

Evaluación de una unión laminada con adhesivo tipo PVA y maderas de plantación: *Acacia mangium*, *Tectona grandis* y *Terminalia amazonia*

*Evaluation of a laminated joint with adhesive type PVA and woods from plantation: **Acacia mangium**, **Tectona grandis** y **Terminalia Amazonia***

FREDDY MUÑOZ ACOSTA¹
y PABLO MORENO PÉREZ²

1 Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Centro de Investigación en Integración Bosque-Industria, Cartago, Costa Rica, correo electrónico: fmunoz@tec.ac.cr
2 Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Laboratorio Nacional de Productos Forestales, Mérida, Venezuela, correo electrónico: pmoreno@ula.ve

Recibido: 17-03-11 / Aceptado: 23-11-11

Resumen

Se evaluó la resistencia en cizalle paralelo a la fibra en una unión adhesiva entre un adhesivo del tipo acetato de polivinilo (PVA) y tres especies de madera de Costa Rica y procedentes de plantación: *Acacia mangium* Willd., *Tectona grandis* L.f. y *Terminalia amazonia* A. Chev., bajo procedimientos de normas estándar ASTM. Los resultados mostraron que la resistencia en cizalle de la unión adhesiva en las tres especies fue mayor respecto de la resistencia del mismo tipo de esfuerzo en madera sólida. En *A. mangium* se obtuvo un aumento del 9,7%, para *T. grandis* y *T. amazonia* un 4,4%. La especie *T. grandis* con el mayor valor de peso específico básico (PEB), presentó la mejor resistencia en ambos ensayos en cizalle y mayor porcentaje de falla en madera en la unión adhesiva. El adhesivo aplicado es apto para fabricar uniones adhesivas laminadas por cara con piezas de madera en condición seca. Particularmente el adhesivo es recomendable para *T. grandis*, *A. mangium* y *T. amazonia* en ese orden de prioridad, acorde a los resultados obtenidos.

Palabras clave: esfuerzo en cizalle, peso específico, densidad, adhesivo, porcentaje de falla en madera, industria, Costa Rica.

Abstract

We evaluated the shear strength parallel to the fiber in an adhesive joint between adhesive type polyvinyl acetate (PVA) and three wood species of Costa Rica and from plantation: *Acacia mangium* Willd., *Tectona grandis* L.f. y *Terminalia amazonia* A. Chev., according to ASTM standards. The results showed that shear strength of adhesive laminated joint in the three species was higher on the strength of the same kind of strength in solid wood. In *A. mangium* was obtained an increase 9.7% for *T. grandis* and *T. Amazonia* an increase 4.4%. The species *T. grandis* with the highest specific gravity (SG) value, showed the best in both test of shear strength and higher wood failure percentage in the adhesive joint. The applied adhesive is suitable for making laminated adhesive joints by principal side with pieces of wood in dry condition. Particularly, the adhesive is recommended for *T. grandis*, *A. mangium* and *T. amazonia* in that order of priority, according to the results obtained.

Key words: shear strength, specific gravity, density, adhesive, wood failure percentage, industry, Costa Rica.

1. Introducción

Actualmente, el mercado e industria maderera costarricense se abastece en un alto porcentaje de madera proveniente de especies de plantación y en un porcentaje, cada vez menor, de maderas procedentes de bosque natural. Muchas especies forestales han sido probadas en condiciones de reforestación, tanto especies nativas como exóticas. No obstante, un grupo aproximado de 10 especies, están presen-

tando un rápido crecimiento, generando un alto volumen de producción y desarrollo en plantaciones forestales (Moya *et al.*, 2010).

De acuerdo a Triantafyllou (1997), los productos de ingeniería en madera han sido un pilar en la industria de la madera durante muchos años, permitiendo un mejor aprovechamiento del recurso forestal, ya que utiliza menos madera sólida o la misma cantidad de madera para hacer nuevos productos de madera con un mejor rendimiento.

Bajo el concepto de productos de ingeniería en maderas, los adhesivos y el avance de los mismos, han tenido un papel importante en los productos forestales y un factor clave para la eficiencia y utilización del recurso maderero (Frihart y Hunt, 2010). La combinación de adhesivos y madera lleva a la fabricación de nuevos materiales como tableros (fibra, partículas, hojuelas, laminados, contralaminados), madera laminada estructural, puertas, ventanas y marcos, montaje de muebles, elementos de construcción, artesanías entre otros productos. Es por esto que la industria maderera necesita, cada vez más investigar y obtener información del comportamiento de distintas especies ante nuevos productos forestales de ingeniería que pueden ser utilizados en el campo de la construcción, como elementos estructurales unidos a través de adhesivos, así como también como elementos de cerramientos internos en viviendas u otras instalaciones.

Entre el adhesivo y el sustrato (madera) se produce un fenómeno llamado adhesión, en donde las interacciones dependen de la composición de la capa exterior de células del sustrato, que puede afectar la calidad de la adhesión, ya que, los extractivos en la superficie de la madera son los principales medios de inactivación física y química (Vick, 1999). Entonces idealmente, un adhesivo debe ser compatible con las propiedades físicas y químicas del sustrato (madera).

La preparación de la superficie a encolar es muy importante ya que esta influye en la unión. La selección del adhesivo considera, el tipo de madera, durabilidad y resistencia, preparación y las características de usos y la aplicación. Además, de acuerdo a Frihart (2005), la falla en madera se considera tan importante como la fuerza de unión (adhesión), la falla en madera es fácil de observar; pero determinar dónde y por qué la falla tiene lugar en la línea de unión es algo complicado.

Un esfuerzo en cizalle o cizallamiento, es la capacidad que tiene la madera o unión adhesiva para resistir fuerzas que tienden a causar el deslizamiento de una sección sobre otra adyacente y se produce cuando actúan sobre un cuerpo dos fuerzas de igual magnitud, paralelas entre sí pero en dirección opuesta tratando de desplazar las fibras de una parte de la pieza respecto a la otra. La resistencia de la madera al cizalle es la medida de su capacidad para resistir una fuerza que tiende a causar este deslizamiento o falla (Figura 1).

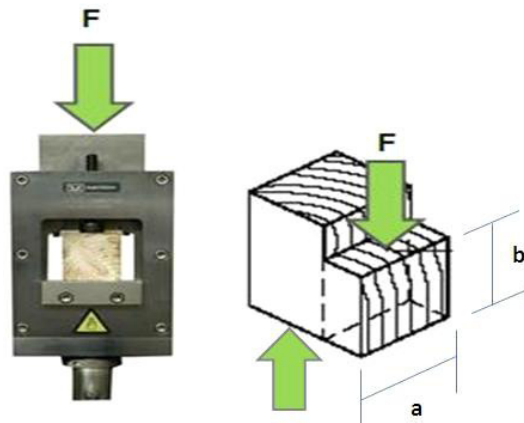


Figura 1. Ensayo de cizalle en madera sólida y unión adhesiva: Aplicación de la fuerza o carga (F) para producir desplazamiento paralelo a la fibra de la sección de esfuerzo ($a \times b$) respecto de la otra parte fija de la probeta.

El peso específico es considerado como uno de los mejores indicadores de la resistencia y los valores de las propiedades mecánicas en la madera (Da Silva *et al.*, 2009) ya que, se refiere al espesor de la pared celular que posee cada fibra de madera. Otra forma de ver este concepto es relacionar la densidad de la madera a un contenido de humedad determinado y la densidad del agua (Simpson y TenWolde, 1999). La densidad de un material se define como su masa por unidad de volumen, la densidad difiere del peso específico en que este último es un número adimensional indicando densidad relativa (Panshin y De Zeeuw, 1970). La densidad de la madera varía dentro de una especie y entre especies (Simpson y TenWolde, 1999).

El objetivo en este trabajo es evaluar el comportamiento al esfuerzo en cizalle en dirección paralela a la fibra de madera de una unión adhesiva laminada entre un adhesivo tipo PVA y tres diferentes especies de madera *Acacia mangium* Willd., *Tectona grandis* L.f. y *Terminalia amazonia* A. Chev, provenientes de plantación y de interés en la industria maderera costarricense.

2. Materiales y métodos

2.1 Sitios de muestreo

Las especies maderables de este estudio provienen de diferentes ubicaciones geográficas de Costa Rica. *T. grandis* procede de la Región Atlántica con

clima tropical húmedo a muy húmedo durante casi todo el año. *T. amazonia* y *A. mangium* proceden de la región del Pacífico Sur y Central, respectivamente; ambas regiones con clima tropical seco por un periodo de 4 meses al año. Para las tres especies se seleccionaron tres árboles al azar. En el cuadro 1 se muestran algunas características de las especies y plantaciones muestreadas. El procesamiento de la madera, preparación de probetas y ensayos se ejecutó en las instalaciones del Centro de Investigación en Integración Bosque Industria de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC).

2.2 Densidad y peso específico

Se prepararon, acondicionaron y ensayaron para cada especie 16 probetas para densidad y 16 probetas para peso específico (PE) bajo la norma D 2395 método B (ASTM, 2002). De acuerdo a Glass y Zelinka (2010), el porcentaje de contenido de humedad (%CH), densidad (ρ) y peso específico (PE) de la madera se calculan según las siguientes ecuaciones:

$$CH = \left[\frac{m_v - m_o}{m_o} \right] * 100\% \quad (\text{Ec. 1})$$

$$\rho_x = \frac{m_x}{V_x} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$PEB = \left[\frac{m_v}{V_v} \right] / \rho_a \quad (\text{Ec. 3})$$

$$PE_{12} = \left[\frac{m_{12}}{V_{12}} \right] / \rho_a \quad (\text{Ec. 4})$$

$$PE_o = \left[\frac{m_o}{V_o} \right] / \rho_a \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

CH = contenido de humedad base seca (%)

ρ_x = densidad a un CH específico (g/cm^3)

ρ_a = densidad del agua a 25°C ($\sim 1 \text{ g}/\text{cm}^3$)

PEB, PE_{12} y PE_o = peso específico básico, al 12% CH y seco (103°C por 24 h), respectivamente.

m_x , m_v , m_{12} , m_o = masa a cualquier %CH, verde, al 12% y seca a estufa, respectivamente (g)

La clasificación del peso específico básico (PEB) de la madera se realizó de acuerdo a Bárcenas (1985), el criterio de esta clasificación se presenta en el cuadro 2.

2.3 Cizalle madera sólida y unión adhesiva

Se prepararon, acondicionaron y ensayaron para cada especie 30 probetas para cizalle en madera sólida de acuerdo a norma D 143-94 (ASTM, 1994) y 36 probetas para cizalle en línea de cola, de acuerdo a norma D 905-03 (ASTM, 2003). La evaluación del porcentaje de falla en madera en la unión adhesiva por cara de acuerdo a norma D 5266-99 (ASTM, 1999). Se utilizó para el ensayo de ambos tipos de cizalle una máquina universal de ensayos Tinius Olsen con celda de carga de 1 tonelada. Para calcular el esfuerzo en cizalle paralelo a la fibra en madera sólida y unión adhesiva a un CH= 12%, se utilizó la siguiente relación:

$$E_{\text{cizalle}} = \left[\frac{\text{Carga ruptura}}{\text{Área esfuerzo}} \right] \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

E_{cizalle} = esfuerzo en cizalle paralelo a la fibra en madera sólida y unión adhesiva (kg/cm^2)

Carga ruptura = carga a la cual en la probeta se produce la falla ó ruptura de la madera (kg)

Área esfuerzo = sección de la probeta a la cual se aplica la carga (cm^2)

Cuadro 1. Características de las plantaciones y especies *A. mangium*, *T. grandis* y *T. amazonia*.

Especie	Edad (años)	Densidad de plantación (árboles/ha)	Altura total (m)	Diámetro altura pecho (cm)	Manejo silvícola
<i>A. mangium</i>	9	556	17,1	20,5	Raleo del 50% a los 4 años.
<i>T. grandis</i>	9	338	19,0	26,7	Limpieza de malezas anuales y raleo a los 3 y 6 años.
<i>T. amazonia</i>	14	452	21,4	22,6	Raleo sanitario y raleo del 50% a los 5 y 9 años.

Fuente: Moya et al. (2010)

Cuadro 2. Rangos para clasificar a la madera de *A. mangium*, *T. grandis* y *T. amazonia* por su peso específico básico.

Peso Específico Básico	Criterio de clasificación
≤ 0,2	Extremadamente liviana
0,20 – 0,25	Excesivamente liviana
0,25 – 0,30	Muy liviana
0,30 – 0,36	Liviana
0,36 – 0,42	Moderadamente liviana
0,42 – 0,50	Moderadamente pesada
0,50 – 0,60	Pesada
0,60 – 0,72	Muy pesada
0,72 – 0,86	Excesivamente pesada
≥ 0,86	Extremadamente pesada

Fuente: Bárcenas (1985).

El criterio de clasificación del esfuerzo en cizalle para madera sólida y unión adhesiva se realizó de acuerdo a lo estimado por Vargas (1987), el criterio de clasificación se indica en el cuadro 3.

Cuadro 3. Clasificación de esfuerzo según corte en cizalle paralelo a la fibra en madera sólida y unión adhesiva para *A. mangium*, *T. grandis* y *T. amazonia*.

Esfuerzo en cizalle (kg/cm ²)	Criterio de clasificación
< 40	Muy Bajo
40 – 85	Bajo
86 – 120	Mediano
121 – 175	Alto
> 175	Muy Alto

Fuente: Vargas (1987).

2.4 Adhesivo utilizado y preparación de probetas

El adhesivo utilizado para realizar la unión adhesiva por cara fue el Multibond EZ-1, es una emulsión estable precatalizada de acetato de polivinilo (PVA) de un solo componente, porcentaje de sólidos 46-49%, viscosidad 3,000-4.300 cps y pH 2,2 – 3,5 Se aplicó un gramaje mínimo recomendado de 140 g/m². La preparación del sustrato (madera) se realizó con un secado previo de la madera a un CH~12%, cepillado y lijado previo al proceso enco-

lado, y construcción de las probetas de acuerdo a norma D 905-03 (ASTM, 2003). El tiempo de ensamble abierto (5-10 min), presión (10-15 kg/cm²) y aplicación del adhesivo esparcido con brocha manualmente.

2.5 Diseño experimental

Se utilizó un diseño factorial general con un factor (especie) con 3 niveles categóricos (*A. mangium*, *T. grandis* y *T. amazonia*) y dos variables respuestas (esfuerzo en cizalle en unión adhesiva y % falla en madera), 36 corridas por especie para un total de 108 corridas. Para el análisis del diseño se utilizó el software estadístico Design Expert[®].

3. Resultados y discusión

3.1 Análisis de varianza (ANOVA) de un solo factor

La probabilidad normal de residuales de los datos obtenidos en las respuestas esfuerzo cizalle en unión adhesiva y % falla en madera, utilizando tres especies de plantación cumplen con el supuesto de normalidad, dado que los valores están ajustados a la línea de tendencia de normalidad, no se observaron fluctuaciones significativas de las muestras ensayadas ni datos atípicos. Sin embargo, el modelo aplicado con un 95% de confiabilidad no es significativo para la variable respuesta ensayo de cizalle en unión adhesiva, pero sí lo es para la variable respuesta % de falla en madera. Dado que la especie es factor significativo (valor $p < 0,0001$) para % de falla, se aplicó el método LSD (diferencia mínima significativa) para comparar pares de medias en % de falla madera en cada especie (Cuadro 4).

Valores “ $Prob > |t|$ ” menores que 0,05 indica que la diferencia entre pares de medias de especies es significativa. Los valores “ $Prob > |t|$ ” mayores que 0,1 indican que la diferencia entre pares de medias de especies no es significativa. Por lo tanto, existe diferencia significativa en el par de medias para % de falla entre *A. mangium* y *T. grandis*, y también entre *T. grandis* y *T. amazonia*. Entre *A. mangium* y *T. amazonia* no hay diferencia mínima significativa entre medias.

Cuadro 4. Método LSD para comparaciones de medias en % falla de madera para las especies *A. mangium*, *T. grandis* y *T. amazonia* procedentes de plantación.

Especie	Diferencia media	GL	Error estándar	t for H ₀ Coef=0	Prob > t
<i>A. mangium</i> vs <i>T. grandis</i>	-11,53	1	3,58	-3,22	0,0017
<i>A. mangium</i> vs <i>T. amazonia</i>	3,75	1	3,58	1,05	0,2968
<i>T. grandis</i> vs <i>T. amazonia</i>	15,28	1	3,58	4,27	< 0,0001

Fuente: Software estadístico Desing Expert*.

3.2 Valores promedio obtenidos para densidad, peso específico y esfuerzo en cizalle

El cuadro 5, resume los valores promedio obtenidos para densidad, peso específico y esfuerzo en cizalle para madera sólida y unión adhesiva, propiedades obtenidas y que corresponden a cada especie. Los valores de PEB y PE_{12%} obtenidos para las especies, son similares a los obtenidos por Moya *et al.* (2010), para las mismas especies. Sin embargo, los resultados en los esfuerzos en cizalle con madera sólida obtenidos difieren a los reportados por Moya *et al.* (2010), particularmente con las especies *A. mangium* y *T. grandis*. Esta diferencia puede ser atribuida a lo que indica León (2010), que la relación entre peso específico y las propiedades está influenciada por las diferencias de peso específico entre madera temprana y madera tardía; lo que implica tener diferencias en los valores de las diferentes propiedades físicas y mecánicas, dentro de una misma especie de madera.

Referente a los datos de densidad básica y densidad al 12%, los valores obtenidos con las especies de este trabajo difieren levemente con los repor-

tados por Moya *et al.* (2010). Sin embargo, como es conocido las propiedades físicas de la madera como densidad y peso específico son directamente dependientes del porcentaje de CH de la madera (Glass y Zelinka, 2010), esto explica las diferencias encontradas, dado que el porcentaje de CH de la madera no fue el mismo para ambos estudios, particularmente el CH inicial de la madera y procedimientos de acondicionamiento para las probetas ensayadas.

3.3 Clasificación por peso específico básico (PEB)

De acuerdo a Bárcenas (1985) y el valor obtenido en el PEB para cada especie (Cuadro 5), indica que *A. mangium* y *T. amazonia* son maderas moderadamente pesadas, mientras que, *T. grandis* clasifica como madera pesada. Además, según León (2010) a mayor PEB mayor espesor de pared celular indica que potencialmente mejora la resistencia mecánica de determinada especie de madera. Lo cual se pudo comprobar con la *T. grandis* ya que fue la especie con mayor PEB y mejor resistencia mecánica en el esfuerzo en cizalle.

Cuadro 5. Densidad, peso específico y esfuerzo en cizalle promedio para las especies *A. mangium*, *T. grandis* y *T. amazonia* procedentes de plantación.

Especie	Densidad (g/cm ³)		Peso Específico			Esfuerzo cizalle madera sólida (kg/cm ²)	Esfuerzo cizalle unión adhesiva (kg/cm ²)	Falla en madera (%)
	básica	12%	PEB	PE _{12%}	PE ₀			
<i>A. mangium</i>	0,91	0,83	0,49	0,50	0,53	80,18	88,79	82
desv estándar	0,06	0,05	0,03	0,04	0,04	4,84	11,15	16,24
%coef var	6,79	6,43	6,69	7,24	6,90	6,03	12,56	19,89
<i>T. grandis</i>	0,80	0,73	0,50	0,51	0,52	85,10	89,05	93
desv estándar	0,06	0,06	0,04	0,04	0,04	7,39	9,20	10,94
%coef var	7,74	7,80	7,22	7,13	7,35	8,68	10,33	11,74
<i>T. amazonia</i>	0,63	0,58	0,48	0,50	0,51	84,50	88,37	78
desv estándar	0,06	0,06	0,04	0,05	0,05	11,90	8,17	16,97
%coef var	9,46	10,47	8,43	9,23	10,14	15,10	9,24	21,78

3.4 Clasificación del esfuerzo en cizalle para madera sólida y unión adhesiva

La resistencia de una unión adhesiva se determina realizando un ensayo de ruptura (cizalle) de la unión. El fallo puede ocurrir según cuatro posibilidades (Figura 2):

- Fallo por adhesión: cuando la separación se produce en la interfase sustrato-adhesivo.
- Fallo mixto: combinación de fallo por adhesión y cohesión
- Fallo por cohesión: cuando se produce la ruptura del adhesivo.
- Ruptura del sustrato (madera): cuando el propio sustrato se rompe antes que la unión adhesiva o que la interfase sustrato-adhesivo.

Tanto el esfuerzo en cizalle de madera sólida como en unión adhesiva (Cuadro 5), las especies *T. grandis* y *T. amazonia* presentaron valores muy similares. Sin embargo, la especie *A. mangium* presentó un esfuerzo en cizalle menor en madera, en comparación con las otras dos especies.

Para las tres especies el esfuerzo de cizalle en madera sólida, de acuerdo al criterio de clasificación de Vargas (1987) se clasifica como bajo. Pero el esfuerzo en cizalle de la unión adhesiva aumentó para las tres especies pasando de la categoría de clasificación bajo a mediano, respecto del esfuerzo en cizalle en madera sólida. Entonces para *A. mangium* el aumento de la resistencia en cizalle de la unión adhesiva fue de un 9.7%, para *T. grandis* un 4.4% y para *T. amazonia* un 4.4%, siendo así la *A. mangium* la especie más favorecida con ese incremento de la resistencia del esfuerzo en cizalle en la unión adhesiva, respecto del mismo esfuerzo en madera sólida.

Sin embargo, el porcentaje de falla en madera de la especie *T. amazonia* presentó el menor ren-

dimiento, indicando que la unión específica entre madera y adhesivo para esta especie no fue la mejor, observándose que en la sección de esfuerzo en la unión adhesiva la falla en promedio fue del 22%; además se observó que la mayor incidencia de falla en la unión adhesiva para esta especie fue la del tipo falla por adhesión (Figura 2).

Caso contrario, se obtuvo con *T. grandis* que presentó el mejor comportamiento en el cizalle a la unión adhesiva, ya que, la falla en la unión adhesiva fue de solo 7%, predominando el tipo de falla mixta (Figura 2). Además, esta especie presentó el mejor porcentaje de falla en madera (Cuadro 5). Serrano (2005), determinó que la especie *T. grandis* en probeta sólida tiende a presentar un mayor cizalle que en probetas con unión adhesiva, sin embargo, en el estudio en mención el proceso de encolado se realizó en madera verde y utilizando adhesivo a base de resinas de poliuretano.

Se considera que una unión adhesiva satisfactoria, es aquella en donde la falla se produce en la madera (sustrato) y no en la unión adhesiva. Esto puede lograrse mediante una buena preparación de la madera (un cepillado y lijado de calidad previo al encolado, madera seca, tratamientos químicos a la superficie del sustrato antes del encolado) o introduciendo cambios en el adhesivo, ya sea en el tipo, en su formulación o en las condiciones de aplicación.

3.5 Afinidad entre adhesivo PVA y propiedades químicas de las maderas utilizadas

Aunque la medición de la penetración del adhesivo en la madera no se realizó, se atribuye para el caso particular de la *T. amazonia* que el adhesivo no penetró adecuadamente dentro de la estructura celular de la madera y que potencialmente la afinidad química entre la madera y el tipo de adhesivo uti-

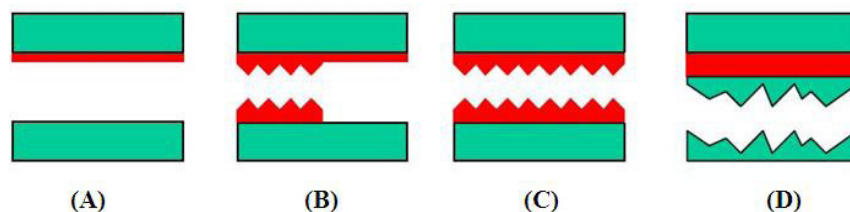


Figura 2. Aspecto de una ruptura en una unión adhesiva laminada, madera-adhesivo-madera: (A) fallo por adhesión; (B) fallo mixto; (C) fallo cohesivo (ruptura adhesiva); y (D) ruptura del sustrato (falla en madera).

lizado no fue la más adecuada. Una posible causa de esta poca afinidad entre adhesivo y sustrato se puede explicar mediante las propiedades químicas de estas especies; y en particular al contenido de extractivos.

Moya *et al.* (2010), reportan para *T. amazonia* un 22,4% y 8,24% de extractivos solubles en NaOH y agua, respectivamente. Contenido de extractivos solubles muy superior a los reportados para *T. grandis* (11,98% en NaOH y 3,28% en agua) y *A. mangium* (13,21% NaOH y 2,0% en agua).

De acuerdo a Frihart y Hunt (2010) la migración de extractivos a las capas superficiales de la madera, generan una inactivación superficial impidiendo que los grupos activos de la madera (grupos hidroxilos--OH) y del adhesivo entren en contacto. De acuerdo a Conner (2001), los adhesivos de polivinil acetato (PVA) polimerizan con una menor cantidad de alcohol vinilo y hay grupos hidroxilo libres en el polímero, también estos grupos hidroxilo pueden ser formados por la hidrólisis del acetato, estos grupos hidroxilo ofrecen puntos de unión, sin embargo el adhesivo Multibond EZ-1 es pre-catalizado acelerando su curado y la formación de estos grupos activos es por un periodo de tiempo más corto. La adición de catalizadores puede ser la solución a los problemas de fraguado que la acidez de la madera provoca al adhesivo y la magnitud de los cambios en las propiedades depende del valor de pH de la especie (Poblete y Pinto, 1993).

Por otra parte, el nivel de acidez (pH) de los extractivos pueden interferir con el curado de algunos adhesivos. Moya *et al.*, (2010) reportan para *T. amazonia* un pH= 3,79 para *T. grandis* un pH= 6,4 y para *A. mangium* un pH= 5,6; claramente se identifica que la madera de *T. amazonia* presenta mayores niveles de acidez. Extractivos con niveles alcalinos pueden retardar la polimerización normal de un adhesivo ácido (Frihart y Hunt, 2010).

Lo anterior se corrobora con la compatibilidad del pH del adhesivo Multibond EZ-1 (2,2-3,5) y los pH de las maderas ensayadas, resulta que *T. grandis* y *A. mangium* son maderas más alcalinas y por lo tanto son más compatibles con el adhesivo que la *T. amazonia*.

La teoría de Arrhenius define a un ácido como un compuesto que produce iones H^+ y una base como un compuesto que produce iones OH^- ambos en solución acuosa. Esta teoría si la asociamos con que el adhesivo PVA es una emulsión acuosa y las

especies *T. grandis* y *A. mangium* son compuestos con pH básico, habrá más opciones de generar grupos activos OH^- aumentando las posibilidades de unión específica entre adhesivo y sustrato, dando como resultado una mejor adhesión.

Según Vick (1999), en las uniones encoladas madera-adhesivo-madera se pueden presentar por separado o al mismo tiempo dos tipos de unión: *Mecánica*, el adhesivo se introduce en los poros de la madera y después por fraguado, el adhesivo se convierte en un sólido de gran cohesión, manteniendo las piezas unidas; *Específica*, es la que resulta de la atracción química entre los grupos activos de naturaleza polar de la madera y los grupos activos polares del adhesivo.

4. Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo a los resultados obtenidos, la aplicación de adhesivo para fabricar uniones adhesivas madera-adhesivo-madera, resultó ser beneficiosa. Pues, la resistencia al esfuerzo en cizalle en las tres especies aumentó respecto del mismo tipo de esfuerzo en madera sólida.

El esfuerzo en cizalle en unión adhesiva resultó ser no significativa entre especies, pero el porcentaje de falla en madera si es significativo entre especies, ambas significancias con un 95% de confiabilidad.

La especie *Tectona grandis* con el mayor valor de peso específico básico (PEB), presentó mejor resistencia en ambos ensayos en cizalle y mayor porcentaje de falla en madera en la unión adhesiva (93%).

La especie *Acacia mangium* presentó menor resistencia en cizalle en madera sólida, pero fue la especie con mayor aumento porcentual (9,7%) en la cizalle en la unión adhesiva.

El comportamiento en porcentaje de falla entre *A. mangium* y *T. grandis*; entre *T. grandis* y *T. amazonia* es significativamente diferente. Para *A. mangium* y *T. amazonia* es el mismo comportamiento, no hay diferencia mínima significativa entre medias.

El adhesivo Multibond EZ-1 resultó ser apto para fabricar uniones adhesivas adecuadas que tienen un esfuerzo al cizalle mediano para las especies *Tectona grandis*, *Acacia mangium* y *Terminalia amazonia* en ese orden de prioridad, acorde a los resultados obtenidos.

Se recomienda para obtener mejores resultados en la unión adhesiva en la madera de *Terminalia amazonia* con adhesivo Multibond EZ-1, modificar la superficie de la madera previamente al encolado con alguna sustancia química que eleve la alcalinidad de la madera ó modificar previamente el adhesivo con algún catalítico que eleve la alcalinidad del adhesivo. Para las otras dos especies, se recomienda aplicar el adhesivo con la formulación original del fabricante.

5. Agradecimientos

Al Centro de Investigación en Integración Bosque-Industria (CIIBI) por el apoyo de personal técnico y equipamiento. A las empresas, Precious Woods de Centro América, Ecodirecta Group y Barca S.A. por el suministro del material de estudio. A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Tecnológico de Costa Rica, por el apoyo financiero.

6. Referencias bibliográficas

- ASTM. 1994. D143 Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. ASTM (American Society for Testing and Materials, US). In: *Annual Book of ASTM Standards*. ASTM (eds.). Vol. 04.10. (ASTM D 143-94 Reapproved 2000). Philadelphia, USA. 1-31 pp.
- ASTM. 2002. D2395 Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials. ASTM (American Society for Testing and Materials, US). In: *Annual Book of ASTM Standards*. ASTM (eds.). Vol. 04.10 (ASTM D 143-02). Philadelphia, USA. 1-8 pp.
- ASTM. 1999. D5266 Standard Practice for Estimating the Percentage of Wood Failure in Adhesive Bonded Joints. ASTM (American Society for Testing and Materials, US). In: *Annual Book of ASTM Standards*. ASTM (eds.). Vol.15.06 (ASTM D 5266-99 Reapproved 2005). Philadelphia, U.S.A. 1-4 pp.
- ASTM. 2003. D905 Standard Test Method for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading. ASTM (American Society for Testing and Materials, US). In: *Annual Book of ASTM Standards*. ASTM (eds.). Vol.15.06 (ASTM D 905-03). Philadelphia, U.S.A. 1-5 pp.
- BÁRCENAS, G. 1985. *Recomendaciones para el uso de 80 maderas de acuerdo con su estabilidad dimensional*. Xalapa, Mx. Instituto de Investigaciones sobre Recursos Bióticos (INIREB). Laboratorio de Ciencia y Tecnología de la Madera (LACITEMA). Nota técnica 11. 18 p.
- CONNER, A. 2001. Wood adhesives. In: *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. Amsterdam, New York. *Elsevier Science* 9583-9599.
- DA SILVA, L., F. RIBEIRO, P. GASSON y D. CUTLER. 2009. Anatomia em densidade básica da madeira de *Caesalpinia pyramidalis* Tul. (Fabaceae), espécie endêmica da caatinga do Nordeste do Brasil. *Acta Bot. Bras.* 23: 436-445.
- FRIHART, C. 2005. Adhesive bonding and performance testing of bonded wood products. *Journal of ASTM International* 2(7): 1-12.
- FRIHART, C. y C. HUNT. 2010. Adhesives with Wood Materials Bond Formation and performance. Chapter 10. In: *Wood handbook—Wood as an engineering material*. R. J. Ross (ed.). Centennial edition. General Technical Report FPL-GTR-190. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin, USA. 1-24 pp.
- GLASS, S. y S. ZELINKA. 2010. Moisture Relations and Physical Properties of Wood. Chapter 4. In: *Wood handbook—Wood as an engineering material*. R. J. Ross (ed.). Centennial edition. General Technical Report FPL-GTR-190. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin, U.S.A. 1-19 pp.
- LEÓN, W. 2010. Anatomía y densidad o peso específico de la madera. *Revista Forestal Venezolana* 54(1): 67-76.
- MOYA, R., F. MUÑOZ, C. SALAS, A. BERROCAL, L. LEANDRO y E. ESQUIVEL. 2010. Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 7(18-19): 1-207. En línea: www.tec.ac.cr/revistaforestal. [Consultado: 03/14/2011].
- PANSHIN, A. y C. DE ZEEUW. 1970. *Text of wood technology*. Vol. 1. 3^{era} ed. Editorial McGraw-Hill. San Luis, USA. 705 p.
- POBLETE, H. y A. PINTO. 1993. Avances sobre el efecto del catalizador en el fraguado de urea formaldehído en tableros de teca. *Revista Bosque* 14(1): 55-61.
- SERRANO, R. 2005. Influencia del apartamiento de la zona juvenil y el encolado en verde sobre la calidad de la madera de cuatro especies forestales de plantación. *KURÚ Revista Forestal* 2(4): 1-14.
- SIMPSON, W. y A. TENWOLDE. 1999. Physical Properties and Moisture Relations of Wood. Chapter 3. In: *Wood handbook—Wood as an engineering material*. R. J. Ross (ed.). Centennial edition. General Technical Report

- FPL-GTR-190. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin, U.S.A. 1-24 pp.
- TRANTAFILLOU, T. C. 1997. Shear reinforcement of wood using FRP materials. *Journal of Materials in Civil Engineering* 9(2): 65-69.
- VARGAS, J. 1987. *Anatomía y tecnología de la madera. Manual del Técnico Forestal*. Escuela Técnica Superior Forestal-Cooperación Técnica Alemana. Cochabamba, Bolivia. 119 p.
- VICK, C. 1999. Adhesive bonding of woods materials. Chapter 9. In: *Wood handbook—Wood as an engineering material*. USDA Forest Products Staff (eds.). Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin, U.S.A. 1-24 pp.