

VALORACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DE CONSOLIDACIÓN DE MADERA DETERIORADA COMPARANDO LOS VALORES DE MÓDULO DE ELASTICIDAD ANTES Y DESPUÉS DE LOS TRATAMIENTOS.

Julio Enrique Benítez Telles; Oliver-Villanueva, Jose Vicente¹; Ibiza-Palacios María de Sales¹; Martínez-Ruiz Guillermo¹; Grafiá Jose Vicente² y Vivancos María Victoria²

Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio de la Universidad Politécnica de Valencia.

¹ Taller de Escultura

² Taller de Pintura de Caballete

³ Dpto. de Tecnología y Biotecnología de la Madera. AIDIMA - Instituto Tecnológico del Mueble, Madera, Embalaje y Afines. Paterna.

AUTOR DE CONTACTO: Julio Enrique Benítez Telles, j_benitez_telles@hotmail.com

RESUMEN: Esta investigación se planteó con el objetivo de mensurar el incremento de la resistencia a la flexión (MOE) en maderas deterioradas sometidas a consolidación con dos resinas termoplásticas: poli metil metacrilato (MMA) y polivinil butiral (PVB).

Ambas resinas se aplicaron por inmersión a dos presiones diferentes 0,5atm y 1,0atm. Para aplicar las resinas a 0,5atm se empleó una cámara experimental de vacío. Todos los procesos se realizaron bajo temperatura y humedad relativa constantes.

Las probetas empleadas corresponden a una única especie de madera (aliso) y presentaban diferente grado de infestación por organismos xilófagos. Los grados de infestación se agruparon previamente de forma natural en tres grupos correspondiente a niveles de infestación leve, medio o severo. El equipo empleado se basa en medir la frecuencia con que vibra libremente un objeto, frecuencia Eigen; esta técnica está clasificada como no destructiva.

Partiendo de los valores de frecuencia, es factible obtener el módulo de elasticidad dinámico (MOEdin) de las probetas tratadas.

Los MOEdin de las probetas tratadas con MMA o PVB, no muestran diferencias importantes o significativas. Sin embargo, se evidenció cierta tendencia a que los valores de MOEdin de probetas tratadas con PVB sean mayores a aquellos de probetas tratadas con MMA.

Todo el grupo de probetas tratadas presentó valores de MOEdin mayores a las probetas testigo, sin embargo esta diferencia no es estadísticamente significativa. Concluyéndose que si bien hay un incremento en el módulo de elasticidad (y en consecuencia en la resistencia de las maderas) este no difiere estadísticamente de las probetas sin consolidar.

PALABRAS CLAVE: valoración, comparación, MOE, MOE dinámico, madera deteriorada, resinas termoplásticas, MMA, PVB,

1.- INTRODUCCIÓN.

La intención de consolidar madera deteriorada parte del supuesto de que con este tratamiento la resistencia de la madera tratada mejora. Varios estudios y reportes de intervención señalan que existe mejora. Sin embargo, esta mejora no es importante o significativa con resinas termoplásticas. La ausencia de una metodología adecuada que relacione variables mensurables que posibilite establecer de forma objetiva el resultado o mejora real obtenida después de un tratamiento de consolidación motivó el desarrollo de esta investigación.

Con estos antecedentes, se planteó esta investigación con el objetivo de establecer la efectividad de la aplicación de productos consolidativos en madera deteriorada; partiendo de la hipótesis de que Los productos consolidativos aplicados en madera deteriorada ofrecen similar efectividad.

2.- MATERIALES Y MÉTODOS.

2.1.- Materiales.

2.1.1.- Probetas de madera.

Las probetas se obtuvieron a partir de una única pieza de madera identificada como aliso, *Alnus spp* (Ibiza, S. 2008); muy

probablemente *Alnus jorulensis* (Tobar, G. 2008; Carreras, R. 2007) que formó parte de un antiguo par de cubierta del artesonado de la Iglesia de San Francisco de Quito, Ecuador, instalada entre 1755 y 1756 (Guerra, P. 2004)

2.1.2.- Resinas termoplásticas.

En esta investigación se emplearon dos polímeros orgánicos sintéticos termoplásticos sugeridos como apropiados para la consolidación de objetos culturales confeccionados con madera (Schniewind, 1995; Wang, Y. 1985). Los solventes empleados corresponden a aquellos indicados por las casas productoras.

- (Poli) metil metacrilato - MMA. Paraloid B72 de la casa Rhom & Hass, disuelta en acetona. Y.

- Polivinil butiral - PVB. Butvar B98 de la casa Monsanto, disuelta en solución etanol / tolueno (40/60).

2.2.- Métodos.

2.2.1.- Acondicionamiento de las probetas.

Las probetas fueron previamente preparadas y estabilizadas para estudios en laboratorio según las normas:

ASTM D 4933-91 Standard Guide for Moisture Conditioning of Wood and Wood-Based Materials; y UNE 56-528-78 Características físico-mecánicas de la madera; Preparación de probetas para ensayos.

2.2.2.- Selección de las probetas.

Las probetas se escogieron según la norma ASTM D 5536-94 (Standard Practice for Sampling Forest Trees for Determination of Clear Wood Properties) aquellas probetas que no presentaron fisuras, grietas, nudos u otro defecto se consideraron adecuadas para los ensayos. Es necesario indicar que el deterioro causado por los insectos no fue tomado en cuenta para la selección por la misma naturaleza de la investigación.

Se tomaron 48 probetas como válidas para los ensayos; 45 de las cuales estaban destinadas a los ensayos y las 3 restantes como reemplazo en caso de fallo.

2.2.3.- Variables mensuradas para el estudio.

Las variables consideradas fueron: densidad, frecuencia de vibración y MOEdin.

- Densidad: valor obtenido de la relación Masa (m) / Volumen (V): el valor de masa se determinó por gravimetría con una balanza electrónica de precisión (0,01g) AND FX-2000 según lo indica la norma ASTM D2395 (Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials) (60,2%). Los valores de volumen se establecieron por estereometría con nonio de precisión (0,01mm) como lo indica la norma ASTM D2395 (60,3%)

- Frecuencia de vibración: valor obtenido con equipo Grindosonic MK-5, precisión de 0,01Hz conforme la norma ASTM E1876-07.

- MOEdin: se calculó con programa informático Winemod versión 2.0; la importación de datos desde el equipo Grindosonic MK-5 se efectuó con el programa informático Gsdata.

2.2.4.- Preparación de las resinas empleadas.

Ambas resinas fueron disueltas en los solventes recomendados por las respectivas Casas productoras e indicadas en la bibliografía revisada.

Metil metacrilato al 20,00% en acetona.

Polivinil butiral al 16,75% en una solución de etanol (96°) y tolueno, en proporción 40:60.

La concentración o porcentaje de la resina frente a su respectivo solvente se determinó en función de las referencias bibliográficas y de pruebas efectuadas en esta misma investigación.

2.2.5.- Diseño experimental.

Para esta investigación se trabajó con cuatro factores: dos resinas (MMA y PVB) y dos presiones diferentes (0,5 y 1,0atm), conforme el Cuadro 2.2.5.a.

Factores en estudio	
Resina 1 (MMA)	R1
Resina 2 (PVB)	R2
Presión 1 (0,5atm)	P1
Presión 2 (1,0atm)	P2

La interacción de estos cuatro factores conformó los bloques del estudio (cuatro). Se conformó un quinto bloque como grupo testigo, las probetas de este bloque no recibieron tratamiento alguno. Cuadro 2.2.5.b.

Tratamientos	Factores que interactúan.
T1	R1P1
T2	R1P2
T3	R2P1
T4	R2P2
T5	(Testigos)

Cada bloque se dividió en tres grupos correspondiente a los niveles leve, medio o severo de deterioro y a cada grupo se asignó tres probetas. Este diseño corresponde a bloques seleccionados.

2.2.6.- Recolección de datos.

Los datos tomados con equipo no destructivo presentaban una alta variación y al no tener un referente se vio que al realizar 14 mediciones se tenía una media más o menos estable. Se trabajó con la media de las medidas tomadas luego de eliminar los extremos aplicando 63s.

2.2.7.- Análisis estadístico.

Para evaluar las diferentes variables en estudio y conformar o negar la hipótesis de trabajo, se realizó el Análisis de la varianza con pruebas de Tukey al 5%.

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1.-Frecuencia.

Efectuado el Análisis de Varianza para la variable frecuencia se determinó que existe variación estadística entre: los tratamientos; entre estados de deterioro; y, para tratamientos entro del estado leve de deterioro (G1).

No se observa significación para las interacciones de resinas vs presión. El coeficiente de variación para esta variable fue de 10,53 % y la media fue de 779,913Hz.

ANALISIS DE VARIANZA PARA LA VARIABLE FRECUENCIA (Hz) DESPUÉS DE APLICADOS LOS TRATAMIENTOS

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F
--------	--------------------	-------------------	------------------	---------

Total	44	869515,99		
Repeticiones	2	123172,47	61586,235	9,130 **
Tratamientos	14	557568,83	39826,345	5,910 **
Entre grupos	2	90469,53	45234,764	19,060 **
Dentro G1	4	59305,57	14826,392	6,930 *
Resinas (R)	1	579,186	579,186	0,351 ns
Presiones (P)	1	25348,972	25348,972	15,369 **
R x P	1	7252,672	7252,672	4,397 ns
T vs resto	1	26124,74	26124,74	3,874 ns
Dentro G2	4	8685,340	2171,335	0,620 ns
Resinas (R)	1	6,035	6,035	0,002 ns

Presiones (P)	1	15,300	15,300	0,005 ns
R x P	1	7782,108	7782,108	2,689 ns
T vs resto	1	881,897	881,897	0,130 ns
Dentro G3	4	37230,190	9307,547	0,780 ns
Resinas (R)	1	33905,437	33905,437	2,975 ns
Presiones (P)	1	700,434	700,434	0,061 ns
R x P	1	1127,915	1127,915	0,099 ns
T vs resto	1	1496,404	1496,404	0,221 ns
Error	28	188774,69	6741,953	

Media = 779,913 (Hz)

Coefficiente de variación = 10,53 %

** = altamente significativo

* = significativo

ns = no significativo

La prueba de Tukey al 5 % determinó cinco rangos de significación estadística observándose que el testigo del estado de deterioro leve se encuentra en el primer rango debido a el orden general de los tratamientos indica que las probetas del primer grupo (G1) vibraron con mayor frecuencia, seguido por el grupo dos y finalmente el tercer grupo.

PRUEBA DE TUKEY AL 5 % PARA TRATAMIENTOS EN LA VARIABLE FRECUENCIA

Nº	Símbolo	Media	Rango
5	TG1	976,8	a
2	G1R1P2	950,0	ab
4	G1R2P2	886,9	abc
3	G1R2P1	844,1	abcd
9	G2R2P2	828,0	abcde
6	G2R1P1	824,4	abcde
1	G1R1P1	808,9	abcde
10	TG2	781,6	abcde
7	G2R1P2	775,7	abcde
8	G2R2P1	774,9	abcde
14	G3R2P2	715,0	bcde
13	G3R2P1	680,3	cde
15	TG3	669,5	cde
11	G3R1P1	593,4	de
12	G3R1P2	589,3	e

Aplicada la prueba de Tukey al 5 % para esta variable se observa que el estado de deterioro leve presenta una frecuencia mayor debido a que las probetas presentan mayor cantidad de materia que permite mayor continuidad de las ondas. Por el

contrario, las probetas con mayor nivel de deterioro al tener menor cantidad de materia las ondas se propagan con mayor dificultad bajando la frecuencia de oscilación.

PRUEBA DE TUKEY AL 5 % PARA GRUPOS EN LA VARIABLE FRECUENCIA DESPUÉS DE APLICADOS LOS TRATAMIENTOS

Grupo		Media	Rango
G1	L	893,32	a
G2	M	796,91	b
G3	S	649,51	c

Se analizó únicamente este grupo por ser significativos en el análisis de la varianza realizado. Los tratamientos aplicados para el estado leve de deterioro (G1) presentan menor valor en cuanto a la frecuencia con relación al testigo que se ubicó en el primer rango de significación debido probablemente a algún error en el momento de toma de medida.

PRUEBA DE TUKEY AL 5% PARA TRATAMIENTOS DENTRO DEL GRUPO UNO EN LA VARIABLE FRECUENCIA

Grupo	Símbolo	Media	Rango
5	TG1	976,8	a
2	R2P1	950,0	ab
4	R2P2	886,9	abc
3	R2P1	844,1	bc
1	R1P1	808,9	c

Comparados los promedios de las frecuencias según las presiones aplicadas al estado leve de deterioro (G1) se establece que la aplicación de 1 atm de presión fue mejor ya que tuvo una mayor frecuencia que con 0,5 atm de presión. Probablemente esta presión o el tiempo en que se mantuvo esta presión no fueron suficientes para determinar un mayor incremento de solución consolidativa.

PRUEBA DE DIFERENCIA MÍNIMA SIGNIFICATIVA AL 5 % PARA PRESIONES EN LA VARIABLE FRECUENCIA DESPUÉS DE APLICADOS LOS TRATAMIENTOS

Grupo	Media (Hz)	Rango
P2	918,42	a
P1	826,50	b

3.2.- Módulo de elasticidad dinámico (MOE din).

Con los datos obtenidos en el experimento se realizó el Análisis de Varianza para la variable MOE din, con este se determinó

que: existe variación estadística para tratamientos; entre estados de deterioro; y, dentro del grupo uno presiones y la interacción resinas por presiones. El coeficiente de variación para esta variable fue de 15,43 % y la media fue de 4946,640 MPa.

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA VARIABLE MOE din DESPUÉS DE APLICADOS LOS TRATAMIENTOS

Fuente de	Grados de	Suma de	Cuadros de	Valor de
			medios	F

Total	44	125287617,69		
Repeticiones	2	20514319,68	10257159,839	17,61 **
Tratamientos	14	88461142,22	6318653,016	10,850 **
Entre grupos	2	15156352,25	7578176,126	88,990 **
Dentro G1	4	4818705,210	1204676,302	6,870 *
Resinas (R)	1	197464,932	197464,932	0,846 ns
Presiones (P)	1	2229438,425	2229438,425	9,553 *
R x P	1	2362894,214	2362894,214	10,125 *
T vs resto	1	28907,639	28907,639	0,049 ns
Dentro G2	4	2658691,240	664672,810	3,060 ns
Resinas (R)	1	206449,673	206449,673	1,434 ns
Presiones (P)	1	219921,711	219921,711	1,528 ns
R x P	1	48520,665	48520,665	0,337 ns
T vs resto	1	2183799,191	2183799,191	3,748 ns
Dentro G3	4	5201976,840	1300494,211	0,910 ns
Resinas (R)	1	4751122,635	4751122,635	3,496 ns
Presiones (P)	1	22932,107	22932,107	0,016 ns
R x P	1	65190,486	65190,486	0,048 ns
T vs resto	1	362731,612	362731,612	0,622 ns
Error	28	16312155,80	582576,993	

Media = 4946,640 MPa
 Coeficiente de variación = 15,43 %
 ** = altamente significativo
 * = significativo
 ns = no significativo

Mediante la prueba de Tukey al 5 % para la variable MOE din se pudo determinar la existencia de seis rangos de significación, en el primer rango se ubicó el tratamiento G1R1P2 con el mayor valor de 7541,746 MPa; en tanto que en el último rango se ubicó el tratamiento G3R1P2 con un valor promedio de 2669,819 MPa.

PRUEBA DE TUKEY AL 5 % PARA TRATAMIENTOS EN LA VARIABLE MOE din DESPUÉS DE APLICADOS LOS TRATAMIENTOS

Nº	Símbolo	Media	Rango
2	G1R1T2	7541,756	a
5	TG1	6428,956	ab
3	G1R2P1	6423,140	ab
4	G1R2P2	6397,713	abc
1	G1R1P1	5792,211	abcd
6	G2R1P1	5505,356	abcd
8	G2R2P1	5115,852	bcde
7	G2R1P2	5107,428	bcde
9	G2R2P2	4972,274	bcdef
10	TG2	4221,332	bcdef
14	G3R2P2	4075,685	cdef
13	G3R2P1	4015,703	def
15	TG3	3027,702	ef
11	G3R1P1	2904,660	ef
12	G3R1P2	2669,819	f

Aplicada la prueba de Tukey para esta variable luego de aplicados los tratamientos se observa que cada uno de los tres grupos

ocupan cada uno un rango diferente demostrando que son significativamente diferentes. El estado de deterioro leve tiene un mayor valor de MOE din con un promedio de 6516,7558 (MPa), y el menor valor fue para el estado severo de deterioro con un promedio de 3338,7143 MPa.

PRUEBA DE TUKEY AL 5% PARA GRUPO EN LA VARIABLE MOE DIN DESPUÉS DE APLICADOS LOS TRATAMIENTOS

Grupo		Media	Rango
G1	L	6516,7558	a
G2	M	4984,4487	b
G3	S	3338,7143	c

Realizada la prueba de Tukey al 5 % se observan dos rangos de significación, en el primero se ubicó el tratamiento R2P1 (PVB a 0,5atm) con un valor de 7541,756 MPa mientras que en el último lugar se encuentra el tratamiento R1P1 (MMA a 0,5) con un promedio de 5792,211 MPa debido probablemente a que esta resina (y el porcentaje de aplicación) deje mayor cantidad de sólidos al interior de las probetas, y por lo tanto otorgando mayor continuidad a la probeta, permitiendo mejor propagación de las ondas en consecuencia mayor frecuencia y mayor MOE din.

PRUEBA DE TUKEY AL 5 % PARA TRATAMIENTOS DENTRO DEL GRUPO UNO EN LA VARIABLE MOE din

Tratamientos

Nº	Símbolo	Media	Rango
2	R2P1	7541,756	a
5	TG1	6428,956	ab
3	R2P1	6423,140	ab
4	R2P2	6397,713	ab
1	R1P1	5792,211	b

La prueba de Diferencia Mínima Significativa al 5% presenta en el primer rango a la aplicación de 1 atm de presión en tanto que en segundo rango se ubicó la aplicación de 0,5 atm de presión con un valor de 6107,6757 MPa.

PRUEBA DE DIFERENCIA MÍNIMA SIGNIFICATIVA AL 5 % PARA PRESIONES DENTRO DEL GRUPO UNO EN LA VARIABLE MOE din DESPUÉS DE APLICADOS LOS TRATAMIENTOS

Presiones		Media	Rango
P2		6969,7353	a
P1		6107,6757	b

Aplicada la prueba de Tukey al 5 % se observa en primer rango al tratamiento R1P2 (MMA a 1,0atm) con un valor promedio de 7541,756 MPa mientras que en el último lugar podemos observar al tratamiento R1P1 (MMA a 0,5atm) con un promedio de 5792,211 MPa.

PRUEBA DE TUKEY AL 5 % PARA LA INTERACCIÓN RESINA POR PRESIÓN DENTRO DEL GRUPO UNO EN LA VARIABLE MOE din

Tratamientos

Nº	Símbolo	Media	Rango
2	R1P2	7541,756	a
3	R2P1	6423,140	ab
4	R2P2	6397,713	ab
1	R1P1	5792,211	b

4.- CONCLUSIONES.

Con los datos obtenidos en el experimento se determinó que no existe diferencias significativas en los tratamientos realizados. Es decir, ambas resinas otorgan un nivel muy similar de mejora. La comparación con el grupo de testigos indica que la mejora obtenida luego de los tratamientos no es significativa, por lo tanto no sería necesaria la consolidación de las probetas en las condiciones del experimento.

Luego de la consolidación las probetas aumentaron de peso, los mayores incrementos se registraron con MMA, este resultado es importante porque si ambas resinas otorgan mejoras similares, MMA aporta mayor peso que PVB.

BIBLIOGRAFÍA.

Carreras, R. (2007): Personal Communication.

Guerra, P. (2004) Investigación histórica, in Estudios para la Restauración y Consolidación del artesanado, cubiertas, y cúpulas de la Iglesia de San Francisco, trabajo no publicado.

Ibiza, S. (2008) Dpto. de Tecnología y Biotecnología de la Madera. AIDIMA - Instituto Tecnológico del Mueble, Madera, Embalaje y Afines. Paterna. Personal Communication

Schniewind, (1995): "Consolidation of Wooden Panels" in The Structural Conservation of Panel Paintings; Dardes Katheleen, Rothe Andrea (Eds.) Proceedings of a Symposium at the J. Paul Getty Museum, pp. 87-103.

Tobar, G. (2008) Personal Communication.

Wang, Y.; Schniewind, A. (1985), "Consolidation of Deteriorated Wood with Soluble Resins", in *Journal of the American Institute for Conservation*, Vol. 24, N°.2. (Spring, 1985), pp. 77-91.

ASTM D 4933-91; Standard Guide for Moisture Conditioning of Wood and Wood-Based Materials.

ASTM D 5536-94; Standard Practice for Sampling Forest Trees for Determination of Clear Wood Properties.

ASTM D2395; Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials

UNE 56-528-78 Características físico-mecánicas de la madera; Preparación de probetas para ensayos.

English version

TITLE: *Valuation of the Treatments of Consolidation of Wood Deterioration Comparing the Values of the Elasticity Amounts Before and After the Treatment.*

ABSTRACT: *This study aims to measure the increase of the resistance of the flexion (MOE) in deteriorated wood subjected to consolidation with two thermoplastic resins: poly methyl methacrylate (MMA) and polyvinylbutyral (PVB).*

Both resins are applied for the immersion of two different pressures 0, 5 atm and 1, 0 atm. In order to apply the resins to 0, 5 atm a vacuum experimental camera is used. All the processes are established at relative constant temperature and humidity.

The beakers used correspond to a unique type of wood (alder) and represent a different grade of infestation from woodworm. The grades of infestation are previously grouped in a natural way with three groups referring to the level of infestation: light, medium and severe.

The working equipment is based on the measuring the frequency involving a freely vibrating object - the frequency Eigen. This technique is classified as not being destructive.

Starting with the frequency values, it is feasible to obtain the module of dynamic elasticity (MOE din) from the treated beakers.

The MOE din from the treated beakers with MMA or PVB do not show considerable nor important differences. However, a certain tendency is noticed that the MOE din values from the beakers treated with PVB tend to be higher than those treated with MMA.

The whole group of treated beakers showed higher MOE din values than the other beakers, but the difference noted is not statistically significant.

To sum up, even if there is an increase in the amount of elasticity (and as a consequence in the resistance of the wood), this does not differ statistically to the beakers that have not been consolidated.

KEYWORDS: *valuation, comparison, MOE, MOE dinamic, wood deterioration, MMA, PVB*