

NOTA TÉCNICA N° 10

Evaluación de la Resistencia al Cizallamiento por Compresión y Falla en Madera de uniones encoladas en Maderas Nacionales e Importadas.

Sebastián Quagliotti ¹

INTRODUCCIÓN

La presente nota técnica es el complemento de la nota técnica N° 9. Estos estudios se vienen desarrollando dentro del Grupo de Encastres de Madera Sólida (GT6). Dicho grupo está integrado por la Asociación de Industriales de la Madera del Uruguay, la Universidad del Trabajo del Uruguay y el Laboratorio Tecnológico del Uruguay.

En el trabajo que aquí se presenta se analizó la adhesividad de cinco especies de madera: *Eucalyptus grandis*, *Pinus taeda*, *Pinus elliottii*, *Cedrela spp* (Cedro) y *Tabebuia ipe* (Lapacho).

La evaluación se realizó tomando en cuenta la Resistencia al Cizallamiento por Compresión y el Porcentaje de Falla en Madera.

Palabras claves: Resistencia al Cizallamiento, Compresión, Falla en Madera, PVA, Isocianato.

MATERIALES

MADERA

- *Eucalyptus grandis*: se seleccionaron tablas de árboles de 12 años, sin poda y con raleo provenientes del departamento de Rivera.
- *Pinus taeda*: se seleccionaron tablas de árboles de 24 años, con poda y raleo provenientes del departamento de Río Negro.
- *Pinus elliottii*: se seleccionaron tablas de árboles de 24 años, con poda y raleo provenientes del departamento de Río Negro y tablas de árboles de 40 años de trozas basales, sin poda y raleo provenientes del departamento de San José.
- *Cedrela spp* y *Tabebuia ipe*: tablas de origen y edad desconocido suministradas por Bomel S.A (ADIMAU).

ADHESIVOS

Los adhesivos utilizados en el presente trabajo fueron:

Adhesivo	Contenido no volátil	Relación de mezcla	Proveedor
Emulsión de polivinil acetato TOR 101 (PVA A)	49	-----	Riolsa S.A
Emulsión de polivinil acetato TOR 101/49 (PVA B)	44	-----	Riolsa S.A
Polímero hidrosoluble Isocianato KR-134	60	100/15	Koyo Sanyo CO. Ltd

¹ Ing. Agr. Sebastián Quagliotti (squaglio@latu.org.uy) <http://www.latu.org.uy>
Departamento de Proyectos Forestales LATU

PROCEDIMIENTO

El presente estudio está basado en las siguientes normas:

- **ASTM D 5751-99 (Adhesives Used for Laminate Joints in Nonstructural Lumber Products)**
- **JIS K 6852-1994 (Testing methods for shear strength of adhesive bonds by compression loading)**
- **EN 205:1991. Métodos de ensayo para Adhesivos para la madera de uso no estructural.**

A continuación se presenta la secuencia de etapas para la realización del presente trabajo:

- **Elaboración de listones para elaborar probetas**

Para cada especie se elaboraron listones a partir de las tablas libre de defectos. Todos los listones poseen una sección transversal de corte radial. Las dimensiones de los mismos son: 300 mm de largo x 45 mm de ancho x 10 mm de espesor.

- **Determinación del contenido de humedad de los listones**

De cada especie se seleccionaron 10 listones para determinar el contenido de humedad. Se determinó por el método de secado en estufa. Primero se pesaron los listones y luego fueron colocados en estufa secándose a $103 \pm 2^\circ \text{C}$ hasta llegar a peso constante.

Los valores de humedad fueron los siguientes:

Tabla N° 1. Contenido de humedad de las tablillas según especie.

Especie	Contenido de humedad (%)
<i>Tabebuia ipe</i> (Lapacho)	12,3
<i>Cedrela spp.</i> (Cedro)	13,7
<i>Pinus taeda</i>	9,9
<i>Pinus elliottii</i>	9,7
<i>Eucalyptus grandis</i>	10,1

- **Determinación de la densidad de los listones**

A cada una de los listones se le determinó el largo y el ancho utilizando un calibre digital y el espesor utilizando un micrómetro digital. Luego se procedió al peso de las mismas, para el posterior cálculo de la densidad. Con los valores obtenidos se ranquearon los listones de menor a mayor valor de densidad para poder encolar listones de similar densidad.

- **Acondicionamiento previo al encolado**

Los listones fueron acondicionados en una cámara climatizada a 20°C y 65 % de humedad relativa (H.R) hasta que alcanzaron el equilibrio luego de dos pesadas consecutivas de los testigos.

El contenido de humedad al que llegaron los listones luego de ser acondicionados se muestra en la siguiente tabla:

Tabla N° 2. Contenido de humedad de los listones acondicionados a 20° C y 65 % H.R según especie.

Especie	Contenido de humedad (%)
<i>Tabebuia ipe</i> (Lapacho)	11,6
<i>Cedrela spp.</i> (Cedro)	13,2
<i>Pinus taeda</i>	11,4
<i>Pinus elliottii</i>	10,8
<i>Eucalyptus grandis</i>	10,5

- **Encolado**

Una vez acondicionados se encolaron pares de listones de similar densidad aplicando una carga de adhesivo de 250-300 g/m². Para el prensado se utilizó una prensa “SHINTO Compression Moulding Machine” (Figura N° 1) colocando los listones entre los platos de la prensa y se utilizó una presión de 10 o 12 kgf/cm² dependiendo de la especie. Para *Eucalyptus grandis* y *Tabebuia ipe* se utilizó 12 kgf/cm² y para los 2 pinos y el *Cedrela spp* 10 kgf/cm². El fraguado se realizó con las probetas sujetas a las prensas durante 24 horas a temperatura y humedad ambiente.



Figura N° 1. Prensa “SHINTO Compression Moulding Machine”

- **Corte de las probetas**

De cada par de listones encolados se obtuvieron 10 probetas escalonadas como se muestra en la siguiente Figura N° 2 Cada probeta tiene un área de ensayo de 600 mm^2 aproximadamente.

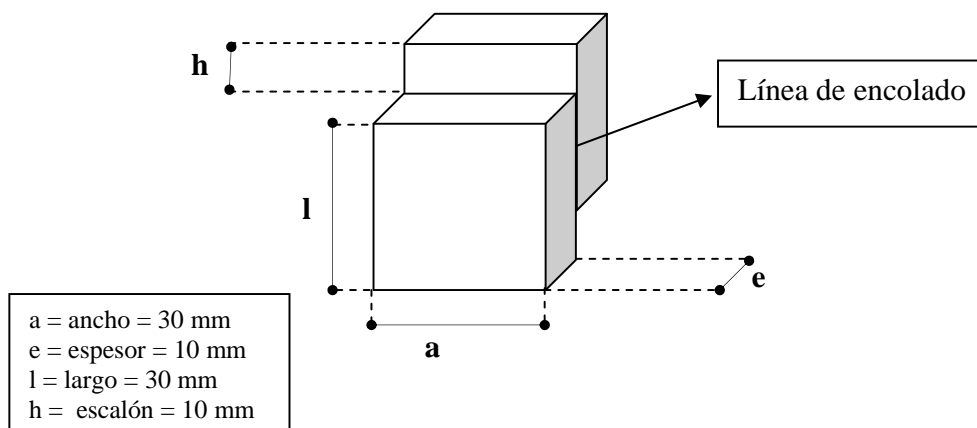


Figura N° 2. Geometría de las probetas escalonadas

- **Acondicionamiento de las probetas previo al ensayo de compresión**

Se realizó un acondicionamiento a 20° C y 65 % de H.R (curado de las probetas) por un período de una semana.

- **Tratamientos realizados**

Los tratamientos a las que fueron sometidas las probetas son para crear condiciones de envejecimiento previas a la realización del ensayo. Además se ensayaron probetas en condiciones secas. Previo a la realización de cada tratamiento se determinó de cada probeta el ancho y espesor en el área de ensayo.

Tratamiento 1 (Condiciones secas)

En este tratamiento las probetas luego de estar una semana en cámara climatizada a una H.R de 65 % y 20° C se ensayaron en esas condiciones.

Tratamiento 2 (Inmersión en agua a 30° C)

Las probetas son sumergidas en agua a 30° C dentro de un baño termostatzado (Figura N° 3) con control de temperatura por un período de 3 horas. Luego de ese tiempo las probetas son colocadas debajo de agua a temperatura ambiente por 10 minutos. Posteriormente son ensayadas las probetas en condiciones húmedas.

Tratamiento 3 (Inmersión en agua a 60° C)

Las probetas son sumergidas en agua a 60° C dentro de un baño termostatzado (Figura N° 3) con control de temperatura por un período de 3 horas. Luego de ese tiempo las probetas son colocadas en agua a temperatura ambiente por 10 minutos. Posteriormente son ensayadas las probetas en condiciones húmedas.

Tratamiento 4 (Inmersión en agua a 100° C)

Las probetas a ensayar en húmedo fueron sometidas a un tratamiento Húmedo-Seco-Húmedo, el mismo consistía en:

- Colocar probetas en baño de agua a 100° C durante 4 horas
- Secado en estufa a 60 ° C durante 20 horas
- Colocar probetas en agua fría por 1 hora
- Colocar probetas en baño de agua a 100° C durante 4 horas

Este tratamiento solamente fue realizado a las probetas encoladas con Isocianato debido a la agresividad del mismo. Para dicho tratamiento se utilizó un baño termostatzado (Figura N° 3) con control de temperatura y una estufa de secado con circulación forzada.



Figura N° 3. Baño termostatzado con control de temperatura.

• **Ensayo**

El ensayo se realizó en una máquina universal de ensayos dentro de una cámara climatizada a 20° C y 65 % de humedad relativa como se muestra en la figura N° 4. Se aplicó compresión paralela a la unión encolada, una velocidad de aplicación de 10 mm/minuto en todos los casos (Figuras N° 5 y N° 6).

Se registró la carga máxima aplicada en Newton y se calculó la Resistencia de la unión encolada como el esfuerzo unitario máximo, empleando la siguiente fórmula:

$$\text{Resistencia al cizallamiento por compresión (N/mm}^2\text{)} = \text{Carga máxima aplicada (N)} / \text{Área de ensayo (mm}^2\text{)}$$

Cabe aclarar que N/mm² es igual a Megapascal (MPa).

Luego del ensayo se determinó mediante una inspección visual el porcentaje de Falla en Madera de cada probeta. Este corresponde al cociente entre el área de ensayo donde se produjo la rotura en la madera y el área de ensayo de la probeta.



Figura N° 4. Máquina Universal



Figura N° 5. Ajuste de probeta



Figura N° 6. Probeta siendo ensayada.

También se determinó la Retención del Poder Adhesivo para los tres adhesivos; entendiéndose como tal el porcentaje entre los promedios de la Resistencia al Cizallamiento obtenido en la condiciones húmeda y seca respectivamente, o sea:

$$\text{Retención del Poder Adhesivo (\%)} = H/S * 100$$

Donde: H = Promedio de la Resistencia al Cizallamiento según tratamiento húmedo
S = Promedio de la Resistencia al Cizallamiento en condiciones seca

RESULTADOS

Resistencia al cizallamiento por compresión, Retención del Poder Adhesivo y Porcentaje de Falla en Madera

En los siguientes cuadros y gráficos se muestran los resultados obtenidos para cada especie, adhesivo y condición de ensayo. Para cada tratamiento se ensayaron 10 probetas por especie.

PVA 49 % de Sólidos

En las tablas N° 3 y N° 4 se presentan los resultados de Resistencia al Cizallamiento por compresión, Retención del Poder Adhesivo y el % de Falla en Madera para las probetas encoladas con PVA (mayor carga de sólidos) según tratamiento. Cabe aclarar que no fueron ensayadas probetas de Cedro y Lapacho debido a que no se pudo conseguir madera suficiente de estas dos especies para poder confeccionar probetas.

Tabla N° 3. Resistencia al cizallamiento por compresión, Retención del Poder Adhesivo y para cada especie y tratamiento utilizando probetas encoladas con PVA A (49 % sólidos).

Tratamiento	Resistencia al cizallamiento por compresión (MPa) y Retención Poder Adhesivo (%)					
	<i>Eucalyptus grandis</i>		<i>Pinus taeda</i>		<i>Pinus elliottii</i>	
	MPa	H/S (%)	MPa	H/S (%)	MPa	H/S (%)
Tratamiento 1. Condiciones secas	10,5	----	11,6	----	10,0	----
Tratamiento 2. Inmersión agua 30° C.	4,1	39	0,8	7	0,3	3
Tratamiento 3. Inmersión en agua 60° C.	2,0	19	0,2	2	0,1	1

Tabla N° 4. Falla en Madera para cada especie y tratamiento utilizando probetas encoladas con PVA A (49 % sólidos).

Tratamiento	Falla en Madera (%)		
	<i>Eucalyptus grandis</i>	<i>Pinus taeda</i>	<i>Pinus elliottii</i>
Tratamiento 1. Condiciones secas	87	64	66
Tratamiento 2. Inmersión agua 30° C.	12	0	0
Tratamiento 3. Inmersión en agua 60° C.	1	0	4

Los datos de las tablas N° 3 y N° 4 se representan gráficamente en los gráficos N° 1 y N° 2.

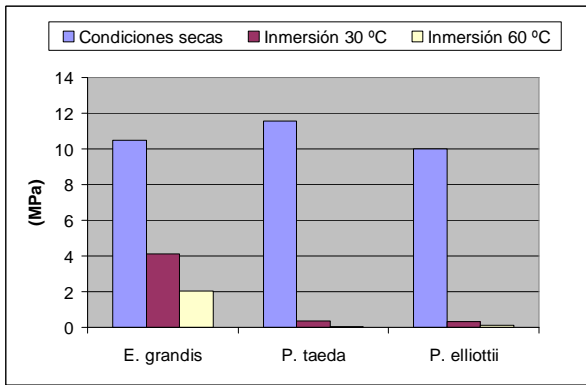


Gráfico N° 1. Resistencia al cizallamiento por compresión según tratamiento para probetas encoladas con PVA 49 % sólidos

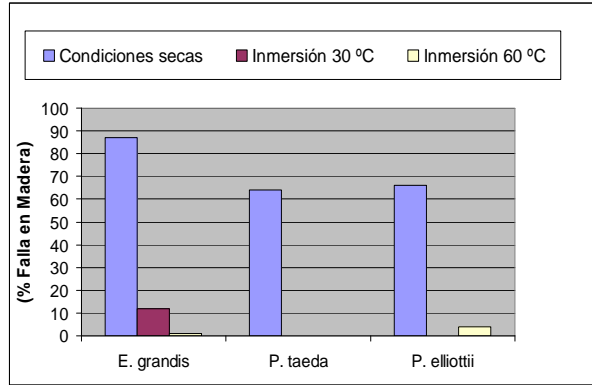


Gráfico N° 2. Falla en madera según tratamiento para probetas encoladas con PVA 49 % de sólidos

Se observa que los valores de resistencia en condiciones secas son similares para las 3 especies estudiadas, pero *Eucalyptus grandis* presenta valores superiores de % de Falla en Madera (87%) comparado con los pinos (64% y 66%).

Como era de esperar luego de los tratamientos en Inmersión en agua a 30° C y 60° C los valores de Resistencia y Falla en Madera disminuyen en todo los casos. Para ambos tipo de Pino luego de los tratamientos los valores están cercanos a cero tanto para la Resistencia como para la Falla en Madera.

Como era de esperar la Retención del Poder Adhesivo es baja para las 3 especies, siendo mínima en las dos especies de pinos donde es menor al 10 % después de los 2 tratamientos. Esto se debe a que el PVA que es adhesivo hidrosoluble es poco resistente a condiciones de alta humedad.

PVA 44 % de Sólidos

En las tablas N° 5 y N° 6 se presentan los resultados de Resistencia al Cizallamiento por compresión, Retención del Poder Adhesivo y % de Falla en Madera para las probetas encoladas con PVA (menor carga de sólidos) según tratamiento.

Para *Eucalyptus grandis*, *Pinus taeda* y *Pinus elliotii*, luego de los tratamientos de inmersión en agua, la resistencia disminuye considerablemente en todas las especies, no registrándose valores de Resistencia para *Pinus taeda* luego de la inmersión a 30° C y para *Pinus elliotii* luego de ambos tratamientos.

El % de Falla en Madera desciende en las 5 especies luego de los tratamientos registrándose valores menores al 5 % de falla en todas ellas.

Tabla N° 5. Resistencia al cizallamiento por compresión, Retención del Poder Adhesivo para cada especie y tratamiento utilizando probetas encoladas con PVA B (44 % sólidos).

Tratamiento	Resistencia al cizallamiento por compresión (MPa) y Retención Poder Adhesivo (%)									
	<i>Eucalyptus grandis</i>		<i>Cedrela spp</i> (Cedro).		<i>Tabebuia ipe</i> (Lapacho)		<i>Pinus taeda</i>		<i>Pinus elliottii</i>	
	MPa	H/S (%)	MPa	H/S (%)	MPa	H/S (%)	MPa	H/S (%)	MPa	H/S (%)
Tratamiento 1. Condiciones secas	9,6	----	9,2	----	8,2	----	11,3	----	8,7	----
Tratamiento 2. Inmersión agua 30° C.	3,7	39	2,1	23	0,6	7	0,4	4	0,1	1
Tratamiento 3. Inmersión en agua 60° C.	1,0	10	0,9	10	0,2	2	0,0	0	0	0

Tabla N° 6 Falla en Madera para cada especie y tratamiento utilizando probetas encoladas con PVA B (44 % sólidos).

Tratamiento	Falla en Madera (%)				
	<i>Eucalyptus grandis</i>	<i>Cedrela spp</i> (Cedro).	<i>Tabebuia ipe</i> (Lapacho)	<i>Pinus taeda</i>	<i>Pinus elliottii</i>
Tratamiento 1. Condiciones secas	78	82	29	47	42
Tratamiento 2. Inmersión agua 30° C.	4	4	4	0	1
Tratamiento 3. Inmersión en agua 60° C.	4	5	3	0	0

Los datos de las tablas N° 5 y N° 6 se representan gráficamente en los gráficos N° 3 y N° 4.

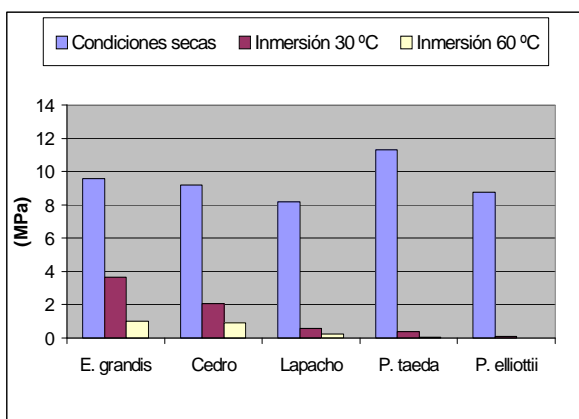


Gráfico N° 3. Resistencia al cizallamiento por compresión según tratamiento para probetas encoladas con PVA 44 % sólidos

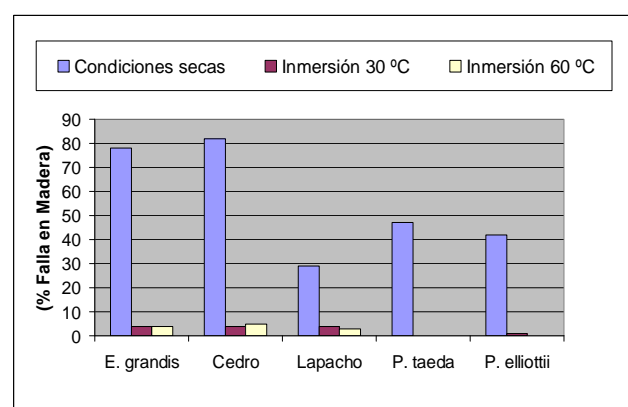


Gráfico N° 4. Falla en madera según tratamiento para probetas encoladas con PVA 44 % de sólidos

Si comparamos los resultados en condiciones secas observamos que *Pinus taeda* presenta los valores más altos de resistencia con 11,3 MPa y que las demás especies presentan valores dentro de un rango de 8 a 10 MPa.

La diferencia mayor la observamos en el % de Falla en Madera donde *Eucalyptus grandis* y Cedro presentan valores cercanos al 80 % comparado con las otras 3 especies que no superan el 50 % de falla.

En relación a la Retención del Poder Adhesivo hay un comportamiento similar que con el PVA de mayor carga de sólidos. Esto es debido a que al absorber la madera y el adhesivo humedad del ambiente lo que ocurre es que se cambian las características de la unión encolada y por lo tanto cuanto más severo es el tratamiento menor es la retención del poder adhesivo.

Esto se debe a que una de las principales causas de desencolado de adhesivos de Acetato de Polivinilo (PVA) es un ambiente excesivamente húmedo y la falta de resistencia al agua o a la humedad del adhesivo.

Comparando las probetas encoladas con ambos tipos de PVA y ensayadas en condiciones secas se observa que a mayor carga de sólidos los valores de resistencia al cizallamiento y % de falla en madera son mayores.

Esto es más notorio en el % de falla que en la resistencia y además es más notoria la diferencia para las probetas de los dos tipos de pino donde las encoladas con el PVA de mayor carga de sólidos tiene un valor de falla en madera promedio de 65 % y las encoladas con el PVA de menor carga de sólidos de 45 %. Esto se puede ver observando las tablas N° 3, N° 4, N° 5 y N° 6 conjuntamente.

ISOCIANATO

En los siguientes dos gráficos y en las tablas N° 7 y N° 8 se observan los resultados de la Resistencia al Cizallamiento por compresión, Retención del Poder Adhesivo y el % de Falla en Madera para las distintas especies y tratamientos utilizando probetas encoladas con Isocianato.

Se observa claramente que las probetas de Lapacho presenta los valores mayores de Resistencia salvo para el tratamiento de Inmersión en agua a 100° C, aunque es la especie que presenta valores de Falla en Madera más bajos luego de todos los tratamientos. Los altos valores de Resistencia están dados por la alta densidad que presenta el Lapacho y no por una unión encolada resistente explicándose por el bajo % de Falla en Madera. El bajo % de Falla en Madera se puede explicar ya que especies más densas existe menor volumen de espacio libre que permite la entrada del adhesivo no facilitando una buena adhesión mecánica.

Tabla N° 7. Resistencia al cizallamiento por compresión, Retención del Poder Adhesivo y para cada especie y tratamiento utilizando probetas encoladas con Isocianato.

Tratamiento	Resistencia al cizallamiento por compresión (MPa) y Retención Poder Adhesivo (%)									
	<i>Eucalyptus grandis</i>		<i>Cedrela spp</i> (Cedro).		<i>Tabebuia ipe</i> (Lapacho)		<i>Pinus taeda</i>		<i>Pinus elliottii</i>	
	MPa	H/S (%)	MPa	H/S (%)	MPa	H/S (%)	MPa	H/S (%)	MPa	H/S (%)
Tratamiento 1. Condiciones secas	10,1	----	12,1	----	17,9	----	12,1	----	9,5	----
Tratamiento 2. Inmersión agua 30° C.	9,2	91	9,0	74	14,8	83	5,7	47	4,3	45
Tratamiento 3. Inmersión en agua 60° C.	6,9	68	6,0	50	9,8	55	4,9	40	4,1	43
Tratamiento 4. Inmersión en agua 100° C	7,3	72	2,8	23	4,6	26	4,3	36	3,3	35

Tabla N° 8. Falla en Madera para cada especie y tratamiento utilizando probetas encoladas con Isocianato.

Tratamiento	Falla en Madera (%)				
	<i>Eucalyptus grandis</i>	<i>Cedrela spp</i> (Cedro).	<i>Tabebuia ipe</i> (Lapacho)	<i>Pinus taeda</i>	<i>Pinus elliottii</i>
Tratamiento 1. Condiciones secas	85	89	46	76	78
Tratamiento 2. Inmersión agua 30° C.	85	59	26	76	43
Tratamiento 3. Inmersión en agua 60° C.	85	53	32	74	55
Tratamiento 4. Inmersión en agua 100° C	74	17	13	49	25

Los datos de las tablas N° 7 y N° 8 se representan gráficamente en los gráficos N° 5 y N° 6.

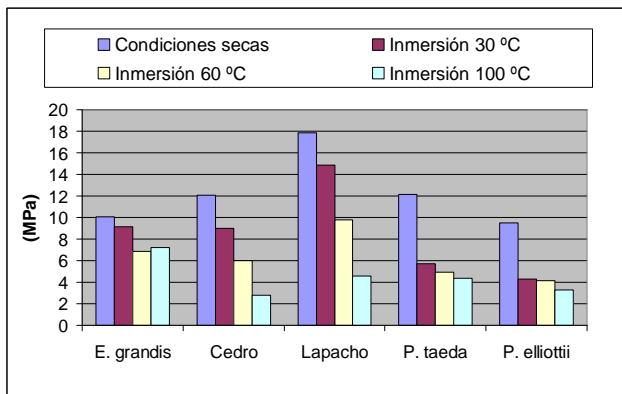


Gráfico N° 5. Resistencia al cizallamiento por compresión según tratamiento para probetas encoladas con Isocianato

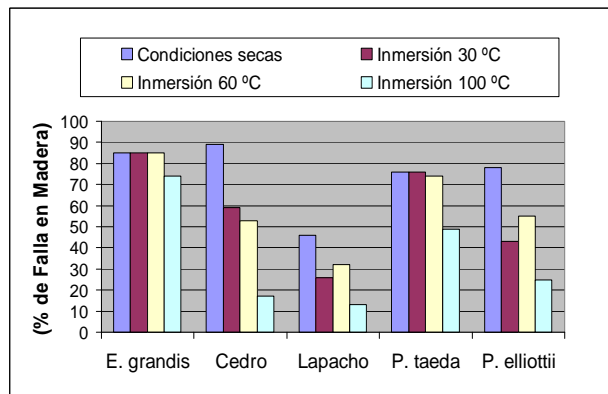


Gráfico N° 6. Falla en madera según tratamiento para probetas encoladas con Isocianato

Si comparamos a las otras cuatro especies dejando de lado al Lapacho, luego de ensayar en condiciones secas las probetas de Cedro presentan los valores más altos de resistencia y % de falla, 12,1 MPa y 89%.

Eucalyptus grandis es la especie que presenta los mayores resultados de Falla en Madera luego de los tratamientos de Inmersión en agua. Mantiene el mismo valor de 85 % de falla luego de las Inmersiones en agua a 30° C y 60° C para descender a un valor de 74 % luego del tratamiento de Inmersión a 100° C. La Retención del Poder Adhesivo es la más alta de todas las especies estudiadas luego de los tratamientos.

Esto habla de una especie que presenta una buena unión encolada ya que tiene alta resistencia tanto en seco como en condiciones húmedas, tiene un % de Falla en Madera alto en todos los casos lo que indica una buena penetración del adhesivo para formar una unión fuerte.

CONCLUSIONES

1. Utilizando PVA como adhesivo en condiciones secas; a mayor carga de sólidos mayor es la Resistencia al Cizallamiento y mayor es el % de Falla en Madera. Esto queda bien marcado en las dos especies de Pino (Tablas N° 3, 4, 5 y 6 y gráficos N° 1 al N° 4).
2. PVA no es un adhesivo para ser utilizado en ambientes de alta humedad ya que luego de los tratamientos de Inmersión en agua los valores obtenidos de Resistencia y % de Falla muestran que la unión fue debilitada con respecto al ensayo en condiciones secas.
3. Las dos especies que presentan mejor adhesividad para interiores usando PVA como adhesivo son *E. grandis* y Cedro, ya que si bien no difieren tanto en los valores de resistencia con respecto a los pinos presentan un mejor resultado en el % de Falla en Madera lo que significa una mejor unión encolada (tablas N° 5 y 6).
4. Utilizando Isocianato como adhesivo, en general después de ensayar probetas expuestas a los diferentes tratamientos se observa que a medida que aumenta la rigurosidad de las condiciones del tratamiento la unión encolada se ve debilitada y la Resistencia al Cizallamiento disminuye como también disminuye el % de Falla en Madera para todas las especies estudiadas.
5. También las dos especies que presentan mejor adhesividad utilizando Isocianato como adhesivo en condiciones secas son *E. grandis* y Cedro ya que presentan los valores más altos de Resistencia y Falla en Madera.
6. En condiciones húmedas la mejor especie es *Eucalyptus grandis* ya que las probetas encoladas con Isocianato presenta los valores de Retención del poder adhesivo más altos luego de realizar los tratamientos de Inmersión y además es la que disminuye menos el % de Falla en Madera en comparación con las otras especies. Se puede concluir que es la mejor unión ya que se degrada menos frente al ataque del agua.
7. Las probetas de *Pinus taeda* presentan mayor proporción de madera de leño tardío respecto al leño temprano lo que hace que su densidad sea más alta. Por ende presenta valores de Resistencia al Cizallamiento más altos que lo esperado. Esto se debe a la resistencia de la madera; como en el caso del Lapacho; y no por la resistencia de la unión encolada ya que presenta valores bajos de % de Falla en Madera para dichos valores de resistencia.

REFERENCIAS

- ✓ ASTM D 5751-99. Adhesives Used for Laminate Joints in Nonstructural Lumber Products
- ✓ Benites Maciel, L. 2003: Informe de Investigación N° 12. Adhesividad de Maderas Nacionales. Proyecto de Tecnología de Ensayo de Productos Forestales, LATU-JICA (1998-2003)
- ✓ Pérez del Castillo, A; Benites Maciel, L.2002: Informe de Investigación N° 10. Propiedades Mecánicas y Resistencia de Uniones Encoladas de Vigas Laminadas. Proyecto de Tecnología de Ensayo de Productos Forestales, LATU-JICA (1998-2003)
- ✓ EN 205:1991. Métodos de ensayo para Adhesivos para la madera de uso no estructural.
- ✓ JIS K 6852-1994. Testing methods for shear strength of adhesive bonds by compression loading
- ✓ Quagliotti Estradé, S. 2007: Nota Técnica N° 9. Evaluación de la Resistencia a la Adhesión y el Porcentaje de Falla en Madera en *Eucalyptus grandis*, *Pinus taeda*, *Pinus elliottii*, *Cedrela spp* y *Tabebuia ipe*.