

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE ADHESIÓN DE MADERA  
LAMINADA ENCOLADA (MLE) DE CACHIMBO ROJO (*Cariniana  
domestica*) CON DOS TIPOS DE ADHESIVOS”**

**TESIS PARA OPTAR TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL**

**JAVIER RAMOS ULLOA**

**LIMA – PERÚ**

**2023**

## EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE ADHESIÓN EN LA MADERA LAMINADA ENCOLADA (MLE) DE CACHIMBO (Cariniana domestica) CON DOS TIPOS DE ADHESIVOS

### INFORME DE ORIGINALIDAD

<b>13%</b>	<b>13%</b>	<b>3%</b>	<b>2%</b>
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

### FUENTES PRIMARIAS

<b>1</b>	<b>acervodigital.ufpr.br</b> Fuente de Internet	<b>2%</b>
<b>2</b>	<b>biblioteca.uajms.edu.bo</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>3</b>	<b>aitiminforma.blogspot.com</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>4</b>	<b>revistas.udistrital.edu.co</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>5</b>	<b>revistas.ubiobio.cl</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>6</b>	<b>orcid.org</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>7</b>	<b>www.scribd.com</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>8</b>	<b>dspace.uazuay.edu.ec</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**

**“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE ADHESIÓN DE MADERA  
LAMINADA ENCOLADA (MLE) DE CACHIMBO ROJO (*Cariniana  
domestica*) CON DOS TIPOS DE ADHESIVOS”**

**TESIS PARA OPTAR TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL**

**JAVIER RAMOS ULLOA**

**Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:**

.....  
Ing. Milciades Leonidas Miguel Castro, Dr.  
Presidente

.....  
Ing. Manuel Chavesta Custodio, Dr.  
Miembro

.....  
Ing. Elvito Fabian Villegas Silva, Dr.  
Miembro

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

.....  
Ing. José Carlos Cano Delgado, M.Sc.  
Co-Asesor

## **DEDICATORIA**

Dedicado a mis padres Mauro y Alejandra, y a mi hermano Ricardo, pilares durante mi formación profesional y como persona.

## **AGRADECIMIENTOS**

Me gustaría mostrar mi más profundo agradecimiento a:

Mi asesor el Dr. Julio Canchucaja por su soporte y orientación en la realización de este estudio.

A los miembros del honorable jurado por sus recomendaciones para enriquecer este trabajo.

A la empresa KFR INVERSIONES S.A. por facilitar la madera objeto de estudio.

A la empresa POSTES WISE S.A.C. por brindar sus instalaciones para la fabricación de probetas en este estudio.

A los laboratorios de Anatomía e Identificación de Maderas, Tecnología de la Madera, Pulpa y Papel de la Madera y Preservación de la Madera, de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina, por permitirme usar sus instalaciones para los ensayos de este estudio.

Al laboratorio de Materiales e Insumos del CITEMadera Lima, por permitirme usar sus instalaciones para complementar los ensayos de este estudio.

A mi familia por ser una fuente de aliento permanente.

A mis amigas Kusi e Izumi que me apoyaron y animaron durante todo este proceso.

# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>3</b>
2.1. Aspectos generales de la especie a evaluar.....	3
2.1.1. Cachimbo.....	3
2.1.2. Distribución geográfica.....	3
2.1.3. Descripción del árbol.....	3
2.1.4. Descripción de la madera.....	4
2.1.5. Usos.....	6
2.2. Aspectos generales de la madera laminada encolada (MLE).....	6
2.2.1. Tipos de MLE.....	7
2.2.2. Uniones dentadas tipo finger joint.....	10
2.2.3. Evaluación de calidad de adhesión de la MLE.....	10
2.2.4. Fracturas/delaminación en MLE.....	11
2.3. Aspectos generales de la adhesión.....	13
2.3.1. Adhesión.....	13
2.3.2. Adhesión de madera.....	13
2.3.3. Superficie de la madera.....	15
2.3.4. Penetración del adhesivo.....	16
2.4. Factores que afectan la calidad de adhesión de la madera laminada encolada.....	18
2.4.1. Superficie de la madera.....	18
2.4.2. Propiedades anatómicas de la madera.....	18
2.4.3. Propiedades físicas de la madera.....	19
2.4.4. Composición química de la madera.....	20
2.5. Adhesivos.....	21
2.5.1. Emulsión polimérica de isocianato (EPI).....	21
2.5.2. Melamina-Urea-Formaldehido (MUF).....	22
2.6. Fabricación de vigas de madera laminada encolada.....	22
<b>III. METODOLOGÍA.....</b>	<b>29</b>
3.1. Lugar de ejecución.....	29

3.2.	Material experimental .....	29
3.3.	Adhesivos.....	29
3.4.	Equipos y herramientas.....	30
3.5.	Metodología y procedimiento .....	31
3.5.1.	Acopio de madera.....	31
3.6.	Fabricación de las vigas .....	32
3.6.1.	Selección de la madera .....	33
3.6.2.	Verificación del contenido de humedad .....	34
3.6.3.	Preparación y maquinado de láminas .....	35
3.6.4.	Elaboración de empalmes tipo finger joint.....	35
3.6.5.	Pre-armado de las vigas .....	36
3.6.6.	Fabricación de láminas .....	37
3.7.	Ensayos de delaminación y esfuerzo cortante .....	43
3.7.1.	Delaminación de empalmes por unión dentada entre láminas .....	43
3.7.2.	Esfuerzo cortante en los planos de encolado .....	45
3.7.3.	Delaminación en planos de encolado .....	48
3.8.	Análisis estadístico .....	52
<b>IV.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>54</b>
4.1.	Propiedades anatómicas de la madera .....	54
4.1.1.	Características generales.....	54
4.1.2.	Descripción macroscópica.....	54
4.1.3.	Descripción microscópica.....	54
4.2.	Propiedades químicas de la madera .....	56
4.3.	Propiedades físicas de la madera .....	57
4.4.	Propiedades mecánicas de la madera.....	58
4.4.1.	Resistencia al cizallamiento paralelo al grano.....	58
4.5.	Delaminación de los empalmes por unión dentada entre láminas .....	59
4.5.1.	MUF .....	60
4.5.2.	EPI .....	62
4.5.3.	Comparación de la delaminación de empalmes entre adhesivos.....	64
4.6.	Esfuerzo cortante (fv) en los planos de encolado .....	65
4.6.1.	Con adhesivo MUF.....	66
4.6.2.	Con adhesivo EPI .....	73

4.6.3.	Comparación de resultados de EPI vs MUF.....	79
4.7.	Delaminación en planos de encolado.....	84
4.7.1.	Con adhesivo MUF.....	84
4.7.2.	Con adhesivo EPI.....	89
4.7.3.	Comparación de resultados del EPI vs MUF .....	93
4.8.	Análisis estadístico .....	95
4.8.1.	Delaminación de empalmes por unión dentada entre láminas .....	95
4.8.2.	Resistencia al esfuerzo cortante en la línea de cola.....	97
4.8.3.	Delaminación en planos de encolado .....	98
<b>V.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>101</b>
<b>VI.</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>102</b>
<b>VII.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>103</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1: Madera laminada verticalmente .....	7
Figura 2: Madera laminada horizontalmente .....	8
Figura 3: Delaminación de madera laminada encolada tras 34 años de servicio .....	12
Figura 4: Severas delaminaciones y fracturas en elementos estructurales con más de 34 años de servicio.....	13
Figura 5: Enlace de hidrógeno entre un fragmento celulósico y un polímero PF .....	14
Figura 6: Microfotografía de la interface entre adhesivo y madera.....	15
Figura 7: Humectación de superficie de madera .....	16
Figura 8: Eslabón de cadenas de enlaces por cohesión y adhesión .....	17
Figura 9: Determinación de cizallamiento paralelo al grano.....	32
Figura 10: Selección de madera proveniente de residuos.....	34
Figura 11: Medición de contenido de humedad con higrómetro de pines.....	34
Figura 12: Extremos de tablas con empalmes finger joint.....	35
Figura 13: Pre-armado de vigas laminadas.....	36
Figura 14: Fresa de máquina formadora de empalmes finger joint .....	36
Figura 15: Cálculo de adhesivo utilizado, de acuerdo al gramaje .....	37
Figura 16: Encolado de empalmes finger joint.....	37
Figura 17: Juntado de empalmes finger joint.....	38
Figura 18: Empalmes con finger joint encoladas y prensadas.....	38
Figura 19: Periodo de “curado” de láminas con empalmes finger joint.....	39
Figura 20: Cepillado de láminas unidas con empalmes finger joint.....	40
Figura 21: Forma de encolado de láminas en sus caras .....	40
Figura 22: Prensado de vigas laminadas.....	41
Figura 23: Vigas laminadas en proceso de fraguado .....	41
Figura 24: Cepillado de vigas laminadas.....	42
Figura 25: Vigas laminadas acabadas.....	42
Figura 26: Dimensiones de probeta para ensayos de delaminación por unión dentada entre láminas.....	43
Figura 27: Probetas antes y durante el ensayo con agua hirviendo .....	44
Figura 28: Secado de probetas en horno experimental .....	45

Figura 29: Dimensiones de probetas para ensayo de esfuerzo cortante en los planos de encolado.....	46
Figura 30: Dimensiones de probetas para ensayo de esfuerzo cortante en los planos de encolado.....	47
Figura 31: Dimensiones de probetas para ensayo de delaminación en planos de encolado.....	49
Figura 32: Probetas antes y después del tratamiento en autoclave.....	50
Figura 33: Secado de probetas en horno experimental.....	50
Figura 34: Elementos anatómicos de la madera de Cachimbo.....	55
Figura 35: Corte histológico de la madera de Cachimbo.....	56
Figura 36: Delaminación en el empalme finger joint.....	59
Figura 37: Delaminación del empalme por unión dentada con adhesivo MUF.....	61
Figura 38: Delaminación del empalme por unión dentada con adhesivo EPI.....	63
Figura 39: Delaminación de empalmes por unión dentada entre láminas con adhesivos MUF y EPI.....	64
Figura 40: Fallo de madera en probeta ensayada en esfuerzo cortante.....	66
Figura 41: Promedios de resistencia al esfuerzo cortante en la línea de cola con adhesivo MUF y sección 2"x6".....	68
Figura 42: Fallo de madera (%) vs fallo mínimo UNE-EN 14080 (2013) con adhesivo MUF y sección 2"x6".....	69
Figura 43: Promedios de resistencia al esfuerzo cortante en la línea de cola con adhesivo MUF y sección 2"x8".....	71
Figura 44: Fallo de madera (%) vs fallo mínimo UNE-EN 14080 (2013) con adhesivo MUF y sección 2"x8".....	72
Figura 45: Promedios de resistencia al esfuerzo cortante en la línea de cola con adhesivo EPI y sección 2"x6".....	74
Figura 46: Promedios de fallo de madera (%) vs fallo mínimo UNE-EN 14080 (2013) con adhesivo EPI y sección 2"x6".....	75
Figura 47: Promedios de resistencia al esfuerzo cortante en la línea de cola con adhesivo EPI y sección 2"x8".....	77
Figura 48: Promedios de fallo de madera (%) vs fallo mínimo UNE-EN 14080 (2013) con adhesivo EPI y sección 2"x8".....	78
Figura 49: Resistencia al esfuerzo cortante en la línea de cola (EPI vs MUF).....	80

Figura 50: Promedios de fallo de madera (%) y fallo de madera mínimo (%) UNE-EN 14080 (2013), con dos adhesivos (EPI y MUF) y con dos secciones comerciales (2"x6" y 2"x8") .....	83
Figura 51: Delaminación en un plano de encolado.....	86
Figura 52: Promedio de delaminación total en planos encolados con adhesivo MUF y sección 2"x6" .....	86
Figura 53: Promedio de delaminación total en planos encolados con adhesivo MUF y sección 2"x8" .....	88
Figura 54: Promedio de delaminación total en planos encolados con adhesivo EPI y sección 2"x6" .....	90
Figura 55: Promedio de delaminación total en planos encolados con adhesivo EPI y sección 2"x8" .....	92
Figura 56: Delaminación total en los planos encolados (EPI vs MUF).....	94
Figura 57: Pruebas estadísticas para la delaminación de empalmes por unión dentadas entre láminas con adhesivos EPI y MUF.....	96
Figura 58: Pruebas estadísticas para la resistencia al esfuerzo cortante en la línea de cola con adhesivos EPI y MUF .....	97
Figura 59: Medidas de tendencia central y dispersión para resistencia al esfuerzo cortante en la línea de cola con adhesivos EPI y MUF .....	98
Figura 60: Pruebas estadísticas para la delaminación en planos de encolado con adhesivos EPI y MUF.....	99
Figura 61: Medidas de tendencia central y dispersión para delaminación en planos de encolado.....	100

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1: Propiedades físicas del Cachimbo .....	5
Tabla 2: Propiedades mecánicas del Cachimbo .....	5
Tabla 3: Clases de uso y clases de servicio de la madera .....	9
Tabla 4: Numero de vigas y probetas según tipo de ensayo .....	33
Tabla 5: Parámetros geométricos del perfil dentado (adaptado de UNE-EN 14080 (2013)). .....	36
Tabla 6: Cantidad de probetas para ensayo de esfuerzo cortante .....	46
Tabla 7: Propiedades químicas de la madera Cachimbo.....	56
Tabla 8: Propiedades físicas del Cachimbo .....	57
Tabla 9: Delaminación del empalme por unión dentada con adhesivo MUF.....	60
Tabla 10: Delaminación del empalme por unión dentada con adhesivo EPI.....	62
Tabla 11: Promedios de resistencia al esfuerzo cortante ( $f_v$ ) con adhesivo MUF y sección 2"x6".....	67
Tabla 12: Promedios de resistencia al esfuerzo cortante ( $f_v$ ) con adhesivo MUF y sección 2"x8".....	70
Tabla 13: Promedios de resistencia al esfuerzo cortante ( $f_v$ ) con adhesivo EPI y sección 2"x6".....	73
Tabla 14: Promedios de resistencia al esfuerzo cortante ( $f_v$ ) con adhesivo EPI y sección 2"x8".....	76
Tabla 15: Promedios de resistencia al esfuerzo cortante en la línea de cola con adhesivos EPI y MUF, y secciones 2"x6" y 2"x8" .....	79
Tabla 16: Promedios de fallo de madera (%) y fallo de madera mínimo (%) UNE-EN 14080 (2013), con adhesivos (EPI y MUF) y secciones comerciales (2"x6" y 2"x8") .....	82
Tabla 17: Valores máximos del porcentaje total de delaminación.....	84
Tabla 18: Promedio de delaminación total en planos encolados con adhesivo MUF y sección 2"x6" .....	85
Tabla 19: Promedio de delaminación total en planos encolados con adhesivo MUF y sección 2"x8" .....	87

Tabla 20: Promedio de delaminación total en planos encolados con adhesivo EPI y sección 2"x6".....	89
Tabla 21: Promedio de delaminación total en planos encolados con adhesivo EPI y sección 2"x8".....	91
Tabla 22: Promedios de delaminación total en planos encolados con adhesivos EPI y MUF, y con secciones comerciales 2"x6" y 2"x8" .....	93

## RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la calidad de adhesión de madera laminada encolada (MLE), fabricando vigas laminadas con residuos de madera Cachimbo (*Cariniana domestica*), utilizando los adhesivos Emulsión Polimérica de Isocianato (EPI) y Melamina-Urea-Formaldehído (MUF), además de dos secciones comerciales (2"x 6" y 2"x 8"). La madera fue caracterizada a nivel anatómico, físico-mecánico y químico, posteriormente se fabricaron las vigas laminadas con base en las fichas técnicas de los adhesivos usados, literatura consultada y los parámetros indicados en la norma usada para la ejecución de ensayos para evaluar la calidad de adhesión (UNE-EN 14080. 2013). El ensayo de delaminación de los empalmes por unión dentada (finger joint) entre láminas mostró que la calidad de adhesión de los empalmes tipo finger joint es óptima y que estadísticamente no hay diferencia significativa entre los adhesivos usados. El ensayo de esfuerzo cortante en los planos de encolado mostró que la calidad de adhesión entre láminas es buena y no hay diferencia estadística significativa entre los adhesivos y secciones comerciales usadas. Finalmente, el ensayo de delaminación en planos de encolado mostró que la calidad de adhesión entre láminas y empalmes es resistente frente a la simulación de interperismo, pero el adhesivo EPI permite obtener menores porcentajes de delaminación frente al adhesivo MUF. Todos los resultados obtenidos en los tres ensayos realizados cumplen con los requisitos mínimos establecidos en la norma UNE-EN 14080. 2013 para ambos adhesivos, demostrando que la madera de residuos de la especie Cachimbo puede usarse para la fabricación de MLE.

**Palabras claves:** Madera laminada encolada, esfuerzo cortante, delaminación de empalmes, melamina urea formaldehído, emulsión polimérica de isocianato, gramaje, pH.

## ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the adhesion quality of glued laminated timber (GLT), manufacturing laminated beams with Cachimbo wood waste (*Cariniana domestica*), using the adhesives Emulsion Polymer Isocyanates (EPI) and Melamine Urea Formaldehyde (MUF), as well as two commercial sections (2"x 6" and 2"x 8"). The wood was characterized at an anatomical, physical-mechanical, and chemical level, subsequently, the laminated beams were manufactured based on the technical sheets of the adhesives used, the literature consulted, and the parameters indicated in the standard used for the execution of tests to evaluate the quality of adhesion (UNE-EN 14080. 2013). The delamination test of the finger joint splices between sheets showed that the adhesion quality of the finger joint splices is optimal and that there is no statistically significant difference between the adhesives used. The shear stress test on the gluing planes showed the quality of adhesion between sheets is good, and there is no significant statistical difference between the adhesives and commercial sections used. Finally, the delamination test on gluing planes showed that the adhesion's quality between sheets and splices is resistant to weather conditions, although the EPI adhesive allows lower delamination percentages to be obtained compared to the MUF adhesive. All the results obtained in the three tests carried out comply with the minimum requirements established in the UNE-EN 14080. 2013 standard for both adhesives, demonstrating that waste wood from the Cachimbo species can be used for the manufacture of GLT.

**Keywords:** Glued laminated wood, adhesion quality, shear stress, delamination of splices, melamine urea formaldehyde, emulsion polymer isocyanates, grammage, pH.

## I. INTRODUCCIÓN

PROINVERSION (2006), citado por Santiago *et al.* (2012), afirma que el sector de la madera en el Perú está dividido en tres actividades fundamentales: la explotación forestal (extracción de madera), la transformación primaria (aserrío, secado, preservación, fabricación de tableros, chapas y pisos) y la transformación secundaria (partes, piezas, carpintería de obra, muebles y artesanía). Esta última, al igual que las dos primeras, presenta problemas en el uso integral de la madera. Para Guevara *et al.* (2006) la transformación mecánica de la madera, dentro de la industria del aserrío, es la más importante puesto que es la más estudiada; sin embargo, dichos estudios concluyen que, dentro de los problemas principales relacionados a costos, está el inadecuado uso de la capacidad instalada y falta de tecnología en cuanto al reciclado de productos secundarios.

La transformación secundaria de madera produce entre 30 al 48% de residuos (Casana y Prieto, 2008), debido principalmente a la falta de estandarización de calidad en la transformación primaria y a problemas de secado, a pesar de que estos residuos suelen ser convertidos en subproductos, su uso de forma estructural es poco conocida (Tenssera, 2008).

Frente a ello, la madera laminada encolada (MLE) es una buena alternativa para el uso de estos residuos, ya que actualmente viene siendo considerada por la industria, como en el mejoramiento del uso de la madera maciza, pues con ella es posible fabricar vigas, viguetas, columnas, crucetas y estructuras de grandes dimensiones (Barrera, 2010). Además, por sus propiedades físico-mecánicas, no solo se le puede comparar con madera maciza, sino también con otros materiales tradicionales que se usan para construcción y que compiten con la madera, como el concreto y acero.

En regiones como los Estados Unidos, Europa, Asia, y algunos países vecinos como Argentina, Chile y Brasil, los beneficios de este material vienen siendo aprovechados y popularizados por la cantidad de madera laminada que producen; sin embargo, en el Perú, el uso de este material aún no se ha desarrollado, pese a que se dispone de madera para su

elaboración y en amplia variedad de especies, no solamente refiriéndonos a residuos sino también a madera comercial dimensionada.

En este contexto, en el presente estudio se evaluó la calidad de adhesión de madera laminada encolada (MLE) de la especie Cachimbo (*Cariniana domestica*), proveniente de residuos de la transformación secundaria, con dos tipos de adhesivo.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Aspectos generales de la especie a evaluar

#### 2.1.1. Cachimbo

Familia: LECYTHIDACEAE

Nombre común: Cachimbo colorado, Misa, Bacú.

Nombre científico: *Cariniana domestica* Martius

Sinónimos: *Couratari domestica* Martius.

#### 2.1.2. Distribución geográfica

Su distribución abarca países de Sur y Centro América como las Guyanas, Panamá, Brasil, Venezuela, Colombia y Perú. (CPM, 2008).

La (CPM, 2008) señala también que “en el Perú se encuentra en los departamentos de Huánuco, Loreto, Madre de Dios y Ucayali. Se desarrolla en las formaciones ecológicas de bosque muy húmedo premontano (bmh-P) y bosque húmedo tropical (bh-T). Se presenta por lo general en zonas altas. Generalmente crece asociado con las especies *Xilopia* sp., *Aniba* sp., *Calycophyllum*”.

#### 2.1.3. Descripción del árbol

El Cachimbo (*Cariniana domestica*) es un árbol de hasta 25 m de altura total, 17 m de altura comercial y 0.50 m de diámetro a la altura del pecho (DAP). Generalmente es cilíndrico, recto, de buena conformación y con aletas en la base (Sibille, 2006).

Según Aróstegui (1974), “la corteza es fisurada paralelamente en todo el fuste y de color pardo oscuro, de textura fibrosa, con olor a aceite rancio y de un espesor de 1.5 cm”

#### **2.1.4. Descripción de la madera**

La madera de esta especie presenta albura poco visible de color beige, duramen de color pardo rojizo claro que al ser expuesto a la luz se decolora ligeramente, brillo medio, vetado suave, dureza media alta, grano recto, textura fina a media y olor no perceptible (Aróstegui, 1974).

Es una madera moderadamente resistente al ataque biológico. Se recomienda los tratamientos, inmersión para madera húmeda, baño caliente-frío para madera seca y vacío presión; se considera como fácil de tratar (Oshiro, 2016).

##### **2.1.4.1. *Propiedades anatómicas***

Los poros son difusos, fácilmente visibles a simple vista, de medianos a moderadamente grandes (120 a 210  $\mu\text{m}$ ), solitarios de forma oval y múltiples radiales de 2 a 3 predominantemente en hileras radiales, cambiando de concentración entre anillos. (Aróstegui, 1974).

El parénquima es visible a simple vista; apotraqueal tipo escaleriforme. Los radios no son visibles a simple vista y son de finos a medianos (50 a 100  $\mu\text{m}$ ). (Aróstegui, 1974).

##### **2.1.4.2. *Propiedades físicas***

En la Tabla 1 se muestra de forma resumida las propiedades físicas del Cachimbo (Aróstegui, 1974).

**Tabla 1: Propiedades físicas del Cachimbo**

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
<b>Densidad básica</b>	0.59 g/cm <sup>3</sup>
<b>Contracción volumétrica</b>	12.10%
<b>Relación T/R</b>	1.5
<b>Contracción tangencial</b>	7.58%
<b>Contracción radial</b>	4.96%

Fuente: Aróstegui, A. (1974)

#### 2.1.4.3. *Propiedades mecánicas*

Aróstegui (1974) reporta las propiedades mecánicas para esta especie indicadas en la Tabla 2.

**Tabla 2: Propiedades mecánicas del Cachimbo**

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
<b>Flexión estática (MOR)</b>	634 kg/cm <sup>2</sup> MPa
<b>Compresión paralela</b>	327 kg/cm <sup>2</sup> ) MPa
<b>Cizallamiento</b>	8.53 MPa (N/mm <sup>2</sup> )
<b>Dureza janka</b>	367 kg en extremos y 398 kg en lados

Fuente: Aróstegui, A. (1974)

#### 2.1.4.4. *Propiedades químicas*

En lo referente a inclusiones, presenta cristales de oxalato de forma romboide, múltiples y en forma abundante, localizados en las células del parénquima y en las fibras. El contenido de sílice es de 0.52%. (Aróstegui, 1974), propiedad a tener en cuenta durante el corte de madera. En cuanto al pH, Rowell (1995) afirma que “es una de las características que influye directamente sobre 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”, para ajustar los niveles de pH y asegurar un buen

fraguado, se suelen utilizar catalizadores, cuya correcta aplicación se determina con ensayos de resistencia (Rüdiger, 1975).

El contenido de extractivos en la madera es generalmente bajo, llegando hasta un 10% en especies de zonas tropicales, se ubican generalmente en el duramen aunque se pueden ubicar de 1 a 2% en la albura y decrece de forma gradual en el árbol, de la parte basal a la apical (Fengel y Wegener, 1984, citado por Manuel. 2010). La presencia de extractivos en exceso 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, citado por Canchucaja, 2020).

### **2.1.5. Usos**

Oshiro (2016) indica que sus principales usos son: carpintería de interiores: tabiquería, armarios, puertas. Muebles. Estructuras: vigas, viguetas, pies derechos, columnas, tijerales. Encofrados, pisos, molduras y machihembrados. Envases pesados. Mangos de herramientas. Artículos deportivos en general.

## **2.2. Aspectos generales de la madera laminada encolada (MLE)**

Arriaga y Blasco (2003), definen a la MLE como “la formación de elementos estructurales a partir de la adición solidaria de láminas de madera encoladas entre sí. El objetivo es conseguir mayores secciones y longitudes, además de aprovechar la facilidad de conformación o curvabilidad individual de cada lámina, atributos no conseguidos en la madera aserrada”.

Según Peraza y Rico, citado por Somoza (1986), se llama MLE, a” toda pieza, recta o curvada, obtenida a partir de piezas menores en forma de tablas o tablillas, encoladas en capas sucesivas en las tres direcciones, de tal forma, que las fibras de todas las láminas sean paralelas entre sí y a la longitud de la pieza”.

Kuzman *et al.* (2010) indican que la MLE o glulam, es un material compuesto y de distribución uniforme, con valores en características mecánicas más altos que la madera maciza, el cual es

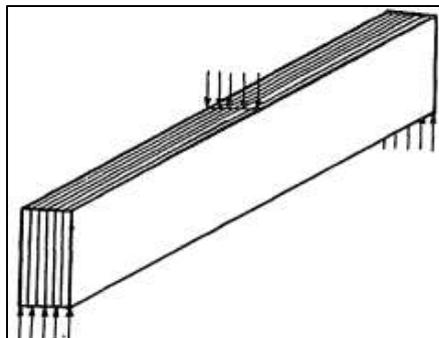
fabricado con láminas pegadas entre sí con adhesivos estructurales rígidos y duraderos, resistentes al agua, humedad, temperatura y factores biológicos.

También resaltan las ventajas de este material de construcción por ser uno de los más ligeros y con excelentes características elásticas y mecánicas. Es utilizado para la construcción de vigas y columnas individuales, así como para la construcción plana y espacial de gran envergadura.

### 2.2.1. Tipos de MLE

Somoza (1986), presenta los tipos de MLE con base en su dirección, horizontal o vertical.

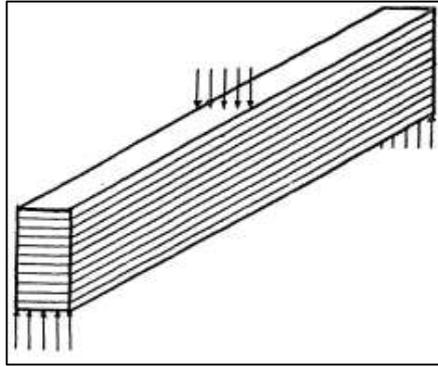
- Madera laminada verticalmente: Donde los planos de laminado son paralelos a las cargas actuantes sobre la pieza. Los encolados de canto son fundamentales, pues han de absorber los esfuerzos tangenciales.



**Figura 1: Madera laminada verticalmente**

Fuente: Somoza, L. (1986)

- Madera laminada horizontalmente: Están constituidas por láminas de madera encoladas de tal forma que las cargas actúan normalmente a los planos de laminación. En esta disposición las uniones de canto no trabajan.



**Figura 2: Madera laminada horizontalmente**

Fuente: Somoza, L. (1986)

La AITIM (2016), muestra las clases de servicio y clases de uso de la madera, haciendo énfasis en no confundir estos términos, ya que la clase de servicio es un concepto necesario para el cálculo de las estructuras de madera, mientras que las clases de uso son necesarias para definir la protección de la madera.

**a. Clase de servicio 1**

La AITIM (2016), caracteriza esta clase por el contenido de humedad en los materiales (temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  y humedad relativa del aire  $\leq 65\%$ ). También señalan que “en esta clase, el contenido de humedad medio de equilibrio higroscópico en la mayoría de las maderas no excede el 12%”. Las estructuras bajo cubierta y cerradas, generalmente pertenecen a esta clase de servicio.

**b. Clase de servicio 2**

La AITIM (2016), caracteriza esta clase por el contenido de humedad en los materiales (temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  y humedad relativa del aire  $\leq 85\%$ ). También señalan que “en esta clase, el contenido de humedad medio de equilibrio higroscópico en la mayoría de las maderas no excede el 20%. Las estructuras bajo cubierta, pero abiertas y expuestas al ambiente exterior, como es el caso de cobertizos, suelen considerarse como pertenecientes a esta clase de servicio”. La estructura de una cubierta que se encuentre ventilada y en climas húmedos puede asignarse a esta clase de servicio.

**c. Clase de servicio 3**

La AITIM (2016), caracteriza esta clase por las condiciones climáticas que conduzcan a contenidos de humedad superiores al de la clase de servicio 2. También señalan que “en la clase de servicio 3 se encuentran las estructuras expuestas a la intemperie, en contacto con el agua o con el suelo. Como ejemplos se mencionan las pasarelas, embarcaderos y otros”.

La Tabla 3 muestra la equivalencia entre clases de uso y clases de servicio, resaltando que la clase de servicio 3 podría incluir diferentes clases de uso que deben demostrarse para elegir la que correspondan en cada situación.

**Tabla 3: Clases de uso y clases de servicio de la madera**

Clase de uso		Clase de servicio	
Clase de uso	Contenido de humedad de la madera (H)	Contenido de humedad de la madera (H)	Clase de servicio
1 Interior, bajo cubierta	Máximo 20%	I Inferior al 12%	1
2 Interior o bajo cubierta	Ocasionalmente > 20%	Inferior al 20%	2
3 Al exterior por encima del sueño	Frecuentemente >20%		
3 <sup>1</sup> protegido			
3 <sup>2</sup> no protegido			
4 Al exterior, en contacto		Superior al 20%	3
4 <sup>1</sup> con el suelo o con agua dulce	Permanentemente >20%		
4 <sup>2</sup> con el suelo (intenso) y /o agua dulce			
5 En contacto con agua salada	Permanentemente >20%		

Fuente: AITIM (2016)

### **2.2.2. Uniones dentadas tipo finger joint**

Según la Norma UNE-EN 14080 (2013), se denominan uniones dentadas tipo finger joint a los empalmes realizados por mecanización en las testas de los elementos de madera, los cuales tienen un número determinado de entalladuras iguales, afiladas y simétricas. La geometría del diente debe permitir el ensamblaje autoblocante después de la presión aplicada, siendo la longitud de diente recomendada entre 15 a 30 mm.

Existen diferentes tipos de uniones, pero en cuanto a la fabricación de MLE, las uniones finger joint son las más usadas debido a la calidad de unión que se obtiene con ellas (De Cristóforo. s.f.).

Castro y Paganini, citados por Moya *et al.* (2019), afirman que “la geometría del diente, la presión aplicada y su influencia en la aptitud estructural de las uniones dentadas, son factores clave en la producción de MLE estructural”.

En cuanto a longitudes de diente, Lara-Bocanegra *et al.* (2017), estudiaron el desempeño mecánico de uniones tipo finger joint con madera de *Eucalyptus globulus* usando el adhesivo poliuretano PUR y longitudes de diente de 10 y 15 mm, concluyendo que el mejor desempeño frente a los ensayos de flexión se logró con la longitud de diente de 15 mm. Por otro lado, Vassiliou *et al.* (2005), estudiaron la resistencia a la flexión de diferentes longitudes de dientes (4, 10 y 15 mm) con madera de diferentes especies de *Quercus sp*, concluyendo que los valores del MOR (Módulo de Ruptura) aumentan con las longitudes de los dientes y que estos valores se ven ligeramente afectados por la orientación de los dientes (horizontal o vertical).

### **2.2.3. Evaluación de calidad de adhesión de la MLE**

La Norma UNE-EN 14080 (2013) contiene diferentes ensayos para la verificación de la calidad de adhesión, como son los ensayos de delaminación de los empalmes por unión dentada entre láminas, esfuerzo cortante en los planos de encolado y delaminación en planos de encolado. Estos ensayos son parte de los requisitos para la fabricación de MLE.

#### **2.2.3.1. *Delaminación de los empalmes por unión dentada entre láminas***

Con base en la Norma UNE-EN 14080 (2013), este ensayo se aplica a probetas con uniones dentadas (finger joint), las cuales serán sometidas a diferentes condiciones que inciten a su delaminación. Este ensayo es muy importante ya que las uniones dentadas son las que hacen posible la conformación de láminas de grandes luces que deben soportar esfuerzo mecánico.

#### **2.2.3.2. *Esfuerzo cortante en los planos de encolado***

Con base en la Norma EN 14080 (2013), la resistencia al esfuerzo de las líneas de cola se da mediante la aplicación de una carga creciente, que genera una tensión de cortadura en la línea de cola entre láminas de MLE, o en la línea de cola entre los componentes de la MLE, hasta la rotura.

#### **2.2.3.3. *Delaminación en planos de encolado***

Con base en la Norma UNE-EN 14080 (2013), el principio de este ensayo es originar tensiones internas en la madera mediante un gradiente de humedad. Este dará lugar a tensiones de tracción perpendicular a los planos de encolado, entre láminas de madera laminada. Los encolados defectuosos sufrirán delaminaciones en los planos de encolado.

### **2.2.4. *Fracturas/delaminación en MLE***

Divos (2011) indica que en las estructuras de MLE se pueden identificar dos principales tipos de fracturas, la que ocurre entre láminas (puede incluir delaminación) y la que ocurre dentro de las láminas.

#### **2.2.4.1. *Fractura entre láminas***

Las fallas en el adhesivo (delaminación) u otra falla tecnológica, puede causar la separación parcial entre láminas. Estas fallas son notorias luego de varios años de servicio y cuando el

material ha sido expuesto a condiciones de intemperismo (sol y lluvia), en esos casos se puede ver una delaminación como la que se muestra en la Figura 3.



**Figura 3: Delaminación de madera laminada encolada tras 34 años de servicio**

Fuente: Divos, F. (2011)

#### 2.2.4.2. *Fractura dentro de las láminas*

En el pasado, los elementos estructurales de MLE contenían médula (casos extremos) en el eje central, el cual soporta la carga mecánica y se mostraban fallas como la que se aprecia en la parte izquierda de la Figura 4. En estos casos, la fractura era visible incluso en la superficie, tal y como se muestra en la parte media de la Figura 4. Los extremos de los elementos estructurales son más vulnerables a sufrir delaminación o fracturas, especialmente si contienen parte medular, como se muestra en la parte derecha de la Figura 4.



**Figura 4: Severas delaminaciones y fracturas en elementos estructurales con más de 34 años de servicio**

Fuente: Divos, F. (2011)

### **2.3. Aspectos generales de la adhesión**

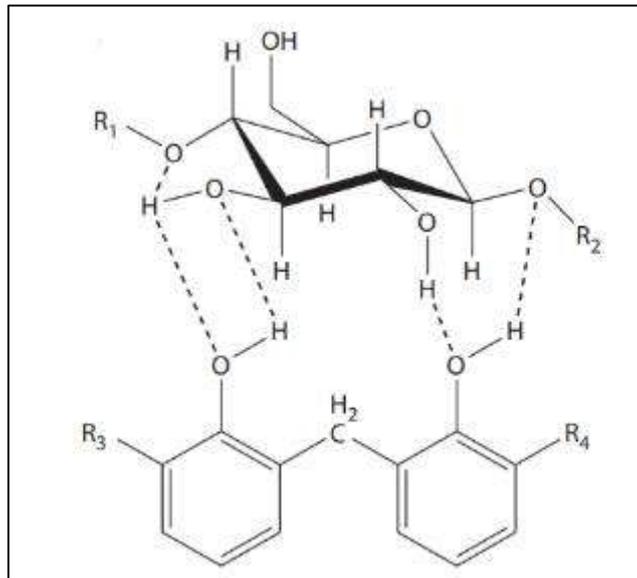
#### **2.3.1. Adhesión**

Es la interacción existente en la interface entre el adhesivo y sustrato, no debiéndose confundir con las fuerzas de enlace (Vick, 1999). La calidad de la adhesión está en función de dicha interacción, si es poca, el adhesivo y sustrato se separarán con la aplicación de fuerza.

#### **2.3.2. Adhesión de madera**

La adhesión de la madera y adhesivo se rige por uniones a través de enlaces, los cuales proporcionan resistencia al formar un enclavamiento mecánico; esta resistencia, a su vez, está en función de la cantidad de adhesivo que logra penetrar en los poros del sustrato. A nivel molecular, los componentes de la madera son ricos en grupos hidroxilo y algunos contienen ácido carboxílico y grupos éster. Estos grupos forman enlaces de hidrógeno internos y muy fuertes, que son responsables de la resistencia de la madera, pero también pueden formar

enlaces de hidrógeno externos, pudiendo así formar enlaces con adhesivos de base biológica y sintética (Ülker, 2016). La Figura 5 muestra un ejemplo de enlace a nivel molecular.

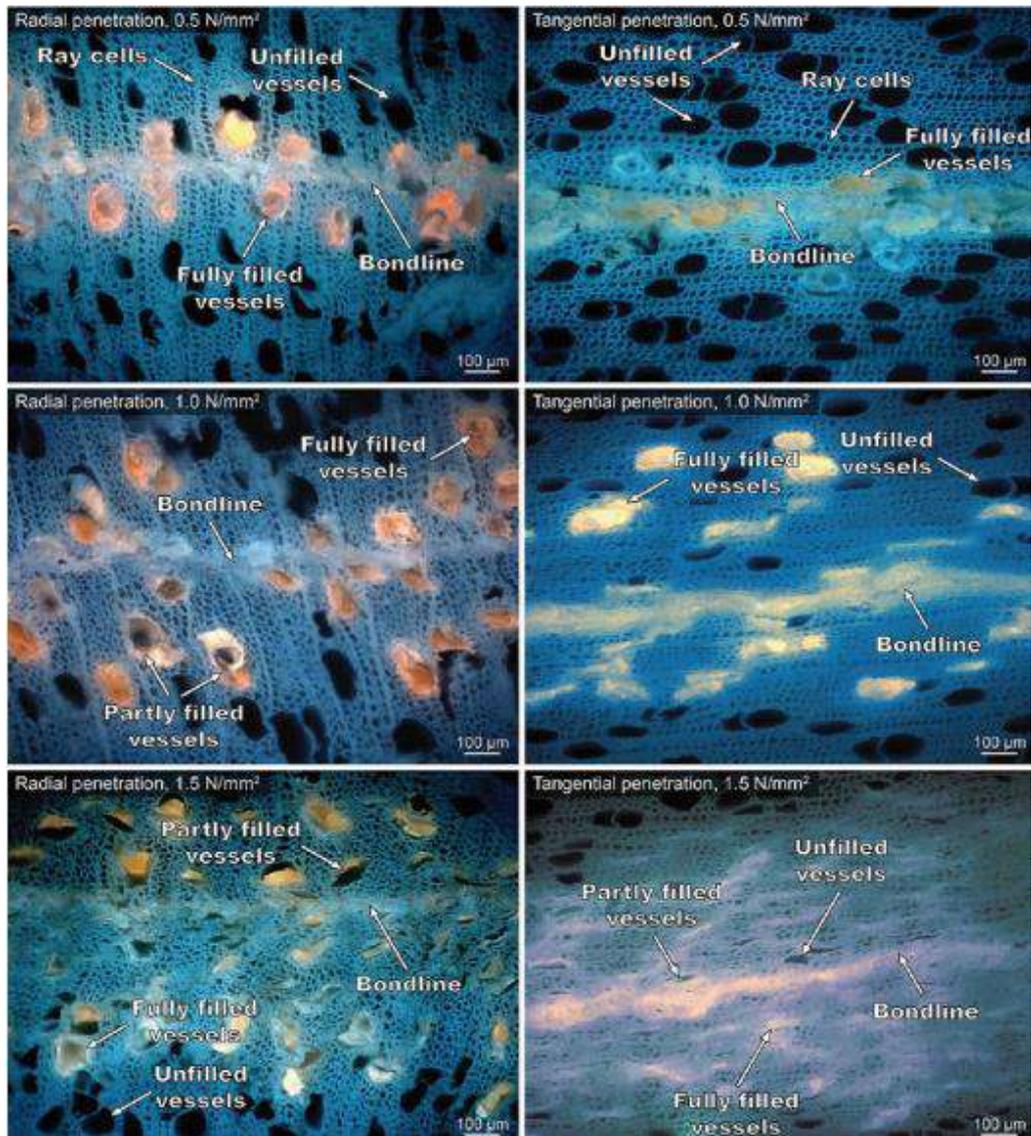


**Figura 5: Enlace de hidrógeno entre un fragmento celulósico y un polímero PF**

Fuente: Frihart, CR. (2005)

El enclavamiento mecánico varía según las especies de madera y la morfología de su superficie. Los tipos y tamaños de elementos anatómicos son diferentes entre madera dura y blanda, variando su capacidad de penetración de líquidos, cantidad de extractivos y distribución de sus células. Las células de madera temprana, con las paredes más delgadas, deberían ser más fáciles de unir debido a un lumen más accesible. La albura de una especie generalmente se considera más fácil de unir que el duramen, debido a los cambios en la cantidad de extractivos. La madera juvenil, de compresión y tensión tiene estructuras celulares distorsionadas que deberían debilitar la región de interface adhesiva de la madera. Simplificando, es importante clasificar la madera que se desea encolar. (Frihart, 2005).

La Figura 6 muestra como la geometría de la interface entre adhesivo y sustrato (madera) se ve influenciada por el prensado. Esta conformación de la estructura de la interface tiene un efecto muy significativo en el rendimiento de los enlaces formados.



**Figura 6: Microfotografía de la interface entre adhesivo y madera**

Fuente: Ülker, O. (2016)

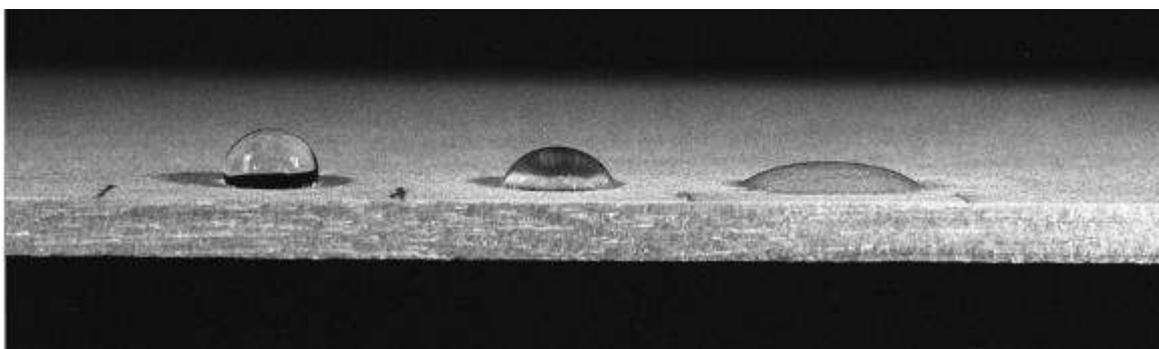
### 2.3.3. Superficie de la madera

La superficie de la madera debe ser mecanizada de manera suave, de forma que no queden irregularidades (granos, astilladuras, marcas de máquina u otros) y hasta 24 horas antes de realizar el encolado. El lijado o cepillado, ha demostrado ser una ventaja al momento de preparar superficies para encolar; sin embargo, este debe ser ligero, ya que una superficie pulida dificultará la formación de enlaces con el adhesivo; por otro lado, hay una creencia de que se logra una mejor adhesión con superficies rugosas, la cual ha sido desmentida con

ensayos comparativos de resistencia con superficies rugosas versus superficies lisas (Selbo, 1975).

La preparación de la superficie de la madera es más compleja de lo que parece, no solamente por el comportamiento anisotrópico que presenta, sino también por la composición química y la variación del tamaño de sus células (madera temprana y tardía o madera de albura y duramen) de las diversas especies, sin sumarle a esto la estructura distorsionada que presenta la madera de compresión y tensión. Por otro lado, si bien los extractivos se han considerado como un factor que afecte de forma negativa la resistencia adhesiva, no se ha evidenciado que estos sean los causantes principales, pero sí influyen durante la humectación, cuando salen a la superficie moléculas de baja polaridad (Frihart CR, 2005).

La Figura 7 muestra la importancia de la preparación de la superficie de la madera para optimizar la humectación con el adhesivo, desde una superficie sin tratamiento (izquierda) hasta una lijada (derecha).



**Figura 7: Humectación de superficie de madera**

Fuente: Frihart, CR, (2005)

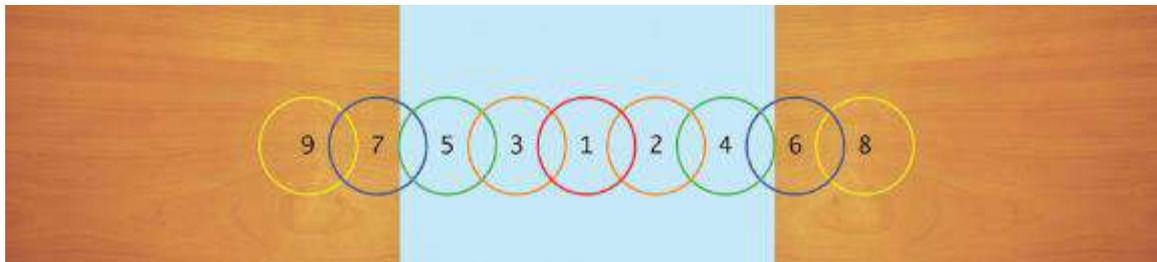
#### **2.3.4. Penetración del adhesivo**

(Ülker, 2006) señala que la penetración de adhesivo en la madera se clasifica en dos grupos:

- Penetración bruta: La que ocurre cuando la resina llena la estructura porosa de la madera, en su mayoría lúmenes de las células.

- Penetración de la pared celular: La que ocurre cuando la resina se difunde en la pared celular o fluye hacia microfisuras.

La penetración del adhesivo influye en la formación de todos los posibles mecanismos de adhesión, así como también el área de superficie en contacto entre adhesivo y pared celular. La Figura 8 muestra las cadenas de enlaces formados para una unión adhesiva en madera, la penetración del adhesivo abarca los números del 4 al 7, representando esta zona a los enlaces formados por cohesión, mientras que los números extremos 8 y 9, representan a los enlaces formados por adhesión, en contacto con la superficie de la madera.



**Figura 8: Eslabón de cadenas de enlaces por cohesión y adhesión**

Fuente: Ülker, O. (2006)

En una superficie de madera sin lijado o algún otro tratamiento mecánico previo, la formación de enlaces de adhesión ubicados en los números 8 y 9, serían débiles. En otras palabras, la madera sería la más propensa a fallar frente a diferentes esfuerzos que pueda sufrir la unión madera-adhesivo.

Cuando la pared celular es delgada, en comparación con el diámetro de la célula, habrá más fractura longitudinal y transversal de la pared celular. Los vasos de madera suave y las células de madera temprana tienen paredes delgadas que se dividen fácilmente para abrir los lúmenes al adhesivo para una buena penetración. Por otro lado, las fibras de madera dura y las células de madera tardía tienen paredes gruesas que no son fáciles de fracturar, por lo que la fractura a menudo se produce más en la lámina media, lo que proporciona menos área para el anclaje mecánico.

## **2.4. Factores que afectan la calidad de adhesión de la madera laminada encolada**

### **2.4.1. Superficie de la madera**

Benites y Pérez (2002) señalan que “el deterioro físico y contaminación química de la superficie, interfieren en el mojado, movimiento y penetración del adhesivo, pero también en el curado y la resistencia de cohesión resultante del adhesivo. Por ello, la superficie de la madera debe ser lisa, plana, libre de marcas producidas por las máquinas u otras irregularidades superficiales, defectos en el grano y también debe estar libre de barnices, exudados, aceites, suciedad, entre otros”.

Según Poblete, citado por Otúzar (2008), “la adhesión es la condición en la que dos superficies se mantienen unidas”. En el caso de la madera, Vick, citado por Otúzar (2008), indica que, para que el proceso de adhesión sea completado, el adhesivo debe penetrar en los espacios porosos en su estado líquido, lo cual se favorece con una superficie bien preparada, de forma que cuando se solidifique, la unión resista eficazmente maquinados posteriores; entonces, se puede afirmar que las superficies están efectivamente adheridas.

La norma UNE-EN 14080 (2013), indica que los procesos de encolado posteriores al lijado de las superficies, no deben tardar demasiado, puesto que la superficie puede contaminarse y sufrir reacciones químicas que afectan la formación de enlaces sustrato – adhesivo. Matsuda (1995) señala que en la madera, al estar hecha primordialmente de celulosa, hemicelulosa y lignina, los sitios reactivos más abundantes son grupos hidroxilo, los cuales sufren modificaciones químicas por eterificación, esterificación y oxidación; la oxidación puede ser de varios tipos y depende sustancialmente de la naturaleza de los oxidantes.

### **2.4.2. Propiedades anatómicas de la madera**

Según Kollmann, citado por Camargo y Vicente (2000), las propiedades anatómicas de la madera tienen un efecto nítido en las uniones adhesivas y generalmente las maderas tropicales presentan más dificultades que las coníferas.

La porosidad es una propiedad que influye en la penetración del adhesivo, por ello Marra, citado por Camargo y Vicente (2000), recalca esta propiedad recordando que el tejido leñoso producido para resistencia, posee una densidad más elevada; por lo tanto, presenta paredes celulares más gruesas, así como lúmenes y punteaduras reducidas. Estas características tienden a limitar el movimiento del adhesivo, ya que cuanto más densa es la madera, será menos permeable al adhesivo y; por consecuencia, originará una unión adhesiva superficial y probablemente más débil.

Los vasos de madera dura y las células de madera temprana tienen paredes delgadas que se dividen fácilmente para abrir los lúmenes al adhesivo para una buena penetración. Por otro lado, las fibras de madera dura y las células de madera tardía tienen paredes gruesas que no son fáciles de fracturar, por lo que la fractura a menudo se produce más en la lámina media, lo que proporciona menos área para el anclaje mecánico.

#### **2.4.3. Propiedades físicas de la madera**

Carmona *et al.* (1998) señalan que de acuerdo a varios autores, la densidad es el factor de mayor incidencia en cuanto a la encolabilidad, ya que en las especies menos densas el adhesivo es absorbido por la madera y genera uniones pobres, debido a que en estos sustratos la madera falla más fácilmente que la línea de cola. Basset, citado por Carmona *et al.* (1998), indica que maderas con densidades altas (mayores a  $0.7 \text{ g/cm}^3$ ) también suelen generar uniones débiles, por una mala transferencia de adhesivo entre sustratos, o exceso de escurrimiento lateral durante el prensado.

Respecto al contenido de humedad, De Cristófano (s.f.) hace énfasis en que las uniones encoladas más resistentes, puestas en servicio, son las que tuvieron un contenido de humedad óptimo durante el encolado, ya que el adhesivo aumenta el contenido de humedad en la madera al esparcirse en las láminas, pero esto depende del espesor de las piezas, del tipo de adhesivo, de la especie de madera y la cantidad de adhesivo usado. Las líneas de cola no suelen ser de calidad cuando el contenido de humedad en la madera es alto, es por ello que la madera a usarse debe mantener un rango de entre 12 a 17% y como no todas las tablas usadas en la conformación de láminas tienen el mismo contenido de humedad, recomienda que se acepten

diferencias no mayores a 4% entre láminas y no mayor a 2% entre sectores de una misma lámina.

El contenido de humedad puede afectar los procesos de curado, He y Yan (2005) demostraron que la reacción química de un adhesivo basado en isocianato se puede ver afectada por el contenido de humedad en la madera, haciendo que las energías de activación y velocidad de reacción sean variables con la cantidad de agua presente en la madera, la cual llega a ser estable con madera seca a un promedio de 12% de contenido de humedad.

Por otro lado, Bomba *et al.* (2014) demostraron la influencia del contenido de humedad en uniones de madera con adhesivos de acetato de polivinilo (PVAc) y poliuretano (PUR), concluyendo que los valores de resistencia obtenidos disminuyen a medida que aumenta el contenido de humedad, pero aun así pueden llegar a cubrir su resistencia mínima establecida.

#### **2.4.4. Composición química de la madera**

Poblete, citado por Otúzar (2008), menciona al pH de la madera y características del adhesivo (pH, viscosidad y tiempo de reunión) como variables que afectan las fuerzas intermoleculares de atracción entre madera y adhesivo.

Wang *et al.* (2010) estudiaron la influencia del pH en las uniones adhesivo-madera, concluyendo que la madera modera significativamente el pH de dichas uniones, especialmente para los adhesivos alcalinos, aunque también logran amortiguar adhesivos altamente ácidos, pero en menor medida. Los catalizadores de los adhesivos (ácidos y alcalinos) tienen como función acelerar el proceso de curado y evitar que la madera amortigüe excesivamente el adhesivo, lo cual cambiaría su pH y retardaría así su velocidad de curado. Debido a esto es que muchos de los adhesivos tienen estándares de pH mínimos y máximos.

La madera tiene la capacidad de almacenar adhesivos altamente alcalinos o ácidos, pero la alta exposición a la humedad podría hacer que los adhesivos, extremadamente ácidos o alcalinos, provoquen la degradación de los componentes de madera y una resistencia reducida en la interfaz adhesivo-madera de los productos unidos. Las hemicelulosas de la madera son susceptibles a la degradación tanto ácida como alcalina. En general, la celulosa es más

resistente a los álcalis y la lignina es más resistente a los ácidos (Sjostrom, citado por Wang *et al.* 2010).

Otro componente a tomar en cuenta son los extractivos, Wegener, citado por Rey (2010), remarca su importancia, ya que estos son los que determinan el pH de la madera, siendo el pH factor importante durante el fraguado de los adhesivos.

Rey (2010) menciona que la cantidad de extractivos dentro la madera es variable, generalmente es mayor en el duramen con respecto a la albura y también varía a lo largo del fuste, siendo mayor en la parte basal y decreciendo hacia la parte apical. Por consecuencia, los niveles de PH también varían.

## **2.5. Adhesivos**

Según la AITIM (s.f.), el adhesivo que se utiliza en la fabricación de la madera laminada desde hace varios años, casi con exclusividad, es la cola de Resorcina Fenol Formol (RFF). Actualmente existen otras opciones como la cola de Melamina-Urea-Formaldehido (MUF) o Emulsión Polimérica de Isocianato (EPI).

Los más utilizados en la actualidad son:

- Melamina-Urea-Formaldehído (MUF).
- Resorcina-Fenol-Formaldehído (RPF).
- Emulsión Polimérica de Isocianato (EPI)

### **2.5.1. Emulsión polimérica de isocianato (EPI)**

Es un adhesivo termoplástico de cadena larga que por lo general tiene menos resistencia al calor, la humedad y la carga estática, pero que a largo plazo se vuelve polímeros termoestables (Frihart & Hunt, citados por López *et al.* 2013).

Boerhorst, citado por López *et al.* (2013), afirman que “este adhesivo junto con su endurecedor de isocianato, forman una unión muy fuerte e impermeable (D4++), tiene tanto un endurecimiento físico como un endurecimiento químico, por tanto, es menos sensible a los cambios de humedad y de temperatura en su entorno y garantiza propiedades para soportar carga hasta de 6 m de luz”.

AkzoNobel (2010), indica que el adhesivo EPI es usado para unir madera con madera de forma estructural, la línea de cola presenta una alta resistencia a factores climáticos y a agentes químicos, así como una excelente resistencia a esfuerzos cortantes.

### **2.5.2. Melamina-Urea-Formaldehido (MUF)**

Edebé, citado por López *et al.* (2013), lo define como “polímero termoestable, excelente adhesivo estructural ya que forma polímeros reticulados que pueden tener una alta resistencia a la humedad y otros productos químicos, y son lo suficientemente rígidos para soportar esfuerzo mecánico sin deformarse”. También agrega que, los adhesivos termoestables por acción de un agente externo (catalizador, calor o luz UV), experimentan una reacción química que los lleva a un estado sólido, permanentemente resistente al calor, generándose así una transformación irreversible, pero conservando todas sus propiedades físicas y químicas en caliente”.

Demkoff, citado por López *et al.* (2013), menciona que este adhesivo tiene un desempeño similar con el Fenol-Resorcinol-Formaldehido (PRF) pero con mejores características y más amigable con el medio ambiente.

## **2.6. Fabricación de vigas de madera laminada encolada**

Arbeláez (2013), afirma que “es un proceso relativamente sencillo pero muy sensible en cada uno de sus pasos; por ello, es importante controlar algunos factores como el tamaño de láminas, así como la cantidad y tipo de adhesivo a utilizar”.

Dicho proceso consiste en pasos muy específicos, como son: dimensionamiento de la madera en láminas, secado, bonificado o saneado de la madera, elaboración de las uniones dentadas o

finger joint, encolado y la aplicación de presión. Los procesos a desarrollar se detallan a continuación.

#### **a. Dimensionamiento de láminas**

Arbeláez (2013), al trabajar con *Pinus patula*, señala que si la madera es procedente del bosque, se deben aserrar a cuartones de 5 cm de espesor. Para esta elección de espesor del cuartón, se debe tener en cuenta la optimización de la madera; se recomienda que esta dimensión no sea mayor de 5 cm para obtener un secado en menor tiempo y de mejor calidad. Dimensiones menores de 3 cm son antieconómicas, pues se debe utilizar mayor tiempo de máquina y mayor número de líneas de cola.

#### **b. Bonificado o saneado**

Este proceso consiste en seleccionar y desechar defectos (nudos, madera podrida y otros), lo que permite que el material a fabricar no se vea afectado notoriamente en sus propiedades mecánicas y por consecuencia no se vea afectado el encolado.

El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 C.9.5 permite el uso de la madera de menor calidad en sitios donde se presenta esfuerzos menores, reduciendo los desperdicios de madera al mínimo. En el caso de vigas, (Rosboro, 2013) afirma que también es posible usar maderas de menor calidad en partes específicas.

#### **c. Secado**

Córdoba (2005) señala que el secado es uno de los aspectos más importantes en el proceso de la madera laminada, ya que de un buen secado se deriva un buen producto. Los beneficios de la madera seca son muchos, pero los más importantes para el proceso de laminado son:

- Reducción del peso: la madera seca puede pesar entre un 25 y 50% menos que en estado verde.

- Estabilidad dimensional: Cuando la madera está en la humedad de equilibrio no sufre cambios apreciables en sus dimensiones.
- Resistencia mecánica: Cuando el agua libre ha sido eliminada por completo hasta llegar a una humedad cercana al 10%, variando este valor entre especies, la resistencia mecánica sube aproximadamente un 33%.
- Adhesivos: Con un secado adecuado se obtienen líneas de colas más estables y resistentes al disminuir al mínimo la migración de humedad.

El secado para la fabricación de madera laminada tiene que ser por métodos artificiales, ya que estos garantizan secados más uniformes, con mejor calidad y en tiempos relativamente cortos.

Tellechea (s.f.) recalca que se debe tener especial cuidado con las diferencias de humedades de cada lámina, esta no debe ser superior al 4% entre tablas contiguas. Se debe tener un contenido de humedad que se sitúe dentro de los límites aptos para su encolado. Las láminas deben tener un contenido de humedad menor del 15%, para su óptimo funcionamiento.

#### **d. Uniones**

Tellechea (s.f.) indica que las láminas se empalman unas con otras mediante un proceso conocido como finger joint o de juntas de dedos, que son entalladuras múltiples en sus extremos. Esta unión también puede hacerse con un adhesivo no necesariamente estructural y se debe ejercer una presión mínima de 2 MPa. Luego se deja en reposo para permitir la correcta unión química de los empalmes.

Demkoff (2003), sugiere que en este proceso se verifique que el contenido de humedad se encuentre entre un 12 y 15%, con diferencias que no superen el 4% entre tablas y no mayores al 2% a lo largo de la misma tabla.

Además, el mismo autor afirma que el largo efectivo de los dientes del empalme debe ser como mínimo de 15 mm, asegurando el área suficiente de encolado para una adecuada unión estructural.

Existen dos tipos de uniones dentadas, vertical y horizontal, siendo la vertical la de principal uso en Europa y la horizontal en Estados Unidos, Canadá y Australia. El perfil vertical es un 9% más resistente que el horizontal ya que presenta más área de encolado. (Batista *et al.*, 2002).

#### **e. Cepillado**

Es el proceso de preparación de las láminas para el encolado, el cual debe asegurar una superficie uniforme que garantice una perfecta adherencia entre las láminas y la cola. Las láminas se deben cepillar con una tolerancia que depende del tipo de cola a utilizar; para la urea formaldehído se tiene una tolerancia de 0.1 mm por metro de largo y 0.2 mm cuando se usa urea resorcinol (Demkoff, 2003).

Para evitar la contaminación de la superficie de encolado, no deben transcurrir más de veinticuatro horas entre el proceso de cepillado y encolado de las láminas. Adicionalmente, se recomienda mantener las láminas en lugares libres de polvo y aserrín.

#### **f. Encolado**

Este proceso consiste en agregar adhesivo en las caras superior e inferior de las láminas, con un espesor constante de cola que varía de acuerdo con el tipo de adhesivo. Existen muchos tipos de colas y están condicionadas con el uso final de las vigas laminadas.

El gramaje a utilizar depende del uso del elemento estructural y del tipo de adhesivo; se puede verificar que este valor es correcto si al aplicar la presión se nota un leve lagrimeo en las uniones a lo largo de la línea de cola. Un lagrimeo excesivo indica presiones muy altas o gramajes muy altos de adhesivo o combinación de ambos factores (AkzoNobel, 2009).

En cuanto a la orientación de las láminas, todas deberán tener la orientación de los anillos hacia el mismo lado, con la excepción de las piezas destinadas a otros tipos de servicios (AITIM, 2011).

Este proceso es muy importante, no solo por la calidad de los adhesivos a usar, sino también porque se ve influenciado por las características anatómicas de la madera. Referente a este tema, Camargo y Vicente (2000), señalan que la variabilidad estructural y anatómica existente en la madera, afecta de modo significativo el rendimiento de una buena unión adhesiva.

Según Maloney (1977), “una variable importante referida al encolado, es la acidez, medida como pH y capacidad de buferización”. Mientras el pH mide el nivel específico de la acidez, la buferización cuantifica la capacidad de resistencia de la madera a cambiar su nivel de pH. Por ello, una madera con alta capacidad de buferización requiere gran cantidad de catalizador para reducir el nivel de pH, hasta llegar al óptimo requerido para curado del adhesivo.

Poblete (2001), afirma que “los extractivos de la madera determinan el valor del pH e influyen sobre el proceso de encolado; este efecto se debe a que las reacciones químicas, que ocurren durante el fraguado de los adhesivos convencionales, siguen su curso óptimo con un determinado rango del valor del pH”.

#### **g. Prensado**

Esta parte del proceso es muy importante, Tellechea (s.f.) indica que se colocan las piezas con las láminas encoladas en una prensa que aplica presión constante a lo largo de ella; es de vital importancia monitorear las condiciones ambientales, ya que los adhesivos son muy sensibles a cambios en la temperatura y humedad. La temperatura óptima del recinto es de 15 °C y la presión aplicada debe estar por el orden de 1 MPa, dependiendo del tipo de cola utilizado. La presión se aplica al centro de la pieza y avanza simétricamente hacia los extremos

La presión se debe ejercer de forma uniforme, ya que si no se da esta situación, la viga quedará con presiones localizadas, lo que puede generar un decremento significativo en sus propiedades mecánicas.

De acuerdo con AkzoNobel (2009), “la presión específica de prensado depende del espesor de las láminas y del tipo de madera; cuando se usa madera blanda se requiere una presión entre 0.6 y 0.8 MPa para láminas con espesores de 33 mm, mientras que con láminas de 45 mm se requiere entre 0.8 y 1 MPa. Para maderas duras se requiere un mínimo de 1 MPa”.

Controlar la presión específica es muy importante, ya que una presión excesiva puede generar lagrimeo excesivo lo que lleva a una línea de cola pobre, y poca presión genera pobre contacto entre las superficies. Es importante lograr niveles más exactos de presión realizando pruebas específicas para la planta de producción.

Finalmente, se deben almacenar las vigas evitando golpes y flexiones indebidas, hasta que se alcance la estabilidad higrométrica de las piezas encoladas. Este almacenaje se debe hacer en un lugar con condiciones de temperatura y humedad controladas.

Algunos otros estudios referentes a MLE, describen las características del uso de este material y su importancia. Sousa *et al.* (2012), evaluaron las propiedades mecánicas de MLE en flexión y tracción paralela a la fibra, determinando que las propiedades de resistencia están influenciadas por la presencia de defectos, he ahí la importancia de hacer una correcta selección de madera a usar para la fabricación de MLE, especialmente cuando la madera es de residuos. Por otro lado Zhuravlev *et al.* (2020), afirman que la MLE es un material moldeable y estéticamente expresivo, se puede aplicar a diferentes morfotipos espaciales y resiste eficazmente las condiciones ambientales extremas, por lo que consideran a este material se utilizará de forma variable en la arquitectura del futuro.

Referente a los cambios en MLE por incidencia de temperatura y humedad, Chiniforush *et al.* (2019), estudiaron este comportamiento con madera dura y suave, concluyendo que para ambos casos la temperatura y humedad inducen a una contracción e hinchamiento más pronunciado en dirección longitudinal que transversal, información importante para los análisis higrotermomecánicos de MLE a largo plazo. Estas condiciones ambientales a las que están sometidas las vigas laminadas, suelen originar delaminaciones a nivel de línea de cola entre láminas y entre uniones de empalmes finger joint, Gomes *et al.* (2017), evaluaron el comportamiento de vigas laminadas reparadas por efectos de delaminación, demostrando que las delaminaciones longitudinales que no involucran todo el ancho de la sección transversal, no afectan de forma considerable la resistencia y rigidez, en el caso de delaminaciones que requieren de reparación, están son efectivas para recuperar valores de resistencia y rigidez pero que no sobrepasan los de una viga sana. Otra alternativa es el uso de MLE reforzada, que según Issa y Kmeid (2005), aumenta la capacidad de carga de las vigas y además suele ser más económica.

Así como los mencionados, existen recientes estudios sobre MLE para variar su uso y mejorarlo en construcciones de grandes dimensiones como edificios y puentes, además de nuevos métodos tomográficos para detectar defectos como las delaminaciones internas en vigas laminadas gruesas, para mejorar los diseños y calidad de fabricación, en donde también se toma en cuenta los tipos de adhesivos usados. Todos estos estudios continuos se realizan para producir productos de MLE con un mejor rendimiento y que sean más rentables

### **III. METODOLOGÍA**

#### **3.1. Lugar de ejecución**

El presente trabajo de investigación se dividió en 3 partes: la recolección de madera fue realizada en la empresa KFR INVERSIONES S.A., la fabricación de las vigas laminadas fue realizada en las instalaciones de la Empresa POSTES WISE S.A.C., mientras que los ensayos anatómicos, físicos, químicos y mecánicos se realizaron en el Laboratorio de Anatomía e Identificación de Maderas, Laboratorio de Tecnología de la Madera, Laboratorio de Pulpa y Papel de la Madera y Laboratorio de Preservación de la Madera, pertenecientes al Departamento Académico de Industrias Forestales de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) y en el Laboratorio de Materiales e Insumos perteneciente al Centro de Innovación Productiva y Transferencia Tecnológica de la Madera (CITEmadera-Lima).

#### **3.2. Material experimental**

La Empresa KFR INVERSIONES S.A. proporcionó residuos de madera de la especie Cachimbo (*Cariniana domestica*), la cual se obtuvo del proceso de manufactura de mobiliario escolar.

#### **3.3. Adhesivos**

Los adhesivos usados fueron:

- Melamina-Urea-Formaldehido (MUF).
- Emulsión Polimérica de Isocianato (EPI).

### **3.4. Equipos y herramientas**

- Máquina de ensayos mecánicos "Tinius Olsen" y accesorios de cizallamiento.
- Autoclave a escala, modelo IE 0.31/1 1P
- Horno experimental con ventilación forzada.
- Baño termostático
- Balanza analítica Ohaus de 0.0001 g.
- Estufa eléctrica de 220 °C.
- Higrómetro de Pines.
- Vernier digital 0.01m
- Prensa Hidráulica de 6 pistones.
- Equipo de ensamble tipo Finger Joint
- Juntadora de testas.
- Sierra circular.
- Despuntadora
- Cepilladora
- Encoladora de rodillos.
- Brochas
- Garlopa
- Wincha
- Regla y escuadra.
- Lupa de 10x.
- Brocha

- Lápiz de cera y crayón

### **3.5. Metodología y procedimiento**

#### **3.5.1. Acopio de madera**

Se colectaron residuos de madera de la especie Cachimbo en la empresa KFR INVERSIONES S.A. realizándose durante su acopio, la identificación de la madera a nivel macroscópico, ya que esta se encontraba mezclada con residuos de otras especies comerciales.

##### ***3.5.1.1. Determinación de propiedades anatómicas de la madera***

La descripción anatómica se realizó siguiendo las normas de procedimientos del IBAMA (1991) y del Boletín de la International Association of Wood Anatomists - IAWA (1989), en las instalaciones del Laboratorio de Anatomía e Identificación de Maderas en la UNALM y del Laboratorio de Materiales e Insumos del CITEMadera-Lima.

##### ***3.5.1.2. Determinación de propiedades químicas de la madera***

Se determinaron las características de contenido de extractivos totales, pH y cenizas de los residuos de la madera Cachimbo en el Laboratorio de Pulpa y Papel de la Madera de la UNALM y con base en lo indicado en las normas TAPPI T 257 sp-12 (TAPPI, 2012) y TAPPI T 264 cm-07 (TAPPI, 2007).

##### ***3.5.1.3. Determinación de propiedades físicas de la madera***

Se evaluó el contenido de humedad con el método gravimétrico, según NTP 251.010 (2019), la densidad básica de la madera, según NTP 251.011 (revisada el 2019) y su variación dimensional, según NTP 251.012 (2015). Todos los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Tecnología de la Madera de la UNALM.

#### 3.5.1.4. *Determinación de propiedades mecánicas de la madera*

Se determinó la resistencia al cizallamiento paralelo al grano, con base en la NTP 251.013 (2015) en el Laboratorio de Tecnología de la Madera de la UNALM.



**Figura 9: Determinación de cizallamiento paralelo al grano**

### 3.6. Fabricación de las vigas

En la Tabla 4 se muestra el número de vigas y probetas a fabricar, cumpliendo con la cantidad mínima requerida por la norma UNE-EN 14080 (2013).

Se fabricaron cinco (05) vigas por cada tipo de adhesivo y sección comercial, de las cuales se extrajeron diez (10) probetas (de diferentes partes de la viga) para los ensayos de delaminación y esfuerzo cortante.

**Tabla 4: Numero de vigas y probetas según tipo de ensayo**

Especie	Adhesivo	Sección	Vigas	Probetas		
				Delaminación de los empalmes por unión dentada entre láminas	Esfuerzo cortante en los planos de encolado	Delaminación en planos de encolado
Cachimbo ( <i>Cariniana domestica</i> )	EPI	2"x6"	5	10	10	10
		2"x8"	5	10	10	10
	MUF	2"x6"	5	10	10	10
		2"x8"	5	10	10	10

Las dimensiones finales de las vigas fueron de sección 2"x6" y 2"x8", con longitudes variables mayores a 3 m. La fabricación se describe a continuación:

### 3.6.1. Selección de la madera

Se utilizaron residuos de madera Cachimbo, secos al horno en un rango de 8 a 15%. Las dimensiones fueron variables, pero se seleccionaron las que tenían como mínimo 1" de espesor y 2" de ancho, la longitud fue variable entre todas las piezas, llegándose a usar piezas de hasta 20".

Se revisaron y eliminaron todos los defectos (hongos, nudos, grietas, rajaduras, madera de compresión, entre otros.) para evitar que influyan en el proceso de fabricación.



**Figura 10: Selección de madera proveniente de residuos**

### **3.6.2. Verificación del contenido de humedad**

Se midió el contenido de humedad de todas las piezas con un higrómetro de pines, para asegurar que el promedio general se encuentre entre 6 a 15% y que la diferencia máxima entre piezas continuas no supere el 5%, tal como recomienda la norma UNE-EN 1408 (2013).



**Figura 11: Medición de contenido de humedad con higrómetro de pines**

### 3.6.3. Preparación y maquinado de láminas

Las piezas de madera que conformarán las láminas, fueron cepilladas y despuntadas, hasta dejarlas en dimensiones aproximadas de 1” de espesor y 2” de ancho, mientras que las superficies transversales quedaron emparejadas para facilitar el posterior proceso con la elaboración de los empalmes finger joint. Durante este proceso se evitó usar madera con defectos de dimensiones no permitidas por la norma UNE-EN 14080 (2013), como es el caso de los nudos mayores a 5 mm de diámetro.



**Figura 12: Extremos de tablas con empalmes finger joint**

### 3.6.4. Elaboración de empalmes tipo finger joint

Los extremos de las piezas seleccionadas se pasaron por una máquina formadora de empalmes finger joint. Los dientes del cabezal finger joint tenían 15 mm de longitud y 3 mm de paso, según las recomendaciones de la norma UNE-EN 14080 (2013). El tipo de maquinado de los empalmes finger joint realizado en las láminas fue vertical.

En la Tabla 5 se indican las medidas del perfil del cabezal finger joint que se usó para la fabricación de láminas.

**Tabla 5: Parámetros geométricos del perfil dentado (adaptado de UNE-EN 14080 (2013))**

Geometría del dentado		
$l_i$	Longitud del diente	15 mm
$P$	Paso	3 mm
$l_t$	Holgura del diente	0.1 mm
$b_t$	Ancho del diente	0.5 mm

### 3.6.5. Pre-armado de las vigas

En este proceso se distribuyeron las láminas de modo que las uniones dentadas tipo finger joint no se encuentren alineadas entre láminas; en este caso, se realizó con más cuidado ya que la madera de residuos es muy variable en cuanto a dimensiones.



**Figura 13: Pre-armado de vigas laminadas**



**Figura 14: Fresa de máquina formadora de empalmes finger joint**

### 3.6.6. Fabricación de láminas

#### 3.6.6.1. *Encolado de empalmes*

Previo al encolado, se calcularon las cantidades de adhesivo necesario en función al área a encolar, de acuerdo al gramaje recomendado en la ficha técnica de cada adhesivo, usando un gramaje de 200 g/m<sup>2</sup> para el adhesivo EPI y 320 g/m<sup>2</sup> para el adhesivo MUF. Luego se encolaron los empalmes de forma manual, usando brocha de ½”.



**Figura 15: Cálculo de adhesivo utilizado, de acuerdo al gramaje**



**Figura 16: Encolado de empalmes finger joint**

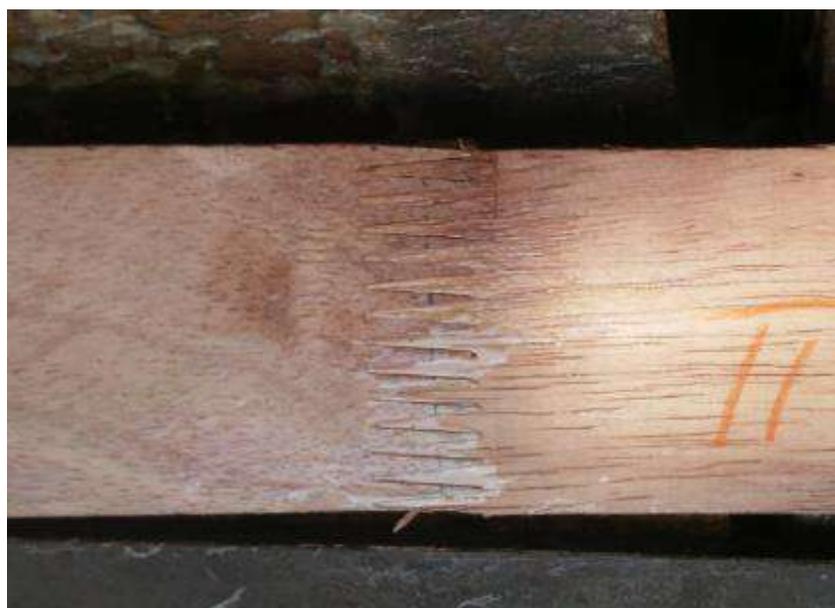
### 3.6.6.2. *Juntado de testas*

Luego de encolar los empalmes, se procedió a juntarlos usando una máquina juntadora de testas, los empalmes fueron juntados con una presión específica de 1 MPa, realizándose de forma continua hasta completar el largo de una lámina de aproximadamente 3 m.

Esta operación requirió de un tiempo de ensamblaje de 1 minuto, debido al tiempo de vida del adhesivo, evitando que la superficie de la madera se contamine y ocasione una adhesión deficiente.



**Figura 17: Juntado de empalmes finger joint**



**Figura 18: Empalmes con finger joint encoladas y prensadas**

### 3.6.6.3. *Periodo de fraguado del adhesivo*

Una vez encolados los empalmes y conformadas las láminas con cada tipo de adhesivo (EPI y MUF), se dejaron “curar” por 24 horas, de acuerdo a lo señalado en la ficha técnica de cada adhesivo, asegurando una correcta adhesión, dejando a las láminas listas para seguir con la fabricación de las vigas.



**Figura 19: Periodo de “curado” de láminas con empalmes finger joint**

### 3.6.6.4. *Cepillado*

Las láminas pasaron por una cepilladora de dos caras, dejándolas con un espesor de aproximadamente 1”.



**Figura 20: Cepillado de láminas unidas con empalmes finger joint**

#### 3.6.6.5. *Encolado de láminas*

Previamente, se calculó la cantidad de material a usar según el gramaje para cada adhesivo, siendo de 200 g/m<sup>2</sup> con adhesivo EPI y 350 g/m<sup>2</sup> con adhesivo MUF; luego, se encolaron las caras de las láminas de forma manual, usando brochas de 1½”, utilizando un tiempo de ensamblaje abierto y cerrado de 10 minutos.



**Figura 21: Forma de encolado de láminas en sus caras**

### 3.6.6.6. *Prensado*

Las láminas encoladas fueron apiladas para formar las vigas de sección aproximada de 2"x6" y 2"x8" respectivamente. Seguidamente, las vigas fueron colocadas en una prensa hidráulica, con una presión específica aplicada de 1 MPa para ambos adhesivos, mientras que los tiempos de prensado fueron de 10 horas para el adhesivo MUF y de 1 hora para el adhesivo EPI, tal como se indican en las fichas técnicas. Una vez completado el tiempo de prensado, se retiraron de la prensa y se dejaron culminar con el fraguado, por un tiempo mínimo de 24 horas.



**Figura 22: Prensado de vigas laminadas**



**Figura 23: Vigas laminadas en proceso de fraguado**

### 3.6.6.7. *Dimensionado final*

Las vigas laminadas fueron escuadradas, cepillando las secciones laterales y despuntando los extremos, para obtener las dimensiones finales de 2"x6"x10' y 2"x8"x10'.



**Figura 24: Cepillado de vigas laminadas**



**Figura 25: Vigas laminadas acabadas**

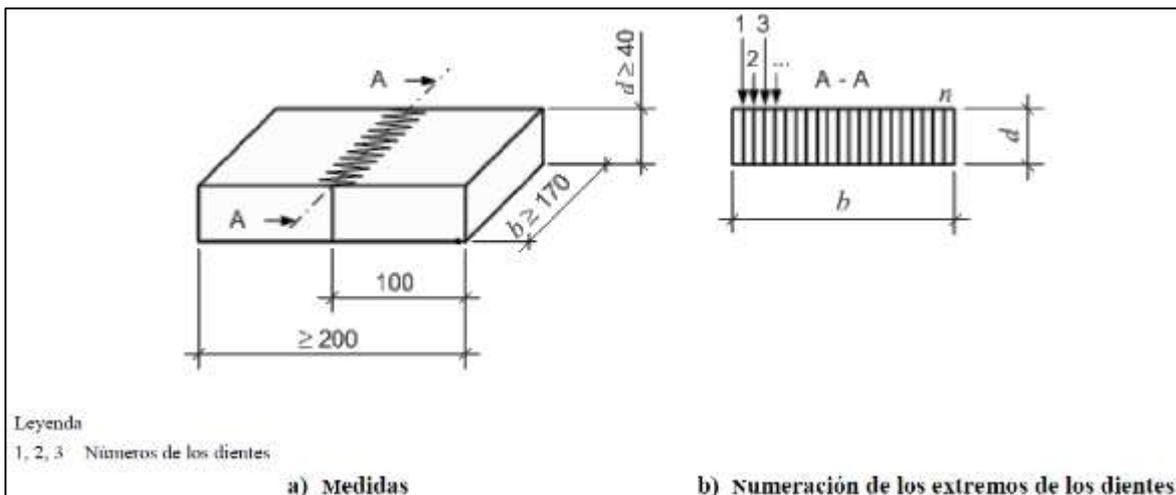
### 3.7. Ensayos de delaminación y esfuerzo cortante

La elaboración de probetas y los ensayos de delaminación y esfuerzo cortante, fueron realizados en base a la norma UNE-EN 14080 (2013).

#### 3.7.1. Delaminación de empalmes por unión dentada entre láminas

##### 3.7.1.1. Confección de probetas

Se elaboraron diez (10) probetas por tipo de adhesivo (MUF y EPI) y sección comercial (2"x6" y 2"x8"), tal como lo indica la norma UNE-EN 14080 (2013). Las dimensiones de cada probeta se muestran en la Figura 26.



**Figura 26: Dimensiones de probeta para ensayos de delaminación por unión dentada entre láminas**

Fuente: UNE-EN 14080 (2013)

##### 3.7.1.2. Ensayos de delaminación

Este ensayo fue realizado de acuerdo a la norma UNE-EN 14080 (2013), según la cual, antes de someter las probetas a las condiciones del ensayo:

- Se dejaron fraguar las probetas por 7 días.
- Se midieron los contenidos de humedad de cada probeta, utilizando un higrómetro de pines.
- Se midieron las líneas de cola en cada probeta por ambas caras, con imágenes tomadas mediante un estereoscopio.
- Se sumergieron en agua hirviendo por 5 horas, seguidamente se hizo una inmersión en agua fría a  $(20 \pm 5^\circ\text{C})$  por 1 hora.



**Figura 27: Probetas antes y durante el ensayo con agua hirviendo**

- Culminado el tratamiento en agua hirviendo y agua fría, se secaron en horno experimental a una temperatura de  $(60 \pm 3^\circ\text{C})$ , hasta alcanzar un contenido de humedad cercano al 19%, en un tiempo menor o igual de 18 horas.



**Figura 28: Secado de probetas en horno experimental**

### 3.7.1.3. *Determinación de delaminación*

Se calculó la delaminación total de las probetas, por la relación entre la longitud total de las delaminaciones y la longitud total de planos de encolado, como se muestra en la Ecuación 1.

#### **Ecuación 1:**

$$\text{Delaminación por probeta} = \frac{\text{Longitud total de delaminación}}{\text{Longitud de plano encolado}}$$

No se tomaron en cuenta las delaminaciones menores a 3 mm, tal como lo indica la norma UNE-EN 1408 (2013).

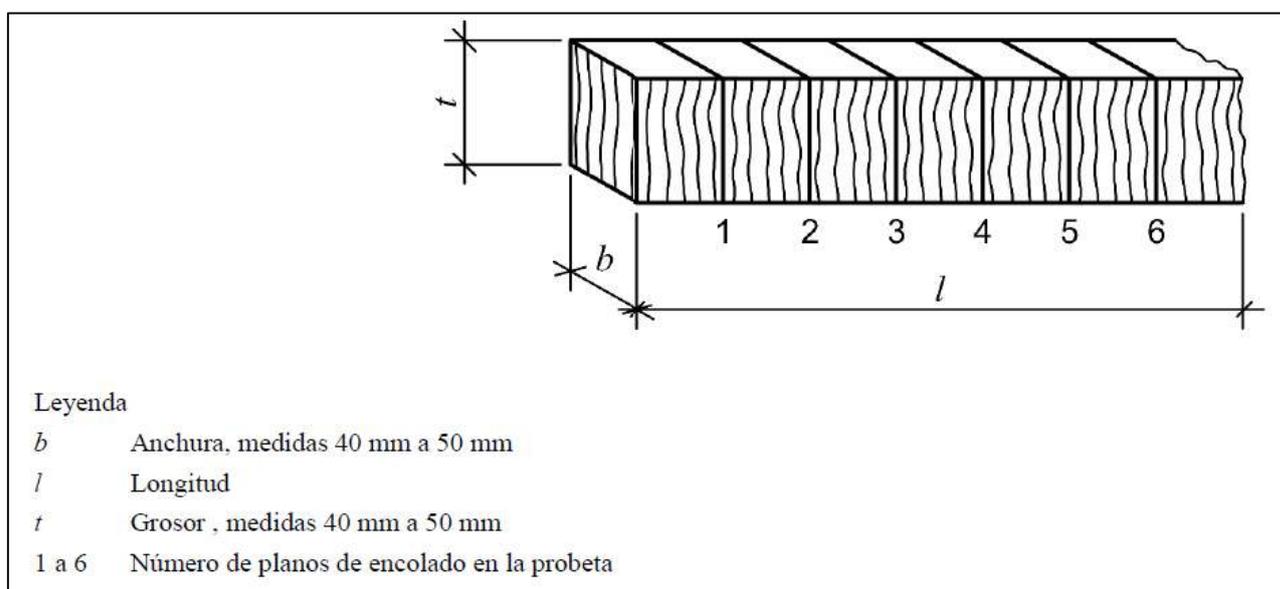
### **3.7.2. Esfuerzo cortante en los planos de encolado**

#### 3.7.2.1. *Elaboración de probetas*

Estas probetas fueron obtenidas mediante cortes transversales a las vigas, las dimensiones se muestran en la Figura 29 y la cantidad por cada tipo de viga se indican en la Tabla 6.

**Tabla 6: Cantidad de probetas para ensayo de esfuerzo cortante**

Adhesivo	Vigas	Líneas de cola por probeta	Probetas	Total de líneas de cola a ensayar
MUF	2"x6"	5	10	50
	2"x8"	7	10	70
EPI	2"x6"	5	10	50
	2"x8"	7	10	70



**Figura 29: Dimensiones de probetas para ensayo de esfuerzo cortante en los planos de encolado**

La norma UNE-EN 14080 (2013) indica que, si el espesor de la viga es menor a 100 mm, se ensaya la sección completa, pero si es mayor habrá que dividirla en 2 o hasta 3 partes longitudinalmente. Las vigas fabricadas tuvieron aproximadamente 50 mm de ancho, por lo cual no fue necesario dividir las longitudinalmente.



**Figura 30:** Dimensiones de probetas para ensayo de esfuerzo cortante en los planos de encolado

Fuente: UNE-EN 14080 (2013)

### 3.7.2.2. *Determinación de la resistencia al esfuerzo cortante en la línea de cola*

Para cada probeta se determinó la resistencia al esfuerzo cortante utilizando la Ecuación 2.

**Ecuación 2:**

$$f_v = K_v \frac{F_u}{A}$$

Dónde:

$f_v$  Resistencia al esfuerzo cortante (en N/mm<sup>2</sup>);

$F_u$  Carga de rotura (en N);

$A$  Área de cortante (en mm<sup>2</sup>);

$A = b t$  para una probeta prismática;

$b$  Anchura (en mm);

$K_v$  Factor de corrección  $K_v = 0.78 + 0.0044 t$ ; adimensional. Afecta cuando el grosor de la sección de rotura en la dirección de la fibra ( $t$ ) es inferior a 50 mm;

$t$  Grosor (en mm).

### 3.7.2.3. *Estimación del porcentaje de fallo en la madera*

Se estimó el porcentaje de área de fallo en la madera, aplicando la Ecuación 3.

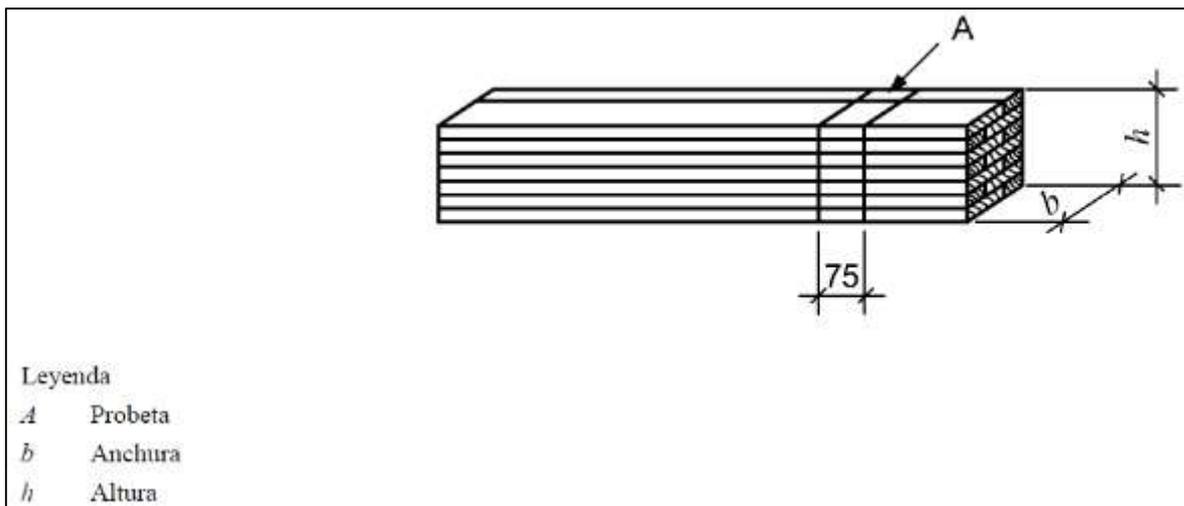
**Ecuación 3:**

$$\text{Porcentaje de fallo en la madera} = \frac{\text{Superficie de madera fallada}}{\text{Superficie encolada}} \times 100$$

### 3.7.3. **Delaminación en planos de encolado**

#### 3.7.3.1. *Confección de probetas*

Las probetas fueron obtenidas mediante cortes transversales a las vigas, las dimensiones se muestran en la Figura 31. Se extrajeron diez (10) probetas por cada tipo de viga, diez (10) por cada tipo de adhesivo (MUF y EPI) y diez (10) por cada sección (2"x8" y 2"x6"), siendo un total de 40.

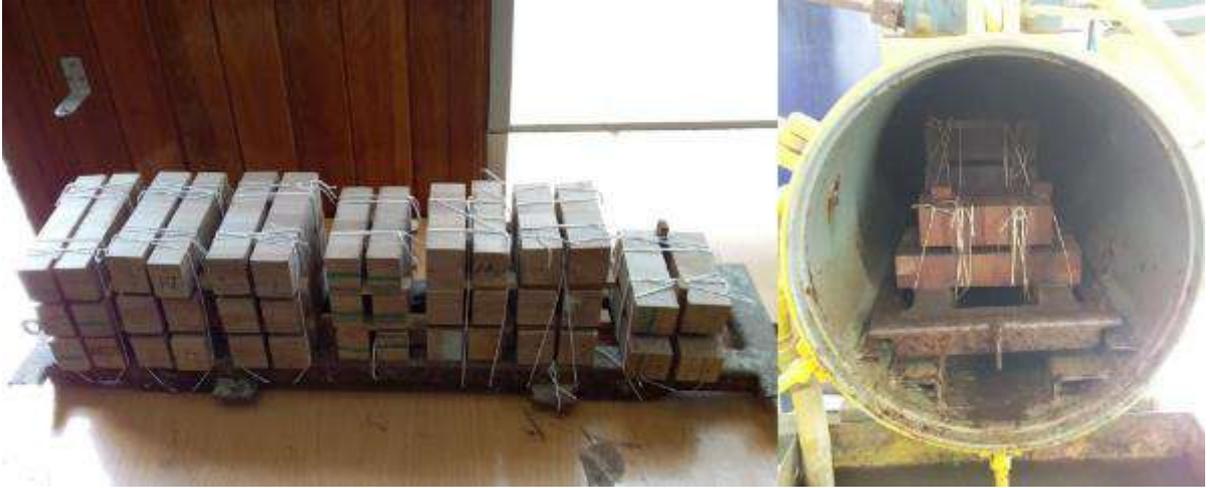


**Figura 31: Dimensiones de probetas para ensayo de delaminación en planos de encolado**

Fuente: UNE-EN 14080 (2013)

Este ensayo, de acuerdo a la norma UNE-EN 14080 (2013), se realizó bajo las condiciones del método A, para lo cual se usó la autoclave del Laboratorio de Preservación de la Madera de la UNALM, donde se colocaron las probetas. Se introdujo agua a una temperatura entre 10 °C y 20 °C en cantidad suficiente para que las piezas queden completamente sumergidas. Se dispusieron las probetas de modo que las testas queden expuestas al agua. Se realizó un vacío entre 70 kPa y 85 kPa y se mantuvo durante 5 minutos. Seguidamente, se suprimió el vacío y se aplicó una presión comprendida entre 500 kPa y 600 kPa durante 1 hora, permaneciendo las probetas completamente sumergidas. Se repitió este ciclo de vacío/presión, efectuando en total dos ciclos, que requirieron un total de 130 minutos.

Luego, las probetas fueron tratadas en una cámara de secado durante un tiempo de 21 a 22 horas, de 60 a 70°C de temperatura y humedad relativa del aire menor a 15%.



**Figura 32: Probetas antes y después del tratamiento en autoclave**



**Figura 33: Secado de probetas en horno experimental**

### 3.7.3.2. *Determinación de la delaminación en la línea de cola*

#### a. **Delaminación total**

El porcentaje de delaminación total de una probeta se calculó mediante la Ecuación 4.

**Ecuación 4:**

$$\text{Delam}_{\text{tot}} = \frac{l_{\text{tot,delam}}}{l_{\text{tot,plano encolado}}} \quad (\text{en } \%)$$

Dónde:

$l_{\text{tot,delam}}$  : es la longitud total de delaminación (en mm);

$l_{\text{tot,plano encolado}}$  : es la longitud total de planos de encolado en las dos superficies de testa de cada probeta (en mm).

#### b. **Delaminación máxima**

El porcentaje de delaminación máxima para una sola línea de cola en una probeta se calculó mediante la Ecuación 5.

**Ecuación 5:**

$$\text{Delam}_{\text{max}} = 100 \frac{l_{\text{max,delam}}}{2.l_{\text{plano encolado}}} \quad (\text{en } \%)$$

Dónde:

$l_{\text{max, delam}}$  es la longitud máxima de delaminación (en mm);

$l_{\text{plano encolado}}$  es la longitud de una línea de cola (en mm).

### 3.8. Análisis estadístico

Para el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos explicados en el punto 7, se hizo un diseño estadístico factorial de 2x2, que comprende las pruebas de análisis de varianza (ANOVA), de normalidad t-student y Shapiro-Wilk. De esta manera se probó si es que existe efecto de los factores sobre los resultados obtenidos y si las diferencias halladas son significativas. Los análisis fueron realizados con el programa estadístico “RStudio - 1.1.463”.

Unidad experimental: Probetas de uniones dentadas tipo finger joint y de madera laminada encolada.

Nivel de significancia: 95% de confianza con un  $\alpha= 0.05$ .

#### **Variables independientes:**

Especie de madera

- Cachimbo (Cariniana domestica)

Tipo de adhesivo

- Melamina-Urea-Formaldehido (MUF)
- Emulsión Polimérica de Isocianato (EPI)

Secciones comerciales

- 2”x6”
- 2”x8”

### **Variables dependientes:**

- Ensayo de delaminación de los empalmes por unión dentada (finger joint) entre láminas.
- Ensayo de delaminación en planos de encolado.
- Ensayo de esfuerzo cortante en los planos de encolado.

De acuerdo al diseño utilizado para los ensayos de delaminación, se plantearon las siguientes hipótesis:

- Ho: Tipo de madera, adhesivo y sección afectan la calidad de adhesión en la MLE.
- H1: Tipo de madera, adhesivo y sección no afectan la calidad de adhesión en la MLE.

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1. Propiedades anatómicas de la madera**

#### **4.1.1. Características generales**

En condición seca al aire, el duramen es de color rojo, los anillos de crecimiento diferenciados, olor y sabor no distintivos, grano recto ha entrecruzado, textura media a fina, brillo bajo a medio, vetado jaspeado, arcos superpuestos y satinados; resultados que coinciden con lo indicado por Aróstegui (1974).

#### **4.1.2. Descripción macroscópica**

La especie presenta porosidad difusa, con poros solitarios y múltiples radiales, líneas vasculares rectilíneas, finas, visibles a simple vista. El parénquima es reticulado y visible con lupa 10X, y radios no estratificados, descripción que concuerda con lo reportado por Aróstegui (1974).

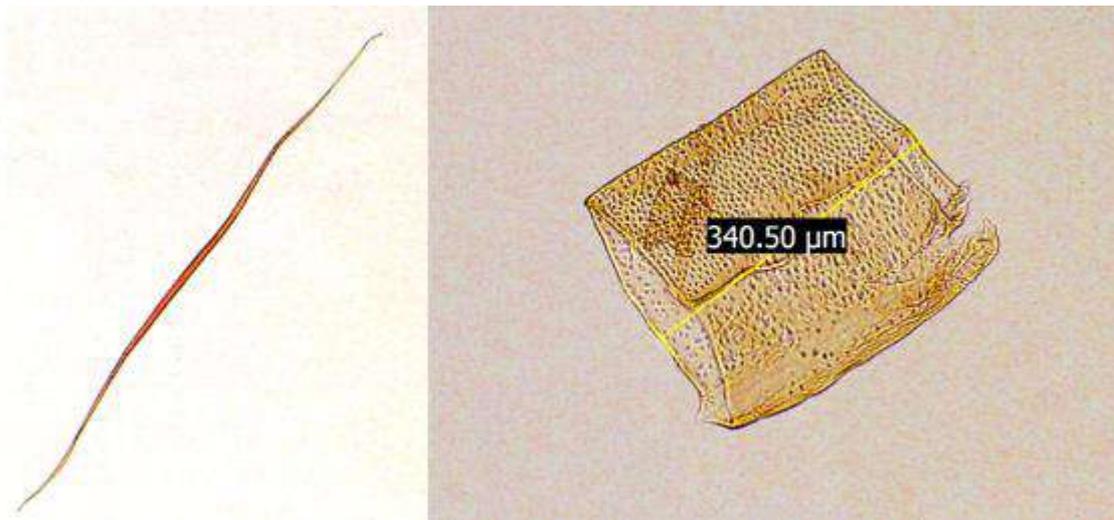
#### **4.1.3. Descripción microscópica**

Los poros son predominantemente de sección ovalada, con diámetro tangencial promedio de 189  $\mu\text{m}$  (de 114 a 265  $\mu\text{m}$ ), clasificado como mediano a moderadamente grande (100-200  $\mu\text{m}$ ) (IAWA, 1989). De 2 a 5 poros/ $\text{mm}^2$ , clasificados como pocos ( $\leq 5$ ) (IAWA, 1989). Longitud de elementos vasculares promedio 462  $\mu\text{m}$  (de 215 a 684  $\mu\text{m}$ ), clasificados como medianos (350–800  $\mu\text{m}$ ) (IAWA, 1989). Platinas de perforación simples, desde poco inclinadas (menos de 150°) a muy inclinadas (mayor de 150°). Punteaduras intervasculares alternas de forma redonda, diámetro de 7 a 10  $\mu\text{m}$  y clasificadas como pequeñas (7-10  $\mu\text{m}$ ) (IAWA, 1989), apertura incluida de forma ovalada.

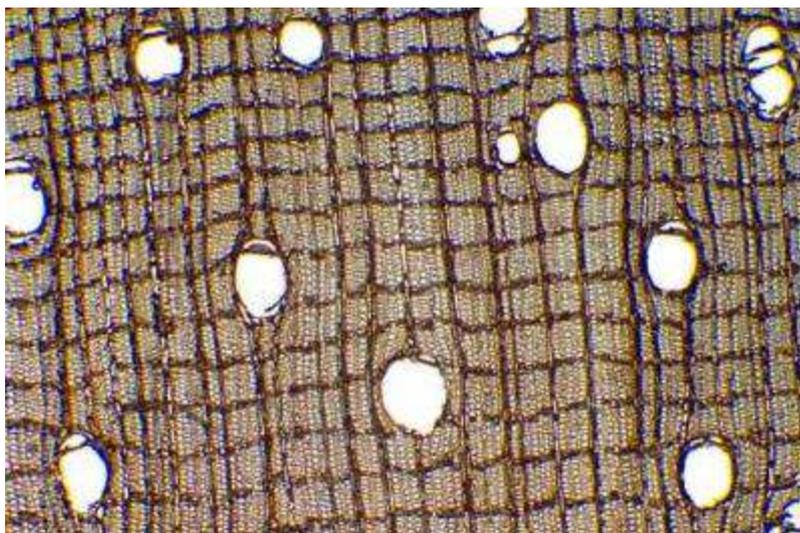
Los radios en sección tangencial son exclusivamente biseriados, con ancho promedio de 35  $\mu\text{m}$  (de 15 a 51  $\mu\text{m}$ ), clasificados como finos. Altura promedio de 327  $\mu\text{m}$  (de 181 a 474  $\mu\text{m}$ ) y con menos de 20 células de alto, clasificados como extremadamente bajos. En promedio 4 radios/  $\text{mm}^2$ , clasificados como poco numerosos ( $\leq 4$ ) (IAWA, 1989), no estratificados.

Las fibras son libriformes, con longitud promedio de 1350  $\mu\text{m}$  (de 884 a 2077  $\mu\text{m}$ ), clasificadas como medianas (900 – 1600  $\mu\text{m}$ ) (IAWA, 1989), en promedio 22  $\mu\text{m}$  de diámetro, clasificadas como angostas, de paredes delgadas y con un espesor promedio de 4  $\mu\text{m}$ ; no estratificadas.

Se aprecian en las Figuras 34 y 35, los elementos anatómicos medidos tras el proceso de macerado y corte histológico.



**Figura 34: Elementos anatómicos de la madera de Cachimbo**



**Figura 35: Corte histológico de la madera de Cachimbo**

La descripción anatómica de la madera de residuos de la especie Cachimbo, concuerda con lo descrito por Aróstegui (1974) y se encuentra dentro de los parámetros establecidos por el IAWA (1989). Esto muestra una homogeneidad de las muestras, lo cual es importante ya que la anatomía tiene influencia sobre las demás características de la madera.

#### **4.2. Propiedades químicas de la madera**

En la Tabla 7 se aprecian los valores promedio y el coeficiente de variación de los extractivos totales, pH y contenido de cenizas de los residuos de la madera Cachimbo.

**Tabla 7: Propiedades químicas de la madera Cachimbo**

<b>Propiedades químicas</b>	<b>Valor promedio</b>
<b>Extractivos totales (%)</b>	4.0 (14.99)
<b>pH</b>	5.0 (0.73)
<b>Cenizas (%)</b>	0.6 (32.71)

NOTA: Los valores entre paréntesis representan a los coeficientes de variación, en porcentaje.

La cantidad de extractivos totales se encuentra dentro del rango promedio para latifoliadas según Otero, citado por Del Aguila (2009), quien señala que la cantidad de extractivos para madera seca de latifoliadas oscila entre 2 a 4%.

El pH es ligeramente ácido, un valor promedio típico en la madera. Al respecto, Rüdiger (1975) determinó un promedio de 5.5, mientras que Avila *et al.*, citados por Del Aguila (2009), establecieron un rango de 3.3 a 6.5 de pH para madera y corteza. El propio Del Aguila (2009) determinó que el pH no solamente varía de albura a duramen o corteza, sino también a lo largo de los fustes.

El contenido de cenizas es un valor medio, de acuerdo a la clasificación de Almeida, citado por Paucar (2015), quien menciona que los valores de cenizas, tanto para coníferas, como latifoliadas; varían de 0.1 a 1.0%. Este compuesto es importante porque influye en la trabajabilidad de la madera.

#### **4.3. Propiedades físicas de la madera**

En la Tabla 8 se pueden apreciar los resultados obtenidos referentes a las propiedades físicas de los residuos de madera Cachimbo.

**Tabla 8: Propiedades físicas del Cachimbo**

<b>Propiedades</b>	<b>Valor</b>
<b>Contenido de humedad (%)</b>	14.3 (22.24)
<b>Densidad básica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0.59 (2.88)
<b>Contracción radial (%)</b>	4.26 (13.28)
<b>Contracción tangencial (%)</b>	6.78 (17.60)
<b>Contracción longitudinal (%)</b>	0.21 (15.37)
<b>Contracción volumétrica (%)</b>	10.15 (15.15)
<b>Relación T/R</b>	1.52 (14.65)

NOTA: Los valores entre paréntesis representan a los coeficientes de variación, en porcentaje.

El contenido de humedad promedio de los residuos de madera Cachimbo se encuentra dentro del rango recomendado por la norma UNE-EN 14080 (2013); del mismo modo, el contenido de humedad entre las piezas de madera no supera el 4% de diferencia, como especifica Demkoff (2003). Por tanto, se cumplen las condiciones en cuanto al contenido de humedad para tener una buena calidad de adhesión entre piezas que conforman una lámina y entre láminas.

El valor promedio de densidad básica es similar al reportado por Aróstegui (1974), de 0.59 g/cm<sup>3</sup>, reafirmando al Cachimbo como una especie maderable de densidad básica media a alta. Los valores generales oscilan entre 0.55 g/cm<sup>3</sup> y 0.61 g/cm<sup>3</sup>; sin embargo, Oshiro (2016) afirma la madera es de fácil trabajabilidad, excepto por su contenido de sílice, el cual afecta el filo de las herramientas.

Según lo esperado, la contracción radial (4.26%) es 1.5 veces menor que la tangencial (6.78%), valores que se encuentran dentro de lo normal, según Ananías, citado por Gamez (2007). La contracción longitudinal es mínima (0.21%) y la volumétrica muestra un valor medio (10.15%), no tan diferente a lo reportado por Aróstegui (1974) con 12.10%. Estos valores indican que la madera es de baja contracción y se comporta bien al secado natural y artificial.

El valor de la relación T/R de 1.52 obtenido no muestra mayor variación que al registrado por Aróstegui (1974) quien indica un valor de 1.5. Por tanto, se califica al Cachimbo como una especie dimensionalmente estable, ya que no presenta fuertes tensiones que hagan inviable su uso en productos estructurales.

#### **4.4. Propiedades mecánicas de la madera**

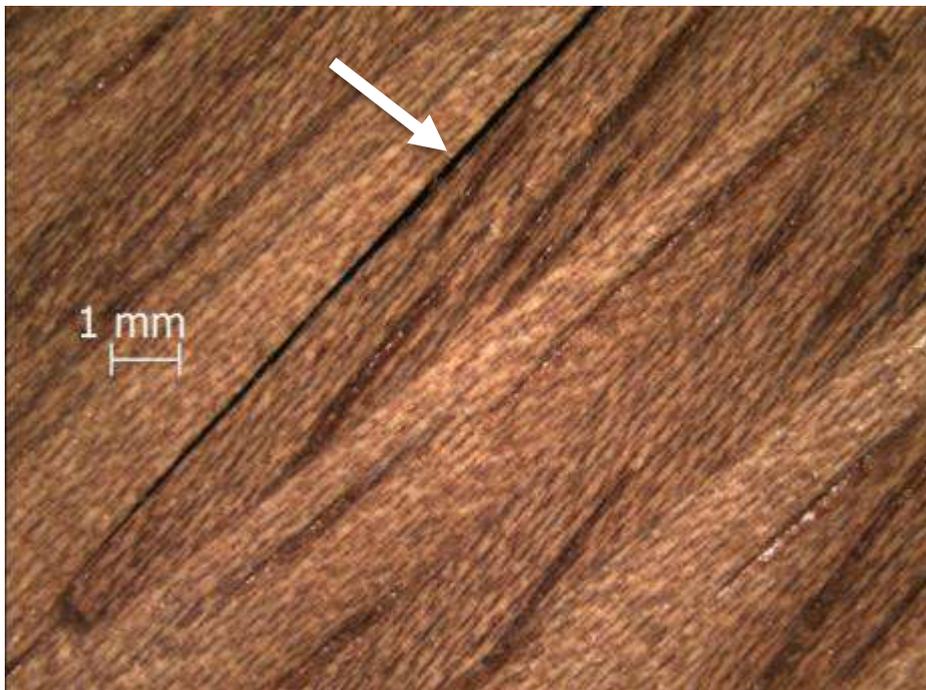
##### **4.4.1. Resistencia al cizallamiento paralelo al grano**

La resistencia al cizallamiento paralelo al grano obtenida al ensayar 45 probetas de Cachimbo, dio como resultado un promedio de 8.36 MPa, con un coeficiente de variación de 19.8%, valor que refleja una moderada variabilidad de las muestras, pero no alta (>25%), según Ramos *et al.* (2020).

Esta variabilidad se explica porque las muestras de la madera Cachimbo provienen de residuos; sin embargo, este valor promedio determinado es similar al reportado por Aróstegui (1974), siendo 8.53 MPa, y según Aróstegui *et al.* (1986) clasificado como de media resistencia.

#### **4.5. Delaminación de los empalmes por unión dentada entre láminas**

Se ensayaron 20 probetas en total, 10 por cada tipo de adhesivo (MUF y EPI), en los puntos siguientes se muestran los resultados individuales y comparativos. La Figura 36 expone la delaminación en el empalme finger joint.



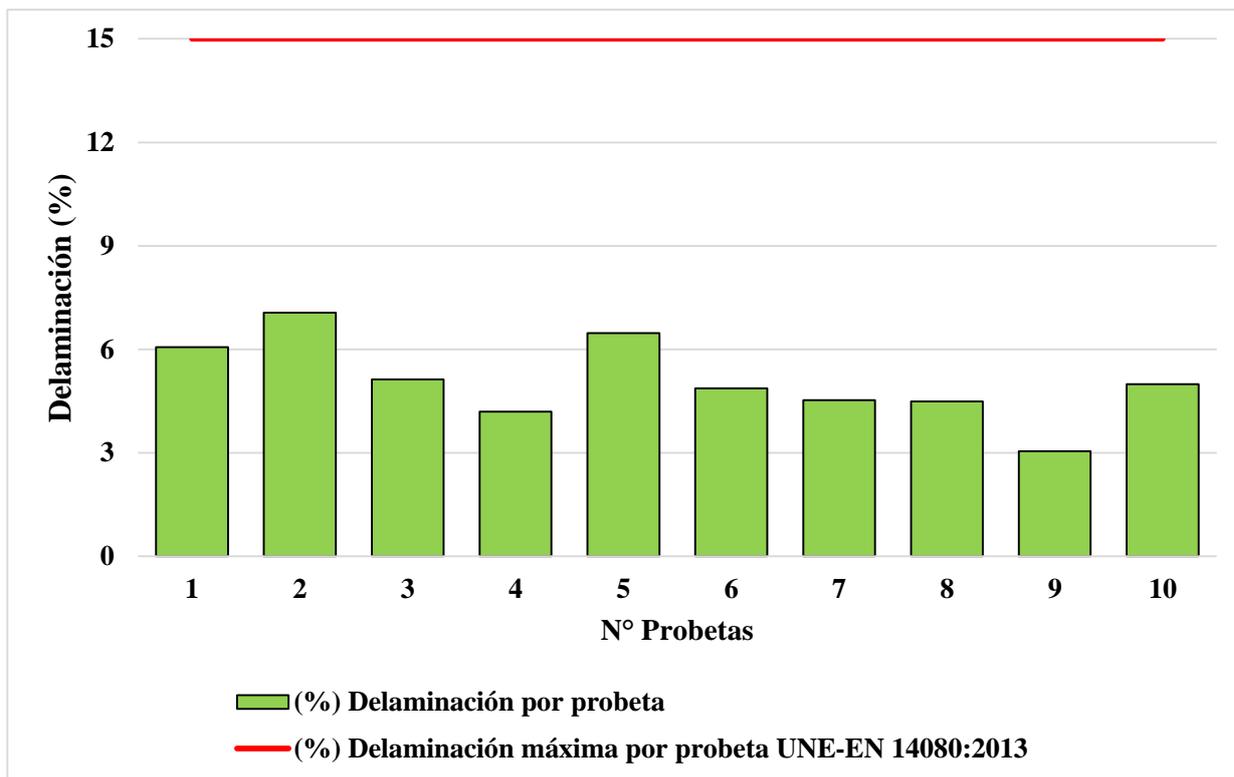
**Figura 36: Delaminación en el empalme finger joint**

#### 4.5.1. MUF

La Tabla 9 presenta los resultados de delaminación de las probetas con adhesivo MUF.

**Tabla 9: Delaminación del empalme por unión dentada con adhesivo MUF**

<b>Adhesivo</b>	<b>N° Probeta</b>	<b>Línea de cola total (mm)</b>	<b>Delaminación total por probeta (mm)</b>	<b>Delaminación por probeta (%)</b>
<b>MUF</b>	1	361.80	21.94	6
	2	361.80	25.55	7
	3	361.80	18.54	5
	4	361.80	15.16	4
	5	361.80	23.40	6
	6	361.80	17.62	5
	7	361.80	16.39	5
	8	361.80	16.24	4
	9	361.80	11.01	3
	10	361.80	18.05	5
<b>Promedio</b>			<b>18.39</b>	<b>5</b>



**Figura 37: Delaminación del empalme por unión dentada con adhesivo MUF**

La Figura 37 grafica los promedios individuales de delaminación, los cuales fueron calculados en función a la delaminación total por probeta y la línea de cola. Se obtuvieron valores de delaminación entre 11.01 mm y 25.55 mm, de 3 a 7% expresado en porcentaje, y un promedio de 5%.

La mayoría de probetas presentaron delaminaciones sobre los 15mm, excepto la probeta 9, la sólo registró 11.01 mm siendo el menor valor y de llegar a registrar menos delaminación, se alcanzaría un caso que sería ideal ya que la madera tiende a hincharse y contraerse de forma natural en la intemperie y con ello somete a la línea de cola a esfuerzos de delaminación por cambios en las condiciones de humedad y temperatura.

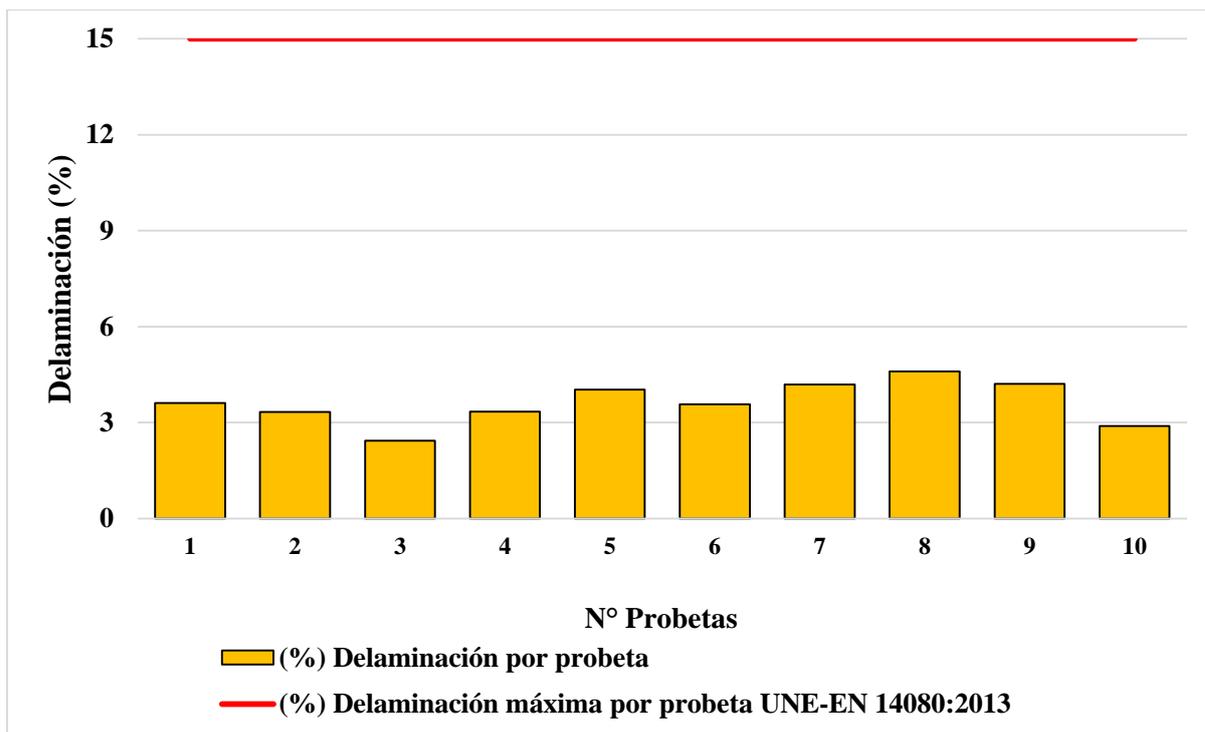
Todos los valores de delaminación de las probetas estuvieron por debajo del 15%, porcentaje máximo permitido por la UNE-EN 14080 (2013) (línea roja superior), para usar este tipo de uniones en la fabricación de láminas para la MLE. Estos resultados muestran que la calidad de adhesión es muy buena y que el adhesivo cumple con su característica termoestable, tras haber soportado cambios bruscos de condiciones altamente saturadas a secas,

#### 4.5.2. EPI

La Tabla 10 contiene los resultados de delaminación de las probetas con adhesivo EPI.

**Tabla 10: Delaminación del empalme por unión dentada con adhesivo EPI**

<b>Adhesivo</b>	<b>N° Probeta</b>	<b>Línea de cola total (mm)</b>	<b>Delaminación total por probeta (mm)</b>	<b>Delaminación por probeta (%)</b>
<b>EPI</b>	1	361.80	13.06	4
	2	361.80	12.06	3
	3	361.80	8.79	2
	4	361.80	12.08	3
	5	361.80	14.57	4
	6	361.80	12.93	4
	7	361.80	15.15	4
	8	361.80	16.63	5
	9	361.80	15.23	4
	10	361.80	10.46	3
<b>Promedio</b>			<b>13.10</b>	<b>4</b>



**Figura 38: Delaminación del empalme por unión dentada con adhesivo EPI**

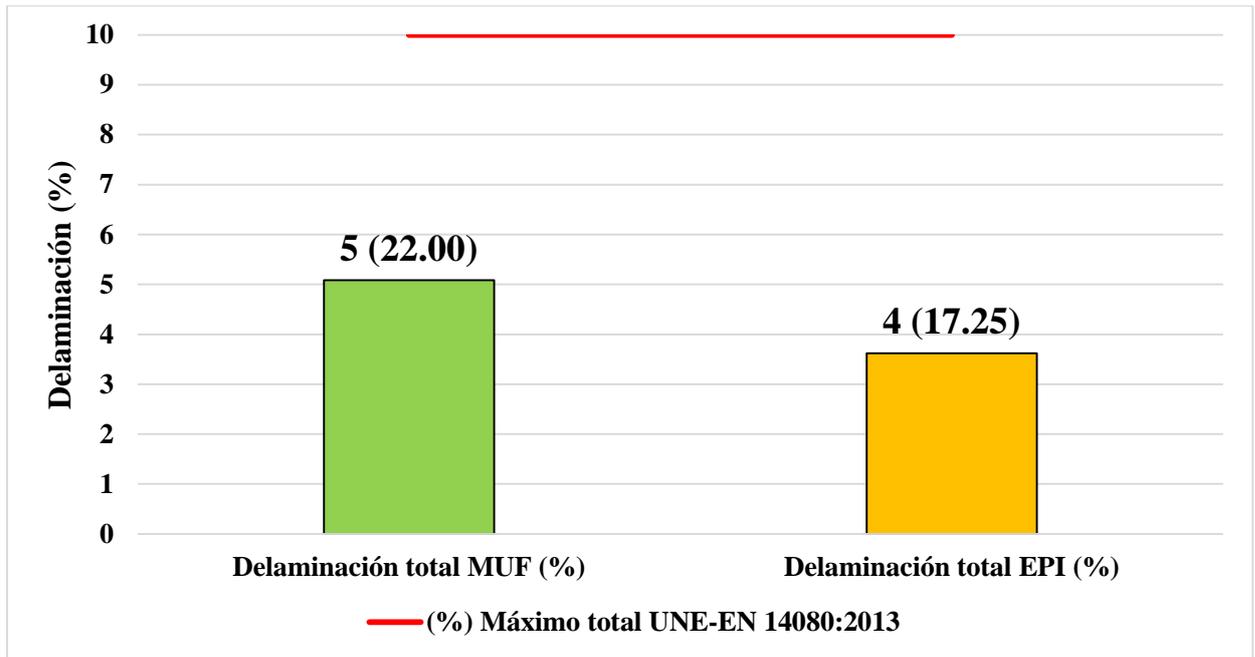
La Figura 38 visualiza los promedios individuales de delaminación, los cuales fueron calculados en función a la delaminación total por probeta y la línea de cola. Se obtuvieron valores de delaminación de 8.79 mm a 16.63 mm, de 2 a 5% expresado en porcentaje, y un promedio de 4%.

Del total de probetas, 2 presentaron la menor delaminación (3 y 10), casos ideales en los que se puede afirmar que la penetración del adhesivo fue lo suficientemente eficiente como para soportar los esfuerzos de hinchamiento y contracción de las probetas durante el ensayo.

Todos los valores de delaminación de las probetas estuvieron debajo del 15%, porcentaje máximo permitido por la UNE-EN 14080 (2013) (línea roja superior), para usar este tipo de uniones en la fabricación de MLE. Estos resultados muestran una calidad de adhesión muy buena, al igual que con el adhesivo MUF, resultado esperado debido al buen comportamiento de ambos adhesivos frente a la temperatura, justificando así las recomendaciones hechas por la AITIM (s.f.) en el uso de estos adhesivos para la fabricación de MLE.

### 4.5.3. Comparación de la delaminación de empalmes entre adhesivos

Se observan en la Figura 39, los valores promedio y comparación de delaminación de los empalmes finger joint entre láminas, con los adhesivos MUF y EPI. Esta comparación está delimitada por el porcentaje máximo de delaminación total señalado por la UNE-EN 14080 (2013), que para el promedio total de delaminaciones no debe superar el 10%.



**Figura 39: Delaminación de empalmes por unión dentada entre láminas con adhesivos MUF y EPI**

NOTA: Los valores entre paréntesis representan a los coeficientes de variación, en porcentaje.

Como se puede apreciar, la delaminación total con el adhesivo EPI fue menor que con el adhesivo MUF, lo cual significa que la adhesión fue mejor con el adhesivo EPI, pero la diferencia no es muy significativa a nivel de porcentajes, ya que solo es de aproximadamente 1%.

Ambos promedios se encuentran dentro del rango de delaminación permitido por la UNE-EN 14080 (2013) y el mejor resultado se obtuvo con el adhesivo EPI, además que el coeficiente de variación muestra que los valores obtenidos fueron más variables, respecto al adhesivo MUF, esto debido a que con el adhesivo EPI se registraron más probetas sin delaminación.

La calidad de adhesión alcanzada en la presente investigación es buena; sin embargo, los resultados variaron ligeramente entre los adhesivos, esta diferencia se puede atribuir a las características de los mismos, ya que la especie Cachimbo presenta porosidad mediana a moderadamente grande y, de acuerdo a Camargo y Vicente (2000), esta característica influye en la penetración del adhesivo, así como también la viscosidad, siendo la del adhesivo MUF mayor que la del adhesivo EPI. Al respecto, Almeida *et al* (2017) señalan que a mayor viscosidad, menor uniformidad en la distribución del adhesivo sobre la madera e insuficiente penetración sobre su estructura, lo cual le resta resistencia a la línea de cola.

Estos resultados validan el uso de los adhesivos MUF y EPI en la unión de empalmes tipo finger joint para la fabricación de MLE; sin embargo, es importante asegurar una buena adhesión en estos empalmes, ya que Negrão & Calil (2007), mencionan que estos son los primeros en presentar fallos cuando se aplican fuerzas de tracción sobre la MLE y si el control de calidad no es suficientemente bueno, pasarán a ser factores limitantes en el uso de MLE con fines estructurales.

#### **4.6. Esfuerzo cortante ( $f_v$ ) en los planos de encolado**

A continuación, se muestran los resultados de la resistencia al esfuerzo cortante en la línea de cola, para los dos tipos de adhesivos (EPI y MUF) y para las secciones comerciales 2"x6", 2"x8", de forma individual y comparativa.

Para el análisis de cada punto, es importante tener en cuenta que, respecto a la resistencia al esfuerzo cortante, la UNE-EN 14080 (2013) indica para los valores medios, un porcentaje mínimo por rotura de:  $144 - (9 * f_v)$ .

En la Figura 40 se observa el fallo de madera producido tras los ensayos, donde se aprecia el desfibrado cercano a la línea de cola.



**Figura 40: Fallo de madera en probeta ensayada en esfuerzo cortante**

#### **4.6.1. Con adhesivo MUF**

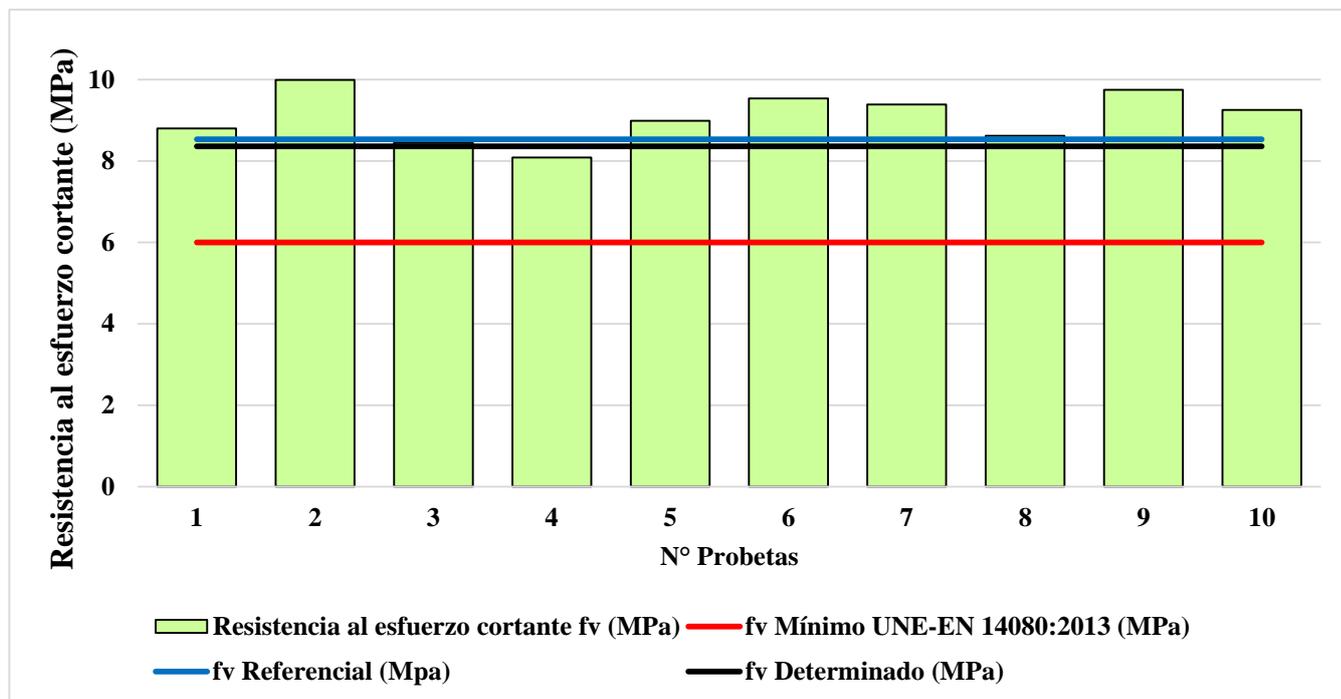
##### **4.6.1.1. *MUF 2"x6"***

La Tabla 11 expone los promedios de resistencia al esfuerzo cortante y fallo de madera (%) en las líneas de cola de 10 probetas (tomadas de partes representativas de las vigas), cada una de las cuales está compuesta por 6 láminas de 1".

**Tabla 11: Promedios de resistencia al esfuerzo cortante ( $f_v$ ) con adhesivo MUF y sección 2"x6"**

<b>Probeta</b>	<b>Resistencia al esfuerzo cortante <math>f_v</math> (MPa)</b>	<b>Fallo de madera (%)</b>	<b>Fallo de madera mínimo (%) UNE-EN 14080 (2013)</b>
<b>1</b>	8.80 (12.30)	84	65
<b>2</b>	9.99 (16.01)	88	54
<b>3</b>	8.45 (23.60)	82	68
<b>4</b>	8.09 (18.64)	84	71
<b>5</b>	8.99 (23.62)	94	63
<b>6</b>	9.54 (25.68)	94	58
<b>7</b>	9.39 (13.69)	100	59
<b>8</b>	8.62 (27.32)	92	66
<b>9</b>	9.75 (17.04)	90	56
<b>10</b>	9.26 (18.29)	96	61
<b>Promedio</b>	<b>9.09</b>	<b>90</b>	<b>62</b>

NOTA: Los valores entre paréntesis representan a los coeficientes de variación, en porcentaje.



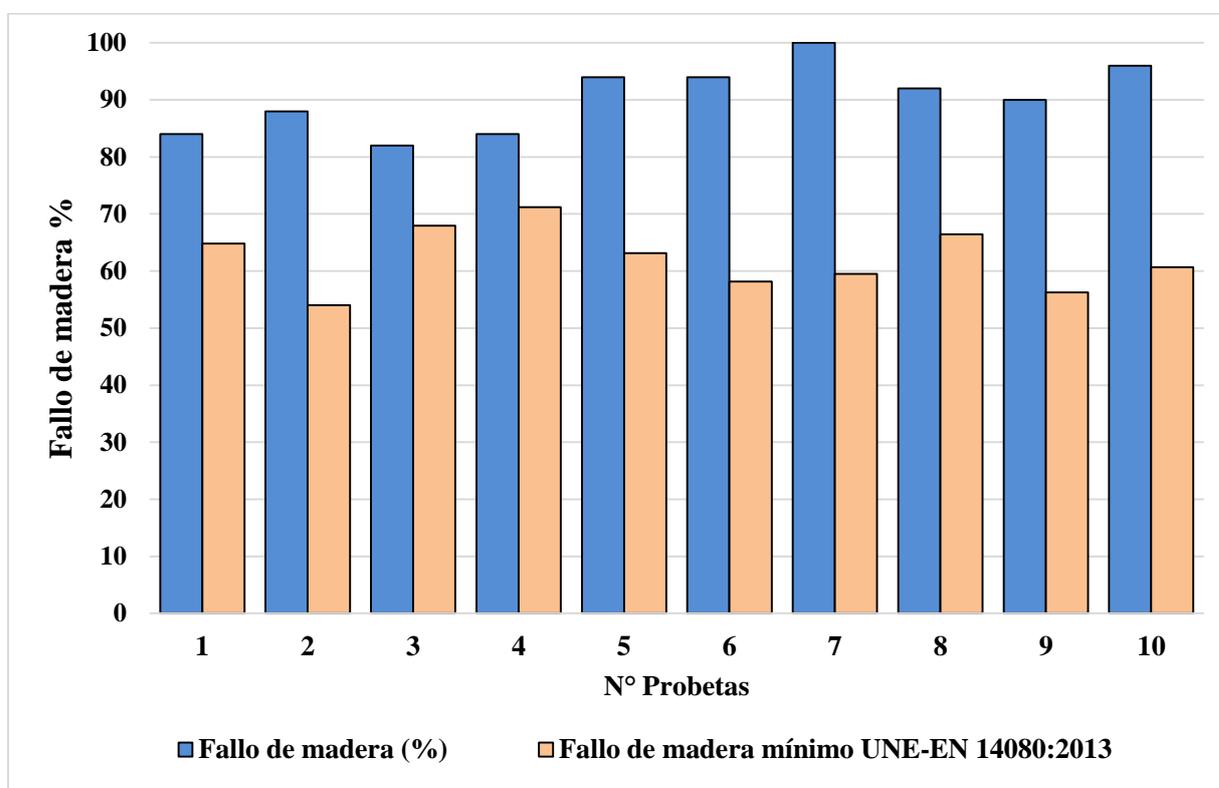
**Figura 41: Promedios de resistencia al esfuerzo cortante en la línea de cola con adhesivo MUF y sección 2”x6”**

La Figura 41 muestra que la resistencia al esfuerzo cortante ( $f_v$ ) fue superior al mínimo establecido ( $f_v \geq 6.0$  MPa) por la norma UNE-EN 14080 (2013), para la mayoría de ensayos individuales, y en promedio general (9.09 MPa).

Las probetas presentaron coeficientes de variación relativamente bajos, siendo el mayor valor reportado de 25.68%, con la probeta 6, lo cual indica que los valores de delaminación obtenidos con el adhesivo MUF, entre las líneas de cola de la probeta y entre las probetas, no fueron muy variables respecto de la media, debido a una buena calidad de adhesión entre láminas.

El 80% de las probetas superaron el esfuerzo cortante en madera maciza reportado por Aróstegui (1974) (8.53 MPa), el cual está representado por una línea roja como  $f_v$  Referencial, y también el esfuerzo cortante en madera maciza determinado en este trabajo (8.36 MPa), el cual está representado por una línea negra como  $f_v$  Determinado. Estos resultados verifican lo afirmado por Vick (1999), quien señaló que si hay una buena penetración del adhesivo sobre la madera, la resistencia debería ser mayor que el de la madera, por ello la importancia de

realizar un correcto proceso de encolado y prensado de acuerdo a las especificaciones del adhesivo.



**Figura 42: Fallo de madera (%) vs fallo mínimo UNE-EN 14080 (2013) con adhesivo MUF y sección 2”x6”**

Se aprecia en la Figura 42 que el fallo de madera obtenido (promedio de 90%) es mayor al fallo de madera mínimo (promedio 62%), establecido en la norma UNE-EN 14080 (2013). Estos resultados están directamente relacionados con los de resistencia al esfuerzo cortante, mostrados en la Figura 41, ya que, a mayor calidad de adhesión entre las láminas, mayor será el fallo por madera. En cuanto a esto último, resalta la importancia de la porosidad, que como señala Marra, citado por Camargo y Vicente (2000), es importante ya que, como se determinó en el presente trabajo, la especie Cachimbo presenta porosidad clasificada como mediana a moderadamente grande, según la IAWA (1989), lo cual facilitó el ingreso del adhesivo en los poros, haciendo posible un buen anclaje entre madera y adhesivo, al grado tal, que el fallo por madera fue cercano al 100%.

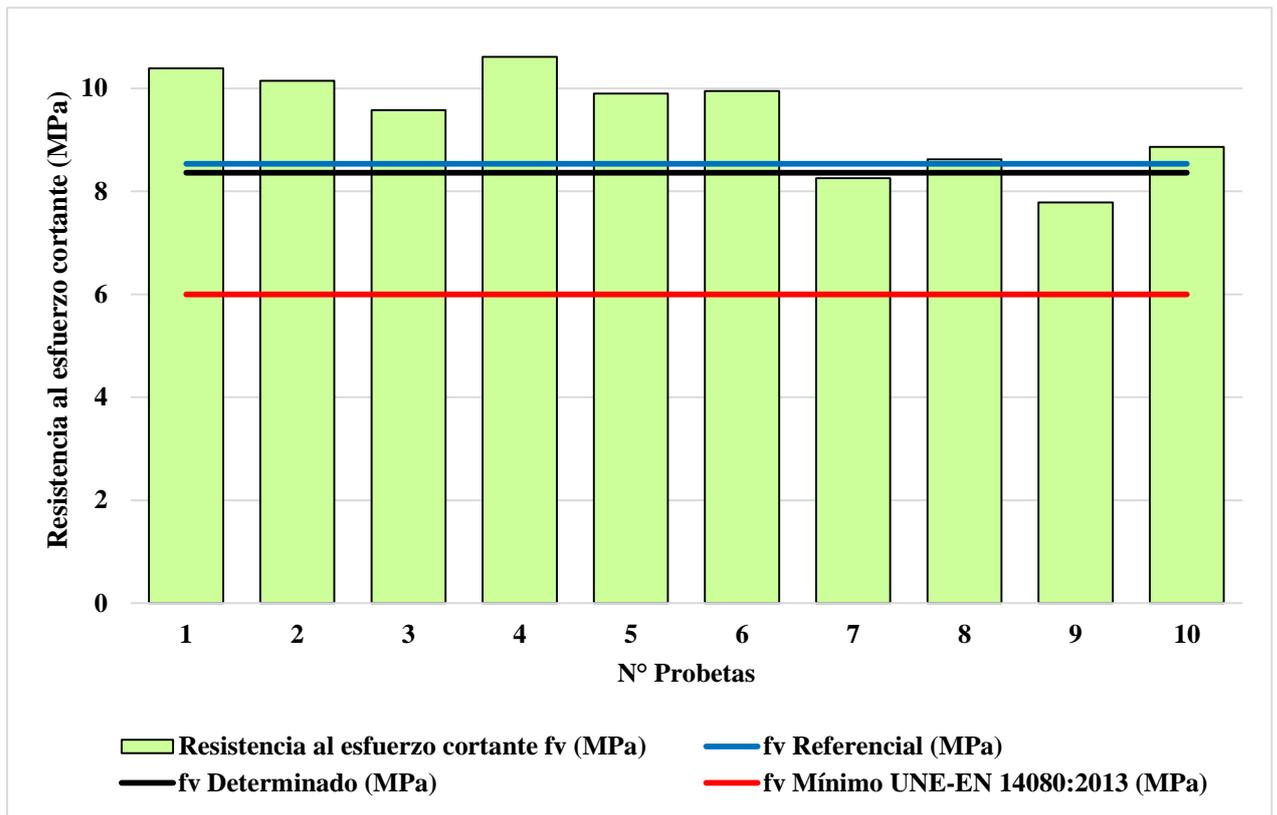
#### 4.6.1.2. MUF 2"x8"

La Tabla 12 contiene los promedios de resistencia al esfuerzo cortante y fallo de madera (%) en las líneas de cola de 10 probetas (tomadas de partes representativas de la viga), cada una de las cuales está compuesta por 8 láminas de 1".

**Tabla 12: Promedios de resistencia al esfuerzo cortante ( $f_v$ ) con adhesivo MUF y sección 2"x8"**

Probeta	Resistencia al esfuerzo cortante $f_v$ (MPa)	Fallo de madera (%)	Valor mínimo (%) UNE-EN 14080 (2013)
1	10.39 (8.34)	94	51
2	10.15 (13.29)	91	53
3	9.58 (15.41)	87	58
4	10.61 (7.78)	97	48
5	9.90 (13.72)	89	55
6	9.95 (9.84)	91	54
7	8.26 (10.16)	89	70
8	8.62 (9.84)	91	66
9	7.78 (8.14)	93	74
10	8.86 (13.23)	86	64
<b>Promedio</b>	<b>9.41</b>	<b>91</b>	<b>59</b>

NOTA: Los valores entre paréntesis representan a los coeficientes de variación, en porcentaje.



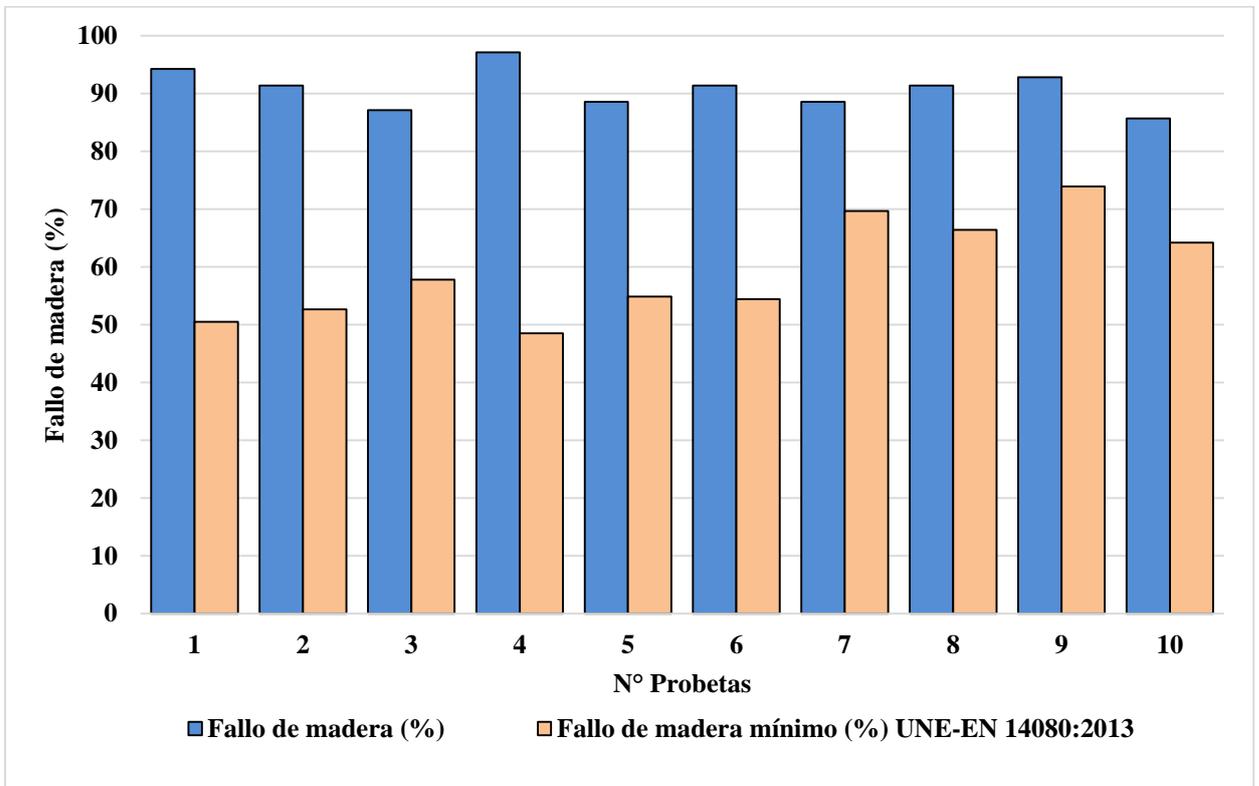
**Figura 43: Promedios de resistencia al esfuerzo cortante en la línea de cola con adhesivo MUF y sección 2”x8”**

En la Figura 43 demuestra que la resistencia al esfuerzo cortante ( $f_v$ ) fue superior al mínimo establecido ( $f_v \geq 6.0$  MPa) por la norma UNE-EN 14080 (2013), para la mayoría de ensayos individuales y en promedio general (9.41 MPa).

Los coeficientes de variación observados, al igual que con la sección 2”x6”, son relativamente bajos, siendo el mayor valor reportado 13.72% con la probeta 3, lo cual se interpreta como una baja diferencia entre valores de delaminación respecto de la media, con el adhesivo MUF, tanto para las líneas de cola dentro de la probeta y entre probetas.

El 80% de las probetas presentaron valores de resistencia superiores, respecto al esfuerzo cortante en madera maciza reportado por Aróstegui (1974) (8.53 MPa), el cual está representado por una línea roja como  $f_v$  Referencial y también al valor reportado en este trabajo (8.36 MPa), el cual está representado por una línea negra como  $f_v$  Determinado. Estos resultados son similares a los obtenidos con las probetas de MUF 2”x6”, de igual forma se

verifica lo señalado por Vick (1999), en referencia a que una buena penetración del adhesivo hace posible obtener resultados de resistencia mayores que con madera maciza.



**Figura 44: Fallo de madera (%) vs fallo mínimo UNE-EN 14080 (2013) con adhesivo MUF y sección 2”x8”**

Se observa que en la Figura 44 el fallo de madera obtenido (promedio de 91%) es mayor al fallo de madera mínimo (promedio 59%) establecido en la norma UNE-EN 14080 (2013). Estos resultados también son similares a los obtenidos con las probetas de MUF 2”x6”, ya que la resistencia al esfuerzo cortante está directamente relacionada con el % de fallo de madera, las cadenas de adhesión y cohesión entre madera y adhesivo (Ülker, 2006) formadas por la buena penetración del adhesivo, fueron lo suficientemente resistentes como para superar a la resistencia de la madera maciza.

## 4.6.2. Con adhesivo EPI

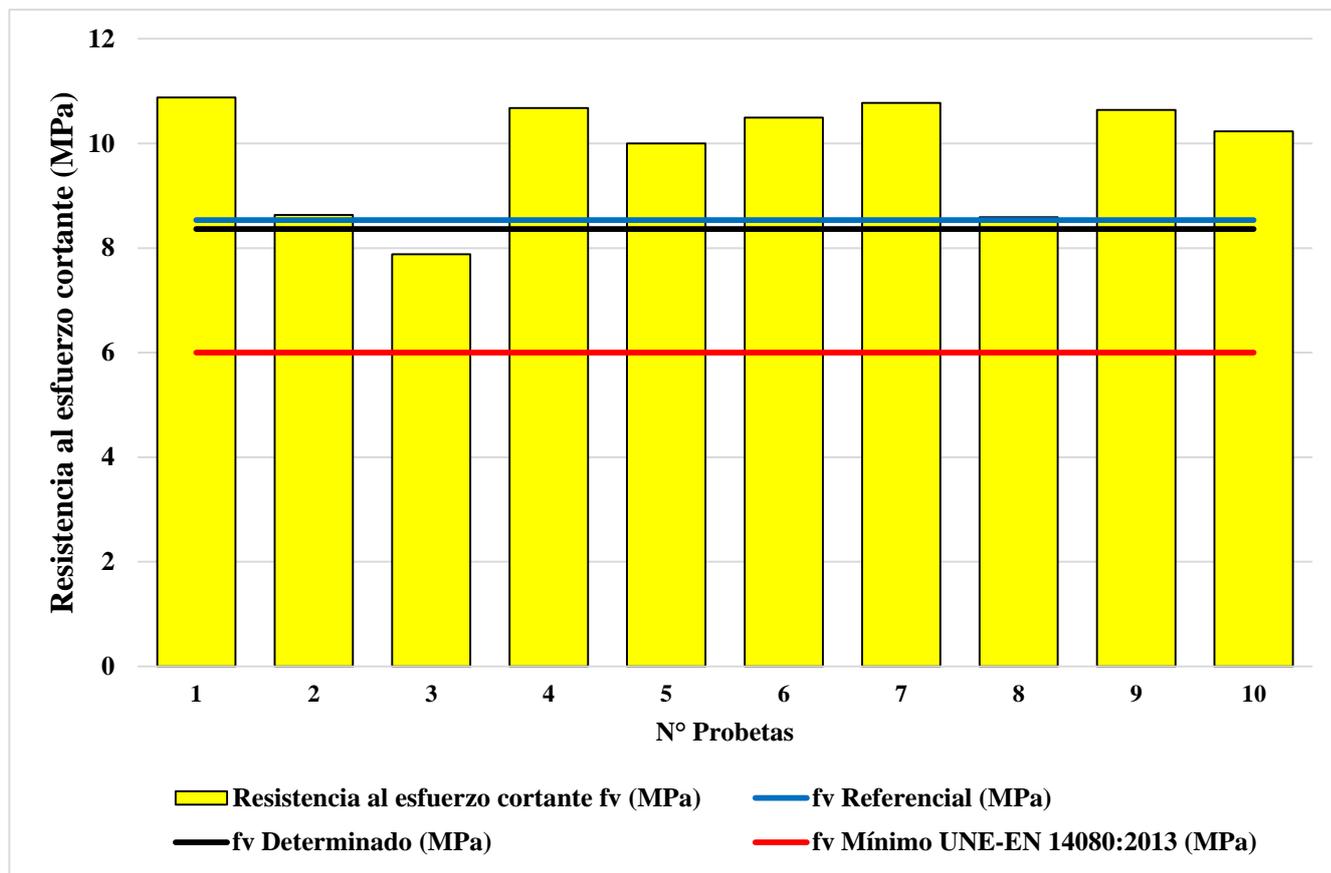
### 4.6.2.1. EPI 2"x6"

La Tabla 13 muestra los promedios de resistencia al esfuerzo cortante y fallo de madera (%) en líneas de cola de 10 probetas (tomadas de partes representativas de la viga), cada una de las cuales está compuesta por 6 láminas de 1".

**Tabla 13: Promedios de resistencia al esfuerzo cortante ( $f_v$ ) con adhesivo EPI y sección 2"x6"**

Probeta	Resistencia al esfuerzo cortante $f_v$ (MPa)	Fallo de madera (%)	Fallo de madera mínimo (%) UNE-EN 14080 (2013)
1	10.88 (7.26)	96	46
2	8.63 (17.57)	92	66
3	7.88 (16.41)	86	73
4	10.68 (8.36)	100	48
5	9.99 (7.58)	96	54
6	10.49 (11.94)	100	50
7	10.78 (6.39)	96	47
8	8.59 (15.72)	94	67
9	10.64 (3.63)	98	48
10	10.23 (8.10)	100	52
<b>Promedio</b>	<b>9.88</b>	<b>96</b>	<b>55</b>

NOTA: Los valores entre paréntesis representan a los coeficientes de variación, en porcentaje.



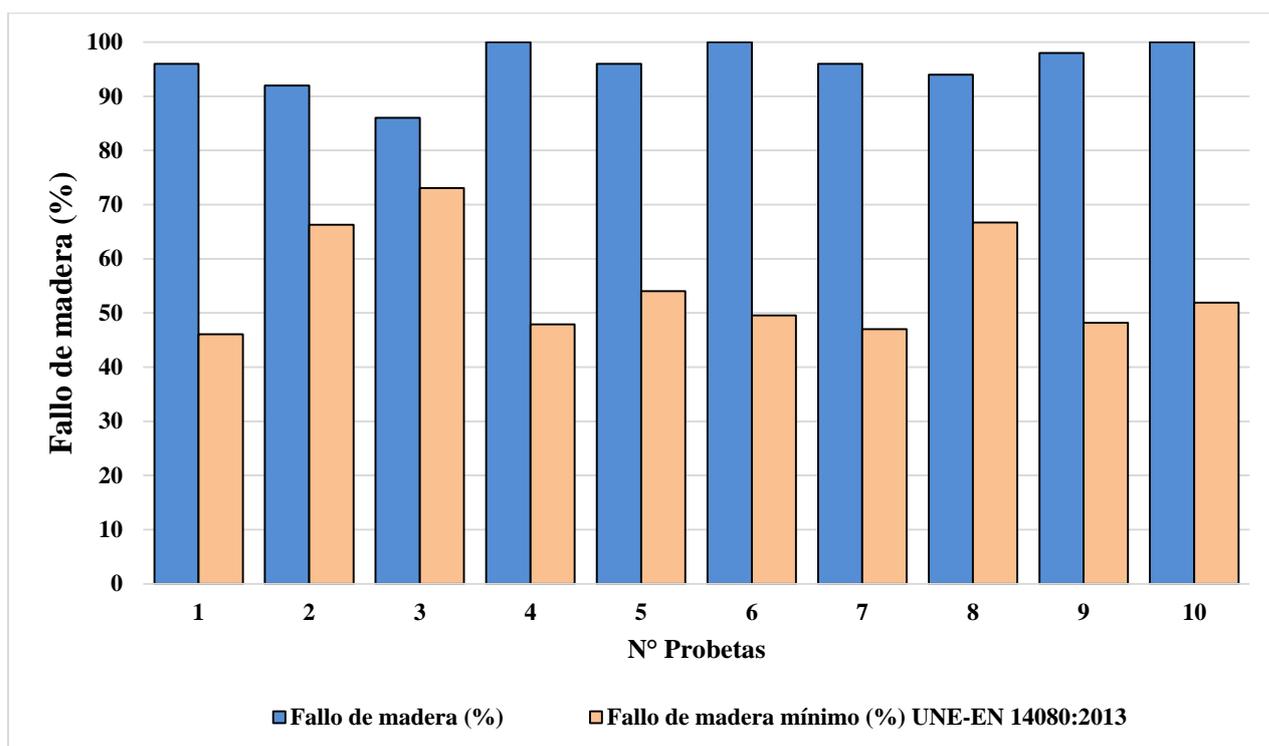
**Figura 45: Promedios de resistencia al esfuerzo cortante en la línea de cola con adhesivo EPI y sección 2”x6”**

En la Figura 45 se denota que la resistencia al esfuerzo cortante ( $f_v$ ) fue superior al mínimo establecido ( $f_v \geq 6.0$  MPa) por la norma UNE-EN 14080 (2013), para la mayoría de ensayos individuales y en promedio general (9.88 MPa).

Las probetas presentaron coeficientes de variación bajos, siendo el mayor valor reportado 26.41% con la probeta 3, esto quiere decir que los valores de resistencia en las líneas de cola no fueron muy variables respecto de la media y muestran una mayor uniformidad, lo cual es lo esperado tras haber realizado los ensayos, cumpliendo con los procedimientos de la norma UNE-EN 14080 (2013).

El 90% de las probetas presentaron valores de resistencia superiores respecto al esfuerzo cortante en madera maciza reportado por Aróstegui (1974) (8.53 MPa), el cual está representado por una línea roja como  $f_v$  Referencial y también al valor reportado en este trabajo

(8.36 MPa), el cual está representado por una línea negra como  $f_v$  *Determinado*. Los enlaces formados entre sustrato y adhesivo fueron lo suficientemente fuertes como para superar los de la madera maciza, esto gracias también a la correcta preparación de la superficie, ya que como señala Otúzar (2008), una superficie bien preparada favorece la penetración del adhesivo sobre los espacios porosos de la madera y puede formar enlaces resistentes.



**Figura 46: Promedios de fallo de madera (%) vs fallo mínimo UNE-EN 14080 (2013) con adhesivo EPI y sección 2”x6”**

La Figura 46 grafica que el de fallo de madera obtenido (promedio de 96%) es mayor al fallo de madera mínimo (promedio 55%) establecido en la norma UNE-EN 14080 (2013). El diámetro de poros de la madera Cachimbo, determinado en el presente estudio, es de 189  $\mu\text{m}$ , clasificado como mediano a moderadamente grande (100-200) (IAWA, 1989), característica anatómica muy importante para la penetración del adhesivo, ya que como señalan Albino *et al* (2012), la dimensión del diámetro de poro puede facilitar el ingreso de adhesivo hacia la célula y mejorar la adhesión para que sea resistente a los esfuerzos de cizallamiento. En este caso se superaron los límites de resistencia al esfuerzo por cizallamiento de la madera maciza y el fallo de madera fue muy alto, cercano al 100%.

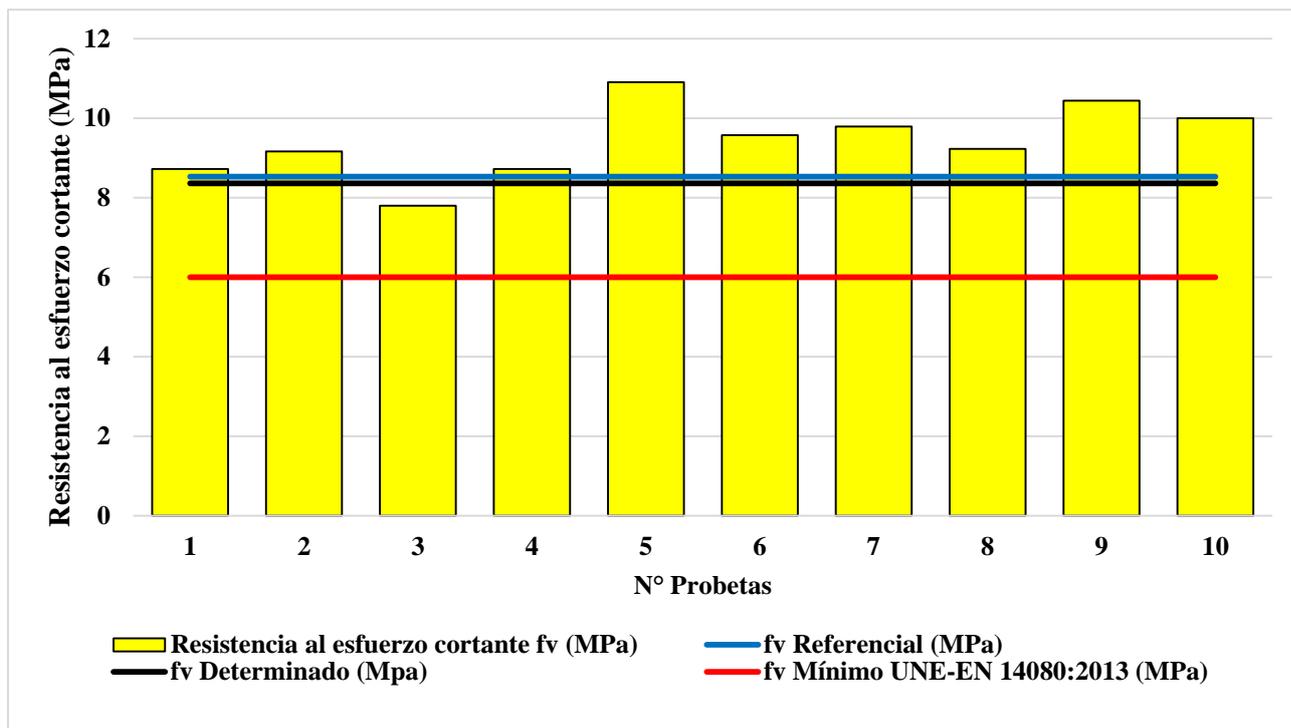
#### 4.6.2.2. EPI 2"x8"

La Tabla 14 expone los promedios de resistencia al esfuerzo cortante y fallo de madera (%) en líneas de cola de 10 probetas (tomadas de partes representativas de la viga), cada una de las cuales está compuesta por 8 láminas de 1".

**Tabla 14: Promedios de resistencia al esfuerzo cortante ( $f_v$ ) con adhesivo EPI y sección 2"x8"**

Probeta	Resistencia al esfuerzo cortante $f_v$ (MPa)	Fallo de madera (%)	Fallo de madera mínimo (%) UNE-EN 14080 (2013)
1	8.72 (19.99)	94	66
2	9.16 (14.87)	93	62
3	7.80 (9.05)	81	74
4	8.73 (11.75)	100	65
5	10.92 (10.70)	99	46
6	9.57 (13.79)	99	58
7	9.79 (9.03)	97	56
8	9.23 (17.78)	100	61
9	10.44 (13.47)	93	50
10	10.01 (13.66)	99	54
<b>Promedio</b>	<b>9.44</b>	<b>95</b>	<b>59</b>

NOTA: Los valores entre paréntesis representan a los coeficientes de variación, en porcentaje.



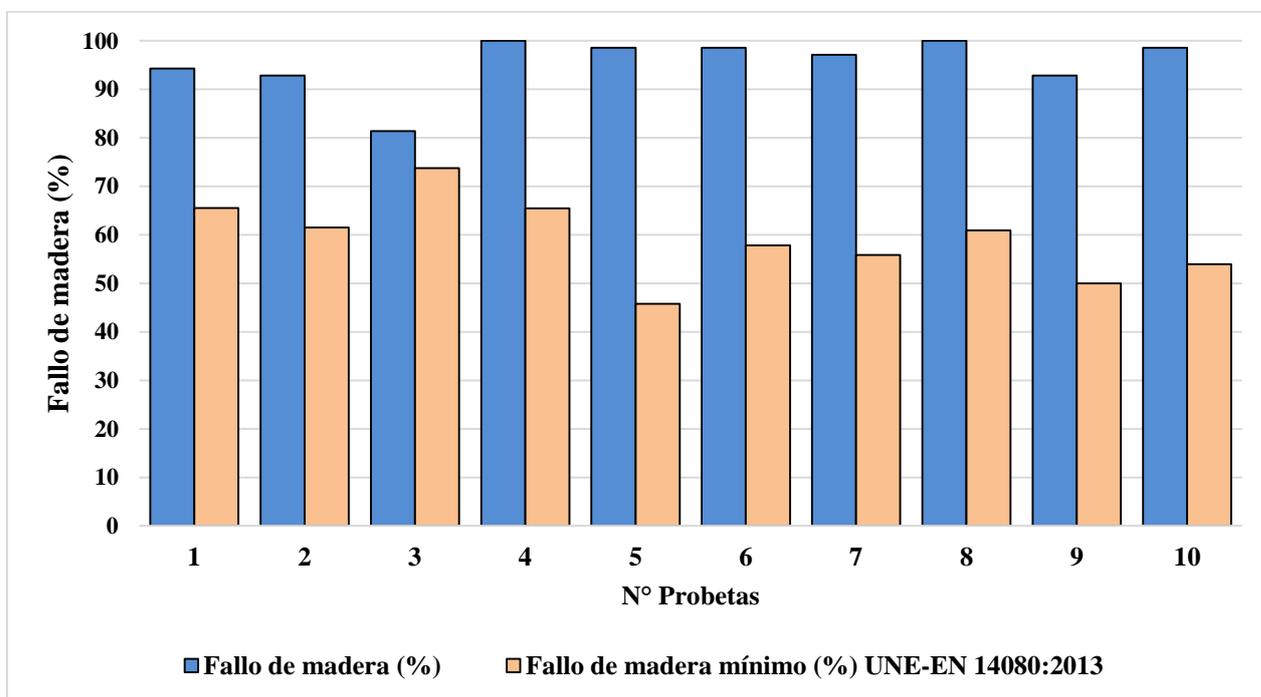
**Figura 47: Promedios de resistencia al esfuerzo cortante en la línea de cola con adhesivo EPI y sección 2”x8”**

En la Figura 47 se observa que la resistencia al esfuerzo cortante ( $f_v$ ) fue superior al mínimo establecido ( $f_v \geq 6.0$  MPa) por la norma UNE-EN 14080 (2013), para la mayoría de ensayos individuales y en promedio general (9.43 MPa).

Los coeficientes de variación obtenidos, al igual que con la sección 2”x6”, son relativamente bajos, el mayor valor obtenido fue de 19.99% con la probeta 1, lo cual indica que la adhesión fue buena al obtenerse valores aceptables, cuya desviación estándar no varían en más de 20%, respecto de la media en cada línea de cola de todas las probetas.

El 90% de las probetas presentaron valores de resistencia superiores, respecto al esfuerzo cortante en madera maciza reportado por Aróstegui (1974) (8.53 MPa), el cual está representado por una línea roja como  $f_v$  Referencial y también al valor reportado en este trabajo (8.36 MPa), el cual está representado por una línea negra como  $f_v$  Determinado. También se resalta que los valores obtenidos son superiores al mínimo establecido ( $f_v \geq 6.0$  MPa) por la norma UNE-EN 14080 (2013). Los valores resultantes fueron similares a los obtenidos con la sección 2”x6”, reafirmando así lo expuesto por Vick (1999), cuando señala que la buena

calidad de adhesión se obtiene con la correcta penetración del adhesivo en el encolado y prensado, y también validando al adhesivo EPI para su uso en este tipo de producto.



**Figura 48: Promedios de fallo de madera (%) vs fallo mínimo UNE-EN 14080 (2013) con adhesivo EPI y sección 2”x8”**

La Figura 48 compara el fallo de madera obtenido (promedio de 95%), siendo este mayor al fallo de madera mínimo (promedio 59%) establecido en la norma UNE-EN 14080 (2013), Esto se interpreta como una buena penetración del adhesivo EPI y una buena calidad de adhesión, reportándose incluso casos como el de la probeta 5, en donde el fallo de madera encontrado fue aproximadamente el doble del fallo de madera mínimo, validando así el proceso de fabricación del producto. Al respecto, Quevedo (s.f.) afirma, para que los adhesivos formen una adecuada línea de cola deben humedecer bien el sustrato para que la penetración del adhesivo sea lo suficientemente buena y así asegurar que en la unión actúen, tanto las fuerzas químicas como mecánicas; es así que los promedios de fallos por madera y por probeta, alcanzaron un porcentaje 81 a 100%.

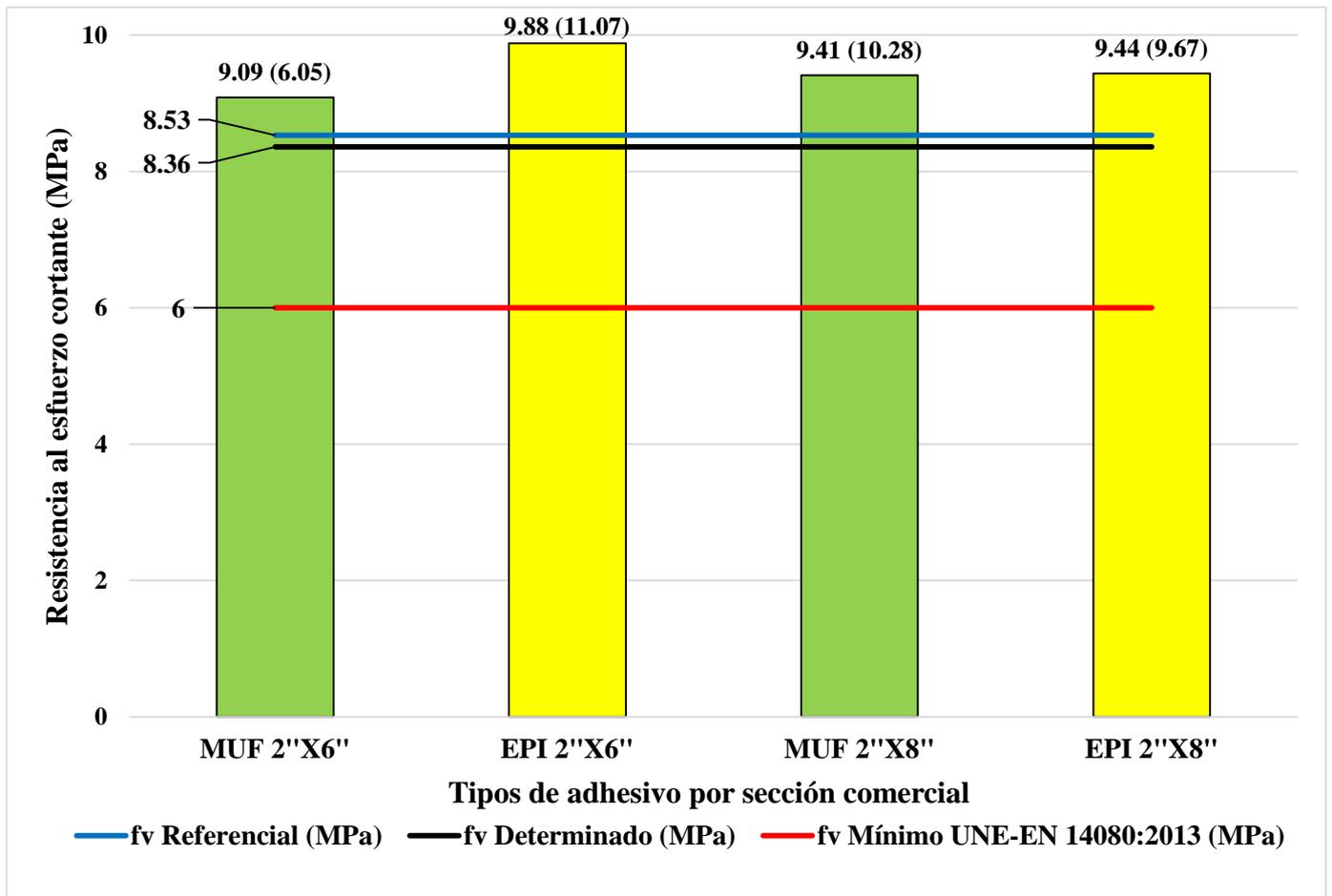
### 4.6.3. Comparación de resultados de EPI vs MUF

La Tabla 15 muestra los valores promedios de resistencia al esfuerzo cortante ( $f_v$ ), por tipo de adhesivo (EPI y MUF) y sección comercial (2"x6" y 2"x8").

**Tabla 15: Promedios de resistencia al esfuerzo cortante en la línea de cola con adhesivos EPI y MUF, y secciones 2"x6" y 2"x8"**

Probeta	Resistencia al esfuerzo cortante (MPa)			
	MUF 2"x6"	EPI 2"x6"	MUF 2"x8"	EPI 2"x8"
1	8.80	10.88	10.39	8.72
2	9.99	8.63	10.15	9.16
3	8.45	7.88	9.58	7.80
4	8.09	10.68	10.61	8.73
5	8.99	9.99	9.90	10.92
6	9.54	10.49	9.95	9.57
7	9.39	10.78	8.26	9.79
8	8.62	8.59	8.62	9.23
9	9.75	10.64	7.78	10.44
10	9.26	10.23	8.86	10.01
<b>Promedio</b>	<b>9.09 (6.67)</b>	<b>9.88 (11.05)</b>	<b>9.41 (10.27)</b>	<b>9.44 (9.65)</b>

NOTA: Los valores entre paréntesis representan a los coeficientes de variación en porcentaje.



**Figura 49: Resistencia al esfuerzo cortante en la línea de cola (EPI vs MUF)**

Como se aprecia en la Figura 49, para las secciones 2''x6'' y 2''x8'', el adhesivo con el que se registró mayor resistencia al esfuerzo cortante fue con EPI, respecto de MUF, siendo el mayor promedio 9.880 MPa en la sección 2''x6'' EPI, mientras que el menor fue de 9.09 MPa en la sección 2''x6'' MUF. Cabe señalar que las diferencias entre los valores promedios no son significativas y que todos sobrepasan el mínimo valor de resistencia al esfuerzo cortante establecido por la norma UNE-EN 14080 (2013) ( $f_v \geq 6.0$  MPa), como también sobrepasan los valores de resistencia al esfuerzo cortante en madera maciza, cuyo primer valor referencial (8.53 MPa) fue reportado por Aróstegui (1974) y el segundo valor (8.362 MPa) fue determinado en este trabajo. Estos valores comprueban lo expuesto por Kuzman *et al.* (2010), para quienes la MLE es un material con características mecánicas más altas que la madera maciza.

Los coeficientes de variación alcanzados fueron bajos para todos los casos (menos del 15%), pero los obtenidos con MUF fueron ligeramente superiores a los de EPI, lo cual demuestra que la dispersión de los mayores valores de resistencia al esfuerzo cortante no necesariamente son los más uniformes respecto de su media; sin embargo, ambas secciones, con los dos adhesivos, superan los valores mínimos establecidos en la norma UNE-EN 14080 (2013).

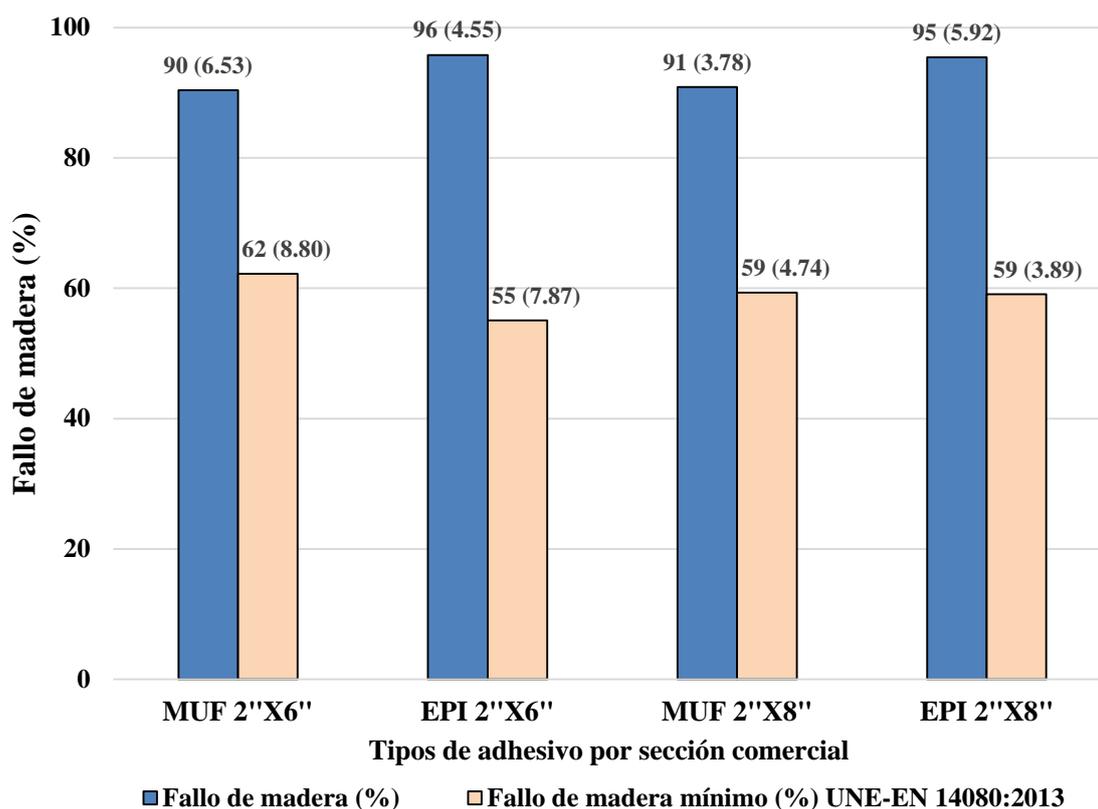
Los resultados demuestran que se logró una buena calidad de adhesión entre las líneas de cola con ambos adhesivos y en diferentes secciones comerciales (2"x6" y 2"x8"), debido posiblemente a la correcta metodología aplicada y a las propiedades de la madera Cachimbo, ya que, como señalan Carmona *et al.* (1998), la densidad es un factor de fuerte inferencia en el encolado y, al ser la especie Cachimbo de densidad media (con 0.59 g/cm<sup>3</sup>), permitió que el adhesivo sea absorbido por la madera y se generen uniones fuertes.

Respecto a esto último, la madera puede absorber eficientemente el adhesivo después de un correcto proceso de secado. En este caso, la madera Cachimbo fue secada hasta alcanzar un promedio de 14.3% de humedad, el cual se encuentra en el rango recomendado por De Cristóforo (s.f.) (de 12 a 17%). El mismo autor, indica que el adhesivo aumenta el contenido de humedad de la madera al esparcirse sobre las láminas y que las líneas de cola no serían de calidad si el contenido de humedad de la madera fuera alto.

En cuanto al fallo de madera (%), la Tabla 16 muestra el promedio general por probeta y el valor mínimo (%), establecido en la norma UNE-EN 14080 (2013), mediante la fórmula:  $144 - (9 * f_v)$ .

**Tabla 16: Promedios de fallo de madera (%) y fallo de madera mínimo (%) UNE-EN 14080 (2013), con adhesivos (EPI y MUF) y secciones comerciales (2"x6" y 2"x8")**

Probeta	MUF 2"x6"		MUF 2"x8"		EPI 2"x6"		EPI 2"x8"	
	Fallo de madera (%)	Fallo de madera mínimo (%) UNE-EN 14080 (2013)	Fallo de madera (%)	Fallo de madera mínimo (%) UNE-EN 14080 (2013)	Fallo de madera (%)	Fallo de madera mínimo (%) UNE-EN 14080 (2013)	Fallo de madera (%)	Fallo de madera mínimo (%) UNE-EN 14080 (2013)
<b>1</b>	84	65	94	51	96	46	94	66
<b>2</b>	88	54	91	53	92	66	93	62
<b>3</b>	82	68	87	58	86	73	81	74
<b>4</b>	84	71	97	48	100	48	100	65
<b>5</b>	94	63	89	55	96	54	99	46
<b>6</b>	94	58	91	54	100	50	99	58
<b>7</b>	100	59	89	70	96	47	97	56
<b>8</b>	92	66	91	66	94	67	100	61
<b>9</b>	90	56	93	74	98	48	93	50
<b>10</b>	96	61	86	64	100	52	99	54
<b>Promedio</b>	<b>90</b>	<b>62</b>	<b>91</b>	<b>59</b>	<b>96</b>	<b>55</b>	<b>95</b>	<b>59</b>



**Figura 50: Promedios de fallo de madera (%) y fallo de madera mínimo (%) UNE-EN 14080 (2013), con dos adhesivos (EPI y MUF) y con dos secciones comerciales (2"x6" y 2"x8")**

La Figura 50 presenta la comparación entre adhesivos MUF y EPI, con respecto al porcentaje de fallo de madera en promedio total, la cual muestra que, para la sección comercial 2"x6" con el adhesivo EPI (promedio de 96%), se obtuvo un fallo de madera mayor que con el MUF (promedio de 90%); del mismo modo, para la sección comercial 2"x8", con el adhesivo EPI (promedio 95%), se obtuvo mayor fallo de madera que con el MUF (promedio 91%). Es de importancia resaltar que, con ambos adhesivos y para las dos secciones comerciales, se supera ampliamente el mínimo porcentaje de fallo de madera establecido en la UNE-EN 14080 (2013), lo que significa que la adhesión a nivel molecular fue tan buena que, bajo el esfuerzo cortante, la parte más débil llegó a ser la madera y no la línea de cola. Este es un supuesto ideal en la adhesión madera-adhesivo, el cual se ha logrado alcanzar con una correcta preparación de la madera y de los adhesivos, bajo sus respectivas normas o fichas técnicas.

#### 4.7. Delaminación en planos de encolado

Los resultados del total de probetas, por tipo de adhesivo y sección comercial, sometidas al ensayo de delaminación en planos de encolado usando el método A, de acuerdo a la norma UNE-EN 14080 (2013), se muestran en la Tabla 17, donde también se indican los valores máximos del porcentaje total de delaminación, por cada método y número de ciclos.

**Tabla 17: Valores máximos del porcentaje total de delaminación**

<b>Tipo*</b>	<b>Número de ciclos</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Madera laminada encolada, madera laminada encolada con empalmes macrodentados y madera laminada encolada al bloque</b>	Método A	-	5	10
	Método B	4	8	-
	Método C	10	-	-
<b>Madera maciza encolada con grosores de lámina de 60 mm a 85 mm (inclusive)</b>	Método A	-	10	15
	Método B	8	12	-
	Método C	15	-	-

Fuente: UNE-EN 14080 (2013)

##### 4.7.1. Con adhesivo MUF

###### 4.7.1.1. *MUF 2"x6"*

La Tabla 18 muestra los resultados obtenidos con adhesivo MUF, los promedios de longitud de delaminación total (*Lot delam*) y longitud total de plano encolado (*Ltot plano encolado*).

**Tabla 18: Promedio de delaminación total en planos encolados con adhesivo MUF y sección 2"x6"**

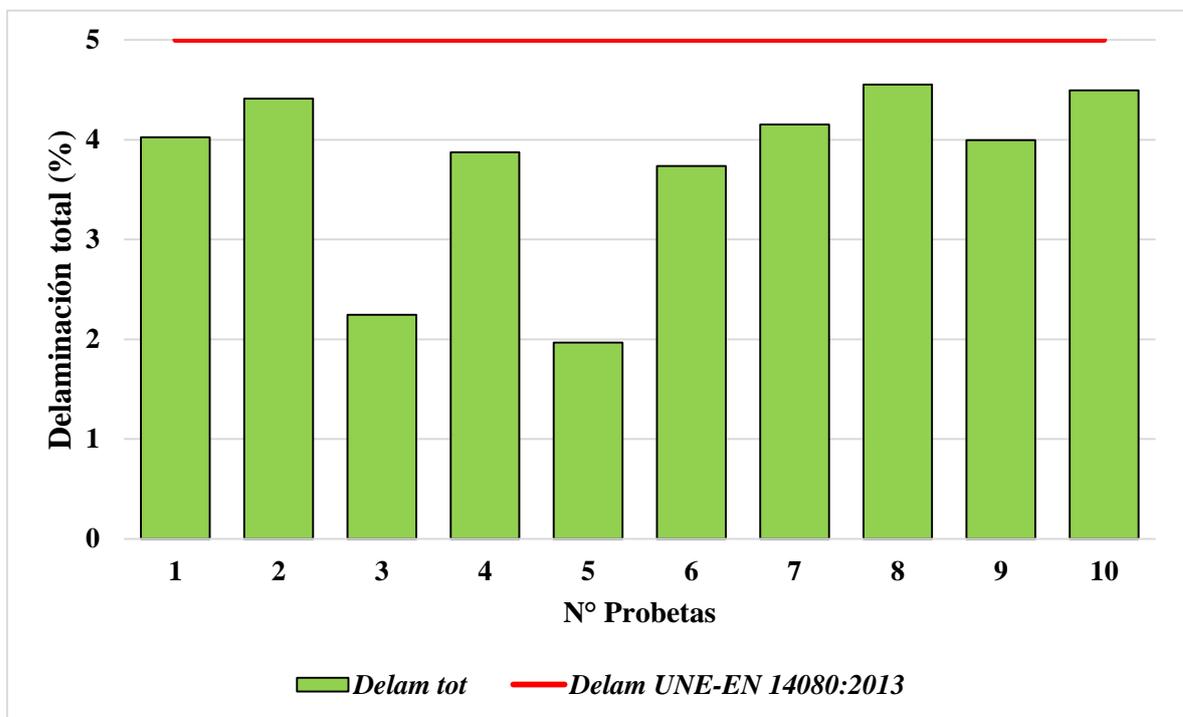
<b>N° Probeta</b>	<b>Ltot delam (mm)</b>	<b>Ltot plano encolado (mm)</b>	<b>Delam tot (%)</b>
<b>1</b>	3.45	85.70	4.02 (24.73)
<b>2</b>	3.85	87.67	4.41 (15.61)
<b>3</b>	1.95	87.02	2.25 (24.19)
<b>4</b>	3.46	89.03	3.87 (24.76)
<b>5</b>	1.68	85.20	1.97 (28.71)
<b>6</b>	3.35	89.59	3.74 (33.13)
<b>7</b>	3.71	89.51	4.15 (32.69)
<b>8</b>	3.97	86.99	4.55 (35.90)
<b>9</b>	3.47	86.62	3.99 (20.55)
<b>10</b>	3.99	88.98	4.49 (30.18)
<b>Promedio</b>	<b>3.29</b>	<b>87.63</b>	<b>3.75</b>

NOTA: Los valores entre paréntesis representan a los coeficientes de variación, en porcentaje.

La Figura 51 muestra una probeta con delaminación en uno de los planos de encolado, tras los ensayos realizados



**Figura 51: Delaminación en un plano de encolado**



**Figura 52: Promedio de delaminación total en planos encolados con adhesivo MUF y sección 2”x6”**

Como se muestra en la Figura 52, todos los promedios por probeta están por debajo de la delaminación máxima (5%), establecida en la norma UNE-EN 14080 (2013), representada en la Figura 52 por una línea superior roja, el mayor valor reportado fue 4.49%, con la probeta número 10, y el menor 1.97% con la probeta número 1.

Los coeficientes de variación son ligeramente altos, debiéndose probablemente a la gran variedad de resultados de delaminación máxima; sin embargo, todos se incluyen dentro del porcentaje máximo permitido. Las condiciones de saturación y secado rápido, a la que se sometieron las probetas, generaron diferentes fuerzas de tensión internas que tienden a romper las líneas de cola, en algunos casos por la propia contracción de la madera; en este caso, los buenos resultados obtenidos se pueden atribuir a que durante el proceso del encolado con adhesivo MUF, se lograron los dos tipos de penetración de adhesivo señalados por Ülker (2006), bruta y de pared celular, asegurando así que el adhesivo haya llenado desde poros hasta microfibras de la pared celular, para que la adhesión sea resistente.

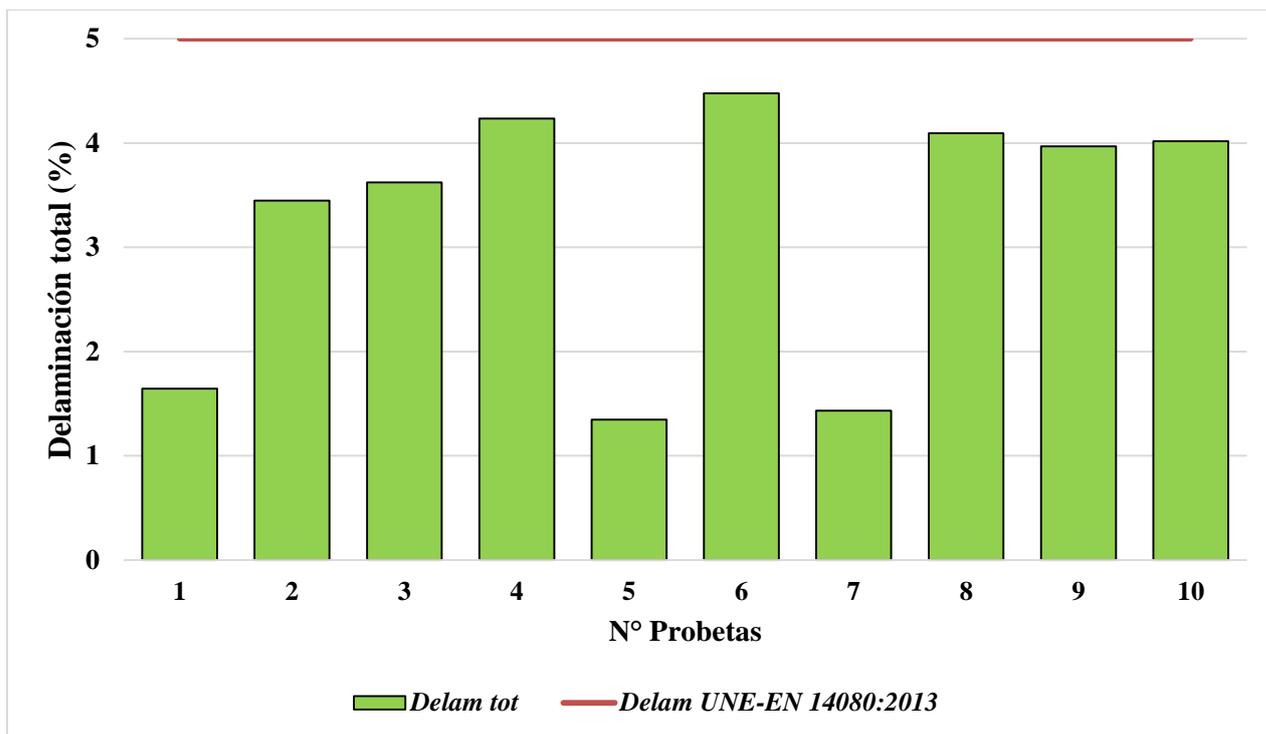
#### 4.7.1.2. MUF 2"x8"

La Tabla 19 presenta los resultados obtenidos con adhesivo MUF, los promedios de longitud de delaminación total (*Ltot delam*) y longitud total de plano encolado (*Ltot plano encolado*).

**Tabla 19: Promedio de delaminación total en planos encolados con adhesivo MUF y sección 2"x8"**

N° Probeta	Ltot delam (mm)	Ltot plano encolado (mm)	Delam tot (%)
1	1.42	86.10	1.64 (27.39)
2	3.00	87.02	3.45 (13.81)
3	3.20	87.95	3.62 (25.46)
4	3.78	89.19	4.24 (23.78)
5	1.16	85.95	1.35 (31.69)
6	4.00	89.22	4.48 (31.69)
7	1.24	86.42	1.43 (24.60)
8	3.64	88.39	4.10 (20.44)
9	3.48	87.23	3.97 (22.38)
10	3.60	89.34	4.02 (19.80)
<b>Promedio</b>	<b>2.85</b>	<b>87.68</b>	<b>3.23</b>

NOTA: Los valores entre paréntesis representan a los coeficientes de variación, en porcentaje.



**Figura 53: Promedio de delaminación total en planos encolados con adhesivo MUF y sección 2”x8”**

Como se señala en la Figura 53, todos los promedios por probeta están por debajo de la delaminación máxima (5%) establecida en la norma UNE-EN 14080 (2013), representada en la Figura 53 por una línea superior roja; el mayor valor reportado fue 4.24% con la probeta número 6, y el menor 1.35% con la probeta número 5.

Las probetas de esta sección presentaron un promedio de delaminación ligeramente menor (3.23%) que la sección 2”x6” (3.75%), además de una disminución de los coeficientes de variación de los resultados de delaminación máxima, que no superan el 5% permitido por la norma UNE-EN 14080 (2013). La adhesión entre madera y adhesivo se rige por la calidad del enclavamiento mecánico obtenido, el cual varía entre especies de madera según sus características (Frihart, 2005); en este caso, las descripciones realizadas de la especie Cachimbo la acreditan como una buena madera para su uso en MLE, ya que sus características anatómicas, físicas, mecánicas, y químicas, permiten que el enclavamiento sea profundo y su resistencia supere, en algunos casos, al de la madera maciza.

## 4.7.2. Con adhesivo EPI

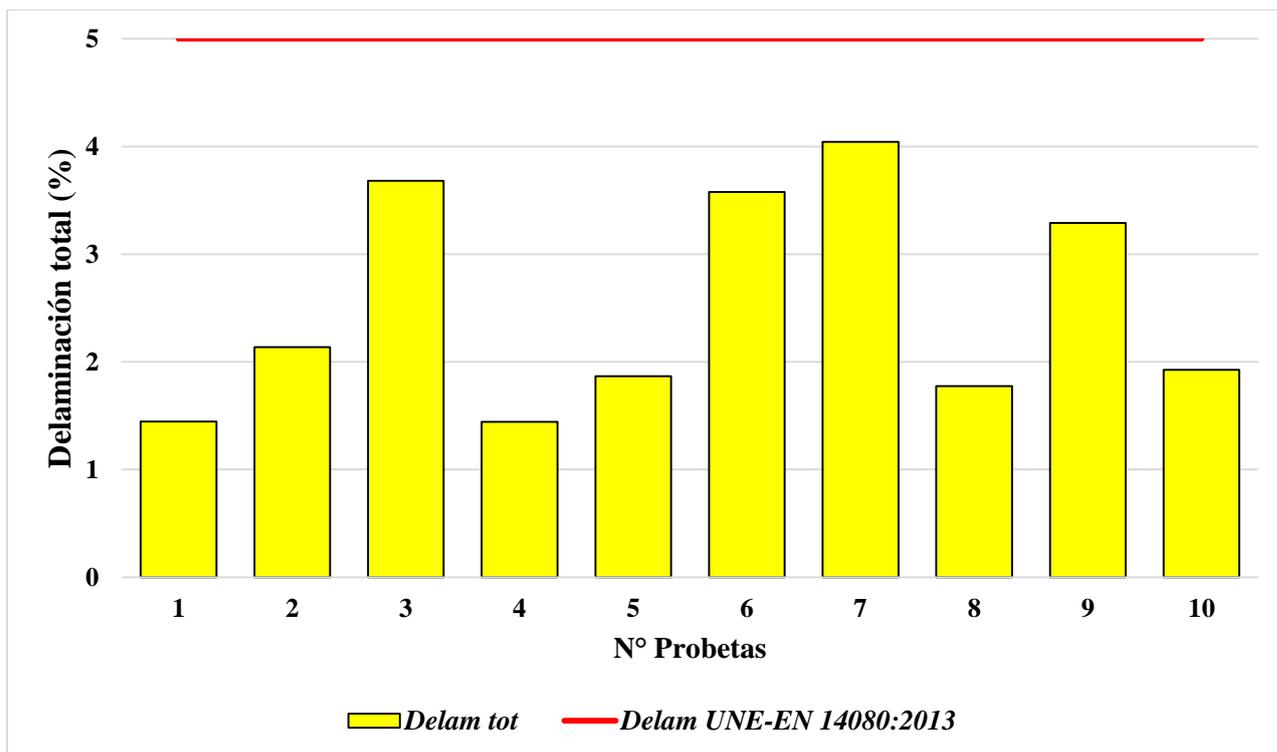
### 4.7.2.1. EPI 2"x6"

La Tabla 20 presenta los resultados obtenidos con adhesivo EPI, los promedios de longitud de delaminación total (*Ltot delam*) y longitud total de plano encolado (*Ltot plano encolado*).

**Tabla 20: Promedio de delaminación total en planos encolados con adhesivo EPI y sección 2"x6"**

<b>N° Probeta</b>	<b>Ltot delam</b>	<b>Ltot plano encolado</b>	<b>Delam tot (%)</b>
<b>1</b>	1.33	91.96	1.45 (18.70)
<b>2</b>	1.98	92.64	2.14 (25.08)
<b>3</b>	3.32	90.22	3.68 (28.05)
<b>4</b>	1.32	91.85	1.44 (30.00)
<b>5</b>	1.67	89.46	1.87 (11.08)
<b>6</b>	3.25	90.58	3.58 (21.91)
<b>7</b>	3.68	91.02	4.04 (25.40)
<b>8</b>	1.60	89.83	1.78 (10.43)
<b>9</b>	2.99	90.20	3.29 (19.77)
<b>10</b>	1.71	88.62	1.93 (25.53)
<b>Promedio</b>	<b>2.29</b>	<b>90.64</b>	<b>2.52</b>

NOTA: Los valores entre paréntesis representan a los coeficientes de variación, en porcentaje.



**Figura 54: Promedio de delaminación total en planos encolados con adhesivo EPI y sección 2”x6”**

Como se muestra en la Figura 54, todos los promedios por probeta están por debajo de la delaminación máxima (5%), establecida en la norma UNE-EN 14080 (2013), representada en la Figura 54 por una línea superior roja, siendo el mayor valor reportado 4.04% con la probeta número 7, y el menor 1.44% con la probeta 4.

En comparación con el adhesivo MUF, usado para la misma sección 2”x6”, el adhesivo EPI registra un promedio general menor, 3.75 y 2.52% respectivamente; sin embargo, ambos están dentro del 5% permitido por la norma UNE-EN 14080 (2013), confirmando así que la buena adhesión lograda no es exclusiva de un solo tipo de adhesivo. En referencia a esto último, para generar una buena unión entre láminas, los adhesivos deben ser aplicados sobre superficies lisas, planas y libres de marcas producidas por máquinas u otras irregularidades superficiales, tal y como recomiendan Benites y Pérez (2002); por ello, es importante dimensionar correctamente las láminas de madera y lijarlas con grano mediano para no dejar una superficie semi impermeable, que dificultaría el ingreso del adhesivo.

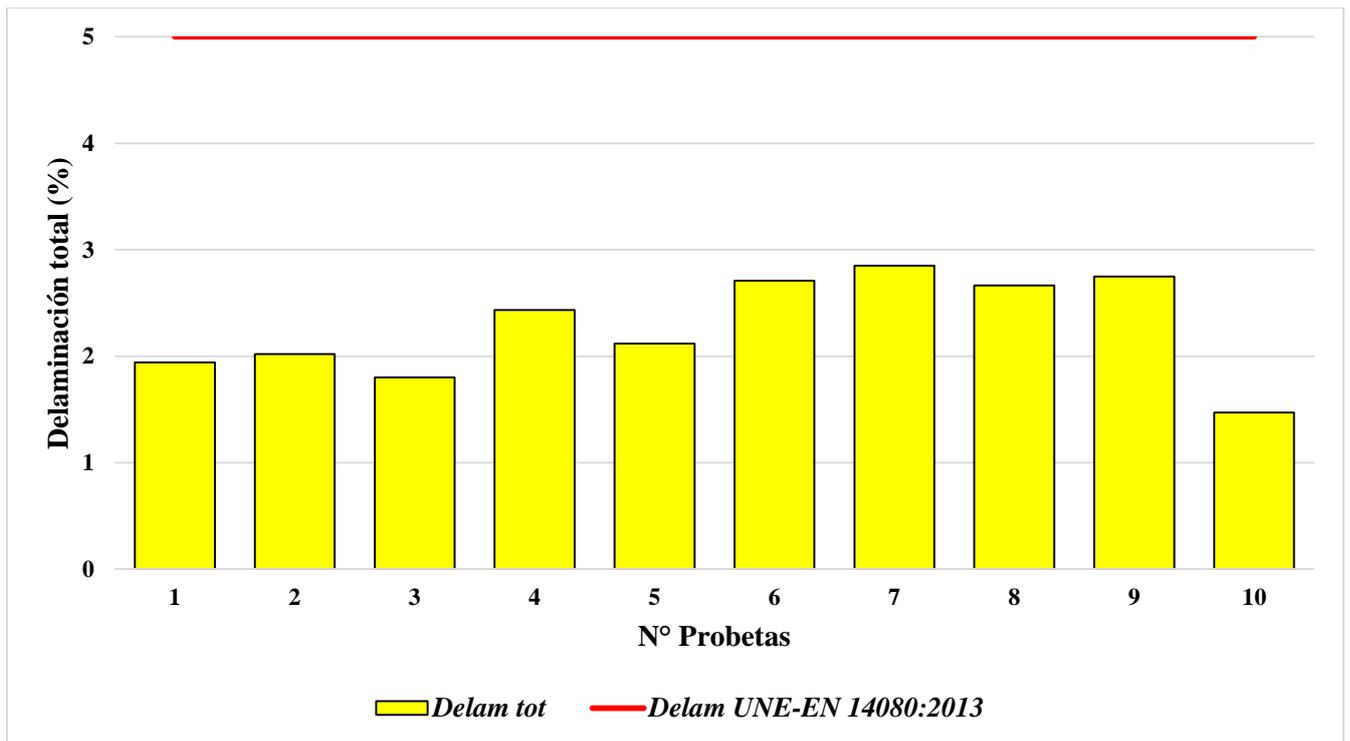
#### 4.7.2.2. EPI 2"x8"

La Tabla 21 muestra los resultados obtenidos con adhesivo EPI, los promedios de longitud de delaminación total (*Ltot delam*) y longitud total de plano encolado (*Ltot plano encolado*).

**Tabla 21: Promedio de delaminación total en planos encolados con adhesivo EPI y sección 2"x8"**

N° Probeta	Ltot delam	Ltot plano encolado	Delam tot (mm)
1	1.78	91.56	1.94 (16.48)
2	1.89	93.58	2.02 (24.74)
3	1.70	93.79	1.80 (18.62)
4	2.29	93.61	2.43 (22.24)
5	1.99	93.40	2.12 (21.12)
6	2.50	92.18	2.71 (27.93)
7	2.66	93.42	2.85 (13.50)
8	2.44	91.24	2.66 (22.04)
9	2.56	92.71	2.75 (22.56)
10	1.38	93.80	1.47 (28.33)
<b>Promedio</b>	<b>2.74</b>	<b>92.93</b>	<b>2.28</b>

NOTA: Los valores entre paréntesis representan a los coeficientes de variación, en porcentaje.



**Figura 55: Promedio de delaminación total en planos encolados con adhesivo EPI y sección 2”x8”**

Como se señala en la Figura 55, todos los promedios por probeta están por debajo de la delaminación máxima (5%) establecida en la norma UNE-EN 14080 (2013), representada en la Figura 55 por una línea superior roja, el mayor valor reportado fue 2.85% con la probeta número 7, y el menor 1.47% con la probeta 10.

A pesar de que los coeficientes de variación son ligeramente altos, los promedios no sobrepasan el 5% permitido por la norma UNE-EN 14080 (2013), además que el promedio general es menor al obtenido con el adhesivo MUF con la sección 2”x8”, que son de 2.28 y 3.23% respectivamente. Como se ha señalado antes, obtener buenos resultados no depende únicamente del adhesivo y la madera a usar, sino también de la correcta metodología aplicada, la conformación de láminas toma más tiempo que el proceso de prensado de las mismas; Además, se debe tener en cuenta que, como señala Matsuda (1995), en la superficie de la madera lijada antes del encolado, quedan expuestos grupos hidroxilo que pueden sufrir modificaciones como oxidación, lo cual puede afectar la formación de enlaces y facilitar así la delaminación de las líneas de cola.

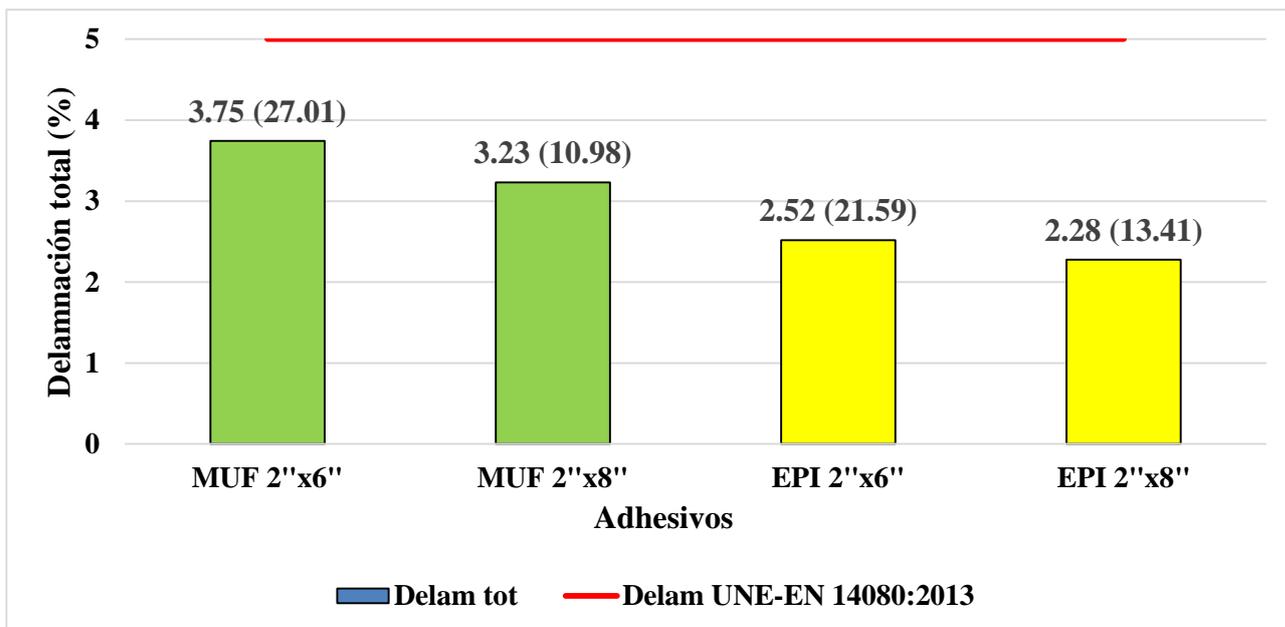
### 4.7.3. Comparación de resultados del EPI vs MUF

La Tabla 22 muestra el consolidado de los promedios de resistencia al esfuerzo cortante ( $f_v$ ), por tipo de adhesivo (EPI y MUF) y sección comercial (2"x6" y 2"x8").

**Tabla 22: Promedios de delaminación total en planos encolados con adhesivos EPI y MUF, y con secciones comerciales 2"x6" y 2"x8"**

Probeta	Delaminación total en planos encolados (%)			
	MUF 2"x6"	EPI 2"x6"	MUF 2"x8"	EPI 2"x8"
1	4.02	1.45	1.64	1.94
2	4.41	2.14	3.45	2.02
3	2.25	3.68	3.62	1.80
4	3.88	1.44	4.24	2.43
5	1.97	1.87	1.35	2.12
6	3.74	3.58	4.48	2.71
7	4.15	4.04	1.43	2.85
8	4.55	1.78	4.10	2.66
9	3.99	3.29	3.97	2.75
10	4.49	1.93	4.02	1.47
<b>Promedio</b>	<b>3.75 (27.01)</b>	<b>2.52 (21.59)</b>	<b>3.23 (10.98)</b>	<b>2.28 (13.41)</b>

NOTA: Los valores entre paréntesis representan a los coeficientes de variación, en porcentaje.



**Figura 56: Delaminación total en los planos encolados (EPI vs MUF)**

Como se puede apreciar en la Figura 56, tanto para las secciones 2''x6'' y 2''x8'', el adhesivo con el que se registró menor delaminación en los planos encolados fue con el EPI, frente al MUF; lo cual significa que la adhesión con el EPI resultó ligeramente mejor, ya que produjo menor delaminación; sin embargo, esta diferencia no es muy holgada, siendo menor a 2 mm, por lo que ambos adhesivos no superan el porcentaje de delaminación máximo ( $D_{tot} \geq 5.0$  mm) establecido por la norma UNE-EN 14080 (2013) independientemente del tipo de sección ensayada.

Habiéndose comprobado la calidad de adhesión de las líneas de cola, frente a esfuerzos mecánicos con los ensayos de esfuerzo cortante en planos de encolado, el ensayo de delaminación en planos de encolado puso a prueba las líneas de cola frente a esfuerzos de tensiones internas, por cambios bruscos de temperatura y humedad, tal y como un producto de este tipo sufre al estar expuesto en condiciones de intemperismo, pudiéndose generar así delaminaciones entre láminas o dentro de las mismas, como explica Divos (2011), después de varios años de servicio y que generalmente los extremos de las vigas son los más susceptibles a sufrir delaminación o fracturas parciales. En ese aspecto, es importante resaltar que la madera Cachimbo tiene una relación T/R de 1.52, valor determinado en este estudio, el cual es similar al reportado por Aróstegui (1974) (1.5), y calificado como normal según Ananías, citado por Gamez (2007). Por tanto, se considera al Cachimbo como una madera dimensionalmente

estable, lo cual es favorable para ensayos de delaminación de este tipo, en el que la madera se hincha y contrae rápidamente.

Como se explicó para los ensayos anteriores, las características propias de la madera influyen sobre la adhesión, independientemente del tipo de adhesivo usado, pero las características químicas son las que tienen cierta influencia directa en el encolado; en este caso, para la madera de Cachimbo, el contenido de extractivos totales (4%) está dentro del rango típico para latifoliadas según Otero, citado por Del Aguila (2009), y no afectó notoriamente el encolado. Por otro lado, el pH (5), que se encuentra dentro del rango establecido por Avila *et al.*, citados por Del Aguila (2009), es ligeramente ácido, mientras que los adhesivos son de pH más alcalinos, de 7.0 - 8.5 para EPI Akzonobel (2010) y de 9.5 – 11.0 para MUF Akzonobel (2009). Sin embargo, Wang *et al.* (2010) señalan que la madera tiene la propiedad de almacenar y amortiguar pH alcalinos; además, Sjostrom, citado por Wang *et al.* (2010) indica que la exposición a la humedad, como a la que fueron sometidas las probetas en este ensayo, provoca que el pH afecte y degrade los componentes de la madera, haciendo que se reduzca la resistencia de la interfase adhesivo-madera y se generen delaminaciones. Finalmente, el contenido de cenizas (0.6%), valor medio según la clasificación de Almeida, citado por Paucar (2015), afecta la variación del pH y como se explicó, esto altera la calidad de adhesión; sin embargo, no fue el caso y sí tuvo relevancia, debido al contenido de sílice, en la trabajabilidad de la madera al hacer los empalmes finger joint, en donde se redujo rápidamente el filo de las cuchillas usadas. Por tanto, se puede garantizar que los adhesivos EPI y MUF resisten a condiciones de intemperismo en su uso para MLE.

#### **4.8. Análisis estadístico**

Se aplicaron diseños estadísticos para el análisis de los factores (tipos de adhesivo y secciones comerciales). A continuación, se describe el análisis por cada tipo de ensayo realizado.

##### **4.8.1. Delaminación de empalmes por unión dentada entre láminas**

Para la prueba de delaminación en empalmes tipo finger joint, previa corroboración de la homocedasticidad de los errores, se realizó la prueba t-Student, de la cual se desprende, con

un nivel de confianza del 95% que no existe diferencia en la media de delaminación al usar distintos tipos de adhesivos (MUF y EPI).

También se aplicó una diferencia de medias de Poisson, la hipótesis nula es que la diferencia de medias de delaminación al usar distintos tipos de adhesivos es igual a 0, con un valor p-valor =1 y con un nivel de confianza del 95%, no se puede rechazar dicha hipótesis nula.

```
Two Sample t-test

data: df$Delaminacion by df$Adhesivo
t = -1.1805, df = 18, p-value = 0.2532
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -4.169448  1.169448
sample estimates:
mean in group EPI mean in group MUF
                3.6                5.1

Comparison of Poisson rates

data: c(5, 4) time base: c(10, 10)
count1 = 5, expected count1 = 4.5, p-value = 1
alternative hypothesis: true rate ratio is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.2690492 6.2995012
sample estimates:
rate ratio
        1.25
```

**Figura 57: Pruebas estadísticas para la delaminación de empalmes por unión dentadas entre láminas con adhesivos EPI y MUF**

En la Figura 57 se demuestra que los datos se encuentran dentro de la estadística paramétrica; es decir, que tienen una distribución normal. Se aplicó la prueba t-Student y con un p-valor=0.2532 no se puede rechazar la hipótesis nula de que las medias son iguales y se concluye que existen pruebas estadísticas significativas para afirmar que las medias de las dos variables independientes (delaminación con adhesivos EPI y MUF), son iguales. Esto se reafirma con la diferencia de medias de Poisson con la cual se llega a la misma conclusión y como ambas medias se encuentran dentro del rango permitido por la UNE-EN 14080 (2013), se puede decir que la calidad de adhesión de los empalmes finger joint con adhesivos EPI y MUF es aceptable.

#### 4.8.2. Resistencia al esfuerzo cortante en la línea de cola

Para este análisis se presentan las medidas de tendencia central y de dispersión, el cual se representa en la Figura 58. Posteriormente, se estudió el efecto del adhesivo y de la sección, para lo cual se realizó un ANOVA (ANalysis Of VAriance) a un diseño factorial de 2 x 2 completamente al azar.

El ANOVA mostró que no existe efecto significativo del tipo de adhesivo ( $F=2,02$ ;  $p$ -valor= $0,16$ ), ni de sección empleada ( $F=0,043$ ;  $p$ -valor= $0,83$ ) sobre la media del esfuerzo cortante.

adhesive	seccion	EC_prom	CV	min	max
1	EPI	2x6	9.88	11.05	7.882600 10.87800
2	EPI	2x8	9.44	9.65	7.803000 10.91471
3	MUF	2x6	9.09	6.67	8.085600 9.99480
4	MUF	2x8	9.41	10.27	7.782571 10.61186

Shapiro-Wilk normality test

data: ri  
W = 0.9555, p-value = 0.1173

Non-constant Variance Score Test  
Variance formula: ~ fitted.values

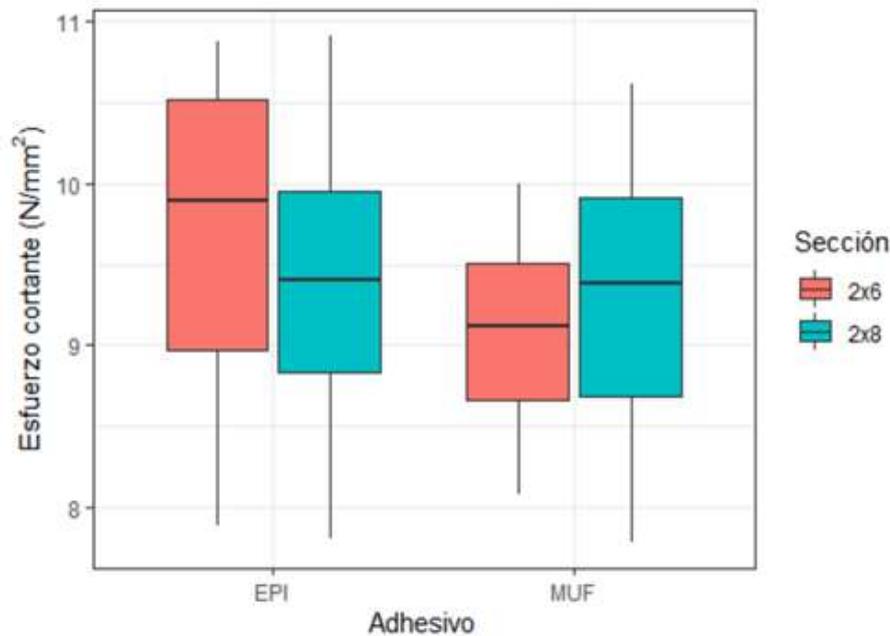
Chisquare = 2.322637, Df = 1, p = 0.1275

Analysis of Variance Table

Response: E.C.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
adhesive	1	1.6842	1.68423	2.0271	0.1631
seccion	1	0.0359	0.03595	0.0433	0.8364
adhesive:seccion	1	1.4682	1.46816	1.7671	0.1921
Residuals	36	29.9102	0.83084		

**Figura 58: Pruebas estadísticas para la resistencia al esfuerzo cortante en la línea de cola con adhesivos EPI y MUF**



**Figura 59: Medidas de tendencia central y dispersión para resistencia al esfuerzo cortante en la línea de cola con adhesivos EPI y MUF**

Se aprecia en la Figura 58 que los datos tienen una distribución normal, lo cual se comprueba con el Shapiro test ( $p\text{-valor}=0.1175$ ) con el que no puede rechazar la hipótesis nula de que la muestra sigue una distribución normal. Así también las pruebas Chi-cuadrado y ANOVA (ambas con  $p\text{-valor} > 0.05$ ) demuestran que no existe relación entre el adhesivo usado y el tipo de sección comercial trabajado, además el diagrama de cajas de la Figura 59 muestra que estadísticamente las medias son iguales con ambos adhesivos para cada sección comercial.

#### 4.8.3. Delaminación en planos de encolado

Para este análisis se presentan las medidas de tendencia central y de dispersión, el cual se presenta en la Figura 60. Se aplicó un diseño factorial completamente al azar, con 2 factores: Tipo de adhesivo y sección comercial. El tipo de adhesivo tiene dos niveles: EPI y MUF. La sección comercial también tiene 2 secciones: 2"x6" y 2"x8".

Se aplicó un ANOVA, previa corroboración del supuesto de normalidad ( $W$  de Shapiro Wilk = 0.94,  $p\text{-valor}=0.051$ ) y homocedasticidad (Chi-cuadrado=1.25,  $p\text{-valor}=0.26$ ). Con un valor  $F$  de Fisher igual a 13.15 y un  $p\text{-valor}=0.0008$ , se encontró que el único factor que afecta significativamente a la media es el tipo de adhesivo usado. En vista de ello, se aplicó la prueba

de Tukey, a través de la cual se observa, con un 95% de confianza, que el promedio de delaminación total, cuando se usa el MUF, es mayor al hallado cuando se usa EPI. Por tanto, EPI es mejor.

```

Analysis of Variance Table

Response: prom
          Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
adhesive    1  11.878  11.8780  13.1500 0.0008829 ***
seccion     1   1.443   1.4428   1.5972 0.2144162
adhesive:seccion 1   0.186   0.1859   0.2058 0.6528192
Residuals   36  32.518   0.9033

Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> shapiro.test(ri)

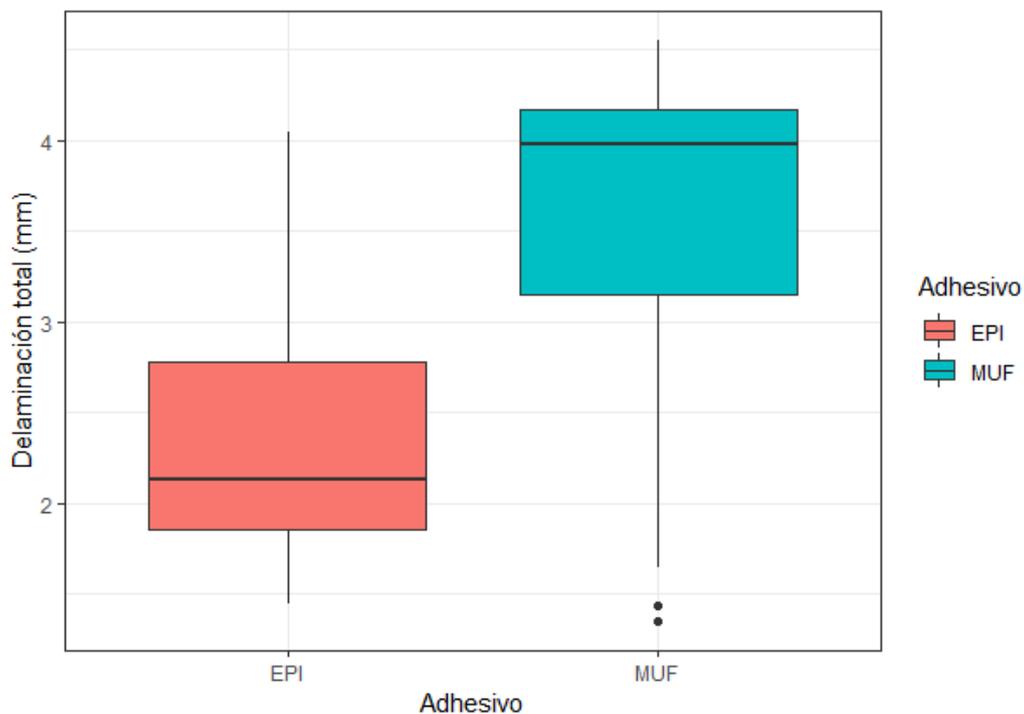
Shapiro-Wilk normality test
data:  ri
W = 0.94485, p-value = 0.05051

> ncvTest(mod)
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 1.248077, Df = 1, p = 0.26392

Response: prom
          Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
adhesive    1  11.878  11.8780  13.1500 0.0008829 ***
seccion     1   1.443   1.4428   1.5972 0.2144162
adhesive:seccion 1   0.186   0.1859   0.2058 0.6528192
Residuals   36  32.518   0.9033
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> shapiro.test(ri)

```

**Figura 60: Pruebas estadísticas para la delaminación en planos de encolado con adhesivos EPI y MUF**



**Figura 61: Medidas de tendencia central y dispersión para delaminación en planos de encolado**

Tras determinar que el único factor significativo que afecta a la media es el tipo de adhesivo usado, el diagrama de cajas de la Figura 61 muestra la diferencia de medias y aunque el adhesivo EPI tiene una media menor que la de MUF, ambas medias están por debajo del límite de delaminación máxima establecida en la norma UNE-EN 14080 (2013), que es de 5mm. Por lo tanto, ambos adhesivos son válidos para su uso en la unión de láminas de madera que componen las vidas de MLE.

## V. CONCLUSIONES

1. La caracterización de los residuos de la madera Cachimbo (*Cariniana domestica*) a nivel anatómico, químico, físico y mecánico, fue importante para la discusión de factores que pueden afectar la fabricación de MLE.
2. Los resultados de delaminación de los empalmes por unión dentada muestran que no existe diferencia significativa entre la calidad de adhesión de los adhesivos EPI y MUF usados para la fabricación de MLE con la especie Cachimbo.
3. Los ensayos de resistencia al esfuerzo cortante en la línea de cola muestran que no existe efecto significativo que afecte la calidad de adhesión con los adhesivos EPI y MUF, ni con las secciones comerciales (2"x6" y 2"x8") usadas para la fabricación de MLE con la especie Cachimbo.
4. Los resultados de delaminación en planos de encolado muestran que la calidad de adhesión no se ve influenciada por la sección comercial (2"x6" o 2"x8") pero sí por el tipo de adhesivo usado (EPI o MUF), registrándose menor delaminación con EPI.
5. La combinación de la especie Cachimbo (*Cariniana domestica*) con los adhesivos MUF y EPI, es aceptable para la fabricación de MLE, ya que cumplen con los requisitos de calidad de adhesión especificados en la norma UNE-EN 14080 (2013), para los ensayos de Delaminación de los Empalmes por Unión Dentada, Resistencia al Esfuerzo Cortante en la Línea de Cola y Delaminación en Planos de Encolado.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- Complementar este estudio con ensayos de propiedades físicas y mecánicas de vigas con tamaño a escala real.
- Realizar estudios económicos acerca de la rentabilidad de la implementación de una línea de producción madera laminada encolada (MLE) con madera de residuos.
- Continuar con estudios de calidad de adhesión de MLE elaboradas con residuos de otras especies comerciales peruanas.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

Almeida, C., Cunha, A. & Rios, P. (2017). Avaliação da qualidade da colagem da madeira de *Cupressus lusitanica* Mill. para a produção de painéis colados lateralmente. Scientia Forestalis, Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/316908594\\_Avaliacao\\_da\\_qualidade\\_da\\_colagem\\_de\\_topo\\_da\\_madeira\\_de\\_Cupressus\\_lusitanica\\_Mill\\_para\\_a\\_producao\\_de\\_paineis\\_colados\\_lateralmente](https://www.researchgate.net/publication/316908594_Avaliacao_da_qualidade_da_colagem_de_topo_da_madeira_de_Cupressus_lusitanica_Mill_para_a_producao_de_paineis_colados_lateralmente)

Albino, VC., Mori, F., Mendes, L. (2012). Influência das características anatômicas e do teor de extrativos totais da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden na qualidade da colagem. Ciência Florestal, 22(4). Recuperado de: <file:///C:/Users/ADMIN/Desktop/REVISI%C3%93N%20BIBLIOGR%C3%81FICA/Influ%C3%Aancia%20das%20caracter%C3%ADsticas%20anat%C3%B4micas%20e%20do%20teor%20de%20extrativos%20totais%20da%20madeira%20de%20Eucalyptus%20grandis%20w.%20hill%20ex%20maiden%20na%20qualidade%20da%20colagem.pdf>

AkzoNobel. (2009). Información de Producto, Sistema MUF 1242/2542 para Vigas Laminadas.

AkzoNobel. (2010). Información de Producto. EPI 1911 con HARDENER 1999.

Asociación de Investigación de las Industrias de la Madera. (18 de julio del 2011). Madera Laminada Encolada. [Publicación en un blog]. Recuperado de [http://infomadera.net/uploads/productos/informacion\\_general\\_126\\_Madera%20Laminada%20Encolada\\_18.07.2011.pdf](http://infomadera.net/uploads/productos/informacion_general_126_Madera%20Laminada%20Encolada_18.07.2011.pdf)

Asociación de Investigación de las Industrias de la Madera. (s.f.). Adhesivos para estructuras de madera laminada. Recuperado de [http://infomadera.net/uploads/articulos/archivo\\_2670\\_13937.pdf?PHPSESSI](http://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_2670_13937.pdf?PHPSESSI)

Asociación Española de Normalización y Certificación. (2013). UNE-EN 14080. Estructuras de madera. Madera laminada encolada y madera maciza encolada. Requisitos. Recuperado de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0052410>

Asociación de Investigación de las Industrias de la Madera. (12 de agosto del 2016). Clases de servicio y clases de uso: parecidos y diferencias. [Publicación en un blog]. Recuperado de <http://aitinforma.blogspot.com/2016/08/clases-de-servicio-y-clases-de-uso.html>

Arbeláez, JD. (2013). Ficha técnica de vigas de madera a flexión. (Tesis de Grado, Escuela de Ingeniería de Antioquia). Recuperada de [https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/311/7/ArbelaezJuan\\_2013\\_FichaTecnicaVigas.pdf](https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/311/7/ArbelaezJuan_2013_FichaTecnicaVigas.pdf)

Arriaga, F. & Blasco, JR. (2003). Estructuras: Estructuras de madera (Jornadas de introducción). Recuperado de <https://docplayer.es/17950004-Estructuras-estructuras-de-madera-jornadas-de-introduccion-francisco-arriaga-martitegui-joan-ramon-blasco-casanovas.html>

Aróstegui, A. (1974). Características tecnológicas y usos de la madera de 145 especies del país. Estudio tecnológico de maderas del Perú. Lima, Perú: Ministerio de Agricultura.

Aróstegui, A. & Acevedo, M. (1986). Evaluación de las Propiedades Físico – Mecánicas y Usos probables de las maderas de 20 especies de Jenaro Herrera. Revista Forestal del Perú, 5(1-2). Recuperado de [http://cedinfor.lamolina.edu.pe/Articulos\\_RFP/Vol05\\_no1-2\\_Ene71-Dic74\\_\(08\)/vol5\\_art1.pdf](http://cedinfor.lamolina.edu.pe/Articulos_RFP/Vol05_no1-2_Ene71-Dic74_(08)/vol5_art1.pdf)

- Barrera, JA. (2011). La Madera Laminada: Una alternativa estructural y ambiental. M&M. Recuperado de <https://www.yumpu.com/es/document/read/48607822/la-madera-laminada-una-alternativa-estructural-y-ambiental>
- Batista, A., Rodrigo, M., Calil, C. & Martínez, M. (2002). Evaluación de la resistencia a la tracción en elementos estructurales de madera con uniones dentadas. Maderas. Ciencia y Tecnología, 4(2). Recuperado de [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-221X2002000200007](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2002000200007)
- Benites, L. & Pérez, A. (2002). Propiedades mecánicas y resistencia de uniones encoladas de vigas laminadas. Recuperado de [https://catalogo.latu.org.uy/opac\\_css/doc\\_num.php?explnum\\_id=573](https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=573)
- Bomba, J., Šedvinka, P., Böhm, M. & Devera, M. (septiembre, 2014). Influence of moisture content on the bond strength and water resistance of bonded Wood joints. Bioresources, 9(3). Recuperado de [https://pdfs.semanticscholar.org/7629/be51e888310ecd7222233a836ceb24040e74.pdf?f\\_ga=2.30786879.1666886804.1593235618-108299680.1592891271](https://pdfs.semanticscholar.org/7629/be51e888310ecd7222233a836ceb24040e74.pdf?f_ga=2.30786879.1666886804.1593235618-108299680.1592891271)
- Camargo, CE., Vicente, J. (2000). Influência das características anatômicas da madeira na penetração e adesão de adesivos. Floresta e Ambiente. 7(1). Recuperado de: [http://www.if.ufrj.br/biolig/art\\_citados/Influ%C3%A2ncia%20das%20caracter%C3%ADsticas%20anat%C3%B4micas%20da%20madeira%20na%20penetra%C3%A7%C3%A3o%20e%20ades%C3%A3o%20de%20adesivos.pdf](http://www.if.ufrj.br/biolig/art_citados/Influ%C3%A2ncia%20das%20caracter%C3%ADsticas%20anat%C3%B4micas%20da%20madeira%20na%20penetra%C3%A7%C3%A3o%20e%20ades%C3%A3o%20de%20adesivos.pdf)
- Canchucaya, J. C. (2020). Viabilidad técnica para el uso de residuos de madera provenientes de procesos de transformación secundaria para la producción de paneles encolados lateralmente (EGP) en el Perú (Tesis doctoral, Universidad Federal de Paraná). Recuperada de: <https://www.prppg.ufpr.br/signa/visitante/trabalhoConclusaoWS?idpessoal=38813&idprograma=40001016015P0&anobase=2020&idtc=1492>

- Carmona, R.J., Espinoza, F., & Bull, S. (1998). Influencia de la densidad de la madera en la encolabilidad de *Pinus radiata* D. DON. Recuperado de [http://revistacienciasforestales.uchile.cl/1997-1998\\_vol12-13/n1-2a6.pdf](http://revistacienciasforestales.uchile.cl/1997-1998_vol12-13/n1-2a6.pdf)
- Casana, S. & Prieto, H.C. (2008). Producción más limpia en la manufactura de crucetas de madera. (Tesis de Grado, Universidad Nacional Agraria La Molina).
- Chiniforush, A., Akbarnezhad, A., Valipour, H., & Malekmohammadi, S. (febrero, 2019). Moisture and temperature induced swelling/shrinkage of softwood and 2 hardwood Glulam and LVL: An experimental study. *Revista Construction and Building Materials*, 207, 70-93. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.114
- Córdoba, R. (2005). Conceptos básicos sobre el secado de la madera. *Kurú: Revista Forestal (Costa Rica)*, 2(5). Recuperado de <file:///C:/Users/ADMIN/Downloads/Dialnet-ConceptosBasicosSobreElSecadoDeLaMadera-5123396.pdf>
- Confederación Peruana de la Madera. (2008). Compendio de información técnica de 32 especies forestales. (2da. ed.). Lima, Perú: CPM. Recuperado de <http://www.infobosques.com/descargas/biblioteca/125.pdf>
- Demkoff, M. (octubre, 2003). Vigas Laminadas Estructurales de Madera, su Fabricación y Empleo. XVIII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Recuperado de <https://m1db.files.wordpress.com/2012/05/madera-laminada-demkoff.pdf>
- De Cristóforo, N. (s.f.). Madera Laminada. Recuperado de [https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/19457/mod\\_resource/content/2/MADERA%20LAMINADA.pdf](https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/19457/mod_resource/content/2/MADERA%20LAMINADA.pdf)
- Del Aguila, I.B. (2009). Determinación del pH y la capacidad buffer a diferentes alturas del fuste y corteza de la Capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth.) en la zona de Tingo María. (Tesis de Grado, Universidad Nacional Agraria de la Selva). Recuperada de <http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/688/T.FRS-63.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Divos, F. (2011). Delamination Evaluation of in-Service Glulam Beams and other Structural Members Via Ultrasonics. Sopron-Hungary. En Bucur, V (Ed.), *Delamination in Wood, Wood Products and Wood-Based Composites* (pp 353-364). doi: [https://doi.org/10.1007/978-90-481-9550-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-90-481-9550-3_1)
- Frihart, CR. (2005). Wood adhesión and adhesives. En Rowell, RM (Ed.), *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites* (pp 215-278). Recuperado de <http://93.174.95.29/main/49A37D5F96709415721DE924EB254A42>
- Gamez, J. (2007). Evaluación de las características físicas del *Calycophyllum spruceanum* (Benth) Hooker F, ex Chuman “Capirona” a tres niveles del fuste en la zona de Tingo María-Perú. (Tesis de Grado, Universidad Nacional Agraria de la Selva). Recuperada de: <http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/708/T.FRS-86.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gomes, J., Cruz H., & Silva, R. (febrero, 2017). Failure behaviour and repair of delaminated glulam beams. *Revista Construction and Building Materials*, 154, 384-394. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.200
- Guevara, L., Reyes, P., & Bocanegra, L. (2006). Evaluación de residuos de aserrío. *Folia Amazónica*. 5: Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/316710057\\_EVALUACION\\_DE\\_RESIDUOS\\_DE\\_ASERRIO](https://www.researchgate.net/publication/316710057_EVALUACION_DE_RESIDUOS_DE_ASERRIO)
- He, G. & Yan, N. (marzo, 2005). Effect of moisture content on curing kinetics of pMDI resin and wood mixtures. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 5(25). Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143749605000060>
- Instituto Brasileiro Do Meio Ambiente E Dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA. Normas e procedimentos em estudos de anatomia da madeira: I. Angiospermae. II. Gimnospermae. Brasilia. 1991.

- Instituto Nacional de la Calidad. (2014). NTP 251.010. Madera, Método para determinar el contenido de humedad.
- Instituto Nacional de la Calidad. (2015). NTP 251.011. Madera, Método para determinar la densidad.
- Instituto Nacional de la Calidad. (2015). NTP 251.012. Madera, Método de determinación de la contracción.
- Instituto Nacional de la Calidad. (2015). NTP 251.013. Madera, Método de determinar el cizallamiento paralelo al grano.
- International Association of Wood Anatomists. (1989). List of Microscopic Features for Hardwood Identification. IAWA journal, 10(3). Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/294088872\\_IAWA\\_List\\_of\\_Microscopie\\_Features\\_for\\_Hardwood\\_Identification](https://www.researchgate.net/publication/294088872_IAWA_List_of_Microscopie_Features_for_Hardwood_Identification)
- Issa, C., & Kmeid, Z. (marzo, 2005). Advanced Wood Engineering: Glulam Beans. Revista Construction and Building Materials, 19(2), 99-106. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2004.05.013
- Kuzman, K., Oblack, L., & Vratuša, S. (2010). Glued Laminated Timber in Architecture. DRVNA INDUSTRIJA, 61(3). Recuperado de <https://www.semanticscholar.org/paper/Kitek-Kuzman-%2C-Oblak-%2C-Vratu%C5%A1a-%3A-Glued-Laminated-in-Kuzman-Oblak/b3d75a1669116b67ef27de51f8d307ef41d7bb2e>
- Lara-Bocanegra, JA., Majano-Majano, A., Crespo, J. & Guatia, M. (12 de enero 2017). Finger-jointed *Eucalyptus globulus* with 1C-PUR adhesive for high performance engineered laminated products. Construction and Building Materials. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817300041>

- López, FN., Polanco, C. & Bermúdez, JC. (Octubre, 2013). Caracterización mecánica estructural para veinte combinaciones de madera laminada encolada. *Colombia Forestal*, 16(2). Recuperado de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-07392013000200002](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-07392013000200002)
- Maloney, T. (1977). *Modern particleboard & process fiberboard manufacturing*. San Francisco: Milles Freeman Publication Inc.
- Manuel, J. R. (2010). Evaluación de la acidez (pH) y contenido de extraíbles de albura y duramen en tres niveles de altura del fuste de la especie *Jacaranda copaia* (Aubl.). D. Don, en Tingo María (Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria de la Selva). Recuperada de <http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/538/T.FRS-135.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Matsuda, H. (1995). Chemical modification of solid Wood. En Hon, DN (Ed.), *Chemical modification of lignocellulosic materials* (pp 159-183). Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=hc03DwAAQBAJ&pg=PA107&lpg=PA107&dq=wood+surface+oxidation&source=bl&ots=tw91m3ELq&sig=ACfU3U1sz2fvKtMpzQfqK5aUH7XENMPfNg&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjmsLPLrJfqAhV7ILkGHbzVC74Q6AEwDnoECAgQAQ#v=onepage&q=wood%20surface%20oxidation&f=false>
- Moya, L., Pérez, C., Vega, A., Sánchez, A., Torino, I. & Baño, V. (2019). Relación entre parámetros de producción y propiedades estructurales de madera laminada encolada de *Eucaliptus grandis*. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 21(3). Recuperado de <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/MCT/article/view/3474/3500>
- Negrão, A & Calil, C. (2007). Fadiga em emendas dentadas em madeira laminada colada. *Cuadernos de engenharia de estruturas*, 9(37).

- Organización Internacional de las Maderas Tropicales. (1996). Utilización Industrial de Nuevas Especies Forestales en el Perú. Lima, Perú. Recuperado de <http://www.itto.int/files/user/pdf/publications/PD37%2088/pd-37-88%20s.pdf>
- Oshiro, M. (2016). Ficha estándar de familia del catálogo de bienes, servicios y obras del MEF. Ficha estándar N° 92. Familia 20720021 Madera Cachimbo rojo. Recuperado de [https://www.mef.gob.pe/contenidos/doc\\_siga/catalogo/ctlogo\\_familias\\_madera\\_cachimbo.pdf](https://www.mef.gob.pe/contenidos/doc_siga/catalogo/ctlogo_familias_madera_cachimbo.pdf)
- Otúzar, FJ. (2008). Relación del estado superficial de la calidad de las uniones de madera laminada encolada de *Pinus Radiata D Don*. (Tesis de Grado, Universidad Austral de Chile). Recuperada de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2008/fifo.78r/doc/fifo.78r.pdf>
- Paucar, P. (2015). Determinación de la composición química a nivel básico de la corteza y madera de *Septotheca tessmannii* (utucuro) procedente de la CCNN Callería y CCNN Puerto Belén en tres niveles longitudinales del fuste. (Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ucayali). Recuperada de <http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/1580/000001997T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Poblete, H. (2001). Tableros de Partículas. Facultad de Ciencias forestales. Universidad
- Quevedo, VM. (s.f.). Adherencia y adhesivos para madera. Recuperado de [https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP\\_EPD/PD-GP-MA-ASIG/PD-GP-ASIG-200637/TAB42359/ADHERENCIA%20Y%20ADHESIVOS%20PARA%20MADE RA%20\(V%20Quevedo\).pdf](https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP_EPD/PD-GP-MA-ASIG/PD-GP-ASIG-200637/TAB42359/ADHERENCIA%20Y%20ADHESIVOS%20PARA%20MADE RA%20(V%20Quevedo).pdf)
- Ramos, J., Del Águila, V. & Bazalar, A. (2020). Estadística básica para negocios. Recuperado de [https://repositorio.ulima.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12724/10771/Ramos\\_Estad%C3%ADstica\\_b%C3%A1sica\\_de\\_los\\_negocios.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ulima.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12724/10771/Ramos_Estad%C3%ADstica_b%C3%A1sica_de_los_negocios.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Rey, MRJ. (2010). Evaluación de la acidez (pH) y contenido de extraíbles de albura y duramen en tres niveles de altura del fuste de la especie *Jacaranda copaia* (Aubl). D. Don. (Tesis de Grado, Universidad Nacional Agraria de la Selva). Recuperada de <http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/538/T.FRS-135.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rosboro. (2013). Glulam technical guide. Recuperado de <https://f01.justanswer.com/OkRB33CR/Rosboro+Gluelams+techguide060326.pdf>
- 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. Recuperado de: <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1995/rowel95g.pdf>
- Rüdiger, A. (1975). Determinación del pH en diversas especies de los renovables de la provincial de Valdivia. BOSQUE, 1(1). Recuperado de <http://revistas.uach.cl/pdf/bosque/v1n1/art02.pdf>
- Santiago, P., Guevara, L. & Espinoza ML. (2012). Diagnóstico de la primera y segunda transformación y de la cadena productiva en Pucallpa. Lima-Perú. Recuperado de [http://www.itto.int/files/user/pdf/PROJECT\\_REPORTS/PD512\\_08\\_Technical\\_ReportDiagn%C3%B3stico%20de%20la%20industria%20de%201%20y%202%20transformaci%C3%B3n.pdf](http://www.itto.int/files/user/pdf/PROJECT_REPORTS/PD512_08_Technical_ReportDiagn%C3%B3stico%20de%20la%20industria%20de%201%20y%202%20transformaci%C3%B3n.pdf)
- Selbo, ML. (1975). Adhesive Bonding of Wood. Recuperado de <https://intrans.iastate.edu/app/uploads/2018/08/tb1512.pdf>
- Sibille, AM. (2006). Guía de Procesamiento Industrial - Fabricación de muebles en maderas poco conocidas. Recuperado de <https://es.slideshare.net/BioModus/guia-de-procesamiento-industrial-de-fabricacion-de-muebles>
- Somoza, L. (1986). La madera laminada encolada: Historia y definición. Recuperado de <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/5130>



Wang, X., Huang, Z., Cooper, P., Wang, XM., Zhang, Y. & Casilla, R. (marzo, 2010). The ability of wood to buff highly acid and alkaline adhesives. *Wood and Fiber Science*, 42(3). Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/232740471\\_The\\_Ability\\_of\\_Wood\\_to\\_Buffer\\_Highly\\_Acidic\\_and\\_Alkaline\\_Adhesives](https://www.researchgate.net/publication/232740471_The_Ability_of_Wood_to_Buffer_Highly_Acidic_and_Alkaline_Adhesives)

Zhuravlev, M., Zhuravlev, T., Zhentelkov, A., & Mottaeva, A. (enero, 2020). Aesthetic, functional and physical features of glulam in building architecture. *Revista E3S Web of Conferences*. doi: 10.1051/e3sconf/202016405004