC (MPa)	FM (%)	5° PI (MPa)	
<i>Caryocar glabrum</i>	PVA	AH	120	0,00	-	-	
			150	0,00	-	-	
			180	0,00	-	-	
		AS	120	4,18 (28,03)	9,69	2,70	
			150	4,10 (14,63)	15,00	3,01	
			180	3,63 (24,45)	14,71	2,54	
		EPI	AH	120	2,67 (22,53)	5,36	1,88
				150	3,87 (26,39)	5,36	2,70
				180	3,94 (24,64)	9,92	2,73
	AS		120	5,88 (31,28)	19,43	3,21	
			150	6,43 (34,96)	24,17	2,75	
			180	6,31 (33,50)	22,73	3,59	
	<i>Guarea guidonia</i>	PVA	AH	120	0,00	-	-
				150	0,00	-	-
				180	0,00	-	-
AS			120	2,05 (39,66)	6,20	1,11	
			150	2,62 (24,63)	6,40	1,70	
			180	1,93 (32,64)	5,40	1,10	

		120	3,87 (22,40)	8,93	2,52
	AH	150	4,05 (21,36)	6,31	2,76
		180	5,30 (31,02)	8,87	3,21
	EPI	120	3,62 (33,55)	11,10	2,54
		150	4,27 (32,11)	12,70	2,80
		180	6,04 (23,22)	19,06	3,92
		120	0,00	-	-
	AH	150	0,00	-	-
		180	0,00	-	-
	PVA	120	0,39 (28,76)	0,00	0,24
		150	0,77 (15,14)	0,20	0,66
		180	1,23 (21,45)	1,80	0,94
		120	3,08 (18,89)	3,17	2,28
	AH	150	3,47 (25,42)	6,13	2,29
		180	4,14 (25,21)	8,12	2,59
	EPI	120	5,41 (14,83)	22,45	4,06
		150	5,55 (25,13)	14,55	3,83
		180	5,32 (22,62)	15,10	4,05

Notas: AS-ambiente seco; AH-ambiente húmedo; PT-pretratamiento; RC-resistencia al cizallamiento; FM-falla de la madera; PI-percetil inferior. Los valores entre paréntesis son los coeficientes de variación en porcentaje

Se observó que las probetas encoladas con adhesivo PVA y sometidas al pretratamiento para uso en ambiente húmedo se despegaron al ser expuestas al pretratamiento con agua hirviendo, reflejando valores de cero. Por lo tanto, se optó por considerar únicamente los resultados

alcanzados con las probetas encoladas con adhesivo PVA y pretratadas exclusivamente para uso en ambiente seco.

Para las probetas con pretratamiento para ambiente seco, el cual se realizó mediante inmersión en agua durante 24 horas, donde se puede apreciar en la Figura 14 que la resistencia al cizallamiento con adhesivo EPI resultó superior que aquellas ensayadas con adhesivo PVA. Esto respalda lo señalado por Iwakiri (2005) y Frihart & Hunt (2010) acerca de la baja resistencia a la humedad del adhesivo PVA, ya que se adhiere principalmente mediante el solvente (agua), en comparación con el adhesivo EPI que mediante la reacción de grupos isocianatos con grupos hidroxilos de la madera, forma enlaces duraderos que le confieren una alta resistencia a la humedad y temperatura.

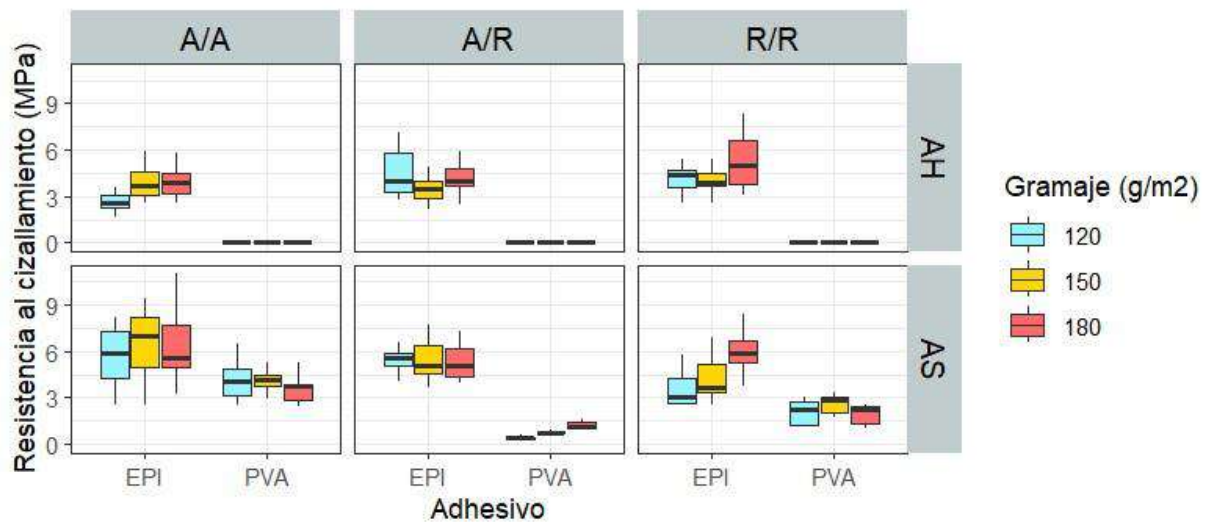


Figura 14: Diagrama de cajas y bigotes de la resistencia al cizallamiento en relación con las variables en estudio (adhesivos, gramajes y pretratamientos)

Nota: A/A-combinación *Caryocar glabrum*; R/R-combinación *Guarea guidonia*; A/R-combinación *Caryocar glabrum-Guarea guidonia*; AS-pretratamiento para uso en ambiente seco; AH-pretratamiento para uso en ambiente húmedo

4.5.1. Pretratamiento para uso en ambiente seco

Los resultados de la resistencia al cizallamiento, obtenidos con pretratamiento para uso en ambiente seco, fueron analizados mediante los modelos estadísticos de las juntas encoladas de *Caryocar glabrum*, *Guarea guidonia* y la combinación de ambas especies; se consideraron las variables de adhesivo (PVA y EPI) y gramajes (120, 150 y 180 g/m²) en relación con la resistencia al cizallamiento. Para el modelo de *Caryocar glabrum*, se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homocedasticidad. Se obtuvo un valor W de *Shapiro-Wilk* de 0,976 (p-valor asociado de 0,286) y un chi-cuadrado de 3,013 (p-valor asociado de 0,083). El ANOVA indicó que existe significancia en el efecto de interacción entre la variable adhesivo (F=46,78 y p-valor=0.000).

El modelo de *Guarea guidonia*, se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homocedasticidad, obteniendo un valor W de *Shapiro-Wilk* de 0,966 (p-valor asociado de 0,060) y un chi-cuadrado de 0,593 (p-valor asociado de 0,442). El ANOVA dio como resultado un valor F calculado de 9,317 con un p-valor de 0,000, lo que sugiere que la interacción entre el adhesivo y el gramaje tienen efectos significativos en la resistencia al cizallamiento.

El modelo de *Caryocar glabrum/Guarea guidonia*, se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homocedasticidad, obteniendo un valor W de *Shapiro-Wilk* de 0,984 (p-valor asociado de 0,599) y un chi-cuadrado de 0,808 (p-valor asociado de 0,369). El ANOVA dio como resultado un valor F calculado de 37,350 con un p-valor de 0,000, lo que sugiere que la interacción entre el adhesivo y el gramaje tienen efectos significativos en la resistencia al cizallamiento.

En la Tabla 13 se muestran los valores de la resistencia al cizallamiento para ambiente seco en relación con el adhesivo PVA y EPI.

Tabla 13: Valores promedio de resistencia al cizallamiento en ambiente seco

Junta encolada	Resistencia al cizallamiento (MPa)	
	PVA	EPI
<i>Caryocar glabrum</i>	3,96 b (23,58)	6,27 a (26,48)
<i>Guarea guidonia</i>	2,20 b (33,73)	4,91 a (34,65)
<i>Caryocar glabrum - Guarea guidonia</i>	0,80 b (48,74)	5,43 a (20,71)

Nota: Los valores entre paréntesis son los coeficientes de variación en porcentaje

En la Tabla 13, se pueden observar los valores de resistencia al cizallamiento promedio para las juntas encoladas con pretratamiento para uso en ambiente seco. Con el adhesivo PVA, estos valores se encuentran en el rango de 0,80 a 3,96 MPa, mientras que con el adhesivo EPI se encuentran en el rango de 5,43 a 6,27 MPa. Estos resultados respaldan lo mencionado por Zimmerman (2006) sobre la buena estabilidad y resistencia del adhesivo EPI, tanto para temperaturas elevadas como a la humedad.

La Tabla 14 muestra los resultados de resistencia al cizallamiento, coeficiente de variación, porcentaje de falla de la madera y el 5° percentil inferior de juntas encoladas de las especies estudiadas, con dos adhesivos y con pretratamiento para uso en ambiente seco.

Tabla 14: Resistencia al cizallamiento en ambiente seco

Junta encolada	Adhesivo	PT	Gramaje (g/m ²)	RC (MPa)	FM (%)	5° PI (MPa)
<i>Caryocar glabrum</i>	PVA	AS	120	4,18 bc (28,03)	9,69	2,70
			150	4,10 c (14,63)	15,00	3,01
			180	3,63 c (24,45)	14,71	2,54
	EPI	AS	120	5,88 ab (31,28)	19,43	3,21
			150	6,43 a (34,96)	24,17	2,75
			180	6,31 a (33,50)	22,73	3,59
<i>Guarea guidonia</i>	PVA	AS	120	2,05 d (39,66)	6,20	1,11
			150	2,62 cd (24,63)	6,40	1,70
			180	1,93 d (32,64)	5,40	1,10
	EPI	AS	120	3,62 bc (33,55)	11,10	2,54
			150	4,27 b (32,11)	12,70	2,80
			180	6,04 a (23,22)	19,06	3,92
<i>Caryocar glabrum</i> / <i>Guarea guidonia</i>	PVA	AS	120	0,39 b (28,76)	0,00	0,24
			150	0,77 b (15,14)	0,20	0,66
			180	1,23 b (21,45)	1,80	0,94
	EPI	AS	120	5,41 a (14,83)	22,45	4,06
			150	5,55 a (25,13)	14,55	3,83
			180	5,32 a (22,62)	15,10	4,05

Nota: AS-ambiente seco; PT-pretratamiento; RC-resistencia al cizallamiento; FM-falla de la madera; PI-percentil inferior. Para ambos adhesivos, las medias seguidas de una misma letra no presentan diferencias significativas, para la prueba *Tukey* con un nivel de confianza de 95 por ciento. Los valores entre paréntesis son los coeficientes de variación en porcentaje

En la Tabla 14, se observa los resultados para todas las juntas encoladas con adhesivo PVA, los cuales se encuentran en el rango de 0,39 a 4,18 MPa. El valor más bajo corresponde a las juntas de la combinación de *Caryocar glabrum*/*Guarea guidonia* con un gramaje de 120 g/m² (0,39 MPa), mientras que el valor más alto pertenece a las juntas encoladas de *Caryocar glabrum* con gramaje de 120 g/m² (4,18 MPa). En comparación, los valores de resistencia al cizallamiento con adhesivo EPI oscilan entre 3,62 a 6,43 MPa. El valor más bajo corresponde a las juntas encoladas de *Guarea guidonia* con un gramaje de 120 g/m² (3,62 MPa), mientras que el valor más alto corresponde a las juntas encoladas de *Caryocar glabrum* con un gramaje de 150 g/m² (6,43 MPa).

Los resultados de la prueba *Tukey* para las juntas encoladas de *Caryocar glabrum* indican que las juntas encoladas con EPI en los gramajes 120 y 150 g/m² aparentemente no muestran diferencias significativas y presentan los valores más altos de resistencia al cizallamiento para dicha especie. En comparación, las juntas encoladas con PVA con gramajes de 150 y 180 g/m² representan los valores de resistencia al cizallamiento más bajos alcanzados por dicha especie. La especie *Caryocar glabrum*, a pesar de presentar grano entrecruzado y tilosis moderada, presenta buenas características, como un diámetro tangencial de 194 µm, clasificada como poros de diámetro mediano por IAWA (1989), y una frecuencia de poros de 7 poros/mm². Estas características favorecen una mejor penetración de solventes y adhesivos, lo que puede resultar en una línea de cola con una adherencia y resistencia mejoradas, según Pizzi & Mittal (2010).

Los resultados de la prueba *Tukey* para las juntas encoladas de *Guarea guidonia* muestran que la junta encolada con EPI con un gramaje 180 g/m² presenta el valor más alto de resistencia al cizallamiento para dicha especie. En contraste, las juntas encoladas con PVA y gramajes de 120 y 180 g/m² representan los valores más bajos de resistencia al cizallamiento alcanzados por *Guarea guidonia*. Esta especie presenta un grano recto, un diámetro tangencial de 187 µm (clasificada como de tamaño medio por IAWA en 1989) y una frecuencia de poros de 5 poros/mm², lo que resulta en una resistencia relativamente baja en comparación con *Caryocar glabrum*.

Los resultados de la prueba *Tukey* para las juntas encoladas de la combinación de *Caryocar glabrum*/*Guarea guidonia* muestran que las juntas encoladas con adhesivo EPI en sus tres

gramajes (120, 150 y 180 g/m²) muestran valores más altos de resistencia al cizallamiento para esta combinación. Por el contrario, las juntas encoladas con PVA en los mismos tres gramajes (120, 150 y 180 g/m²) presentan los valores más bajos de resistencia al cizallamiento para esta combinación. Esto puede deberse a diferencias significativas en las propiedades químicas de cada especie sea lo que posiblemente influya en el rendimiento de cualquier adhesivo en el proceso de encolado, según lo mencionado por Rowell (2005) e Iwakiri (2005).

Los valores promedio obtenidos del 5° percentil inferior de resistencia al cizallamiento de las juntas encoladas utilizando adhesivo PVA y pretratamiento para uso en ambiente seco oscilaron entre 0,24 a 3,01 MPa. Se observó además que únicamente las juntas encoladas de *Caryocar glabrum* para los gramajes de 120, 150 y 180 g/m² cumplen con el valor mínimo del 5° percentil inferior de 2,5 MPa, según lo establecido en la norma UNE-EN 13353 (AENOR, 2023).

Los valores promedio obtenidos del 5° percentil inferior de resistencia al cizallamiento de las juntas encoladas utilizando adhesivo EPI y pretratamiento para uso en ambiente seco oscilaron entre 2,54 a 4,06 MPa. Se observó que todas las juntas encoladas para las dos especies en estudio y su combinación, cumplen con el valor mínimo del 5° percentil inferior de 2,5 MPa, según lo establecido en la norma UNE-EN 13353 (AENOR, 2023).

Los valores promedio de porcentaje de falla en la madera para las juntas encoladas con adhesivo PVA variaron de 0,00 a 15,00 por ciento, mientras que para las juntas encoladas con adhesivo EPI oscilaron en 11,10 a 24,17 por ciento. En ambos casos, estos valores son menores al 40 por ciento, que es el valor mínimo indicado en la norma UNE-EN 13353 (AENOR, 2023); sin embargo, este requisito no se aplica a las especies en estudio y su combinación, ya que presentan una densidad aparente mayor de 0,60 g/cm³.

4.5.1.1. Correlación entre densidad básica y resistencia al cizallamiento

En las Figuras 15, 16, 17 y 18 se muestran los gráficos de dispersión que representan la correlación entre la densidad básica de las probetas de las dos especies ensayadas, después del pretratamiento en ambiente seco, y sus valores de resistencia al cizallamiento, considerando los adhesivos y gramajes del presente estudio. Además, se incluyen líneas rectas que muestran las tendencias individuales por gramaje.

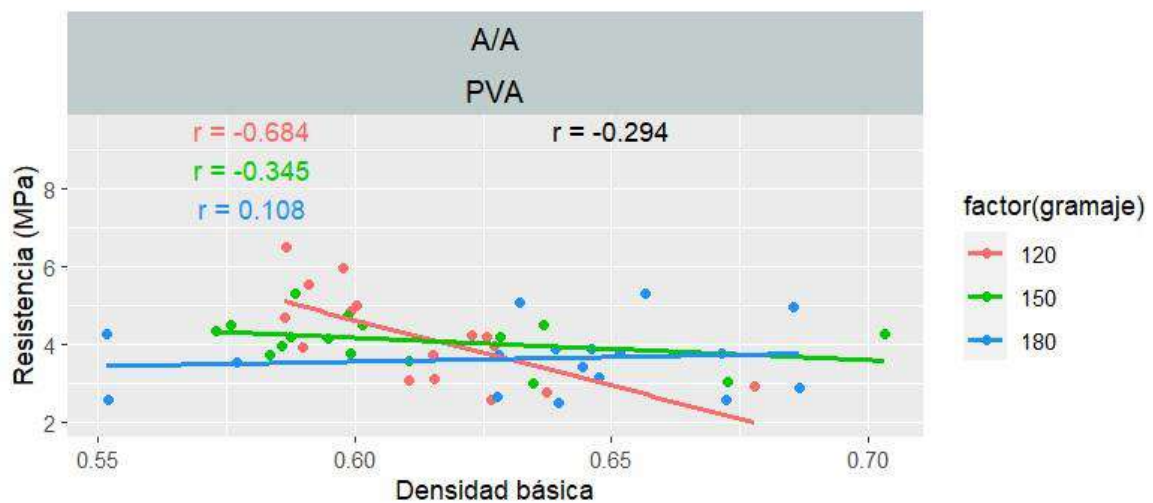


Figura 15: Correlación entre la densidad básica y la resistencia al cizallamiento de probetas de *Caryocar glabrum* encoladas con adhesivo PVA

El coeficiente de correlación de *Pearson* de -0,294 obtenido para la especie *Caryocar glabrum* encolada con adhesivo PVA, indica que no existe una correlación entre las variables de resistencia al cizallamiento y la densidad básica. Esta falta de correlación también se observa en los coeficientes de correlación correspondientes a cada gramaje utilizado en el estudio (120 g/m²: -0,684, 150 g/m²: -0,345 y 180 g/m²: 0,108), lo que señala que no hay una relación entre estas variables.

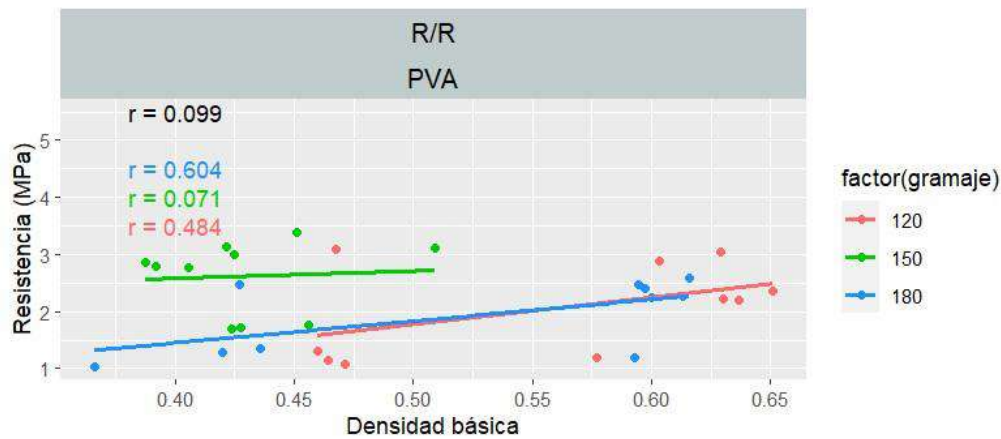


Figura 16: Correlación entre la densidad básica y la resistencia al cizallamiento de probetas de *Guarea guidonia* encoladas con adhesivo PVA

El coeficiente de correlación de *Pearson* de 0,099 obtenido para la especie *Guarea guidonia* encolada con adhesivo PVA muestra que no existe una correlación entre las variables de resistencia al cizallamiento y la densidad básica para dicha especie. La falta de correlación también se observa en los coeficientes de correlación correspondiente a cada gramaje utilizado en el estudio (120 g/m²: 0,484, 150 g/m²: 0,071 y 180 g/m²: 0,604), lo que señala que no hay una relación aparente entre estas variables.

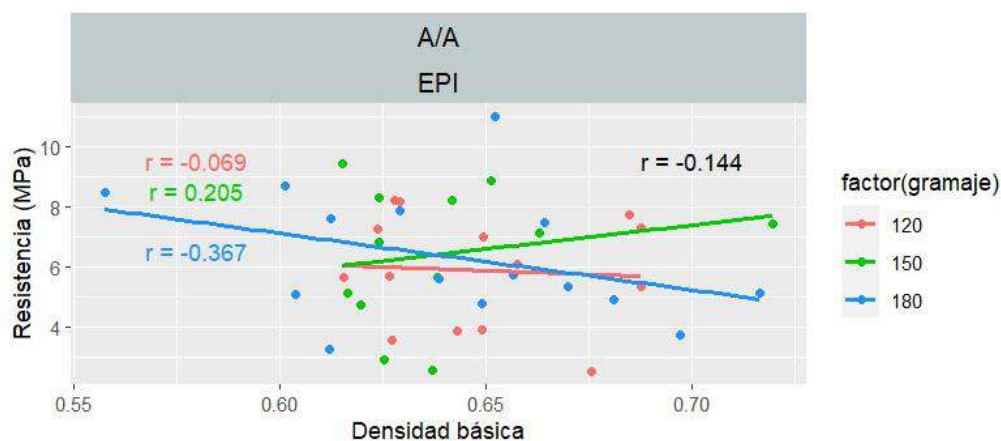


Figura 17: Correlación entre la densidad básica y la resistencia al cizallamiento de probetas de *Caryocar glabrum* encoladas con adhesivo EPI

El coeficiente de correlación de *Pearson* de -0,144 obtenido para la especie *Caryocar glabrum* encolada con adhesivo EPI muestra que no existe una correlación significativa entre las

variables de resistencia al cizallamiento y la densidad básica para dicha especie. Esto sugiere que no hay una tendencia estadísticamente relevante, lo cual también se evidencia en los coeficientes de correlación correspondientes a cada gramaje utilizado en el estudio (120 g/m²: -0,069, 150 g/m²: 0,205 y 180 g/m²: -0,367), lo que indica la ausencia de una relación aparente entre estas variables.

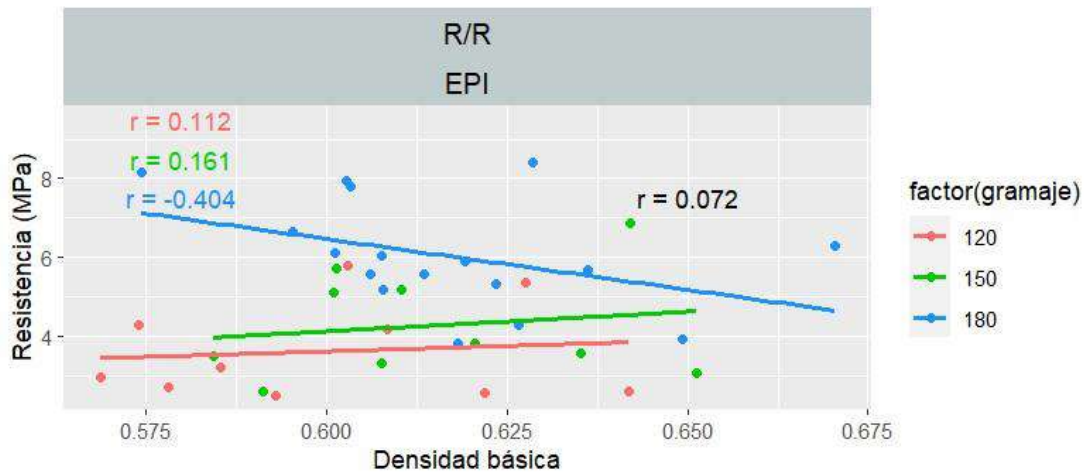


Figura 18: Correlación entre la densidad básica y la resistencia al cizallamiento de probetas de *Guarea guidonia* encoladas con adhesivo EPI

El coeficiente de correlación de *Pearson* de 0,072 obtenido para la especie *Guarea guidonia* encolada con adhesivo EPI muestra que no existe una correlación significativa entre las variables de resistencia al cizallamiento y la densidad básica para esta especie. Esto sugiere que no hay una tendencia estadísticamente relevante, lo cual también se refleja en los coeficientes de correlación correspondientes a cada gramaje utilizado en el estudio (120 g/m²: 0,112, 150 g/m²: 0,161 y 180 g/m²: -0,404), lo que indica la ausencia de una relación aparente entre estas variables.

Las pendientes de las rectas observadas para ambas especies en el estudio muestran una tendencia casi nula y poco definida, lo que indica una baja relación entre las variables. Asimismo, las variaciones observadas en los coeficientes de correlación de *Pearson* para ambas especies del estudio pueden explicarse por las diferencias en densidad básica y la resistencia al cizallamiento entre las especies estudiadas, como señala Marra (1992), quien indica que existe variación entre especies, dentro de una especie y dentro de la misma pieza.

Además, Marra (1992) y Vick (1999) afirman que la resistencia de los enlaces aumenta con la densidad de la madera hasta un rango de 0,7 a 0,8 g/cm³; sin embargo, por encima de este nivel, la resistencia de la unión empieza a disminuir.

Es importante destacar que estas diferencias podrían atribuirse al origen de las probetas utilizadas en el presente estudio, las cuales provienen de residuos de madera de segunda transformación.

4.5.1.2. Correlación entre contenido de humedad y resistencia al cizallamiento

En las Figuras 19, 20, 21 y 22 se muestran los gráficos de dispersión donde se aprecia la correlación entre el contenido de humedad de las probetas de las dos especies ensayadas, después del pretratamiento en ambiente seco, y sus valores de resistencia al cizallamiento, considerando los adhesivos y gramajes del presente estudio. Además, se incluyen líneas rectas que muestran las tendencias individuales por gramaje.

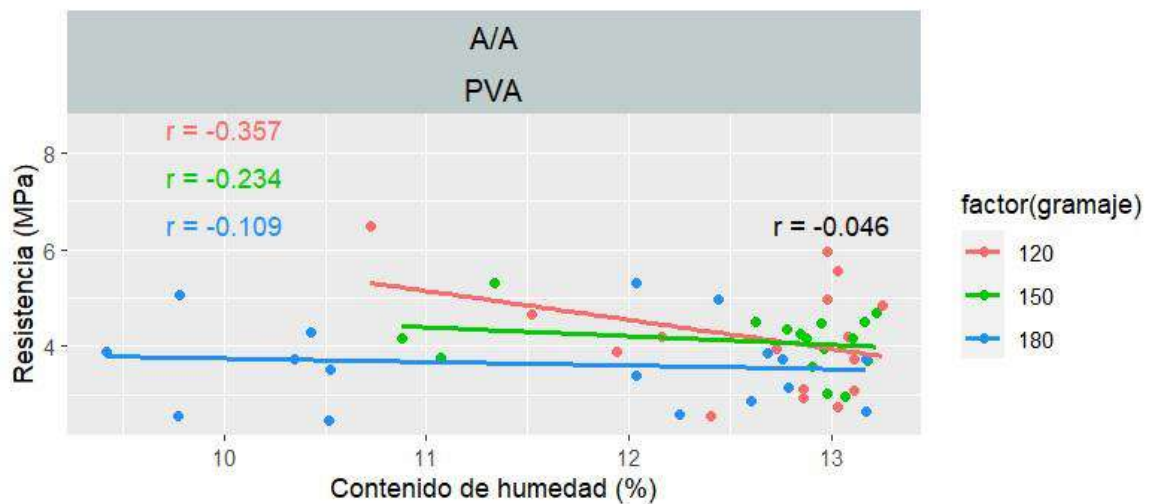


Figura 19: Correlación entre el contenido de humedad y la resistencia al cizallamiento de probetas de *Caryocar glabrum* encoladas con adhesivo PVA

El coeficiente de correlación de *Pearson* de -0,046 obtenido para la especie *Caryocar glabrum* encolada con adhesivo PVA muestra que no existe una correlación entre las variables de resistencia al cizallamiento y el contenido de humedad para dicha especie. Esto sugiere que no hay una tendencia estadísticamente relevante, lo cual también se refleja en los coeficientes de correlación correspondientes a cada gramaje utilizado en el estudio (120 g/m²: -0,357, 150 g/m²: -0,234 y 180 g/m²: -0,109), lo que indica la ausencia de una relación aparente entre estas variables.

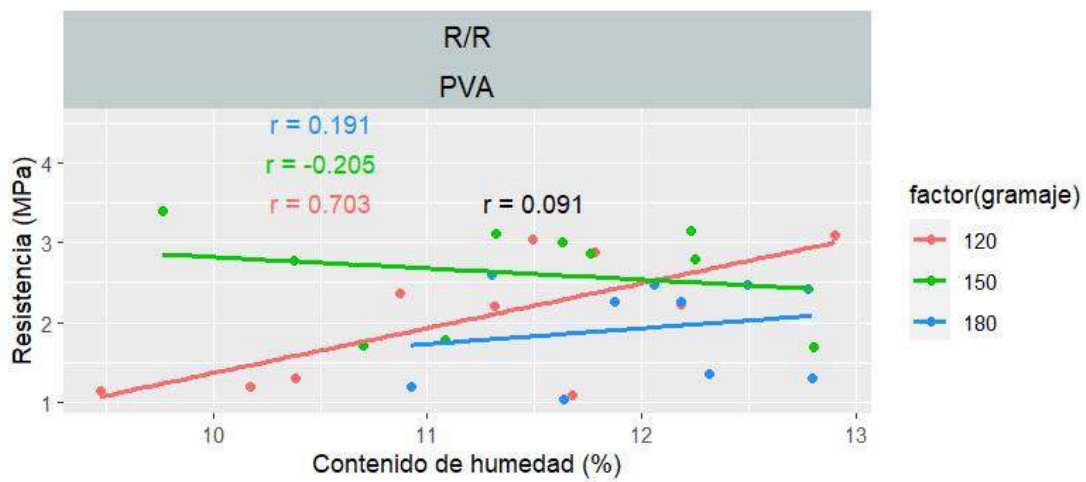


Figura 20: Correlación entre el contenido de humedad y la resistencia al cizallamiento de probetas de *Guarea guidonia* encoladas con adhesivo PVA

El coeficiente de correlación de *Pearson* de 0,091 obtenido para la especie *Guarea guidonia* encolada con adhesivo PVA muestra que no hay una correlación significativa entre las variables de resistencia al cizallamiento y el contenido de humedad para esta especie. Esto se refleja en los coeficientes de correlación correspondientes a cada gramaje utilizado en el estudio (150 g/m²: -0,205 y 180 g/m²: 0,191). Sin embargo, el coeficiente de correlación para el gramaje 120 g/m² muestra un valor de 0,703, lo que indica una correlación positiva. A pesar de ello, la tendencia general para esta especie muestra una relación extremadamente débil y no se considera significativa.

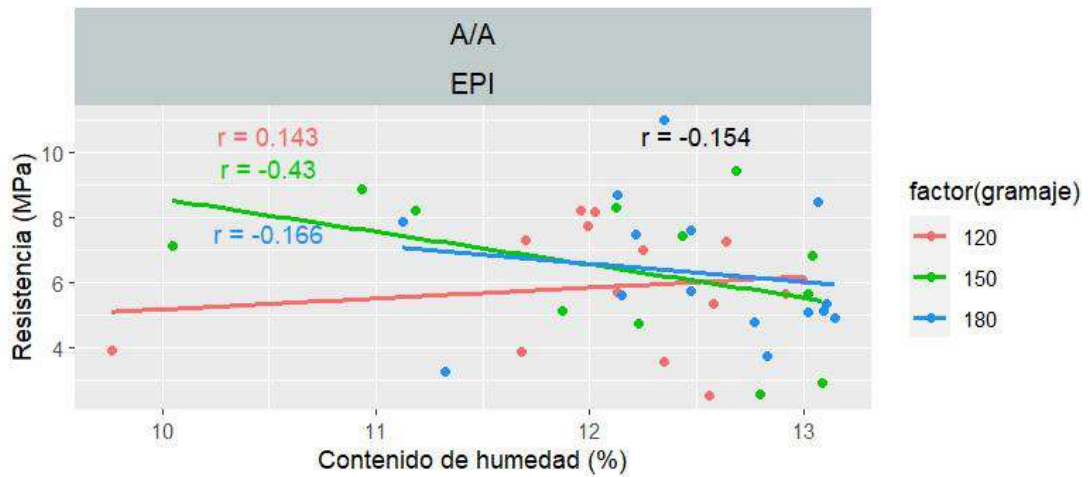


Figura 21: Correlación entre el contenido de humedad y la resistencia al cizallamiento de probetas de *Caryocar glabrum* encoladas con adhesivo EPI

El coeficiente de correlación de *Pearson* de $-0,154$ obtenido para la especie *Caryocar glabrum* encolada con adhesivo EPI muestra que no existe una correlación entre las variables de resistencia al cizallamiento y el contenido de humedad para dicha especie. Esto sugiere que no hay una tendencia estadísticamente relevante, lo cual también se refleja en los coeficientes de correlación correspondientes a cada gramaje utilizado en el estudio (120 g/m^2 : $0,143$, 150 g/m^2 : $-0,430$ y 180 g/m^2 : $-0,166$), lo que indica la ausencia de una relación aparente entre estas variables.

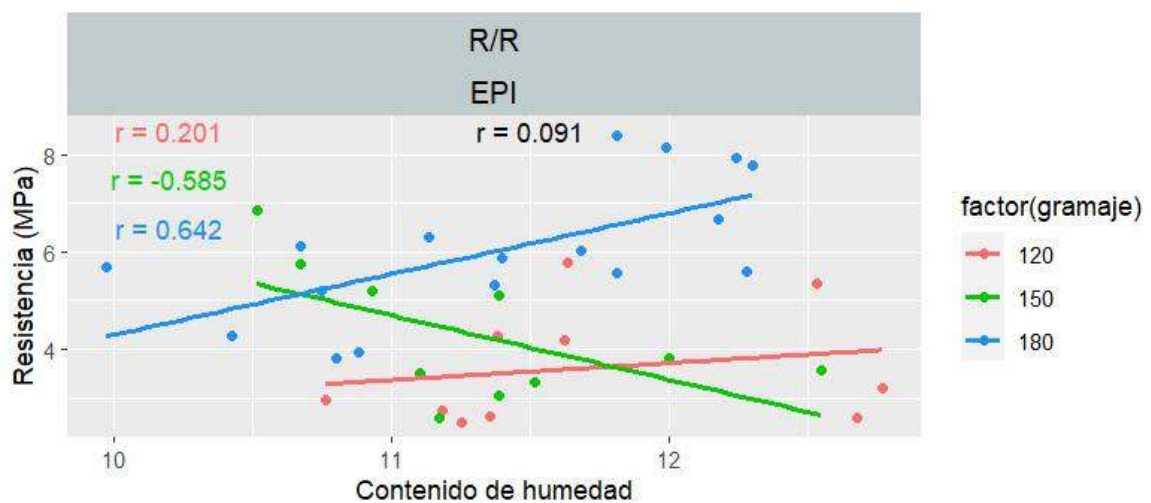


Figura 22: Correlación entre el contenido de humedad y la resistencia al cizallamiento de probetas de *Guarea guidonia* encoladas con adhesivo EPI

El coeficiente de correlación de *Pearson* de 0,091 obtenido para la especie *Guarea guidonia* encolada con adhesivo EPI muestra que no hay una correlación entre las variables de resistencia al cizallamiento y el contenido de humedad para dicha especie. Esto sugiere que no hay una tendencia estadísticamente relevante, lo cual también se refleja en los coeficientes de correlación correspondientes a cada gramaje utilizado en el estudio (120 g/m²: 0,201 y 150 g/m²: -0,585). Sin embargo, el coeficiente de correlación para el gramaje 180 g/m² muestra un valor de 0,642, lo que indica una correlación positiva. A pesar de ello, la tendencia general para esta especie muestra una relación extremadamente débil y no se considera significativa.

Las variaciones observadas en los coeficientes de correlación de *Pearson* para ambas especies del estudio pueden explicarse por las diferencias en el contenido de humedad y la resistencia al cizallamiento entre las especies estudiadas. Los valores observados para las probetas de ambas especies en estudio oscilan en el rango de 9,5 a 13,5 por ciento de contenido de humedad, lo que concuerda con Vick (1999), quién indica que para una unión adhesiva satisfactoria se sugiere que el contenido de humedad se encuentre en el rango de 6 por ciento a 14 por ciento. Además, la madera secada al horno puede presentar variaciones, las cuales no deben ser mayores a 5 por ciento para las especies de densidad baja y al 2 por ciento para especies de densidad alta, con el fin de garantizar una unión óptima.

4.5.2. Pretratamiento para uso en ambiente húmedo

Los resultados de resistencia al cizallamiento con adhesivo PVA mostraron que las juntas de las dos especies estudiadas y su combinación se despegaron al ser expuestas al agua hirviendo, debido a las propiedades del adhesivo. Por consiguiente, se optó por considerar únicamente los resultados obtenidos para las juntas encoladas con adhesivo EPI y pretratadas para uso en ambiente húmedo.

Para el modelo de *Caryocar glabrum*, se analizaron los valores obtenidos a partir de las probetas utilizando el adhesivo EPI y pretratamiento en ambiente húmedo. Se verificó que cumplan los supuestos de normalidad y homocedasticidad, con un valor W de *Shapiro-Wilk* de 0,968 (p-valor asociado de 0,350) y un chi-cuadrado de 2,401 (p-valor asociado de 0,121). El ANOVA mostró significancia para la variable gramaje, con un valor F calculado de 7,382 y un p-valor de 0,002.

Para el modelo de *Guarea guidonia*, se analizaron los valores obtenidos de las probetas utilizando el adhesivo EPI y pretratamiento en ambiente húmedo. Se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homocedasticidad, con un valor W de *Shapiro-Wilk* de 0,952 (p-valor asociado de 0,077) y un chi-cuadrado de 1,774 (p-valor asociado de 0,183), respectivamente. El ANOVA mostró significancia para la variable gramaje, con un valor F calculado de 5,019 y un p-valor de 0,012. Para el modelo de *Caryocar glabrum*/*Guarea guidonia*, se analizaron los valores obtenidos de las probetas utilizando el adhesivo EPI y pretratamiento en ambiente húmedo. Se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homocedasticidad, con un valor W de *Shapiro-Wilk* de 0,972 (p-valor asociado de 0,352) y un chi-cuadrado de 3,154 (p-valor asociado de 0,076), respectivamente. El ANOVA mostró significancia para la variable gramaje, con un valor F calculado de 5,396 con un p-valor de 0,008.

En la Tabla 15 se muestran los valores registrados para la resistencia al cizallamiento en ambiente húmedo.

Tabla 15: Resistencia al cizallamiento en ambiente húmedo

Junta encolada	Adhesivo	PT	Gramaje (g/m ²)	RC (MPa)	FM (%)	5° PI (MPa)
<i>Caryocar glabrum</i>	EPI	AH	120	2,67 b (22,53)	5,36	1,88
			150	3,87 a (26,39)	5,36	2,70
			180	3,94 a (24,64)	9,92	2,73
<i>Guarea guidonia</i>	EPI	AH	120	3,87 b (22,40)	8,93	2,52
			150	4,05 b (21,36)	6,31	2,76
			180	5,30 a (31,02)	8,87	3,21
<i>Caryocar glabrum</i> / <i>Guarea guidonia</i>	EPI	AH	120	3,08 b (18,89)	3,17	2,28
			150	3,47 ab (25,42)	6,13	2,29
			180	4,14 a (25,21)	8,12	2,59

Notas: AH-ambiente húmedo; PT-pretratamiento; RC-resistencia al cizallamiento; FM-falla de la madera; PI-percentil inferior. Las medias seguidas de una misma letra no presentan diferencias significativas, para la prueba *Tukey* con un nivel de confianza de 95 por ciento. Los valores entre paréntesis son los coeficientes de variación en porcentaje

Los resultados de la prueba *Tukey* para las juntas encoladas de *Caryocar glabrum*, *Guarea guidonia* y su combinación, muestran una mayor resistencia al cizallamiento con gramaje de 180 g/m² y adhesivo EPI (*Caryocar glabrum*: 3,94 MPa; *Guarea guidonia*: 5,30 MPa y *Caryocar glabrum/ Guarea guidonia*: 4,14 MPa), para cada uno de sus modelos estadísticos.

Por el contrario, los resultados de la prueba *Tukey* para las juntas encoladas de *Caryocar glabrum*, *Guarea guidonia* y su combinación, indican una menor resistencia al cizallamiento con gramaje de 120 g/m² y adhesivo EPI (*Caryocar glabrum*: 2,67 MPa, *Guarea guidonia*: 3,87 MPa y *Caryocar glabrum/ Guarea guidonia*: 3,08 MPa), para cada modelo estadístico.

Los valores promedio obtenidos del 5° percentil inferior de resistencia al cizallamiento de las juntas encoladas utilizando adhesivo EPI y pretratamiento para uso en ambiente húmedo, oscilaron de 1,88 a 3,21 MPa. Se observó que, a excepción de las juntas encoladas de *Caryocar glabrum* con un gramaje de 120 g/m² (1,88 MPa), así como la combinación de *Caryocar glabrum/ Guarea guidonia* con gramajes de 120 g/m² (2,28 MPa) y 150 g/m² (2,29 MPa); todas las demás juntas encoladas estudiadas cumplen con el valor mínimo del 5° percentil inferior de 2,5 MPa, según lo establecido en la norma UNE-EN 13353 (AENOR, 2023). Estos resultados confirman lo señalado por Zimmerman (2006), quien afirmó que el adhesivo EPI presenta buena resistencia tanto a temperaturas elevadas y a la humedad.

Los valores promedio de porcentaje de falla en la madera obtenidos para las juntas encoladas fluctuó de 3,17 a 9,92 por ciento, que son menores del 40 por ciento, valor mínimo indicado en la norma UNE-EN 13353 (AENOR, 2023); requisito no aplicable para las especies en estudio y su combinación, por presentar una densidad aparente mayor de 0,60 g/cm³.

Los resultados del coeficiente de variación obtenidos por Canchucaja (2020) para juntas encoladas con adhesivo EPI y pretratamiento en ambiente húmedo mostraron valores altos para las maderas tropicales *Cariniana domestica* (4,28 MPa; CV: 32,03 %), *Copaifera paupera* (3,31 MPa; CV: 32,73 %) y *Cedrelinga cateniformis* (3,36 MPa; CV: 17,18 %). Estos

resultados presentan similitud con los coeficientes de variación obtenidos para el presente estudio, siendo mayores al 18 por ciento mencionado por Lisboa *et al.* (1993) para maderas sólidas de especies tropicales. Además, Marra (1992) sostiene que la variabilidad en la resistencia al cizallamiento puede explicarse por la naturaleza única de cada pieza de madera, considerando que se utilizaron residuos de madera de segunda transformación. A pesar de la variabilidad, los valores de resistencia cumplen con los requisitos mínimos que exige la norma UNE-EN 13353 (AENOR, 2023) y pueden emplearse en la manufactura de paneles EGP para uso no estructural húmedo.

V. CONCLUSIONES

- Las características anatómicas de los residuos de las dos especies estudiadas permiten una unión efectiva de los adhesivos utilizados, lo que resulta en una adherencia satisfactoria y una resistencia aceptable.
- El contenido de humedad de los residuos de ambas especies estudiadas se sitúa dentro de los rangos recomendados para la producción de paneles EGP, utilizando los adhesivos PVA y EPI.
- La densidad obtenida en los residuos de ambas especies estudiadas está dentro del rango aceptable para garantizar una resistencia adecuada en la unión de la junta encolada.
- La especie *Guarea guidonia* mostró la relación T/R más baja y fue categorizada como estable, mientras que *Caryocar glabrum* fue clasificada como moderadamente estable.
- Los valores obtenidos de extractivos totales, pH y contenido de cenizas para ambas especies coinciden con los rangos sugeridos por la literatura de referencia. Asimismo, no se observó una influencia directa de estos resultados en las características de calidad de las juntas encoladas.
- Las juntas encoladas con adhesivo PVA y pretratamiento para uso en ambiente seco de *Caryocar glabrum*, para los gramajes de 120, 150 y 180 g/m², así como las juntas encoladas con adhesivo EPI y pretratamiento para uso en ambiente seco de las especies en estudio y su combinación, utilizando gramajes de 120,150 y 180 g/m², cumplen con el valor mínimo establecido para el 5° percentil inferior según la norma UNE-EN 13353.

- Las juntas encoladas con adhesivo EPI y pretratamiento para uso en ambiente húmedo, tanto para *Caryocar glabrum* en los gramajes 150 y 180 g/m², *Guarea guidonia* en los gramajes 120, 150 y 180 g/m², así como la combinación de *Caryocar glabrum*/*Guarea guidonia* en el gramaje 180 g/m², cumplen con el valor mínimo establecido para el 5° percentil inferior según la norma UNE-EN 13353.
- Las juntas encoladas de las especies estudiadas y su combinación satisfacen con el requisito de resistencia para la falla de la madera en los ensayos de cizallamiento establecidos en la norma UNE-EN 13353.
- Es viable elaborar paneles EGP de uso no estructural para ambiente seco, con juntas encoladas con adhesivo PVA y gramaje de 120 g/m² para *Caryocar glabrum*; así también, juntas encoladas con adhesivo EPI y gramaje de 120 g/m² para las especies en estudio y su combinación, con el fin de reducir costos de fabricación.
- Es viable elaborar paneles EGP de uso no estructural para ambiente húmedo, con adhesivo EPI para las juntas encoladas de gramaje de 150 g/m² para *Caryocar glabrum*; de gramaje de 120 g/m² para *Guarea guidonia* y de gramaje de 180 g/m² para la combinación de ambas especies en estudio, con el fin de reducir costos de fabricación.

VI. RECOMENDACIONES

- Realizar estudio para proponer un sistema de gestión de residuos para las empresas de segunda transformación de la madera.
- Elaborar un análisis de viabilidad económica para evaluar el aprovechamiento de los residuos de las maderas del presente estudio en la fabricación de paneles EGP.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- ABIMCI. (2008). Estudio Setorial 2008: Indústria de Madeira Processada Mecanicamente. Brasil.
- AENOR. (1978). UNE-EN 56540. Características físico-mecánicas de la madera. Interpretación de los resultados de los ensayos. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación.
- AENOR. (1995). UNE – EN 326-1. Tableros derivados de la madera. Muestreo, despiece e inspección. Parte 1: muestreo y despiece de probetas y expresión de resultados de ensayo. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación.
- AENOR. (2006). UNE-EN 827. Adhesivos. Determinación del contenido en sólidos convencional y del contenido en sólidos a masa constante. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación.
- AENOR. (2007). UNE – EN 314 – 1. Tableros contrachapados. Calidad del encolado. Parte 1: Métodos de ensayo. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación.
- AENOR. (2009). UNE-EN 13354. Tableros de madera maciza (SWP): Calidad de encolado – Método de ensayo. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación.
- AENOR. (2011). UNE-EN 1245. Adhesivos. Determinación del pH. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación.

- AENOR. (2016). UNE-EN 204. Adhesivos. Clasificación de adhesivos termoplásticos para madera de uso no estructural. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación.
- AENOR. (2023). UNE-EN 13353:2023. Tableros de madera maciza (SWP): Requisitos. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación.
- Akzo Nobel. (2010). Información del producto: EPI 1911 con HARDENER 1999. Versión 2010-04-30. Casco Adhesives Asia.
- Akzo Nobel Perú S.A.C. (2016). Información del producto: PVAc 3339. Versión 2016-045-10. Casco Adhesives Asia.
- Albino, C., Mori, F., & Mendes, L. (2012). Influência Das Características Anatômicas E Do Teor De Extrativos Totais Da Madeira De Eucalyptus Grandis W. Hill Ex Maiden Na Qualidade Da Colagem. *Ciência Florestal*, 22(4), 803–811.
- Almeida, V. (2013). Avaliação do potencial de uso de resíduos de madeira tropical para produção de painéis colados lateralmente - EGP [Tesis, Universidade Federal do Paraná]. <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/34627/R-T-VANESSACOELHOALMEIDA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Araújo, R. (2019). Avaliação do potencial de espécies manejadas na amazônia para produção de painéis EGP (*Edge Glued Panels*) não estrutural [Tesis, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA]. En *Indo American Journal of Pharmaceutical Sciences* (Vol. 23, Número 3). <https://doi.org/10.5281/zenodo.1477753>
- Aróstegui, A., & Acevedo, M. (1974). Evaluación de las Propiedades Físico-Mecánicas y Usos Probables de las Maderas de 20 Especies de Jenaro Herrera-Loreto. *Revista Forestal del Perú* v, 5(2), 1–11.

- Aróstegui, A., González, V., & Sato, A. (1986). Propiedades Tecnológicas y Usos de la Madera de 40 Especies del Bosque Nacional Alexander Von Humbolt. *Revista Forestal del Perú*, 10(2), 1–87.
- ASTM. (1998). ASTM D 1084-97: Standard Test Methods for Viscosity of Adhesives.
- Bandel, A. (1991). Adhesivos y Tecnología del Encolado en la Industria de la Madera. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/286263211/Bandel-Alberto>
- Barrantes, R., & Trivelli, C. (1996). Bosques y madera: Análisis económico del caso peruano. Perú: Consorcio de Investigación Peruana. http://repositorio.iep.org.pe/bitstream/IEP/1009/1/Barrantes_Bosques-y-madera.pdf
- Campelo, S. (2015). Avaliação das propriedades anatômicas, físicas, químicas e de colagem da madeira de *Genipa americana* L. [Tesis, Universidade Federal do Paraná]. http://www.floresta.ufpr.br/pos-graduacao/defesas/pdf_ms/2015/d692.pdf
- Canchucaja, J. (2020). Viabilidad Técnica Para El Uso De Residuos De Madera Provenientes De Procesos De Transformación Secundaria Para La Producción De Paneles Encolados Lateralmente (EGP) En El Perú. Universidade Federal Do Paraná.
- Carbajal, G. (2012). Descripción anatómica de la xilema de la rama de veinte especies forestales del Jardín Botánico Arboretum el “Huayo”, Puerto Almendras, Iquitos [Tesis, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana].
- Ccaipane, J. (2011). Hombres y mujeres emprendedores en la industria del mueble de madera em Lima Sur. Línea de Desarrollo Económico Local. Perú: Programa Urbano de Desco.
- CEPLAN. (2023). El sector forestal en el Perú: Propuestas estratégicas para fortalecer su desarrollo.

- Conner, A. (2001). Wood: Adhesives. Encyclopedia of Materials: Science and Technology. In Adhesives for wood (Elsevier S, p. 17). Recuperado de [http://www.entwoodllc.com/PDF/wood adhesion mechanisms.pdf](http://www.entwoodllc.com/PDF/wood%20adhesion%20mechanisms.pdf)
- Correa, C. (1997). Técnicas De Colagem De Madeira Com Adesivos Vinílicos.
- Confederación Peruana de la Madera, CPM. (2008). Compendio de Información Técnica de 32 Especies Forestales. Tomo II. CITEmadera. Lima – Perú. 56p
- Da Fonte, A. (2016). Utilização da madeira de Cryptomeria japonica para a produção de painéis colados lateralmente e aplicação de acabamento superficial [Tesis, Universidade Federal do Paraná].
- Duran, K. (2014). Comparación del análisis fitoquímico de las especies forestales de tahuari (Tabebuia serratifolia Valhl G.), Tulpay (Clarisia racemosa & Pavon) y Topa (Ochroma pyramidale Cav.). En Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- FAO. (2004). Terminología unificada sobre bioenergía - Terminología de los dendrocombustibles sólidos. Departamento Forestal de la FAO. Dendroenergía (pp. 8–53). <http://www.fao.org/faoterm/collections/climate-change/es/>
- Fernández, P. (2012). Transformación y uso sostenible de los residuos maderables y agrícolas en briquetas en Leoncio Prado - Perú [Tesis, Universidad Nacional Agraria de la Selva].
- Fiorelli, J. (2002). Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira. Ciência e Engenharia de Materiais. Universidad de São Paulo
- Foelkel, E. (2008). *Edged Glued Panel*: Paneles encolados lateralmente. Pinus Letter N°8. Recuperado de: http://www.celso-foelkel.com.br/pinus_07.html

- Follrich, J., Vay, O., Veigel, S., & Müller, U. (2010). Bond strength of end-grain joints and its dependence on surface roughness and adhesive spread. *Journal of Wood Science*, 56(5), 429–434. <https://doi.org/10.1007/s10086-010-1118-1>
- Fonseca, M. (2006). Determinación De La Composición Química De La Madera De Pino Candelillo (*Pinus Maximinoi* H. E. Moore) Procedente De La Finca Río Frío, Tactic, Alta Verapaz.
- Frihart, C., Hunt, C. (2010). Adhesives with wood materials: bond formation and performance.
- García, A. (2011). Adhesivos para a madeira e móveis. REMADE. Revista da madeira. Ed. N°128. Recuperado de: https://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1547&subject=Adesivos&title=Adesivos%20para%20a%20madeira%20e%20m%F3veis
- García, A. (2021). Higroscopicidad y propiedades termodinámicas de maderas modificadas natural y artificialmente a través de sus isotermas de sorción [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica De Madrid].
- Glass, S., Zelinka, S. (2010). Wood Handbook, Chapter 04: Moisture Relations and Physical Properties of Wood.
- Gonzales, M. (2006). Efecto de dos métodos de cepillado en la resistencia al cizallamiento de la línea de cola de dos especies de bosques secundarios [Tesis, Universidad Nacional Agraria La Molina].
- Gonzales, H. (2013). Productos Forestales De Transformación Química. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima-Perú.

- Guerra, A. (2015). Resistencia al cizallamiento de la línea de cola en madera de Tornillo (*Cedrelinga Cateniformis Ducke*) procedente de plantaciones en la zona de Ucayali-Perú [Tesis, Universidad Nacional Agraria La Molina].
- Huaynalaya, F. (2018). Evaluación de las propiedades físicas de la madera de tres especies forestales y su variación por niveles longitudinales del fuste, provenientes de la cuenca del río Utuquinia - provincia Coronel Portillo - región Ucayali [Tesis, Universidad Nacional de Ucayali].
- IAWA. (1989). List of microscopic features for hardwood identification with an appendix on non-anatomical information. International Association of Wood Anatomists. Bulletin ns. 10(3). 113p.
- INACAL. (2014a). Norma Técnica Peruana 251.010: 2014. *Madera, Método para determinar el contenido de humedad. 2 ed.* Instituto Nacional de la Calidad. Lima-Perú. 16 p.
- INACAL. (2014b). Norma Técnica Peruana 251.011. *Madera, Método para determinar la densidad. 2 ed.* Instituto Nacional de la Calidad. Lima-Perú. 9 p.
- INACAL. (2015). Norma Técnica Peruana 251.012. *Madera, Método de determinación de la contracción. 3 ed.* Instituto Nacional de la Calidad. Lima-Perú. 6 p.
- Iwakiri, S. (2005). *Painéis de Madeira Reconstituída.* Curitiba: FUPEF.
- Iwakiri, S., Andrade, A., Cardoso, A., Rocio, E., Guilherme, J., & Ono, M. (2005). Produção de painéis aglomerados de alta densificação com uso de resina melamina-uréia-formaldeído. CERNE, 11(4), 323–328.
- Junta Del Acuerdo De Cartagena – JUNAC. (1979). *Manual del grupo andino para el secado de maderas.* Primera Edición. Editorial Carbajal S.A.Colombia.

- Klock, U., Sulato, A. (2013). *Química Da Madeira* (4ta ed.). Universidade Federal Do Paraná.
- León, W. (2020). Anatomía de maderas de 130 especies de Venezuela. *Pittieria*. La Revista Del Departamento de Botánica y Ciencias Básicas. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales - Universidad de los Andes. <http://www.saber.ula.ve/pittieria/>
- Lima, C., Mori, F., Mendes, L., & Carneiro, A. (2007). Características Anatômicas E Química Da Madeira De Clones De Eucalyptus E Sua Influência Na Colagem (Número 2).
- Londoño, C., & Sepúlveda, S. (2013). Los tableros alistonados: una alternativa para el sector del mueble y la madera en *The edge-glued panels: an alternative for té sector of furniture and wood in Pereira and Dosquebradas*. *Scientia et Technica* Año XVIII, 18(4).
- López, J., Sierra, M., & Tito, R. (2017). Planeamiento estratégico de la industria de los residuos madereros en Perú [Tesis para optar el grado de magister, Pontificia Universidad Católica del Perú] <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/9589>
- Lu, J. (2014). Validación de método para determinar parámetros óptimos de los procesos de unión, mediante adhesivos disponibles del mercado nacional con maderas amazónicas, para la producción de componentes de uso estructural [Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería].
- Madrid, M. (1999). *Mecanismos Fundamentales de la Adhesión*. Seminario sobre Adhesivos. Madrid-España: Departamento Técnico Henkel. <http://materiales.unex.es/downloadladhesivos.pdf>
- Marra, A. (1992). *Technology of Wood Bonding: Principles in practice* (VNR). University of Massachusetts.

- Martins, S. (2011). Adequação tecnológica da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage para a produção de painéis colados lateralmente (PCL) [Tesis, Universidade de Brasília].
- Nock, H., Richter, H. (1978). Adesão e Adesivos – Adesivos e sua aplicação na indústria madeireira. Tópicos de Tecnologia da Madeira. Universidade Federal do Paraná, 94p., Curitiba.
- OIMT. (1992). Utilización Industrial de Nuevas Especies Forestales en el Perú-Fase II. Proyecto ITTO PF 37/88 revisión 3 Fase II-Ficha Técnica. Cámara Nacional Forestal. Dirección General Forestal y de Fauna Silvestre. Disponible en: https://www.itto.int/files/itto_project_db_input/2231/Technical/PD37-88%20PhII%20FICHA%20TECNICA%201992.pdf
- Pimentel, F. (2000). Estatística Experimental. 14 ed. Piracicaba: Nobel.
- Pizzi, A., & Mittal, K. (2010). Wood adhesives (CRC Press). VSP.
- Prata, J. (2010). Estudo da viabilidade tecnológica do uso de espécies de pinus tropicais para produção de painéis colados lateralmente (*Edge Glued Panels* - EGP) [Tesis, Universidade Federal Do Paraná].
- Quagliotti, S. (2008). Evaluación de la resistencia al cizallamiento por compresión y falla en madera de uniones encoladas en maderas nacionales e importadas. INNOTEC-Revista del LATU, 3, 23–29.
- Reynel, C., Pennington, T. D. & Pennington, R. T. (2016). Árboles del Perú. Biblioteca Nacional del Perú.
- Richter, H. & Dallwitz, M. (2000). Maderas comerciales: descripciones, ilustraciones, identificación y recuperación de información. En inglés, francés, alemán, portugués y español. www.delta-intkey.com

- River, B., Okkonen, E. (1991). *Delamination of edge-glued Wood panels. Moisture effects. Madison: Research Note FPL-RN-0259. Forest Products Laboratory.*
- Rodríguez, A., & Kometter, R. (2012). Diagnóstico de la Cadena de Valor del Sector Forestal Maderable en la Región Ucayali-Perú.
- Rowell, R. M. (2005). Handbook of wood chemistry and wood composites. CRC Press.
- Selbo, M. (1975). Adhesive bonding of Wood. New York: Technical bulletin. USDA/Forest Service, n. 1512, p 1-122.
- SERFOR. (2019). Memoria Anual 2019 Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. www.serfor.gob.pe
- Sibille, A. M., & Rodríguez, Mario. (1996). Manual de identificación de especies forestales de la subregión andina: Proyecto PD 150/91 Rev. 1 (I) “Identificación y Nomenclatura de las Maderas Tropicales Comerciales en la Subregión Andina”. Ministerio de Agricultura, INIA, Instituto Nacional de Investigación Agraria, Organización Internacional de las Maderas Tropicales, OIMT.
- Sjöström, E. (1993). Wood chemistry: fundamentals and applications (Second edition). Academic Press.
- Skaar, C. (1988). Wood-Water Relations. Department of Forest Products. Virginia Polytechnic Institute and State University. New York. USA.
- TAPPI. (2007). TAPPI T 264 cm-07: Preparación de la madera para análisis químico. Asociación Técnica de la Industria de la Pulpa y el Papel.
- TAPPI. (2012). TAPPI T 257 sp-12: Muestreo y preparación de la madera para análisis. Asociación Técnica de la Industria de la Pulpa y el Papel.

- TAPPI. (2016a). TAPPI T 252: pH y conductividad eléctrica de extracto de pulpa, papel y cartón de agua caliente. Asociación Técnica de la Industria de la Pulpa y el Papel.
- TAPPI. (2016b). TAPPI T 211: Ceniza en madera, pulpa, papel y cartón: combustión a 525 °C. Asociación Técnica de la Industria de la Pulpa y el Papel.
- TAPPI. (2017). TAPPI T 204: Extractos solventes de madera y pulpa. Asociación Técnica de la Industria de la Pulpa y el Papel.
- Tirira, V., Proaño, C. (2011). Diseño de un sistema de control para el proceso de elaboración de tableros alistonados de madera en la empresa Botrosa, provincia de Esmeraldas [Tesis, Universidad Técnica del Norte].
- Tsoumis, G. (1968). Wood As Raw Material (First edition). Pergamon Press.
- UNIQUE. (2015). Cadenas de valor en el sector forestal del Perú: Informe diagnóstico y desarrollo estratégico.
- USDA, Service Forest, & Laboratory Forest Products. (1999). Wood Handbook: Wood as an engineering material (University).
<https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr113/fplgtr113.pdf>
- Valderrama, H. (1993). Características Tecnológicas y Uso Industrial de Nuevas Especies Forestales de la Amazonia Peruana. Folia Amazónica. IIAP, 5(2), 1–25.
- Vick, C. (1999). Adhesive Bonding of Wood Materials (Products Laboratory). Wood handbook - Wood as an engineering material.
- Vignote, S., & Martínez, I. (2006). Tecnología de la Madera (Mundi-Prensa, Ed.; 3ra ed.).
- Villar, D. (2011). Rendimiento de madera en la producción de muebles y artesanía en el Valle de Mantaro [Tesis, Universidad Nacional del Centro del Perú].

Zimmerman, D. (2006). Adesivos para pisos engenheirados: da fabricação á instalação. Remade: Revista da madeira. Ed. 94. Recuperado de http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=851&subject=Adesivos&title=Colagem%20define%20resist%EAncia%20dos%20produtos%20de%20madeira