

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Tecnología e innovación de estructuras de madera para el sector de la construcción: Vigas de perfil I de amarillón (*Terminalia amazonia* (J.F. Gmel.) Exell) de plantación

Rafael Serrano Montero¹
Marta Sáenz Muñoz¹

Resumen

En Costa Rica el sector de construcción ha sido tradicionalmente el mayor consumidor de madera (más del 50% de la madera aserrada). Sin embargo, en las últimas dos décadas la madera ha sufrido un proceso acelerado de sustitución por materiales principalmente a base de hierro, aluminio y concreto. Dada esta situación, se propuso el desarrollo de un producto innovador de ingeniería, para uso en el sector de construcción de estructuras livianas en residencias y edificios comerciales y similares, que utilice maderas de plantación.

La especie seleccionada para el proceso de investigación y desarrollo (I&D) fue *Terminalia amazonia* (J. F. Gmel.) Exell (amarillón). Las vigas de perfil I desarrolladas se basan en el principio de producción de piezas anchas y largas, utilizando para ello piezas cortas y angostas saneadas. Para esto se consideró el uso de uniones de tipo dedo (finger joint: FJ) que es una tecnología bien establecida de alcance mundial. El volumen total de madera en troza utilizado de amarillón (raleo) para este proyecto fue de 22.741 m³ de los cuales se obtuvo 7.228 m³ para un factor de recuperación de madera aserrada sobre volumen en troza de 31.78%.

El rendimiento de producto final procesado, considerando el volumen de materia prima en troza, fue de 9.87%. Este es el escenario de menor rendimiento esperado, tanto por el diámetro de trozas tan pequeño (16 cm), como por la gran cantidad de saneo de defectos que se debe efectuar para fabricar vigas relativamente homogéneas y rectas. El método de preservación de inmersión- difusión con soluciones de boratos, permitió obtener una buena penetración para piezas gruesas en 22 días.

El programa de secado admitió secar la madera con relativa facilidad en cuanto al tiempo de duración, ya que en 14 días permitió disminuir el contenido de humedad de 44% a un valor entre 10-13%.

En general, tanto los ensayos de flexión como de tensión realizados en las probetas con uniones tipo dedo (FJ), comprueban la buena calidad de las uniones de las vigas de perfil I desarrolladas. Esto podría significar una oportunidad para la introducción de las vigas I de madera en el sector de la construcción residencial y comercial en Costa Rica. El sondeo de mercado realizado, así como el análisis económico del proyecto, indican que es factible

¹ Instituto Tecnológico de Costa Rica, jserrano@itcr.ac.cr, msaenz@itcr.ac.cr

la manufactura de este producto en el mercado nacional, por lo que se recomienda su fabricación y mercadeo por parte de pequeñas y medianas empresas.

Palabras claves: *Terminalia amazonia*, Vigas perfil I, Producto innovador, Rendimientos en aserrío, Preservación de la madera, Secado de la madera, Uniones tipo dedo, Mercado, Análisis financiero, Costa Rica.

Abstract

Technology and innovation of wood structures for the construction sector: I beams of amarillón (*Terminalia amanzonia* (J.F.Gmel) Excell) from timber plantation.

Traditionally, the construction sector in Costa Rica has been the mayor consumer of wood (more than 50% of sawn wood). However, during the last two decades, wood has suffered an accelerated process of substitution, mainly by the use of materials such as iron, aluminum and concrete. Given this situation, it was proposed the development of an innovated engineering product from timber plantation, which will be used in light frame construction for housing and commercial businesses and the like.

Terminalia amazonia (J. F. Gmel.) Exell (amarillón) was the species selected for this process of research and development (R&D). The I beams obtained are based on the principle of producing wide and large pieces using defected short and narrow ones. For this process, it was considered the use of finger joint technology (FJ), which is a well established technology worldwide. The total volume of logs (thinnings) used of “amarillón” for this project was 22.741 m³ that produced 7.228 m³, this means a lumber recovery factor of 31.78%.

The yield of final product based on the raw material processed (volume of logs) was 9.87%. This is perhaps the lowest yield scenario expected because of the small diameter of the logs (16 cm) as well as because of the high level of defected pieces required in order to obtain straight and homogeneous I beams. The preservation method used was the immersion and diffusion of lumber in a borates solution, which allowed a good penetration for thick pieces (38 mm) in 22 days.

The kiln drying program applied to this lumber was relatively fast, allowing the reduction of moisture content from 44% to 10-13% in just 14 days.

In general, bending and tension tests conducted over specimens with FJ revealed good quality of the joints from the I beams produced. This could mean an opportunity for the introduction of wooden I beams into the construction sector for housing and commercial applications in Costa Rica. Market revision and the economic analysis of the project indicate that it is feasible the manufacturing of this product in our national market, therefore it is recommended its fabrication and trade by small to medium size companies.

Key words: *Terminalia amazonia*, I beam, Innovated product, Sawmilling yields, Wood preservation, Wood drying, Finger joint, Market, Economic analysis, Costa Rica.

INTRODUCCIÓN

Como parte del proyecto Ecomercados-Reforesta, financiado por el Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) en Costa Rica y en el marco de la temática de “Innovación y desarrollo de nuevos productos que utilicen maderas de plantación”, se propuso un trabajo de

investigación y desarrollo (I&D) con acciones concurrentes dentro de un área general denominada “Tecnología e innovación de estructuras de madera para el sector de la construcción” (Serrano y Sáenz, 2004).

En las últimas dos décadas la madera ha sufrido un proceso acelerado de sustitución por materiales principalmente a base de hierro, aluminio y concreto. Estos materiales en general tienen un componente de importación elevado y sus materias primas provienen de fuentes no renovables, por lo que a futuro su sostenibilidad y su efecto sobre la economía nacional pueden tener consecuencias negativas para el desarrollo local. Además, dichos materiales requieren de un mayor insumo energético para su producción en comparación con la madera. Por otro lado el país ha realizado grandes inversiones y esfuerzos en reforestación y actualmente esto se ve reflejado en una considerable cantidad de área plantada.

Las maderas reforestadas, principalmente de las especies melina, teca y otras nativas, están siendo hoy en día introducidas en el mercado nacional y también se hacen esfuerzos para su venta en el mercado de exportación. No obstante, en general, todavía se presentan vacíos de conocimiento de sus características y propiedades, por lo que ha sido difícil la introducción y posicionamiento de estas maderas en productos de mayor valor agregado y de alto consumo en el mercado local.

Con el propósito de normalizar y facilitar la comprensión terminológica de este estudio, se incluye al final del artículo el Cuadro 3 denominado: Glosario, abreviaturas y símbolos.

El objetivo del proyecto es promover la innovación y desarrollo de nuevos productos que utilicen madera de plantaciones forestales existentes en Costa Rica, con el propósito de ampliar la gama de productos a fabricar con esas maderas, lo cual a su vez pueda dar mayor viabilidad financiera a las presentes y futuras plantaciones forestales en Costa Rica.

Los objetivos específicos de la investigación son:

- Identificar productos factibles de desarrollar con madera de plantaciones de las especies utilizadas en Costa Rica.
- Elaborar estudios de factibilidad técnica y financiera para su desarrollo.

MARCO TEÓRICO

Hay varios aspectos que han hecho que la madera continúe perdiendo espacios en el sector de la construcción, dentro de los cuales se pueden citar la falta de estabilidad dimensional de la madera, lo que provoca mayores distorsiones (pandeos y torceduras), rajaduras y agrietamientos. También la percepción generalizada de la madera como material de fácil combustión, su durabilidad natural relativamente baja, así como la poca formación de los profesionales (ingenieros y arquitectos), de constructores y otros usuarios sobre las características y propiedades de la madera, lo que impacta en una menor preferencia por el uso de la misma en el sector de la construcción (Serrano, 2004).

En países con mayor desarrollo, la madera es uno de los materiales más apreciados. En Norte América usualmente las construcciones residenciales utilizan un alto porcentaje de madera (entre un 50% y un 70% de todos los materiales empleados). A manera de ejemplo y tomando como referencia la percepción negativa que existe en nuestro medio en el sentido que la madera posee poca resistencia al fuego, se puede ilustrar la razón de dicha preferencia en estos países, dado que cuando se analizan estadísticas de pérdidas por incendios se revela un dato crucial: “Cuando

se trata de protección al fuego, las personas están tan seguras en casas con entramados de madera en las paredes y tabiques como los que están en un edificio de estructuras livianas de acero, concreto o materiales de hormigón” (Leicester, 2000). Dicha investigación ha demostrado que el comportamiento de los materiales en edificios de apartamentos y la seguridad no están relacionados con la combustibilidad, sino más bien con la inclusión de sistemas de protección contra el fuego que ofrezca una mayor seguridad a la vida humana.

Existen muchos factores que podrían contribuir al resurgimiento de la madera como una opción preferida para proyectos, tanto residenciales como en edificios comerciales. En general, los productos con un fuerte componente de ingeniería y de alto valor agregado están teniendo un gran auge tanto en Europa como en América del Norte, con crecimientos establecidos de alrededor de unas veinte veces durante esta década y se tienen reportes de crecimientos en volumen de ventas de más del 100% anual. Por ejemplo, en Inglaterra y Europa hoy en día se pueden construir casas de hasta siete pisos utilizando madera; una situación similar se está presentando en Australia. Dichas construcciones se fundamentan principalmente en entramados de madera (Leicester, 2000).

Dentro de los materiales compuestos a base de madera con alto grado de ingeniería, existen tres grandes grupos a saber:

1. Los elementos estructurales obtenidos de piezas aserradas de las costillas de las trozas, tablas o formas lineales de materiales homogéneos, tales como vigas laminadas, madera laminada a partir de chapas (LVL por sus siglas en inglés), madera contrachapada (plywood), material lineal y paneles hecho de madera con uniones tipo dedo (finger joint).
2. Elementos estructurales hechos con piezas aserradas de las costillas de trozas, tablas o formas lineales de compuestos, tales como madera aserrada con uniones de dedo, con conectores metálicos, vigas tipo perfil I obtenidas de una mezcla de reglas o alfajillas y material aserrado de las costillas de las trozas.
3. Compuestos fabricados con elementos estructurales. Por ejemplo las conocidas MacMillan (Truss-joist), es decir vigas tipo cercha y otros productos.

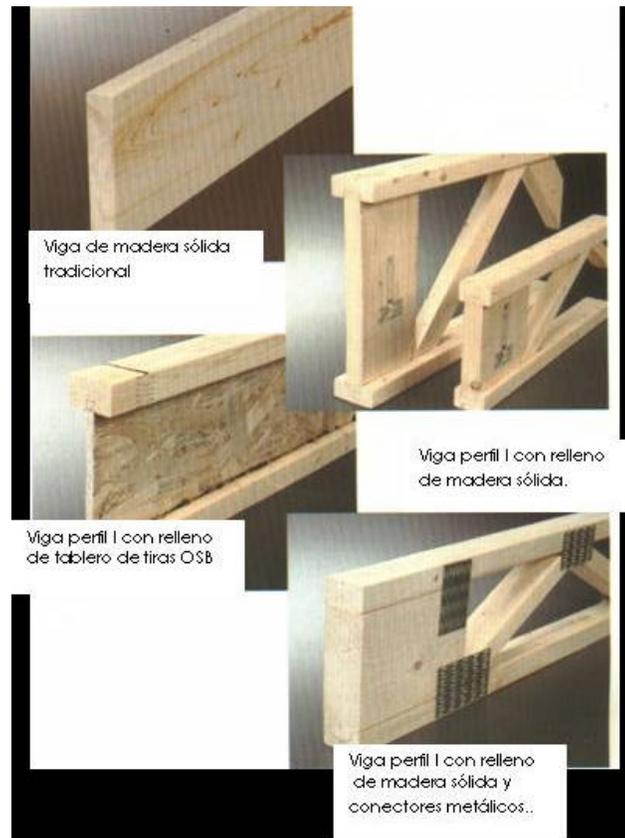


Figura 1. Vigas perfil I consideradas para el desarrollo de un producto innovador para la construcción. Fuente: Forintek Canadá Corp., 2002.

De estos tres grupos de materiales compuestos con características ingenieriles, el proyecto desarrolló los productos que pertenecen al grupo 2 (Figura 1) que actualmente no son utilizados en nuestro medio.

La idea básica fue investigar y desarrollar un producto innovador de encadenamiento en el sector de construcción con alto potencial de consumo y utilizando madera de raleo (subproductos) de plantaciones forestales. Además, que posibilite competir con materiales sustitutos como las vigas metálicas conocidas como “perlings”, los entramados metálicos en paredes y las piezas estructurales de concreto, procurando recobrar espacios de utilización en edificaciones residenciales y comerciales.

Estas piezas estructurales al tener un alto componente de ingeniería del producto y del proceso, permiten su fabricación con altos estándares de calidad y con características técnicas conocidas, que faciliten a los usuarios (ingenieros, arquitectos, etc.) su especificación en las obras civiles.

Entre estos estándares se encuentran aspectos técnicos como el tipo de adhesivo y el tipo de unión, los cuales deben garantizar la calidad del producto ingenieril. Para obtener la mejor calidad en el proceso de encolado se investigaron los adhesivos del tipo PVAc (“crosslinking” entrelazado catalizado de un componente) de dos casas distribuidoras diferentes: Franklin International y Akzo Nobel.

El PVA o acetato de polivinilo es la base de las colas vinílicas más comunes que se usan para remanufactura de productos a base de madera. Es un adhesivo termoplástico; a medida que la polimerización se efectúa, la viscosidad aumenta hasta tener un producto sólido, que se aplica mediante una emulsión acuosa. Es de color blanco lechoso que fragua a temperatura ambiente y es muy estable a la luz y al calor (Martínez, 1990). Además, este adhesivo es recomendable para la fabricación de pequeñas series de elementos laminados, debido a la facilidad de obtención y aplicación. Los adhesivos vinílicos pueden ser formulados con aditivos especiales que permiten una mayor resistencia a la humedad y al agua.

Entre las principales ventajas de los adhesivos vinílicos se pueden indicar: 1) poseen una propiedad rellenadora de juntas, 2) forman una unión tenaz y elástica, 3) tienen estabilidad al almacenaje prolongado, 4) poseen un tiempo útil sin limitaciones, 5) son de fácil aplicación y 6) son considerados poco peligrosos para los seres humanos y animales domésticos.

METODOLOGÍA

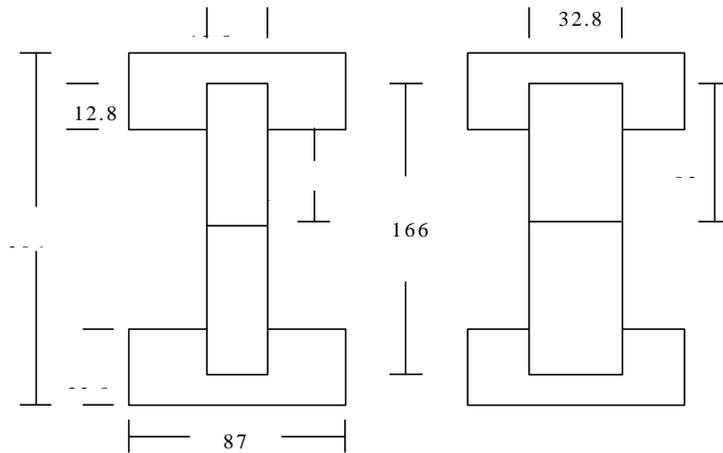
Selección de la especie

La especie seleccionada para el proceso de innovación y desarrollo (I&D) es *Terminalia amazonia* (J. F. Gmel.) Exell (amarillón). Ésta es una especie nativa poco estudiada, que se ha utilizado en plantaciones forestales con relativo éxito en varias zonas de Costa Rica (principalmente Zona Sur), pero que no ha sido empleada para la fabricación de productos de alto valor agregado.

Selección del producto

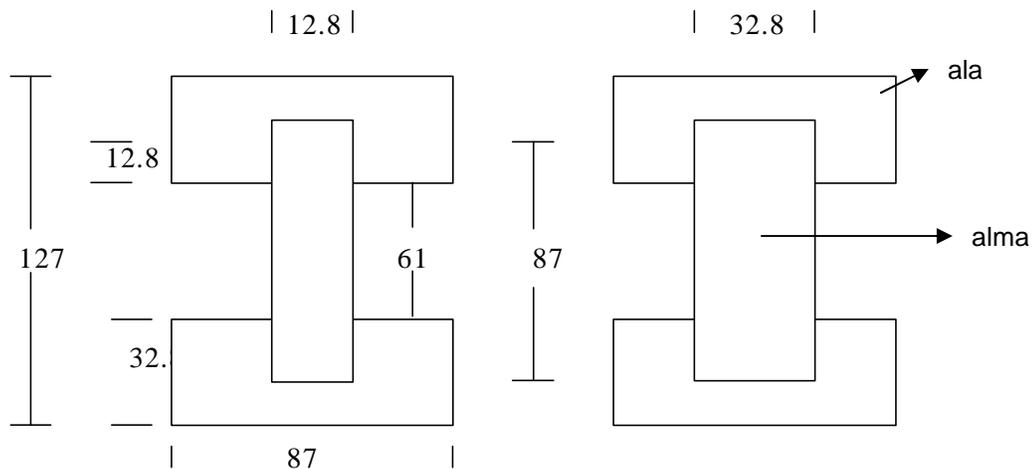
Inicialmente se realizó una investigación en bases de datos bibliográficas disponibles en el país e internet sobre las características, componentes y procesos de fabricación de productos innovadores. De esta búsqueda se obtuvo información sobre diversos productos ingenieriles basados en madera, tales como vigas laminadas de diversos perfiles y formas, tableros listonados y productos con uniones de dedo (finger joint), así como productos estructurales propiamente dichos y para estructuras livianas dentro de los cuales se encuentran las vigas de perfil I.

Algunos de estos productos se han venido introduciendo en el mercado costarricense. Sin embargo, las vigas de perfil I no se están fabricando en el país, por lo que se consideró importante realizar el proceso de investigación y desarrollo para la introducción de este producto en el mercado nacional. La propuesta se basó en el diseño y fabricación de un producto (Figuras 2 y 3) conveniente para el subsector de la construcción residencial y en edificios comerciales principalmente. Se prevé que esto permita tener un fuerte encadenamiento con el sector de la construcción.



Sin escala, todas las medidas en mm

Figura 2. Vigas de perfil I con peralte alto de alma delgada (izq.) y alma gruesa (der.).



Sin escala, todas las medidas en mm

Figura 3. Vigas de perfil I con peralte bajo de alma delgada (izq.) y alma gruesa (der.).

Selección de la tecnología

Con el proceso de unión de piezas cortas se procura disminuir las distorsiones y la mayor variabilidad presentada en piezas hechas de madera sólida, aspectos que han tenido un impacto negativo en el mercado local, dado que los materiales sustitutos (“perlings”) tienen una mayor homogeneidad y rectitud.

La fabricación de piezas estructurales de madera mediante las uniones de tipo dedo se han realizado con dientes relativamente largos (28.27 mm de tipo horizontal en Norteamérica). No obstante, la tecnología de este tipo de uniones seleccionada para en este proyecto es conocida como “microdentada” (5-20 mm). La razón fundamental para realizar este cambio se basa en resultados reportados (Jerger y Torres, 1995), en donde se ha demostrado que no existen diferencias significativas en resistencia mecánica. La ventaja principal de utilizar la unión microdentada, es que al hacer esta unión se reduce la longitud de la pieza en 20 mm y comparada con la unión tradicional, se reduciría la longitud en 56.54 mm.

Para el proceso de encolado se probaron el adhesivo tipo PVAc (“crosslinking”) de dos casas distribuidoras diferentes: Franklin International (Multibond EZ1) y Akzo Nobel (3339 con endurecedor 3385). Los adhesivos vinílicos utilizados en el presente proyecto son para uso interior, con posibilidad de una frecuente exposición al agua fluyendo o condensada por corto plazo y con exposición a alta humedad, también para exterior no expuesto a la intemperie (clima).

Para las pruebas de resistencia mecánica y de control de calidad tanto de las vigas como del adhesivo se utilizaron las siguientes normas ASTM: D-198 (ASTD, 1999), D-5055 (ASTD, 2000b), D-4688 (ASTD, 1990), D-143 (ASTD, 2000a), D-245 (ASTD, 2000c), D-2555 (ASTD, 1998). La norma D-5055-00 establece una relación de la distancia entre apoyos y el peralte (altura) de las vigas. Esto permite hacer comparaciones con otros materiales ensayados manteniendo la misma relación. Una relación mayor indica que la viga es más larga que alta. Así, una relación más baja indica una viga más corta. Por lo general, las relaciones altas son las que se usan para estudiar vigas sometidas a flexión. Por esta razón solamente se muestran los resultados de Módulo de Elasticidad para las relaciones de la longitud entre la altura de la viga de 12.7. Incluso, la norma establece relaciones L/h^2 de 18 o más. Sin embargo, por las limitaciones del equipo de ensayos, no fue posible ensayar vigas de mayor longitud.

Corta, extracción y preparación del material

Para la selección del material se realizó una visita a una plantación de amarillón, ubicada en el Campus de la Sede Regional del Instituto Tecnológico de Costa Rica en Santa Clara de San Carlos, provincia de Alajuela, de donde se extrajo la madera a utilizar. Se cortaron alrededor de 200 árboles, de los cuales se obtuvo 419 trozas con un diámetro promedio de 16 cm y de 2.6 m de longitud.

El proceso de aserrío se realizó mediante el uso de una sierra circular doble y una reaserradora múltiple en el CIIBI (Centro de Investigación en Integración Bosque-Industria) del Instituto Tecnológico de Costa Rica. El grupo completo de trozas se utilizó para la determinación del Factor de Recuperación de la madera (FRM), en la elaboración de las partes de las vigas, esto es, piezas de 3.8 x 9.5 cm para las alas y almas; y de 1.7 x 9.5 cm para el alma de la viga. La madera fue directamente tratada (en verde) por medio del método de preservación inmersión-difusión, con una solución de boro (Acido Bórico y Borato de Sodio) durante 22 días. Con el tratamiento preservante se busca solventar la percepción de los usuarios de que la madera es poco durable y al mismo tiempo se estaría compitiendo con productos de madera importados, como los pinos que usualmente se venden en el mercado con tratamiento preservante. El tratamiento de inmersión-difusión se escogió por ser un procedimiento simple, de fácil aplicación y con sustancias de muy baja toxicidad para los mamíferos. Dicho tratamiento consistió en la inmersión rápida (4 minutos) de las muestras húmedas, en una solución de 1 parte de ácido bórico por 1.5 partes de borato de sodio (borax). La mezcla de boratos se preparó en seco, lo que facilitó su disolución en agua. La solución final se preparó a una concentración del 12% (peso/volumen). Después de la inmersión

² L = longitud de la viga; h = altura de la viga

rápida se les dejó en un período de difusión durante 3 semanas. Posteriormente, varias muestras fueron cortadas transversalmente por la mitad y se les midió la penetración mediante un método colorimétrico, con la aplicación de una solución de cúrcuma en alcohol y una solución de ácido salicílico en alcohol y ácido clorhídrico, lo que hace resaltar la presencia de boro en la madera, al tornarse de un color rojo fuerte.

La madera fue apilada en una secadora experimental (tipo convencional) marca Nardi®, utilizando separadores de 16 mm de espesor. Además, se midieron las torceduras y grietas en la madera aserrada seca, en las piezas saneadas, procesadas y rectificadas, así como en las vigas. Una vez finalizado el proceso de secado se procedió a la elaboración de los elementos de las vigas (Figuras 2, 3 y Anexo), siguiendo la secuencia de operaciones de la Figura 4.

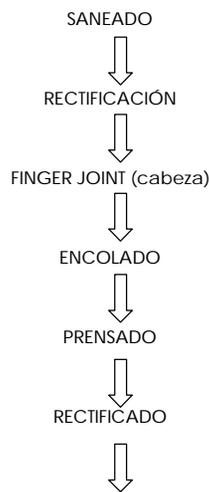


Figura 4. Diagrama del proceso de elaboración de vigas I.

Pruebas experimentales

El diseño y elaboración de las vigas se planteó para cuatro tipos diferentes, con las cuales se pretende comprobar el efecto de los principales factores incluidos en el desarrollo experimental de las vigas. Para ello, se realizó un experimento con un diseño factorial 2^f con tres factores y dos niveles por factor.

Con este experimento factorial, se probaron dos tipos de almas (delgada y gruesa), dos tipos de peraltes (alto y bajo) y dos tipos de marcas comerciales de adhesivos PVAc disponibles en el país, utilizándose tres repeticiones para un total de 24 unidades experimentales (vigas). La variable de respuesta (variable dependiente) a medir, fue la resistencia de las vigas en ensayos de flexión estática. También, se realizaron ensayos de resistencia a la tensión y a la flexión (ASTM D-4688), utilizando tres tipos de adhesivos (PVAc Franklin International, PVAc Akzo Nobel y MUF Akzo Nobel), con el fin de determinar el comportamiento de las uniones de dedo microdentadas.

Prueba de mercado

Una vez elaboradas las vigas I se realizaron entrevistas a 17 personas, distribuidas así: 4 ingenieros civiles e ingenieros en construcción, 6 arquitectos y 7 maestros de obras. La entrevista tuvo como objetivos:

1. Identificar las ventajas y desventajas que presenta la madera, respecto a los materiales constructivos, como lo son los metales y aquellos a base de cemento.
2. Determinar la percepción de las características técnicas principales de las vigas I, a saber: rectitud, uniones, defectos, preservación, secado y resistencia mecánica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aserrío

El volumen total de la madera en troza utilizado fue de 22.741 m³, de los cuales se obtuvo 7.228 m³ para un rendimiento de madera aserrada sobre un volumen en troza de 31.78%. Este resultado es considerado normal para el tamaño de trozas (16 cm de diámetro) empleadas de raleos procesados en el país.

Preservación

Las pruebas preliminares hechas a las probetas, permitieron determinar el tiempo apropiado que garantizará una penetración suficiente del boro en la madera. Se logró determinar que para las piezas gruesas simplemente aserradas (3.8 x 9.5 cm) una duración de 22 días de difusión fue suficiente. Además, por experiencias previas con otras especies (teca y melina), este procedimiento ha dado buenos resultados. Las pruebas colorimétricas demostraron lo anterior.

Secado

El programa de secado permitió secar tanto la madera gruesa como la delgada con relativa facilidad en cuanto al tiempo de duración, ya que en 14 días permitió disminuir el contenido de humedad de 44% a un valor entre 10-13%.

Con respecto a la calidad de la madera seca, medida por las grietas y torceduras, los resultados no fueron tan buenos. En el Cuadro 1 se presentan los resultados de las mediciones, tanto de torceduras como de grietas.

Cuadro 1. Torceduras y grietas en piezas secas de *Terminalia amazonia* procesadas y en vigas.

Elemento	Encorvadura	Arqueadura	Abaleo	Grietas (n)	Grieta más larga	Grieta más profunda
Pieza de 38 mm	9.61	14.12	8.78	2.33	621.3	34.88
Pieza de 32.8 mm procesada	1.49	2.23	0.64	0	0	0
Pieza de 17 mm	7.53	30.96	7.62	1.5	101.6	16.08
Pieza de 12.8 mm procesada	1.98	6.40	1.5	0	0	0
Viga tipo I	1.45	1.69	-	-	-	-

En este cuadro se puede notar claramente la disminución lograda en torceduras en las piezas de madera aserradas y secas con relación a las piezas procesadas. También es claro que en las piezas procesadas, las grietas fueron eliminadas del todo. Finalmente, en las vigas sólo se presentaron magnitudes muy pequeñas de arqueadura y encorvadura.

Procesamiento secundario

El volumen total de madera aserrada seca fue de 7.228 m³ de los cuales 1.273 m³ se utilizaron en la fabricación de las vigas I. Además de las vigas se obtuvo producto procesado por 0.9654 m³ para un rendimiento de producto terminado de 30.97% (vol. producto/vol. madera aserrada seca). El rendimiento global considerando el volumen de materia prima en troza fue de 9.87% (vol. producto/vol. madera troza).

El rendimiento esperado de producto utilizando trozas de raleos (16 cm de diámetro promedio) es el escenario de menor rendimiento esperado, tanto por el diámetro de trozas tan pequeño, así como por el elevado logro de saneo (eliminación de defectos) que se debe efectuar para fabricar vigas relativamente homogéneas y rectas. Esto se puede apreciar claramente por la longitud promedio de piezas saneadas de 52.78 cm (rango 19-82 cm). Por otro lado, esto quiere decir que una materia prima en troza de mayor diámetro promedio permitirá lograr rendimientos superiores. Posiblemente una mezcla de trozas de primeros raleos y de raleos intermedios sea lo más recomendable y equilibrado para la producción de las vigas.

Desarrollo de prensa mecánica

La fase de fabricación de las vigas se realizó con maquinaria disponible en el CIIBI y además se desarrolló una prensa mecánica sencilla (Figura 5). Después de varios ensayos, se determinó que la presión es adecuada cuando al ejercerla, la cola se reboza tanto en la parte superior como en la parte inferior de la unión de dedo y esto se logró con un torque de entre 30-50 lb-pie.



Figura 5. Diseño de prensa mecánica para las uniones dedo (finger joint) de alas y almas y el ensamblado final.

Referente a la tolerancia para realizar la unión entre el alma y el ala de la viga, se recomienda de acuerdo con los fabricantes de adhesivos un ± 0.15 mm como un lineamiento general. Sin embargo, la variabilidad del material utilizado (madera juvenil, madera de reacción), unido al comportamiento anisotrópico e higroscópico de la madera, hace difícil contemplar estrictamente esta tolerancia. Más bien, la práctica de observar la unión en donde el adhesivo se rebose al ejercer la presión y la utilización de una cuerda que mantuviera el ala lo más recta posible, fue lo que al final probó ser efectivo.

Ensayos mecánicos en vigas I

La evaluación de los resultados indicó que el tipo de adhesivo no tuvo efectos significativos en la resistencia de las piezas. En general el módulo de ruptura de las vigas ensayadas (Cuadro 2), es menor que el obtenido para madera sólida libre de defectos con la misma edad de 9 años (Solís y Moya, 2003). El esfuerzo cortante máximo es también, en promedio, menor que el de madera sólida libre de defectos de igual edad. Estos resultados son predecibles, dado que los ensayos

según la norma ASTM 143, se realizan con madera libre de defectos y en condiciones de ensayo a escala reducida, por lo que los valores son mayores.

Cuadro 2. Promedio de módulo de ruptura, módulo de elasticidad y esfuerzo cortante máximo, según relación distancia entre apoyos a peralte (L'/h), tipo de adhesivo, espesor del alma y peralte de la viga con madera de *Terminalia amazonia*.

Relación (L'/h)* nominal	Tipo de adhesivo	Espesor del alma	Peralte de la viga	Valores estadísticos**	Módulo de ruptura (kg/cm^2)	Módulo de elasticidad (kg/cm^2)	Esfuerzo cortante máximo (kg/cm^2)	
12.7	Franklin	Delgada	Alto	Promedio	223	103206	53	
				D.E.	71	8312	16	
				n	4	4	4	
			Bajo	Promedio	241	134531	79	
			D.E.	25	15745	10		
			n	3	3	3		
		Gruesa	Alto	Promedio	307	106224	34	
			D.E.	35	3200	4		
			n	3	3	3		
		Delgada	Bajo	Promedio	365	156003	49	
			D.E.	63	8998	8		
			n	3	3	3		
		Akzo Nobel	Delgada	Alto	Promedio	207	98741	52
				D.E.	22	3509	5	
				n	3	3	3	
			Bajo	Promedio	270	127349	84	
			D.E.	33	32026	10		
			n	3	3	3		
	Gruesa	Alto	Promedio	268	104195	30		
		D.E.	101	1941	12			
		n	3	3	3			
		Bajo	Promedio	386	159034	52		
		D.E.	90	15394	12			
		n	3	3	3			

* (L'/h): Distancia entre apoyos a peralte

**D.E.: Desviación estándar

La forma de falla más común fue cortante horizontal en el alma (Figura 6a), seguido por el inicio de la falla en la unión alma-ala que continúa a 45° sobre el alma y sigue cerca de la unión alma-ala superior (Figura 6b). También fue común la falla en la unión ala-alma. Es importante indicar que las fallas ocurrieron en la madera y no en la unión dedo ni en la línea de cola de la unión alma-ala; esto es un buen indicador de que el proceso de fabricación y encolado, así como las características de adhesión de la madera de amarillón son adecuados.

Las resistencias relativas, según las diferentes combinaciones de espesor de alma, peralte y relación longitud/altura empleadas en los ensayos, no muestran diferencias significativas para la mayoría de las combinaciones con una relación longitud/altura de 12.7.



Figura 6. Principales fallas de las vigas en el ensayo de flexión. Madera de *Terminalia amazonia*.

Las pruebas de resistencia para flexión estática de probetas con uniones de dedo, obtenidas de piezas hechas mediante el proceso de fabricación de las vigas perfil I, fueron satisfactorias. El módulo de elasticidad (MOE) para dichas probetas de amarillón está por encima del amarillón de plantación de 6 años reportado y presenta un valor similar para la madera de bosque natural.

Con respecto al módulo de ruptura (MOR) los valores de estas probetas están por encima del valor reportado seco del amarillón de plantación de 6 años, y un poco menores (alrededor de un 30%) para los valores de amarillón de bosque natural de Nicaragua y Panamá. Es importante destacar que la mayoría de las fallas se dieron en las uniones de dedo (situación normal) y no hubo ninguna falla en la línea de cola. Esto también es un indicativo de una buena calidad tanto de la unión de dedo, del maquinado general, así como del proceso de encolado y prensado. En resumen, esto significa que se ha fabricado un producto (vigas I) con uniones dedo de buena calidad. Lo anteriormente expuesto fue verificado por el tipo de falla presentado en los ensayos mecánicos de las vigas.

De acuerdo con trabajos previos para este tipo de productos en el país (Tuck y Picado, 1981), cuando las vigas trabajen en forma conjunta se recomienda un factor de seguridad de 1.5 y para las que trabajen en forma individual un factor de seguridad de 2.1. Para las vigas del presente estudio se podría utilizar un factor de seguridad de 2 cuando éstas trabajen en conjunto y de 2.8 para las que trabajen de forma individual. Para estimar las deflexiones bajo carga permanente más carga de servicio, se recomienda un factor de magnificación de 2.0.

Prueba de mercado

El primer resultado importante que se debe destacar, es que todos los encuestados conocen relativamente bien la madera como material de construcción. Esto indica que a pesar de que la madera ha experimentado un proceso acelerado de sustitución, las personas involucradas con la construcción siguen utilizando la madera. Dentro de los usos más frecuentes que le dan a este material en la construcción, se encuentran las estructuras de entepiso, divisiones y techos. Además, reportan que han utilizado en algún momento la madera de plantación y estiman que las principales desventajas que tiene la madera de plantación es que es muy joven, lo que repercute directamente en cuanto a torceduras, nudos, dificultad para la consecución de tamaños grandes, presencia de madera con médula y baja resistencia mecánica. A pesar de esto, los consultados están conscientes de que las principales ventajas de utilizar maderas plantadas, se relacionan con consideraciones ecológico-ambientales y de sostenibilidad. Las dos desventajas mencionadas más frecuentemente tienen que ver con la durabilidad y la menor resistencia mecánica de la madera, con respecto a otros materiales. Sin embargo, las principales ventajas tienen que ver con la versatilidad de transformación de la madera y su apariencia.

Es importante considerar que el total de los entrevistados manifestó su anuencia a utilizar las vigas I, con las especificaciones técnicas que se les comunicó. Sin embargo, consideran que si un producto como este se introduce al mercado, es de suma importancia mantener una adecuada disponibilidad y tiempos de entrega reducidos. En síntesis, pareciera que este producto tiene un mercado disponible en el sector de la construcción costarricense, por lo que sería recomendable iniciar su fase de producción, así como diseñar y fabricar modelos a escala real de las posibles aplicaciones de las vigas.



Figura 7. Vigas de perfil I de madera de *Terminalia amazonia* utilizadas como cerchas en una casa.

Análisis económico

Las vigas desarrolladas en esta investigación son de cuatro tipos diferentes, a saber: peralte alto-alma delgada y peralte alto-alma gruesa, peralte bajo-alma delgada, peralte bajo-alma gruesa.

El sistema de producción analizado considera la fabricación de 400 vigas mensuales (25% de cada tipo de viga). En la práctica, esto dependerá del mercado disponible para cada una de estas vigas y probablemente la proporción de producción tendrá que ser ajustada.

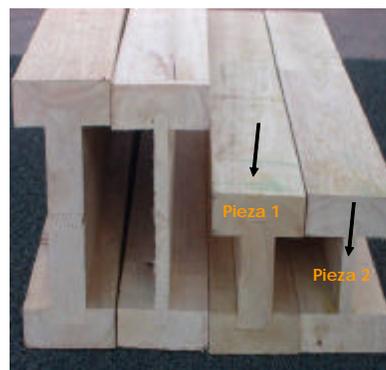


Figura 8. Vigas de madera de *Terminalia amazonia* desarrolladas en el presente proyecto.

Nota: obsérvese que las vigas están hechas de solamente dos piezas básicas.

El estudio de tiempos y el cálculo de maquinaria permitieron estimar los requerimientos de personal, de mano de obra directa, de personal de supervisión, para la consecución de la materia prima y proveeduría general, así como el personal administrativo y gerencial para la actividad comercial. En este caso la mano de obra directa lo constituyen ocho personas, un jefe de producción, un encargado de consecución de materia prima, un gerente general y una secretaria. En Costa Rica, este ejemplo de empresa, podría considerarse como mediana.

El precio calculado de venta varía de US\$45 a US\$78 por viga de 6 m de longitud. Esto cubriría los costos totales y se incluyó alrededor de un 20% de margen de ganancia para estimar el precio de venta.

A manera de comparación, se escogió las vigas de “perling” que actualmente son comercializadas en el país. Por ejemplo, una viga de este tipo que utiliza dos “perlings” soldados en caja de 20.32 x 0.3175 cm (8” x 1/8”) (costo del material US\$110) con acabado anticorrosivo, dos manos de pintura y el transporte en un radio de 10-15 km tiene un costo total de US\$165. Esta viga podría ser comparable a la viga de madera de amarillón de peralte alto (8”) de alma gruesa, que tendría un precio de venta de US\$78. Sin embargo, para no ser tan optimistas, la misma comparación se

podría hacer para una viga de dos “perlings” soldados en caja de 6” x 1/8” (costo del material US\$88) y los costos de acabados y transporte a una distancia similar tendría un costo total de US\$120. En ambos casos, pareciera que la viga de madera podría competir favorablemente en el mercado.

Este breve análisis indica claramente que los costos del metal se han incrementado recientemente en proporciones considerables (aproximadamente 50% en el año 2004). Por otro lado, esto podría significar una oportunidad para la introducción de este producto en el sector de la construcción residencial y comercial, incluyendo un adecuado plan de mercadeo y comercialización.

Según el análisis económico y de rentabilidad, el costo más alto es el de la materia prima, que representa un 53.75% del costo total, seguido por los costos variables que representan un 32.0%, por lo que la utilidad neta del proceso de producción de vigas de madera de perfil I, puede mejorar si se utiliza una materia prima de menor costo, si se aumenta el rendimiento de producción, o bien, si se aumenta el precio del producto terminado.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para el proceso de investigación y desarrollo de las vigas I de madera de amarillón, se utilizó un volumen total de madera en troza de 22.741 m³, de los cuales se obtuvo 7.228 m³ para un rendimiento de madera aserrada sobre volumen en troza de 31.78%. Para el tamaño de troza utilizado, se concluye que éste es un rendimiento normal para el producto obtenido.

En relación con el sistema de preservación empleado (inmersión–difusión con solución de boratos), se concluye que para piezas gruesas simplemente aserradas (3.8 x 9.5 cm) una duración de 22 días de difusión es suficiente. Experiencias previas con otras especies (teca y melina), en Costa Rica indican que este procedimiento es adecuado, las pruebas colorimétricas así lo demostraron.

El programa de secado permitió secar tanto la madera gruesa (38 mm) como la delgada (7 mm) con relativa facilidad en cuanto al tiempo de duración, ya que en 14 días permitió disminuir el contenido de humedad de 44% a un valor entre el 10 y 13%. El secado se considera rápido, pero no de muy buena calidad en cuanto a distorsiones, por aspectos propios de la especie (madera juvenil, madera de reacción, médula incluida, nudos y otros).

El volumen total de madera aserrada seca fue de 7.228 m³, de los cuales 1.273 m³ se utilizaron en la fabricación de las vigas I. Además de las vigas, se obtuvo producto procesado por 0.9654 m³ para un rendimiento de producto terminado de 30.97% (vol. producto/vol. madera aserrada seca).

Como parte fundamental del proceso de fabricación de las vigas I, se desarrolló una prensa mecánica sencilla, como un accesorio, que pueda ser fabricado en talleres industriales locales.

La evaluación de los resultados de los ensayos mecánicos, indicó que el tipo de adhesivo no tuvo efectos significativos en la resistencia de las piezas y de las vigas ensambladas. Las resistencias relativas según las diferentes combinaciones de espesor de alma, peralte y relación longitud/altura empleadas en los ensayos, no muestran diferencias significativas para la mayoría de las combinaciones con una relación longitud/altura de 12.7.

La forma de falla más común fue cortante horizontal en el alma, seguido por el inicio de la falla en la unión alma-ala que continúa a 45° sobre el alma y sigue cerca de la unión alma-ala superior. También fue común la falla en la unión ala-ala. Es importante indicar que las fallas ocurrieron en la madera y no en la unión dedo, ni en la línea de cola de la unión alma-ala. Esto representa un

buen indicador de que el proceso de fabricación y encolado, así como las características de adhesión de la madera de amarillón son adecuados

De acuerdo con trabajos previos para este tipo de productos en el país, cuando las vigas trabajen en forma conjunta, se recomienda un factor de seguridad de 1.5 y para las que trabajen en forma individual, un factor de seguridad de 2.1. Para las vigas del presente estudio se podría utilizar un factor de seguridad de 2 cuando éstas trabajen en conjunto y de 2.8 para las que trabajen de forma individual. Para estimar las deflexiones bajo carga permanente, más carga de servicio, se recomienda un factor de magnificación de 2.0.

En general, tanto los ensayos de flexión como de tensión realizados, comprueban la buena calidad de las uniones tipo dedo (finger joint) de las vigas I desarrolladas.

La maquinaria y el equipo utilizado en el proceso de fabricación de las vigas I, está disponible en talleres pequeños y medianos en el ámbito nacional.

El cálculo de maquinaria requerida, se hizo para una empresa mediana que haya alcanzado un nivel de producción de 400 vigas por mes (100 vigas de cada tipo diseñada). La inversión requerida inicialmente es de US\$40 000 y la planta se puede establecer en un área de alrededor de 300 m², con una mano de obra directa de ocho personas.

Según los resultados de las pruebas de mercado realizadas, pareciera que este producto tiene un espacio disponible en el sector de la construcción costarricense.

Según el análisis económico y de rentabilidad, el costo más alto es el de la materia prima, que representa un 53.75% del costo total, seguido por los costos variables que representan un 32.0%, por lo que la utilidad neta del proceso de producción de vigas de madera tipo I, puede mejorar si se utiliza una materia prima de menor costo, si se aumenta el rendimiento de producción, o bien, si se aumenta el precio del producto terminado.

AGRADECIMIENTOS

Al Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO), Centro de Investigación en Integración Bosque-Industria (CIIBI), Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) por el apoyo en financiamiento, en personal técnico y en el uso de las facilidades para la ejecución de este proyecto.

A los ingenieros Freddy Muñoz, Alexander Berrocal, Guillermo González, Rafael Córbova, Aldo Ramírez, Olman Murillo, Francisco Monge y Ronny Brenes del ITCR, por su apoyo y colaboración para la consecución del material, recomendaciones y asesoramiento general, así como en el procesamiento y evaluación de datos.

A los señores Carlos Peña, Fabián Coto, Adrián Gutiérrez, Ronald Rojas, David Acuña, José Antonio Córdoba y Alberto Quesada también del ITCR, por su apoyo logístico. A la Sra. Ana Yancy Soto y al Sr. Julio César Campos de la sede regional del ITCR en San Carlos por la valiosa ayuda brindada durante el proceso de selección, corta y extracción de la madera utilizada.

Finalmente al Sr. Baldomero Salas (técnico privado en mantenimiento y construcción de equipos para el procesamiento de la madera), por su contribución para el desarrollo de la prensa.

BIBLIOGRAFÍA

- ASTM (American Society for Testing and Materials, US). 1990. Standard test methods for evaluating structural adhesives for finger jointing lumber. ASTM D-4688. Pennsylvania, West Conshohocken, US, ASTM. 7 p.
- _____. 1998. Establishing clear wood strength values. ASTM D-2555. Pennsylvania, West Conshohocken, US, ASTM. 16 p.
- _____. 1999. Standard methods of static tests of timbers in structural sizes. ASTM D-198. Pennsylvania, West Conshohocken, US, ASTM. 20 p.
- _____. 2000a. Establishing structural grades and related allowable properties for visually graded lumber. ASTM D-245. Pennsylvania, West Conshohocken, US, ASTM. 16 p.
- _____. 2000b. Standard methods of testing small clear specimens of timber. ASTM D-143. Pennsylvania, West Conshohocken, US, ASTM. 31 p.
- _____. 2000c. Standard specification for establishing and monitoring structural capacities of prefabricated wood – I Joints. ASTM D-5055. Pennsylvania, West Conshohocken, US, ASTM. 20 p.
- Forintek Canada Corp. 2002. Wood- frame construction, fire resistance and sound transmission. Québec, CA, CMHC-SCHL, Société d'habitation, 12 p.
- Jerger, EL; Torres, F. 1995. Finger jointing pine lumber. *In* 23rd Forest Product Machinery and Equipment Exposition. Atlanta, US. 18 p. (Separated document).
- Leicester R. 2000. Why the stampede to engineered wood? Building innovation & Construction Technology. Number 11. (en línea). Consultado 13 de mayo 2003. Disponible en <http://cmit.csiro.au/innovation/2000-02/index.htm>
- Martínez, E. 1990. La madera y su uso. Boletín técnico N° 24. Iztapalapa, MX; Universidad Autónoma Metropolitana. Instituto de Ecología. Departamento de Materiales. Laboratorio de Ciencia y Tecnología de la Madera. 36 p.
- Serrano, JR. 2004. La madera: Propiedades principales, ventajas, limitaciones y su aportación al desarrollo forestal en Costa Rica. *In* Seminario Tecnología de los Materiales, (2004, San José, CR). San José, CR, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Esc. Ing. Forestal. 9 p.
- Serrano, JR; Sáenz, M. 2004. Tecnología e innovación de estructuras de madera para el sector de la construcción: Vigas de perfil I de amarillón de plantación. Proyecto Ecomercados-Reforesta. San José, CR, FONAFIFO, MINAE. 177 p.
- Solís, M; Moya, R. 2003. *Terminalia amazonia* en Costa Rica. Guía silvicultural. San José, CR. Fondo Nacional de Financiamiento Forestal. 100 p.
- Tuck, J; Picado, F. 1981. Diseño y ensayo de vigas de madera compuestas. Tecnología en Marcha 4(1):9-16.

Cuadro 3. Glosario, abreviaturas y símbolos.

Término	Significado
Ala de viga de perfil I	Piezas de los extremos de la viga (Figura 3).
Alabeo	Es la deformación que puede experimentar una pieza de madera por la curvatura de sus ejes longitudinales, transversales o de ambos.
Alfajillas	Piezas de madera con medidas de sección transversal de 50 x 50 mm; 50 x 75 mm o 50 x 100 mm, utilizadas en construcción general.
Alma de viga de perfil I	Es la parte central que sirve como base para la formación de la viga (Figura 3).
Amarillón	Nombre común asignado al árbol <i>Terminalia amazonia</i> en Costa Rica.
Anisotrópico	Propiedad de ciertos materiales que como la madera, presentan características diferentes según la dirección que se considere (longitudinal, radial o tangencial).
CIIBI	Centro de Investigación en Integración Bosque Industria del ITCR.
CIVCO	Centro de Investigación en Vivienda y Construcción del ITCR.
CONICIT	Consejo Nacional para Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Costa Rica.
Costos variables	Mano de obra, electricidad, mantenimiento, suministros y otros.
Deflexiones	Desviaciones de la dirección rectilínea al aplicar carga.
Difusión	Acción y efecto de difundir una solución líquida dentro de la madera.
Esfuerzo cortante	Fuerzas paralelas y de igual magnitud pero de sentido contrario que tienden a separar (cizallar/cortar) las fibras en sentido perpendicular o paralelo a las mismas.
Factor de recuperación de la madera (FRM)	Rendimiento de la madera aserrada expresado como porcentaje del volumen de la madera en troza.
Finger joint	Termino técnico en idioma ingles. (Véase Uniones tipo dedo)
FONAFIFO	Fondo Nacional de Financiamiento Forestal, Costa Rica.
Higroscópico	Capacidad de materiales porosos como la madera de absorber o ceder humedad de acuerdo a las condiciones de humedad relativa del aire.
I&D	Investigación y desarrollo.
Inmersión	Acción de sumergir la madera en un fluido (por ej. líquido preservante de madera).
ITCR	Instituto Tecnológico de Costa Rica.
L/h	Es la longitud entre apoyos de la viga dividida por la altura de la misma (relación).
LVL	Siglas en inglés (Laminated Veneer Lumber). Es la madera estructural fabricada de chapas laminadas para formar un panel con las chapas dispuestas (todas) en forma paralela a ellas mismas.
MacMillan	Véase Truss joist

Continúa en la siguiente página

Término	Significado
Madera de reacción	Madera con caracteres anatómicos distintivos que se han formado en partes de fustes y ramas inclinadas. En las maderas de hoja ancha consiste en madera de tensión, mientras que en las coníferas en madera de compresión.
Madera juvenil	Es la madera formada en las primeras etapas del desarrollo de un árbol, y que presenta propiedades diferentes a la madera madura, la cual está delimitada a los anillos de crecimiento más cercanos a la médula.
Médula	Parte pequeña, generalmente suave, que se presenta cerca del centro del fuste o las ramas de los árboles. En algunos casos es conocida como “corazón” de la madera.
Módulo de elasticidad (MOE)	Valor que indica la capacidad elástica de un material para recuperar la forma original cuando se ha sometido a la acción de una fuerza y posteriormente se elimina la misma. Este valor es usado por los ingenieros estructurales para estimar la deflexión y deformación de elementos estructurales bajo la acción de cargas.
Módulo de ruptura (MOR)	Valor que indica la carga máxima por unidad de área en la que un elemento de madera falla por ruptura. Este valor es usado por los ingenieros estructurales para estimar los esfuerzos de trabajo y diseño de estructuras, considerando varios factores de reducción y de seguridad.
Peralte	Altura de la viga (Figura3).
Torque	Es el momento producido por una fuerza que causa una tendencia de torsión y rotación sobre un eje.
Truss joist	Ensamble de miembros de madera para formar una estructura tal como una viga, cercha, barra, barilla, etc., en el que todos sus miembros interconectados producen formas triangulares.
Uniones tipo dedo	Junta de extremo hecha de varias cuñas entrelazadas o dedos de madera que se unen por medio de un adhesivo. Los dientes tienen una pequeña pendiente y pueden ser cortados en forma paralela a la cara o al canto de la pieza de madera (ver anexo).
Vigas I	Tipo de estructura. (véase vigas tipo perfil I).
Vigas tipo perfil I	Viga compuesta cuya vista transversal se asemeja a la letra I (Figura 8).
Vol. producto / vol. madera aserrada seca	Rendimiento expresado como porcentaje del volumen de producto entre el volumen de madera seca.
Vol. producto / vol. madera troza	Rendimiento expresado como porcentaje del volumen de producto entre el volumen de madera en troza.

Anexo

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

TECNOLOGIA E INNOVACIÓN DE ESTRUCTURAS DE MADERA PARA EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN



vigas

I DE AMARILLON

CENTRO DE INVESTIGACION EN INTEGRACION BOSQUE -INDUSTRIA, CIIBI

Para ampliar información sobre este proyecto, puede realizar los contactos a los teléfonos del CIIBI (506) 550 2266; (506) 550 2531 ó al fax (506) 591 3315.