

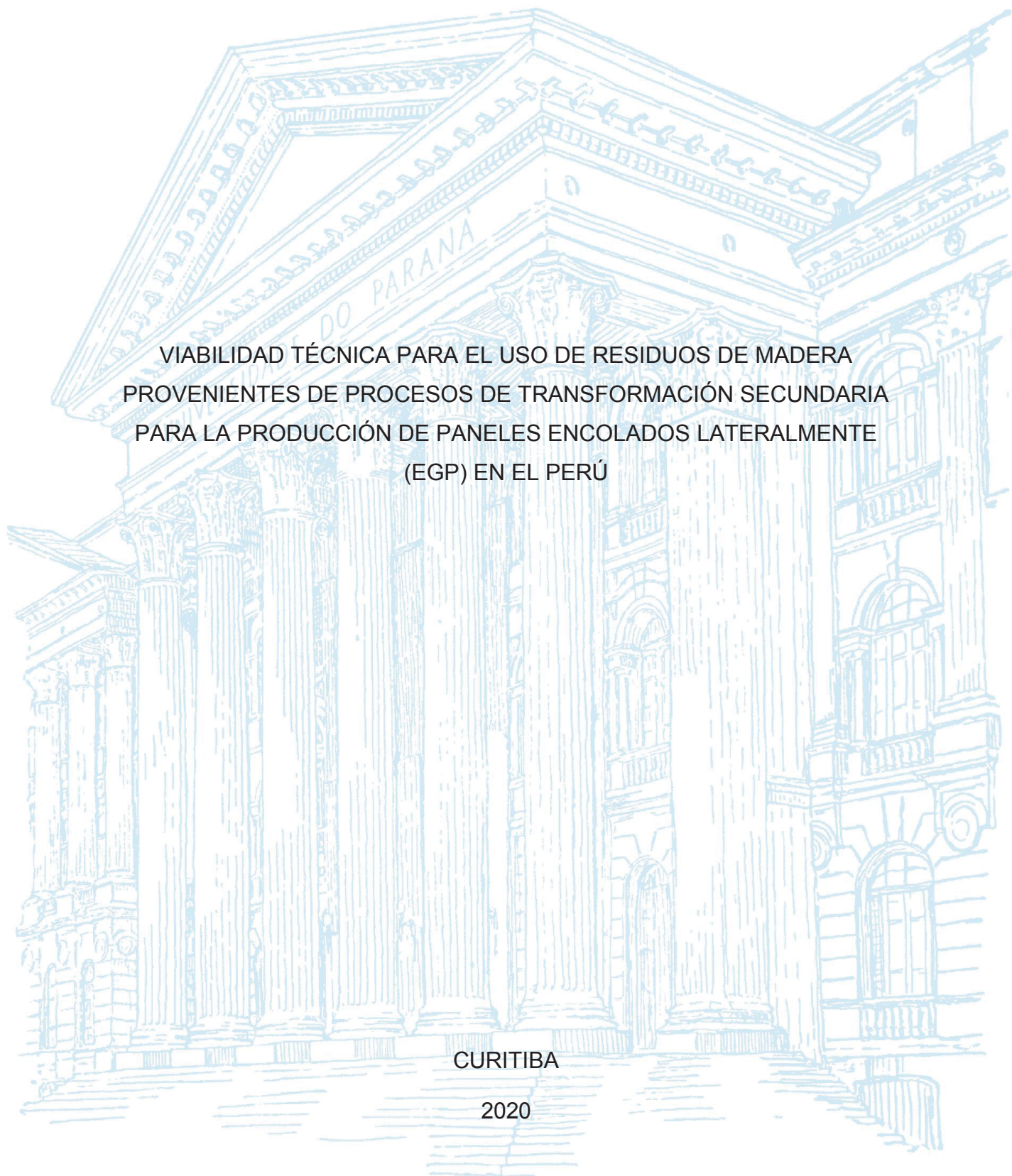
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JULIO CESAR CANCHUCAJA ROJAS

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

CURITIBA

2020



JULIO CESAR CANCHUCAJA ROJAS

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

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do Título de Doutor em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Setsuo Iwakiri

Coorientadores: Profa. Dra. Rosilani Trianoski
Prof. Ph.D. Héctor E. Gonzáles
Mora

CURITIBA

2020

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Canchucaja Rojas, Julio Cesar

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 / Julio Cesar Canchucaja Rojas.
- Curitiba, 2020.

153 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Setsuo Iwakiri

Coorientadores: Profa. Dra. Rosilani Trianoski

Prof. Ph.D. Héctor Enrique Gonzáles Mora

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.

Defesa: Curitiba, 21/08/2020.

Área de concentração: Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

1. Painéis de madeira - Peru. 2. Lâminas de madeira - Peru. 3. Resíduos vegetais - Peru. 4. Madeira - Produtos. 5. Teses. I. Iwakiri, Setsuo. II. Trianoski, Rosilani. III. Gonzáles Mora, Héctor Enrique. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.832.2(85)

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **JULIO CESAR CANCHUCAJA ROJAS** intitulada: **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.**, sob orientação do Prof. Dr. SETSUO IWAKIRI, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 21 de Agosto de 2020.

Assinatura Eletrônica
24/08/2020 17:15:47.0
SETSUO IWAKIRI

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
24/08/2020 13:58:37.0

JOSÉ GUILHERME PRATA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
25/08/2020 11:59:31.0

CARLOS FREDERICO ALICE PARCHEN

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
24/08/2020 16:39:50.0

EVERTON HILLIG

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE)

Assinatura Eletrônica
24/08/2020 11:27:44.0

ADAUTO JOSÉ MIRANDA DE LIMA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

A mi querida esposa Jenny y mi hijo Juan Rodrigo por todo su amor y apoyo incondicional. A mi padre César y madre Viviana por su cariño, motivación e inspiración a lo largo de mi vida. A mis Hermanas Elena, Gladys, Teresa, Carmen y Sonia por su afecto y respaldo permanente.

AGRADECIMENTOS

A Dios por brindarme la fortaleza, perseverancia y conceder amor, paz y salud para mi familia.

A mi Orientador profesor Dr. Setsuo Iwakiri por sus enseñanzas, amistad y permanente direccionamiento en la conducción del presente trabajo de doctorado.

A mis co-orientadores Dra. Rosilani Trianoski y Dr. Héctor Enrique Gonzales Mora, por todo su apoyo y consejos para la culminación de esta investigación.

A los profesores miembros de la banca de evaluación Dr. Everton Hillig, Dr. José Guilherme Prata, Dr. Carlos Frederico Alice Parchen y Dr. Adauto José Miranda de Lima, por sus aportes y sugerencias brindadas para la mejora del trabajo de tesis.

A los Profesores del Programa de Post Graduación en Ingeniería Forestal de la Universidad Federal de Paraná; Dr. Nilton Souza, Dr. Marcio Pereira da Rocha, Dr. Ricardo Klitzke, Dr. Romano Timofeiczkyk, y Dr. Jorge Mattos por sus enseñanzas y consejos.

Al Dr. Francisco García Fernández, colega y amigo, por sus consejos y enseñanzas brindadas durante el desarrollo de mis estudios de doctorado.

Al Sr. Hector Rocca Huanca, Gerente de la empresa KFR Inversiones S.A., al Sr. Florentino Choque Arias, Gerente de la empresa Industry of Furniture S.A. y al Ing. Willy Sedano Tamagno, Gerente de la empresa Postes Wise S.A.C. por su valiosa colaboración en el suministro y maquinado de los residuos de madera, así como en la manufactura de los materiales de estudio.

A los Laboratorios de Anatomía de la Madera, Ensayos Tecnológicos, Productos Forestales y de Química de la madera, por su colaboración en el desarrollo de los ensayos requeridos para esta investigación.

Al Ing. Rolando Montenegro Muro, Sr. Manuel Aspajo Valles, Eduardo Gonzáles Maguiña (QEPD), Roy Pacchioni Valentín y Jaime Borja Navarro por su apoyo y colaboración durante la ejecución del presente trabajo.

A todos mis colegas de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria la Molina, por su apoyo y amistad.

RESUMO

A indústria madeireira no Peru, pelo fato de utilizar principalmente madeira de florestas tropicais nativas como matéria-prima, que não possui manejo silvicultural, obtém baixos coeficientes de aproveitamento na transformação primária e secundária, gerando grandes volumes de resíduos que, na melhor das hipóteses, eles são usados como fonte de energia ou são coletados dentro da empresa, causando impactos ambientais e sociais. Para revalorizá-los convertendo-os em subprodutos, parte dos resíduos produzidos na transformação secundária pode ser usada na produção de painéis colados lateralmente (EGP), um produto com maior valor agregado que está sendo importado atualmente para satisfazer a demanda nacional. No presente estudo, foi avaliada a viabilidade técnica do uso de resíduos de madeira das espécies mais utilizadas em móveis escolares, *Cariniana domestica* (Mart) Miers, *Copaifera paupera* (Herzog) Dwyer e *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke, para a produção de painéis EGP. Os resíduos de madeira das espécies estudadas foram caracterizados anatomicamente, avaliando também suas propriedades físicas (massa específica, variação dimensional e teor de umidade) e químicas (extrativos totais, pH e cinzas). Além disso, foram avaliadas a viscosidade, o pH e o teor de sólidos dos adesivos PVA e EPI utilizados na colagem. Juntas coladas lateralmente foram elaboradas com as três espécies e suas combinações, utilizando a gramatura de 180 g/m², pressão específica de 0,8 MPa e tempo de prensagem a frio de 60 minutos; da mesma forma, para as emendas *finger joint*, foi aplicada a gramatura de 200 g/m², pressão específica de 1,0 MPa e tempo de 8 segundos. Posteriormente, os ensaios de cisalhamento foram realizados na linha de cola, utilizando os pré-tratamentos para uso em ambientes secos e úmidos indicados na norma UNE-EN 13354; bem como os ensaios de flexão estática e tração paralela mencionados na ASTM D 5572, submetendo-os anteriormente a pré-tratamentos secos, de alta temperatura e três ciclos na água. Os resultados obtidos indicam que os resíduos das três espécies estudadas apresentam características anatômicas, físicas e químicas adequadas para a sua utilização na fabricação de painéis EGP. Além disso, é possível produzir painéis EGP para uso não estrutural seco, com resíduos das espécies *Cariniana domestica*, *Copaifera paupera*, *Cedrelinga cateniformis*, *Cariniana domestica/Cedrelinga cateniformis* e *Copaifera paupera/Cedrelinga cateniformis*, usando o adesivo EPI para colagem lateral, para os melhores resultados obtidos, e o PVA para as emendas *finger joint*, devido ao menor custo. Da mesma forma, propõe-se o uso das espécies *Cariniana domestica*, *Copaifera paupera* e *Cariniana domestica/Cedrelinga cateniformis* para uso não estrutural úmido, usando o adesivo EPI para colagem lateral e emendas *finger joint*, pois atendem aos requisitos mínimos de qualidade exigidas pelas normas técnicas indicadas para o referido produto.

Palavras-chave: Painel de madeira maciça. Espécies tropicais. Resíduos de madeira. Transformação secundária.

ABSTRACT

Wood industry in Peru lacks of efficiency in the wood primary and secondary transformation, because it uses mainly wood from native tropical forests, with no silvicultural management. Besides it generates large volumes of waste which in the best cases are used for energy, otherwise accumulated within the company, causing environmental and social impacts. In order to increase their value through conversion to by-products, part of this waste produced in the secondary transformation would be used in the production of Edge Glued Panels (EGP), higher value-added product that is currently being imported to satisfy the national demand. The present research studies the technical feasibility to manufacture EGP panels from wood residues of the most commonly used species for school furniture, *Cariniana domestica* (Mart) Miers, *Copaifera paupera* (Herzog) Dwyer and *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke was evaluated. The wood residues of the studied species were characterized anatomically. Also, their physical properties (specific gravity, dimensional variation and moisture content) and chemical properties (total extractive, pH and ash) were determined. In addition, the viscosity, pH and solids content of the PVA and EPI adhesives used for gluing were evaluated. The laterally glued joints were made with the three species and their combinations. A grammage of 180 g/m², specific pressure of 0,8 MPa and a cold pressing time of 60 minutes were used. Likewise, for the finger joint, a grammage of 200 g/m² and specific pressure of 1,0 MPa for 8 seconds were applied. Next, the shear tests were carried out on the glue line, pretreatments for dry and wet environment used as indicated in UNE-EN 13354. Afterwards tests of static bending and parallel traction were conducted according to ASTM D 5572. Pretreatments in dry conditions, high temperature and three cycles in water were performed before these tests. Results obtained indicate that the residues of the three species studied have anatomical, physical and chemical characteristics that allows the use of them for manufacturing EGP panels. In addition, it is suitable to manufacture EGP panels for dry non-structural use with the residues of the species *Cariniana domestica*, *Copaifera paupera*, *Cedrelinga cateniformis*, *Cariniana domestica/Cedrelinga cateniformis* and *Copaifera paupera/Cedrelinga cateniformis*. This is achieved with better results and lower costs by using EPI adhesive for lateral gluing, and PVA adhesive for finger joint. Likewise, it is proposed for wet non-structural use to utilize the species *Cariniana domestica*, *Copaifera paupera* and *Cariniana domestica/Cedrelinga cateniformis* employing EPI adhesive for lateral gluing and for finger joint because they meet the minimum quality requirements pointed in the standards for the product.

Key-words: Solid wood board. Tropical species. Wood residues. Secondary transformation.

RESUMEN

La industria maderera en el Perú, debido a que utiliza mayormente como materia prima madera proveniente de bosques tropicales nativos, que no han tenido manejo silvicultural, obtiene bajos coeficientes de aprovechamiento en la transformación primaria y secundaria, generando grandes volúmenes de residuos que, en el mejor de los casos, son utilizados como fuente de energía, o bien son acopiados al interior de la empresa, ocasionando impactos medioambientales y sociales. Con el fin de revalorizarlos mediante la conversión a subproductos, parte de los residuos producidos en la transformación secundaria, pueden utilizarse en la producción de paneles encolados lateralmente (EGP), producto de mayor valor agregado que actualmente se está importando para satisfacer la demanda nacional. En el presente estudio se evaluó la viabilidad técnica del uso de residuos de madera de las especies más comúnmente utilizadas para mobiliario escolar, *Cariniana domestica* (Mart) Miers, *Copaifera paupera* (Herzog) Dwyer y *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke, para la producción de paneles EGP. Los residuos de madera de las especies estudiadas fueron caracterizados anatómicamente, evaluando además sus propiedades físicas (masa específica, variación dimensional y contenido de humedad) y químicas (extractivos totales, pH y cenizas). Además, se evaluaron la viscosidad, pH y contenido de sólidos de los adhesivos PVA y EPI utilizados para el encolado. Se elaboraron juntas encoladas lateralmente con las tres especies y sus combinaciones, utilizando un gramaje de 180 g/m², presión específica de 0,8 MPa y un tiempo de prensado en frío de 60 minutos; asimismo, para los empalmes *finger joint*, se aplicó un gramaje de 200 g/m², presión específica de 1,0 MPa y un tiempo de 8 segundos. Seguidamente, se realizaron los ensayos de cizallamiento en la línea de cola, utilizando los pretratamientos para uso en ambiente seco y húmedo indicados en la norma UNE-EN 13354; así como las pruebas de flexión estática y tracción paralela, mencionadas en la ASTM D 5572, sometiénolas previamente a los pretratamientos en seco, alta temperatura y de tres ciclos en agua. Los resultados obtenidos indican que los residuos de las tres especies estudiadas presentan características anatómicas, físicas y químicas que permiten ser utilizadas para la fabricación de paneles EGP. Además, es factible elaborar paneles EGP para uso no estructural seco, con residuos de las especies *Cariniana domestica*, *Copaifera paupera*, *Cedrelinga cateniformis*, *Cariniana domestica/Cedrelinga cateniformis* y *Copaifera paupera/Cedrelinga cateniformis*, utilizando el adhesivo EPI para el encolado de juntas laterales, por los mejores resultados obtenidos, y el PVA para los empalmes *finger joint*, por su menor costo. Igualmente, se plantea para uso no estructural húmedo el aprovechamiento de las especies *Cariniana domestica*, *Copaifera paupera* y *Cariniana domestica/Cedrelinga cateniformis*, empleando el adhesivo EPI para el encolado de juntas laterales y empalmes *finger joint*, porque cumplen con los requisitos mínimos de calidad indicados en las normas técnicas referidas para dicho producto.

Palabras clave: Tablero de madera maciza. Especies tropicales. Residuos de madera. Transformación secundaria

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – RESIDUOS GENERADOS EN LAS EMPRESAS DE FABRICACIÓN DE MOBILIARIO ESCOLAR	58
FIGURA 2 – PREPARACIÓN DE LISTONES A PARTIR DE RESIDUOS DE MADERA.....	59
FIGURA 3 – MEDICIÓN DE DIÁMETRO TANGENCIAL Y FRECUENCIA DE POROS EN IMÁGENES TOMADAS DE LOS RESIDUOS DE MADERA	60
FIGURA 4 - DETERMINACIÓN DE LA MASA ESPECÍFICA BÁSICA Y APARENTE DE LOS RESIDUOS DE MADERA	62
FIGURA 5 – MEDICIÓN DE LA SECCIÓN DE UNA PROBETA PARA DETERMINAR LA VARIACIÓN DIMENSIONAL	63
FIGURA 6 – DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DE LOS RESIDUOS DE MADERA	64
FIGURA 7 - DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DE UN ADHESIVO EN VISCOSIMETRO BROOKFIELD	65
FIGURA 8 - CORTE DE LOS EXTREMOS DE LISTONES CON EQUIPO PROVISTO DE CABEZAL <i>FINGER JOINT</i>	67
FIGURA 9 – GEOMETRÍA DE LOS DIENTES <i>FINGER JOINT</i>	67
FIGURA 10 – ENCOLADO LATERAL DE LISTONES OBTENIDOS DE .RESIDUOS DE LAS MADERAS ESTUDIADAS	68
FIGURA 11 – FLUJOGRAMA DE LA ELABORACIÓN DE MUESTRAS DE PANELES EGP.....	69
FIGURA 12 – PROBETAS PARA ENSAYOS MECÁNICOS DE CIZALLAMIENTO Y TRACCIÓN PARALELA.....	70
FIGURA 13 – ENSAYOS MECÁNICOS DE PROBETAS DE JUNTAS Y EMPALMES ENCOLADOS DE LOS RESIDUOS DE MADERA.	71
FIGURA 14 - FOTOGRAFÍAS DE LA MADERA <i>Cariniana domestica</i>	77

FIGURA 15 - FOTOGRAFÍA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA MADERA <i>Cariniana domestica</i> , DE 1 mm ²	77
FIGURA 16 - FOTOGRAFÍAS DE LA MADERA <i>Copaifera paupera</i>	78
FIGURA 17 - FOTOGRAFÍA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA MADERA <i>Copaifera paupera</i> , DE 1 mm ²	79
FIGURA 18 - FOTOGRAFÍAS DE LA MADERA <i>Cedrelinga cateniformis</i>	80
FIGURA 19 - FOTOGRAFÍA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA MADERA <i>Cedrelinga cateniformis</i> , DE 1 mm ²	80
FIGURA 20 - BARRAS DE ERROR (IC 95%) DE LA RESISTENCIA DE LAS JUNTAS ENCOLADAS AL CIZALLAMIENTO PARA ADHESIVOS PVA Y EPI, POR ESPECIE.....	96
FIGURA 21 - CORRELACIÓN ENTRE MASA ESPECÍFICA BÁSICA Y RESISTENCIA AL CIZALLAMIENTO DE PROBETAS ENCOLADAS CON ADHESIVO PVA.....	103
FIGURA 22 - CORRELACIÓN ENTRE MASA ESPECÍFICA BÁSICA Y RESISTENCIA AL CIZALLAMIENTO DE PROBETAS ENCOLADAS CON ADHESIVO EPI	104
FIGURA 23 - CORRELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE HUMEDAD Y RESISTENCIA AL CIZALLAMIENTO DE PROBETAS ENCOLADAS CON ADHESIVO PVA.....	106
FIGURA 24 - CORRELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE HUMEDAD Y RESISTENCIA AL CIZALLAMIENTO DE PROBETAS ENCOLADAS CON ADHESIVO EPI	107
FIGURA 25 - BARRAS DE ERROR (IC 95%) DEL MOR EN FLEXIÓN ESTÁTICA PARA ADHESIVOS PVA Y EPI POR ESPECIE, AGRUPADOS POR PRETRATAMIENTO	112
FIGURA 26 - BARRAS DE ERROR (IC 95%) DEL EFECTO DE LOS PRETRATAMIENTOS EN LOS RESULTADOS DEL MOR EN FLEXIÓN ESTÁTICA.....	121

FIGURA 27 - BARRAS DE ERROR (IC 95%) DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN PARALELA PARA ADHESIVOS PVA Y EPI POR ESPECIE, AGRUPADOS POR PRETRATAMIENTO	127
FIGURA 28 - BARRAS DE ERROR (IC 95%) DEL EFECTO DE LOS PRETRATAMIENTOS EN LOS RESULTADOS DE TENSIÓN MAXIMA EN TRACCIÓN PARALELA	136

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 - CLASIFICACIÓN DE LOS ADHESIVOS TERMOPLÁSTICOS SEGÚN SU DURABILIDAD	45
TABLA 2 – DISEÑO EXPERIMENTAL DE LOS ENSAYOS DE CIZALLAMIENTO DEL ENCOLADO LATERAL.....	74
TABLA 3 - DISEÑO EXPERIMENTAL DE LOS ENSAYOS DE FLEXIÓN ESTÁTICA Y DE TRACCIÓN PARALELA DE EMPALMES <i>FINGER JOINT</i>	75
TABLA 4 - VALORES PROMEDIO DE CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS RESIDUOS DE MADERA	82
TABLA 5 - VALORES PROMEDIO DE MASA ESPECÍFICA DE LOS RESIDUOS DE MADERA	84
TABLA 6 - VALORES PROMEDIO DE CONTRACCIÓN MÁXIMA Y COEFICIENTE DE ANISOTROPÍA DE LOS RESIDUOS DE MADERA.....	86
TABLA 7 - VALORES PROMEDIO DE EXTRACTIVOS TOTALES, pH Y CONTENIDO DE CENIZAS DE LOS RESIDUOS DE MADERA	89
TABLA 8 - VALORES PROMEDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS ADHESIVOS UTILIZADOS	92
TABLA 9 - RESISTENCIA DE LAS JUNTAS ENCOLADAS AL CIZALLAMIENTO.....	95
TABLA 10 - RESISTENCIA AL CIZALLAMIENTO DE JUNTAS ENCOLADAS CON LAS ESPECIES ESTUDIADAS Y DOS ADHESIVOS, CON PRETRATAMIENTO PARA USO EN AMBIENTE SECO	98
TABLA 11 – RESISTENCIA AL CIZALLAMIENTO DE JUNTAS ENCOLADAS CON ADHESIVO EPI, CON PRETRATAMIENTO PARA USO EN AMBIENTE HÚMEDO	108

TABLA 12 - RESISTENCIA DEL MÓDULO DE ROTURA (MOR) EN FLEXIÓN ESTÁTICA, DE EMPALMES <i>FINGER JOINT</i> DE LAS ESPECIES ESTUDIADAS, ENCOLADAS CON ADHESIVOS PVA Y EPI.....	111
TABLA 13 - VALORES PROMEDIO DEL MOR EN FLEXIÓN ESTÁTICA DE LAS ESPECIES ESTUDIADAS, CON PRETRATAMIENTO SECO	114
TABLA 14 - VALORES PROMEDIO DEL MOR EN FLEXIÓN ESTÁTICA PARA LAS ESPECIES ESTUDIADAS, CON PRETRATAMIENTO A ALTA TEMPERATURA	116
TABLA 15 - VALORES PROMEDIO DEL MOR EN FLEXIÓN ESTÁTICA PARA LAS ESPECIES ESTUDIADAS, CON PRETRATAMIENTO DE TRES CICLOS EN AGUA	117
TABLA 16 - VALORES PROMEDIO DEL MOR EN FLEXIÓN ESTÁTICA PARA LOS ADHESIVOS PVA Y EPI, CON PRETRATAMIENTO DE TRES CICLOS EN AGUA.....	118
TABLA 17 - EFECTO DE LOS PRETRATAMIENTOS EN LOS RESULTADOS DE FLEXIÓN ESTÁTICA DE LAS ESPECIES ESTUDIADAS, ENCOLADAS CON ADHESIVOS PVA Y EPI.....	120
TABLA 18 - RESISTENCIA DE LA TENSIÓN MÁXIMA EN TRACCIÓN PARALELA DE EMPALMES <i>FINGER JOINT</i> DE LAS ESPECIES ESTUDIADAS, ENCOLADAS CON ADHESIVOS PVA Y EPI	126
TABLA 19 - VALORES PROMEDIO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN PARALELA DE LAS ESPECIES ESTUDIADAS, CON PRETRATAMIENTO SECO	129
TABLA 20 - VALORES PROMEDIO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN PARALELA DE LAS ESPECIES ESTUDIADAS, CON PRETRATAMIENTO A ALTA TEMPERATURA.....	131
TABLA 21 - VALORES PROMEDIO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN PARALELA PARA LOS ADHESIVOS PVA Y EPI, CON PRETRATAMIENTO A ALTA TEMPERATURA.....	132

TABLA 22 - VALORES PROMEDIO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN PARALELA DE LAS ESPECIES ESTUDIADAS CON PRETRATAMIENTO DE TRES CICLOS EN AGUA	133
TABLA 23 - VALORES PROMEDIO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN PARALELA PARA LOS ADHESIVOS PVA Y EPI, CON PRETRATAMIENTO DE TRES CICLOS EN AGUA	134
TABLA 24 - EFECTO DE LOS PRETRATAMIENTOS EN LOS RESULTADOS DE TRACCIÓN PARALELA EN LAS ESPECIES ESTUDIADAS, ENCOLADAS CON ADHESIVOS PVA Y EPI.....	135

LISTA DE SIGLAS

AENOR	– Asociación Española de Normalización y Certificación
AITIM	– Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera
ANOVA	– Análisis de Varianza
ASTM	– <i>American Society for Testing and Materials</i>
DAP	– Diámetro a la Altura del Pecho
EGP	– <i>Edge Glued Panel</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 la Calidad
IRANOR	– Instituto de Racionalización y Normalización
JUNAC	– Junta del Acuerdo de Cartagena
MOR	– Módulo de rotura
NEC	– Núcleo Ejecutor de Compras
NTP	– Norma Técnica Peruana
PMVA	– Producto de Mayor Valor Agregado
pH	– Potencial de hidrógeno
PVA	– Polivinil Acetato
SERFOR	– Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre
SPW	– <i>Solid wood panel</i>
TAPPI	– <i>Technical Association of the Pulp and Paper Industry</i>
TM	– Tensión máxima
UNALM	– Universidad Nacional Agraria La Molina
UNE	– Una Norma Española

LISTA DE UNIDADES

%	- Porcentaje
g/cm ²	- Gramo por centímetro cuadrado
g/cm ³	- Gramo por centímetro cúbico
g/m ²	- Gramo por metro cuadrado
mm	- Milímetro
mm ²	- Milímetro cuadrado
m	- Metro
N/mm ²	- Newton por milímetro cuadrado
CO ₂	- Dióxido de carbono
cm	- Centímetro
°C	- Grado celsius
MPa	- Megapascal
cP	- Centipoise
lb	- Libra
μm	- Micra

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	20
1.1	CONTEXTO Y PROBLEMA.....	20
1.2	OBJETIVOS	23
1.2.1	Objetivo general:	23
1.2.2	Objetivos específicos:.....	23
2	REVISIÓN DE LITERATURA.....	24
2.1	ESPECIES ESTUDIADAS	24
2.1.1	<i>Cariniana domestica</i> (Mart) Miers	24
2.1.2	<i>Copaifera paupera</i> (Herzog) Dwyer	25
2.1.3	<i>Cedrelinga cateniformis</i> (Ducke) Ducke.....	27
2.2	RESIDUOS DE LA TRANSFORMACIÓN DE LA MADERA.....	28
2.3	FACTORES QUE AFECTAN EL ENCOLADO DE LA MADERA.....	31
2.3.1	Propiedades anatómicas	31
2.3.2	Propiedades físicas	34
2.3.3	Propiedades químicas	39
2.4	ADHESIVOS UTILIZADOS EN LA PRODUCCIÓN DE PANELES EGP	41
2.4.1	Adhesivo acetato de polivinilo (PVA)	42
2.4.2	Adhesivo Emulsión polimérica de isocianato (EPI)	45
2.5	PROPIEDADES DE LOS ADHESIVOS.....	47
2.5.1	Viscosidad	47
2.5.2	Contenido de sólidos	48
2.5.3	pH.....	48
2.6	FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PRENSADO.....	49
2.7	PANELES EGP.....	52
2.8	CALIDAD DEL ENCOLADO DE PANELES EGP.....	53
2.9	ESTUDIOS REALIZADOS SOBRE PANELES EGP.....	55
3	MATERIAL Y MÉTODOS.....	58
3.1	MATERIAL	58
3.2	MÉTODOS	59
3.2.1	Preparación de los residuos de madera.....	59
3.2.2	Descripción anatómica de los residuos de madera.....	60

3.2.3	Evaluación de las propiedades físicas de los residuos de madera	61
3.2.4	Evaluación de las propiedades químicas de los residuos de madera ...	63
3.2.5	Determinación de las propiedades de los adhesivos	65
3.2.6	Producción de juntas encoladas y empalmes <i>finger joint</i>	66
3.2.7	Preparación de las probetas para ensayos mecánicos	70
3.2.8	Determinación de la resistencia del encolado lateral y de empalmes <i>finger joint</i>	70
3.2.9	Análisis estadístico	73
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	76
4.1	DESCRIPCIÓN ANATÓMICA DE LOS RESIDUOS DE MADERA.....	76
4.2	PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS RESIDUOS DE MADERA	82
4.2.1	Contenido de humedad	82
4.2.2	Masa específica.....	84
4.2.3	Variación dimensional.....	86
4.3	PROPIEDADES QUÍMICAS DE LOS RESIDUOS DE MADERA	88
4.4	PROPIEDADES DE LOS ADHESIVOS	92
4.5	RESISTENCIA DE LAS JUNTAS ENCOLADAS AL CIZALLAMIENTO .	94
4.5.1	Con pretratamiento para uso en ambiente seco	97
4.5.2	Con pretratamiento para uso en ambiente húmedo	108
4.6	RESISTENCIA DE EMPALMES <i>FINGER JOINT</i> A FLEXIÓN ESTÁTICA.....	110
4.6.1	Con pretratamiento seco	113
4.6.2	Con pretratamiento a alta temperatura	115
4.6.3	Con pretratamiento de tres ciclos en agua.....	117
4.6.4	Efecto de los pretratamientos	119
4.7	RESISTENCIA DE EMPALMES <i>FINGER JOINT</i> A TRACCIÓN PARALELA	125
4.7.1	Con pretratamiento seco	128
4.7.2	Con pretratamiento a alta temperatura	130
4.7.3	Con pretratamiento de tres ciclos en agua.....	132
4.7.4	Efecto de los pretratamientos	135
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	140
	REFERENCIAS	143

1 INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO Y PROBLEMA

La sociedad actual muestra cada vez más preocupación por el uso sostenible de los recursos naturales por parte de las empresas extractivas. En este contexto, la industria forestal se incluye en esta problemática debido a que, al realizar la transformación de la madera para obtener productos de valor agregado, genera residuos y, de no ser adecuadamente manejados, pueden causar problemas socioambientales.

En el Perú, la industria forestal utiliza mayormente materia prima proveniente del bosque tropical amazónico, debido a que no cuenta con políticas ni programas gubernamentales que promuevan efectivamente las plantaciones forestales con fines industriales.

En lo que respecta a la producción nacional, en el 2017 se produjeron un millón seiscientos cincuenta y seis mil doscientos seis metros cúbicos de madera rolliza, mientras que el volumen de madera aserrada fue de cuatrocientos ochenta y dos mil trescientos veinte metros cúbicos, lo cual representa el 29,12% del total de madera extraída del bosque (SERFOR, 2019).

En la transformación primaria de trozas de especies tropicales a madera aserrada, el porcentaje de residuos producido fluctúa de 37 a 78%, valores que dependen mayormente de la calidad de la materia prima y de la tecnología de procesamiento utilizada (CANCHANYA, 2011; SOLANO et al., 2013).

En la industria de transformación secundaria, donde se encuentran principalmente las fábricas de muebles, pisos, puertas, crucetas y parihuelas, se utiliza comunmente madera aserrada como materia prima, produciendo residuos que oscilan del 30 al 48%, dependiendo del tipo de producto elaborado (CASANA; PRIETO, 2008; MAYTA, ESQUINARILA, 2014; BODERO, 2014).

En lo referente al producto mobiliario escolar, el Ministerio de Educación, a través de la Dirección General de Desarrollo Productivo, del

Ministerio de la Producción, compra periódicamente carpetas escolares para las instituciones educativas. Es por ello que, en el año 2013, de acuerdo a lo dispuesto en el Decreto de Urgencia N°058/2011, y bajo la modalidad de Núcleos Ejecutores de Compras (NEC), se adquirieron ciento seis mil ochocientos ochenta módulos escolares, para lo cual se utilizaron aproximadamente dos millones ciento cincuenta mil pies tablares de madera aserrada (MINISTERIO DE LA PRODUCCIÓN, 2013). De la misma forma, en el 2015 se efectuó la adquisición de ciento tres mil cuatrocientos veinticuatro módulos de carpetas escolares y treinta y un mil ciento trece kits de educación inicial, para lo cual se requirieron aproximadamente dos millones novecientos veinte mil pies tablares de madera aserrada (MINISTERIO DE LA PRODUCCIÓN, 2014).

En la fabricación de este producto se utilizaron mayormente las especies *Cariniana domestica* (Mart) Miers (Cachimbo), *Copaifera paupera* (Herzog) Dwyer (Copaiba) y *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke (tornillo); generándose residuos, conformados principalmente por piezas de dimensiones variables, aserrín y polvillo, que representan en promedio el 37% de la madera aserrada utilizada, teniendo en cuenta las dimensiones nominales de comercialización de las tablas y de las piezas que conforman los muebles, así como de los defectos inherentes a la madera y a su proceso productivo (PONCE; VASQUEZ, 2010).

Estos residuos, comúnmente son utilizados como fuente de energía, o son acopiados en almacenes de la empresa esperando darle un uso más adelante, o bien se convierten en desechos, que ocasionan contaminación ambiental y gastos a la empresa para su eliminación de la planta.

Se debe considerar que el uso de residuos de madera como fuente de energía calorífica le da un cierto valor económico, por reemplazar a los combustibles fósiles, teniendo como desventaja la liberación de gases contaminantes al ambiente; sin embargo, al utilizarse como materia prima para la manufactura de productos de mayor valor agregado (PMVA), su valor es económicamente más beneficioso que su empleo como combustible (FAO, 1991), teniendo en cuenta que la madera es el material que representa uno de

los mayores costos de producción, manteniendo además a la madera en su condición natural.

Una alternativa de aprovechamiento de parte de estos residuos, es en la fabricación de paneles encolados lateralmente (EGP), actualmente utilizados en la industria del mueble y en carpintería de obra, ya que no requiere de madera de grandes dimensiones, pudiendo adecuar su producción con el tipo de producto final requerido, en base a la materia prima disponible (JUIZO, 2015).

En este contexto, Iwakiri (2005) señala que el uso de residuos en la manufactura de paneles EGP, además de darle valor agregado, aumenta el rendimiento industrial de la materia prima, ya que se trabaja con listones angostos o cortos, los cuales normalmente serían descartados de la línea de fabricación; pudiendo, además, aprovecharse de mejor manera la materia prima, reduciendo sus costos de manufactura.

Según estadísticas del SERFOR (2020), en la subpartida arancelaria 44071190, donde se incluyen los tableros EGP, se importaron en el 2019 alrededor de treinta y seis millones ciento treinta y cuatro mil dólares USA, principalmente de Chile (veintiocho millones trescientos veintisiete mil dólares USA), Estados Unidos (tres millones cincuenta y seis mil dólares USA) y Brasil (un millón doscientos treinta y cuatro mil dólares USA), y en menor cantidad, fueron producidos en el país, utilizando maderas tropicales (*Dypterix odorata* (Aubl.) Wild, *Myroxylon balsamun* (L.) Harms, *Cedrela odorata* L., *Virola weberbaueri* Markgraf, entre otras) y la *Guazuma crinita* C. Mart. proveniente de plantaciones.

Por otro lado, no se han reportado en el país trabajos de investigación sobre el uso de residuos de la industria de mobiliario escolar o muebles de madera en la fabricación de paneles EGP, ni estudios sobre la evaluación de la calidad de encolado de paneles EGP producidos con las especies *Cariniana domestica* (Mart) Miers, *Copaifera paupera* (Herzog) Dwyer y *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke, y sus combinaciones.

El presente trabajo se realizó con el fin de evaluar la alternativa de fabricación de paneles EGP con residuos de tres maderas tropicales generados en la manufactura de mobiliario escolar; con lo cual se espera obtener

información técnica para el uso de estos subproductos, incrementar el aprovechamiento de la materia prima, reducir sus costos y atenuar los problemas socioambientales que genera en el entorno.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general:

Analizar la viabilidad de producción de paneles EGP con residuos de madera de las especies *Cariniana domestica* (Mart.) Miers (cachimbo, jequitiba), *Copaifera paupera* (Herzog) Dwyer (copaiba) y *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke (tornillo, cedro de água), provenientes del proceso de manufactura de mobiliario escolar.

1.2.2 Objetivos específicos:

- Caracterizar los residuos de madera, evaluando sus cualidades anatómicas, físicas y químicas.
- Determinar las propiedades químicas y físicas de los adhesivos PVA y EPI.
- Evaluar la calidad del encolado de paneles EGP, para uso en ambiente seco y húmedo, elaborados con residuos de las maderas estudiadas y sus combinaciones, a través de ensayos mecánicos de cizallamiento al encolado lateral y de flexión estática y tracción paralela de los empalmes *finger joint*.
- Comparar los resultados de los ensayos realizados por especies estudiadas y adhesivos empleados.
- Analizar las interacciones entre las variables relacionadas a la madera y el proceso productivo, con la resistencia mecánica de las uniones adhesivas.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ESPECIES ESTUDIADAS

Held et al. (2015) señalan que las principales especies maderables utilizadas en la fabricación de mobiliario escolar en el Perú, son las especies *Cariniana domestica* (Mart.) Miers (cachimbo), *Copaifera paupera* (Herzog) Dwyer (copaiba) y *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke (tornillo). Durante la manufactura de estos productos se producen volúmenes importantes de residuos, considerando las dimensiones de las tablas y de piezas que conforman los muebles, así como las exigencias de calidad, en cuanto a defectos prohibidos y tolerados que se permiten.

2.1.1 *Cariniana domestica* (Mart) Miers

El árbol de esta especie pertenece a la familia Lecythidaceae, denominada comercialmente como “cachimbo”; el fuste es recto, ahusado y cilíndrico, con una altura total de 25 m, altura comercial de 12 a 16 m y un diámetro a la altura del pecho (DAP) promedio de 0,58 m. Presenta una corteza marrón oscura, el ritidoma se desprende en delgadas láminas o tiras, dejando una superficie lisa (ARÓSTEGUI, 1974).

En el año 2017 se produjeron ochenta mil ochocientos sesenta y seis metros cúbicos de madera rolliza de *Cariniana domestica*, que equivale al 4,9% del total, y diez y nueve mil trescientos veinticuatro metros cúbicos de madera aserrada, que representa al 4,0% de la producción nacional, ubicándose en los puestos 6 y 5 del ranking de las especies utilizadas respectivamente (SERFOR, 2019).

La madera en condición seca al aire no presenta diferencia entre albura y duramen, de color rojizo claro y al ser expuesto a la luz sufre una ligera decoloración. Los anillos de crecimiento son diferenciados y visibles a simple vista, apreciándose bandas oscuras de forma irregular. Tiene grano recto a entrecruzado, textura media y heterogénea, veteado en arcos superpuestos y

líneas verticales ligeramente visibles, brillo medio y olor y sabor ausentes (ARÓSTEGUI, 1982; GONZALES, 2011).

La madera es de porosidad difusa, con poros solitarios de forma oval y múltiples radiales de 2 a 3 en similar proporción; con 2 a 8 poros/mm² y diámetro tangencial promedio de 141 µm (105 - 236 µm). El parénquima es visible con lupa 10X, en bandas reticulado y radios visibles con lupa 10X, no estratificados (ACEVEDO; KIKATA, 1994).

Presenta una masa específica básica de 0,59 g/cm³, masa específica aparente al 12% de 0,79 g/cm³, contracción tangencial de 7,58%, radial de 4,96% y volumétrica de 12,10%, mostrando además un coeficiente de anisotropía de 1,53 (ARÓSTEGUI, 1982).

La madera de esta especie es de rápido secado natural y buen comportamiento al secado artificial con programa severo; asimismo, es moderadamente resistente al ataque de hongos xilófagos. Mediante la preservación por baño caliente y frío y vacío-presión se considera como fácil de tratar; de resistencia mecánica media y buena trabajabilidad (ARÓSTEGUI, 1982).

La madera es utilizada en la fabricación de muebles, puertas, ventanas, mangos de herramientas, artículos deportivos, juguetes, artesanías, estructuras, encofrados y machihembrados (SIBILLE, 2006).

2.1.2 *Copaifera paupera* (Herzog) Dwyer

Esta especie pertenece a la familia Leguminosae (Caesalpinioideae) y es conocida comúnmente como "copaiba". Se distribuye ampliamente en bosques húmedos tropicales y bosques secos tropicales de la Amazonía. El árbol presenta fuste recto, cilíndrico, alcanzando una altura total de 20 a 35 m y un DAP de 0,5 a 1,5 m (ARÓSTEGUI, 1982; REYNEL et al., 2003).

El árbol se ramifica desde el segundo tercio para formar una copa abierta y muestra raíces pequeñas y aletas basales. La corteza externa es de color marrón claro a grisáceo y tiene escamas de ritidoma que se desprenden aisladamente, dejando huellas impresas; cuando se realiza una incisión exuda

una sustancia aceitosa, traslúcida, conocida como “bálsamo de copaiba” (ARÓSTEGUI, 1974; REYNEL et al., 2003).

En el año 2017 se produjeron treinta y tres mil ochocientos cincuenta y seis metros cúbicos de madera rolliza de *Copaifera paupera*, que equivale al 2,1% del total, y cinco mil doscientos ochenta y ocho metros cúbicos de madera aserrada, que corresponden al 3,2% de la producción nacional, ubicándose en los puestos 13 y 7 de las especies comercializadas respectivamente (SERFOR, 2019).

La albura seca al aire es de color blanquecino a crema rojizo y el duramen de color rojo amarillento; los anillos de crecimiento son delimitados por bandas de parénquima marginal, brillo medio a alto, grano recto, textura media a fina y vetado en arcos superpuestos y bandas longitudinales angostas (ACEVEDO; KIKATA, 1994; REYNEL et al., 2003; GONZALES, 2011).

La madera presenta porosidad difusa, con poros ligeramente visibles a simple vista, solitarios de forma oval y múltiples radiales; con 3 a 8 poros/mm² y diámetro tangencial promedio de 155 μm (144 - 172 μm). El parénquima es visible a simple vista, predominantemente terminal, con canales resiníferos y paratraqueal vasicéntrico, radios visibles con lupa 10X, no estratificados (ACEVEDO; KIKATA, 1994).

La masa específica básica es de 0,61 g/cm³, masa específica aparente al 12% de 0,73 g/cm³, con una contracción tangencial de 7,04%, radial de 3,43% y volumétrica de 10,70%, presentando además un coeficiente de anisotropía de 2,05 (ARÓSTEGUI, 1982).

La madera es de secado natural moderadamente lento; además, el duramen es muy resistente al ataque de hongos e insectos xilófagos. Es de fácil preservación con los métodos de baño caliente y frío y vacío-presión, impregnándose fácilmente la albura y moderadamente tratable en duramen. Su resistencia mecánica es clasificada de media a alta, de fácil aserrío y buena trabajabilidad (ARÓSTEGUI, 1982; REYNEL et al., 2003).

La madera es utilizada en carpintería de obra, ebanistería, carrocerías, machihembrados, cajonería pesada, parquet, contrachapados y laminados (ARÓSTEGUI, 1974; SIBILLE, 1996; REYNEL et al., 2003).

2.1.3 *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke

Esta especie pertenece a la familia Leguminosae (Mimosoideae), conocida comercialmente como “tornillo”, “Huayra caspi”, “aguano” y “pino peruano”. Se desarrolla en formaciones ecológicas de bosque seco tropical, bosque húmedo tropical, bosque seco y muy húmedo sub-tropical. El árbol presenta fuste recto y cilíndrico, con una altura total de hasta 40 m, altura comercial de 25 m y un DAP de 0,5 a 2,0 m (ARÓSTEGUI, 1982; REYNEL et al., 2003).

En lo que respecta a la producción nacional, el año 2017 se aprovecharon ciento cincuenta y cuatro mil ciento treinta y cuatro metros cúbicos de madera rolliza de *Cedrelinga cateniformis*, que representa el 9,3% del total, y se produjeron setenta y ocho mil ciento treinta y cuatro metros cúbicos de madera aserrada, que equivale al 16,2% de la producción, ubicándose en los puestos 3 y 1 del ranking de las especies utilizadas respectivamente (SERFOR, 2019).

En condición húmeda, la albura es de color blanco amarillento y el duramen rosado claro, cuando se seca la albura es de color rosado claro y el duramen cambia a rosado oscuro; con grano recto a entrecruzado, textura gruesa, brillo medio, veteado ausente y con olor y sabor no característico (ARÓSTEGUI, 1974; ACEVEDO; KIKATA, 1994; GONZALES, 2011).

La madera es de porosidad difusa, con poros visibles a simple vista, predominantemente solitarios de forma redonda y múltiples radiales escasos de 2 a 4; con 1 a 5 poros/mm² y diámetro tangencial promedio de 308 μm (293 - 333 μm). El parénquima es visible con lupa 10X, paratraqueal vasicéntrico y radios visibles con lupa 10X, no estratificados (ACEVEDO; KIKATA, 1994).

La madera muestra una masa específica básica de 0,45 g/cm³, masa específica aparente al 12% de 0,55 g/cm³, con una contracción tangencial de 6,90%, radial de 3,17% y volumétrica de 10,65%, además de un coeficiente de anisotropía de 2,17 (ARÓSTEGUI, 1982).

La madera es de secado natural rápido, no mostrando alabeos ni rajaduras restrictivas si se apila correctamente y buen comportamiento al secado artificial con programa fuerte. El duramen de esta especie es poco

susceptible al ataque de hongos e insectos xilófagos. Su resistencia mecánica es clasificada como media y de buen comportamiento a la trabajabilidad (ARÓSTEGUI, 1982; REYNEL et al., 2003). La madera es utilizada en carpintería de obra, ebanistería, muebles, parihuelas, construcciones livianas y carrocerías (ARÓSTEGUI, 1974; REYNEL et al., 2003).

2.2 RESIDUOS DE LA TRANSFORMACIÓN DE LA MADERA.

El manejo y uso sostenible de los recursos es fundamental para la viabilidad y permanencia de las industrias, a fin de mantener los mercados y establecer nuevos niveles de competitividad; lo cual se puede realizar, entre otros métodos, mediante la racionalización del uso de materias primas, reutilización y reciclaje de residuos (FINNOTTI et al., 2006).

Hillig et al. (2006) precisan que parte de los residuos sólidos generados en los procesos que requieren ser tratados, reutilizados y valorizados son los obtenidos en la transformación de la madera.

En este contexto, la región amazónica aún se destaca en el escenario forestal como la gran generadora de residuos provenientes del procesamiento de la madera. La razón de esta situación se debe, tanto al uso inadecuado de la materia prima, como a la falta de conocimientos de sus propiedades tecnológicas básicas, lo cual acarrea la aplicación de tecnologías inadecuadas para su procesamiento (MELO et al., 2012)

El concepto recuperación de la madera se puede definir como el proceso de valorización de residuos, que engloba el transporte, almacenamiento, clasificación, limpieza y reducción de volumen para su posterior reciclado o aprovechamiento energético. La recuperación de la madera tiene como objetivo valorizar los residuos que se generan, fundamentalmente en la industria de la madera y el mueble (CONFEMADERA, 2004).

Los residuos del procesamiento de la madera, como astillas, virutas, recortes de madera y aserrín son recursos valiosos, que pueden ser utilizados como materia prima para la elaboración de subproductos, o para producción de energía. En este sentido, el volumen de residuos generados en un aserradero

depende del tipo y de la eficiencia de la tecnología utilizada, la cual se encuentra relacionada con el producto final a obtener (FAO, 1991).

La acumulación de residuos en los aserraderos puede llegar a obstaculizar el desarrollo del proceso productivo, por lo que es necesario que sean evacuados oportunamente. Algunas empresas los venden o regalan a otras que les dan diferentes usos, pero en muchas ocasiones se envían a vertederos o se incineran sin ningún control (ALVAREZ; DÍAZ; ALESSANDRINI, 2001).

En un estudio realizado en aserraderos de la zona sur de Brasil, Hillig et al. (2006) concluyen que la generación de residuos del aserrío y aprovechamiento de la madera presentó un promedio de 27% para la especie *Araucaria angustifolia*, 36% para *Eucalyptus spp.* y 37% para *Pinus spp.* Con el fin de incrementar el rendimiento de la materia prima, los mismos autores recomiendan el uso de residuos de mayor tamaño, como son las costaneras, en procesos industriales que no requieran de trozas enteras.

En el Perú, Solano et al. (2013) reportaron rendimientos promedio de madera rolliza a madera aserrada de las especies *Jacaranda copaia* (Aubl.) D. Don, 54%; *Simarouba amara* Aubl., 53%; *Croton matourensis* Aubl, 52%; *Brosimum utile* (Kunth) Oken, 50%; *Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F. Blake, 49%; *Apuleia leiocarpa* (Vogel) J.F. Macbr., 48%; *Terminalia oblonga* (Ruiz & Pav) Steud., 44%; *Apeiba membranacea* Spruce ex Benth, 44%; *Septotheca tessmannii* Ulbr, 24% y *Matisia cordata* Bonpl con 23%. Asimismo, mencionan que existe una relación directamente proporcional entre el diámetro y el rendimiento obtenido.

Las industrias de segunda transformación incluyen empresas que fabrican productos para la construcción y acabados de uso doméstico, tales como muebles, ventanas, puertas, etc; además, los volúmenes y características de los residuos varían con el tipo de producto elaborado (DONOVAN, 1990).

Maloney (1996) señala que la manufactura de paneles reconstituidos utiliza una tecnología que permite aprovechar como materia prima subproductos de la industria maderera (costaneras, despuntes, etc.),

incrementando valor agregado al material, reduciendo la demanda de materia prima y la presión sobre los bosques naturales.

En la cadena productiva de madera y muebles, un importante porcentaje de residuos sólidos se produce en el procesamiento de la madera aserrada, y parte de dicho valor varía en función de los procesos, maquinarias y dimensiones de las piezas utilizadas. Por dicho motivo, es importante efectuar la gestión de residuos para establecer el control de la cantidad y destino final adecuado para cada tipo, evitando la generación de desperdicios y la contaminación del medioambiente (FINNOTTI et al., 2006).

En cuanto a la comparación del valor de uso de los residuos para leña o como materia prima para la fabricación de paneles EGP, mediante consultas a fábricas de muebles de madera ubicadas en la ciudad de Lima, se tiene que los residuos de madera se comercializan de S/. 30,00 a S/. 40,00 por m³, mientras que el costo de un tablero EGP de 1,22 m x 2,44 m x 18 mm, con un volumen de 0,0536 m³, elaborado con madera de densidad media, fluctúa de S/. 160,00 a S/. 180,00. Por lo tanto, reintegrar los residuos de madera al proceso industrial podrían incrementar su valor comercial y eficiencia de utilización, disminuyendo, además, su impacto ecológico que se produce al usarlo como combustible (CONFEMADERA, 2009).

En la fabricación de mobiliario escolar, los porcentajes de residuos producidos, utilizando como materia prima tablas de madera seca al 12%, fueron en promedio de 37% para la especie *Cedrela odorata* y 36% para la *Cedrelinga cateniformis* (PONCE; VASQUEZ, 2010).

Asimismo, en la fabricación de crucetas con la especie *Cedrelinga cateniformis*, que es un producto de transformación secundaria utilizado para la electrificación rural en el Perú, se encontró un rendimiento que fluctúa de 65 a 70%, dependiendo de la calidad de la materia prima (CASANA; PRIETO, 2008). Asimismo, los porcentajes de residuos encontrados en la producción de pisos de madera sólida fueron de 40 a 48% (MAYTA; ESQUINARILA, 2014; BODERO, 2014).

2.3 FACTORES QUE AFECTAN EL ENCOLADO DE LA MADERA

Bila (2014) menciona que ciertas características propias de la madera y las propiedades físico-químicas del adhesivo, pueden ocasionar significativas interferencias en el proceso de encolado. Asimismo, debido al origen biológico de la madera, las variables relacionadas con sus características son mayormente inalterables, no sucediendo lo mismo con las propiedades del adhesivo, que pueden ser modificadas o ajustadas.

El correcto y óptimo encolado de un sustrato permite la transferencia de tensiones sin reducir su adhesión y resistencia, la cual tiene relación con su durabilidad cuando es expuesto a la acción del agua, o a otras fuentes de humedad (HAUBRICH; GONÇALVES; TONET, 2007).

Schultz y Nardin (2003) señalan que los mecanismos que intervienen en el proceso de adhesión pueden explicarse por las teorías de adhesión mecánica, difusión de polímeros y adhesión química, siendo aceptado por muchos autores que dicho proceso ocurre por la combinación de las tres hipótesis y no de alguna de ellas que actúe aisladamente.

Para el encolado de la madera, el estudio de los mecanismos de adhesión requiere del conocimiento de las características del material y superficie a encolar, así como de las cualidades del polímero y su interacción con la superficie (GADNER, 2006). Para el caso de paneles EGP, se deben considerar principalmente las propiedades anatómicas, físicas y químicas de las maderas que se utilicen para su manufactura.

2.3.1 Propiedades anatómicas

Fahn (1982) menciona que la estructura anatómica de la madera es muy diversificada, principalmente en latifoliadas, por estar conformada de elementos celulares organizados de diversas formas para constituir el leño, el cual depende a su vez de la especie botánica, edad y condiciones ambientales en las que se desarrolla.

La influencia de la anatomía de la madera está relacionada principalmente con su estructura, con las diferencias en las dimensiones de

elementos celulares, dimensiones, disposiciones y frecuencia de cavidades celulares, las cuales están vinculadas con la porosidad y permeabilidad de la madera. En este sentido, la importancia de la anatomía de la madera en el encolado, está relacionada a sus efectos en el movimiento del adhesivo hacia el interior de su estructura, a fin de lograr un adecuado anclaje (IWAKIRI, 2005).

La formación del duramen se caracteriza por modificaciones anatómicas y químicas; en el caso de latifoliadas, aparecen las tilosis, que son expansiones vasculares procedentes de las células de parénquima, los cuales penetran en los vasos próximos, obturándolos en mayor o menor grado. Del mismo modo, la albura, que es la encargada del transporte de savia bruta, tiene sus elementos conductores generalmente libres de obturaciones por depósitos o tilosis. Por lo tanto, maderas que presentan estas obturaciones pueden ocasionar problemas durante su encolado, reduciendo la capacidad de penetración del adhesivo (GARCÍA et al., 2003).

Higuchi (1997) indica que el cambio de albura a duramen se conoce como proceso de duraminización, el cual se caracteriza por la muerte de células de parénquima radial, consumo de almidón, aumento en el contenido de extractivos (mayormente polifenoles) y tilosis, así como el consumo de oxígeno y liberación de CO². Rowell et al. (2005) mencionan que la mayoría de los extractivos de las maderas de coníferas y latifoliadas se encuentran en el duramen, siendo algunos de ellos responsables del color, olor y durabilidad natural de la madera.

Iwakiri (2005) afirma que la constitución de los anillos de crecimiento, variación del duramen y albura en la pieza a encolar, presencia de madera juvenil y de reacción, el tipo de grano y su porosidad influyen en la movilidad del adhesivo.

Las características más relevantes de la madera relacionadas con los procesos de adhesión son la porosidad, anisotropía, estabilidad dimensional y las propiedades de la superficie. Como material anisotrópico, la madera presenta propiedades físicas y mecánicas que dependen de la orientación de sus elementos y, debido a su naturaleza higroscópica, se hincha y se contrae

en función del contenido de humedad, favoreciendo a su inestabilidad dimensional (GADNER, 2006).

Albuquerque y Latorraca (2005) mencionan que la porosidad de la madera se origina en el proceso de formación y desarrollo de los tejidos, como son de albura, duramen y de los leños inicial y tardío, donde la variación en las dimensiones de los elementos vasculares a lo largo del fuste, conferirá características específicas a cada tipo de madera.

La porosidad y permeabilidad son dos propiedades importantes cuando se requiere juntar dos piezas de madera con un adhesivo. En general, ambas propiedades influyen significativamente en la capacidad de adhesión entre maderas, ya que, de acuerdo a la disposición de los espacios vacíos y que éstos no se encuentren bloqueados, habrá una penetración del adhesivo, produciéndose con el fraguado, su fijación por anclaje (IWAKIRI, 2005; PRATA, 2010). Al respecto, Albino, Mori y Mendes (2012) mencionan que 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.

Iwakiri (2005) afirma que maderas con alta porosidad son más permeables, pudiendo ocasionar una penetración excesiva del adhesivo en las cavidades celulares. Siendo así, para adecuar el grado de penetración del adhesivo en función a la permeabilidad y porosidad de la madera, se debe controlar su viscosidad, aumentándola para maderas de alta permeabilidad y viceversa.

Albuquerque y Latorraca (2000) definen a la dirección del grano como la orientación general de los elementos verticales constituyentes del leño, con relación al eje normal del árbol. Asimismo, señalan la importancia del ángulo relativo a la dirección real de las fibras, que influyen significativamente en sus propiedades físicas y mecánicas y, en diferentes niveles, en el flujo de humedad, estabilidad dimensional y acabado superficial.

Al respecto, Marra (1992) señala que el efecto del grano de la madera en la formación de enlaces involucra principalmente a la porosidad, que se produce en diferentes planos de corte. Asimismo, indica que la presencia de

grano entrecruzado en la superficie de la pieza, debido a su mayor porosidad, ocasiona una mayor penetración, generando una línea de cola débil.

Otro factor que afecta significativamente en la variabilidad entre los tipos de madera, y es causante de muchos problemas en el encolado, es la edad del árbol, ya que a mayor edad ocurren cambios anatómicos, físicos y químicos en su estructura que pueden afectar la movilidad de los adhesivos (MARRA, 1992).

2.3.2 Propiedades físicas

De acuerdo a Vick (1999) y Almeida (2015), la masa específica de la madera, el contenido de humedad y el coeficiente de anisotropía son las propiedades físicas más relevantes de la madera a utilizarse en la manufactura de paneles de madera sólida.

Vick (1999) y Pizzi y Mittal (2003) indican que la masa específica es una de las características más importantes de la madera, ya que influye en mayor grado en sus propiedades físicas y mecánicas, tomándose normalmente como patrón de referencia para su caracterización tecnológica y comportamiento al encolado.

La cantidad y distribución de los vasos de la madera influyen en el encolado, en su habilidad para absorber agua u otros solventes de los adhesivos, así como en el área de absorción de los adhesivos por la madera (PIZZI; MITTAL, 2003). Maderas con alta masa específica contienen menos espacios vacíos que dificultan la penetración del adhesivo hacia la parte interna, disminuyendo su anclaje y generando un bajo nivel de adhesión mecánica (VICK, 1999).

Tsoumis (1991) y Oliveira y Silva (2003) afirman que la masa específica de la madera varía de acuerdo a la proporción de los espesores de las paredes celulares de fibras o traqueidas, número y diámetro de vasos, número de células de parénquima y por la cantidad de cavidades celulares que posee. Además, el contenido de humedad, la estructura histológica, anchura de anillos de crecimiento, proporción de madera temprana y tardía, albura,

duramen, entre otras características, influyen en dicha propiedad (BURGER; RICHTER, 1991; TSOUMIS, 1991).

De acuerdo a Marra (1992), Vick (1999) e Iwakiri (2005), maderas de baja masa específica y alta porosidad son más fáciles de encolar, ya que permiten una mejor penetración del adhesivo, por poseer paredes celulares finas y una cantidad mayor de espacios vacíos, pero puede conllevar a producir una línea de cola débil, disminuyendo la calidad del encolado, al compararlos con maderas de alta masa específica, que generalmente muestran mayores cambios dimensionales y tensiones en la línea de cola.

Vick (1999) afirma que, al aumentar la masa específica de la madera, se incrementa la resistencia de la unión adhesiva, tendencia que se mantiene hasta un límite de 0,7 a 0,8 g/cm³, y por encima de dichos valores su resistencia decrece rápidamente, debido probablemente a que disminuye la penetración del adhesivo, por presentar menos espacios vacíos para un adecuado anclaje.

La Junta del Acuerdo de Cartagena (JUNAC, 1979) establece rangos de clasificación de maderas tropicales en base a su masa específica básica, señalando las siguientes categorías: menor de 0,30 g/cm³ muy baja; de 0,31 a 0,40 g/cm³ baja; de 0,41 a 0,60 g/cm³ media; 0,61 a 0,75 g/cm³ alta y mayor de 0,75 g/cm³ muy alta. Del mismo modo, la norma UNE 56-540 (IRANOR, 1978) establece una clasificación de maderas latifoliadas, de acuerdo a su masa específica aparente al 12%, indicando las siguientes categorías: menor de 0,35 g/cm³ muy ligera; de 0,35 a 0,50 g/cm³ ligera; de 0,50 a 0,70 g/cm³ semipesada; 0,71 a 0,95 g/cm³ pesada y mayor de 0,95 g/cm³ muy pesada.

En relación al coeficiente de variación de esta propiedad, Glass y Zelinka (2010) indican que valores de hasta 10% son considerados como aceptables para describir la variabilidad de la masa específica; mientras que Lisboa et al. (1993), señalan un coeficiente de variabilidad aceptable de hasta 9% para especies amazónicas.

De otro lado, la madera por ser un material poroso, puede absorber determinada cantidad de humedad, la cual es captada por las paredes celulares y acumulada en el lumen de las células. Para el caso de la contracción e hinchamiento, es primordial la humedad absorbida por las

paredes celulares; además, el rango de humedad comúnmente aceptado, donde la madera se contrae o hincha, es de 0 a 30% (TSOUMIS, 1991; PFEIL; PFEIL, 2003; TUSET; DURAN, 2008; GLASS; ZELINKA, 2010).

Las propiedades de la madera varían de acuerdo a la dirección u orientación que se evalúe, debido a que existe una variación en los valores de contracción en los planos de corte, el cual es denominado comúnmente como anisotropía, coeficiente de anisotropía o factor anisotrópico. Este coeficiente es determinado por la relación entre la contracción tangencial total y la contracción radial total, el cual puede limitar su uso como madera sólida (BURGER; RITCHER, 1991; IWAKIRI, 2005; TUSET; DURAN, 2008).

Nock, Richter y Burger (1975) y Durlo y Marchiori (1992) mencionan una clasificación para la estabilidad dimensional de la madera en base al coeficiente de anisotropía, estableciendo que de 1,2 a 1,5 es excelente, 1,5 a 2,0 es normal, mientras que si es mayor de 2,0 es considerada como mala o de baja calidad. Sin embargo, se debe considerar que la madera puede ser inestable si tiene un coeficiente de anisotropía bajo, pero su contracción tangencial y radial es alta (ROCHA, 2000).

Gaspar et al. (2005) y Prata (2010) indican que el coeficiente de anisotropía de la madera es una de las características más importantes a considerar en la producción de paneles EGP, ya que las variaciones de humedad que suceden luego del fraguado del adhesivo, pueden ocasionar elevadas tensiones en las juntas encoladas, perjudicando su estabilidad dimensional y propiedades mecánicas.

Panshin y De Zeeuw (1980), Tsoumis (1991) y Klock (2000) señalan que las variaciones de contracción e hinchamiento presentes en las tres direcciones de crecimiento del árbol, se debe a la estructura anatómica de la pared celular. Además, Glass y Zelinka (2010) afirman que estas variaciones dimensionales, con contenidos de humedad por encima del punto de saturación de las fibras, no alteran su volumen.

Las diferencias de las variaciones dimensionales de la madera en los tres planos de corte se presentan entre especies, ya que son afectados principalmente por su masa específica, contenido de humedad, estructura anatómica y composición química (TSOUMIS, 1991; MARRA, 1992).

Asimismo, los mayores valores se obtienen en la orientación tangencial, seguida de la radial (que es aproximadamente la mitad del tangencial) y finalmente la orientación longitudinal, que muestra generalmente valores mínimos (PANSHIN; DE ZEEUW, 1980; TSOUMIS, 1991; MARRA, 1992).

Los porcentajes de contracciones totales para la mayoría de especies se ubican de 6,0 a 12,0% para la contracción tangencial, 3,0 a 6,0% para la radial y 0,1 a 3,0% para la longitudinal (SKAAR, 1972). Del mismo modo, Pfeil y Pfeil (2003) señalan que los valores porcentuales totales de contracción tangencial varían generalmente de 5,0 a 10,0%, mientras que la contracción radial se considera como la mitad de la tangencial, y la contracción longitudinal fluctúa de 0,1 a 0,3%.

La variación dimensional existente entre la contracción tangencial y radial puede deberse a la influencia de los radios, mayor número de punteaduras en la pared radial de las células y por la alternancia de madera temprana y tardía (GALVÃO; JANKOWSKI, 1985)

Tsoumis (1991) y Marra (1992) indican que la humedad de la madera, referida al contenido de agua presente en la misma, se clasifica como agua libre (lúmenes de las células), de impregnación (paredes celulares) y de constitución (estructura molecular de la madera).

El estudio de la relación agua - madera es el más importante de todos los que dependen de este material, ya que afecta a gran parte de los procesos de transformación; además, las características de su comportamiento están muy influenciadas por el contenido de humedad de la madera (VIGNOTE; MARTINEZ, 2006).

Un factor elemental para el encolado con los distintos tipos de adhesivos aplicados en la industria de la madera es el contenido de humedad, como sucede con los adhesivos PVA y poliuretanos, que reaccionan en forma distinta, en relación con este factor (LOPES, 2008).

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; además, su influencia en la formación del enlace adhesivo está relacionada con la cantidad y ritmo de

absorción del adhesivo líquido por la madera. 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).

Del mismo modo, el contenido de humedad de la madera, combinado con el del adhesivo, influirá en gran medida en la humectación, flujo, penetración, e incluso en el curado de los adhesivos acuosos en la madera. En general, estos adhesivos se unen satisfactoriamente en rangos de contenido de humedad de 6 a 14%, e incluso por debajo y por encima de estos valores, cuando están formulados para un procesamiento especializado. Los valores óptimos de contenido de humedad para unir un sustrato determinado con un adhesivo específico, se establecen a partir de la experiencia práctica y del rendimiento del producto adhesivo (VICK, 1999).

Si la madera a utilizar para una unión adhesiva está demasiado seca, absorberá rápidamente el agua del adhesivo, lográndose una alta adhesión; pero la línea de cola desaparece, comenzando inmediatamente el proceso de fraguado, por lo que el adhesivo ya no será capaz de llenar y humectar la superficie de la madera cuando sea sometida a presión. En maderas que presentan un alto contenido de humedad, el fraguado del adhesivo será deficiente y de baja resistencia; por ello, se requerirá de un mayor tiempo de prensado, pudiendo presentarse además burbujas de vapor durante esta operación (SELBO, 1975).

Silva, Tomaselli e Iwakiri (1998) y Almeida (2013) indican que no es adecuado emplear adhesivos en maderas que tengan un contenido de humedad superior al 20%, pues se obtendría una línea de cola con una resistencia mecánica deficiente.

Por otro lado, en maderas con bajos contenidos de humedad, los adhesivos generalmente tienden a curar más rápido, ya que pueden penetrar más profundamente en zonas más alejadas de la línea de cola (NOCK; RICHTER, 1978; RAKNES, 1982).

2.3.3 Propiedades químicas

La madera está formada químicamente por componentes mayores, que son la celulosa, hemicelulosas, lignina, además de elementos menores, dentro de los cuales se encuentran los extractivos y las sustancias inorgánicas, como las cenizas (IWAKIRI, 2005). Los componentes químicos de la madera más importantes a considerar para el encolado son el contenido de extractivos, pH y porcentaje de cenizas; asimismo, su influencia en la formación y comportamiento de la unión adhesiva, está relacionada principalmente a la exposición de áreas de mayor o menor concentración de extractivos en la superficie de la pieza a ser encolada (IWAKIRI, 2005).

Klock et al. (2005) mencionan que la composición química de la madera varía entre árboles de la misma especie y en distintas zonas del árbol, debido a las características propias que presenta, condiciones de crecimiento, edad y de su estructura anatómica.

Los extractivos son sustancias químicas que no forman parte de la pared celular o de la lámina media, presentan un bajo peso molecular y generalmente están constituidos de materiales orgánicos, como aceites, grasas, taninos, carbohidratos, ácidos, gomas, proteínas y aminoácidos y resinas. Normalmente se ubican en los vasos, en el lumen de células parenquimáticas, entre otras cavidades celulares, y se generan en la formación del duramen; asimismo, sus efectos predominantes están relacionados con la reducción de la higroscopicidad, permeabilidad y porosidad de la madera (SJÖSTRÖM, 1993; KLOCK, 2000; TUSET; DURAN, 2008).

En especies de latifoliadas, los extractivos se generan en las células de parénquima conectadas con los vasos; siendo, ricos en componentes alifáticos, las oleorresinas en terpenoides y también en compuestos fenólicos, que se acumulan preferentemente en el duramen (GONZALES, 2013).

El tipo, cantidad, así como las propiedades físicas y químicas de los extractivos que contiene la madera, pueden influir en las reacciones de polimerización del adhesivo, afectando la calidad del encolado (PIZZI, 1994; LIMA et al., 2007).

La presencia de extractivos en exceso o los denominados apolares (terpenos, ácidos grasos) y las condiciones de la superficie de la madera a ser encolada, pueden perjudicar su humectación por el adhesivo, ocasionando que tengan dificultades para recubrir la superficie submicroscópica (IWAKIRI, 2005). Asimismo, su presencia en la pared celular ocasiona modificaciones en la higroscopicidad, peso específico, contracción, permeabilidad, características mecánicas, entre otros; pudiendo inhibir su aptitud al encolado, teñido y barnizado (GARCÍA et al., 2003).

La cantidad de extractivos que contiene la madera normalmente es menor del 10%; sin embargo, algunas especies tropicales pueden contener porcentajes mayores, lo cual podría ocasionar dificultades en el encolado (JANKOWSKY, 1988; SJÖSTRÖM, 1993; GONZALES, 2013).

El pH de la madera es una característica primordial que influye en el comportamiento de cualquier tipo de adhesivo que se utilice para su encolado, ya que al tener la madera una capacidad tampón muy elevada, puede verse afectada por el medio ácido o básico en el cual el adhesivo fragüe (ROWELL, 1995).

Además, esta propiedad varía en función de diversos factores, como son la estación del año, especie, altura en el fuste, albura, duramen, entre otros. El grado de acidez de la madera se ubica en un rango de 3 a 6, pudiendo ocurrir cambios de pH dentro de una misma pieza, debido a la migración de los extractivos de las capas más internas hacia las superficiales, alterando las condiciones del encolado; además, puede afectar el fraguado del adhesivo y favorecer su pre-endurecimiento, impidiendo su fluidez, humectación y penetración (MARRA, 1992; GARCÍA et al., 2003; IWAKIRI, 2005; ALBUQUERQUE; LATORRACA, 2005; CARNEIRO; VITAL; PEREIRA, 2007).

Con respecto al contenido de cenizas en la madera, éstas son obtenidas luego de una combustión controlada y está conformada por diversos tipos de sales, como son el potasio, calcio, magnesio, sodio, hierro, sílice, sulfato, fosfato, clorato y carbonato (SJÖSTRÖM, 1993; BIERMANN, 1996; BAEZA; FREER, 2001). Estos constituyentes inorgánicos se depositan en las paredes celulares y en el interior del lumen de las células (SJÖSTRÖM, 1993).

La cantidad de cenizas y el porcentaje de elementos que la conforman varían entre especies, mientras que la composición de sus constituyentes inorgánicos cambia mayormente por las condiciones medioambientales en las que se desarrolla el árbol (PAZ, 2008).

Gonzales (2013) menciona que el contenido de cenizas en coníferas es generalmente menor del 2% y en latifoliadas menores de 5%. Asimismo, Tsoumis (1991) señala que el contenido de cenizas en coníferas fluctúa de 0,2 a 1,1% y en latifoliadas de 0,1 a 5,4%.

La presencia de cenizas en la madera no afecta directamente en el comportamiento de la unión adhesiva, pero puede alterar el pH de la madera y, cuando el contenido de sílice es elevado, reduce la capacidad de los equipos utilizados en su trabajabilidad, debido al mayor desgaste de los elementos de corte (MARRA, 1992; IWAKIRI, 2005).

Los coeficientes de variación de las propiedades químicas de la madera pueden considerarse como bajos cuando son menores del 10%, medios cuando fluctúan de 10 a 20%, altos cuando varían hasta el 30% y muy altos cuando son mayores del 30% (PIMENTEL, 2000).

2.4 ADHESIVOS UTILIZADOS EN LA PRODUCCIÓN DE PANELES EGP

Lima et al. (2008) señalan que el encolado es una etapa primordial para la industria de productos de madera y derivados, ya que el desarrollo y disponibilidad de nuevas tecnologías y adhesivos propician un mayor aprovechamiento de la materia prima, debido al requerimiento de mayores volúmenes de madera y por la creciente escasez de madera sólida.

En este contexto, es importante conocer las características de un buen adhesivo de madera para lograr un correcto encolado, porque depende mayormente del tipo de adhesivo, especie de madera, proceso de encolado y tipo de producto obtenido (FRIHART; BEECHER, 2016).

Los adhesivos elaborados para el encolado de la madera tienen un papel relevante en el desarrollo y crecimiento de la industria de productos forestales, además de ser un factor clave en el uso eficiente del recurso. Los adhesivos pueden transferir y distribuir eficazmente las tensiones, aumentando

la resistencia y rigidez del material compuesto; la transferencia efectiva del esfuerzo de un elemento a otro depende de la resistencia de los eslabones de una cadena imaginaria de Adhesivo (VICK, 1999).

Tsoumis (1991) e Iwakiri (2005) afirman que los adhesivos utilizados para el encolado de madera pueden ser clasificados como naturales, de base vegetal o animal, sintéticos termoplásticos y sintéticos termorígidos o termoestables, siendo actualmente los adhesivos sintéticos los utilizados mayormente en la manufactura de productos reconstituidos.

Es importante resaltar que la elección del adhesivo más adecuado debe realizarse en función de las variables y necesidades de proceso, de los requisitos técnicos del adhesivo y de las condiciones medioambientales del lugar de uso final del producto encolado (BILA, 2014).

2.4.1 Adhesivo acetato de polivinilo (PVA)

El adhesivo PVA es un producto termoplástico obtenido por la polimerización, en medio acuoso, del acetato de vinilo y es conocido comúnmente como “cola blanca”; además, cuando fragua se vuelve transparente, no produciendo manchas en la madera. El fraguado de este adhesivo se produce al evaporarse el disolvente, que hace que las partículas de la cola se aglomeren entre sí, formando una película muy resistente mecánicamente, aunque muy rígida y poco resistente a la humedad (VIGNOTE; MARTINEZ, 2006; VASSILIOU; BARBOUTIS; KARASTERGIOU, 2007).

Según Bandel (1991) y Conner (2001), la solución de PVA está formada por la polimerización en agua de monómeros de vinilo, predominantemente de vinil acetato, en un proceso conocido como polimerización en emulsión. Bandel (1991) señala que esta emulsión se produce mediante una reacción de oxidación entre el etileno y ácido acético, para obtener el acetato de vinilo, producto líquido transparente y muy inflamable; seguidamente, el acetato de vinilo se polimeriza en una emulsión líquida, formando una dispersión acuosa de poliacetato de vinilo.

Fiorelli (2002) indica que los polímeros termoplásticos, entre los que se encuentra el adhesivo PVA, tienen como cualidad la posibilidad de poder revertir su curado; es decir, pueden ser debilitados o ablandados cuando son sometidos a elevada temperatura, pudiendo luego volver a solidificarse cuando se enfría, pero en el largo plazo tienen menor resistencia a la humedad y calor, al compararlos con los polímeros termorrígidos.

Clauß, Joscak y Niemz (2011) señalan que el adhesivo PVA sometido a temperaturas de 50°C a más, sufre una significativa degradación térmica, ocasionando una sustancial reducción de sus propiedades adhesivas, limitando su uso como agente encolante para elementos de madera.

Frihart y Hunt (2010) y Prata (2010) mencionan que este adhesivo puede esparcirse directamente en la madera, aplicando luego un prensado a temperatura ambiente o con un calentamiento de alta frecuencia, obteniéndose un producto con alta resistencia mecánica cuando se utiliza en un ambiente seco, no debiendo emplearse en uniones adhesivas que van a prestar servicio en ambientes con alta humedad y temperatura.

Al eliminarse el agua del adhesivo empleado en los sustratos a encolar, su estructura química se une, formando una línea de cola homogénea y continua. Por lo tanto, la porosidad de la madera de por lo menos uno de los sustratos a encolar, es una de las condiciones para que ocurra la humectación, absorción y penetración del adhesivo, proporcionando así la resistencia y elasticidad de la junta adhesiva (GARCIA; RECH, 2011).

El adhesivo PVA, debido a que está compuesto por moléculas largas que muestran una reducida movilidad, solo puede penetrar en los lúmenes de las células, pero no en las paredes celulares; sin embargo, su menor habilidad de penetración en las paredes celulares propicia una mayor cantidad de adhesivo disponible en la línea de cola, lo que explicaría la mayor resistencia en elementos encolados con superficies cepilladas o lijadas (FOLLRICH et al., 2010).

El contenido de sólidos del adhesivo PVA fluctúa de 40% a 60%, debiéndose considerar que, mientras mayor contenido de agua tenga el adhesivo, más lenta será la formación de la película. Debido a la amplitud de contenido de sólidos presentes y a la variación de otros factores que

intervienen en el proceso de encolado, son necesarios ajustes en los tiempos de ensamblado y prensado (GOULDING, 1983; GARCIA; RECH, 2011).

El gramaje empleado generalmente oscila entre 140 y 200 g/m² de superficie a encolar; asimismo, una vez aplicado el adhesivo, se debe considerar el tiempo de ensamble abierto, de acuerdo a lo señalado en la ficha técnica del fabricante (VIGNOTE; MARTINEZ, 2006).

Cuando se utiliza el adhesivo PVA en el encolado de madera, el contenido de humedad óptimo para lograr un buen desempeño debe estar en el rango de 8 a 15% (GOULDING, 1983). Del mismo modo, AKZO NOBEL PERÚ S.A.C. (2013), para el uso del adhesivo PVA 3010, recomienda un rango de contenido de humedad de la madera de 8 a 14%.

La aplicación del adhesivo PVA en la superficie de la madera puede realizarse manualmente con pincel, brocha, rodillo, espátula (lisa o dentada) o con una pistola de baja presión, y en forma mecanizada utilizando encoladoras de rodillos lisos o con relieve, de cortina, extrusoras o sprays (GOULDING, 1983).

El adhesivo PVA muestra como ventajas para el encolado de madera, su facilidad de uso, conformación de una unión flexible, poco abrasiva y transparente, fácil de limpiar, permite un alto tiempo de almacenamiento, sin olor, no es inflamable y de secado rápido bajo condiciones adecuadas. Como desventajas se pueden indicar que son termoplásticos y sufren fatiga (IWAKIRI, 2005; FRIHART; HUNT, 2010).

Para la categorización de los adhesivos a base de resina termoplástica, la norma UNE-EN 204 (AENOR, 2016) presenta una clasificación de adhesivos para madera de uso no estructural, según sus clases de durabilidad, D1 a D4, en base a la resistencia en seco y en húmedo de las líneas de cola, bajo condiciones especificadas y con varios tratamientos de acondicionamiento. En la TABLA 1 se presenta la clasificación de los adhesivos termoplásticos según su durabilidad.

TABLA 1 - CLASIFICACIÓN DE LOS ADHESIVOS TERMOPLÁSTICOS SEGÚN SU DURABILIDAD

CLASE DE DURABILIDAD	CONDICIONES CLIMÁTICAS Y CAMPOS DE APLICACIÓN
D1	Uso interior, en el que el contenido de humedad de la madera no excede el 15%.
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%.
D3	Uso interior, con exposiciones cortas frecuentes a agua corriente o condensada y/o alta exposición a 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 PVA 3010, comercializado por la empresa AKZONOBEL PERÚ S.A.C. (2013), es un adhesivo de clase D3 que cumple con la norma UNE-EN 204 (AENOR, 2016) y ha sido especialmente elaborado para la industria de segunda transformación de la madera. Se comercializa en forma líquida, de color blanco, con una viscosidad de 2 000 a 3 000 cP a 25 °C y pH de 1,8 a 3,4, determinado al momento de su fabricación; además, luego de fraguado, el adhesivo puede soportar altas temperaturas durante cortos periodos de tiempo. Con respecto al valor inferior de pH, éste se encuentra por debajo del rango de 2,5 a 11 indicado por Iwakiri (2005), lo cual podría producir la degradación de las fibras de la madera.

2.4.2 Adhesivo emulsión polimérica de isocianato (EPI)

El producto EPI es un adhesivo bicomponente compuesto de una base de poliacetato de vinilo y de un isocianato polimérico denominado difenil metano diisocianato, el cual tiene la función de catalizar la reacción de curado del adhesivo, que se produce mediante la reacción de los grupos isocianatos con los grupos hidroxilo de la madera (SELLERS, 1994).

La emulsión del adhesivo EPI permite que polímeros de alto peso molecular se utilicen, mientras se mantenga como una solución de baja masa específica, para ser aplicada fácilmente. Como todos los sistemas bicomponentes, es importante determinar la proporción de mezcla adecuada (FRIHART, 2005).

Frazier (2003) indica que el contenido de humedad de la madera a ser encolada con el adhesivo EPI debe fluctuar de 10 a 15%. Asimismo, AKZO NOBEL PERÚ S.A.C. (2010), recomienda para el uso del adhesivo EPI 1911, un rango de contenido de humedad de la madera de 8 a 15%.

El adhesivo EPI presenta como principales ventajas su resistencia a la humedad y a alta temperatura, buena flexibilidad, no emite formaldehído y, por ser constituidos por isocianatos, presentan alta reactividad con grupos que contienen átomos de hidrógeno reactivos (VICK, 1999; CONNER, 2001; FRIHART, 2005; ZIMMERMAN, 2006; FRIHART; HUNT, 2010). En cuanto a sus desventajas, podrían citarse su elevado costo en relación a otras resinas, la necesidad de mezclarlo con un endurecedor antes de ser aplicado y su facilidad para adherirse a metales y plásticos (VICK, 1999; CONNER, 2001; FRIHART, 2005; FRIHART; HUNT, 2010).

El producto EPI 1911, elaborado por la empresa AKZONOBEL PERÚ S.A.C. (2010), es un adhesivo bicomponente, que se comercializa 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 8 000 a 15 000 cP a 25 °C, y un pH de 7,0 a 8,5.

Por ser un producto bicomponente, la relación de mezcla del adhesivo EPI - endurecedor en peso es de 100:15; es decir, 100 partes por peso de adhesivo EPI 1911 y 15 partes por peso del endurecedor HARDENER 1999, los cuales deben mezclarse por un tiempo aproximado de 30 segundos, con un mezclador eléctrico, o dos minutos si se realiza en forma manual, hasta que la mezcla quede homogénea (AKZO NOBEL PERU S.A.C., 2010).

Conner (2001) señala que la viscosidad del adhesivo EPI permite ser aplicado utilizando equipos de encolado convencionales. Además, el fraguado del adhesivo EPI puede lograrse a temperatura ambiente o a alta temperatura, pero aplicando siempre alta presión (VICK, 1999; FRIHART; HUNT, 2010).

Debido a la alta reactividad de este adhesivo, el tiempo de utilización debe ser ajustado en base a lo recomendado por el fabricante; además, pueden ser aplicados utilizando los equipos tradicionales para el encolado de madera (LOPES, 2008).

2.5 PROPIEDADES DE LOS ADHESIVOS

Las características y calidad del adhesivo están directamente relacionadas a diversos factores, donde se puede destacar principalmente la viscosidad, contenido de sólidos y el pH que presenta (IWAKIRI, 2005).

2.5.1 Viscosidad

La viscosidad de un líquido puede definirse como la resistencia al flujo libre entre las capas de un material o la amplitud que caracteriza la existencia de fricción entre moléculas de un fluido, que se manifiesta a través del flujo; por lo tanto, la fluidez de un líquido está relacionada con su viscosidad (IWAKIRI, 2005).

El flujo del adhesivo es importante, ya que el mayor recubrimiento de la superficie de un sustrato permite la obtención de enlaces más fuertes; de este modo, un adhesivo con alta viscosidad puede mojar una superficie, pero no fluir para cubrirla en un periodo de tiempo razonable; además, depende no solo del ángulo de contacto, sino también de su viscosidad. Con una viscosidad más baja, el adhesivo fluye mejor y moja más la superficie (FRIHART, 2005).

La viscosidad del adhesivo tiene una gran influencia en la penetración en la madera y en su fraguado. La determinación de la viscosidad permite saber si se está trabajando adecuadamente, porque define la movilidad del adhesivo durante su aplicación y, al mismo tiempo, señala los límites para su utilización (AITIM, 1998).

Con respecto a la calidad del adhesivo, no son recomendables valores extremos de viscosidad, ya que cuando ésta es alta, es difícil lograr una uniforme distribución del adhesivo en la superficie de la madera, produciendo una insuficiente penetración en su estructura, perjudicando la humectación y originando una línea de cola gruesa; por otro lado, un adhesivo con baja viscosidad permite una mayor penetración y absorción en la madera pero que, en situaciones extremas, puede resultar en una línea de cola débil por una absorción excesiva del adhesivo (ALMEIDA, 2009).

2.5.2 Contenido de sólidos

El contenido de sólidos se define como la cantidad de sustancia sólida que contiene el adhesivo, luego de volatilizarse sus constituyentes líquidos. Esta propiedad es de gran importancia en el encolado de la madera, porque indica cuánto de adhesivo queda efectivamente para formar la línea de cola, el cual a su vez es responsable del enlace entre sustratos y de la transferencia de tensiones generadas en el sistema madera - línea de cola (IWAKIRI, 2005). Debe considerarse que el contenido de sólidos y peso molecular del adhesivo, el tipo y cantidad de carga, de líquido dispersante y de catalizador afectan su consistencia (RIVER; OKKONEN, 1991).

La velocidad con que se produce la formación de la película adhesiva está relacionada con el contenido de sólidos del adhesivo; por lo tanto, para el adhesivo PVA, cuanto mayor es el contenido de agua que contiene, más lenta es la formación de la película (GARCIA; RECH, 2011)

Marra (1992) indica que la temperatura influye en la tasa de transición del estado líquido a sólido, reduciendo el tiempo de prensado. Luego de la solidificación del adhesivo, los sólidos adquieren diferentes propiedades y asumen un nuevo papel; además, durante el encolado, se produce la cohesión y, al suceder esto, los sólidos se convierten en mecanismos de unión entre las dos superficies, adquiriendo resistencia y durabilidad.

2.5.3 pH

Durante la fabricación de adhesivos, el control del pH es una evaluación fundamental, ya que esta propiedad determina la velocidad y el grado de reacciones y configuraciones de las moléculas, así como su vida útil (MARRA, 1992). En el encolado de madera es importante considerar la influencia del pH, tanto de la madera como del adhesivo, debido a que un pH muy bajo puede provocar una formación excesiva de espuma en la mezcla, perjudicando sensiblemente su aplicación (IWAKIRI, 2005).

El pH influye en la solidificación de un adhesivo, disminuyendo su resistencia en la línea de cola, principalmente en materiales celulósicos, como

es la madera, por lo que debe controlarse cuidadosamente (KOLLMANN; KUENZI; STAMM, 1975). La polimerización de la mayoría de adhesivos para madera ocurre a través de una reacción físico-química y comúnmente es influenciada por el pH (ALMEIDA, 2009).

Los adhesivos deben mantener los límites de pH en el rango de 2,5 a 11, ya que valores extremos pueden ocasionar degradación de las fibras de la madera. Cada adhesivo es producido con un pH específico y destinado a proporcionar una determinada solubilidad, velocidad y grado de solidificación (IWAKIRI, 2005).

2.6 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PRENSADO

De acuerdo a lo indicado por Vick (1999), si un adhesivo penetra suficientemente en la madera y se vuelve rígido después de su curado, se espera que la resistencia de la línea de cola sea mayor que la propia madera; además, las excepciones a este comportamiento sólo pueden explicarse por una elección inadecuada del adhesivo o una serie de parámetros relacionados a sus características físico-químicas, tipo de material a ser unido, o por fallas en la operación de encolado.

La calidad de la superficie de los productos de madera es una de las propiedades más importantes que influyen en el acabado y en la resistencia de la unión encolada. En la preparación de la madera para su encolado, la presencia de asperezas e imperfecciones superficiales reduce el grado de aproximación de dos piezas a encolar, perjudicando el movimiento del adhesivo (IWAKIRI, 2005).

Para obtener un buen encolado, la superficie de la madera debe estar suave, lisa y libre de irregularidades, como astillas o grietas, así como estar exenta de aceites, polvo u otras impurezas. La subsuperficie de la madera cuando está dañada, por un proceso inadecuado de corte o una aplicación excesiva de presión, también puede ocasionar fallas en la línea de cola (BILA, 2014).

Con el propósito de lograr un mejor resultado en el uso de los adhesivos PVA 3010 y EPI 1911, la madera debe ser suavemente cepillada;

asimismo, para lograr una resistencia óptima de la línea de cola, el encolado debe realizarse dentro de las 24 horas posteriores a la preparación de la madera (AKZO NOBEL PERU S.A.C., 2010; AKZO NOBEL PERU S.A.C, 2013).

Además de los factores inherentes a la madera, el tipo y cantidad de adhesivo, así como los parámetros del ciclo de prensado (temperatura, presión y tiempo) influyen en la calidad del panel elaborado (NASCIMENTO; GARCIA; DELLA LUCIA, 2013; IWAKIRI et al., 2015).

La presión aplicada durante el prensado es un factor importante, ya que permite que el adhesivo haga contacto con la superficie de la madera, forzando la penetración del adhesivo en los espacios vacíos del sustrato, logrando la formación de una película adhesiva fina, uniforme y con la resistencia necesaria para mantener la unión (SELBO, 1975; LOPES, 2008; FRIHART; HUNT, 2010)

La mayoría de adhesivos para madera normalmente no presentan dificultades en llenar los espacios vacíos, por lo que no requieren de altas presiones para proceder al encolado; sin embargo, la presión requerida varía de acuerdo con la masa específica de la madera (MARRA, 1992). Para maderas con alta masa específica, se requieren de presiones más altas, en comparación con las de baja masa específica, que necesitan presiones menores (RIVER; OKKONEN, 1991).

La presión que se aplica para el caso de empalmes *finger joint*, depende de la longitud del diente y de la masa específica de la madera, teniendo en cuenta que la presión empleada no supere un límite que ocasione fisuras con una extensión superior a 0,5 cm en el fondo de los dientes (SERRANO, 2009).

Si se emplea una presión mayor a la necesaria, puede ocasionar un movimiento excesivo del adhesivo, haciendo que éste se escurra fuera de las superficies de las juntas encoladas; mientras que, si la presión aplicada es menor a la requerida, el adhesivo no penetrará correctamente en la estructura de la madera, produciendo la formación de una línea de cola débil (MARRA, 1992; FRIHART; HUNT, 2010).

Para el encolado de juntas de madera con adhesivo PVA 3010, el fabricante recomienda una presión específica de 0,6 a 1,0 MPa, mientras que para el adhesivo EPI 1911 una presión específica de 0,8 a 1,2 MPa, dependiendo de la masa específica del sustrato a encolar (AKZO NOBEL PERU S.A.C., 2010; AKZO NOBEL PERU S.A.C, 2013)

El tiempo de prensado se establece en función del adhesivo utilizado, contenido de humedad de la madera y temperatura de prensado (SELBO, 1975; MARRA, 1992). Cuando la madera a encolar presenta un contenido de humedad elevado, la pérdida de humedad del adhesivo se retrasa, requiriendo de un mayor tiempo de prensado (MARRA, 1992). A diferencia del contenido de humedad, si la temperatura del ambiente o de la prensa utilizada es elevada, el tiempo de prensado debe reducirse, ya que la reacción de curado del adhesivo se produce más rápidamente (SELBO, 1975; MARRA, 1992).

El tiempo de prensado recomendado por el fabricante, para las juntas de madera encoladas con adhesivo PVA 3010, es de una a dos horas para una temperatura de prensado de 20°C, y de 30 a 60 minutos para una temperatura de 30°C. Asimismo, para el adhesivo EPI 1911, el fabricante sugiere un tiempo de prensado de 40 a 80 minutos a una temperatura de prensado de 20°C, y de 30 a 60 minutos para una temperatura de 30°C, dependiendo de las condiciones de aplicación (AKZO NOBEL PERU S.A.C., 2010; AKZO NOBEL PERU S.A.C, 2013).

La cantidad de cola a esparcir o gramaje (g/m^2), varía según el adhesivo utilizado, tipo de madera, calidad de su superficie, temperatura y humedad del ambiente, así como del tiempo de montaje (SELBO, 1975; MARRA, 1992; FRIHART; HUNT, 2010).

Para el adhesivo PVA 3010, el fabricante recomienda, para una sola cara, un gramaje de 120 a 200 g/m^2 , mientras que para el adhesivo EPI 1911 un gramaje de 150 a 300 g/m^2 , dependiendo de las condiciones de su aplicación (AKZO NOBEL PERU S.A.C., 2010; AKZO NOBEL PERU S.A.C, 2013).

2.7 PANELES EGP

Los productos de mayor valor agregado (PMVA) son definidos como artículos secundarios de madera que, mediante un reprocesamiento o recuperación, son transformados en un producto acabado o semiacabado con valor agregado adicional; dentro de ellos se incluyen, entre otros productos, a puertas, molduras, pisos y paneles EGP (PRATA, 2010; LAU, 2017).

El panel encolado lateralmente, conocido mayormente en lengua inglesa como *Edge Glued Panel* (EGP), es definido como un conjunto de listones de madera encolados lateralmente y en los extremos, mediante encolados planos o por medio de *finger joint*, conformando un panel como producto terminado (IWAKIRI, 2005; PRATA, 2010; BILA, 2014). Generalmente, las juntas dentadas se encuentran distribuidas en todas las piezas que componen el panel EGP, influenciando significativamente en su resistencia. Por este motivo, es fundamental conocer la resistencia mecánica de las juntas dentadas para lograr un buen desempeño de los paneles elaborados (MACEDO; JUNIOR, 1999).

Los paneles EGP son una alternativa para aumentar el rendimiento en el aprovechamiento de la materia prima, haciendo uso de residuos derivados de industrias madereras, obteniendo un producto final con mejores características, ya que permite utilizar listones de dimensiones variables en su fabricación (MAYER, 2008; FONTE, 2016). El uso de estos materiales como materia prima posibilita una reducción de gastos de fabricación, ya que la madera representa uno de los mayores costos de producción (BILA, 2014).

Los paneles EGP usados para la confección de muebles se fabrican con listones de madera, cuyos anchos fluctúan de 30 a 50 mm y espesores de 15 a 30 mm (DEL MENEZZI; NAHUZ; SOUZA, 2001); utilizando comúnmente adhesivos sintéticos PVA y EPI para sus juntas y empalmes (ALMEIDA, 2013).

La producción de paneles EGP permite el aprovechamiento de piezas que pueden presentar pequeños defectos, ya que los requerimientos de calidad para su comercialización se establecen teniendo en cuenta factores como espesor de los listones, contenido de humedad, calidad y cantidad de adhesivo, así como su uniformidad (MAYER, 2008).

2.8 CALIDAD DEL ENCOLADO DE PANELES EGP

Los adhesivos se utilizan generalmente en aplicaciones donde se exponen a cargas continuas o intermitentes durante largos períodos de tiempo, por lo que es difícil simular dichas condiciones a nivel de laboratorio. Ni el ensayo mecánico del adhesivo, ni la evaluación de la junta encolada en condiciones reales de servicio es una alternativa muy viable. Por ello, es normal el uso de ensayos acelerados, donde las condiciones extremas se utilizan para aumentar la velocidad de deterioro de la junta adhesiva. Si bien estos tipos de ensayos no reproducen las condiciones reales de uso de las juntas, son útiles para la comparación entre adhesivos de diferentes grados de durabilidad (DEVRIES; BORGMEIER, 2003).

La evaluación de calidad del encolado tiene como objetivo principal asegurar que las juntas o uniones no se deterioren antes de que puedan alcanzar los objetivos esperados. Generalmente, los ensayos utilizados buscan predecir el comportamiento de uniones encoladas con la aplicación de una carga específica (VICK, 1999). La mayoría de ensayos de resistencia de juntas encoladas prevén simular las peores condiciones de uso del producto, así como las extremas condiciones ambientales de transporte y acondicionamiento (ALMEIDA, 2015).

Los ensayos de cizallamiento son mayormente utilizados para evaluar la capacidad de adhesión de la madera; además, debido a que la distribución de tensiones en una junta encolada no es uniforme, los resultados de estas pruebas se presentan generalmente como carga de rotura sobre el área cizallada (DEVRIES; BORGMEIER, 2003). Este ensayo consiste en la separación de las fibras, producida por un esfuerzo paralelo a las mismas, teniendo como objetivo evaluar la calidad de la línea de cola y clasificar al producto elaborado de acuerdo al lugar de uso final, que puede ser para interior, intermedio o exterior (KOLLMANN; KUENZI; STAMM, 1975).

La norma UNE-EN 13354 (AENOR, 2009) establece un método de ensayo para determinar la calidad de encolado de tableros de madera maciza monocapa o multicapa, mediante un ensayo de cizallamiento, donde las probetas se someten a un pretratamiento, que se determina de acuerdo con la

clase de servicio que se requiere, luego del cual se realiza el ensayo de esfuerzo cortante en compresión hasta la rotura.

Para determinar la calidad del encolado del tablero de madera maciza monocapa, la norma UNE-EN 13353 (AENOR, 2011a) indica que el percentil inferior del 5% de la resistencia a cizallamiento, calculado según la norma UNE-EN 326-1 (AENOR, 1995), no debe ser menor de 2,5 N/mm². Además, la norma UNE-EN 13353 (AENOR, 2011a) especifica que el porcentaje de falla de la madera debe ser mayor del 40%, excepto si la masa específica es mayor de 0,60 g/cm³.

Las tensiones ocasionadas por la interacción madera - adhesivo son relevantes en el balance general de la resistencia del panel. Cuanto mayor es la resistencia de la línea de cola, en relación a la resistencia de la madera, mayor será el porcentaje de falla de la madera en la interface con el adhesivo (IWAKIRI, 2005).

La norma UNE-EN 204 (AENOR, 2016), clasifica a los adhesivos termoplásticos por su durabilidad y valora la resistencia del adhesivo en condiciones adversas, pero no evalúa la calidad de la interacción del encolado entre madera y adhesivo (ALMEIDA, 2015).

Para evaluar la calidad del encolado de los adhesivos usados en empalmes *finger joint* para productos de madera encolada no estructural, se utiliza comúnmente la norma ASTM D 5572 (ASTM, 2005), la cual indica la necesidad de efectuar ensayos de flexión estática y tracción paralela, así como las condiciones de exposición y pretratamientos para uso en seco y húmedo.

En paneles EGP para uso en ambiente seco, la norma ASTM D 5572 (ASTM, 2005) señala, para el ensayo de flexión estática, un valor mínimo de módulo de rotura (MOR) de 13,8 MPa para la prueba con pretratamiento seco, el cual es sin exposición a fuentes de humedad, y de 6,9 MPa para tres ciclos en agua, teniendo en cuenta que para cada ciclo se sumergen a las probetas en agua por cuatro horas a $23 \pm 4^{\circ}\text{C}$, luego a un secado en estufa a $41 \pm 3^{\circ}\text{C}$ por 19 horas; mientras que, para tracción paralela, indica valores mínimos de tensión máxima de 13,8 MPa con pretratamiento seco y de 6,9 MPa para alta temperatura, el cual se efectúa colocando las probetas en estufa con circulación de aire a $104 \pm 3^{\circ}\text{C}$ durante seis horas, y tres ciclos en agua.

La falla de la madera, expresada en porcentaje del área total de unión de la junta adhesiva, significa la ruptura de las fibras durante los ensayos de resistencia de la unión del adhesivo a la madera (VICK, 1999). Al respecto, la norma ASTM D 5572 (ASTM, 2005) señala, para ensayos de tracción paralela con maderas latifoliadas, un porcentaje mínimo de 30% con el pretratamiento seco y de 15% con tres ciclos en agua.

2.9 ESTUDIOS REALIZADOS SOBRE PANELES EGP

Prata (2010) realizó un estudio con seis especies de pinos tropicales (*Pinus taeda*, *Pinus maximinoi*, *Pinus oocarpa*, *Pinus tecunumannii*, *Pinus chiapensis* y *Pinus caribaea hondurensis*), con masas específicas básicas que oscilan de 0,40 a 0,46 g/cm³, utilizando adhesivo PVA para el encolado lateral de juntas, alcanzando valores promedio de cizallamiento con pretratamiento para uso en ambiente seco, que fluctúan de 2,28 a 2,88 MPa. Asimismo, para empalmes *finger joint*, obtuvo valores promedio de MOR en flexión estática de 33,19 a 41,16 MPa, 33,76 a 49,00 MPa y de 46,42 a 61,37 MPa con pretratamientos seco, alta temperatura y tres ciclos en agua; mientras que para tracción paralela reportó valores promedio de 24,54 a 30,37 MPa, 24,19 a 35,33 MPa y de 27,85 a 39,23 MPa con pretratamientos seco, alta temperatura y tres ciclos en agua.

Almeida (2013) evaluó el potencial de uso de residuos de seis maderas tropicales (*Tabebuia spp*, *Hymenaea spp.*, *Astronium lecointel*, *Couratari spp.*, *Pterogyne nitens*, y *Patagonula sp.*), que presentan un rango de masa específica básica de 0,63 a 0,94 g/cm³, utilizando para el encolado lateral de juntas adhesivos PVA y EPI un gramaje de 200 g/m², obteniendo con los pretratamientos para uso en ambiente seco y húmedo, valores promedio de cizallamiento que fluctúan de 0,50 a 4,26 MPa y 0,46 a 0,90 MPa para el adhesivo PVA y de 0,37 a 8,42 MPa y 0,99 a 5,45 MPa para EPI. Además, reportó valores promedio de MOR en flexión estática con adhesivo PVA de 20,76 a 62,90 MPa y de 33,70 a 77,33 MPa con pretratamientos seco y tres ciclos en agua; Asimismo, de 45,46 a 60,63 MPa y 50,28 a 70,48 MPa con pretratamientos seco y tres ciclos en agua con EPI.

Bila (2014) estudió la calidad de juntas encoladas de seis especies tropicales de la Amazonía (*Eschweilera coriacea*, *Manilkara amazonica*, *Protium puncticulatum*, *Inga paraensis*, *Eschweilera odora* y *Byrsonima crispera*), con masas específicas aparentes de 0,81 a 1,21 g/cm³, obteniendo con pretratamiento para uso en ambiente seco, valores promedio de cizallamiento de 3,14 a 7,43 MPa con adhesivo PVA, y de 7,66 a 13,76 MPa con EPI, utilizando para ambos adhesivos un gramaje de 200 g/m².

Almeida (2015) presenta, como resultados de resistencia al cizallamiento de juntas encoladas de la especie *Cupressus lusitánica*, con masa específica básica de 0,40 g/cm³, masa específica aparente de 0,48 g/cm³ y utilizando un gramaje de 200 g/m², valores promedio con pretratamiento para uso en ambiente seco de 0,51 MPa con adhesivo PVA y de 4,88 MPa con adhesivo EPI. Del mismo modo, obtuvo para empalmes *finger joint*, valores promedio de MOR en flexión estática con adhesivo PVA de 15,43, 19,30 y 11,41 MPa con pretratamientos seco, alta temperatura y tres ciclos en agua; además, reportó para el adhesivo EPI, valores promedio de 17,45, 23,50 y 21,14 MPa con pretratamientos seco, alta temperatura y tres ciclos en agua. Del mismo modo, obtuvo valores promedio de tracción paralela de 9,37, 13,86 y 4,04 MPa con pretratamientos seco, alta temperatura y tres ciclos en agua con PVA, y de 15,26, 12,59 y 13,24 MPa con pretratamientos seco, alta temperatura y tres ciclos en agua con EPI.

Juizo (2015) evaluó la aptitud de uso de costaneras, que es un residuo del aserrío, de las especies *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus saligna*, con masa específica básica de 0,58 y 0,67 g/cm³, utilizando adhesivo EPI para el encolado lateral, encontrando para ensayos de cizallamiento con pretratamiento para uso en ambiente seco, un valor promedio de 48,00 MPa. Asimismo, reportó, para empalmes *finger joint* encolados con EPI, valores promedio de MOR en flexión estática de 62,64, 44,08 y 28,76 MPa con pretratamientos seco, alta temperatura y tres ciclos en agua; mientras para los ensayos de tracción paralela, obtuvo valores promedio de 35,26, 32,25 y 24,71 MPa con pretratamientos seco, alta temperatura y tres ciclos en agua.

Fonte (2016), en un estudio realizado con madera de *Cryptomeria japonica*, con masa específica aparente de 0,50 g/cm³, reportó valores

promedio de cizallamiento de juntas encoladas con pretratamiento para uso en ambiente seco, utilizando un gramaje de 180 g/m², de 2,10 y 5,10 MPa con adhesivos PVA y EPI, y de 3,90 MPa para el adhesivo EPI con pretratamiento en ambiente húmedo. Asimismo, utilizando PVA, obtuvo valores promedio de MOR en flexión estática de 41,00, 8,40 y 25,40 MPa con pretratamientos seco, alta temperatura y tres ciclos en agua; mientras que, en pruebas de tracción paralela, encontró valores promedio de 21,30, 20,80 y 24,40 MPa con pretratamientos seco, alta temperatura y tres ciclos en agua.

Campelo et al. (2017) evaluaron la viabilidad de uso de la especie *Genipa americana*, con masa específica básica de 0,61 g/cm³, en la manufactura de paneles EGP, para lo cual realizaron ensayos de cizallamiento de juntas encoladas lateralmente, utilizando un gramaje de 180 g/m², reportando, con pretratamiento para uso en ambiente seco, valores promedio de 0,28 y 4,20 MPa para los adhesivos PVA y EPI respectivamente.

Lau (2017) estudió la especie *Populus deltoides*, con masa específica básica de 0,33 g/cm³, utilizando adhesivos PVA y EPI con gramaje de 180 g/m², reportando valores promedio de cizallamiento de juntas encoladas, con pretratamiento para uso en ambiente seco, de 0,69 y 3,50 MPa respectivamente. Del mismo modo, encontró, para empalmes *finger joint* encolados con adhesivo PVA, valores promedio de MOR en flexión estática de 28,80, 13,60 y 5,49 MPa con pretratamientos seco, alta temperatura y tres ciclos en agua; mientras que, para las pruebas de tracción paralela, obtuvo valores promedio de 24,91, 12,49 y 6,18 MPa con los pretratamientos seco, alta temperatura y tres ciclos en agua.

Endo et al. (2017) evaluó la calidad del encolado de la especie *Pinus taeda* para la producción de tableros EGP, utilizando diferentes formulaciones de adhesivo PVA con sistemas de prensado en frío y alta frecuencia; para ello, de acuerdo a lo indicado en la norma UNE 204 (AENOR, 2016), efectuaron pruebas de cizallamiento en la línea de cola luego de los pretratamientos: 7 días en climatización; 7 días en climatización - 4 días en inmersión en agua y 7 días en climatización - 4 días en inmersión en agua - 7 días en climatización. Los resultados encontrados para el adhesivo PVA D3 con prensado en frío fueron de 5,41, 0,92 y 5,55 MPa para cada pretratamiento arriba enunciado.

3 MATERIAL Y MÉTODOS

3.1 MATERIAL

Los materiales utilizados fueron residuos de madera secas al horno de las especies tropicales *Cariniana domestica* (Mart.) Miers, *Copaifera paupera* (Herzog) Dwyer) y *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke, extraídas de bosques no manejados silviculturamente, procedentes de la ciudad de Pucallpa, departamento de Ucayali; los cuales fueron colectados de procesos de fabricación de mobiliario escolar de las empresas KFR Inversiones S.A. (*Copaifera paupera* y *Cedrelinga cateniformis*) e *Industry of Furniture S.A.* (*Cariniana domestica*), ubicadas en el distrito de San Juan de Lurigancho, departamento de Lima, Perú (FIGURA 1).

FIGURA 1 – RESIDUOS GENERADOS EN LAS EMPRESAS DE FABRICACIÓN DE MOBILIARIO ESCOLAR



FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: A- residuos de madera de la empresa KFR Inversiones S.A. B- residuos de madera de la empresa Industry of Furniture S.A.

Los residuos utilizados fueron piezas de 2,0 a 4,0 cm de espesor, 5,0 a 30,0 cm de ancho y longitudes mayores de 30 cm, con orientaciones de corte variables y presentaban dimensiones o defectos que los vuelven no aptas para la fabricación de mobiliario escolar; además, fueron clasificados en base a sus espesores, anchos y largos, de acuerdo a lo señalado en la NBR 7203 (ABNT, 1982), obteniéndose que corresponden mayormente a los denominados

listones (*sarrafos*), seguido de tablillas (*ripas*) y en menor proporción como tablas (*tábuas*).

Para el encolado de las juntas laterales y de empalmes *finger joint*, se utilizó el adhesivo PVA D3, cuyo nombre comercial es PVA 3010, que es un monocomponente a base de resina de polivinil acetato, y el EPI, el cual se comercializa con el nombre de EPI 1911 y el componente HARDENER 1999, conformando ambos un bicomponente a base de polivinil acetato e isocianato, adquiridos en la empresa AKZO NOBEL PERÚ S.A.C.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Preparación de los residuos de madera

Los residuos de madera colectados de las especies estudiadas fueron reaserrados y recortados en listones de 50 mm de ancho, 300 mm de largo y 20 mm de espesor, en la empresa KFR Ltda. Los listones preparados fueron empaquetados y trasladados a la empresa Postes Wise S.A.C., ubicada en el distrito de Chaclacayo, departamento de Lima (FIGURA 2).

FIGURA 2 – PREPARACIÓN DE LISTONES A PARTIR DE RESIDUOS DE MADERA



FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: A - recorte de listones de madera en la sierra circular; B - listones obtenidos de los residuos y embalados para su traslado a la empresa Postes Wise S.A.C.

Además, se prepararon probetas y materiales para las evaluaciones anatómicas, físicas y químicas de los residuos de madera, cuyas dimensiones

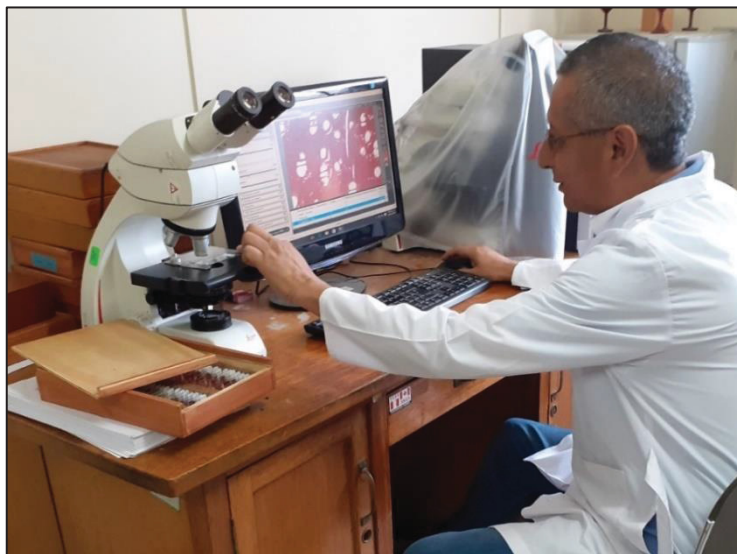
y características se establecieron de acuerdo a las normas técnicas establecidas para cada ensayo. Los equipos utilizados fueron: sierra circular DELTA, sierra radial TATRY, garlopa WACO y regruesadora HOLY.

3.2.2 Descripción anatómica de los residuos de madera

La descripción de las características anatómicas se efectuó siguiendo las normas de procedimientos del IBAMA (1991) y del Boletín de la *International Association of Wood Anatomists - IAWA* (1989), para lo cual se prepararon 25 (veinticinco) cubos de madera de aproximadamente 2,0 cm por lado de cada especie estudiada. Esta actividad se efectuó en el Laboratorio de Anatomía de la Madera de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), departamento de Lima, Perú, para lo cual se utilizaron como patrones, muestras de xiloteca de las especies estudiadas que posee el laboratorio.

La medición del diámetro tangencial de poros y frecuencia de poros (cantidad de poros por mm^2) se realizó en 25 imágenes tomadas con un microscopio Leica modelo DM750 y una cámara Leica ICC50 W/E, a través del programa LAS EZ v. 3.4 (FIGURA 3).

FIGURA 3 – MEDICIÓN DE DIÁMETRO TANGENCIAL Y FRECUENCIA DE POROS EN IMÁGENES TOMADAS DE LOS RESIDUOS DE MADERA



FUENTE: El autor (2019).

3.2.3 Evaluación de las propiedades físicas de los residuos de madera

Para la evaluación de las propiedades físicas de los residuos de madera, se realizaron las determinaciones del contenido de humedad, masa específica básica, masa específica aparente y variación dimensional. Estas determinaciones se realizaron en el Laboratorio de Ensayos Tecnológicos de la UNALM. Los equipos e instrumentos utilizados fueron: estufa eléctrica MEMMERT, balanza analítica ELECTRONIC BALANCE, micrómetro digital MITUTOYO, materiales de vidrio, entre otros.

3.2.3.1 Contenido de humedad

La evaluación del contenido de humedad se efectuó de dos formas: mediante el uso de un higrómetro de pines GANN HT 75, para verificar el contenido de humedad de cada elemento antes del encolado, así como por el método gravimétrico en estufa, de acuerdo con lo mencionado en la NTP 251.010 (INACAL, 2014a). Se realizaron 10 (diez) repeticiones por especie, para verificar el contenido de humedad de los residuos de madera, los cuales estaban almacenados en similares condiciones de humedad relativa y temperatura a los listones que fueron encolados.

3.2.3.2 Masa específica básica y aparente

Las determinaciones de masa específica básica y aparente de los residuos de las tres especies en estudio se realizó en base a lo indicado en la NTP 251.011 (INACAL, 2014b), conjuntamente con la determinación de la variación dimensional, para lo cual se utilizaron 12 (doce) probetas de cada especie (FIGURA 4). La saturación de las probetas de madera se realizó mediante la inmersión en agua a temperatura ambiente dentro de un recipiente por un tiempo de 45 días. Luego de dicho tiempo, con el uso de una balanza, se verificó que el contenido de humedad excediera el punto de saturación de las fibras (30%). Adicionalmente, se determinó la masa específica básica de 20 (veinte) probetas por especie, obtenidas luego de ser sometidas al ensayo

de cizallamiento en la línea de cola lateral, a fin de evaluar la correlación entre la masa específica básica y la resistencia de las juntas encoladas con los adhesivos PVA y EPI, encontradas en los ensayos de cizallamiento realizados con pretratamiento para uso en ambiente seco.

FIGURA 4 – DETERMINACIÓN DE LA MASA ESPECÍFICA BÁSICA Y APARENTE DE LOS RESIDUOS DE MADERA



FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: A - determinación del peso de la probeta; B - determinación del volumen de la probeta; C - probetas de los tres residuos de madera; D - secado en estufa de las probetas.

3.2.3.3 Variación dimensional

La determinación de variación dimensional se desarrolló de acuerdo con la NTP 251.012 (INACAL, 2015), para lo cual se usaron 12 (doce) probetas

de cada especie, para la obtención de las contracciones radial, tangencial, longitudinal y volumétrica, así como el coeficiente de anisotropía (FIGURA 5).

FIGURA 5 – MEDICIÓN DE LA SECCIÓN DE UNA PROBETA PARA DETERMINAR LA VARIACIÓN DIMENSIONAL

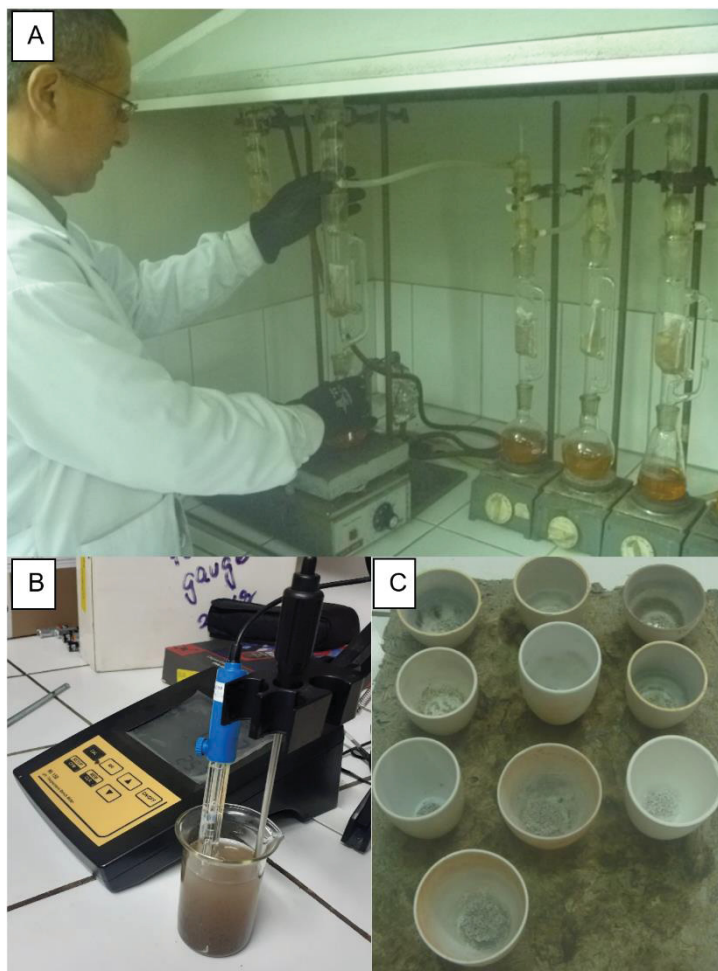


FUENTE: El autor (2019).

3.2.4 Evaluación de las propiedades químicas de los residuos de madera

Para la evaluación del contenido de extractivos totales, pH y contenido de cenizas de los residuos de madera (FIGURA 6), se utilizaron partículas obtenidas luego de ser sometidas al paso de tamices de malla 40 y 60, los cuales fueron preparados de acuerdo a lo indicado en las normas TAPPI T 257 sp-12 (TAPPI, 2012) y TAPPI T 264 cm-07 (TAPPI, 2007).

FIGURA 6 - DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DE LOS RESIDUOS DE MADERA



FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: A - contenido de extractivos; B - pH; C - contenido de sólidos.

Los análisis químicos se realizaron en el Laboratorio de Química de la Madera de la Facultad de Ciencias Forestales de la UNALM, con 5 (cinco) repeticiones por muestra, siguiendo los procedimientos indicados en las siguientes normas técnicas:

- Extractivos totales: TAPPI T 204 cm-17 (TAPPI, 2017)
- pH: TAPPI T 252 om-16 (TAPPI, 2016b)
- Cenizas de la madera: TAPPI T 211 om-16 (TAPPI, 2016a)

Los equipos e instrumento utilizados fueron: balanza analítica ELECTRONIC BALANCE, mufla THERMOLYNE, pH-metro, materiales de vidrio, solventes, reactivos químicos, termómetros, cronometro, entre otros.

3.2.5 Determinación de las propiedades de los adhesivos

3.2.5.1 Viscosidad

La determinación de la viscosidad de los adhesivos PVA y EPI se realizó en base al procedimiento indicado en la norma ASTM D 1084 (ASTM, 1998), la cual se efectuó en un viscosímetro Brookfield DB-II+Pro, manteniendo acondicionados ambos adhesivos a una temperatura de 25 °C, utilizando un agitador o “spindle” número 4, velocidad de rotación de 20 rpm y realizando 5 (cinco) repeticiones para cada tipo de adhesivo (FIGURA 7).

FIGURA 7 - DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DE UN ADHESIVO EN VISCOSIMETRO BROOKFIELD



FUENTE: El autor (2019).

3.2.5.2 Contenido de sólidos

El análisis del contenido de sólidos de los adhesivos PVA y EPI se efectuó de acuerdo a lo señalado en la norma UNE-EN 827 (AENOR, 2006), mediante el calentamiento de 5 (cinco) muestras de aproximadamente 2,0 g de adhesivo, hasta que el residuo final tenga una masa constante, lo que ocurre luego de la evaporación total de sus componentes volátiles. Los equipos y

materiales utilizados fueron: estufa eléctrica MEMMERT, balanza analítica ELECTRONIC BALANCE, materiales de vidrio, entre otros.

3.2.5.3 pH

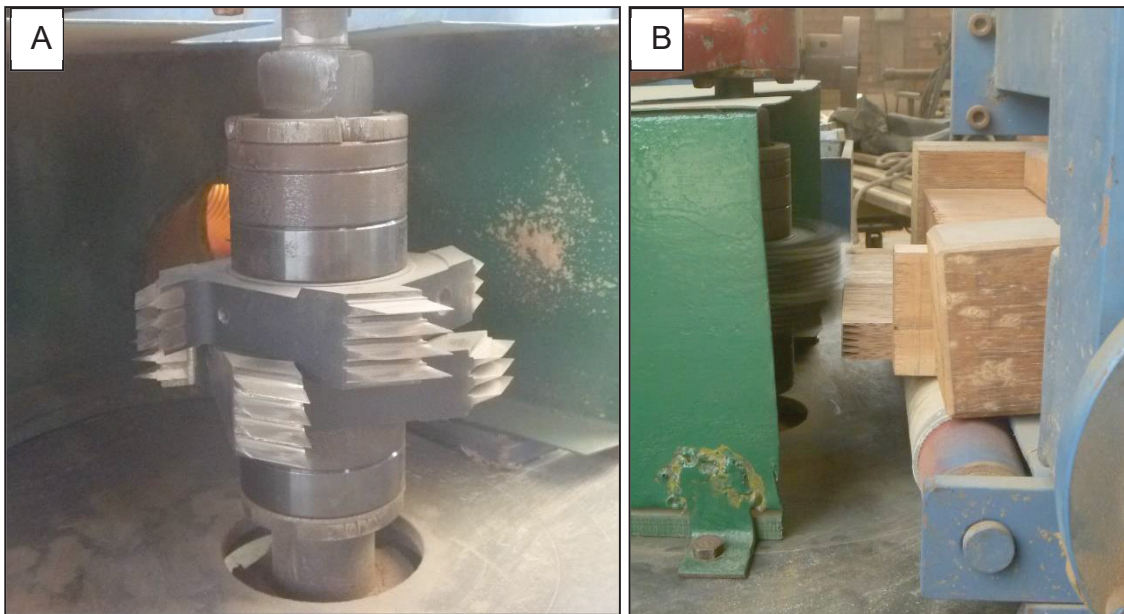
El pH de los adhesivos PVA y EPI utilizados se determinó en base al procedimiento mencionado en la norma UNE-EN 1245 (AENOR, 2011b), para lo cual fueron medidos a una temperatura de 25°C en un pH-metro previamente calibrado a valores de pH de 4 a 7, utilizándose soluciones tampón estandarizadas. Se realizaron 5 (cinco) repeticiones por adhesivo. Los equipos e instrumentos utilizados fueron: balanza analítica ELECTRONIC BALANCE, pH-metro, materiales de vidrio, solventes, termómetros, cronómetro, entre otros.

3.2.6 Producción de juntas encoladas y empalmes *finger joint*

La confección de juntas encoladas y empalmes *finger joint*, utilizando adhesivos PVA y EPI, se realizó con las especies *Cariniana domestica*, *Copaifera paupera*, *Cedrelinga cateniformis* y con combinaciones entre ellas, empleando los listones previamente elaborados.

Para la preparación de listones antes del encolado lateral, los cantos fueron ligeramente cepillados; asimismo, en los listones utilizados para la obtención de probetas de flexión estática y tracción paralela, se realizaron los cortes de dientes horizontales en sus extremos con la máquina SAUTER, equipada con un cabezal *finger joint* (FIGURA 8), cuyos dientes tienen una longitud de 10 mm (FIGURA 9).

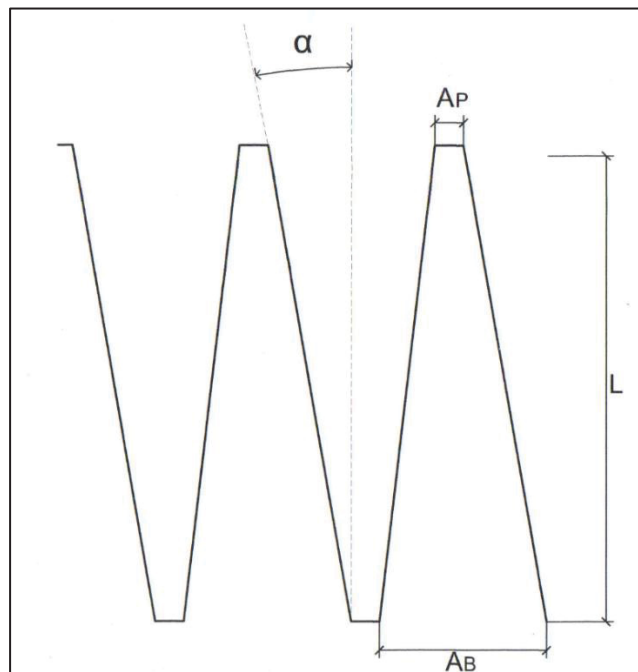
FIGURA 8 – CORTE DE LOS EXTREMOS DE LISTONES CON EQUIPO PROVISTO DE CABEZAL *FINGER JOINT*



FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: A - máquina con cabezal *finger joint*; B - corte horizontal con los dientes *finger joint* en los extremos de los listones de madera.

FIGURA 9 – GEOMETRÍA DE LOS DIENTES *FINGER JOINT*.



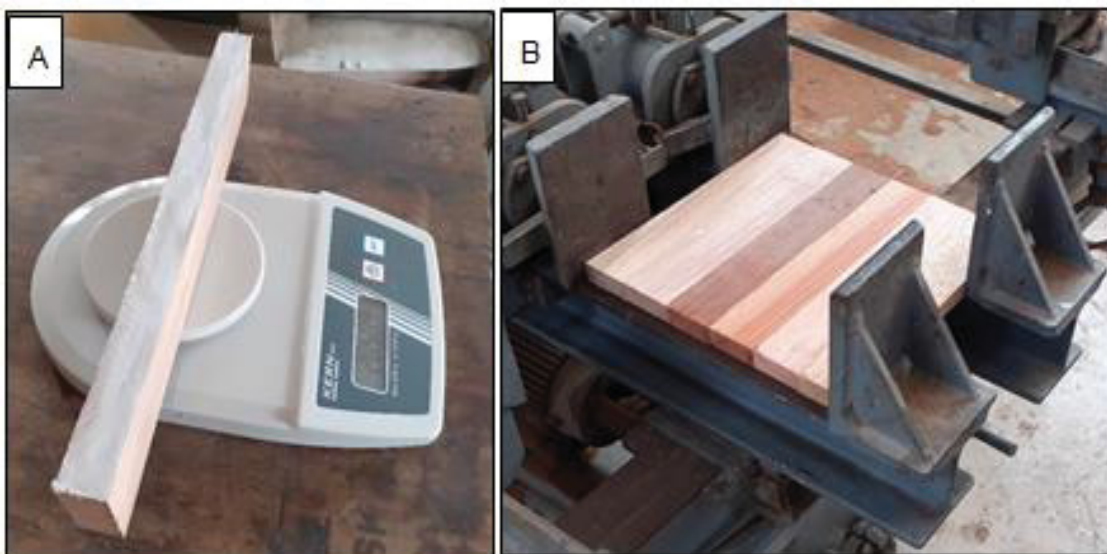
FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: L - longitud del diente (10,0 mm); AB - ancho de la base del diente (3,5 mm); AP - ancho de la punta del diente (0,6 mm); α - ángulo de inclinación del diente (10°).

Los adhesivos utilizados para el encolado lateral y empalmes *finger joint* se aplicaron en un canto o extremo de una de las piezas a encolar con una espátula, calculando previamente la cantidad de adhesivo necesario, de acuerdo al gramaje previsto para cada caso, así como del área de un canto y de un extremo con dientes *finger joint*. La aplicación del adhesivo en los empalmes *finger joint* se realizó esparciendo homogéneamente el adhesivo en todos los dientes que conforman el empalme. El tiempo de ensamblaje fue de un minuto en promedio, efectuando el prensado en una prensa fría.

Para el encolado lateral de las juntas se utilizó un gramaje de 180 g/m² por cada adhesivo utilizado; asimismo, de acuerdo a las recomendaciones indicadas en las fichas técnicas de los adhesivos, se aplicó una presión específica de 0,8 MPa, la cual fue controlada con el manómetro de la prensa utilizada, por un tiempo efectivo de 60 minutos (FIGURA 10).

FIGURA 10 – ENCOLADO LATERAL DE LISTONES OBTENIDOS DE RESIDUOS DE LAS MADERAS ESTUDIADAS



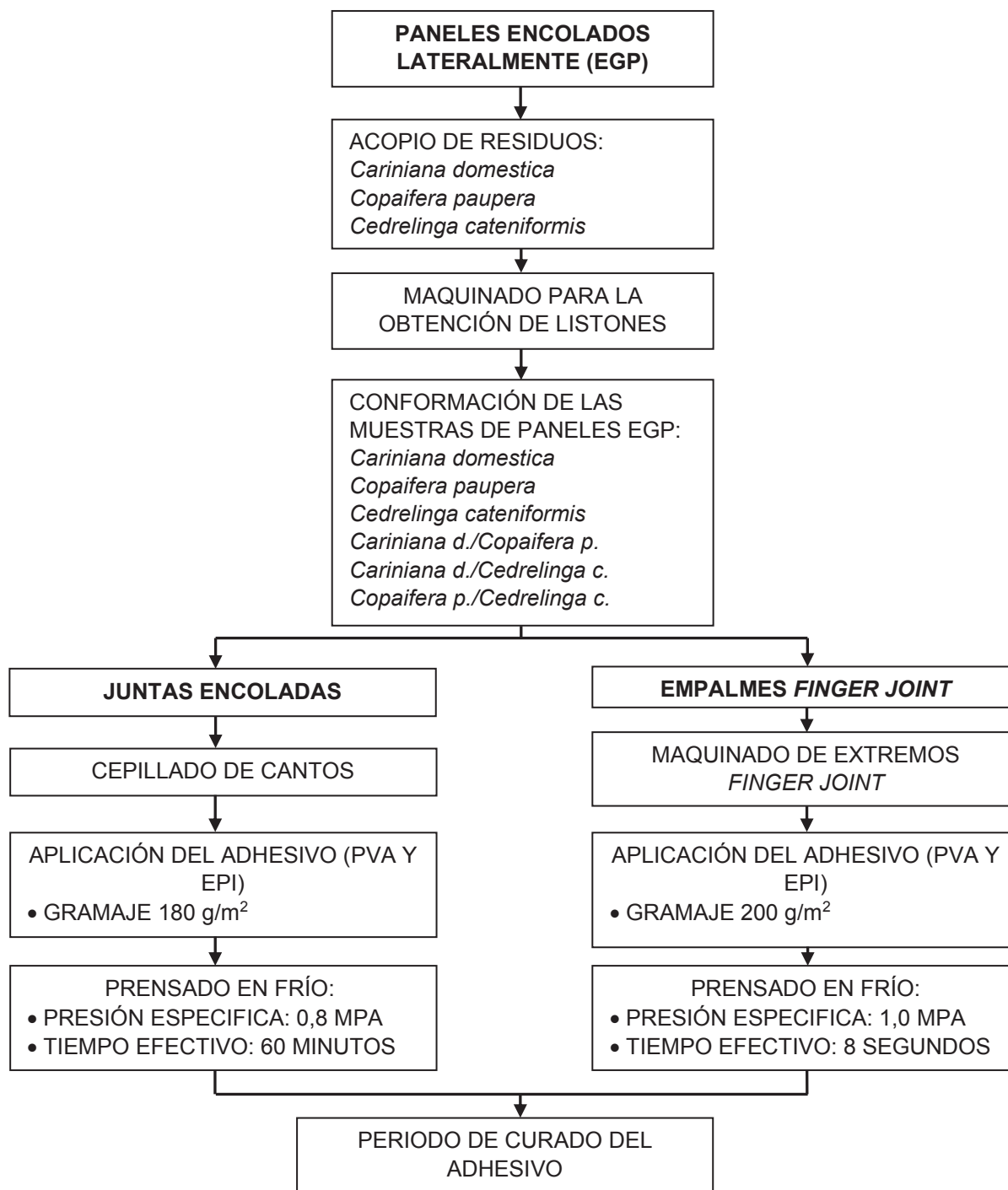
FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: A - pesado de la cantidad de adhesivo; B - prensado de las juntas encoladas.

Asimismo, en los empalmes de extremos tipo *finger joint*, se aplicó un gramaje de 200 g/m² por cada adhesivo empleado, con una presión específica de 1,0 MPa y con un tiempo efectivo de 8 segundos.

En la FIGURA 11 se muestra el Flujograma para la elaboración de muestras de paneles encolados lateralmente (EGP).

FIGURA 11 – FLUJOGRAMA DE LA ELABORACIÓN DE MUESTRAS DE PANELES EGP

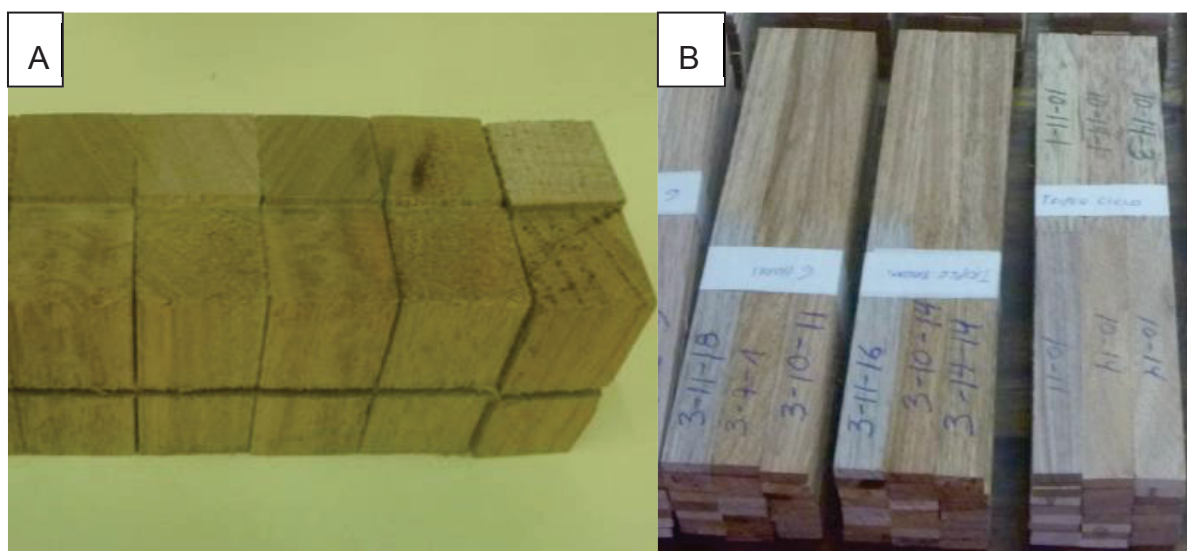


FUENTE: El autor (2020).

3.2.7 Preparación de las probetas para ensayos mecánicos

Las probetas de juntas encoladas utilizadas para ensayos de cizallamiento de la línea de cola fueron elaboradas de acuerdo a lo indicado en las normas UNE-EN 13353 (AENOR, 2011a) y UNE-EN 13354 (AENOR, 2009), para lo cual se prepararon 10 (diez) probetas por pretratamiento. Asimismo, las probetas de empalmes *finger joint* empleadas para pruebas de resistencia a la flexión estática y tracción paralela fueron confeccionadas en base a lo señalado en la norma ASTM D 5572 (ASTM, 2005), elaborándose 20 (veinte) probetas por pretratamiento (FIGURA 12).

FIGURA 12 – PROBETAS PARA ENSAYOS MECÁNICOS DE CIZALLAMIENTO Y TRACCIÓN PARALELA



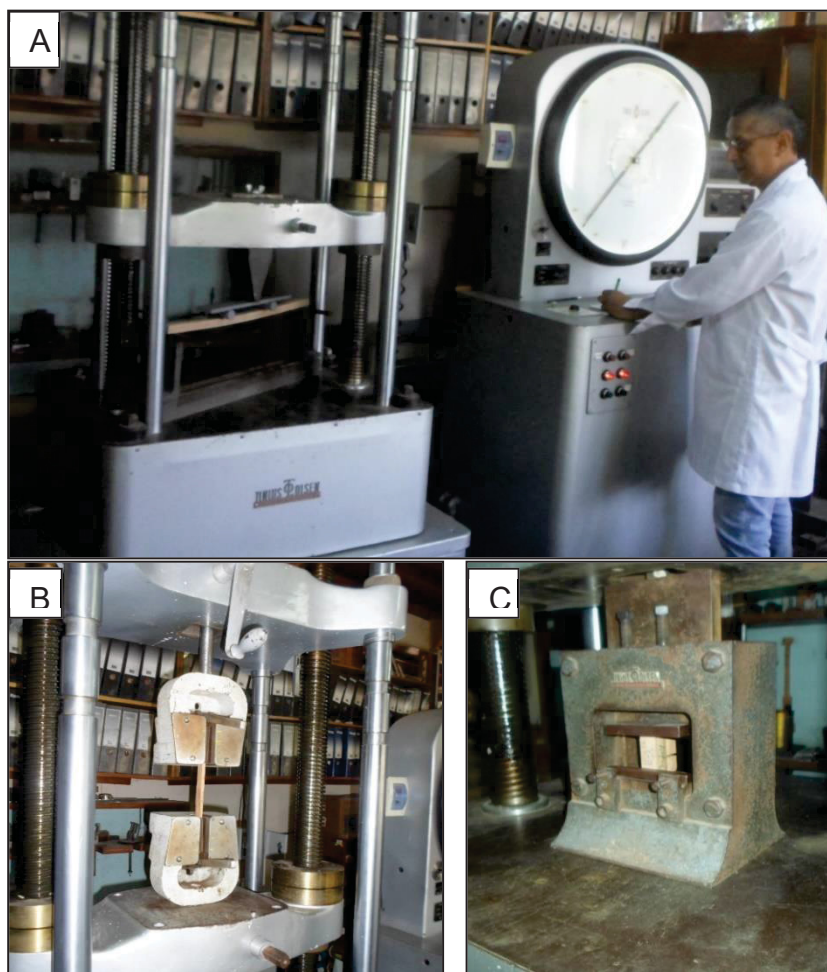
FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: A – probetas para el ensayo de resistencia al cizallamiento de encolado lateral; B – probetas para el ensayo de tracción paralela de empalmes *finger joint*

3.2.8 Determinación de la resistencia del encolado lateral y de empalmes *finger joint*

Los ensayos mecánicos efectuados fueron de cizallamiento al encolado lateral, así como de flexión estática y tracción paralela de los empalmes *finger joint* (FIGURA 13).

FIGURA 13 – ENSAYOS MECÁNICOS DE PROBETAS DE JUNTAS Y EMPALMES ENCOLADOS DE LOS RESIDUOS DE MADERA



FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: A - ensayo de flexión estática de empalmes *finger joint*; B - ensayo de tracción paralela de empalmes *finger joint*; C - ensayo de resistencia al cizallamiento de encolado lateral.

3.2.8.1 Ensayo de cizallamiento al encolado lateral

Los valores de resistencia del encolado lateral de las probetas se determinaron de acuerdo a lo indicado en la norma UNE-EN 13354 (AENOR, 2009).

Previo al ensayo mecánico para el encolado lateral, las probetas fueron sometidas a pretratamientos, de acuerdo a las condiciones de uso del panel: uso no estructural seco (SWP/1 NS) y húmedo (SWP/2 NS), tal como lo indica la norma UNE-EN 13354 (AENOR, 2009). Para uso no estructural en ambiente seco, el pretratamiento consistió en sumergir las probetas en agua a una temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ por 24 horas antes de los ensayos; mientras que,

para uso no estructural en ambiente húmedo, el pretratamiento se basó en someter a las probetas durante seis horas en agua hirviendo y luego a un enfriamiento, por al menos una hora en agua, a una temperatura de $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$.

Los ensayos se realizaron de acuerdo a los procedimientos descritos en la norma UNE-EN 13354 (AENOR, 2009), aplicando una velocidad de carga constante para que la rotura de la probeta se produzca en un tiempo de 60 ± 30 segundos. Los valores obtenidos se compararon con los requisitos indicados en la norma UNE-EN 13353 (AENOR, 2011a); para ello, se determinó el 5° percentil inferior de resistencia al cizallamiento de las probetas ensayadas, con el procedimiento señalado en la norma UNE-EN 326-1 (AENOR, 1995); realizándose además la determinación del porcentaje de falla de la madera, en base a la norma UNE-EN 314-1 (AENOR, 2007).

La determinación del porcentaje de fibras arrancadas en la superficie encolada de las probetas ensayadas se efectuó teniendo en cuenta que para un 100% de falla en la madera se tiene un 0% de falla en el adhesivo, lo cual indica que estos parámetros son inversamente proporcionales. Asimismo, la norma UNE-EN 13353 (AENOR, 2011a) señala, como requisito, que el porcentaje de falla de madera deberá ser mayor del 40%, a menos que la masa específica de la madera empleada sea mayor de $0,60 \text{ g/cm}^3$.

3.2.8.2 Ensayos de flexión estática y tracción paralela de empalmes *finger joint*

La calidad del encolado de empalmes *finger joint* en flexión estática y tracción paralela se determinó en base a la norma ASTM D 5572 (ASTM, 2005). Previo a la ejecución de los ensayos, las probetas fueron sometidas a los siguientes pretratamientos:

- En condición seca: sin exposición a fuentes de humedad,
- Alta temperatura: colocación en estufa con circulación de aire, por un tiempo de seis horas, a una temperatura de $104 \pm 3^{\circ}\text{C}$.
- Triple ciclo: inmersión en agua a una temperatura de 19 a 27°C por cuatro horas, seguido de un secado en estufa con circulación de aire por 19 horas, a una temperatura de $41 \pm 3^{\circ}\text{C}$. Se repitió el procedimiento tres veces, luego del cual se ensayaron inmediatamente.

Los ensayos de flexión estática y tracción paralela se efectuaron utilizando 20 (veinte) probetas por pretratamiento, aplicando una carga constante a una velocidad de 12,7 mm/min. Para los ensayos de tracción paralela, la norma ASTM D 5572 (ASTM, 2005) considera, para maderas latifoliadas, un porcentaje de falla de la madera mínimo de 30% con el pretratamiento seco y de 15% con tres ciclos en agua.

Los ensayos mecánicos se efectuaron en una máquina de ensayos mecánicos marca TINIUS OLSEN, provista de una célula de carga de 60 000 lb, utilizando accesorios acordes con el tipo de ensayo realizado.

3.2.9 Análisis estadístico

En las características anatómicas (frecuencia y diámetro tangencial de poros) de los residuos de las tres especies estudiadas, se determinaron los valores promedio y rangos, mientras que para el área relativa de poros el valor promedio. Para las características físicas y químicas de los residuos de las especies estudiadas, se calculó el promedio y coeficiente de variación por especie, además de un análisis de variancia (ANOVA) para la comparación de medias, luego del cual, se usó la prueba de *Tukey*, con un nivel de confianza de 95%, en los casos en que se encontraron diferencias significativas en al menos una media. Para los resultados de las propiedades de los adhesivos utilizados se determinaron los valores promedio y coeficientes de variación.

En los resultados de resistencia al cizallamiento del encolado lateral, de cada especie y combinación estudiada, se calculó el valor promedio, el 5° percentil inferior y el coeficiente de variación, mientras que para el porcentaje de falla en la madera se calculó el valor promedio. Para cada pretratamiento se realizó un ANOVA aplicado a un diseño factorial 6 x 2 (Factores: especie y adhesivo) y una prueba de *Tukey* con un nivel de confianza de 95%, empleando el programa estadístico R v.3.5.0, en los casos que existieron diferencias significativas en al menos una media (TABLA 2).

TABLA 2 – DISEÑO EXPERIMENTAL DE LOS ENSAYOS DE CIZALLAMIENTO DEL ENCOLADO LATERAL

TRATAMIENTO	ESPECIE	ADHESIVO	PT	Nº PROBETAS/PT
1	<i>Cariniana domestica</i>	PVA	AS/AH	10
2		EPI	AS/AH	10
3	<i>Copaifera paupera</i>	PVA	AS/AH	10
4		EPI	AS/AH	10
5	<i>Cedrelinga cateniformis</i>	PVA	AS/AH	10
6		EPI	AS/AH	10
7	<i>Cariniana domestica</i> -	PVA	AS/AH	10
8	<i>Copaifera paupera</i>	EPI	AS/AH	10
9	<i>Cariniana domestica</i> -	PVA	AS/AH	10
10	<i>Cedrelinga cateniformis</i>	EPI	AS/AH	10
11	<i>Copaifera paupera</i> -	PVA	AS/AH	10
12	<i>Cedrelinga cateniformis</i>	EPI	AS/AH	10

FUENTE: El autor (2019).

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

Asimismo, por medio del coeficiente de correlación de *Pearson*, se determinó el grado de correlación entre la masa específica básica y la resistencia al cizallamiento, así como para el contenido de humedad y la resistencia al cizallamiento; con el fin de evaluar la relación entre la resistencia al cizallamiento, con pretratamiento para uso en ambiente seco, y las propiedades físicas evaluadas de los residuos de madera.

En el caso de los resultados de resistencia de los empalmes *finger joint* a la flexión estática y tracción paralela, se determinó el valor promedio y el coeficiente de variación; además, para el porcentaje de falla en la madera en tracción paralela se calculó el valor promedio. Para cada pretratamiento se empleó un ANOVA aplicado a un diseño factorial 6 x 2 (Factores: especie y adhesivo) y una prueba de *tukey* con un nivel de confianza de 95%, en los casos que existieron diferencias significativas en al menos una media (TABLA 3).

TABLA 3 - DISEÑO EXPERIMENTAL DE LOS ENSAYOS DE FLEXIÓN ESTÁTICA Y DE TRACCIÓN PARALELA DE EMPALMES *FINGER JOINT*

TRATAMIENTO	ESPECIE	ADHESIVO	PT	Nº PROBETAS/PT
1	<i>Cariniana domestica</i>	PVA	S/AT/TC	20
2		EPI	S/AT/TC	20
3	<i>Copaifera paupera</i>	PVA	S/AT/TC	20
4		EPI	S/AT/TC	20
5	<i>Cedrelinga cateniformis</i>	PVA	S/AT/TC	20
6		EPI	S/AT/TC	20
7	<i>Cariniana domestica</i> -	PVA	S/AT/TC	20
8	<i>Copaifera paupera</i>	EPI	S/AT/TC	20
9	<i>Cariniana domestica</i> -	PVA	S/AT/TC	20
10	<i>Cedrelinga cateniformis</i>	EPI	S/AT/TC	20
11	<i>Copaifera paupera</i> -	PVA	S/AT/TC	20
12	<i>Cedrelinga cateniformis</i>	EPI	S/AT/TC	20

FUENTE: El autor (2019)

NOTAS: S - seco; AT - alta temperatura; TC - triple ciclo; PT - pretratamiento

En los casos donde se usó el ANOVA, se realizó previamente un análisis de residuales con el programa estadístico R v 3.5.0. Para la normalidad se empleó la prueba de *Shapiro-Wilk*, mientras que para la homogeneidad de variancias se utilizó la prueba de Score para variancia no constante ('ncvTest'); en adelante, se referirá a la prueba de Score como prueba de homogeneidad. Los datos atípicos se estudiaron haciendo uso de las distancias de *Mahalanobis* y *Cook*, con la finalidad de evaluar el posible origen de la anomalía y así proponer un tratamiento adecuado, pudiendo ser eliminado o sustituido. En caso de incumplimiento de supuestos, se aplicó una transformación de *Box y Cox* a la variable respuesta.

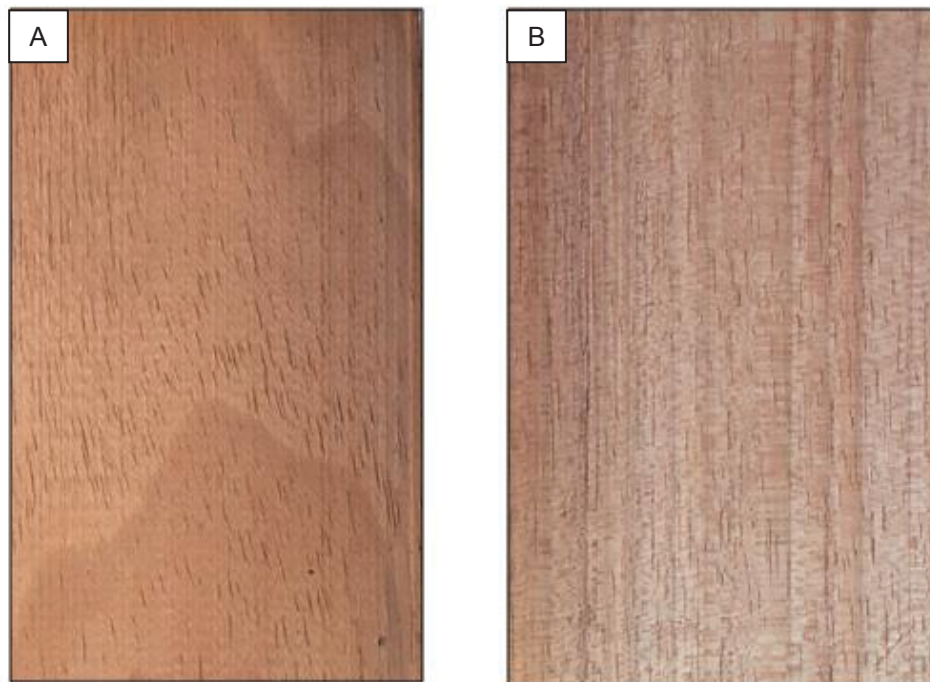
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 DESCRIPCIÓN ANATÓMICA DE LOS RESIDUOS DE MADERA

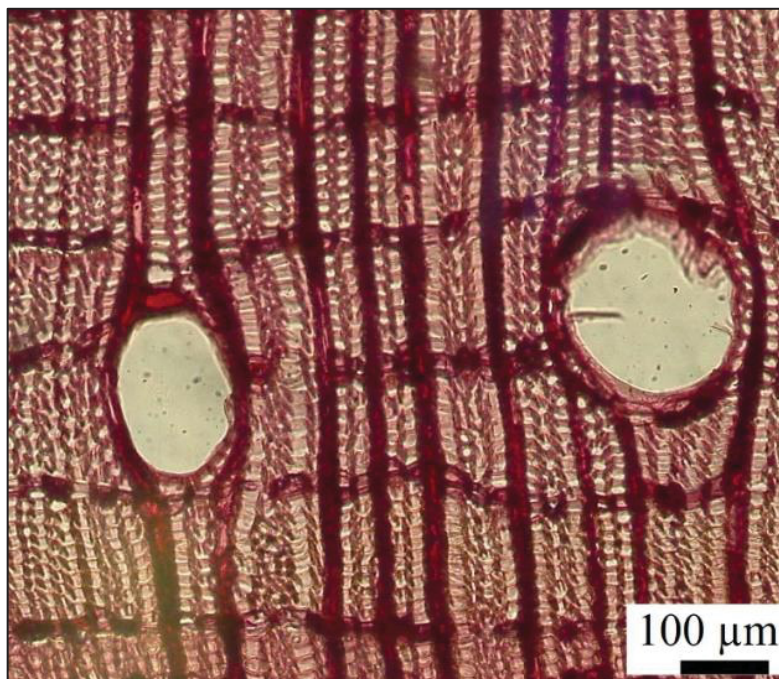
Los resultados de la determinación de las características anatómicas de las especies estudiadas se detallan a continuación:

Especie: *Cariniana domestica* (Mart) Miers (FIGURA 14 y FIGURA 15).

- Latifoliada
- No hay diferencia entre albura y duramen
- Grano recto a entrecruzado
- Textura media
- Brillo Medio
- Veteado de arcos superpuestos en corte tangencial y líneas paralelas en corte radial.
- Anillos de crecimiento no visibles
- Porosidad difusa
- Poros solitarios y múltiples radiales
- Parénquima axial en bandas del tipo reticulado
- Radios no estratificados
- Presencia de gomas
- Frecuencia de poros: (poros/mm²): Promedio 4; mínimo: 1; máximo 6.
- Diámetro tangencial de poros (µm): Promedio: 150; mínimo: 113; máximo: 184
- Área relativa de poros: 7,48%

FIGURA 14 - FOTOGRAFÍAS DE LA MADERA *Cariniana domestica*

FUENTE: El autor (2019).
NOTAS: A - vista tangencial; B – vista radial

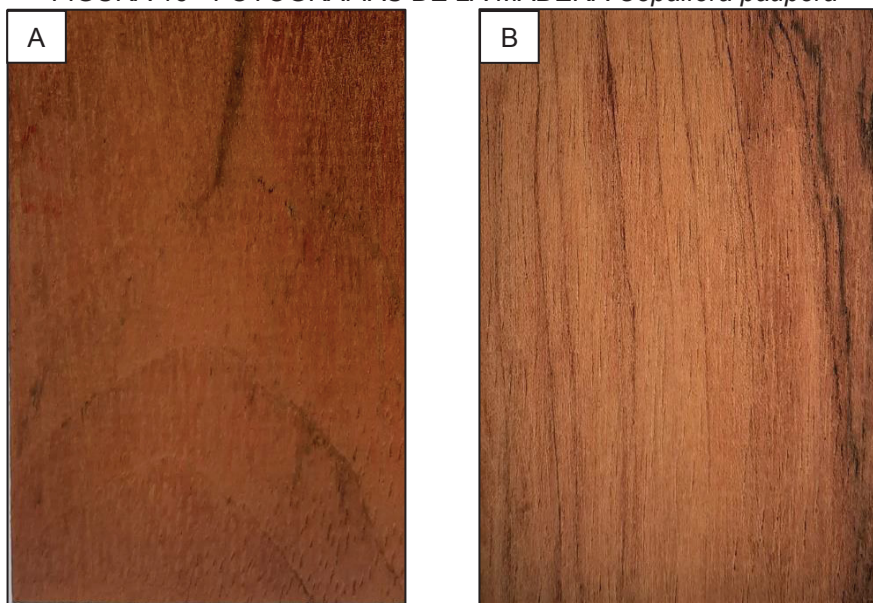
FIGURA 15 - FOTOGRAFÍA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA MADERA *Cariniana domestica*, DE 1 mm²

FUENTE: El autor (2019).

Especie: *Copaifera paupera* (Herzog) Dwyer (FIGURA 16 y FIGURA 17).

- Latifoliada
- Hay marcada diferencia entre albura y duramen
- Grano recto a entrecruzado
- Textura media
- Brillo medio
- Veteado de arcos superpuestos en corte tangencial
- Anillos de crecimiento visibles
- Porosidad difusa
- Poros solitarios y múltiples radiales
- Parenquima axial en bandas del tipo marginal y paratraqueal vasicéntrico
- Radios no estratificados
- Alta presencia de gomas
- Frecuencia de poros: (poros/mm²): Promedio 3; mínimo: 1; máximo 5.
- Diámetro tangencial de poros (µm): Promedio: 156; mínimo: 88; máximo: 214
- Área relativa de poros: 7,48%

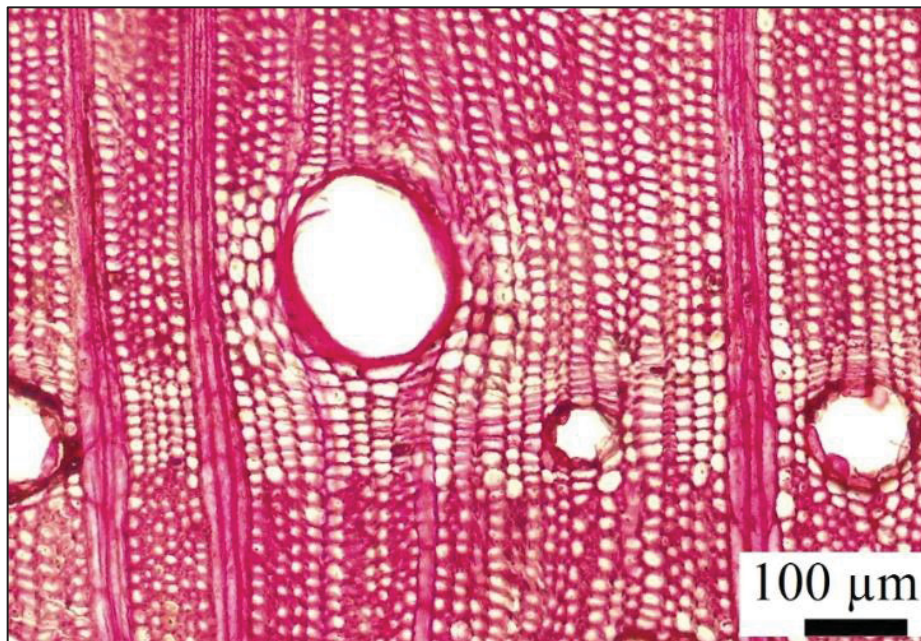
FIGURA 16 - FOTOGRAFÍAS DE LA MADERA *Copaifera paupera*



FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: A - vista tangencial; B – vista radial

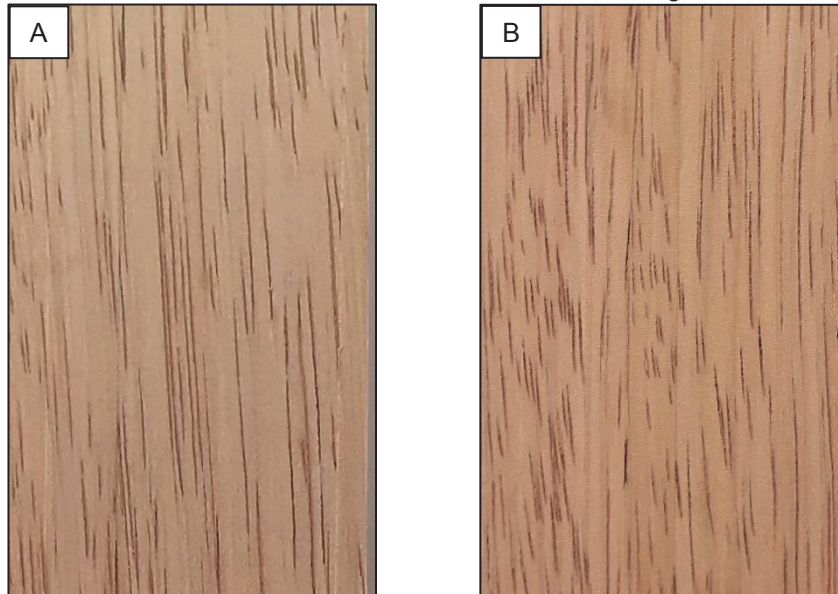
FIGURA 17 - FOTOGRAFÍA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA MADERA *Copaifera paupera*, DE 1 mm²



FUENTE: El autor (2019).

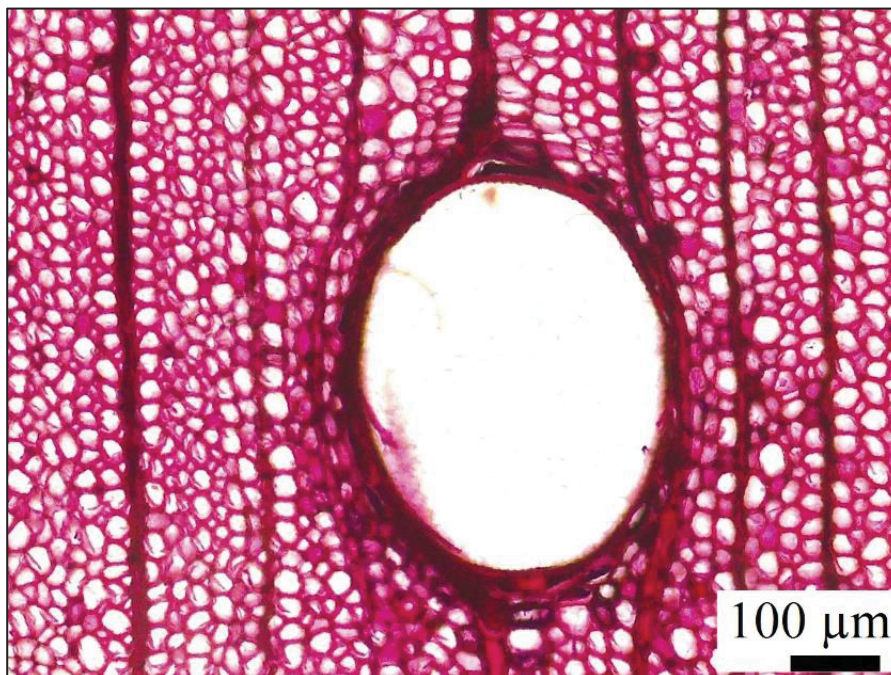
Especie: *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke (FIGURA 18 y FIGURA 19).

- Latifoliada
- No hay diferencia entre albura y duramen
- Grano recto a entrecruzado
- Textura gruesa
- Brillo Medio
- Veteado ausente
- Anillos de crecimiento no visibles
- Porosidad difusa
- Poros solitarios y escasos múltiples radiales
- Parenquima axial paratraqueal vasicéntrico
- Radios no estratificados
- Presencia de gomas
- Frecuencia de poros: (poros/mm²): Promedio 2; mínimo: 0; máximo 4.
- Diámetro tangencial de poros (μm): Promedio: 230; mínimo: 172; máximo: 311
- Área relativa de poros: 8,85%

FIGURA 18 - FOTOGRAFÍAS DE LA MADERA *Cedrelinga cateniformis*

FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: A - vista tangencial; B – vista radial

FIGURA 19 - FOTOGRAFÍA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA MADERA *Cedrelinga cateniformis*, DE 1 mm²

FUENTE: El autor (2019).

Las tres especies muestran grano recto a entrecruzado, lo cual corrobora en cierto modo lo reportado por Aróstegui (1974), Aróstegui (1982) y Acevedo y Kikata (1994), quienes señalan como grano recto a entrecruzado a la *Cariniana domestica* y *Cedrelinga cateniformis*, y como grano recto a la *Copaifera paupera*; además, según Marra (1992) y Albuquerque y Latorraca (2000), dicha característica influye directamente en las propiedades físicas y mecánicas de la madera, en el movimiento de la humedad y del adhesivo, así como en las tensiones de la línea de cola del producto encolado.

Las tres especies presentan porosidad difusa, poros solitarios y múltiples radiales, siendo escasos múltiples radiales en la *Cedrelinga cateniformis*; las tres maderas contienen gomas, siendo la *Copaifera paupera* la que presenta en mayor cantidad, resultado que coincide con lo indicado por Aróstegui (1982), Acevedo y Kikata (1994) y Gonzales (2011).

La frecuencia promedio de poros observada en las tres maderas es clasificada como Muy pocos (≤ 5); para los resultados del diámetro tangencial promedio de poros se tiene que la *Cariniana domestica* y la *Copaifera paupera* son clasificadas como Medianos (101 a $< 200 \mu\text{m}$), mientras que la *Cedrelinga cateniformis* como Grandes ($\geq 200 \mu\text{m}$) (IAWA, 1989). La especie con mayor frecuencia de poros y menor diámetro tangencial de poros es la *Cariniana domestica* (4/mm² y 150 μm), seguida por *Copaifera paupera* (3/mm² y 156 μm), mientras que la *Cedrelinga cateniformis* muestra la menor frecuencia y mayor diámetro tangencial de poros (2/mm² y 230 μm). Además, el área relativa promedio de poros presente en la sección transversal de la *Cedrelinga cateniformis* es mayor (8,85%) que la *Cariniana domestica* y *Copaifera paupera* (7,48%).

Los valores promedio de frecuencia de poros (4/mm²) y diámetro tangencial de poros (150 μm) en la *Cariniana domestica* se encuentran dentro de los rangos presentados por Acevedo y Kikata (1994), que son de 2 a 8/mm² y de 105 a 236 μm respectivamente.

Para la *Copaifera paupera*, los valores promedio de frecuencia de poros (3/mm²) y diámetro tangencial de poros (156 μm) se ubican dentro de los rangos de 3 a 8/mm² y de 144 a 172 μm , mencionados por Acevedo y Kikata (1994).

El valor promedio de frecuencia de poros ($2/\text{mm}^2$) para la *Cedrelinga cateniformis* se encuentra dentro del rango indicado por y Acevedo y Kikata (1994), que es de 1 a $5/\text{mm}^2$; sin embargo, difieren en el diámetro tangencial de poros ($230\ \mu\text{m}$), que señalan un rango de 293 a $333\ \mu\text{m}$. Esta diferencia se puede deber a lo mencionado por Fahn (1982), quien afirma que la estructura anatómica de las maderas de latifoliadas es muy diversificada y depende, entre otros aspectos, de la edad del árbol, especie, así como de las condiciones ambientales en las que se desarrolla.

Burger y Richter (1991), Pizzi y Mittal (2003) y Albino, Mori y Mendes (2012) mencionan que, durante el encolado, cuanto mayor diámetro tangencial de poros y menos inclusiones posea una madera, mayor será la capacidad de penetración de los solventes y del adhesivo, permitiendo que ambas interaccionen, formando una línea de cola con 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 tres residuos de madera, así como sus coeficientes de variación se muestran en la TABLA 4.

TABLA 4 - VALORES PROMEDIO DE CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS RESIDUOS DE MADERA

ESPECIE	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
<i>Cariniana domestica</i>	11,65 (5,33)
<i>Cedrelinga cateniformis</i>	11,62 (2,27)
<i>Copaifera paupera</i>	11,66 (5,28)

FUENTE: El autor (2019).

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

El resultado del ANOVA ($F=0,031$ y $p\text{-valor}=0,969$) indica que no existen diferencias significativas en el contenido de humedad entre los tres residuos de madera, que fluctuaron de 11,62 a 11,66%, ubicándose dentro de los rangos indicados en las fichas técnicas de los adhesivos producidos por la empresa AKZO NOBEL PERU S.A.C., que son de 8 a 14% para el PVA 3010 (AKZO NOBEL PERU S.A.C., 2013) y de 8 a 15% para el EPI 1911 (AKZO

NOBEL PERU S.A.C., 2010). Estos valores coinciden con lo señalado por Goulding (1983), quien recomienda para adhesivos PVA un contenido de humedad de 8 a 15%; mientras que Frazier (2003), señala para el EPI de 10 a 15%.

Los coeficientes de variación obtenidos fueron bajos, por lo que su homogeneidad fue alta. Se debe considerar que los residuos han sido maquinados para eliminar los defectos, con lo cual se homogenizó el material.

Además, se debe tener en cuenta que la madera ha sido secada previamente en hornos industriales, para luego estabilizarse al aire y ser utilizada después de un tiempo mayor de un año. Esto implica que los residuos de madera han sufrido sucesivos ciclos de sorción y desorción que, de acuerdo a Guindeo y García (1991), producen una fatiga higroscópica y dimensional que hace que la madera se estabilice higroscópicamente. En este mismo sentido, García et al. (2006) han estudiado la evolución del bucle de histéresis con el tiempo, llegando a la conclusión de que el ciclo de histéresis se cierra con el paso del tiempo, provocando que los cambios dimensionales sean menores, frente a los cambios de humedad. Estos aspectos podrían ocasionar que las diferencias entre los valores de humedad sean menores en las maderas estudiadas, ya que se habrían estabilizado por el tiempo transcurrido hasta su utilización.

Por otro lado, Vick (1999) indica que los adhesivos acuosos utilizados para el encolado de madera trabajan en forma apropiada en un rango de humedad de 6 a 14%, e inclusive podrían estar por debajo o por encima de dichos valores, siempre y cuando el adhesivo esté preparado para un uso específico.

Se debe tener en cuenta la importancia del contenido de humedad de la madera en el encolado, ya que, según Selbo (1975), Nock y Richter (1978), Raknes (1982), Silva, Tomaselli e Iwakiri (1998) y Lopez (2008), el encolar maderas con un contenido de humedad mayor al 20%, produciría una línea de cola deficiente; mientras que, si se encolan maderas muy secas, el adhesivo tenderá a curar más rápido, ya que puede penetrar más profundamente, corriendo el riesgo de formar una línea de cola débil.

4.2.2 Masa específica

En la TABLA 5 se muestran los valores promedio de masa específica básica, masa específica aparente y coeficientes de variación de los tres residuos de maderas.

TABLA 5 - VALORES PROMEDIO DE MASA ESPECÍFICA DE LOS RESIDUOS DE MADERA
ESPECIE

ESPECIE	MASA ESPECÍFICA (g/cm ³)	
	BÁSICA	APARENTE
<i>Cariniana domestica</i>	0,60 a (3,28)	0,76 a (3,67)
<i>Cedrelinga cateniformis</i>	0,48 b (3,59)	0,59 b (3,92)
<i>Copaifera paupera</i>	0,58 a (6,91)	0,72 a (7,89)

FUENTE: El autor (2019).

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

La prueba de *Tukey* muestra que, tanto la masa específica básica como la masa específica aparente de la *Cariniana domestica* y *Copaifera paupera* no presentan diferencias significativas entre sí, mientras que ambas son significativamente mayores a la *Cedrelinga cateniformis*.

Además, los coeficientes de variación obtenidos en los resultados de las tres maderas fueron de 3,28 a 6,91% para la masa específica básica y de 3,67 a 7,89% para la masa específica aparente, valores que se pueden considerar como adecuados, ya que Glass y Zelinka (2010) señalan un coeficiente de variación aceptable para la masa específica de hasta 10%, mientras que Lisboa et al. (1993), indican un coeficiente de variación de 9% para especies amazónicas.

Los bajos coeficientes de variación encontrados en la presente investigación pueden deberse a que la madera aserrada utilizada, generalmente es adquirida teniendo en cuenta los requerimientos de calidad que solicita el cliente para este producto. Además, durante la preparación de los listones a partir de los residuos colectados, se eliminaron los defectos que presentaban, mayormente en la zona de albura, lo cual contribuyó a la homogeneidad de las muestras de madera evaluadas.

Por otro lado, la *Cariniana domestica* y *Copaifera paupera* presentaron mayores valores promedio de masa específica básica y aparente que *Cedrelinga cateniformis*; sin embargo, las tres especies son clasificadas como

de masa específica básica media, cuyo rango varía de 0,41 a 0,60 g/cm³ (JUNAC, 1979). Asimismo, para la masa específica aparente, de acuerdo a lo señalado en la norma UNE 56-540 (IRANOR, 1978), la *Cedrelinga cateniformis* es clasificada como semipesada (0,50 a 0,70 g/cm³), mientras que la *Cariniana domestica* y *Copaifera paupera* como pesadas (0,71 a 0,95 g/cm³).

Los valores promedio de masa específica básica encontrados para la *Cariniana domestica* y *Cedrelinga cateniformis* fueron ligeramente superiores a los obtenidos por Aróstegui (1982) y Acevedo y Kikata (1994), de 0,59 y 0,45 g/cm³ respectivamente; mientras que la *Copaifera paupera* fue inferior al reportado por los mismos autores, con 0,61 g/cm³.

Además, los valores promedio de masa específica aparente de la *Cariniana domestica* y *Copaifera paupera* son menores a los encontrados por Aróstegui (1982), que fueron de 0,79 y 0,73 g/cm³ respectivamente; mientras que, para la *Cedrelinga cateniformis*, fue mayor al indicado por los mismos autores, con 0,55 g/cm³.

Las diferencias encontradas en los valores de masa específica básica y aparente presentados por Aróstegui (1982) y Acevedo y Kikata (1994), al compararlas con los residuos de las tres maderas estudiadas, pueden deberse a que fueron extraídas de bosques tropicales no manejados silviculturalmente, en los cuales la fisiografía, edad del árbol, calidad de sitio, entre otros factores, afectan sus propiedades físicas y mecánicas.

Al evaluar la relación entre la porosidad y masa específica, se aprecia que la *Cariniana domestica* y *Copaifera paupera* presentan mayor masa específica pero menor diámetro tangencial y área relativa de poros, mientras que la *Cedrelinga cateniformis* muestra menor masa específica y mayor diámetro tangencial y área relativa de poros, lo cual confirma lo indicado por Tsoumis (1991), Vick (1999), García et al. (2003), Oliveira y Silva (2003), Iwakiri (2005) y Gardner (2006), quienes señalan que la porosidad y los espacios vacíos tienen una relación inversa con la masa específica de la madera y, dependiendo de su constitución, permite una mayor o menor facilidad para la penetración del adhesivo en su estructura.

4.2.3 Variación dimensional

En la TABLA 6 se presentan los valores promedio de contracciones máximas tangencial (βT), radial (βR), longitudinal (βL) y volumétrica (βV), así como el coeficiente de anisotropía (A) de los tres residuos de madera.

TABLA 6 - VALORES PROMEDIO DE CONTRACCIÓN MÁXIMA Y COEFICIENTE DE ANISOTROPIA DE LOS RESIDUOS DE MADERA

ESPECIE	βT (%)	βR (%)	βL (%)	βV (%)	A
<i>Cariniana domestica</i>	6,98 a (11,25)	5,22 a (15,71)	0,30 a (17,66)	11,33 a (10,40)	1,40 b (14,26)
<i>Cedrelinga cateniformis</i>	7,11 a (8,97)	3,85 b (15,66)	0,14 b (23,09)	10,69 ab (4,95)	1,90 a (20,03)
<i>Copaifera paupera</i>	6,05 b (10,66)	3,51 b (16,89)	0,15 b (20,04)	9,91 b (13,79)	1,69 a (10,42)

FUENTE: El autor (2019).

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

Los resultados obtenidos corroboran lo manifestado por Panshin y Zeeuw (1980), Tsoumis (1991) y Marra (1992), quienes afirman que las variaciones dimensionales son mayores en el sentido tangencial y seguido de la radial, que normalmente tiene un valor cercano a la mitad de la contracción tangencial. Asimismo, Galvao y Jankowski (1985) mencionan que la diferencia en la contracción tangencial y radial puede deberse a la influencia de los radios, un mayor número de punteaduras en la sección radial y por la alternancia de madera temprana y tardía.

Los porcentajes promedio de contracción tangencial de las especies evaluadas variaron de 6,05 a 7,11%, y de 3,51 a 5,22% para la contracción radial; valores que se encuentran dentro de los rangos indicados por Skaar (1972), de 6,0 a 12,0% para la contracción tangencial y de 3,0 a 6,0% para la contracción radial. Además, para la contracción tangencial se encontró que no existen diferencias significativas entre la *Cariniana domestica* y *Cedrelinga cateniformis*, pero sí de las dos especies con respecto a la *Copaifera paupera*, que presenta la contracción tangencial más baja; mientras que, para la contracción radial, se observó que no existen diferencias significativas entre la *Cedrelinga cateniformis* y *Copaifera paupera*, pero sí de las dos especies con

respecto a la *Cariniana domestica*, quien muestra la contracción radial más alta.

En lo referente a la contracción longitudinal, los valores obtenidos en las tres maderas variaron de 0,14 a 0,30%, y se encuentran dentro del rango de 0,10 a 0,30% señalado por Pfeil y Pfeil (2003) para esta propiedad. Asimismo, se determinó que no existen diferencias significativas entre la *Cedrelinga cateniformis* y *Copaifera paupera*, pero sí de las dos especies con respecto a la *Cariniana domestica*, quien presenta la mayor contracción longitudinal.

En relación a la contracción volumétrica, el rango de valores promedio fluctuó de 9,91 a 11,33%, que se ubican ligeramente por debajo y dentro del rango de 10,2 a 19,2% indicado por Tsoumis (1991) para maderas latifoliadas. Asimismo, se observó que no existen diferencias significativas entre la *Cedrelinga cateniformis* y *Copaifera paupera*, ni entre *Cariniana domestica* y *Cedrelinga cateniformis*, pero sí entre *Cariniana domestica* y *Copaifera paupera*, las cuales muestran las contracciones más altas y bajas respectivamente.

Los coeficientes de variación encontrados en las tres maderas para las contracciones tangencial, radial y volumétrica se pueden considerar como adecuados, ya que Glass y Zelinka (2010), señalan un coeficiente de variación aceptable de 15%, mientras que Lisboa et al. (1993) indican coeficientes de 14, 15 y 16% para las contracciones tangencial, radial y volumétrica.

Para las especies *Cariniana domestica* y *Cedrelinga cateniformis*, los valores promedio de 6,98 y 7,11% de contracción tangencial, 5,22 y 3,85% de contracción radial, así como de 11,33 y 10,69% de contracción volumétrica encontrados en esta investigación, fueron aproximados a los reportados por Aróstegui (1982), que fueron de 7,58 y 6,90%, 4,96 y 3,17%, así como de 12,10 y 10,65% respectivamente.

Para la *Copaifera paupera*, los valores promedio de 6,05% de contracción tangencial y 9,91% de contracción volumétrica obtenidos son menores a los presentados por Aróstegui (1982), que fueron de 7,04 y 10,70% respectivamente. Sin embargo, el valor promedio de 3,51% de contracción

radial encontrado es aproximado al reportado por Aróstegui (1982), que fue de 3,43%.

Las diferencias observadas en las variaciones dimensionales de las tres especies estudiadas pueden deberse a lo señalado por Panshin y Zeeuw (1980), Tsoumis (1991), Marra (1992) y Klock (2000), quienes afirman que pueden ser ocasionadas por las diferencias que se presentan en la masa específica, estructura anatómica, composición química, entre otros factores.

Los coeficientes de anisotropía obtenidos para las especies evaluadas fueron de 1,40 para *Cariniana domestica*, 1,90 para *Cedrelinga cateniformis* y 1,69 para *Copaifera paupera*, los cuales son menores a los reportados por Aróstegui (1982), que fueron de 1,53, 2,17 y 2,05 respectivamente. Además, se encontró que no existen diferencias significativas entre la *Cedrelinga cateniformis* y *Copaifera paupera*, pero sí de las dos especies con respecto a la *Cariniana domestica*, que tiene el coeficiente de anisotropía más bajo.

Asimismo, de acuerdo a lo mencionado por Nock, Richter y Burger (1975) y Durlo y Marchiori (1992), que clasifican la calidad de la madera en base a su coeficiente de anisotropía, se puede catalogar a la *Cariniana domestica* como de excelente calidad (1,2 a 1,5), y la *Cedrelinga cateniformis* y *Copaifera paupera* como de calidad normal (1,5 a 2,0). Sin embargo, se debe considerar lo mencionado por Rocha (2000), quien afirma que, no obstante que una madera presente un coeficiente de anisotropía bajo, puede ser inestable si su contracción tangencial y radial es alta.

Los resultados obtenidos, debido a que provienen de residuos de la segunda transformación y que han sido previamente secadas al horno, pueden haber sido afectados por el fenómeno de histéresis explicado anteriormente.

4.3 PROPIEDADES QUÍMICAS DE LOS RESIDUOS DE MADERA

En la TABLA 7 se indican los valores promedio de extractivos totales, pH y contenido de cenizas obtenidos de los tres residuos de madera.

TABLA 7 - VALORES PROMEDIO DE EXTRACTIVOS TOTALES, pH Y CONTENIDO DE CENIZAS DE LOS RESIDUOS DE MADERA

ESPECIE	EXTRACTIVOS TOTALES (%)	pH	CENIZAS (%)
<i>Cariniana domestica</i>	4,07 b (17,51)	5,19 b (0,68)	0,72 b (17,30)
<i>Cedrelinga cateniformis</i>	4,30 b (4,27)	5,14 b (1,01)	0,11 c (35,41)
<i>Copaifera paupera</i>	7,01 a (7,43)	5,98 a (1,97)	1,11 a (1,53)

FUENTE: El autor (2019).

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

Los resultados de la prueba de *Tukey* del contenido de extractivos totales promedio encontrados en la *Cariniana domestica* y *Cedrelinga cateniformis* no difieren estadísticamente entre sí, pero son significativamente menores con respecto a la *Copaifera paupera*. Asimismo, el mayor valor promedio de extractivos totales obtenido fue en la *Copaifera paupera*, con 7,01%, mientras que en la *Cedrelinga cateniformis* y *Cariniana domestica* fueron de 4,30 y 4,07% respectivamente.

El mayor valor promedio de extractivos totales obtenido en la *Copaifera paupera* (7,01%) se puede deber a la mayor cantidad de gomas que contienen las células de parénquima, los cuales, según lo indicado por González (2013), son ricos en componentes alifáticos y compuestos fenólicos que se acumulan preferentemente en el duramen. Asimismo, Klock et al. (2005) indican que dichas cantidades pueden variar por las condiciones de crecimiento y edad del árbol, así como de la estructura anatómica de la madera.

Los extractivos totales hallados en las tres especies evaluadas muestran valores promedio que se encuentran por debajo del 10% que reportan Jankowsky (1988), Sjöström (1993) y Gonzales (2013), para maderas tropicales, por lo que los porcentajes obtenidos no deberían producir problemas en la interacción del adhesivo y la madera. No obstante, Pizzi (1994), García et al. (2003) y Lima et al. (2008) mencionan que es importante considerar el tipo, cantidad y propiedades de los extractivos, ya que su presencia puede alterar las reacciones de polimerización del adhesivo, afectando la calidad del encolado.

En relación al pH de los residuos de madera, los valores promedio hallados en las tres especies fluctúan de 5,14 a 5,98, no encontrándose

diferencias significativas entre *Cariniana domestica* y *Cedrelinga cateniformis*, pero sí existen diferencias significativas al compararlas con la *Copaifera paupera*, que es más alto, debido probablemente al mayor contenido de extractivos totales que presenta.

Los resultados obtenidos se encuentran dentro del rango de 3 a 6 indicado por Iwakiri (2005); además, García et al. (2003), Iwakiri (2005), Albuquerque y Latorraca (2005) y Carneiro, Vital y Pereira (2007) señalan que el pH de la madera puede inhibir las reacciones químicas del fraguado del adhesivo, impidiendo su fluidez, humectación y penetración, disminuyendo la resistencia y adhesión en la línea de cola.

Se debe considerar que, en vista que los residuos de madera estudiados han sido sometidos previamente a un proceso de secado en horno, parte de los extractivos presentes inicialmente pueden haberse volatilizado por acción del calor al cual fueron sometidos, afectando los valores de extractivos y pH obtenidos en la presente investigación.

Los valores promedio de contenido de cenizas hallados en los residuos de las tres especies varían de 0,11 a 1,11%, encontrándose diferencias significativas entre las tres maderas, siendo la *Copaifera paupera* quien presenta el mayor porcentaje, debido probablemente al mayor contenido de extractivos totales y gomas que contiene.

Los resultados se encuentran dentro del rango de 0,1 a 5,4% de contenido de cenizas para latifoliadas mencionado por Tsoumis (1991), ubicándose además dentro del límite indicado por Gonzales (2013), quien señala para maderas de latifoliadas un valor menor de 5%; sin embargo, solo la *Cedrelinga cateniformis* se incluye dentro del valor mínimo de 0,5% de contenido de cenizas indicado por Iwakiri (2005), mientras que la *Cariniana domestica* (0,72%) y *Copaifera paupera* (1,11%) muestran resultados mayores al valor indicado.

Marra (1992) e Iwakiri (2005) señalan que la presencia de cenizas en la madera no afecta directamente la unión adhesiva, pero puede alterar el pH o las características del procesamiento de la madera, debido a la presencia de minerales como el sílice, que ocasionan un desgaste excesivo de los elementos de corte de las máquinas.

De acuerdo a lo mencionado por Pimentel (2000), se tiene que los coeficientes de variación de los resultados del pH de las tres maderas, los extractivos totales de la *Cedrelinga cateniformis* y *Copaifera paupera*, así como el contenido de cenizas de la *Copaifera paupera* son considerados como bajos (<10%); Además, los coeficientes de variación de los extractivos totales y contenido de cenizas de la *Cariniana domestica* son categorizados como medios (10 a 20%) y el coeficiente de variación del contenido de cenizas de la *Cedrelinga cateniformis* es catalogado como muy alto (> 30%).

Prata (2010), en un estudio realizado con seis especies forestales del género *Pinus* para la manufactura de paneles EGP, encontró que los porcentajes promedio de extractivos totales fluctuaron de 3,48%, para el *Pinus taeda* (masa específica básica 0,46 g/cm³), a 9,60% para el *Pinus chiapensis* (masa específica básica 0,40 g/cm³); valores promedio de pH a las 2 horas de 4,0 para el *Pinus caribaea hondurensis* (masa específica básica de 0,43 g/cm³), a 4,6 para el *Pinus taeda*. Además, reportó valores promedio de contenido de cenizas desde 0,15% para el *Pinus chiapensis*, hasta 0,23% para el *Pinus taeda*.

Almeida (2013) llevó a cabo un estudio con residuos de pisos de madera de seis especies tropicales para la producción de paneles EGP, obteniendo valores promedio de extractivos totales que varían de 3,40% para la *Couratari spp* (masa específica básica de 0,67 g/cm³) a 13,02% para la *Tabebuia spp.* (masa específica básica de 0,94 g/cm³); además, encontró valores promedio de pH de 4,53 para la *Hymenaea spp.* (masa específica básica de 0,75 g/cm³) a 5,90 para la *Patagonula spp.* (masa específica básica de 0,63 g/cm³).

Bila (2014), en una investigación efectuada sobre la posibilidad del uso de juntas encoladas con seis especies tropicales para la producción de paneles EGP, encontró valores promedio de extractivos totales desde 3,19% para la *Byrsonima crispera* (masa específica aparente de 0,89 g/cm³), hasta 11,67% para *Protium puncticulatum* (masa específica aparente de 0,91 g/cm³); valores promedio de pH a las 2 horas de 3,48 para la *Byrsonima crispera* a 5,24 para la *Inga paraensis* (masa específica aparente de 0,81 g/cm³). Finalmente, reportó valores promedio de contenido de cenizas desde 0,19% para la *Manilkara*

amazónica (masa específica aparente de 1,13 g/cm³), hasta 0,70% para la *Byrsonima crispera*.

Lau (2017), realizó una investigación con las especies *Pinus taeda* y *Populus deltoides* para la producción de paneles EGP, encontrando valores promedio de extractivos totales, pH a las 2 horas y contenido de cenizas de 4,85, 4,73 y 0,25% para el *Pinus taeda*, con masa específica básica de 0,37 g/cm³, y de 3,67, 6,74 y 0,98% para el *Populus deltoides*, con masa específica básica de 0,33 g/cm³.

4.4 PROPIEDADES DE LOS ADHESIVOS

En la TABLA 8 se muestran los valores promedio de viscosidad, contenido de sólidos y pH de los adhesivos PVA y EPI utilizados en el presente estudio.

TABLA 8 - VALORES PROMEDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS ADHESIVOS UTILIZADOS

PROPIEDAD	TIPO DE ADHESIVO	
	PVA	EPI
Viscosidad (cP)	2 765 (1,02)	12 102 (0,50)
Contenido de sólidos (%)	49,89 (11,74)	46,12 (0,78)
pH	3,70 (4,48)	6,64 (2,53)

FUENTE: El autor (2019).

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

Los valores de viscosidad obtenidos, que fueron 2 765 cP para el PVA y 12 102 cP para el EPI, se encuentran dentro de los rangos indicados en las fichas técnicas de los adhesivos elaborados por la empresa AKZONOBEL PERÚ S.A.C. (AKZO NOBEL PERU S.A.C., 2010; AKZO NOBEL PERU S.A.C., 2013), que son de 2 000 a 3 000 cP para el adhesivo PVA y de 8 000 a 15 000 cP para el EPI.

Los resultados reportados muestran una mayor viscosidad del adhesivo EPI que el PVA, lo cual se puede deber, de acuerdo a lo señalado por River y Okkonen (1991) y Marra (1992), a que ambos productos tienen diferentes composiciones químicas.

Bila (2014) señala que la menor viscosidad que presenta el adhesivo PVA permitiría una mejor penetración en la superficie de la madera; Asimismo,

Iwakiri (2005) y Almeida (2009) indican que esta propiedad tiene una gran influencia en el encolado, porque define la movilidad del adhesivo durante su aplicación y fraguado.

Almeida (2013), Bila (2014), Fonte (2016), Gonçalves et al. (2016) y Lau (2017), en estudios realizados sobre el uso de especies forestales para la producción de paneles EGP, obtuvieron valores promedio de viscosidad de 5 700, 3 879, 4 083, 2 719 y 2 818 cP para el adhesivo PVA, y de 10 080, 6 310, 12 147, 11 500 y de 10 693 cP para el EPI, respectivamente.

En lo referente a contenido de sólidos, los valores promedio encontrados fueron de 49,89% para el adhesivo PVA y de 46,12% para el EPI, pero no se encontró información de la empresa fabricante sobre esta propiedad; sin embargo, Almeida (2013), Bila (2014), Fonte (2016), Gonçalves et al. (2016) y Lau (2017) reportaron valores promedio de 54,42, 48,52, 55,15, 48,73 y 50,20% para el adhesivo PVA, y de 57,82, 45,30, 49,31, 46,81 y de 49,60% para el EPI, respectivamente.

Los resultados del presente estudio muestran que el adhesivo PVA tiene un contenido de sólidos mayor que el EPI, lo cual concuerda con los resultados reportados por Bila (2014), Fonte (2016), Gonçalves et al. (2016) y Lau (2017). Al respecto, Bila (2014) señala que el mayor valor de esta propiedad es un indicativo de la existencia de mayor cantidad de componentes que forman enlaces con la madera, beneficiando el encolado.

Los valores promedio de pH reportados en la presente investigación fueron 3,70 para el adhesivo PVA y de 6,64 para el EPI, encontrándose ligeramente por encima y por debajo de los rangos indicados en las fichas técnicas de los adhesivos utilizados (AKZO NOBEL PERU S.A.C., 2010; AKZO NOBEL PERU S.A.C., 2013), que son de 1,8 a 3,4 para el adhesivo PVA y de 7,0 a 8,5 para el EPI. Esta diferencia puede deberse a que los datos suministrados por la empresa son valores tomados al momento de la fabricación del producto, lo cual puede variar posteriormente por las condiciones de transporte, almacenamiento, así como por la forma y condiciones de uso.

Asimismo, los valores promedio de las propiedades de los adhesivos utilizados, exceptuando el contenido de sólidos del PVA, mostraron bajos coeficientes de variación (PIMENTEL, 2000).

Iwakiri (2005) menciona que los adhesivos no deben sobrepasar los límites de pH de 2,5 a 11, porque ocasionarían la degradación de las fibras de madera. Asimismo, Marra (1992) afirma que esta propiedad determina la velocidad y el grado de reacción de las moléculas, así como su vida útil.

Almeida (2013), Bila (2014), Fonte (2016), Gonçalves et al. (2016) y Lau (2017) obtuvieron valores promedio de pH de 4,00, 3,72, 3,93, 2,53 y 2,80 para el adhesivo PVA, y de 6,50, 7,58, 8,99, 7,75 y de 7,51 para el EPI, los cuales son cercanos a los encontrados en esta investigación.

4.5 RESISTENCIA DE LAS JUNTAS ENCOLADAS AL CIZALLAMIENTO

En la TABLA 9 se muestran los valores promedio y el quinto percentil inferior de resistencia al cizallamiento de juntas encoladas, elaboradas con residuos de las tres especies estudiadas, sometidos previamente a pretratamientos para usos en ambiente seco y húmedo.

Asimismo, en la FIGURA 20 se presenta el diagrama de barras de error con un intervalo de confianza (IC) al 95%, para los valores de resistencia al cizallamiento de las especies estudiadas, encoladas con adhesivos PVA y EPI.

Debe indicarse que todas las probetas encoladas con adhesivo PVA, sometidas al pretratamiento para uso en ambiente húmedo, se despegaron al ser sometidas al agua hirviendo, por lo cual solo se consideraron los resultados alcanzados con las probetas encoladas con adhesivo PVA, con pretratamiento para uso en ambiente seco.

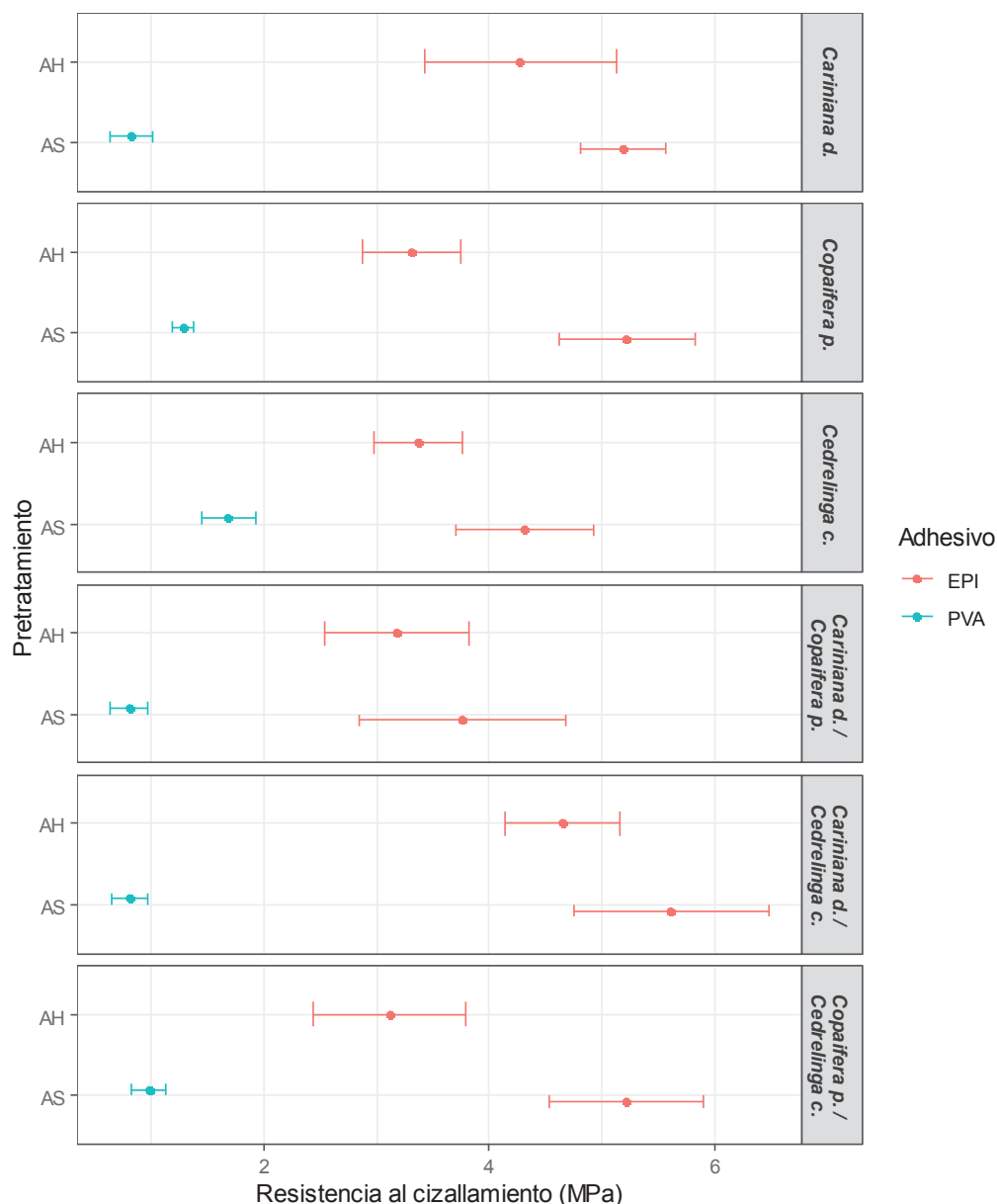
TABLA 9 - RESISTENCIA DE LAS JUNTAS ENCOLADAS AL CIZALLAMIENTO

ESPECIE	ADHESIVO	PRETRATA.	RC (MPa)	FM (%)	5° PI (MPa)
<i>Cariniana domestica</i>	PVA	AS	0,82 (36,36)	0	0,49
	EPI	AS	5,19 (11,59)	15	4,22
		AH	4,28 (32,03)	7	2,57
<i>Copaifera paupera</i>	PVA	AS	1,28 (11,44)	0	1,12
	EPI	AS	5,23 (18,71)	22	3,87
		AH	3,31 (32,73)	5	2,55
<i>Cedrelinga cateniformis</i>	PVA	AS	1,69 (23,32)	0	1,26
	EPI	AS	4,31 (22,94)	13	3,17
		AH	3,36 (17,18)	10	2,43
<i>Cariniana domestica - Copaifera paupera</i>	PVA	AS	0,80 (33,69)	0	0,42
	EPI	AS	3,76 (39,09)	7	2,06
		AH	3,18 (21,27)	4	1,77
<i>Cariniana domestica - Cedrelinga cateniformis</i>	PVA	AS	0,81 (31,38)	0	0,50
	EPI	AS	5,62 (24,96)	14	3,78
		AH	4,65 (25,11)	7	3,55
<i>Copaifera paupera - Cedrelinga cateniformis</i>	PVA	AS	0,98 (25,36)	0	0,67
	EPI	AS	5,22 (21,14)	9	3,74
		AH	3,12 (18,85)	8	1,62

FUENTE: El autor (2019).

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

FIGURA 20 - BARRAS DE ERROR (IC 95%) DE LA RESISTENCIA DE LAS JUNTAS ENCOLADAS AL CIZALLAMIENTO PARA ADHESIVOS PVA Y EPI, POR ESPECIE



FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: AS - pretratamiento para uso en ambiente seco; AH - pretratamiento para uso en ambiente húmedo.

En la TABLA 9 se observa que las juntas de las tres especies y sus combinaciones, encoladas con adhesivo PVA, ensayadas con el pretratamiento para uso en ambiente seco, no cumplen con los requisitos mínimos de resistencia al cizallamiento señalados en la norma UNE-EN 13353 (AENOR, 2011a), que es de 2,5 MPa para el 5° percentil inferior.

En relación a la influencia del adhesivo, debido a que el pretratamiento al que fueron sometidos las probetas, para determinar su uso en ambiente

seco, fue en inmersión en agua por 24 horas, se encontró que todos ensayos de cizallamiento de juntas encoladas con adhesivo EPI presentan mayor resistencia que las juntas elaboradas con PVA, lo cual confirma lo mencionado por Iwakiri (2005) y Frihart y Hunt (2010), sobre la baja resistencia del adhesivo PVA a la humedad, debido a que se fijan por el solvente (agua) que es absorbido por la madera y luego es liberado al aire; mientras que el adhesivo EPI, por la reacción de los grupos isocianatos con los grupos hidroxilo de la madera, conforman enlaces duraderos que le dan una alta resistencia a la humedad y temperatura.

Con respecto al adhesivo EPI, las juntas encoladas de *Cariniana domestica*, *Copaifera paupera*, *Cedrelinga cateniformis*, *Cariniana domestica/Cedrelinga cateniformis* y *Copaifera paupera/Cedrelinga cateniformis* cumplen con el valor mínimo de 2,5 MPa para el 5° percentil inferior indicado en la norma UNE-EN 13353 (AENOR, 2011a), por lo que pueden ser utilizadas para la producción de paneles EGP para uso no estructural seco, mientras que la *Cariniana domestica/Copaifera paupera* no cumple con los requisitos establecidos.

Además, las juntas encoladas de *Cariniana domestica*, *Copaifera paupera* y *Cariniana domestica/Cedrelinga cateniformis* cumplen con el valor de 2,5 MPa, requisito mínimo para el 5° percentil inferior señalado en la norma UNE-EN 13353 (AENOR, 2011a), y pueden emplearse en la manufactura de paneles EGP para uso no estructural húmedo, mientras que las demás especies no alcanzaron los valores mínimos de resistencia requeridos.

Los resultados de resistencia al cizallamiento presentan, en mayor proporción, coeficientes de variación por encima de lo indicado por Lisboa, Matos y Melo (1993), que es de 18% para madera sólida de especies tropicales, lo cual puede deberse a que los materiales utilizados fueron residuos de madera provenientes de fábricas de mobiliario escolar.

4.5.1 Con pretratamiento para uso en ambiente seco

Se efectuó un cambio de base a la variable respuesta, aplicando el logaritmo neperiano, obteniendo para el estadístico *W* de *Shapiro Wilk* un valor

de 0,99 (p-valor asociado de 0,807) y un chi cuadrado de 3,88 (p-valor asociado de 0,549). El ANOVA indicó que hay significancia en el efecto interacción entre las variables especie y adhesivo ($F=0,44$ y $p\text{-valor}=0,000$).

Los datos de la TABLA 10 muestran los resultados de resistencia al cizallamiento, coeficiente de variación, porcentaje de falla en 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 10 - RESISTENCIA AL CIZALLAMIENTO DE JUNTAS ENCOLADAS CON LAS ESPECIES ESTUDIADAS Y DOS ADHESIVOS, CON PRETRATAMIENTO PARA USO EN AMBIENTE SECO

ESPECIE	ADHESIVO	RC (MPa)	FM (%)	5° PI (MPa)
<i>Cariniana domestica</i>	PVA	0,82 e (36,36)	0	0,49
<i>Copaifera paupera</i>	PVA	1,28 cd (11,44)	0	1,12
<i>Cedrelinga cateniformis</i>	PVA	1,69 c (23,32)	0	1,26
<i>Cariniana domestica</i>	– PVA	0,80 e (33,69)	0	0,42
<i>Copaifera paupera</i>				
<i>Cariniana domestica</i>	– PVA	0,81 e (31,38)	0	0,50
<i>Cedrelinga cateniformis</i>				
<i>Copaifera paupera</i> – <i>Cedrelinga cateniformis</i>	PVA	0,98 de (25,36)	0	0,67
<i>Cariniana domestica</i>	EPI	5,19 ab (11,59)	15	4,22
<i>Copaifera paupera</i>	EPI	5,23 ab (18,71)	22	3,87
<i>Cedrelinga cateniformis</i>	EPI	4,31 ab (22,94)	13	3,17
<i>Cariniana domestica</i>	– EPI	3,76 b (39,09)	7	2,06
<i>Copaifera paupera</i>				
<i>Cariniana domestica</i>	– EPI	5,62 a (24,96)	14	3,78
<i>Cedrelinga cateniformis</i>				
<i>Copaifera paupera</i> – <i>Cedrelinga cateniformis</i>	EPI	5,22 ab (21,14)	9	3,74

FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: 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 de *Tukey* con un nivel de confianza de 95%. Los valores entre paréntesis son los coeficientes de variación en porcentaje.

En la TABLA 10 se aprecia que, para todas las juntas encoladas, los valores de resistencia al cizallamiento con adhesivo PVA fueron inferiores (0,80 a 1,69 MPa) a los obtenidos con el EPI (3,76 a 5,62 MPa). Además, se observa que los valores de cizallamiento de juntas encoladas con PVA varían desde 0,80 MPa (*Cariniana domestica/Copaifera paupera*) hasta 1,69 MPa (*Cedrelinga cateniformis*), mientras que para el adhesivo EPI de 3,76 MPa (*Cariniana domestica/Copaifera paupera*) a 5,62 MPa (*Cariniana domestica/Cedrelinga cateniformis*).

Los resultados de la prueba de *Tukey* indican que las juntas encoladas con adhesivo PVA de *Cedrelinga cateniformis* (1,69 MPa) y *Copaifera paupera* (1,28 MPa), no muestran diferencias significativas y presentan mayores valores de resistencia al cizallamiento, mientras que las otras juntas no presentan diferencias significativas entre sí, pero muestran menores valores de resistencia.

Además, se encontró que las juntas encoladas con PVA de *Cedrelinga cateniformis* presentan la mayor resistencia al cizallamiento (1,69 MPa), debido probablemente a que tiene un mayor diámetro tangencial (230 μm) y área relativa de poros (8,85%), lo cual corrobora lo señalado por Burger y Ritcher (1991), Pizzi y Mittal (2003) y Albino, Mori y Mendes (2012), quienes afirman que dichas características facilitan la entrada del adhesivo en las células de la madera, permitiendo una mejor adherencia entre ellas y una mayor resistencia. Además, las juntas encoladas de *Cariniana domestica/Copaifera paupera* reportaron la menor resistencia (0,80 MPa), pudiendo deberse a que ambas presentan menores valores de diámetro tangencial (150 y 156 μm) y área relativa de poros (7,48%).

Los resultados de los ensayos de cizallamiento obtenidos con adhesivo EPI, muestran que las juntas encoladas de *Cariniana domestica/Cedrelinga cateniformis* alcanzaron la mayor resistencia (5,62 MPa), mientras que las de *Cariniana domestica/Copaifera paupera* presentaron el menor valor promedio (3,76 MPa); pero, por su amplia varianza, solo son inferiores a las de *Cariniana domestica/Cedrelinga cateniformis*.

El mejor comportamiento del adhesivo EPI, con respecto a los resultados obtenidos con el PVA, podría deberse a fenómenos físicos y químicos que suceden durante la adhesión de la madera, así como por la propia composición del adhesivo (AKZONOBEL PERU S.A.C., 2010). Marra (1992) y Fiorelli (2002) señalan que el fraguado del adhesivo PVA se produce por la penetración del adhesivo en el sustrato, eliminación del agua, principalmente por su difusión en la madera, y por la unión de su estructura química por medio de las moléculas de acetato de polivinilo. En este sentido, Endo et al. (2017) indican que adhesivo PVA, luego de una inmersión prolongada, pierde su resistencia por su característica termoplástica, ya que se

torna reversible en presencia de agua, donde las fuerzas de adhesión, que unen las moléculas del adhesivo y el sustrato, son reducidas, ocasionando una línea de cola de baja resistencia. Por otro lado, Sellers (1994) indica que el fraguado del adhesivo EPI se produce mediante la reacción de grupos isocianatos del adhesivo con grupos hidroxilo de la madera, obteniéndose una adhesión química de mayor resistencia.

Prata (2010) estudió el uso de seis especies de pinos tropicales para la producción de paneles EGP, cuyos valores de masa específica básica fluctúan de 0,40 a 0,48 g/cm³, utilizando el adhesivo PVA en el encolado lateral de las juntas, alcanzando para el ensayo de cizallamiento con pretratamiento para uso en ambiente seco, valores promedio de 2,28 a 2,88 MPa, los cuales son superiores a los reportados para las especies utilizadas en la presente investigación, que fueron de 0,80 a 1,69 MPa.

Almeida (2013) evaluó el potencial de uso de residuos de seis maderas tropicales para la producción de paneles EGP, utilizando adhesivos PVA y EPI para el encolado lateral de las juntas, obteniendo valores promedio de cizallamiento, con pretratamiento para uso en ambiente seco, que fluctúan de 0,50 a 1,48 MPa para el adhesivo PVA, a excepción de la especie *Pterogine nitens* que tiene un valor promedio de 4,26 MPa, las cuales son cifras similares a las obtenidas con las especies estudiadas (0,80 a 1,69 MPa). Asimismo, para las juntas encoladas con el adhesivo EPI, a excepción de la *Tabebuia* sp. (0,37 MPa) y *Couratari* spp (3,89 MPa), obtuvo valores mayores (6,01 a 8,42 MPa) a los reportados con las especies evaluadas, que fueron de 3,76 a 5,62 MPa, lo cual podría explicarse por la mayor masa específica básica que presentan (0,63 a 0,94 g/cm³); no observándose además una notoria influencia del alto contenido de extractivos que contienen, exceptuando el *Couratari* spp., en su resistencia al cizallamiento (7,02 a 13,02%).

Los resultados de cizallamiento encontrados en el presente estudio, para todas las juntas encoladas con adhesivos PVA (0,80 a 1,69 MPa) y EPI (3,76 a 5,62 MPa), fueron inferiores a los reportados por Bila (2014), para seis especies tropicales de la Amazonía, obteniendo valores promedio de 3,14 a 7,43 MPa para el adhesivo PVA y de 7,66 a 13,76 MPa para el EPI; estas diferencias podrían justificarse por la mayor masa específica aparente (0,89 a

1,21 g/cm³) que presentan las seis maderas tropicales, con respecto a las especies estudiadas (0,59 a 0,76 g/cm³).

Almeida (2015) evaluó la resistencia al cizallamiento de juntas encoladas de *Cupressus lusitánica*, con pretratamiento para uso en ambiente seco, obteniendo valores promedio de 0,51 MPa para el adhesivo PVA y de 4,88 MPa para el EPI, resultados que son inferiores a los encontrados en la presente investigación para todas las juntas encoladas con adhesivo PVA y superiores a las de *Cedrelinga cateniformis* y *Cariniana domestica/Copaifera paupera*, encoladas con EPI.

Fonte (2016) investigó el uso de la madera *Cryptomeria japónica* para la producción de paneles EGP, reportando valores promedio de resistencia de juntas encoladas con pretratamiento para uso en ambiente seco, de 2,1 y 5,1 MPa para los adhesivos PVA y EPI respectivamente, que son mayores a los encontrados para todas las juntas encoladas con PVA, y a las juntas de *Cedrelinga cateniformis* y *Cariniana domestica/Copaifera paupera* encoladas con EPI.

Campelo et al. (2017), para los ensayos de cizallamiento en juntas encoladas de *Genipa americana*, con pretratamiento para uso en ambiente seco, reportaron valores promedio de 0,28 y 4,20 MPa para los adhesivos PVA y EPI respectivamente, cifras inferiores a las obtenidas en este estudio con ambos adhesivos, a excepción de la *Cariniana domestica/Copaifera paupera*, encolada con EPI.

Lau (2017) reportó para juntas encoladas de *Populus deltoides* con adhesivos PVA y EPI, valores promedio de cizallamiento, con pretratamiento para uso en ambiente seco, de 0,69 y 3,50 MPa respectivamente, que son inferiores a los encontrados en todas las juntas ensayadas en la presente investigación. Asimismo, estos resultados podrían deberse al hecho que el *Populus deltoides* presenta una masa específica básica baja (0,33 g/cm³) y alto coeficiente de anisotropía (2,52), lo cual, de acuerdo a lo mencionado por Gaspar et al. (2005) y Prata (2010), pueden afectar sus propiedades mecánicas, al generar elevadas tensiones en las juntas encoladas luego del fraguado del adhesivo.

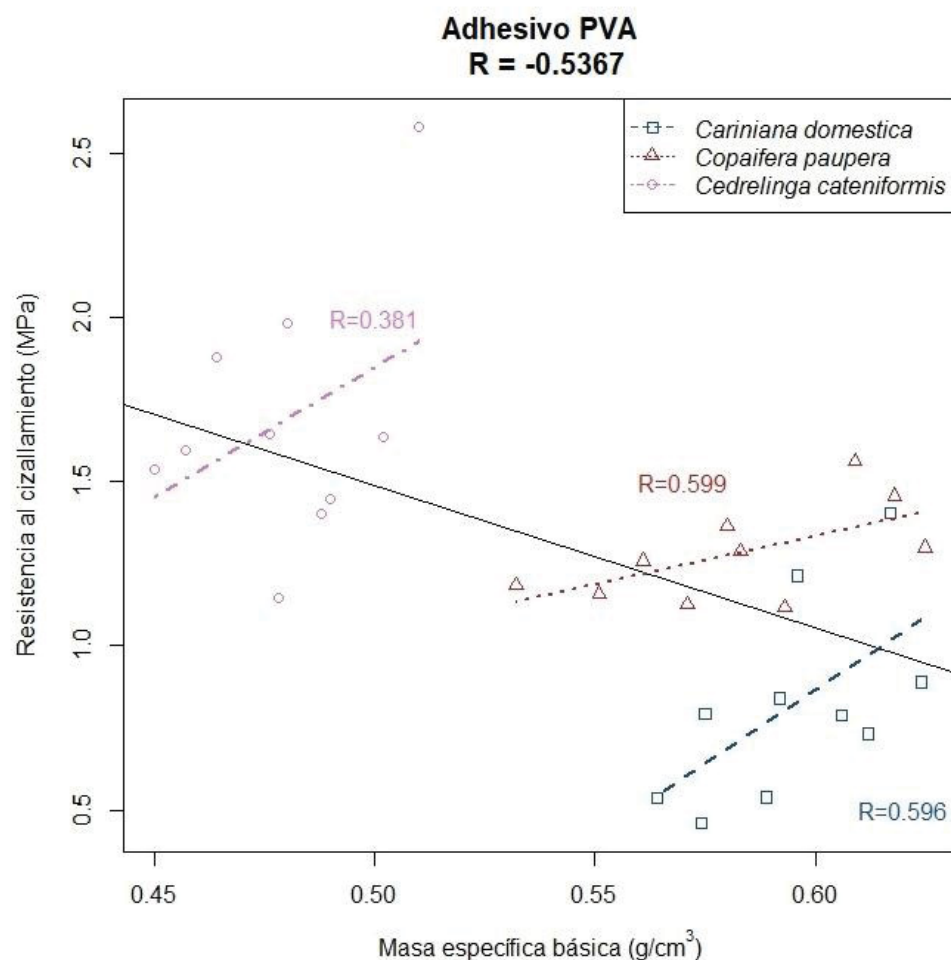
Para el porcentaje de falla en la madera, los valores obtenidos fueron de 0% para todas las juntas encoladas con adhesivo PVA, confirmándose su baja resistencia al contacto directo con el agua, y de 7 a 22% con EPI, que presenta una mejor resistencia a la humedad, pero se encuentran por debajo del valor mínimo (mayor de 40%) considerado en la norma UNE-EN 13353 (AENOR, 2011), requisito que no aplica para la *Cariniana domestica*, *Copaifera paupera* y sus combinaciones, por presentar una masa específica aparente mayor de 0,60 g/cm³.

Los porcentajes de falla de la madera encontrados con juntas encoladas con adhesivo PVA fueron similares a los reportados por Bila (2014) para seis especies tropicales, Almeida (2015) con *Cupressus lusitánica*, Fonte (2016) para *Cryptomeria japonica*, Lau (2017) con *Populus deltoides* y por Campelo et al. (2017) para *Genipa americana*, que fueron para todos los casos de 0%; mientras que, para el adhesivo EPI, fueron de 3 a 33%, 80%, 31%, 0% y 3% respectivamente.

4.5.1.1 Correlación entre masa específica básica y resistencia al cizallamiento

En la FIGURA 21 y FIGURA 22 se muestran los gráficos de dispersión, donde se observa la correlación entre la masa específica básica de probetas de las tres especies ensayadas, luego del pretratamiento en ambiente seco, y sus valores de resistencia al cizallamiento para los adhesivos PVA y EPI. Asimismo, se presenta con una raya sólida la línea de tendencia para las 30 muestras y con líneas punteadas las tendencias individuales por especie.

FIGURA 21 - CORRELACIÓN ENTRE MASA ESPECÍFICA BÁSICA Y RESISTENCIA AL CIZALLAMIENTO DE PROBETAS ENCOLADAS CON ADHESIVO PVA

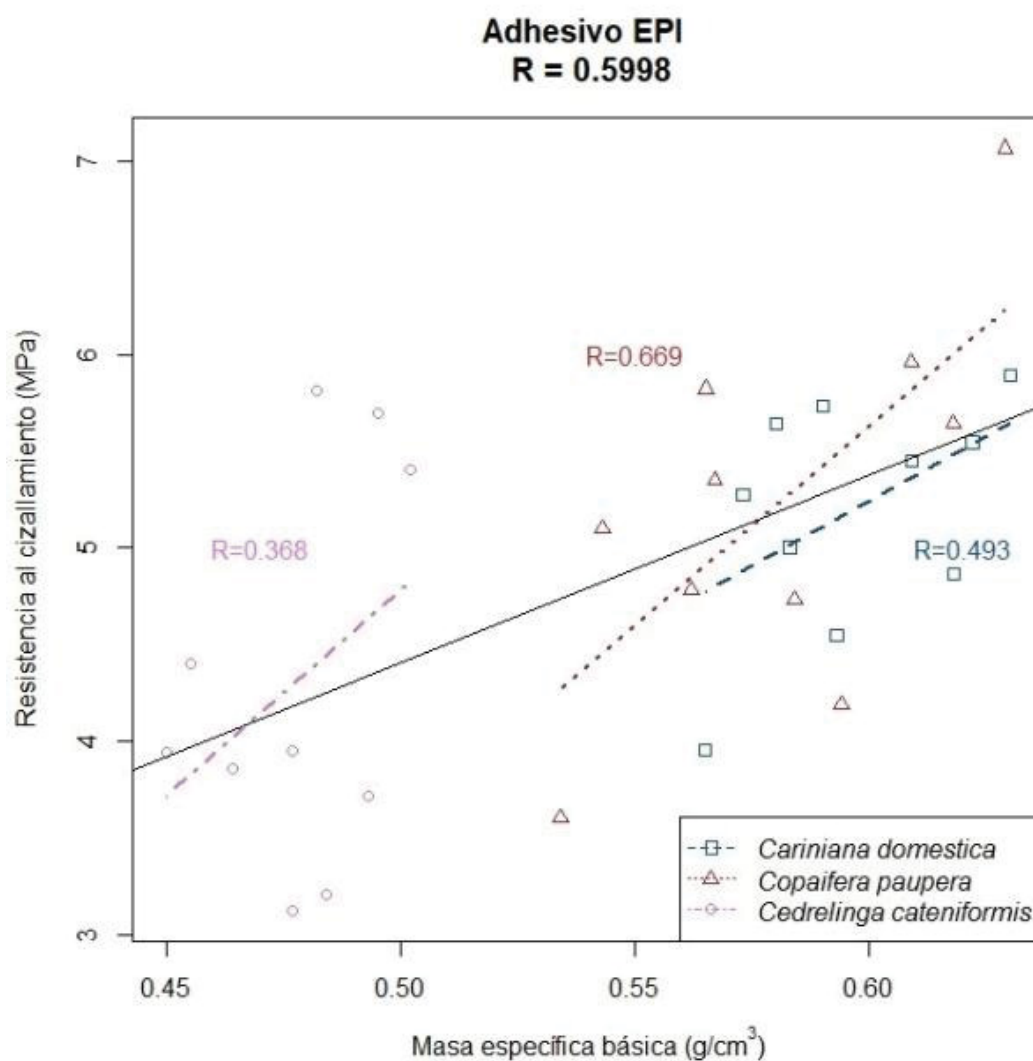


FUENTE: El autor (2019).

El coeficiente de correlación de *Pearson* de -0,537 obtenido para el adhesivo PVA es negativo y considerado como moderado (CALLEGARI-JACQUES, 2003), observándose que los mayores valores de resistencia al cizallamiento se hallaron en la *Cedrelinga cateniformis*, quien posee la menor masa específica básica, así como el mayor diámetro tangencial y área relativa de poros, mientras que los menores valores corresponden a la *Cariniana domestica*, que presenta mayor masa específica básica y menor diámetro tangencial y área relativa de poros. Además, dentro de cada especie se observa un coeficiente de correlación positivo entre ambas variables, siendo considerados como moderados (0,3 a 0,6) para las tres maderas (*Cariniana domestica*: R=0,596, *Copaifera paupera*: R=0,599 y *Cedrelinga cateniformis*: R=0,381).

Las variaciones encontradas en los coeficientes de correlación de *Pearson* podrían explicarse por el hecho que existen diferencias de masa específica y porosidad entre las especies estudiadas, que concuerda con lo manifestado por Marra (1992), Vick (1999) e Iwakiri (2005), quienes indican que maderas con baja masa específica y alta porosidad son más fáciles de encolar, porque permiten una mejor penetración del adhesivo. Sin embargo, dentro de la misma especie, la porosidad es similar, por lo que el cizallamiento podría verse afectado, entre otros factores, por la variación en la masa específica que presentan las muestras evaluadas.

FIGURA 22 - CORRELACIÓN ENTRE MASA ESPECÍFICA BÁSICA Y RESISTENCIA AL CIZALLAMIENTO DE PROBETAS ENCOLADAS CON ADHESIVO EPI



FUENTE: El autor (2019).

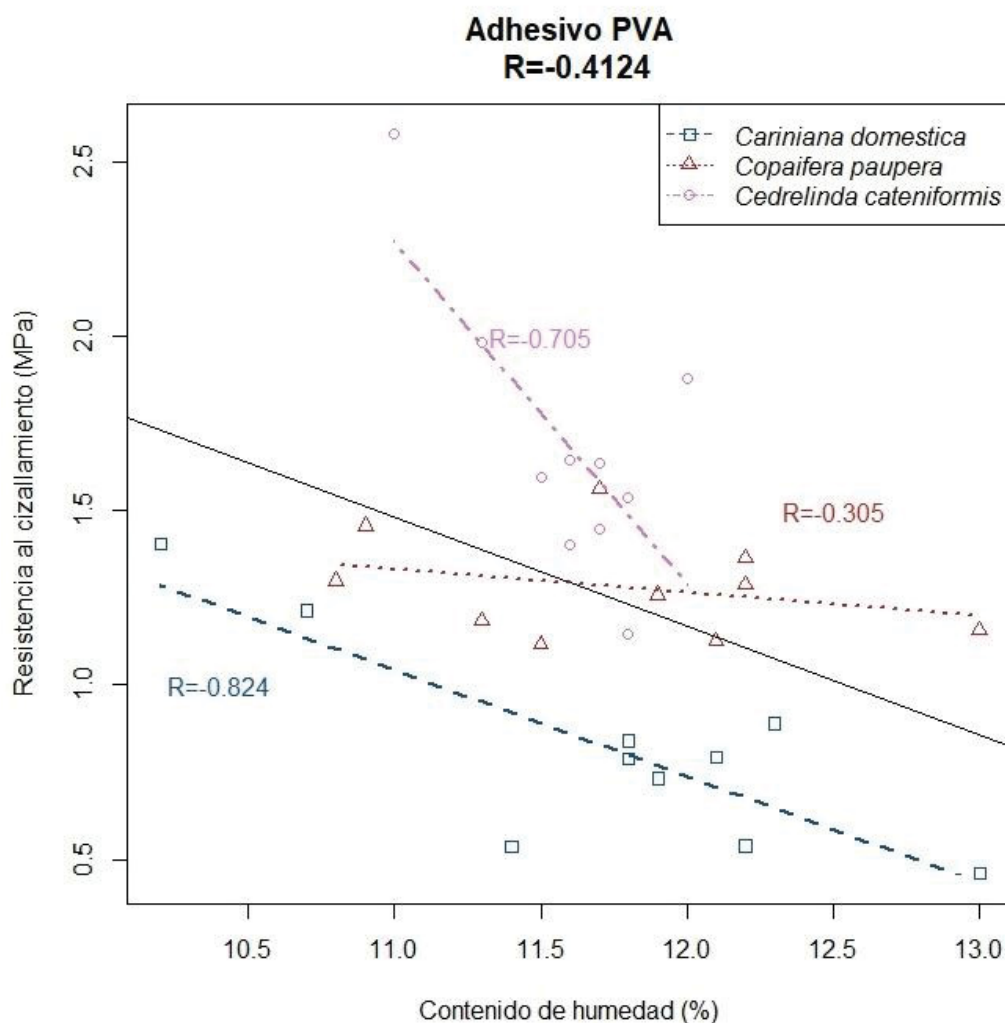
Asimismo, para el adhesivo EPI, si se consideran todas las muestras evaluadas, se tiene que los valores de resistencia al cizallamiento presentan un coeficiente de correlación de *Pearson* positivo y moderado con la masa específica básica ($R=0,599$); sin embargo, en las especies evaluadas individualmente resulta moderado para la *Cedrelinga cateniformis* ($R=0,368$) y *Cariniana domestica* ($R=0,493$), así como fuerte (0,6 a 0,9) para la *Copaifera paupera* ($R=0,669$) (CALLEGARI-JACQUES, 2003).

A diferencia del coeficiente de correlación de *Pearson* negativo encontrado entre masa específica básica y resistencia al cizallamiento con el adhesivo PVA, los resultados alcanzados con el EPI podrían deberse a lo reportado por Iwakiri (2005) y Frihart y Hunt (2010), quienes mencionan que este producto, por la reacción de los grupos isocianatos con los grupos hidroxilo de la madera, forman enlaces duraderos que le podrían dar una mayor resistencia a la humedad, lo cual no sucede con el PVA. Además, Vick (1989) menciona que, al aumentar la masa específica de la madera, se incrementa la resistencia de la unión adhesiva, tendencia que se conserva hasta un límite de 0,7 a 0,8 g/cm³, luego del cual tiende a decrecer por la disminución de la penetración del adhesivo.

4.5.1.2 Correlación entre el contenido de humedad y resistencia al cizallamiento

En la FIGURA 23 y FIGURA 24 se presentan los gráficos de dispersión, donde se aprecia la correlación entre el contenido de humedad de las probetas de madera de las tres especies ensayadas antes del pretratamiento para uso en ambiente seco, y sus valores de resistencia al cizallamiento de las juntas encoladas luego del pretratamiento, para los adhesivos PVA y EPI. En dichas figuras se muestra, con una raya sólida, la línea de tendencia para las 30 muestras y con líneas punteadas las tendencias individuales por especie.

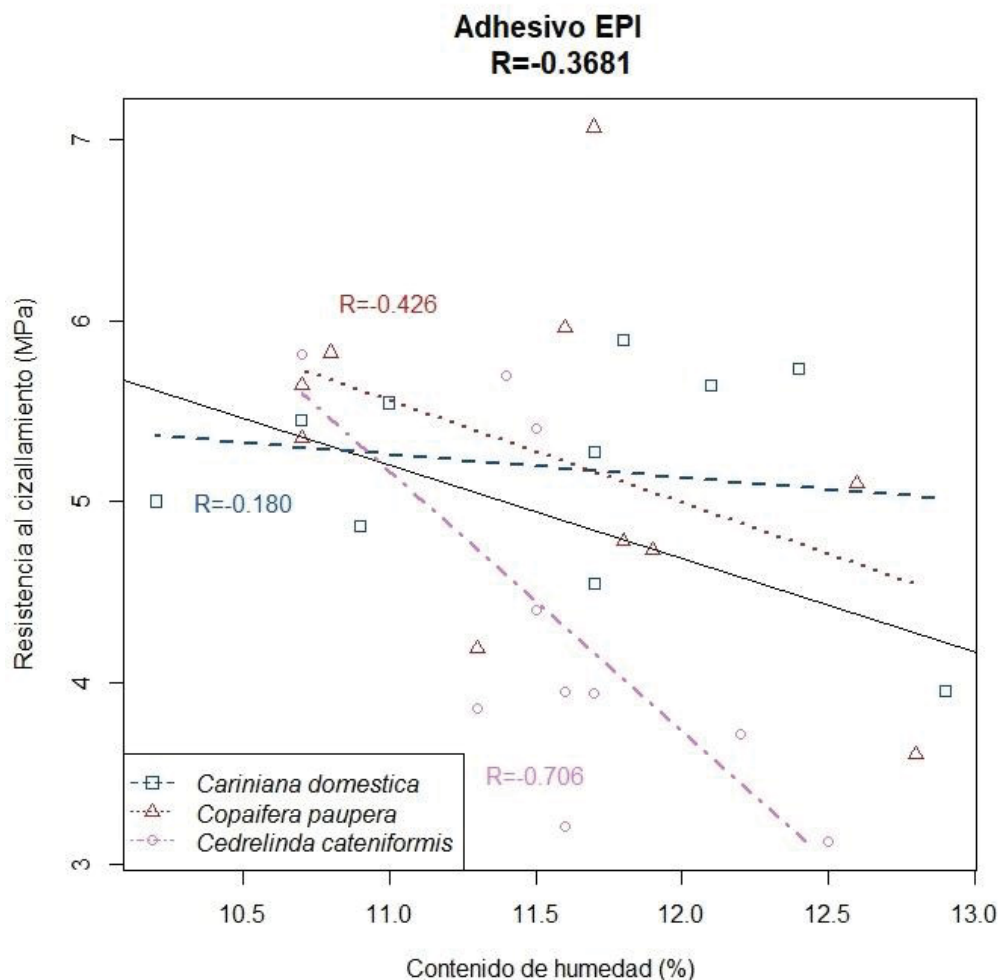
FIGURA 23 - CORRELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE HUMEDAD Y RESISTENCIA AL CIZALLAMIENTO DE PROBETAS ENCOLADAS CON ADHESIVO PVA



FUENTE: El autor (2019).

El coeficiente de correlación de *Pearson* encontrado entre el contenido de humedad de las probetas ensayadas, encoladas con adhesivo PVA, antes del pretratamiento para uso en ambiente seco, y los resultados de resistencia al cizallamiento luego del pretratamiento fue negativo y moderado ($R=-0,412$) (CALLEGARI-JACQUES, 2003). Sin embargo, en forma individual, la *Cariniana domestica* ($R=-0,824$) y la *Cedrelinga canteniformis* ($R=-0,705$) muestran un coeficiente de correlación negativo y fuerte, no ocurriendo lo mismo para la *Copaifera paupera* ($R=-0,305$), que resultó negativo y débil (CALLEGARI-JACQUES, 2003).

FIGURA 24 - CORRELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE HUMEDAD Y RESISTENCIA AL CIZALLAMIENTO DE PROBETAS ENCOLADAS CON ADHESIVO EPI



FUENTE: El autor (2019).

En los resultados encontrados para el adhesivo EPI, se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson de -0,368, lo cual se interpreta como negativo y moderado (CALLEGARI-JACQUES, 2003). Este comportamiento se aprecia para ambos adhesivos utilizados, lo cual podría deberse a que el rango de contenido de humedad de las muestras evaluadas fue reducido y, para mejorar la correlación, se tendría que aumentar dicho rango.

Se observó, además que el coeficiente de correlación en las especies individuales es inverso al contenido de humedad y se considera como débil para la *Cariniana domestica* (R=-0,180), moderado para la *Copaifera paupera* (R=-0,426) y fuerte para la *Cedrelinga cateniformis* (R=-0,706), el cual tiene una pendiente más pronunciada, lo cual implica un fuerte impacto negativo de la humedad sobre la resistencia al cizallamiento para esta especie.

4.5.2 Con pretratamiento para uso en ambiente húmedo

En los resultados de cizallamiento con el pretratamiento para uso en ambiente húmedo con adhesivo EPI, se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homocedasticidad, obteniéndose un *W* de *Shapiro Wilk* de 0,98 (p-valor asociado de 0,660) y un chi cuadrado de 0,50 (p-valor asociado de 0,055). El ANOVA muestra que solo el efecto de la variable especie es significativo, obteniéndose un *F* calculado de 4,38 con un p-valor de 0,002.

Los resultados de resistencia al cizallamiento, porcentaje de falla en la madera y el 5° percentil inferior de las juntas encoladas con pretratamiento para uso en ambiente húmedo se muestran en la TABLA 11.

TABLA 11 – RESISTENCIA AL CIZALLAMIENTO DE JUNTAS ENCOLADAS CON ADHESIVO EPI, CON PRETRATAMIENTO PARA USO EN AMBIENTE HÚMEDO

ESPECIE	RC (MPa)	FM (%)	5° PI (MPa)
<i>Cariniana domestica</i>	4,28 ab (32,03)	7	2,57
<i>Copaifera paupera</i>	3,31 b (32,73)	5	2,55
<i>Cedrelinga cateniformis</i>	3,36 ab (17,18)	10	2,43
<i>Cariniana domestica</i> –	3,18 b (21,27)	4	1,77
<i>Copaifera paupera</i>			
<i>Cariniana domestica</i> –	4,65 a (25,11)	7	3,55
<i>Cedrelinga cateniformis</i>			
<i>Copaifera paupera</i> –	3,12 b (18,85)	8	1,62
<i>Cedrelinga cateniformis</i>			

FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: 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 de *Tukey* con un nivel de confianza de 95%. Los valores entre paréntesis son los coeficientes de variación en porcentaje.

La prueba de *Tukey* muestra que los resultados de resistencia al cizallamiento de las juntas encoladas de *Cariniana domestica/Cedrelinga cateniformis* (4,65 MPa) presentan los mayores valores, mientras que las de *Copaifera paupera* (3,31 MPa), *Cariniana domestica/Copaifera paupera* (3,18 MPa) y *Copaifera paupera/Cedrelinga cateniformis* (3,12 MPa) muestran los menores valores; además, las juntas encoladas de *Cariniana domestica* (4,28 MPa) y *Cedrelinga cateniformis* (3,36 MPa) pueden ser consideradas en ambos grupos.

Los valores promedio obtenidos del 5° percentil inferior de resistencia al cizallamiento de las juntas encoladas, con pretratamiento para uso en

ambiente húmedo, fluctuaron de 1,62 a 3,55 MPa, encontrando que las juntas de *Cariniana domestica*, *Copaifera paupera* y *Cariniana domestica/Cedrelinga cateniformis* cumplen con el valor mínimo del 5° percentil inferior de 2,5 MPa indicado en la norma UNE-EN 13353 (AENOR, 2011a). Estos resultados confirman lo señalado por Frihart (2005) y Frihart y Hunt (2010), quienes afirman que el adhesivo EPI le suministra a la línea de cola una alta resistencia a la humedad y temperatura.

Los resultados encontrados por Almeida (2013) en juntas encoladas con adhesivo EPI para las maderas tropicales *Astronium lecointei* (0,99 MPa), *Himenaëa courbaril* (1,72 MPa) y *Tabeuia spp* (1,30 MPa) fueron inferiores a los hallados en todas las juntas encoladas ensayadas en esta investigación (3,12 a 4,65 MPa), lo cual podría explicarse por la mayor masa específica básica (0,71 a 0,94 g/cm³) y contenido de extractivos que presentan (11,90 a 13,02%); lo cual concuerda con lo indicado por Iwakiri (2005), quien señala que maderas con alta masa específica dificultan la penetración del adhesivo, ocasionando una baja adhesión mecánica, además que elevados porcentajes de extractivos pueden reducir su higroscopicidad y permeabilidad.

Fonte (2016), en los ensayos de resistencia al cizallamiento de juntas encoladas de *Cryptomeria japonica*, obtuvo un valor promedio de 3,90 MPa, que es inferior a los reportados para las juntas de *Cariniana domestica* y *Cariniana domestica/Cedrelinga cateniformis* (4,28 y 4,65 MPa), y superior a los valores encontrados para las demás juntas encoladas estudiadas en esta investigación (3,12 a 3,36 MPa). Por otro lado, Lau (2017) reportó un valor promedio de resistencia al cizallamiento de juntas encoladas de *Populus deltoides* con adhesivo EPI de 2,61 MPa, que es menor a los reportados para todas las juntas ensayadas en este estudio, lo cual podría deberse a su menor masa específica básica (0,33 g/cm³) y alto coeficiente de anisotropía (2,52).

Los valores promedio de porcentaje de falla en la madera obtenidos para todas las juntas encoladas con adhesivo EPI fluctuó de 4 a 10%, que son menores del 40%, valor mínimo indicado en la norma UNE-EN 13353 (AENOR, 2011a); requisito no aplicable para la *Cariniana domestica*, *Copaifera paupera* y sus combinaciones, por presentar una masa específica aparente mayor de 0,60 g/cm³. Los valores reportados en el presente estudio son mayores al obtenido

por Fonte (2016), para *Cryptomeria japonica*, que fue de 0%, y menores al indicado por Lau (2017), con *Populus deltoides*, que fue de 18%.

4.6 RESISTENCIA DE EMPALMES *FINGER JOINT* A FLEXIÓN ESTÁTICA

En la TABLA 12 se muestran los valores promedio del módulo de rotura (MOR) en flexión estática y coeficientes de variación encontrados en los ensayos de empalmes *finger joint*, elaborados con residuos de madera encolados con adhesivos PVA y EPI, sometidos a tres pretratamientos.

Asimismo, en la FIGURA 25 se presenta el diagrama de barras de error con un intervalo de confianza (IC) al 95%, para los valores del MOR en flexión estática de empalmes *finger joint* de las especies estudiadas, encolados con adhesivos PVA y EPI, agrupados por pretratamiento.

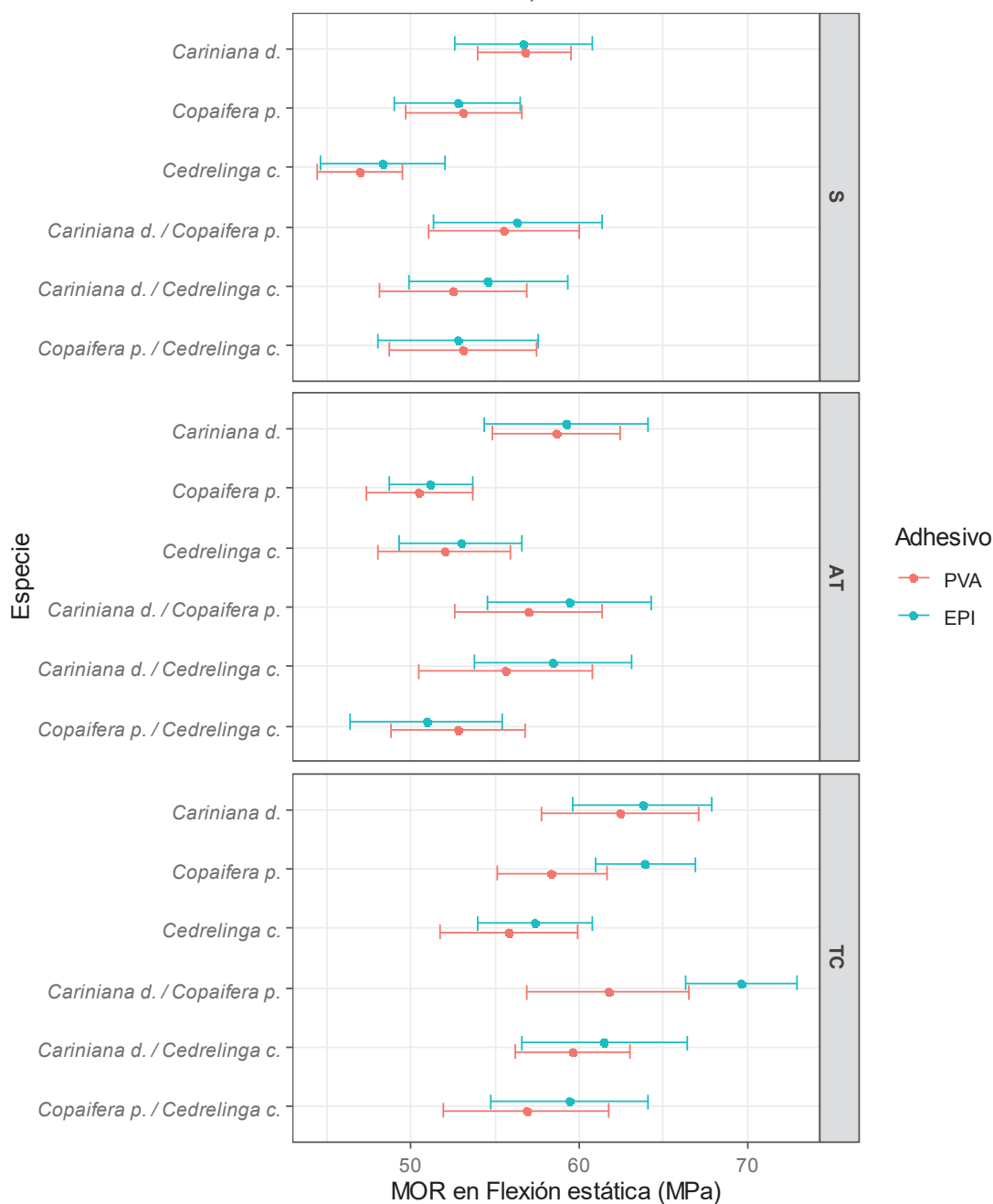
TABLA 12 - RESISTENCIA DEL MÓDULO DE ROTURA (MOR) EN FLEXIÓN ESTÁTICA, DE EMPALMES *FINGER JOINT* DE LAS ESPECIES ESTUDIADAS, ENCOLADAS CON ADHESIVOS PVA Y EPI

ESPECIE	ADHESIVO	PRETRATAM.	MOR (MPa)	CV (%)
<i>Cariniana domestica</i>	PVA	S	56,73	11,24
		AT	58,62	14,88
		TC	62,41	17,04
	EPI	S	56,66	16,58
		AT	59,24	18,74
		TC	63,77	14,73
<i>Copaifera paupera</i>	PVA	S	53,12	14,87
		AT	50,49	14,24
		TC	58,34	12,76
	EPI	S	52,76	16,29
		AT	51,15	11,13
		TC	60,48	17,55
<i>Cedrelinga cateniformis</i>	PVA	S	46,93	12,40
		AT	51,98	17,40
		TC	55,80	16,72
	EPI	S	48,33	17,38
		AT	52,94	15,87
		TC	57,39	13,57
<i>Cariniana domestica - Copaifera paupera</i>	PVA	S	55,50	18,36
		AT	56,96	17,63
		TC	61,71	17,80
	EPI	S	56,30	20,30
		AT	59,38	18,73
		TC	64,32	19,22
<i>Cariniana domestica - Cedrelinga cateniformis</i>	PVA	S	52,47	19,01
		AT	55,64	21,19
		TC	59,88	20,86
	EPI	S	54,58	19,82
		AT	58,42	18,25
		TC	61,50	18,37
<i>Copaifera paupera - Cedrelinga cateniformis</i>	PVA	S	53,07	18,67
		AT	52,78	17,12
		TC	56,84	19,84
	EPI	S	52,76	20,64
		AT	50,90	20,33
		TC	59,42	17,88

FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: S - pretratamiento seco; AT -pretratamiento a alta temperatura; TC - pretratamiento de tres ciclos en agua; MOR - módulo de rotura en flexión estática; CV - coeficiente de variación.

FIGURA 25 - BARRAS DE ERROR (IC 95%) DEL MOR EN FLEXIÓN ESTÁTICA PARA ADHESIVOS PVA Y EPI POR ESPECIE, AGRUPADOS POR PRETRATAMIENTO



FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: S - pretratamiento seco; AT - pretratamiento a alta temperatura; TC - pretratamiento de tres ciclos en agua; MOR - módulo de rotura en flexión estática.

Se aprecia que los valores promedio del MOR en flexión estática de empalmes *finger joint* con residuos de las especies estudiadas, encolados con adhesivos PVA y EPI, son mayores a 13,8 MPa, que es el mínimo indicado como requisito en la norma ASTM D 5572 (ASTM, 2005) cuando son sometidos

al pretratamiento seco, y de 6,9 MPa para el pretratamiento de tres ciclos en agua.

Además, se encontró que los valores promedio del MOR en flexión estática de las tres especies individuales presentan, en mayor proporción, coeficientes de variación de hasta 16%, que es el valor máximo indicado por Lisboa, Matos y Melo (1993) para este ensayo en madera sólida; mientras que todos los valores encontrados en las probetas con combinaciones de especies, fueron mayores al valor indicado. Estas diferencias pueden deberse, tal como señala Bila (2014), a la variabilidad de las propiedades anatómicas, físicas y químicas que presenta cada madera y, al realizar los empalmes *finger joint*, pueden derivar en un incremento en la variabilidad de los resultados obtenidos; además, las probetas evaluadas se elaboraron de residuos de madera procedentes de una segunda transformación y fueron secadas en hornos de secado industriales.

Los resultados obtenidos muestran que los empalmes *finger joint* elaborados con residuos de las tres maderas y sus combinaciones, encoladas con adhesivos PVA y EPI, cumplen con los requisitos mínimos en los pretratamientos seco y tres ciclos en agua señalados en la norma ASTM D 5572 (ASTM, 2005).

4.6.1 Con pretratamiento seco

A los resultados del MOR en flexión estática de empalmes *finger joint* encolados con adhesivos PVA y EPI, luego del pretratamiento seco, presentados en la TABLA 12, se le hizo las pruebas de normalidad y homocedasticidad, obteniéndose un W de *Shapiro Wilk* de 0,99 (p-valor asociado de 0,057) y un chi cuadrado de 2,62 (p-valor asociado de 0,106), con lo cual se cumplen con los supuestos para efectuar el ANOVA.

El ANOVA arrojó que sólo el efecto de la variable especie es significativo con un nivel de significancia de 0,05, mas no es significativo para la variable adhesivo ($F=0,25$ y p-valor=0,621), ni existe interacción entre las variables especie y adhesivo ($F=0,12$ y p-valor=0,988), por lo que se efectuó la prueba de *Tukey* únicamente sobre la variable especie.

La TABLA 13 muestra los valores promedio del MOR en flexión estática de los empalmes *finger joint* de las especies evaluadas, luego del pretratamiento seco.

TABLA 13 - VALORES PROMEDIO DEL MOR EN FLEXIÓN ESTÁTICA DE LAS ESPECIES ESTUDIADAS, CON PRETRATAMIENTO SECO

ESPECIE	MOR (MPa)	CV (%)	F	P
<i>Cariniana domestica</i>	56,70 a	13,98		
<i>Cariniana domestica</i> - <i>Copaifera paupera</i>	55,90 a	19,13		
<i>Cariniana domestica</i> - <i>Cedrelinga cateniformis</i>	53,53 ab	19,29	4,70	0,000
<i>Copaifera paupera</i>	52,94 ab	15,39		
<i>Copaifera paupera</i> - <i>Cedrelinga cateniformis</i>	52,92 ab	19,42		
<i>Cedrelinga cateniformis</i>	47,63 b	15,05		

FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: MOR - módulo de rotura en flexión estática; CV - coeficiente de variación. Las medias seguidas de una misma letra no presentan diferencias significativas, para la prueba de *Tukey* con un nivel de confianza de 95%.

Los resultados de la prueba de *Tukey* indican que la *Cariniana domestica* y la *Cariniana domestica/Copaifera paupera* son significativamente mayores que *Cedrelinga cateniformis*, la cual reporta la menor resistencia.

Asimismo, al comparar los valores del MOR en flexión estática obtenidos en las especies evaluadas, se observó cierta coincidencia con respecto a sus propiedades físicas, mientras que no es notoria con respecto a las propiedades químicas.

De acuerdo a ello, se tiene que los empalmes *finger joint* de la *Cariniana domestica*, con masa específica básica de 0,60 g/cm³, masa específica aparente de 0,76 g/cm³ y coeficiente de anisotropía de 1,40, así como en las combinaciones donde se encuentra, muestran los mayores valores de MOR en flexión estática, seguido de la *Copaifera paupera*, con masa específica básica de 0,58 g/cm³, masa específica aparente de 0,72 g/cm³, y coeficiente de anisotropía de 1,69, y finalmente por la *Cedrelinga cateniformis*, que reporta una masa específica básica de 0,48 g/cm³, masa específica aparente de 0,59 g/cm³ y coeficiente de anisotropía de 1,90.

Esto concuerda con lo indicado por Vick (1999) y Almeida (2015), quienes mencionan que la masa específica, contenido de humedad y el coeficiente de anisotropía de la madera son las propiedades físicas relevantes

en una madera, cuando van a ser utilizadas en la manufactura de paneles de madera maciza. Asimismo, Vick (1999) indica que, al aumentar la masa específica de la madera, se incrementa la resistencia a la rotura en la unión adhesiva, lo cual sucede hasta un límite de 0,7 a 0,8 g/cm³, y por encima de dicho valor su resistencia decrece rápidamente. Esto se podría deber a que maderas de alta masa específica son difíciles de encolar por tener paredes celulares más gruesas y menor volumen de lumen; por dicho motivo, los adhesivos no penetran fácilmente y el anclaje mecánico se limita a una o dos células de profundidad.

Con respecto a las propiedades químicas, se tiene que, a pesar que la *Copaifera paupera* presenta mayor cantidad de extractivos totales que la *Cedrelinga cateniformis*, la primera muestra mayor resistencia a la flexión estática, lo cual podría deberse a lo señalado por Lima et al. (2007), quienes mencionan que las reacciones de polimerización del adhesivo y de los extractivos presentes en la madera, no dependen solamente de la cantidad, sino además del tipo de extractivo, tales como compuestos terpenicos, terpenoides, fenólicos u otros carbohidratos, que se encuentre en mayor proporción (GONZALES, 2013).

4.6.2 Con pretratamiento a alta temperatura

Previo al ANOVA, se efectuaron las pruebas de normalidad y homocedasticidad a los resultados reportados en la TABLA 12, del MOR en flexión estática de empalmes *finger joint* encolados con adhesivos PVA y EPI luego del pretratamiento a alta temperatura, para lo cual se realizó un cambio de base a la variable respuesta, aplicando el logaritmo neperiano, obteniéndose para el W de *Shapiro Wilk* un valor de 0,10 (p-valor asociado de 0,688) y un chi cuadrado de 2,86 (p-valor asociado de 0,091).

El ANOVA muestra que solo el efecto de la variable especie es significativo con un nivel de significancia de 0,05, pero no es significativo para la variable adhesivo (F=0,47 y p-valor=0,493), ni existe interacción entre las variables especie y adhesivo (F=0,37 y p-valor=0,870). En vista de darse el

cumplimiento de los supuestos y la significancia de la variable especie, se realizó la prueba de *Tukey* sobre dicha variable.

En la TABLA 14 se presentan los valores promedio del MOR en flexión estática de empalmes *finger joint* de las especies estudiadas, con pretratamiento a alta temperatura.

TABLA 14 - VALORES PROMEDIO DEL MOR EN FLEXIÓN ESTÁTICA PARA LAS ESPECIES ESTUDIADAS, CON PRETRATAMIENTO A ALTA TEMPERATURA

ESPECIE	MOR (MPa)	CV (%)	F	P
<i>Cariniana domestica</i>	58,93 a	16,73		
<i>Cariniana domestica</i> - <i>Copaifera paupera</i>	58,17 ab	18,10		
<i>Cariniana domestica</i> - <i>Cedrelinga cateniformis</i>	57,03 abc	19,61	5,16	0,000
<i>Copaifera paupera</i>	50,82 c	12,61		
<i>Copaifera paupera</i> - <i>Cedrelinga cateniformis</i>	51,84 c	18,59		
<i>Cedrelinga cateniformis</i>	52,46 bc	16,45		

FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: MOR - módulo de rotura en flexión estática; CV - coeficiente de variación. Las medias seguidas de una misma letra no presentan diferencias significativas, para la prueba de *Tukey* con un nivel de confianza de 95%.

La prueba de *Tukey* indica para la *Cariniana domestica*, *Cariniana domestica/Copaifera paupera* y *Cariniana domestica/Cedrelinga cateniformis*, los mayores valores de MOR en flexión estática. Por otro lado, los datos obtenidos para la *Copaifera paupera*, *Copaifera paupera/Cedrelinga cateniformis* y *Cedrelinga cateniformis* reportan los menores valores. Asimismo, la *Cariniana domestica/Copaifera paupera* no presenta diferencias significativas con la *Cariniana domestica/Cedrelinga cateniformis* y *Cedrelinga cateniformis*.

Se debe considerar que la norma ASTM D 5572 (ASTM, 2005), si bien contempla el pretratamiento de las probetas de empalmes *finger joint* a una temperatura de $104 \pm 3^{\circ}\text{C}$ en estufa con circulación de aire, no señala valores mínimos de resistencia.

Los resultados del MOR en flexión estática para este pretratamiento con las especies evaluadas indican, al igual que para el pretratamiento seco y como se explicó en el ítem 4.6.1, coincidencias de sus propiedades físicas, ya que se aprecia que la *Cariniana domestica*, que tiene mayor masa específica y menor coeficiente de anisotropía, y sus combinaciones, presentan los mayores valores de resistencia. Asimismo, muestran para ambos adhesivos, a

excepción de los empalmes *finger joint* de *Copaifera paupera* y *Copaifera paupera/Cedrelinga cateniformis*, valores de resistencia ligeramente superiores a los alcanzados con el pretratamiento seco.

4.6.3 Con pretratamiento de tres ciclos en agua

A los valores del MOR en flexión estática de empalmes *finger joint* encolados con adhesivos PVA y EPI, luego del pretratamiento de tres ciclos en agua mostrados en la TABLA 12, se aplicó una transformación tipo raíz cuadrada, encontrándose un *W* de *Shapiro Wilk* de 0,99 (p-valor asociado de 0,066) y un chi cuadrado de 2,18 (p-valor asociado de 0,140).

El ANOVA muestra que existen diferencias significativas entre las medias al utilizar las diferentes especies y los distintos adhesivos, con un nivel de significancia de 0,05; además, el efecto interacción especie y adhesivo no resultó significativo ($F=0,61$, p-valor=0,692). En vista del cumplimiento de los supuestos y la significancia de las variables especie y adhesivo, se realizó la prueba de *Tukey* para cada variable.

La TABLA 15 muestra los valores promedio del MOR en flexión estática y coeficientes de variación de empalmes *finger joint* para las especies estudiadas, después del pretratamiento de tres ciclos en agua.

TABLA 15 - VALORES PROMEDIO DEL MOR EN FLEXIÓN ESTÁTICA PARA LAS ESPECIES ESTUDIADAS, CON PRETRATAMIENTO DE TRES CICLOS EN AGUA

ESPECIE	MOR (MPa)	CV (%)	F	P
<i>Cariniana domestica</i>	63,09 a	15,73		
<i>Cariniana domestica</i> - <i>Copaifera paupera</i>	63,01 ab	18,44		
<i>Cariniana domestica</i> - <i>Cedrelinga cateniformis</i>	60,69 abc	19,42	4,86	0,000
<i>Copaifera paupera</i>	59,41 abc	15,33		
<i>Copaifera paupera</i> - <i>Cedrelinga cateniformis</i>	58,13 bc	18,74		
<i>Cedrelinga cateniformis</i>	56,60 c	15,06		

FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: MOR - módulo de rotura en flexión estática; CV - coeficiente de variación. Las medias seguidas de una misma letra no presentan diferencias significativas, para la prueba de *Tukey* con un nivel de confianza de 95%.

En la prueba de *Tukey* se encontró que los valores del MOR en flexión estática de empalmes *finger joint* de la *Cariniana domestica*, *Cariniana domestica/Copaifera paupera*, *Cariniana domestica/Cedrelinga cateniformis* y *Copaifera paupera* no difieren estadísticamente y pertenecen al grupo con los mejores resultados. Del mismo modo, la *Cariniana domestica/Copaifera paupera* tendría valores no diferentes a la *Copaifera paupera/Cedrelinga cateniformis*; mientras que los valores menores se obtienen con la *Cedrelinga cateniformis*, *Copaifera paupera* y *Copaifera paupera/Cedrelinga cateniformis*; sin embargo, estas últimas combinaciones son estadísticamente similares a la *Cedrelinga cateniformis*, que presenta el menor valor promedio.

De modo similar a los dos pretratamientos anteriores, tal como se menciona en el ítem 4.6.1, los resultados de los ensayos de empalmes *finger joint* a la flexión estática para el pretratamiento de tres ciclos en agua muestran cierta concordancia de sus propiedades físicas, ya que la *Cariniana domestica*, con mayor masa específica y menor coeficiente de anisotropía, y sus combinaciones, presentan mayores valores de resistencia, seguidos de *Copaifera paupera*, *Copaifera paupera/Cedrelinga cateniformis* y *Cedrelinga cateniformis*. De otro lado, no se observó una clara relación entre las propiedades químicas de las maderas evaluadas con los resultados de resistencia a la flexión estática ensayadas con los dos adhesivos.

Además, se efectuó un ANOVA para evaluar el efecto de los adhesivos PVA y EPI en los resultados del MOR en flexión estática, luego del pretratamiento de tres ciclos en agua. En la TABLA 16 se presentan los valores promedio del MOR en flexión estática y los coeficientes de variación para los adhesivos utilizados, luego del pretratamiento de tres ciclos en agua.

TABLA 16 - VALORES PROMEDIO DEL MOR EN FLEXIÓN ESTÁTICA PARA LOS ADHESIVOS PVA Y EPI, CON PRETRATAMIENTO DE TRES CICLOS EN AGUA

ADHESIVO	MOR (MPa)	CV (%)	F	P
PVA	59,16 a	17,82	8,33	0,003
EPI	61,15 b	17,18		

FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: MOR - módulo de rotura en flexión estática; CV - coeficiente de variación. Las medias seguidas de una misma letra no presentan diferencias significativas, para la prueba de *Tukey* con un nivel de confianza de 95%.

Los resultados indican que el valor promedio del MOR en flexión estática de empalmes *finger joint* para todas las especies y combinaciones elaboradas con adhesivo EPI, es significativamente superior a los producidos con PVA.

Estas diferencias se pueden explicar por lo manifestado por Vick (1999), Conner (2001), Zimmerman (2006) y Frihart y Hunt (2010), quienes indican que el adhesivo EPI es un producto termorrígido, de alta resistencia a la humedad y a alta temperatura, cuyo fraguado se realiza por la reacción de los grupos isocianatos con los grupos hidroxilo de la madera. Asimismo, Bandel (1991), Vignote y Martínez (2006), así como Vassiliou, Barboutis y Karastergiou (2007) indican que el PVA es un adhesivo termoplástico obtenido por la polimerización en medio acuoso del acetato de vinilo, formando una película muy resistente mecánicamente pero muy rígida y poco resistente a la humedad. Sin embargo, Endo et al. (2017) señalan que, al someter las juntas encoladas con PVA a un proceso de inmersión en agua, seguido de una climatización o secado, el adhesivo puede recuperar su capacidad adhesiva.

4.6.4 Efecto de los pretratamientos

En la TABLA 17 se presenta la influencia de los pretratamientos en los resultados del módulo de rotura en flexión estática de empalmes *finger joint*, encolados con adhesivos PVA y EPI, en función de las especies estudiadas.

Además, en la FIGURA 26 se muestra el diagrama de barras de error con un intervalo de confianza (IC) al 95%, del efecto de los pretratamientos en los valores del MOR en flexión estática de empalmes *finger joint* de las especies evaluadas.

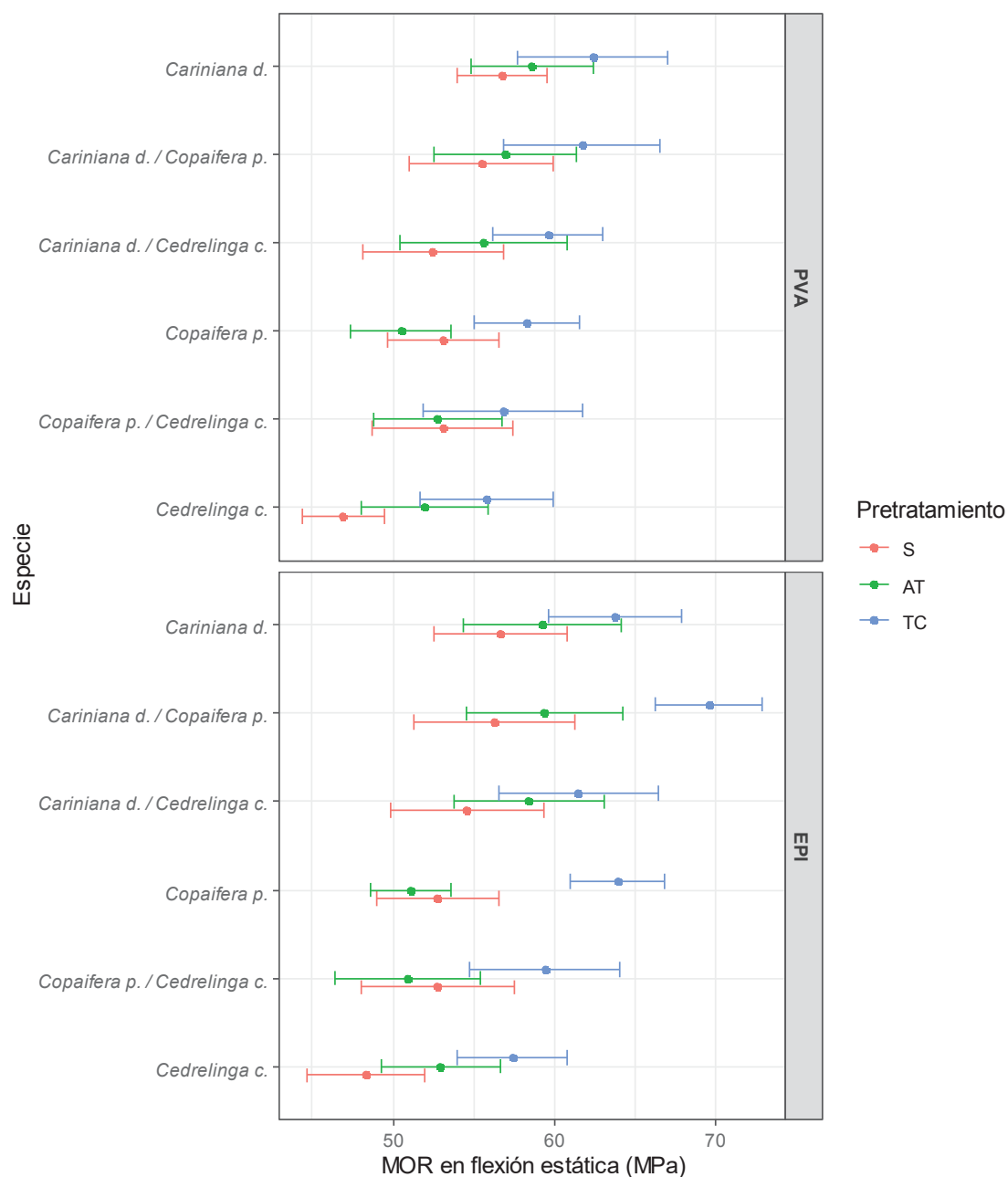
TABLA 17 - EFECTO DE LOS PRETRATAMIENTOS EN LOS RESULTADOS DE FLEXIÓN ESTÁTICA DE LAS ESPECIES ESTUDIADAS, ENCOLADAS CON ADHESIVOS PVA Y EPI

ESPECIE	PT	ADHESIVO PVA			ADHESIVO EPI		
		MOR (MPa)	F	P	MOR (MPa)	F	P
<i>Cariniana domestica</i>	S	56,73 a			56,66 a		
	AT	58,62 a	2,18	0,12	59,24 a	2,59	0,08
	TC	62,41 a			63,77 a		
<i>Cariniana domestica - Copaifera paupera</i>	S	55,50 a			56,30 b		
	AT	56,96 a	1,94	0,15	59,38 b	9,33	0,00
	TC	61,71 a			69,60 a		
<i>Cariniana domestica - Cedrelinga cateniformis</i>	S	52,47 a			54,58 a		
	AT	55,64 a	2,58	0,08	58,42 a	2,01	0,14
	TC	59,61 a			61,50 a		
<i>Copaifera paupera</i>	S	53,12 b			52,76 b		
	AT	50,49 b	5,67	0,01	51,15 b	19,15	0,00
	TC	58,34 a			63,92 a		
<i>Copaifera paupera - Cedrelinga cateniformis</i>	S	53,07 a			52,76 b		
	AT	52,78 a	1,00	0,37	50,90 b	3,56	0,03
	TC	56,84 a			59,42 a		
<i>Cedrelinga cateniformis</i>	S	46,93 b			48,33 b		
	AT	51,98 ab	6,10	0,00	52,94 b	6,10	0,00
	TC	55,80 a			57,39 a		

FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: PT - pretratamiento; S - seco; AT - alta temperatura; TC - tres ciclos en agua; MOR - módulo de rotura en flexión estática. Las medias seguidas de una misma letra en una misma columna no presentan diferencias significativas para la prueba de *Tukey* con un nivel de confianza de 95%.

FIGURA 26 - BARRAS DE ERROR (IC 95%) DEL EFECTO DE LOS PRETRATAMIENTOS EN LOS RESULTADOS DEL MOR EN FLEXIÓN ESTÁTICA



FUENTE: El autor (2020).

NOTAS: S - pretratamiento seco; AT - pretratamiento a alta temperatura; TC - pretratamiento de tres ciclos en agua; MOR - módulo de rotura en flexión estática.

Para el adhesivo PVA, se observa que el efecto entre pretratamientos utilizados fue significativo para empalmes *finger joint* con la *Copaifera paupera* y *Cedrelinga cateniformis*; mientras que para el EPI fueron significativos con la *Copaifera paupera*, *Cedrelinga cateniformis*, *Cariniana domestica/Copaifera paupera* y *Copaifera paupera/Cedrelinga cateniformis*. En todos los casos, de

acuerdo a la prueba de *Tukey*, no existe diferencia estadística entre los pretratamientos seco y alta temperatura con los adhesivos PVA y EPI.

Al comparar los resultados del pretratamiento de tres ciclos en agua con los pretratamientos seco y alta temperatura, se observó en todos casos un incremento de resistencia luego de dicho pretratamiento.

Prata (2010), en ensayos de empalmes *finger joint* efectuados en seis especies de pinos tropicales, utilizando el adhesivo PVA, obtuvo rangos de valores promedio de MOR en flexión estática de 33,19 a 41,16 MPa, 33,76 a 49,00 MPa y de 46,42 a 61,37 MPa con pretratamientos seco, alta temperatura y tres ciclos en agua respectivamente; apreciándose además que los valores con pretratamiento seco son menores a los obtenidos con alta temperatura y estos a su vez menores a los encontrados con pretratamiento de tres ciclos en agua. Asimismo, se observó que todos los valores alcanzados en los tres pretratamientos, a excepción del *Pinus tecunumannii* con pretratamiento de tres ciclos en agua, son inferiores a los encontrados en las especies utilizadas en la presente investigación, que fueron de 46,93 a 56,73 MPa para pretratamiento seco, 50,49 a 58,62 MPa para alta temperatura y de 55,80 a 62,41 MPa para tres ciclos en agua. Estas diferencias pueden deberse al hecho que de los pinos tropicales presentaban bajas masas específicas básicas (de 0,40 a 0,48 g/cm³) y altos coeficientes de anisotropía (de 2,02 a 3,26).

Al respecto, Gaspar et al. (2005) y Prata (2010) señalan que el coeficiente de anisotropía de la madera es una de las características más importantes a considerarse en la producción de paneles EGP, por lo que maderas con coeficientes de anisotropía mayores de 2,0 son consideradas como malas y cuando se someten a variaciones de humedad, luego del fraguado del adhesivo, pueden ocasionar elevadas tensiones en las juntas encoladas, perjudicando su estabilidad dimensional y propiedades mecánicas.

Almeida (2013), obtuvo para residuos de las especies *Pterogyne nitens*, *Hymenaea spp.* y *Astronimum lecointel*, valores promedio de MOR en flexión estática de empalmes *finger joint* encolados con adhesivo PVA, de 45,59 y 48,61 MPa, 51,71 y 77,33 MPa, así como 20,76 y 33,95 MPa para pretratamientos seco y tres ciclos en agua respectivamente. Del mismo modo, reportó para la *Pterogyne nitens*, *Patagonula sp.*, *Hymenaea spp.* y *Astronimum*

lecointel valores promedio del MOR con adhesivo EPI de 49,69 y 58,84 MPa, 46,08 y 62,74 MPa, 45,46 y 70,48 MPa, así como 46,55 y 69,13 MPa para pretratamientos seco y tres ciclos en agua respectivamente.

Juizo (2015), al evaluar el uso de costaneras de *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus saligna*, utilizando adhesivo PVA para el encolado de empalmes *finger joint*; obtuvo valores promedio del MOR en flexión estática de 62,64, 44,08 y 28,76 MPa con pretratamientos seco, alta temperatura y tres ciclos en agua respectivamente. Los valores obtenidos por el autor para el pretratamiento seco son mayores a los encontrados para las especies evaluadas en el presente estudio (46,93 a 56,73 MPa) y menores para pretratamientos a alta temperatura (50,49 a 58,62 MPa) y tres ciclos en agua (55,80 a 62,41 MPa); para el caso del pretratamiento seco, estas diferencias podrían deberse por poseer una masa específica básica combinada mayor a las especies estudiadas en la esta investigación, que van de 0,48 a 0,60 g/cm³.

Almeida (2015) reportó, para ensayos de MOR en flexión estática de empalmes *finger joint* con *Cupressus lusitánica*, utilizando adhesivos PVA y EPI, valores promedio de 15,43 y 17,45 MPa para pretratamiento seco, 19,30 y 23,50 MPa para pretratamiento a alta temperatura y de 11,41 y 21,14 MPa para pretratamiento de tres ciclos en agua respectivamente.

Se observó además que todos los valores alcanzados con adhesivos PVA y EPI y con los tres pretratamientos reportados por el autor, fueron menores a los mínimos alcanzados en las especies utilizadas en el presente estudio, que fueron de 46,93 y 48,33 MPa para pretratamiento seco, 50,49 y 50,90 MPa para alta temperatura y de 55,80 y 57,39 MPa para tres ciclos en agua; lo cual podría explicarse por la baja masa específica básica y aparente que presenta la *Cupressus lusitánica* (0,40 y 0,48 g/cm³), además de la menor longitud del diente *finger joint* utilizado (7,15 mm) con respecto al empleado en el presente estudio (10 mm).

Esta diferencia conlleva a que las probetas de empalmes *finger joint* elaborados por Almeida (2015), presenten una menor área de contacto entre la madera y el adhesivo, ocurriendo lo manifestado por Follich et al. (2010), quienes mencionan que un aumento en el área superficial de la unión de dos

piezas a encolar, posibilita una mejor interacción entre madera y adhesivo, brindando una mayor resistencia a la junta encolada.

Fonte (2016), al realizar ensayos del MOR en flexión estática de empalmes *finger joint*, elaborados con *Cryptomeria japonica*, y encolados con adhesivo PVA D4, encontró valores promedio de 41,00, 8,40 y 25,40 MPa luego de pretratamientos seco, alta temperatura y tres ciclos en agua respectivamente. Los valores obtenidos por la autora para los tres pretratamientos son inferiores a los mínimos encontrados con las especies evaluadas en el presente estudio, que fueron de 46,93, 50,49 y 55,80 MPa con pretratamientos seco, alta temperatura y tres ciclos en agua respectivamente.

Lau (2017), evaluó la resistencia a la flexión estática de empalmes *finger joint* del *Populus deltoides*, encolados con adhesivo PVA, reportando valores de MOR promedio de 28,80, 13,60 y 5,49 MPa con pretratamientos seco, alta temperatura y tres ciclos en agua. Se observó que los valores alcanzados en los tres pretratamientos son menores a los encontrados para las especies utilizadas en el presente estudio (46,93, 50,49 y 55,80 MPa); lo cual se podría deber a que el *Populus deltoides* posee una baja masa específica básica ($0,33 \text{ g/cm}^3$) y un alto coeficiente de anisotropía (2,52), comparado con las especies utilizadas en esta investigación, lo cual podría haber afectado su resistencia.

Para el caso del adhesivo PVA, los resultados del MOR en flexión estática de empalmes *finger joint* alcanzados en el presente estudio no coinciden por lo señalado por Fiorelli (2002), Frihart y Hunt (2010) y Clauß, Joscak y Niemz (2011), quienes afirman que a altas temperaturas (mayores de 50°C) el adhesivo PVA presenta una degradación térmica por ser menos resistentes al calor y ser termoplásticas. Por otro lado, en el caso del adhesivo EPI, Vick (1999), Conner (2001), Frihart (2005) y Zimmermman (2006), señalan que este producto tiene un mejor comportamiento a altas temperaturas, ya que es termorrígido y resistente a la humedad y al calor.

El comportamiento de resistencia del adhesivo PVA en empalmes *finger joint* ensayados en flexión estática puede deberse a que las probetas encoladas son sometidas a elevadas temperaturas por un corto periodo de tiempo en un ambiente con circulación de aire. Al respecto, AKZO NOBEL

PERÚ S.A.C. (2013), menciona en la ficha técnica del adhesivo PVA 3010, que tiene una clasificación D3, porque cumple con los requisitos indicados en la norma UNE-EN 204 (AENOR, 2011), y afirma que luego de su fraguado, puede soportar altas temperaturas durante cortos periodos de tiempo.

Prata (2010), justifica el incremento en la resistencia de los resultados del pretratamiento a alta temperatura obtenidos en su investigación, al hecho que el aumento de la temperatura permite que el adhesivo retorne a su estado físico de gel, con lo cual se puede lograr una mejor penetración y humedecimiento del adhesivo en las cavidades vasculares de la madera, mejorando la fijación del adhesivo. Asimismo, Almeida (2015) señala que dicho comportamiento con el pretratamiento a alta temperatura, también puede deberse al corto tiempo al que estuvo expuesto a elevada temperatura, lo cual puede facilitar el movimiento del adhesivo, mejorando su penetración en la estructura de la madera, logrando una mayor resistencia de los empalmes ensayados con este pretratamiento.

Con respecto a los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia de empalmes *finger joint* a flexión estática con pretratamiento de tres ciclos en agua, Nock y Richter (1978) señalan que el adhesivo PVA generalmente no es afectado por los cambios de humedad, a no ser que ésta suceda por una exposición prolongada.

Bandel (1991), afirma que el adhesivo PVA muestra una capacidad de retornar a su forma cohesiva cuando son expuestas por un corto tiempo a una alta humedad. Del mismo modo, Prata (2010) señala que la interacción entre el adhesivo y la madera en condiciones de alta humedad, seguida de un secado suave a baja temperatura (41°C), permite una mejora en la resistencia de la unión adhesiva; además, indica que los factores que pueden influir en este comportamiento son de magnitud química y/o física, tanto del sustrato madera como del adhesivo utilizado.

4.7 RESISTENCIA DE EMPALMES *FINGER JOINT* A TRACCIÓN PARALELA

En la TABLA 18 se muestran los valores promedio de tensión máxima en tracción paralela y coeficientes de variación, obtenidos en los ensayos de

empalmes *finger joint*, elaborados con residuos de madera de las especies estudiadas, utilizando adhesivos PVA y EPI, sometidos a tres pretratamientos.

Además, en la FIGURA 27 se observa el diagrama de barras de error con un intervalo de confianza al 95% para la media de los valores de resistencia a la tracción paralela de empalmes *finger joint* de las especies estudiadas, encoladas con dos adhesivos, agrupados por pretratamiento.

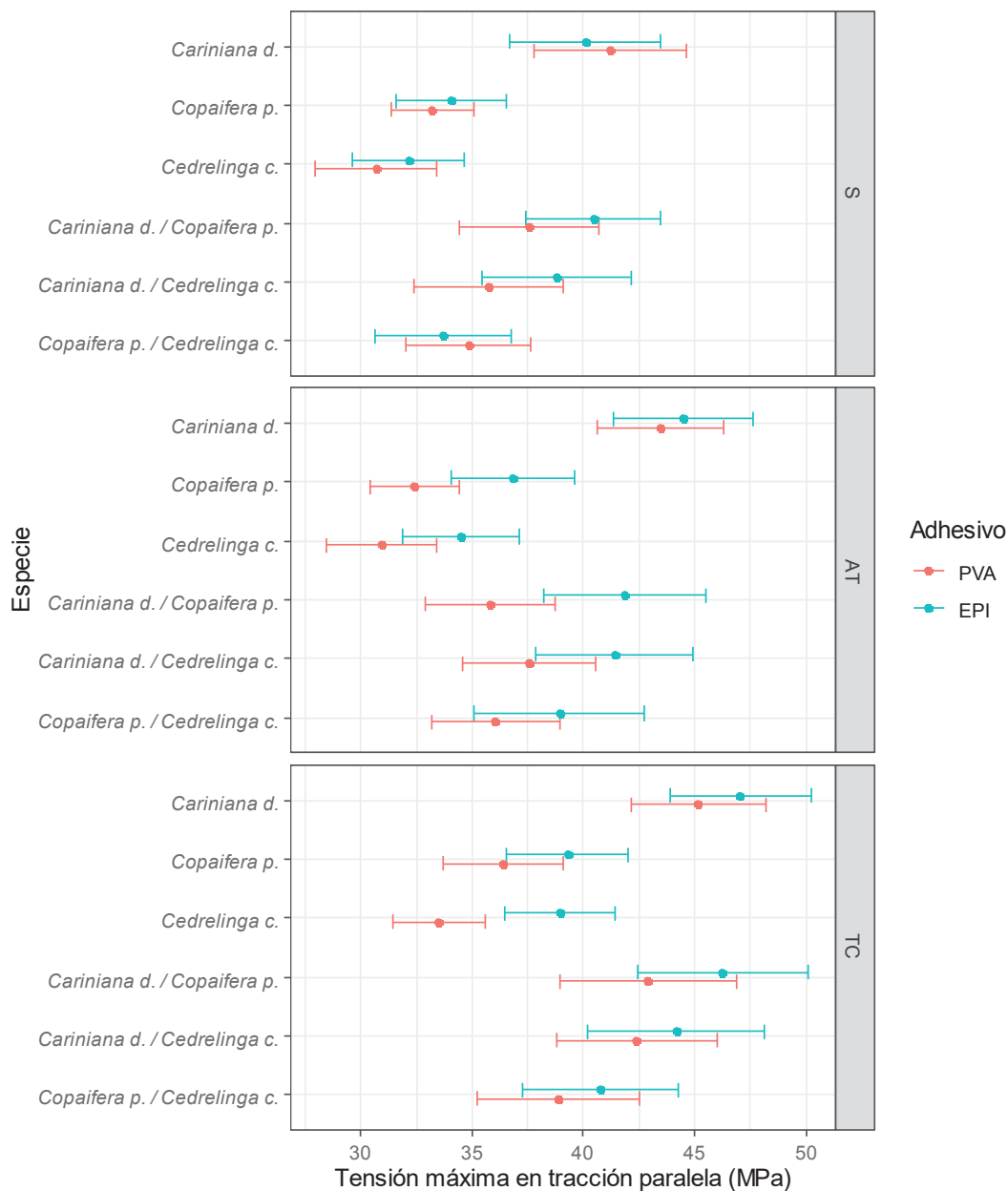
TABLA 18 - RESISTENCIA DE LA TENSIÓN MÁXIMA EN TRACCIÓN PARALELA DE EMPALMES *FINGER JOINT* DE LAS ESPECIES ESTUDIADAS, ENCOLADAS CON ADHESIVOS PVA Y EPI

ESPECIE	ADHESIVO	PT.	TM (MPa)	CV (%)
<i>Cariniana domestica</i>	PVA	S	41,19	18,97
		AT	43,47	14,86
		TC	43,16	15,34
	EPI	S	40,10	19,22
		AT	44,51	16,07
		TC	47,07	15,42
<i>Copaifera paupera</i>	PVA	S	33,22	12,74
		AT	32,41	14,01
		TC	36,40	16,96
	EPI	S	34,07	16,42
		AT	36,83	16,97
		TC	39,29	15,87
<i>Cedrelinga cateniformis</i>	PVA	S	30,68	20,18
		AT	30,92	18,30
		TC	33,51	14,17
	EPI	S	32,14	17,94
		AT	34,51	17,38
		TC	38,98	14,48
<i>Cariniana domestica - Copaifera paupera</i>	PVA	S	37,55	19,16
		AT	35,81	18,50
		TC	42,90	21,14
	EPI	S	40,46	17,06
		AT	41,87	19,74
		TC	46,28	18,88
<i>Cariniana domestica - Cedrelinga cateniformis</i>	PVA	S	35,76	21,39
		AT	37,60	18,13
		TC	42,41	19,55
	EPI	S	38,81	19,78
		AT	41,41	19,58
		TC	44,19	20,57
<i>Copaifera paupera - Cedrelinga cateniformis</i>	PVA	S	34,86	18,37
		AT	36,07	18,43
		TC	38,87	21,52
	EPI	S	33,72	20,64
		AT	38,92	22,42
		TC	40,79	19,61

FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: PT - pretratamientos; S - seco; AT - alta temperatura; TC - tres ciclos en agua; TM - tensión máxima en tracción paralela; CV - coeficiente de variación.

FIGURA 27 - BARRAS DE ERROR (IC 95%) DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN PARALELA PARA ADHESIVOS PVA Y EPI POR ESPECIE, AGRUPADOS POR PRETRATAMIENTO



FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: S - pretratamiento seco; AT - pretratamiento a alta temperatura; TC - pretratamiento de tres ciclos en agua.

Se observa que los valores de resistencia de empalmes *finger joint* a la tracción paralela son mayores a los mínimos indicados como requisitos en la norma ASTM D 5572 (ASTM, 2005), que es de 13,8 MPa, cuando son sometidos al pretratamiento seco y de 6,9 MPa para pretratamientos a alta temperatura y tres ciclos en agua.

Además, se observó que los valores promedio de tracción paralela de empalmes *finger joint* tienen coeficientes de variación menores al 25%, valor máximo señalado por Lisboa, Matos y Melo (1993) para este ensayo con madera sólida, siendo el menor valor obtenido en empalmes de *Copaifera paupera* encolado con adhesivo PVA y pretratamiento seco, con 12,74%; mientras que el mayor valor se encontró en empalmes de *Copaifera paupera/Cedrelinga cateniformis* encolado con adhesivo EPI, luego del pretratamiento de tres ciclos en agua, con 22,42%.

Los resultados encontrados muestran que los empalmes *finger joint* producidos con residuos de las especies estudiadas y sus combinaciones, encolados con adhesivos PVA y EPI, cumplen con los requisitos mínimos de tracción paralela para los pretratamientos seco, alta temperatura y tres ciclos en agua mencionados en la norma ASTM D 5572 (ASTM, 2005).

4.7.1 Con pretratamiento seco

A los resultados de tracción paralela de empalmes *finger joint*, encolados con adhesivos PVA y EPI luego del pretratamiento seco, presentados en la TABLA 18, se les aplicó una transformación tipo raíz cuadrada, obteniéndose un *W* de *Shapiro Wilk* de 0,99 (p-valor asociado de 0,080) y un chi-cuadrado de 2,17 (p-valor asociado de 0,140).

El ANOVA mostró que existe efecto significativo de la variable especie, con un nivel de significancia de 0,05, pero no en la variable adhesivo ($F=1,34$ y $p\text{-valor}=0,248$); además, el efecto de interacción de la variable especie con el adhesivo no resultó significativo ($F=0,75$ y $p\text{-valor}=0,584$). Dado el cumplimiento de los supuestos y la significancia de la variable especie, se realizó la prueba de *Tukey* para esta variable.

La TABLA 19 reporta los valores promedio de resistencia de empalmes *finger joint* a la tracción paralela, coeficientes de variación y porcentajes de falla en la madera para las especies estudiadas, luego del pretratamiento seco.

TABLA 19 - VALORES PROMEDIO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN PARALELA DE LAS ESPECIES ESTUDIADAS, CON PRETRATAMIENTO SECO

ESPECIE	TM (MPa)	CV (%)	FM (%)	F	P
<i>Cariniana domestica</i>	40,65 a	18,89	56		
<i>Cariniana domestica</i> - <i>Copaifera paupera</i>	39,01 a	18,24	74		
<i>Cariniana domestica</i> - <i>Cedrelinga cateniformis</i>	37,28 ab	20,70	66	10,70	0,000
<i>Copaifera paupera</i>	33,64 bc	14,61	74		
<i>Copaifera paupera</i> – <i>Cedrelinga cateniformis</i>	34,29 bc	19,33	80		
<i>Cedrelinga cateniformis</i>	31,41 c	18,95	85		

FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: TM - tensión máxima en tracción paralela; CV - coeficiente de variación; FM - falla en la madera. Las medias seguidas de una misma letra no presentan diferencias significativas para la prueba de *Tukey* con un nivel de confianza de 95%.

La prueba de *Tukey* revela que la *Cariniana domestica*, *Cariniana domestica/Copaifera paupera* y *Cariniana domestica/Cedrelinga cateniformis* muestran los mayores valores de resistencia a la tracción paralela y diferencias significativas con las otras especies estudiadas. A su vez, la *Cariniana domestica/Cedrelinga cateniformis* no muestra diferencias significativas con la *Copaifera paupera* y *Copaifera paupera/Cedrelinga cateniformis*, quienes pertenecen simultáneamente al grupo de menor resistencia, donde se encuentra la *Cedrelinga cateniformis*.

Los resultados de ensayos de empalmes *finger joint* a tracción paralela con las especies estudiadas, al igual que lo observado en el ítem 4.6.1 de los resultados de flexión estática, coinciden con sus propiedades físicas, teniéndose que la *Cariniana domestica*, de mayor masa específica y menor coeficiente de anisotropía, y sus combinaciones exhiben mayores valores de resistencia, mientras que la *Cedrelinga cateniformis*, de menor masa específica y mayor coeficiente de anisotropía, muestra el menor valor encontrado.

Con respecto al porcentaje de falla en la madera, se encontró que todos los ensayos efectuados presentan valores mayores al 30%, que es el requisito mínimo señalado en la norma ASTM D 5572 (ASTM, 2005) para este pretratamiento en latifoliadas. Asimismo, se obtuvo el mayor valor en empalmes *finger joint* con *Cedrelinga cateniformis*, posiblemente por poseer el mayor diámetro tangencial de poros y área relativa de poros, mientras que el menor valor fue para la *Cariniana domestica*, pudiendo deberse a que presenta el menor diámetro tangencial de poros y área relativa de poros.

Estos resultados confirman lo señalado por Burger y Ritcher (1991) y Pizzi y Mittal (2003), quienes afirman que, en el encolado de la madera, cuanto mayor sea el diámetro tangencial de poros que presente una madera, mayor será la aptitud de penetración del adhesivo. Además, Albino, Mori y Mendes (2012), mencionan que la madera que presenta un mayor diámetro tangencial de poros podría facilitar el ingreso del adhesivo en su estructura, logrando que ambas interaccionen, obteniendo una mejor adherencia y resistencia.

4.7.2 Con pretratamiento a alta temperatura

Los valores de resistencia de tracción paralela, señaladas en la TABLA 18, de empalmes *finger joint* encolados con adhesivos PVA y EPI, luego del pretratamiento a alta temperatura, fueron sometidos a las pruebas de normalidad y homocedasticidad, para lo cual se aplicó una transformación tipo raíz cuadrada para el cumplimiento de los supuestos, encontrando un *W* de *Shapiro Wilk* de 0,93 (p-valor asociado de 0,080) y un chi-cuadrado de 2,36 (p-valor asociado de 0,120).

El ANOVA muestra que existen diferencias significativas en las medias al utilizar las diferentes especies y distintos adhesivos, con un nivel de significancia de 0,05. Además, no se encontró diferencias significativas en el efecto interacción especie y adhesivo ($F=0,61$ y $p\text{-valor}=0,692$). Con el cumplimiento de los supuestos y la significancia de las variables especie y adhesivo, se realizó la prueba de *Tukey* para ambas variables.

En la TABLA 20 se presentan los valores promedio de resistencia a la tracción paralela, coeficientes de variación y porcentajes de falla en la madera de empalmes *finger joint* para las especies estudiadas, luego del pretratamiento a alta temperatura.

TABLA 20 - VALORES PROMEDIO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN PARALELA DE LAS ESPECIES ESTUDIADAS, CON PRETRATAMIENTO A ALTA TEMPERATURA

ESPECIE	TM (MPa)	CV (%)	FM (%)	F	P
<i>Cariniana domestica</i>	43,99 a	15,34	49		
<i>Cariniana domestica</i> - <i>Copaifera paupera</i>	38,84 bc	20,61	58		
<i>Cariniana domestica</i> - <i>Cedrelinga cateniformis</i>	39,50 ab	19,34	59	13,28	0,000
<i>Copaifera paupera</i>	34,62 cd	16,87	55		
<i>Copaifera paupera</i> - <i>Cedrelinga cateniformis</i>	37,50 bc	20,78	64		
<i>Cedrelinga cateniformis</i>	32,71 d	18,45	62		

FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: TM - tensión máxima en tracción paralela; CV - coeficiente de variación; FM - falla de la madera. Las medias seguidas de una misma letra no presentan diferencias significativas para la prueba de *Tukey* con un nivel de confianza de 95%.

La prueba de *Tukey* indica que los resultados de resistencia a la tracción paralela de empalmes *finger joint* de la *Cariniana domestica* y *Cariniana domestica/Cedrelinga cateniformis* presentan los mejores resultados. Asimismo, la *Copaifera paupera* no es estadísticamente diferente de la *Copaifera paupera/Cedrelinga cateniformis* y *Cariniana domestica/Copaifera paupera*; sin embargo, estas últimas combinaciones tienen resultados mayores que la *Cedrelinga cateniformis*. Además, la *Cariniana domestica/Cedrelinga cateniformis*, *Cariniana domestica/Copaifera paupera* y *Copaifera paupera/Cedrelinga cateniformis* no presentan diferencias estadísticas significativas.

Los resultados de tracción paralela para este pretratamiento con las especies evaluadas indican, al igual que los encontrados para pretratamiento seco y para los pretratamientos utilizados en los ensayos de flexión estática señalados en el ítem 4.6.1, una cierta concordancia de sus propiedades físicas. Además, se aprecia que la *Cariniana domestica*, con mayor masa específica y menor coeficiente de anisotropía, y sus combinaciones, presentan los mayores valores de resistencia; mientras que la *Cedrelinga cateniformis*, que posee menor masa específica y mayor coeficiente de anisotropía, muestra el menor valor de resistencia.

Con respecto al porcentaje de falla en la madera, la norma ASTM D 5572 (ASTM, 2005) no considera valores mínimos que deben cumplir para este pretratamiento.

Asimismo, se realizó un ANOVA para evaluar el efecto de los adhesivos PVA y EPI en los resultados de resistencia a la tracción paralela. La TABLA 21 presenta los valores promedio de resistencia a la tracción paralela y coeficientes de variación de los adhesivos utilizados con pretratamiento a alta temperatura.

TABLA 21 - VALORES PROMEDIO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN PARALELA PARA LOS ADHESIVOS PVA Y EPI, CON PRETRATAMIENTO A ALTA TEMPERATURA

ADHESIVO	TM (MPa)	CV (%)	F	P
PVA	36,05a	20,17	16,63	0,000
EPI	39,67b	20,30		

FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: TM - tensión máxima en tracción paralela; CV - coeficiente de variación. Las medias seguidas de una misma letra no presentan diferencias significativas para la prueba de *Tukey* con un nivel de confianza de 95%.

Los resultados muestran que el valor promedio de resistencia a la tracción paralela para todas las especies y combinaciones encoladas con adhesivo EPI fue significativamente superior al encontrado con PVA.

Al respecto, Vick (1999), Conner (2001), Zimmerman (2006) y Frihart y Hunt (2010), mencionan que el adhesivo EPI presenta una alta resistencia a la humedad y temperatura, debido a que el fraguado se produce mediante la reacción de los grupos isocianatos con los grupos hidroxilo de la madera. De otro lado, el adhesivo PVA, por ser termoestable, forma una línea de cola muy resistente mecánicamente, pero muy rígida y poco resistente a la humedad (BANDEL, 1991; VIGNOTE; MARTINEZ, 2006).

4.7.3 Con pretratamiento de tres ciclos en agua

La TABLA 18 muestra los valores de resistencia a la tracción paralela de empalmes *finger joint* encolados con adhesivos PVA y EPI, luego del pretratamiento de tres ciclos en agua; se les aplicó una transformación tipo raíz cuadrada para el cumplimiento de los supuestos, obteniéndose un *W* de *Shapiro Wilk* de 0,99 (p-valor asociado de 0,228), y un chi-cuadrado de 3,09 (p-valor asociado de 0,078).

El ANOVA indica que existen diferencias significativas en las medias de resistencia a la tracción paralela al usar las diferentes especies y distintos adhesivos, con un nivel de significancia de 0,05. Por otro lado, el efecto interacción especie y adhesivo no resultó significativo ($F=0,44$ y $p\text{-valor}=0,821$). Al cumplirse los supuestos de normalidad y homocedasticidad y la significancia de las variables especie y adhesivo, se efectuó la prueba de *Tukey* para ambas variables.

La TABLA 22 presenta los valores promedio de resistencia de empalmes *finger joint* a la tracción paralela, coeficientes de variación y porcentajes de falla en la madera para las especies estudiadas, luego del pretratamiento de tres ciclos en agua.

TABLA 22 - VALORES PROMEDIO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN PARALELA DE LAS ESPECIES ESTUDIADAS, CON PRETRATAMIENTO DE TRES CICLOS EN AGUA

ESPECIE	TM (MPa)	CV (%)	FM (%)	F	P
<i>Cariniana domestica</i>	46,12 a	15,33	73		
<i>Cariniana domestica - Copaifera paupera</i>	44,59 ab	20,08	63		
<i>Cariniana domestica - Cedrelinga cateniformis</i>	43,30 ab	19,94	63	11,00	0,000
<i>Copaifera paupera</i>	37,84 c	16,64	68		
<i>Copaifera paupera - Cedrelinga cateniformis</i>	39,83 bc	20,43	71		
<i>Cedrelinga cateniformis</i>	36,24 c	16,13	80		

FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: TM - tensión máxima en tracción paralela; CV - coeficiente de variación; FM - falla en la madera. Las medias seguidas de una misma letra no presentan diferencias significativas para la prueba de *Tukey* con un nivel de confianza de 95%.

Los resultados de la prueba de *Tukey* muestran que la *Cariniana domestica*, *Cariniana domestica/Copaifera paupera* y *Cariniana domestica/Cedrelinga cateniformis* tienen los mayores valores de tracción paralela y presentan diferencias significativas con las otras especies evaluadas. Asimismo, la *Copaifera paupera* no presenta diferencias significativas con *Copaifera paupera/Cedrelinga cateniformis* ni con *Cedrelinga cateniformis*, quienes tienen los menores valores de resistencia.

Los valores de resistencia a la tracción paralela de las especies evaluadas, de forma similar a los resultados obtenidos para los pretratamientos seco y alta temperatura, así como para los pretratamientos utilizados en los ensayos de flexión estática, coinciden con sus propiedades físicas. Al respecto,

la *Cariniana domestica*, por tener la mayor masa específica y menor coeficiente de anisotropía, y en las combinaciones donde se utiliza, tienen los mayores valores de resistencia, mientras que la *Cedrelinga cateniformis*, que reporta la menor masa específica y mayor coeficiente de anisotropía, presenta la menor resistencia.

En lo referente al porcentaje de falla de la madera para este pretratamiento, se encontró que todos los valores cumplen con el requisito mínimo de 15% mencionado en la norma ASTM D 5572 (ASTM, 2005). Asimismo, se reportó un mayor porcentaje en empalmes *finger joint* de la *Cedrelinga cateniformis*, probablemente por poseer mayor diámetro tangencial de poros y área relativa de poros, que permite una mejor penetración y anclaje de los adhesivos.

Además, se efectuó un ANOVA para evaluar el efecto de los adhesivos PVA y EPI en los resultados de resistencia de empalmes *finger joint* a la tracción paralela. En la TABLA 23 se presentan los valores promedio de resistencia a la tracción paralela y coeficientes de variación de los adhesivos utilizados con pretratamiento de tres ciclos en agua.

TABLA 23 - VALORES PROMEDIO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN PARALELA PARA LOS ADHESIVOS PVA Y EPI, CON PRETRATAMIENTO DE TRES CICLOS EN AGUA

ADHESIVO	TM (MPa)	CV (%)	FM (%)	F	P
PVA	39,87 a	20,83	67	9,31	0,003
EPI	42,77 b	18,99	72		

FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: TM - tensión máxima en tracción paralela; CV - coeficiente de variación; FM - falla en la madera. Las medias seguidas de una misma letra no presentan diferencias significativas para la prueba de *Tukey* con un nivel de confianza de 95%.

Los resultados indican que el valor promedio de resistencia a la tracción paralela para todas las especies y combinaciones, encoladas con adhesivo EPI, fue significativamente mayor al obtenido con PVA.

Las diferencias en los valores de resistencia a la tracción paralela obtenidos con adhesivos EPI y PVA pueden deberse a los aspectos indicados en el ítem 4.6.3, donde se explica un comportamiento similar al encontrado para los ensayos de flexión estática luego del pretratamiento de tres ciclos en agua.

En los resultados del porcentaje de falla en la madera, se observó que los empalmes *finger joint* encolados con adhesivo EPI muestran mayores valores al compararlos con los reportados para el PVA, lo cual puede deberse a las características químicas y físicas del adhesivo EPI, que por ser termorrígido, tiene una mayor resistencia a la temperatura y a altas condiciones de humedad; no ocurriendo lo mismo con PVA, que es termoplástico y presenta limitaciones en sus condiciones de uso.

4.7.4 Efecto de los pretratamientos

En la TABLA 24 se presenta el efecto de los pretratamientos en los resultados de tensión máxima en tracción paralela, de empalmes *finger joint* de las especies estudiadas, encoladas con adhesivos PVA y EPI.

TABLA 24 - EFECTO DE LOS PRETRATAMIENTOS EN LOS RESULTADOS DE TRACCIÓN PARALELA EN LAS ESPECIES ESTUDIADAS ENCOLADAS CON ADHESIVOS PVA Y EPI

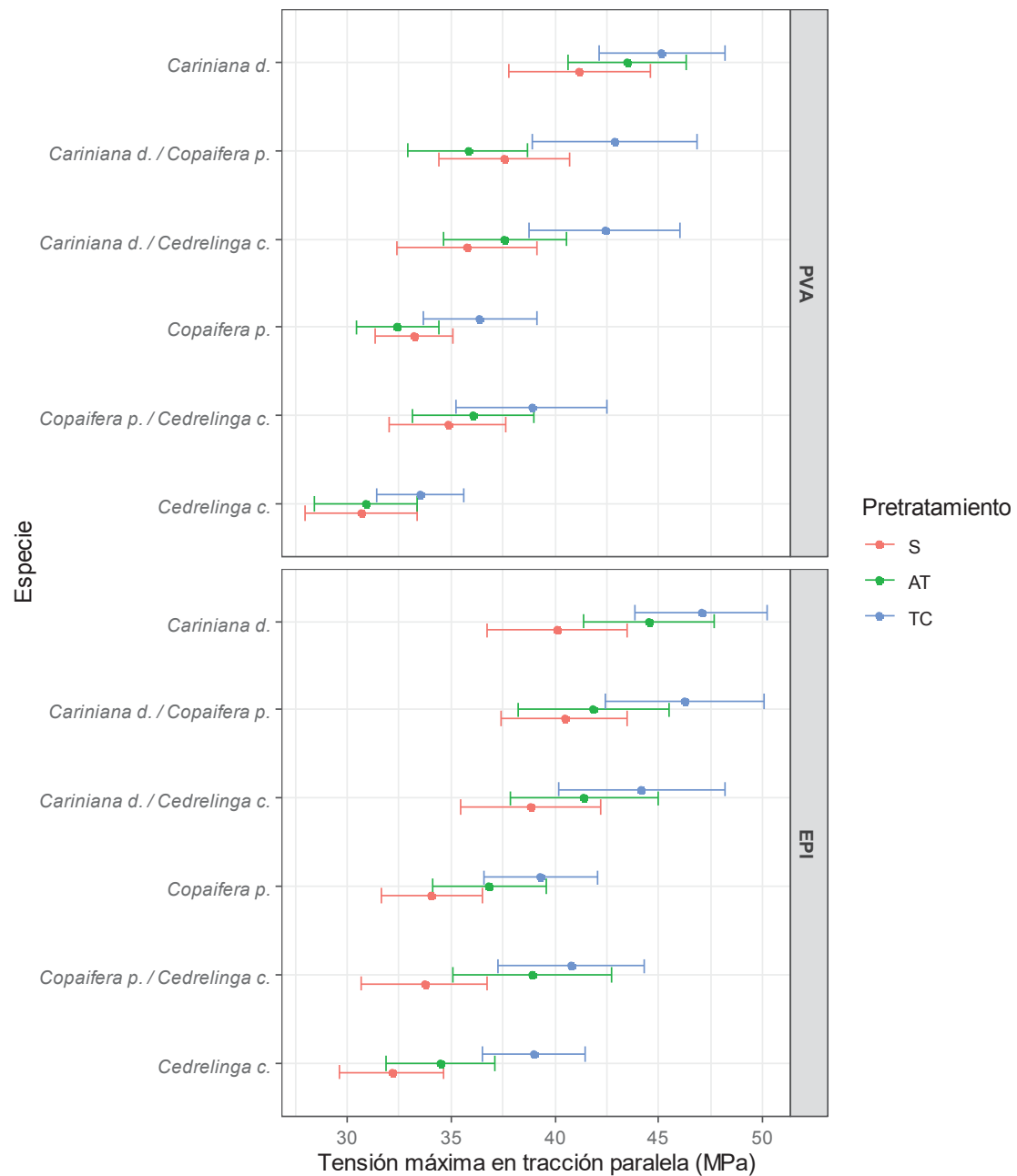
ESPECIE	PT	ADHESIVO PVA			ADHESIVO EPI		
		TM (MPa)	F	P	TM (MPa)	F	P
<i>Cariniana domestica</i>	S	41,19 a			40,10 b		
	AT	43,47 a	1,58	0,22	44,51 ab	4,57	0,01
	TC	45,16 a			47,07 a		
<i>Cariniana domestica - Copaifera paupera</i>	S	37,55 ab			40,46 a		
	AT	35,81 b	4,60	0,01	41,87 a	2,87	0,06
	TC	42,90 a			46,28 a		
<i>Cariniana domestica - Cedrelinga cateniformis</i>	S	35,76 b			38,81 a		
	AT	37,60 b	4,06	0,02	41,41 a	2,10	0,13
	TC	42,41 a			44,19 a		
<i>Copaifera paupera</i>	S	33,22 ab			34,07 b		
	AT	32,41 b	3,48	0,04	36,83 ab	3,75	0,03
	TC	36,40 a			39,29 a		
<i>Copaifera paupera - Cedrelinga cateniformis</i>	S	34,86 a			33,72 b		
	AT	36,07 a	1,64	0,20	38,92 ab	4,28	0,02
	TC	38,87 a			40,79 a		
<i>Cedrelinga cateniformis</i>	S	30,67 a			32,14 b		
	AT	30,92 a	1,59	0,21	34,51 b	7,16	0,00
	TC	33,51 a			38,98 a		

FUENTE: El autor (2019).

NOTAS: PT - pretratamiento; S - seco; AT - alta temperatura; TC - tres ciclos en agua; TM - tensión máxima en tracción paralela. Las medias seguidas de una misma letra en una misma columna no presentan diferencias significativas para la prueba de *Tukey* con un nivel de confianza de 95%.

Además, en la FIGURA 28 se muestra el diagrama de barras de error con un intervalo de confianza (IC) al 95%, del efecto de los pretratamientos en los valores de tensión máxima en tracción paralela de las especies estudiadas.

FIGURA 28 - BARRAS DE ERROR (IC 95%) DEL EFECTO DE LOS PRETRATAMIENTOS EN LOS RESULTADOS DE TENSIÓN MÁXIMA EN TRACCIÓN PARALELA



FUENTE: El autor (2020).

NOTAS: S - pretratamiento seco; AT - pretratamiento a alta temperatura; TC - pretratamiento de tres ciclos en agua.

En los resultados de los ensayos de tracción paralela con adhesivo PVA, se observa que el efecto entre pretratamientos utilizados fue significativo, con un nivel de confianza de 95%, para empalmes *finger joint* de la *Cariniana domestica/Copaifera paupera*, *Cariniana domestica/Cedrelinga cateniformis* y *Copaifera paupera*; mientras para el adhesivo EPI fueron significativos con *Cariniana domestica*, *Copaifera paupera*, *Cedrelinga cateniformis* y *Copaifera paupera/Cedrelinga cateniformis*. Además, la prueba de *Tukey* muestra que no existe diferencia estadística entre los pretratamientos seco y alta temperatura con los adhesivos PVA y EPI.

La explicación del comportamiento de los pretratamientos realizados en los resultados en tracción paralela en el presente estudio, son similares a los expuestos para los ensayos realizados en flexión estática.

Prata (2010), para ensayos de resistencia a la tracción paralela de empalmes *finger joint* elaborados con *Pinus taeda*, *Pinus maximinoi*, *Pinus tecunumannii*, y *Pinus caribaea hondurensis*, encolados con adhesivo PVA, reportó mayores valores promedio con pretratamiento de tres ciclos en agua (27,85, 36,26, 39,23 y 38,21 MPa), seguido de los obtenidos para alta temperatura (25,52, 28,90, 35,33 y 32,91 MPa) y en último lugar para el pretratamiento seco (24,54, 27,42, 29,46 y 30,37 MPa).

Almeida (2015), en los resultados de ensayos a tracción paralela de empalmes *finger joint* del *Cupressus lusitánica*, encolados con adhesivo PVA, obtuvo valores promedio de 9,37 MPa para pretratamiento seco y de 13,86 MPa para pretratamiento a alta temperatura. Estos resultados fueron inferiores a los mínimos alcanzados en las especies utilizadas en el presente estudio (30,67 y 30,92 MPa), lo cual podría explicarse por la menor masa específica básica y aparente (0,40 y 0,48 g/cm³) del *Cupressus lusitánica*, comparado con las que tienen las especies estudiadas (0,48 a 0,60 g/cm³ y de 0,59 a 0,76 g/cm³ respectivamente) y de la menor longitud del diente *finger joint* utilizado para los empalmes *finger joint*.

Juizo (2015), al estudiar el uso de residuos del aserrío del *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus saligna* para el encolado con adhesivo PVA de empalmes *finger joint*, encontró valores promedio de resistencia a la tracción paralela de 35,26, 32,25 y 24,71 MPa con pretratamientos seco, alta temperatura y tres

ciclos en agua respectivamente; los cuales se encuentran dentro de los rangos obtenidos con las especies evaluadas en el presente estudio para pretratamientos seco (30,67 a 41,19 MPa) y alta temperatura (30,92 a 43,17 MPa), pero menor a los alcanzados para el pretratamiento de tres ciclos en agua (33,51 a 45,16 MPa).

Fonte (2016) realizó ensayos de resistencia a la tracción paralela con empalmes *finger joint* elaborados con *Cryptomeria japonica*, utilizando el adhesivo PVA D4, obteniendo valores promedio de 21,30, 20,80 y 24,40 MPa con pretratamientos seco, alta temperatura y tres ciclos en agua respectivamente, que son inferiores a los mínimos encontrados para los tres tratamientos efectuados con las especies evaluadas en esta investigación, que fueron de 30,67, 30,92 y 33,51 MPa con pretratamientos seco, alta temperatura y tres ciclos en agua respectivamente.

Lau (2017) obtuvo, para ensayos de resistencia a la tracción paralela de empalmes *finger joint* de *Populus deltoides* encolados con adhesivo PVA, valores promedio de 24,91, 12,49 y 6,18 MPa con pretratamientos seco, alta temperatura y tres ciclos en agua respectivamente; encontrándose que los resultados obtenidos en los tres pretratamientos son menores a los mínimos valores reportados para las especies evaluadas en el presente estudio, que fueron de 30,67, 30,92 y 33,51 MPa; este comportamiento se podría explicar porque el *Populus deltoides* muestra una menor masa específica básica ($0,33 \text{ g/cm}^3$) y un mayor coeficiente de anisotropía (2,52), al compararlo con las que presentan las especies utilizadas en la presente investigación.

Al contrastar los resultados del efecto de los pretratamientos en los ensayos de flexión estática y tracción paralela, se observa que generalmente se mantiene la tendencia, para ambos adhesivos, de tener una mayor resistencia luego del pretratamiento de tres ciclos en agua, seguido de los sometidos a alta temperatura y finalmente los ensayados con pretratamiento seco.

Con el adhesivo PVA, el efecto de los pretratamientos fue significativo, con un nivel de confianza de 95%, para la *Copaifera paupera* en los ensayos de flexión estática y tracción paralela, mientras que para la *Cedrelinga cateniformis* solo en flexión estática. Finalmente, los pretratamientos tuvieron

un efecto significativo para las combinaciones *Cariniana domestica/Copaifera paupera* y *Cariniana domestica/Cedrelinga cateniformis* solo para tracción paralela.

Asimismo, para el adhesivo EPI, el efecto de los pretratamientos en los dos ensayos realizados fue significativo para *Copaifera paupera*, *Cedrelinga cateniformis*, *Copaifera paupera/Cedrelinga cateniformis*, mientras que para flexión estática fue significativo además para *Cariniana domestica/Copaifera paupera* y para tracción paralela la *Cariniana domestica*.

Finalmente, se encontró que, cuanto más drástico era el pretratamiento al que eran sometidos las probetas de empalmes *finger joint*, para los ensayos de flexión estática y tracción paralela, e independientemente del tipo de adhesivo, mejor era su resistencia, lo cual podría deberse a las diferentes interacciones entre el adhesivo y la ultraestructura de la madera, ya que con el PVA se obtendría un mejor enlace del adhesivo con la estructura de la madera; así como por la modificación de su estructura, por la menor cantidad de grupos hidroxilos disponibles.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base a los resultados encontrados en esta investigación, se presentan las siguientes conclusiones:

Los residuos de las tres especies estudiadas muestran características anatómicas que permiten un anclaje adecuado de los adhesivos empleados, lográndose una buena adherencia y resistencia.

El contenido de humedad de los residuos de las tres especies evaluadas se encuentra dentro de los rangos recomendados para la fabricación de paneles EGP con los adhesivos utilizados.

Los valores de masa específica de las especies estudiadas influyeron en cierto grado en los resultados de resistencia mecánica, sobre todo en los ensayos de flexión estática y tracción paralela, donde se obtuvieron mayores valores de resistencia en la *Cariniana domestica*, quien tiene la mayor masa específica, y menores en la *Cedrelinga cateniformis*, quien muestra la menor masa específica.

La especie *Cariniana domestica* reportó el menor coeficiente de anisotropía, siendo clasificada como excelente, mientras que la *Copaifera paupera* y *Cedrelinga cateniformis* son clasificadas como normales; asimismo, se apreció una cierta influencia de dicha propiedad sobre los resultados obtenidos en los ensayos de flexión estática y tracción paralela.

Los mayores valores de extractivos totales, pH y contenido de cenizas lo presentó la especie *Copaifera paupera*; sin embargo, no se apreció una influencia directa de estos resultados en las características de calidad de las juntas y empalmes encolados evaluados con las tres especies estudiadas.

Las juntas encoladas con adhesivo PVA de las especies y combinaciones estudiadas, luego del pretratamiento en ambiente seco, no cumplen con los requisitos mínimos de resistencia al cizallamiento indicados en la norma UNE-EN 13353.

Las juntas encoladas con adhesivo EPI de las especies y combinaciones estudiadas, a excepción de la *Cariniana domestica/Copaifera paupera*, cumplen con el valor mínimo para el quinto percentil inferior señalado en la norma UNE-EN 13353, luego del pretratamiento en ambiente seco.

Las juntas encoladas con adhesivo EPI de las especies *Cariniana domestica*, *Copaifera paupera* y *Cariniana domestica/Cedrelinga cateniformis* cumplen con el valor mínimo para el quinto percentil inferior mencionado en la norma UNE-EN 13353, luego del pretratamiento en ambiente húmedo.

Las juntas encoladas de las especies y combinaciones estudiadas, a excepción de las conformadas por la *Cedrelinga cateniformis*, cumplen con el requisito de resistencia de falla en la madera para los ensayos de cizallamiento indicado en la norma UNE-EN 13353, por presentar una masa específica aparente mayor a 0,60 g/cm³.

Los empalmes *finger joint* elaborados con las tres especies y combinaciones, encolados con adhesivos PVA y EPI, cumplen con los requisitos mínimos de resistencia a la flexión estática y tracción paralela para los pretratamientos señalados en la norma ASTM D 5572, para uso no estructural seco.

Es viable elaborar paneles EGP con residuos de las especies y combinaciones estudiadas, para uso no estructural seco y húmedo.

Para uso no estructural seco, se propone el empleo de las especies *Cariniana domestica*, *Copaifera paupera*, *Cedrelinga cateniformis*, *Cariniana domestica/Cedrelinga cateniformis* y *Copaifera paupera/Cedrelinga cateniformis*, utilizando el adhesivo EPI para el encolado de las juntas laterales, así como el PVA para los empalmes *finger joint*, con el fin de reducir costos de fabricación.

Para uso no estructural húmedo, se plantea el uso de las especies *Cariniana domestica*, *Copaifera paupera* y *Cariniana domestica/Cedrelinga cateniformis*, empleando el adhesivo EPI para el encolado de las juntas laterales y de los empalmes *finger joint*.

Además, se indican las siguientes recomendaciones:

Realizar un estudio sobre la viabilidad económica del uso de residuos de las maderas estudiadas en la manufactura de paneles EGP.

Desarrollar estudios sobre la fabricación de paneles EGP, utilizando diferentes gramajes y niveles de presión específica, con el fin de reducir costos de manufactura.

Evaluar la posibilidad de elaborar paneles EGP con residuos de otras especies maderables, utilizando diversos tipos de adhesivos actualmente comercializados en el mercado nacional.

REFERENCIAS

- ACEVEDO, M.; KIKATA, Y. **Atlas de maderas del Perú**. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina, Universidad de Nagoya, 1994.
- AKZONOBEL PERÚ S.A.C. **Información del producto EPI 1911 con HARDENER 1999**. Casco Adhesives. v. 2. Medellín. 2010.
- AKZONOBEL PERÚ S.A.C. **Información del producto PVA 3010**. Casco Adhesives. v. 2. Medellín. 2013.
- ALBINO, V. C. S. MORI, F. A.; MENDES, L. M. 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**, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 803 -811, 2012.
- ALBUQUERQUE, C. E. C.; LATORRACA, J. V. F. Influência das características anatômicas da madeira na penetração e adesão de adesivos. **Floresta e Ambiente**, v. 7, n. 1, p.158-166, 2000.
- ALBUQUERQUE, C. E. C.; LATORRACA, J. V. F. Colagem varia de acordo com propriedades da madeira. REMADE. **Revista da Madeira**. Ed. N° 88, março. 2005.
- ALMEIDA, V. C. **Efeito da adição de carga e extensor nas propriedades do adesivo uréia-formaldeído e dos compensados de pinus e paricá**. 2009, 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.
- ALMEIDA, V. C. **Avaliação do potencial de uso de resíduos de madeira tropical para produção de painéis colados lateralmente – EGP**. 2013. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- ALMEIDA, C. C. F. **Avaliação da qualidade da colagem da madeira de *Cupressus lusitanica* Mill. para a produção de painéis colados lateralmente (EDGE GLUED PANEL – EGP)**. 2015. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2015.
- ALVAREZ, E.; DÍAZ, S.; ALESSANDRINI, M. Utilización racional de los residuos forestales. Unasyuva N° 206. **Revista internacional de silvicultura e industrias forestales**. v. 52 – 2001/3. FAO, Roma, 2001.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS- **ASTM. 1084**: Standard test methods for viscosity of adhesives. 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS- **ASTM D 5572**: Standard specification for adhesives used for *finger joints* in nonstructural lumber products. 2005.

ARÓSTEGUI, A. **Características tecnológicas y usos de la madera de 145 especies del país. Vol I. Estudio tecnologico de maderas del Perú (Zona Pucallpa)**. Lima: Dirección General de Investigación – Ministerio de Agricultura, Universidad Nacional Agraria La Molina, 1974.

ARÓSTEGUI, A. **Recopilación y análisis de estudios tecnológicos de maderas peruanas**. Lima: Documento de trabajo N° 2, Proyecto PNUD/FAO/PER/81/002, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7203**: madeira serrada e beneficiada. São Paulo, 1982.

ASOCIACION ESPAÑOLA DE NORMALIZACION Y CERTIFICACION – AENOR. **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. 1995.

ASOCIACION ESPAÑOLA DE NORMALIZACION Y CERTIFICACION – AENOR. **UNE-EN 827**. Adhesivos. Determinación del contenido en sólidos convencional y del contenido en sólidos a masa constante. Madrid. 2006.

ASOCIACION ESPAÑOLA DE NORMALIZACION Y CERTIFICACION – AENOR. **UNE-EN 314-1**. Tableros contrachapados. Calidad del encolado. Parte 1: Métodos de ensayo. Madrid. 2007.

ASOCIACION ESPAÑOLA DE NORMALIZACION Y CERTIFICACION – AENOR. **UNE-EN 13354**. Tableros de madera maciza. Calidad de encolado. Método de ensayo. Madrid. 2009.

ASOCIACION ESPAÑOLA DE NORMALIZACION Y CERTIFICACION – AENOR. **UNE-EN 13353:2009+A1**. Tableros de madera maciza. (SWP). Requisitos. Madrid. 2011a.

ASOCIACION ESPAÑOLA DE NORMALIZACION Y CERTIFICACION – AENOR. **UNE-EN 1245**. Adhesivos. Determinación del pH. Madrid. 2011b.

ASOCIACION ESPAÑOLA DE NORMALIZACION Y CERTIFICACION- AENOR. **UNE-EN 204**. Clasificación de adhesivos termoplásticos para madera de uso no estructural. Madrid. 2016.

ASOCIACIÓN DE INVESTIGACIÓN DE LAS INDUSTRIAS DE LA MADERA - AITIM. ¿Cómo trabajan los adhesivos? **Boletín de Información Técnica**. N° 194. Madrid. 1998.

BAEZA, J.; FREER, J. Chemical characterization of wood and its components. In: HON, D. N. S.; SHIRAIISHI, N. **Wood and cellulosic chemistry**. 2nd ed., rev. and expanded. New York: Marcel Dekker, 2001.

BANDEL, A. **Adesivos y tecnologia del encolado en la industria de la madera**, 288 p. Milano, 1991.

BIERMANN, C. J. **Handbook of pulping and papermaking**. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 1996.

BILA, N. F. **Avaliação da qualidade de juntas coladas de seis espécies de madeiras tropicais da Amazônia**. 2014. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

BODERO, L., R. **Guía de operaciones de una empresa maderera para la fabricación de pisos**. 2014. 52 p. Trabajo profesional (Título de Ingeniero Forestal). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, 2014.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artmed. 2003.

CAMPELO, S.; IWAKIRI, S.; TRIANOSKI, R.; AGIAR, O. R. Utilização da madeira de *Genipa americana* para produção de painéis de colagem lateral EGP. **Floresta**. Curitiba, v. 47, n 1, p. 129 – 135, 2017.

CANCHANYA, J. J. **Determinación del coeficiente de rendimiento en el aserrio de madera para la especie leche caspi (*Brosimum utile* Ducke C.C. Berg) Villa Rica - Perú**. 2011. 122 p. Tesis (Título de Ingeniero en Recursos Naturales Renovables). Facultad de Recursos Naturales Renovables. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María. 2011.

CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; PEREIRA, F. A. Adesivos e sua importância na indústria madeireira. In: **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro II**. Eds.: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. Vitória: Gráfica Aquarius, p. 99-128, 2007.

CASANA, S.; PRIETO, H. C. **Producción más limpia en la manufactura de crucetas de madera**. 2008. 87 p. Trabajo de Investigación (Título de Ingeniero forestal). Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, 2008.

CLAUß, S.; JOSCAK, M.; NIEMZ, P. Thermal stability of glued wood joints measured by shear tests. **Eur. J. Wood Prod.** Zurich, n. 69, p. 101–111, 2011.

CONFEDERACIÓN ESPAÑOLA DE EMPRESARIOS DE MADERA - CONFEMADERA. **Guía Sobre la recuperación de residuos de madera**.

Valorizar madeira, alargar su ciclo de vida. Madrid: Grupo industrial de Artes Gráficas, 2004.

CONFEDERACIÓN ESPAÑOLA DE EMPRESARIOS DE MADERA - CONFEMADERA. **Soluciones medioambientales en carpintería y mueble.** Madrid: Grupo industrial de Artes Gráficas, 2009.

CONNER, A. H. **Wood: Adhesives.** Encyclopedia of Materials: Science and Technology. New York: Elsevier Science. 2001.

DEL MENEZZI, C. H. S.; NAHUZ, M. A. R.; SOUZA, M. R. Utilização de um método combinado de desdobro e secagem para obtenção de madeira serrada de eucalipto destinada à produção de painéis colados lateralmente. **Árvore**, Viçosa, MG v. 25, n. 1, p.113-123, 2001.

DEVRIES, K. L.; BORGMEIER, P. R. Testing of Adhesives. In PIZZI, A; MITTAL, K.L. **Handbook of adhesive technology.** 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2003.

DONOVAN, C. T. **Opportunities and constraints associated with using wood waste for fuel in Connecticut.** Connecticut: Office of Policy & Management. Energy Division, C. T. Donovan Associates, Atlantis, Inc, Environmental Risk Limited, 1990.

DURLO, M. A.; MARCHIORI, J. N. C. **Tecnologia da madeira:** retratibilidade. Santa Maria: CEPEF/FATEC, 1992. 33 p. Serie técnica 10.

ENDO C.; TRIANOSKI R.; IWAKIRI S. Produção de EGP com diferentes adesivos PVAc e sistemas de prensagem. **Floresta e Ambiente.** v. 24, 2017.

FAHN, A. **Plant anatomy.** Oxford: Pergamon, 1982.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **Aprovechamiento potencial de los residuos de madera para la producción de energía.** Roma: Estudio FAO MONTES 93. Conservación de energía en las industrias mecánicas forestales, 1991.

FINOTTI, A. R., SCHNEIDER, V. E., WANDER, P. R., HILLIG, É., SILVA, M. D. A. Uso energético de resíduos de madeira na cadeia produtiva de madeira/móveis e possibilidades de geração de créditos de carbono. In: **Pólo Moveleiro da Serra Gaúcha - Sistemas de gerenciamento ambiental na indústria moveleira.** Schneider, V. E., Nehme, M. C., Ben. F. Orgs. Educ, p. 191-230, 2006.

FIORELLI, J., **Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira.** Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Instituto de Química e Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2002.

FOLLRICH, J.; VAY, O.; VEIGEL, S.; MÜLLER, U. Bond strength of end-grain joints and its dependence on surface roughness and adhesive spread. **J Wood Sci.** n. 56, p.429–434, 2010.

FONTE, A. P. N. **Utilização da madeira de *Cryptomeria japonica* para a produção de painéis colados lateralmente e aplicação de acabamento superficial.** 2016. 185 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

FRAZIER, C. E. Isocyanate wood binders. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of adhesive technology.** 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2003.

FRIHART, C. R. Wood adhesion and adhesives. In: ROWELL, R.M. **Handbook of wood chemistry and wood composites.** Cap.9, p. 215-278. CRC Press: Madison, 2005.

FRIHART, C. R.; HUNT, C. G. Adhesives with wood materials: bond formation and performance. In: Forest Products Laboratory. **Wood Handbook – Wood as an engineering material.** Ed. Centenária. Madison: USDA, 2010. p. 10-1; 10-24.

FRIHART, C. R.; BEECHER, J. F. **Factors that lead to failure with wood adhesive bonds.** World conference on timber engineering. WCTE 2016. August 22 – 25, Vienna, 2016.

GADNER, D. J. Adhesion mechanisms of durable wood adhesive bonds. In: STOKKE, D. D.; GROOM, L. H. **Characterization of the cellulosic cell wall.** Cap. 19. p. 254-265. Iowa. 2006.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I.P. **Secagem racional da madeira.** São Paulo: Nobel, 1985.

GARCÍA, L.; GUINDEO, A.; PERAZA, C.; DE PALACIOS, P. **La Madera y su anatomía.** Madrid: Fundación Conde Del Valle Del Mar – AITIM, Mundi – Prensa. 2003.

GARCÍA, L; GARCÍA, F; GUINDEO, A; DE PALACIOS, P; GRIL, J. Comparison of the hygroscopic behaviour of 205-year-old and recently cut juvenile wood from *Pinus sylvestris* L. **Annals of Forest Science**, v. 63, p. 309-317. 2006.

GARCIA, A.; RECH, M. Adesivos para a madeira e móveis. REMADE. **Revista da madeira.** Ed. N° 128. Agosto 2011.

GASPAR, F.; CRUZ, H.; NUNES, L.; GOMES, A. **Fabrico de estruturas lameladas-coladas com madeira de Pinho bravo tratada em autoclave.** 5º Congresso Florestal Nacional, Viseu, 2005.

GINDEO, A; GARCÍA, L. Fatiga higroscópica y dimensional de la madera. **Materiales de construcción**, v. 41, n. 221, p. 115-119. 1991.

GLASS, S. V.; ZELINKA, S. L. Moisture relations and physical properties of wood. In: **Wood handbook—Wood as an engineering material**. Madison, USDA, 2010. P. 4.1; 4-19.

GONÇALVES, F. G.; SEGÚNDINHO, P. G. de A.; SCHAYDER, L. F.; TINTI, V. P.; SANTIAGO, S. B. Avaliação da resistência ao cisalhamento da madeira de *Pinus sp.* coladas em temperatura ambiente. **Ciência da Madeira - RCM**, v. 7, n. 1, p. 42 - 50, 2016.

GONZALES, I. **Atlas de maderas de Selva Central**. Huancayo: Universidad Nacional del Centro Perú, Organización No Gubernamental Jardín Botánico Missouri, Programa de Ciencia y Tecnología de la PCM. Fincyt, 2011.

GONZALES; H, E. **Transformación química de la madera**. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina, 2013.

GOULDING, T. M. Polyvinyl acetate wood adhesives. In: PIZZI, A. **Wood adhesives: chemistry and technology**. New York: Marcel Dekker, 1983. p. 319-350.

HAUBRICH, J. L.; GONÇALVES, C.; TONET, A. Adesivos vinílicos apresentam soluções para madeira. **REMADE Revista da madeira**, Ed. N° 103, março 2007.

HELD, CH.; PAWLOWSKI, G.; PAREDES, A.; CALO, I. **Cadenas de valor en el sector forestal del Perú. Informe diagnóstico y desarrollo estratégico**. Freiburg: Global Green Growth Institute, 2015.

HIGUCHI, T. **Biochemistry and molecular biology of wood**. Berlin: Springer Verlag, 1997.

HILLIG, E.; SCHNEIDER, V. E.; WEBER, C.; TECCHIO, R. D. **Resíduos de madeira da indústria madeireira – Caracterização e aproveitamento**. In: XXVI ENEGEP 2006, Fortaleza, ABEPRO, 2006.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS -IAWA. List of microscopic features for hardwood identification. **IAWA Bulletin**, v. 10, n. 3, p. 219-332, 1989.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. **Normas e procedimentos em estudos de anatomia da madeira: I. Angiospermae. II. Gimnospermae**. Brasília. 1991.

INSTITUTO NACIONAL DE LA CALIDAD- INACAL. **NTP 251.010**. Madera. Método para determinar el contenido de humedad. Lima, 2014a.

INSTITUTO NACIONAL DE LA CALIDAD - INACAL. **NTP 251.011**. Madera. Método para determinar la densidad. Lima, 2014b.

INSTITUTO NACIONAL DE LA CALIDAD - INACAL. **NTP 251.012**. Madera. Método para determinar la contracción. Lima, 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE RACIONALIZACION Y NORMALIZACION – IRANOR. **UNE 56-540-78**. Características físico-mecánicas de la madera. Interpretación de los resultados de los ensayos. Madrid. 1978.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005.

IWAKIRI, S.; TRIANOSKI, R.; NASCIMENTO, C. C.; GUMANE, C.; LENGOWSKI, E. C.; SCHARDOSIN, F. Z.; AZAMBUJA, R. Resistência das juntas coladas de madeiras de *Inga alba* (SW) Willd e *Swartzia recurva* Poepp. **Cerne**, Lavras, v. 21, n. 3, p. 457 - 463, 2015.

JANKOWSKY, I. P. **Colagem de madeiras**. Piracicaba: ESALQ, 1988.

JUÍZO, C. G. F. **Aproveitamento de costaneiras em serraria de eucalipto para produção de painéis EGP**. 2015. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA – JUNAC. **Estudio de las propiedades físicas y mecánicas de 104 especies de los bosques tropicales de la Subregión Andina**. PADT-REFORT. Lima, 1979.

KLOCK, U. **Qualidade da madeira de *Pinus maximinoi* H. E. Moore**. 2000. 291 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. **Química da madeira**, 3^o ed., Curitiba, 2005.

KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J. **Principles of wood science and technology II. Wood based materials**. New York, 1975.

LAU, P. M. **Produção de painéis de colagem lateral – EGP com madeira de *Populus deltoides***. 2017. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

LIMA, C. K. P.; MORI, F.A.; MENDES, L. M.; CARNEIRO, A. C. O. Características anatômicas e química da madeira de clones de *Eucalyptus* e sua influência na colagem. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 2, p. 123-129, 2007.

LIMA, C. K. P.; MORI, F. A.; MENDES, L. M.; TRUGILHO, P. F.; MORI, C. L. S. O. Colagem da madeira de clones de *Eucalyptus* com três adesivos comerciais. **Scientia Forestalis**, v. 36, n. 77, p. 73-77, 2008.

LISBOA, C. D. J.; MATOS, J. L. M.; MELO, J. E. **Amostragem e propriedades físico-mecânicas de madeiras amazônicas**. Brasília: IBAMA, 1993.

LOPES, M. C. **Espectroscopia no infravermelho próximo aplicada a classificação de painéis colados lateralmente de madeira de *Pinus taeda*** L. Tese (Doutorado em Engenharia Floresta) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

MACÊDO, A. N.; JUNIOR, C. C. Estudo de juntas dentadas em madeira laminada colada (MLC): avaliação de método de ensaio – NBR 7190/1997. **Cadernos de engenharia de estruturas**, São Carlos, n. 7, p. 1-23, 1999.

MALONEY, T. M. The family of wood composite materials. **Forest Products Journal**, Madison, v. 46, n. 2, p.19-26, 1996.

MARRA, F. S. **Technology of wood bonding: principles in practice**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.

MAYER, R. D. **Utilização de painéis colados lateralmente de Eucalipto na confecção de móvel valorizado pelo design**. 2008. 28 f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2008.

MAYTA, G., C.; ESQUINARILA, M., E. **Propuesta de manejo de residuos madereros en una empresa dedicada a la elaboración de pisos de madera**. 2014. 80 p. Trabajo de Titulación (Títulos de Ingeniero Forestal y Licenciado en Biología). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, 2014.

MELO L. E. L.; SILVA C. J.; LOPES K. V.; BRITO P. G. M.; SANTOS I. S. Resíduos de serraria no Estado do Pará: caracterização, quantificação e utilização adequada. **Floresta e Ambiente**. v. 19, n. 1, p. 113-116, 2012.

MINISTERIO DE LA PRODUCCIÓN. **Expediente técnico. Adquisición de carpetas escolares en el marco de lo dispuesto en la Ley N°29951 y el Decreto de Urgencia N°058/2011**. Dirección General de Desarrollo Productivo. Lima. Junio. 2013.

MINISTERIO DE LA PRODUCCIÓN. **Expediente técnico. Adquisición de mobiliario escolar para el Ministerio de Educación en el marco de lo dispuesto en el Decreto de Urgencia N°058/2011 y normas modificatorias**. Dirección General de Desarrollo Productivo. Lima. Noviembre. 2014.

NASCIMENTO, A. M.; GARCIA, R. A.; DELLA LUCIA, R. M. Qualidade de adesão de juntas coladas de diferentes espécies comerciais de madeira. **Cerne**, v. 19, n. 4, p. 593-601, 2013.

NOCK, H. P; RICHTER, H. G.; BURGER, L. M. **Tecnologia da madeira**. Curitiba: Departamento de Engenharia e Tecnologia Rurais, Universidade Federal do Paraná, 1975.

- NOCK, H. P., RICHTER, H. G. **Adesão e adesivos – Adesivos e sua aplicação na indústria madeireira**. Curitiba: Tópicos de Tecnologia da Madeira. Universidade Federal do Paraná, 1978.
- OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. **Árvore**, Viçosa-MG, v. 27, n. 3, p. 381-385, 2003.
- PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 4. ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1980.
- PAZ, F. J. **Determinación de la composición química de la madera obtenida del primer clareo en árboles de melina (*Gmelina arborea* roxb.), de una plantación proveniente del departamento de Izabal**. 2008. 122 p. Tesis (Título de Ingeniero Químico) Escuela de Ingeniería Química, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2008.
- PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. 6. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- PIMENTEL G. F. **Curso de estatística experimental**. 14 ed. Piracicaba: Nobel, 2000.
- PIZZI, A., **Advanced wood adhesives technology**, New York: Marcel Dekker, 1994.
- PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of adhesive technology**. New York: Marcel Dekker, 2003.
- PONCE, G. M.; VASQUEZ, A. M. **Caracterización y clasificación de los residuos de madera “Tornillo” (*Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke) y “Cedro” (*Cedrela odorata* L.) obtenidos de la fabricación de mobiliario escolar**. 2010. 98 p. Trabajo de investigación (Título de Ingeniero forestal). Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima. 2010.
- PRATA, J. G.; **Estudo da viabilidade tecnológica do uso de espécies de pinus tropicais para produção de painéis colados lateralmente (Edge Glued Panels – EGP)**. 2010. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- RAKNES, E. **The influence of production conditions on the strength of finger-joints, production, marketing and use of finger-jointed sawnwood**. Hague, Forestry Sciences, 1982.
- REYNEL, C.; PENNINGTON, T. D.; PENNINGTON, R. T.; FLORES, C.; DAZA, A. **Árboles útiles de la Amazonía peruana y sus usos. Un manual con apuntes de identificación, ecología y propagación de las especies**. Lima: DARWIN INITIATIVE Project 09/17-.International Center for Research in Agroforestry (ICRAF). Ed. Tarea Asociacion Gráfica Educativa, 2003.

RIVER, B. H.; OKKONEN, E. A. **Delamination of edge-glued wood panels. moisture effects**. Madison: Research Note FPL-RN-0259. Forest Products Laboratory. 1991.

ROCHA, M. P. ***Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus dunnii* Maiden como fontes de matéria prima para serrarias**. 2000. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

ROWELL, R. M., **Chemical modification of wood for improved adhesion in composites. Wood adhesives**. Madison: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, p. 56-60, 1995.

ROWELL, R. M. **Handbook of Chemistry and wood composites**. 2nd ed. Florida. CRC Press. 2005.

SCHULTZ, J.; NARDIN, M. Theories and mechanisms of adhesion. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. (Ed.). **Handbook of adhesive technology**. New York: Marcel Dekker, 2003. p. 61-75.

SELBO, M. L. **Adhesive bonding of wood**. New York: Technical bulletin. USDA/Forest Service, n. 1512, p. 1-122, 1975.

SELLERS JR., T. Adhesive in the wood industry. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of adhesive technology**. New York: Marcel Dekker, p. 599-614. 1994.

SERRANO, L. J. P. **Resistência à tração da madeira e resistência ao cisalhamento no plano de cola, seus impactos na geometria do dente e propriedades mecânicas de emendas dentadas**. 2009. 107 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2009.

SERVICIO NACIONAL FORESTAL Y DE FAUNA SILVESTRE - SERFOR. **Anuario forestal y de fauna silvestre 2017**. Ministerio de Agricultura y Riego, Lima, 2019.

SERVICIO NACIONAL FORESTAL Y DE FAUNA SILVESTRE - SERFOR. **Importación de productos maderables 2019**. SNIFFS – Componente Estadístico. Dirección de Información y Registro. Ministerio de Agricultura y Riego, Lima, 2020.

SIBILLE, A. M. **Guía de procesamiento industrial. Fabricación de muebles con maderas poco conocidas – LKS**. Lima: WWF-Perú. USAID. Ed. Argentina S.R.L. 2006.

SILVA, D. A.; TOMASELLI, I.; IWAKIRI, S. Influência da umidade na resistência da linha de cola e estabilidade dimensional do compensado utilizando resina de alta reatividade. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 54, p. 69-80, 1998.

SJÖSTRÖM, E. **Wood chemistry: fundamentals and applications**. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 1993.

SKAAR, C. **Water in wood**. New York: Syracuse University Press, 1972.

SOLANO, R., W.; SANTIAGO, P.; GUEVARA, L.; ESPINOZA, M., I. **Utilización industrial y mercado de diez especies maderables potenciales de bosques secundarios y primarios residuales**. Lima: Proyecto PD512/08 Rev. 2 (I), Asociación para la Investigación y Desarrollo Integral-Dirección General Forestal y Fauna del Ministerio de Agricultura-ITTO, 2013.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI 264 cm-07**: preparation of wood for chemical analysis. Atlanta, 2007.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI 257 sp-12**: Sampling and preparing wood for analysis. Atlanta, 2012.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI 211 om-16**: ash in wood, pulp, paper and paperboard - combustion at 525°C. Atlanta, 2016a.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI 252 om-16**: pH and electrical conductivity of hot water extracts of pulp, paper, and paperboard. Atlanta, 2016b.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI 204 cm-17**: solvent extractives of wood and pulp. Atlanta, 2017.

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood: structure, properties, utilization**. New York: Chapman & Hall, 1991.

TUSET, R.; DURAN, F. **Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización. v II**. Montevideo: Hemisferio Sur. 2008.

VASSILIOU, V.; BARBOUTIS, I.; KARASTERGIOU, S. Effect of PVAc bonding on finger-joint strength of steamed and unsteamed beech Wood (*Fagus sylvatica*). **Journal of Applied Polymer Science**, v. 103, p. 1664 - 1669, 2007.

VICK, C. B. **Adhesive bonding of wood materials**. Madison: U.S. PRODUCTS LABORATORY. Wood handbook - Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL—GTR—113. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999.

VIGNOTE, S; MARTINEZ, I. **Tecnología de la madera**. Madrid: Mundi-Prensa. 2006.

ZIMMERMAN, D. Adesivos para pisos engenheirados: da fabricação à instalação. REMADE: **Revista da madeira**. Ed. N° 94. Fevereiro 2006.