

INCREMENTO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA Y VIDA MEDIA DE CULMOS DE GUADUA ANGUSTIFOLIA MEDIANTE SU INFILTRACIÓN CON POLIÉSTER

Anavir Padilla ^{1,a*}, Juan Meléndez ^{1,2,b}, Joaquín Lira-Olivares ^{1,3,c}.

¹ Centro de Ingeniería de Superficies, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.

² Departamento de Termodinámica y Fenómenos de Transporte, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.

³ Departamento de Ciencias de los Materiales, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.

* Autor correspondiente.

^a anavirpadilla@gmail.com, ^b jmelendez@usb.ve, ^c joaquinliraolivares@gmail.com

Resumen —

Una de las dificultades para el uso del bambú en la construcción de viviendas es su baja resistencia mecánica, lo cual no permite el uso de éste en estructuras altas o en grandes luces, salvo por adhesión de varios culmos en sucesión.

Igualmente otra dificultad se presenta en la baja resistencia al ataque de hongos y coleópteros que disminuyen la vida media de las estructuras.

El propósito de esta investigación fue contribuir a incrementar la resistencia mecánica y la vida media de culmos de bambusa *Guadua Angustifolia*, mediante la infiltración de sus vasos capilares, por medio de presión, de un polímero, mediante una adaptación mecánica que permite un rápido intercambio de muestras y alta penetración.

Se diseñó con este fin, un tope neumático para asegurar la presión del fluido, obligándolo a penetrar los vasos capilares a una velocidad aceptable ($0,42 \pm 0,02$ cm/seg) y luego fácilmente intercambiarlo por otro culmo.

Se ensayaron varios tipos de polímeros y se decidió finalmente realizar el tratamiento con una resina de poliéster, por ser un polímero comercial de bajo costo, termoestable y resistente a la humedad.

En su fase sólida se esperaba que éste aumentara la resistencia mecánica del bambú y, al mismo tiempo, invadiera las porosidades del parénquima cortical, disminuyendo la posibilidad de penetración de los culmos por coleópteros y hongos.

Se comprobó así mismo que la resistencia a la flexión aumentó en 50% y a la compresión en 75%. Pruebas iniciales de resistencia biológica indican una disminución de los ataques producidos por coleópteros.

Palabras clave— *Guadua Angustifolia*, infiltración, resistencia mecánica.

I. INTRODUCCIÓN

El bambú ha sido utilizado en la construcción, por la mayoría de las culturas que lo poseen como planta endémica.

Su utilización se ha extendido en países asiáticos, como por ejemplo, China, Indonesia y Japón que lo utilizan frecuentemente en la construcción de andamios, y en Latinoamérica en países como Colombia, Costa Rica y Brasil, entre otros. Lo han utilizado tanto en el área artesanal como en la construcción de viviendas, puentes y hasta iglesias (Johnson, N., 2015).

La limitación como elemento estructural ha sido su bajo módulo de Young, el cual le permite el pandeo pero no le impide su uso en estructuras muy altas. La solución para mejorar esta característica ha sido la inyección de cemento en su interior, lo cual requiere perforar los tabiques naturales para luego introducir a presión dicho elemento.

La presente investigación se realizó con la finalidad de diseñar, probar, evaluar y proponer un método alternativo para el refuerzo y curado del bambú que se emplea como material de construcción de viviendas rurales, por medio de un proceso de infiltrado de fluidos, siendo ésta, la primera variación con respecto al método tradicional de infiltrado de solución boratada por desplazamiento de savia a presión con el proceso Boucherie.

El fluido utilizado es una formulación de resina de poliéster, glicerol (glicerina comercial) y thinner que aporta al culmo de bambú beneficios adicionales a la inmunización contra las plagas (aportado también por la solución tradicional a base de bórax), atribuyendo mejores condiciones de flexibilidad y resistencia al pandeo, proporcionando un menor peso de material infiltrado que el que se puede obtener con otros materiales para refuerzo mecánico como el cemento.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Selección culmos de bambú experimentales

Se seleccionaron los culmos para la experimentación siguiendo la norma ISO/TR 22157-2. Se identificaron las muestras en función de los ensayos que se ejecutarían para la evaluación de sus propiedades mecánicas, con fines comparativos entre los culmos control y los tratados con la resina de poliéster formulada.

B. Preparación de la resina polimérica

Se practicó el proceso de curado de la resina de poliéster pre acelerada (figura 3.1) luego de agregar el catalizador MEKP a razón de 0,1 ml por cada 5 ml de solución, obteniéndose un sólido con tono rosa, translúcido y rígido,

características propias de la resina de poliéster luego de finalizar el tiempo de curado correspondiente.

C. Formulación de la mezcla diluida para la infiltración

A condiciones de 5ml Resina de Poliéster y número de gotas de catalizador MEKP constante, se varió la concentración de Glicerol como solvente, arrojando tiempos diferentes de curado del polímero, como se muestra en la tabla siguiente.

Tabla I. *Tiempos del proceso de curado de la resina de poliéster disuelta en diferentes concentraciones de glicerol ante una misma cantidad de catalizador empleado (2 gotas).*

	V Glicerol (ml ± 0,5ml)	% Vste/Vsto	% Vste/Vsol	Tiempo de secado (días)
Muestra 1	2.3	0.45	0.31	3.5
Muestra 2	1.8	0.35	0.26	3
Muestra 3	1.3	0.25	0.20	2.5
Muestra 4	0.8	0.15	0.13	2
Muestra 5	0.3	0.05	0.05	1.5

Es apreciable la relación existente entre la velocidad de polimerización del producto y la adición de glicerol, la cual trae como consecuencia del entrecruzamiento del poliéster, según lo reportado por Eyerer, P., (2010). El glicerol aporta a la molécula de poliéster numerosas ramificaciones funcionales, presentando una elevada capacidad para disolver compuestos orgánicos, ofreciendo mejoras en el rendimiento de conversión y selectividad, convirtiéndose en un efectivo medio de reacción, posibilitando la interacción y solubilidad entre los reactivos y catalizadores.

Se utilizó adicionalmente thinner como solvente para evaluar su interacción con la resina de poliéster y las características del producto una vez solidificado, obteniéndose el comportamiento presentado en la tabla II. Se propone esta sustancia como solvente debido a que se busca una consistencia acuosa en la fase líquida del polímero, que permita transportarlo con facilidad a través de los capilares del bambú donde se transporta naturalmente savia en estado acuoso y que optimice los tiempos de curado del polímero. Esta característica no se logra solamente con el uso de glicerol como solvente.

Tabla II. *Productos finales de la variación de las proporciones de thinner y glicerina como mezcla disolvente para la resina.*

	Proporción Glicerol/Thinner para 100% de solvente	Tiempo de secado (días)
Muestra 1	30/70	1
Muestra 2	50/50	7
Muestra 3	70/30	15

D. Preparación del sistema de infiltrado

El prototipo planteado consta de un dispositivo de diseño específico para el proceso, en el que se aprovecha una corriente de aire comprimido que surte a un mecanismo de agarre para el culmo de bambú; dispuesto en una boquilla adaptada al diámetro externo del bambú.

También se utiliza el aire de la fuente para impulsar la mezcla de resina de poliéster líquida catalizada desde un tanque, a través de una tubería de cobre que surte la boquilla e impulsa el fluido polimérico dentro del culmo de bambú a una presión de 40 psi. Una vez que el polímero recorre toda la probeta, sale de ella impulsando consigo la savia que ocupaba los haces vasculares del bambú, tal como puede observarse en la Figura 1.

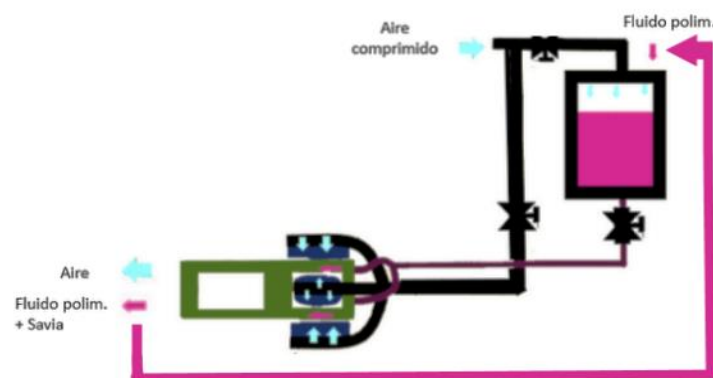


Fig. 1. Segundo prototipo del montaje para optimización del Método Boucherie por presión con desplazamiento de savia.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Análisis del bambú sin infiltrar

Se caracterizó la morfología interna del bambú, a fin de confirmar su capacidad de transferencia de fluidos a través de los haces vasculares que transportan la savia en estado natural por efecto de capilaridad dentro del culmo de bambú *Guadua Angustifolia*. A simple vista, al hacer un corte transversal del culmo, se aprecia una alta densidad de poros (haces vasculares), huecos y aparentemente continuos longitudinalmente dentro del mismo.



Fig. 2. Vista simple del corte transversal de un culmo de bambú. Pueden observarse los vasos capilares dentro de toda su estructura.

Al analizar las muestras para conocer su estructura interna, se obtuvo la siguiente imagen por medio del uso del microscopio electrónico de barrido (MEB).

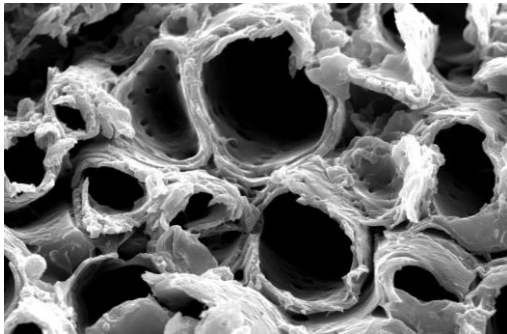


Fig. 3. Microscopía electrónica de barrido (MEB) de la bambusa Guadua Angustifolia. Aumento de x1500.

En las imágenes se aprecia la estructura cilíndrica de los haces vasculares de la Bambusa Guadua Angustifolia, extensos longitudinalmente dentro del culmo, huecos en sus paredes de diámetros variables, paredes irregulares y con presencia de algunos conductos interporo, cualidades que permiten la difusión de fluido (la savia en su estado natural a través de la estructura completa del culmo) y su almacenamiento en el parénquima.

Se realizaron ensayos de fractura por flexión y compresión sobre las probetas de la Bambusa Guadua Angustifolia.

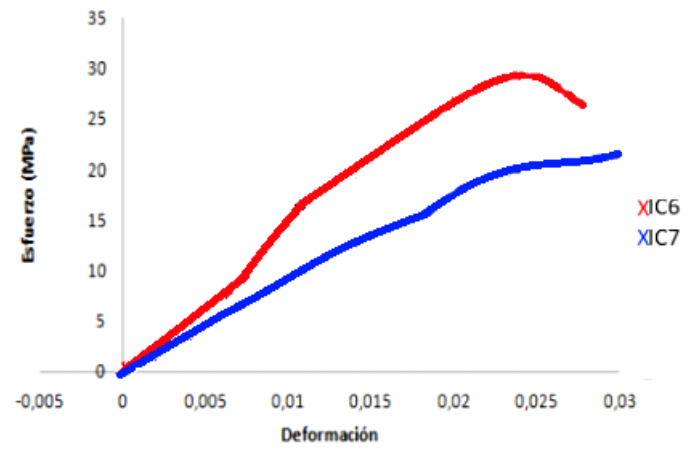


Fig. 4. Gráficas de ensayos de compresión para las probetas sin infiltrar.

Los valores obtenidos son comparables en magnitud a los presentados en el trabajo de González et. al. (2006), obteniendo un rango de valores con un esfuerzo máximo de 29,45 MPa.

Para las probetas estudiadas el rango de esfuerzo de compresión máximo se encuentra entre 17 a 29 MPa.

Tabla III. Datos experimentales de los ensayos mecánicos de compresión y flexión sobre las probetas control.

	Muestra	$\sigma_{\text{máximo}} \pm 0,001$ (MPa)	$E \pm 0,01$ MPa
Compresión	IIC2	19,000	19,87
	IC1	32,190	20,89
	IIC6	29,000	29,12
	IIC7	17,650	85,41
	s (\pm)	7,224	31,333
Flexión	IIF8	2,440	63,83
	IIF10	1,400	48,14
	IIF12	2,470	53,64
	IF6	2,015	96,33
	IF8	1,850	35,31
	IF10	1,400	48,14
	IIF13	1,660	217,06
	IIF14	4,150	65,95
	s (\pm)	0,899	58,817

En cuanto a su comportamiento frente a la humedad y agentes biológicos, se tiene que: transcurridos 30 días después del corte de los culmos de bambú, los culmos sin tratamiento preservante de ningún tipo (sin infiltrar con la solución de resina de poliéster, en su estado natural luego de cortados) son víctima del ataque de hongos, así como de la invasión de insectos que se alimentan de las paredes del bambú, penetrando en su estructura y creando cavidades que se extienden a lo largo de los culmos debilitándolos drásticamente.

B. Análisis de las probetas infiltradas

Se analizó microscópicamente la estructura interna de los culmos, validando su capacidad de transferencia de

fluidos y la presencia del polímero en estado sólido una vez finalizado el proceso de curado.

A simple vista, luego del secado completo del polímero se aprecian zonas oscuras en el corte transversal de las probetas, esta coloración corresponde a los capilares del bambú impregnados de resina de poliéster, en la figura siguiente puede apreciarse este fenómeno.

Se observan áreas más claras de los cortes que tienen una densidad estructural mayor, traducida en ausencia de espacio para el paso de la resina de poliéster a través del culmo.



Fig. 5. Vista del corte transversal de culmos de bambusa *Guadua Angustifolia* infiltrados con el polímero experimental.

Observando en la macrolupa los culmos infiltrados, luego de transcurrido el tiempo de curado del polímero, se obtuvo la Figura 6.

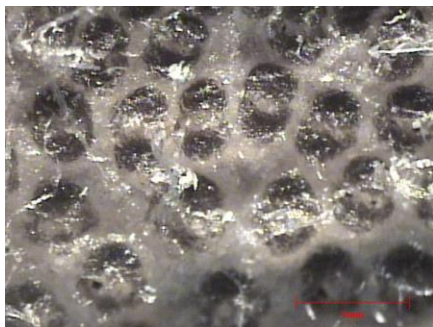


Fig. 6. Vista frontal de los haces vasculares centrales rellenos con resina de poliéster. Aumento de 30x en la macrolupa.

Se aprecia la presencia del polímero en los vasos capilares y sus adyacencias, evidenciando el movimiento de la sustancia polimérica según describe Painter, P. et. al. (1996) implicando un perfil de velocidad, desde el reposo hasta el movimiento remanente luego de que se ha detenido la fuente de presión sobre la sustancia. Esto se evidencia al observarse la salida de resina a través del culmo infiltrado durante algunos segundos luego de que se ha detenido la operación del equipo de infiltrado.

Se tomaron muestras del bambú infiltrado con la solución polimérica preservante luego del tiempo de curado

de la misma y se sometieron a observación vía microscopía electrónica de barrido. Al analizar las muestras para conocer la incorporación del polímero a la estructura interna de la *Guadua Angustifolia*, se obtuvo la siguiente imagen (Fig. 7).

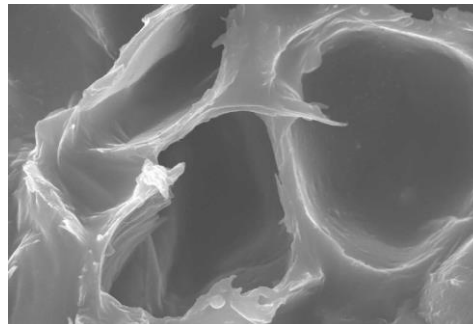


Fig. 7. Microscopia electrónica de barrido (MEB) de la bambusa *Guadua Angustifolia* infiltrado luego del curado de la solución polimérica preservante. Aumento de x1500.

Obsérvese el interior de los vasos y el parénquima entre ellos completamente revestido por polímero.

Es apreciable la integración de la nueva sustancia dentro de la estructura de haces vasculares del bambú, gracias al movimiento de fluidos dentro de la estructura del mismo, el cual depende de la anatomía interna de los culmos, tal como exponen Grosser y Liese (1971), en este caso, el polímero se evidencia mostrándose como opacidad translúcida y aclarando los espacios antes vacíos del material, además, se observan asentamientos de polímero sobre las paredes de algunas fibras capilares. Al realizar el análisis espectroscópico se ha validado la ocupación de la resina de poliéster en los espacios vacíos dentro de los poros del bambú.

La Figura 8 muestra los resultados de los efectos del ensayo de flexión sobre culmos de bambú con y sin tratamiento preservante a base de resina de poliéster, luego de finalizado el efecto de la carga sobre ellos.

Para fines comparativos, la Figura 9 muestra los capilares con y sin tratamiento preservante a base de resina de poliéster.



Fig. 8. Efectos del ensayo de flexión sobre probetas sin (arriba) y con (abajo) tratamiento preservante a base de resina de poliéster.

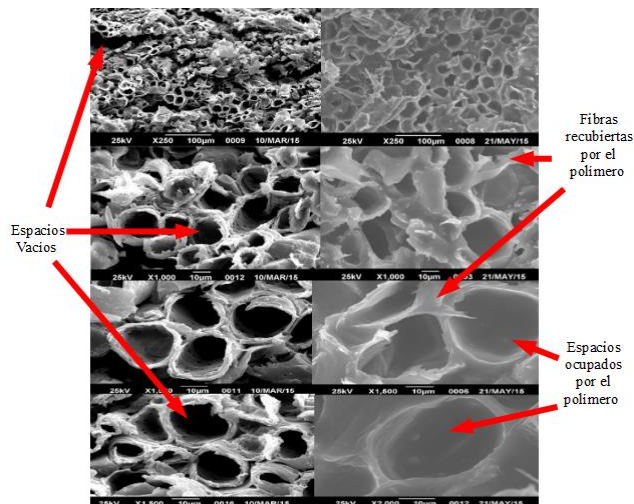


Fig. 9. Comparación gráfica en MEB de los capilares de la bambusa Guadua Angustifolia sin infiltrar (izquierda) y luego de ser infiltrados con la sustancia polimérica y finalizado el tiempo de curado (derecha).

Se realizaron además los ensayos de ruptura por flexión y compresión sobre las probetas de Bambusa Guadua Angustifolia infiltradas, a fin de analizar su resistencia a este tipo de esfuerzo y comparar su desempeño con las probetas control.

Se presenta en la siguiente figura la relación esfuerzo-deformación ante carga de flexión de las probetas ensayadas.

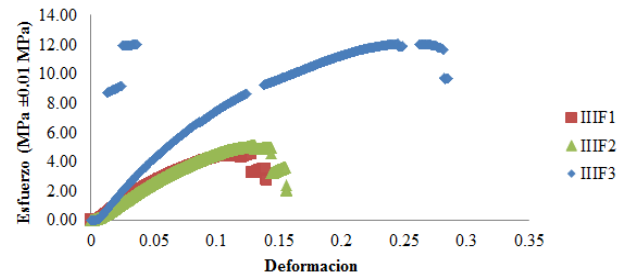


Fig. 10. Curva de esfuerzo-deformación de los ensayos de flexión para las probetas infiltradas con tratamiento preservante a base de resina de poliéster.

Se puede deducir entonces que el esfuerzo máximo obtenido está alrededor de los 5 MPa.

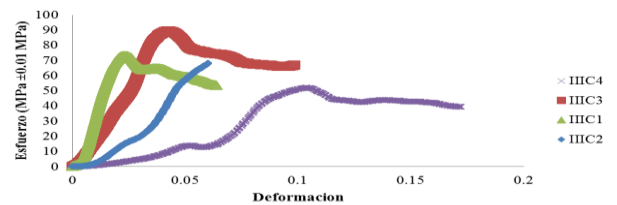


Fig. 11. Curva de esfuerzo-deformación de los ensayos de compresión para las probetas infiltradas.

El esfuerzo máximo de compresión para las probetas infiltradas tratadas con solución preservante polimérica a través del dispositivo de optimización del método Boucherie, se encuentra cercano a los 70 MPa, a diferencia del máximo esfuerzo en las muestras control el cual se encontraba entre el rango de 20 a 40 MPa.

La tabla a continuación reporta los resultados de esfuerzo, módulo de Young y fuerza máxima obtenidos en función de la deformación ocurrida durante los ensayos mecánicos de flexión y compresión en las probetas infiltradas con tratamiento preservante a base de resina de poliéster.

En conclusión, se obtuvo un mejoramiento del desempeño de las probetas ante cargas de flexión y compresión, gracias al aumento de la resistencia en un 50% y 75% respectivamente.

Tabla IV. Datos experimentales de ensayos mecánicos a compresión y flexión sobre probetas infiltradas con polímero.

Muestra	$\sigma_{\text{máximo}} \pm 0,01$ (MPa)	$\epsilon_{\text{máximo}} \pm 0,001$	$\sigma_{\text{mínimo}} \pm 0,001$ (MPa)	$\epsilon_{\text{mínimo}} \pm 0,001$
IIF3	12,03	0,286	0,00	0,002
IIF2	5,07	0,157	0,00	0,002
IIF1	4,54	0,141	0,01	0,002
s (\pm)	4,18	0,080	0,01	0,000
IIC4	51,87	0,172	0,01	0,002
IIC3	89,46	0,098	0,10	0,002
IIC2	72,98	0,064	0,14	0,002
IIC1	68,11	0,060	0,02	0,002
s (\pm)	15,47	0,052	0,06	0,000

IV. CONCLUSIONES

La infiltración de la *Bambusa Guadua Angustifolia* con polímero produce un material compuesto de base natural con refuerzo polimérico con alta capacidad de desempeño en las diversas áreas al incorporar la impermeabilización de las fibras, evitando el proceso de degradación por humedad descrito por Dagang et. al. (2012), que implicaría la hinchazón de fibras de celulosa que desarrolla la tensión en la interface y provocaría microgrietas y daños estructurales. Así mismo aumenta la resistencia mecánica a compresión y al pandeo de las muestras infiltradas hasta en un 75% y 50%, respectivamente.

V. AGRADECIMIENTOS

Departamentos de Termodinámica y Fenómenos de Transporte y Ciencias de los Materiales de la Universidad Simón Bolívar. Al FONACIT de Venezuela por su apoyo financiero y a Eliana Pinto (Estudiante de Ciencias de Materiales USB), por su colaboración en la redacción de este documento.

REFERENCIAS

- [1] A. Padilla, "Estudio de la resistencia de flexión y compresión en bambú Guadua infiltrado con resina de poliéster", Proyecto de grado, Ingeniería Química, Universidad Simón Bolívar, 2015.
- [2] Johnson, N. 2015. "Could bamboo replace steel reinforcement in developing countries?", Architecture and design magazine.
- [3] Eyerer, Peter. Weller, Martin, Hübner, Christof 2010. "Polymers - Opportunities and Risks I". The Handbook of Environmental Chemistry Vol.11. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. P. 300. Berlin, Alemania.
- [4] González C., 2006. "Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la guadua angustifolia y determinación del módulo de elasticidad".
- [5] Painter, P et al. 1996. "Propiedades Mecánicas y Reológicas. Fundamentales de Ciencia de Polímeros: Un Texto Introductorio", Technomic Publishing Company, Suiza.
- [6] Grosser, D., Liese, W. 1971. "On the Anatomy of Asian Bamboos, with special reference to their Vascular Bundles". Wood Science and Technology, Springer Verlag: Hamburg, Vol. 5, 290-312 pp.
- [7] Dagang, L., Song, J., Anderson, D., Chang, D., Hua, Y., 2012 "Bamboo fiber and its reinforced composites: structure and properties". Department of Chemistry, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, 210044, © Springer Science+Business Media B.V., China.