

COMPORTAMIENTO A LA CIZALLADURA DE VIGAS ENCOLADAS LAMINADAS DE *Guadua angustifolia* KUNTH

Behavior to the shear test of beams laminated of *guadua angustifolia kunth*

RESUMEN

En esta publicación se presentan los resultados del ensayo de cizalle en vigas laminadas de *guadua angustifolia* Kunth, siguiendo los criterios y la metodología de la norma Europea DIN – EN – 392 de Junio de 1994. Se presentan también los resultados del efecto sobre la cizalladura causados por el clima tropical 20°C, 85% HR, y comparados con los obtenidos para el clima estándar 20°C, 65% HR

PALABRAS CLAVES: Ensayo, *guadua*, cizalladura, laminados, clima.

ABSTRACT

This publication presented the results of the shear test in laminated beams of "guadua angustifolia Kunth", following the criteria and the methodology of the European standard DIN - EN - 392, June 1994. Also it presented the results of the effect on the cizalladura caused by the tropical climate (20°C, 85 % HR), and compared with the obtained for the standard climate (20°C, 65 % HR).

KEYWORDS: Test, *guadua*, shear, laminated, climate.

M.Sc. Héctor Álvaro González B.

Profesor Asociado

Escuela de Tecnología Mecánica.

Universidad Tecnológica de Pereira

e-mail: hagonza@utp.edu.co

Dipl. Ing. Steffen Hellwig

Investigador Ingeniero Civil

BFH- Bundesforschungsanstalt für

Forst- und Holzwirtschaft,

Universidad de Hamburgo

e-mail:

steffenhellwig@googlemail.com

Ph.D, M.Sc. Jorge Augusto

Montoya Arango

Profesor Asistente

Facultad de Ciencias Ambientales.

Universidad Tecnológica de Pereira

e-mail: jorgemontoya@utp.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Los tableros laminados en madera o *guadua* se fabrican de tablas unidas a través de sus cantos, caras y extremos, generalmente con sus fibras orientadas en la misma dirección, de la misma forma, las vigas laminadas en *guadua* se fabrican uniendo las latas a través de sus cantos y caras y en algunas aplicaciones por sus extremos, conformando un elemento que se comporta como una sola unidad estructural, ver figura 1. Para esta investigación las uniones se hicieron usando un adhesivo por lo tanto se hablara aquí de vigas laminadas encoladas, o comúnmente llamada vigas laminadas. Las vigas laminadas se empezaron a usar en estructuras desde comienzos del siglo pasado por el suizo Hetzer y actualmente se usan mucho en construcción, en edificios con grandes vanos y en la medida que la investigación de nuevos adhesivos ha avanzado su uso se ha intensificado. Las aplicaciones más comunes son vigas rectas, arcos y marcos [1], [2]. Conocer las propiedades de resistencia de las uniones encoladas de las vigas laminadas para uso estructural es de mucha importancia y existen normas Europeas y Americanas, que establecen criterios mínimos de cumplimiento con un grado de confianza del 95%. El BFH- Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (Instituto Federal para la Investigación Forestal y de Productos Maderables), de la Universidad de Hamburgo en Alemania y el Instituto de Tecnología de productos forestales de la Universidad Austral de

Chile en Valdivia, realizan permanentemente este tipo de ensayos en laminados en madera. El objetivo de este estudio es apropiar para los laminados en *guadua* la tecnología existente en ensayos de cizalle para laminados en madera trabajando en clima estándar (20°C, 65% HR) y en clima tropical (20°C, 85% HR) con el fin de conocer la resistencia de la línea de encolado a la cizalladura y a la influencia del clima. El alcance de la investigación esta limitado al uso del material *Guadua angustifolia* Kunth, en vigas laminadas para uso estructural, usando equipo de laboratorio para su fabricación y posterior ensayo.

En esta publicación se presentan los resultados del ensayo de cizalladura en vigas laminadas de *Guadua angustifolia* Kunth, siguiendo los criterios y la metodología de la norma Europea DIN – EN – 392 de Junio de 1994. La norma establece procedimientos de laboratorio para determinar la resistencia a la cizalladura de la unión encolada en la viga. El estudio de las propiedades de los laminados significa para la región del eje cafetero un avance en la búsqueda de la apropiación de tecnología para el procesamiento de la *guadua*, además, el recurso *guadua* comienza a ser valorado en el país y se perfila como un renglón importante de la economía del eje cafetero.

El esfuerzo de compresión y esfuerzo de cizalladura son bajos en los nudos [3]. Esto debido a la irregularidad de las fibras, causada por la disposición de las células. Los mejores esfuerzos a la flexión y modulo de elasticidad, se

obtienen en el tope de los culmos esto debido a la alta concentración de haces vasculares y poco parenchym [3]. Para Ota M., (1953) [4] la densidad de los nudos del Bambú es significativa un 10% por encima de la de los internudos, en la especie *Phyllostachys reticulata*.

Atrops J. L., (1969) [5] realizó pruebas apoyándose en la DIN 52 187, pero realizó dos tipos de pruebas, tipo A: Un segmento de aro circular, con dos puntos de corte y tipo B: Un aro completo con 4 puntos de corte; los resultados dieron un menor resistencia al esfuerzo de cizalladura empleando 4 puntos, pero también hace diferencia con el espesor. Espesor de 6 mm dio 11% menos que espesores de 10 mm.

Con los ensayos de Sotela J., (1990) [6] con la especie *Guadua angustifolia* comprobó que el esfuerzo de cizalladura fue mayor en culmos de la procedencia Sur que la del Atlántico, las muestras con nudos presentaron diferencia significativa con la de los internudos. Las pruebas con internudo presentaron un mayor esfuerzo de cizalladura que las que tenían nudo y fue mayor en el tope del culmo que en la base; esto concuerda con los resultados de (Atrops J. L., 1969) [5] pero difieren de los resultados de (Jannsen J. A. A., 1981) [7].



Figura No. 1 Latas de *Guadua angustifolia* Kunth unidas a través de cantos formando una viga

2. MATERIALES Y METODOS

El material usado en esta investigación es de la especie "*Guadua angustifolia*", y fue escogido y posteriormente extraído de los guaduales que actualmente posee el vivero de la Universidad Tecnológica de Pereira. Este sembrado se encuentra a una altura de 1414 metros sobre el nivel del mar y a una temperatura promedio de 23°C.

El material fue inmunizado, cortado en latas de longitud de 2000 mm x 30 mm x 8 mm y posteriormente secado en el secador solar de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Tecnológica de Pereira a un contenido de humedad promedio de 15%. Este material fue empacado y enviado a los laboratorios del BFH- Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (Instituto Federal para la Investigación Forestal y de Productos Maderables), ubicado en Hamburgo (Alemania), asegurando en todo momento su

trazabilidad mediante una convención de identificación adecuada. En la tabla 1 se muestra el total de probetas usadas en la investigación de cizalladura, haciendo la claridad que para esta experiencia se trabajo con guadua madura únicamente. Durante el transporte de las latas hasta el BFH, sus condiciones de contenido de humedad cambiaron, entonces, se les realizó un tratamiento de climatizado, primero llevando su contenido de humedad a 13% y luego climatizando a 20°C, 65% HR.

PEGANTE	EDAD	CANT.LATAS	UNION	PRUEBA CIZALLA DURA
MELAMINHA RZLEIM II	MADURA	6	ee	4
			ie	4
RECORCIN - HARZLEIM	MADURA	4	ee	4
			ie	4
1K-POLYURET HAN I	MADURA	2	ee	4
			ie	4
SUBTOTAL PROBETAS				24
TOTAL PROBETAS				24

Tabla No.1 Cantidad de probetas laminadas de *Guadua Angustifolia* Kunth para cizalladura.

Obsérvese también en la tabla 1 que las uniones de los laminados siguieron un orden en las posiciones de las latas (eiei, eeii). Se ha tomado como nomenclatura "e" la cara exterior de la guadua que posee mayor densidad de fibras y la cara interior "i" que posee menor densidad de fibras, así por ejemplo, una secuencia eiei consiste en pegar cara exterior con cara interior y luego con exterior y luego con interior. Las pegas de las láminas se hicieron siguiendo las recomendaciones de las hojas técnicas de los fabricantes de los pegantes, [8], [9], [10]. Una vez pegadas las láminas y conformadas en vigas, se procedió a preparar las probetas para los ensayos de cizalladura en el numero que se indica en la tabla 1, y de acuerdo con lo estipulado en la norma alemana con respecto a la cizalladura (DIN EN 392) [11].

Para el ensayo de la cizalladura se prepararon probetas de 20 x 20 x 49 mm tal como se muestra en la figura 1, y posteriormente se sometieron a una fuerza de cizalla a lo largo de la línea de encolado hasta que la unión falle (ver figuras 2 y 3). Como se muestra en la figura 1 esta probeta esta compuesta de siete latas unidas entre si por un adhesivo y cada una de las uniones se somete a cizalladura. El criterio de aceptación de la probeta es que el esfuerzo de cizalladura en la unión encolada debe ser $\geq 6 \text{ N/mm}^2$, y si la cizalla se produce 100% en la guadua debe ser $\geq 4 \text{ N/mm}^2$.

La metodología utilizada es la misma que plantea la norma DIN – EN – 392 de Junio de 1994, en la cual se describe como medir el esfuerzo de cizalladura de la línea de encolado paralela a la dirección de la fibra.



Figura No. 2 Probetas de cizalladura. Dimensiones en mm.

Se puede observar en la figura 2 la disposición horizontal de la probeta para el ensayo.

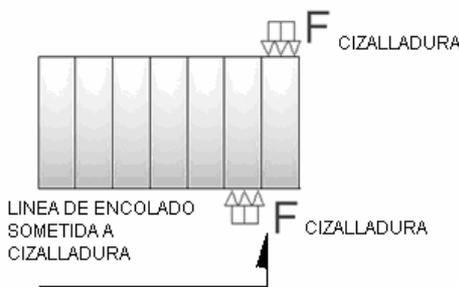


Figura No. 2 Probeta sometida a fuerza de cizalladura a lo largo de la línea de encolado.

La norma se aplica en el control de la calidad de la línea de encolado en madera laminada y usa como referencia la norma DIN – EN – 386 de 1993, “Glued laminated timber – Performance requirements and minimum product requirement” [12] [13]. La herramienta que propone la norma se muestra en la figura 3 y consiste de una guía cilíndrica la cual recibe la fuerza de empuje vertical que actúa sobre el plano de cizalladura en toda la línea de encolado como se puede apreciar.

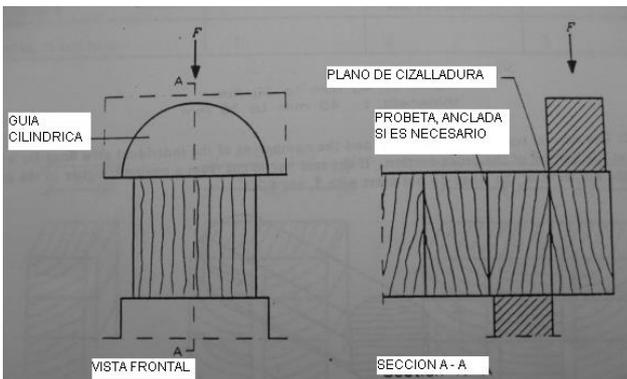


Figura No. 3 Probeta sometida a prueba de cizalladura utilizando guía cilíndrica.

Se tuvo especial cuidado en la preparación de cada una de las probetas para asegurar que las superficies que reciban la carga estuvieran libres de rugosidades o

salientes, fueran paralelas unas con otras y perpendicular a la dirección de la fibra, tal como se muestra en al figura 1 Se siguió la recomendación de la norma [12] para la extracción de la probetas de la viga laminada, tomándolas de la parte media y en la zona donde se garantiza que la presión de encolado fue constante. Como se obtuvieron probetas con menos de diez líneas de encolado, todas las líneas deben ser ensayadas a cizalladura.

Atendiendo la recomendación de la norma, el numero de probetas por viga fue de uno porque el ancho de las vigas no sobrepaso los 100 mm. [12].

Todas las probetas se marcaron siguiendo la recomendación de la norma con una identificación durable, tal como se muestra en la figura 4. La convención utilizada tiene cuatro campos:

XXYY - ZZ - WW

XX: Letra que identifica el pegante de la unión encolada.
 YY: Letra que identifica el ensayo de cizalladura.
 ZZ: Letras que indican el tipo de unión entre las latas.
 WW: Numero que indica el numero de la probeta.

El siguiente es un ejemplo de marcación e identificación de probetas:

KC – ei - 1

El cual significa:

K: Pegante Melamin-Harnstoff-Formaldehyd - Harz, Kauramin 683 Härter 688.

C: Ensayo de cizalladura.

ei: Unión de las latas cara exterior con cara interior.

1: Probeta numero 1.

Adicionalmente se marco con una flecha señalando la parte superior de la probeta, con el fin de no perder el orden en la posición original en la viga.

Para realizar el procedimiento de la prueba de cizalladura se acondicionaron previamente el contenido de equilibrio de humedad de las probetas en un clima estándar 20°C, 65% HR y un contenido de humedad uniforme en cada probeta de 13%. Con el objeto de conocer el efecto del clima tropical sobre las probetas en la prueba de cizalladura se preparó un juego igual de probetas acondicionadas en un clima tropical 20°C, 85% HR y un contenido de humedad uniforme en cada probeta de 13%.

Antes de someter la probeta a la fuerza de cizalladura se debe medir la sección de la superficie con un calibrador, con el fin de calcular su área que permitirá el cálculo del esfuerzo.



Figura No. 4. Identificación de probetas para cizalladura.

Al colocar la probeta en la maquina de ensayo se debe tener cuidado que la línea de encolado este a máximo un milímetro de distancia del plano de corte en la maquina. La aplicación de la fuerza se debe realizar a una velocidad constante de 25 mm. /minuto y en aproximadamente 20 segundos se debe presentar la falla.

El esfuerzo de cizalladura f_v se calcula con la ecuación 1

$$f_v = k \frac{F_u}{A} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (1)$$

Donde:

A: Área de la sección sometida a cizalladura en mm^2 .

k: factor de corrección. $k = 0.78 + 0.0044 * t$

t: espesor en milímetros de la lata encolada.

F_u : Fuerza de cizalladura en Newton.

El factor de corrección k modifica el esfuerzo de cizalladura en aquellas probetas cuyo espesor en la dirección de las fibras y en la sección que se somete al esfuerzo sea menor a 50 mm. Que es el caso en esta investigación. La figura 6 muestra la maquina usada para este tipo de ensayo. Finalmente la información se debe registrar en tablas adecuadas para ello.

Los resultados de los ensayos se analizaron mediante estadística descriptiva, de acuerdo a un diseño completamente aleatorio, en el cual la dispersión de los datos fue mínima.

3. RESULTADOS

Los resultados de las pruebas de cizalladura en las probetas de la *Guadua angustifolia* Kunth permitirán

decir que este material es apto para la fabricación de vigas laminadas si los resultados de los ensayos de delaminación también son favorables. En la figura 5 se puede observar una probeta sometida a la prueba de cizalladura en la cual se nota el corrimiento de las fibras muy cerca de la unión, pero en realidad la línea de encolado no fallo, la falla se produjo en el material de la guadua como se puede observar en la figura 6. El comportamiento de la unión encolada fue excelente.

Se presentan primero los resultados del juego de probetas climatizadas en clima estándar 20°C , 65% HR. El gráfico de la figura 7 muestra el comportamiento de la cizalladura de las uniones encoladas de las probetas antes de la delaminación en un clima estándar $20^\circ\text{C} / 65\% \text{HR}$, en donde el esfuerzo de cizalladura de todas las uniones encoladas no tiene valores promedio por debajo de 4 N/mm^2 excepto las uniones de latas en la posición eiei encoladas con el pegante 1K - POLYURETHAN I, que tuvo un valor mínimo por debajo de este criterio.

En los valores promedio se encontró que algunos no cumplieron el criterio de mínimo valor de cizalladura de 6 N/mm^2 como son las latas encoladas con unión eiei, iiiii usando pegante 1K - POLYURETHAN I, las latas encoladas con unión eiei, usando pegante RESORCIN HARZLEIM y las latas encoladas con unión iiiii usando pegante MELAMIN HARZLEIM II.



Figura No. 5 Probeta sometida a prueba de cizalladura.



Figura No. 6 Probeta a cizalladura que muestra la falla de la unión por el material guadua.

Se entiende aquí que hubo marcada influencia de la posición de las latas al encolado. Se puede observar como la probeta testigo de material de guadua (Bambú) sin encolar cumple con los criterios de la norma de cizalladura.

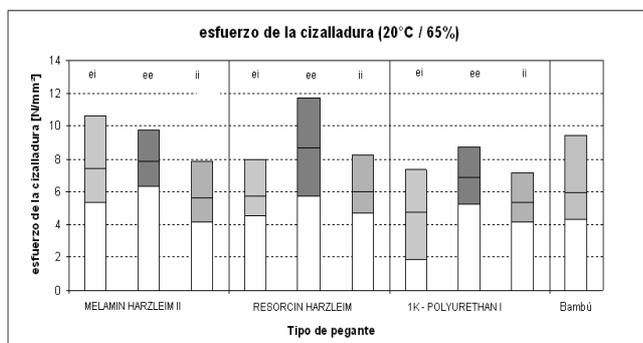


Figura No. 7 Esfuerzo de cizalladura antes de la delaminacion clima 20°C / 65% HR.

Es importante destacar que en algunas de las pruebas se obtuvieron desviaciones estándar bajas de los datos en sus diversas repeticiones que permite inferir un comportamiento estable frente a la prueba como fue el caso de las probetas encoladas con las latas en la posición eie i y pegadas con MELAMIN HARZLEIM II.

El grafico de la figura 8 muestra el comportamiento de la cizalladura de las uniones encoladas de las probetas

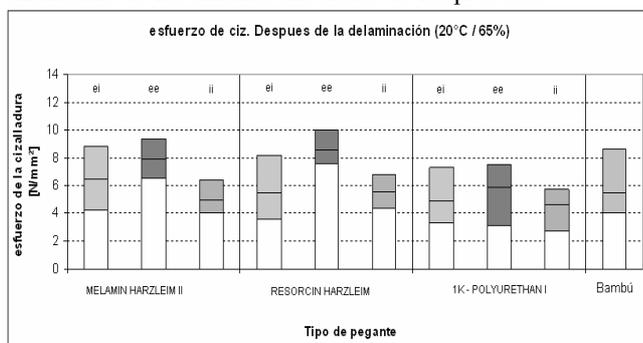


Figura No. 8 Esfuerzo de cizalladura después de la delaminacion clima 20°C / 65% HR.

Después de la delaminacion en un clima estándar 20°C / 65% HR en donde el esfuerzo de cizalladura de todas las uniones encoladas cizalladas no tiene valores promedio por debajo de 4 N/mm², lo que muestra un resultado excelente de la guadua ante una prueba tan fuerte como es la delaminacion y aun sigue dentro de la norma. También se observa que todas las probetas superaron el criterio de mínimo valor de cizalladura de 6 N/mm² en sus valores máximos, excepto las uniones de latas en la posición iiiii encoladas con el pegante 1K – POLYURETHAN I. En los valores promedio se encontró

que algunos no cumplieron este criterio como son las latas encoladas con unión eie i, eeee, iiiii usando pegante 1K - POLYURETHAN I, las latas encoladas con unión eie i, iiiii usando pegante RESORCIN HARZLEIM y las latas encoladas con unión iiiii usando pegante MELAMIN HARZLEIM II. Se entiende también aquí que hubo marcada influencia de la posición de las latas al encolado. Se puede observar como la probeta testigo de material de guadua (Bambú) sin encolar cumple con los criterios de la norma de cizalladura después de ser sometida a la delaminacion.

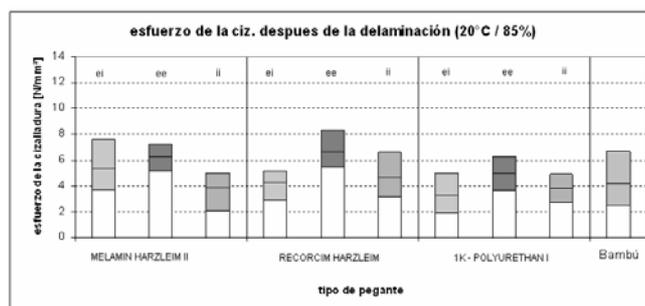


Figura No. 9 Esfuerzo de cizalladura después de la delaminacion clima 20°C / 85% HR.

El grafico de la figura 9 muestra el comportamiento de la cizalladura de las uniones encoladas de las probetas después de la delaminacion en un clima tropical 20°C / 85% HR en donde el esfuerzo de cizalladura de todas las uniones encoladas ya se ve afectado y tiene algunos valores promedio por debajo de 4 N/mm², lo que muestra un resultado regular de la guadua ante una prueba tan fuerte como es la delaminacion, pero por otro lado algunos valores promedio siguen dentro de la norma, como es el caso de la viga con uniones de latas en la posición ei y ee encoladas con el pegante MELAMIN HARZLEIM II, igualmente la viga con uniones de latas en la posición ei, ee, ii, encoladas con el pegante RESORCIN HARZLEIM y finalmente la viga con uniones de latas en la posición ee, encoladas con el pegante 1K – POLYURETHAN I. También se observa que solo dos probetas superaron el criterio de mínimo valor promedio de cizalladura de 6 N/mm² como fue el caso de la viga con uniones de latas en la posición ee, encoladas con el pegante MELAMIN HARZLEIM II y RESORCIN HARZLEIM respectivamente. Se puede observar como la probeta testigo de material de guadua (Bambú) sin encolar en sus valores promedio cumple con el criterio de la norma de cizalladura ≥ 4 N/mm². si la cizalladura se produce en el bambú, pero no cumple el otro criterio de ≥ 6 N/mm² después de ser sometida a la delaminacion.

4. CONCLUSIONES Y DISCUSION

El comportamiento de la guadua *angustifolia* Kunth al esfuerzo de cizalladura permiten plantear las siguientes conclusiones:

- El criterio de requerimiento DIN EN 392 (6.0 N/mm²) fue cumplido por el material *Guadua angustifolia* Kunth con el Pegante MELAMIN HARZLEIM II y la posición de las latas eiei (7,4 N/mm²) y Pegante RECORCIN HARZLEIM y la posición de las latas eeii (6.0 N/mm²)
 - La resistencia a la cizalladura en la guadua fue más baja que en la unión con las combinaciones mencionadas debido a un mejoramiento de las propiedades mecánicas de línea de encolado dada por el pegante.
 - Con la combinación Pegante MELAMIN HARZLEIM II y la posición de las latas eiei se obtuvieron los valores más altos, para clima estándar antes y después de la delaminación. Para el clima tropical esta combinación no supero la prueba de cizalladura después de la delaminación, lo que significa que este material puede ser usado en este clima con protección superficial en ambientes exteriores e interiores.
 - El porcentaje de las roturas en la guadua alrededor de la línea de encolado se encontraron sobre 90%, lo que implica que el pegante mejoro la resistencia a la cizalladura en esa zona.
 - El clima influencia los valores del esfuerzo de la cizalladura para todos las combinaciones de pegante y posición de las latas.
 - Los valores se redujeron en un 10% después del desencolado realizando la prueba de cizalladura en un clima estándar.
 - Los valores se redujeron en un 25% después del desencolado realizando la prueba de cizalladura en un clima tropical.
- AGRADECIMIENTOS.** Los autores agradecen el apoyo financiero de COLCIENCIAS en Colombia y el DAAD de Alemania, e igualmente agradecen el apoyo logístico de la Universidad Tecnológica de Pereira en Colombia y el BFH- Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (Instituto Federal para la Investigación Forestal y de Productos Maderables), de la Universidad de Hamburgo en Alemania. También se agradece a las siguientes empresas Alemanas que suministraron sin costo los pegantes para esta investigación: Türmerleim GMBH, Hexion Specialty Chemicals GMBH, y Ulrich Lübbert Warenhandel GmbH & Co. KG.
- BIBLIOGRAFÍA**
- [1] CENTRO DE TRANSFERENCIA TECNOLOGICA. Pino Radiata. Proyecto CORFO – FONTEC. Chile, Noviembre 2003.
 - [2] Poblete, H. Uniones de madera con adhesivos. Publicación técnica No. 1. Universidad Austral de Chile, 1978
 - [3] Liese W. (1985b): The Anatomy and Properties of Bamboo. Recent Research on Bamboo. Proceedings of the International Bamboo Workshop, Hangzou Republic of China, pp. 196-209.
 - [4] Ota M. (1953b): Studies on the Properties of Bamboo Stem (Part 13). On the Relation between Shearing Strenght Parallel to Grain and Moisture Content of Bamboo Splint. Bulletin N° 25 Kyushu University, Japan. 121 – 131 pp.
 - [5] Atrops J. L. (1969) Elastizität und Festigkeit von Bambusrohren. Der Bauingenieur 44 Heft 6, pp. 220 -225.
 - [6] Sótela Motero, J. (1990): Determinación de las propiedades físicas y mecánicas del Bambú de la especie *Guadua* de dos zonas de Costa Rica. Proyecto PNUD-COS 87/001, San José de Costa Rica. 65 pp.
 - [7] Janssen J.J.A. (1981): Bamboo in Building Structures. Thesis to obtain the degree of Doctor of Technical Sciences at the Eindhoven University, Nijmegen Netherlands. 235 pp.
 - [8] AG, technical sheet. Bakelite HL 283 Härter H 183, Duisburg, Germany, 2007.
 - [9] BASF, technical sheet. Kauramin 683 Härter 688, D-Ludwigshafen, Germany, 2007.
 - [10] Dynea ASA, technical sheet. Prefere 6001, Norwegen, Germany, 2007.
 - [11] DIN EN 392: 1996: Brettschichtholz – Scherprüfung der Leimfugen.
 - [12] DIN EN 386: 2001: Brettschichtholz – Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung.
 - [13] NCH 2148. Of. 89. Madera laminada encolada estructural – Requisitos e inspección. Norma Chilena Oficial, área forestal.