

FICHA TÉCNICA DE VIGAS DE MADERA LAMINADA A FLEXIÓN

JUAN DIEGO ARBELÁEZ ALZATE

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Javier Arbeláez Gómez

Ingeniero Químico



**ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA
INGENIERIA CIVIL
ENVIGADO
2013**

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento a todas las personas quienes directa o indirectamente colaboraron con el desarrollo del proyecto

Al personal asociado y no asociado de Inmunizadora Colombia S. A. S. quienes mediante su apoyo técnico acompañaron el proceso.

A los Ingenieros Carlos Andrés Blandón Uribe y María del Pilar Duque Uribe.

Finalmente a mi director y padre Javier Arbeláez Gómez quien ha sido timón y vela en mi vida.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	12
1. PRELIMINARES.....	14
1.1 Planteamiento del problema	14
1.1.1 Contexto y caracterización del problema	14
1.1.2 Formulación del problema	16
1.2 Objetivos del proyecto	17
1.2.1 Objetivo General.....	17
1.2.2 Objetivos Específicos	17
1.3 Marco de referencia.....	18
1.3.1 Proceso de laminado.....	19
1.3.2 Pegantes	25
2. METODOLOGÍA.....	29
2.1 ETAPA 1. ESTABLECIMIENTO DE PARÁMETROS DE LAMINACIÓN	29
2.1.1 Recolección de información técnica.....	29
2.1.2 Establecimiento del proceso de fabricación	29
2.2 ETAPA 2. IDENTIFICACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS.....	30
2.3 ETAPA 3. ELABORACIÓN DE FICHAS TÉCNICAS.....	31
3. DESARROLLO DEL PROYECTO	32
3.1 Fabricación.....	32
3.1.1 Trozado y desorillado de la madera.....	32
3.1.2 Secado.....	33

3.1.3	Fabricación de lamelas.....	35
3.1.4	Unión de lamelas.....	37
3.1.5	Cepillado	38
3.1.6	Encolado	38
3.1.7	Prensado.....	39
3.1.8	Acabados finales	39
3.1.9	Pruebas sobre la línea de cola	39
3.2	Obtención de las propiedades MECÁNICAS	41
3.2.1	Conformación del ensayo.....	41
3.2.2	Metodología del ensayo.....	43
3.2.3	Valores característicos	45
3.2.4	Asignación de las clases resistente de la madera laminada encolada.	45
3.3	Elaboración de fichas técnicas	47
3.3.1	Bases de cálculo	47
3.3.2	Cargas de diseño	52
3.3.3	Tablas de diseño	56
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	58
4.1	Prueba de calidad sobre la línea de cola.	58
4.2	Hipótesis de falla en la calidad de la línea de producción en EPI.	60
4.3	Caracterización mecánica de vigas laminadas	62
4.3.1	Resultados obtenidos	62
4.3.2	Hipótesis de falla	64
4.3.3	Determinación de las propiedades mecánicas.....	67
4.3.4	Asignación de las clases resistente.	72

4.4	Tablas de diseño	73
4.4.1	Tabla diseño de alfardas	73
4.4.2	Tabla diseño de vigas.....	74
5.	CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES	76
5.1	Conclusiones.....	76
5.2	Recomendaciones.....	78
	BIBLIOGRAFIA.....	79

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1 Taxonomía del pino Pátula (Pinus Pátula) (Nacional)	18
Tabla 2 Propiedades mecánicas del Pino Pátula	19
Tabla 3 Propiedades MUF (AkzoNobel, 2009).....	27
Tabla 4 Propiedades EPI (AkzoNobel, 2011).....	28
Tabla 5 Parámetros de laminación	58
Tabla 6 Peso probetas.....	59
Tabla 7 Resultados de aprobación	59
Tabla 8 Probetas reprobadas MUF	60
Tabla 9 Probetas reprobadas EPI.....	60
Tabla 10 Re testeo EPI.....	61
Tabla 11 Probetas reprobadas re testeo EPI	61
Tabla 12 Resultados de ensayo MUF	63
Tabla 13 Resultados de ensayo EPI	63
Tabla 14 Propiedades mecánicas MUF	68
Tabla 15 Propiedades mecánicas EPI	68
Tabla 16 propiedades a flexión relevantes para la asignación de clase resistente.....	72
Tabla 17 clase resistente GL24h	72
Tabla 18 Tablas ayuda de diseño de alfardas.....	74
Tabla 19 Tablas ayuda de diseño de vigas	75

LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1 zona de menores esfuerzos en vigas (Rosboro, 2013).	21
Ilustración 2 uniones dentadas (Batista, Rodrigo, Calil, & Mariano, 2002).	23
Ilustración 3 Madera del bosque	32
Ilustración 4 Madera trozada	33
Ilustración 5 Madera desorillada	33
Ilustración 6 Horno de secado	34
Ilustración 7 Cortadora tipo Ripsaw	36
Ilustración 8 Proceso de bonificado	36
Ilustración 9 Mesa de armado.....	37
Ilustración 10 Cepillo dos caras	38
Ilustración 11 Marco a reacción	42
Ilustración 12 Celda de carga (Omega engineering, 2013)	42
Ilustración 13 Potenciómetro (Omega engineering, 2013)	43
Ilustración 14 Clases resistentes madera laminada homogénea.....	47
Ilustración 15 Esquema cubierta típica	53
Ilustración 16 Cargas de alfardas	56
Ilustración 17 probetas reprobadas.....	61
Ilustración 18 Falla de la madera a flexión.....	64
Ilustración 19 Falla por diferencia de densidad en la madera	65
Ilustración 20 Falla de la madera en el <i>finger joints</i>	65
Ilustración 21 albura y duramen.....	66

Ilustración 22 Falla en la unión dentada..... 67

Ilustración 23 MOR para EPI y MUF 69

Ilustración 24 MOE para EPI y MUF 70

Ilustración 25 Curva capacidad MUF 71

Ilustración 26 Curva capacidad EPI 71

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla una investigación de los parámetros más relevantes para la producción con calidad de madera laminada estructural en pino Pátula para la empresa Inmunizadora Colombia S. A. S. y validar este proceso mediante el desarrollo de fichas técnicas del producto y ayudas de diseño para la elección de elementos estructurales en cubiertas de madera de dos productos, madera laminada mediante Emulsión Polímero ISO cianato (EPI) y madera laminada mediante Melanina Urea Formaldehído (MUF).

Para lograr este objetivo se construyó un prototipo de viga laminada con los parámetros de laminación recomendados encontrados en la literatura y se evaluó la calidad final del proceso mediante la prueba de calidad sobre la línea de cola en conformidad con la norma BWS JAS 1152. Con esta prueba además de evaluar la línea de cola se encontró la resistencia cuando se somete la madera a condiciones de interperismos la madera.

Para la obtención de la ficha técnica se siguieron los parámetros de la norma “UNE EN 408. Estructuras de madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas” para hallar el módulo de rotura y el módulo de elasticidad y mediante los valores característicos de estos parámetros se realizaron las ayudas de diseño basadas en el Eurocode 5.

A partir de los resultados obtenidos se determina que el proceso de laminación de madera pino Pátula de la empresa Inmunizadora Colombia S. A. S. es exitoso, pues las propiedades mecánicas encontradas sobrepasan las propiedades mecánicas de la madera maciza. Gracias a esto, se logra con éxito la realización de ayudas de diseño ya que las secciones obtenidas concuerdan con las que se manejan comercialmente en el medio.

Palabras clave: Madera laminada, caracterización mecánica, ficha técnica, Pino Pátula.

ABSTRACT

This paper develops an investigation of the most relevant parameters for quality production of Pátula pine structural plywood for the company immunizing Colombia S. A. S. and validate this process by developing product datasheets and design aids for the choice of structural elements in wood covered two products, plywood by Polymer Emulsion ISO cyanate (EPI) and plywood by Melanin Urea Formaldehyde (MUF) .

To achieve this goal was built a prototype laminated beam lamination parameters recommended in the literature and evaluated the final quality of the process through the quality test on the glue line in accordance with JAS BWS 1152. This test and to evaluate the glue line found resistance to wet conditions of the timber.

To obtain the data sheet is followed by the parameters of the "EN 408. Wooden structures. Sawn timber and glulam structural use. Determination of some physical and mechanical properties "to find the modulus of rupture and modulus of elasticity and using the characteristic values of these parameters is performed based design aids in Eurocode 5.

From the results obtained it is determined that the rolling process Pátula pine wood immunizing Colombia company S. A. S. was successful since the mechanical properties found exceeded the mechanical properties of solid wood. Furthermore achievement successfully performing as design aids sections obtained are consistent with those commercially handled in between.

Keywords: Wood laminate, mechanical characterization, data sheet, Pine Pátula.

INTRODUCCIÓN

La explotación de bosque nativo para productos maderables ha pasado de ser una práctica mal vista a una práctica ilegal en el estado Colombiano, cada día los entes ambientales territoriales penalizan más rigurosamente la explotación inapropiada, por lo cual la madera laminada surge como producto sustituto a maderas nativas tradicionales con vocación estructural.

Aunque la madera laminada es un producto ambiental y económicamente viable que tiene amplio uso en el mundo, en Colombia aun es un producto desconocido que tiene poco uso en el sector de la construcción. Inmunizadora Colombia S. A. S., nuevo productor de madera laminada estructural en el país, quiere incursionar en el mercado generando confiabilidad con un producto de calidad.

El mercado de la madera laminada en Colombia ha estado limitado al uso en elementos no estructurales, esto en gran parte por el desconocimiento de las bondades y por las malas experiencias en los pocos intentos de fabricar estructuras en esta madera.

La fabricación de madera laminada requiere un gran conocimiento de su comportamiento y del proceso de fabricación, pues cualquier error en este conlleva a una disminución en las propiedades mecánicas.

Por lo tanto surge la necesidad de crear mecanismo de control que ayuden a estandarizar procesos para obtener productos de calidad estructural. El proceso de fabricación se realiza mediante la investigación de procesos exitosos y la acomodación de estos a la línea de producción de Inmunizadora Colombia S. A. S.

La evaluación del éxito de esos procesos se realiza mediante pruebas de calidad de línea de cola bajo la norma BWS JAS 1152, y se realiza una caracterización mecánica con ensayos a escala natural de vigas laminadas bajo la norma "UNE EN

408. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas”.

Con las propiedades mecánicas encontradas se realiza una asignación de clase resistente bajo la norma UNE EN 1194 “Estructuras de madera. Madera laminada encolada. Clases resistentes y determinación de los valores característicos” y se realizan ayudas de diseño para la elección de elementos estructurales en madera laminada en pino Pátula para estructuras de cubierta típica en teja de barro bajo el Eurocode 5.

1. PRELIMINARES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1 Contexto y caracterización del problema

Si bien es cierto que una de las actividades económicas con las que más se ha beneficiado el hombre es la explotación de bosques para uso forestal, no se pueden desconocer las graves implicaciones ambientales que tiene esta práctica. Una gran cantidad de bosques nativos están siendo arrasados, produciendo altas tasas de deforestación anual y daños irreversibles a ecosistemas, por lo que se hace necesario regular y controlar el tema.

Se han establecido parámetros que sancionan la violación en contra de los recursos naturales en el Código Penal Colombiano, restringiendo cada día más la explotación de dichos recursos, es decir, el artículo 328 del Código Penal tipifica el siguiente delito: “ Ilícito aprovechamiento de los recursos naturales renovables. El que con incumplimiento de la normatividad existente se apropie, introduzca, explote, transporte, mantenga, trafique, comercie, explore, aproveche o se beneficie de los especímenes, productos o partes de los recursos fáunicos, forestales, florísticos, hidrobiológicos, biológicos o genéticos de la biodiversidad colombiana, incurrirá en prisión de cuarenta y ocho (48) a ciento ocho (108) meses y multa hasta de treinta y cinco mil (35.000) salarios mínimos legales mensuales vigentes. La pena se aumentará de una tercera parte a la mitad, cuando las especies estén categorizadas como amenazadas, en riesgo de extinción o de carácter migratorio, raras o endémicas del territorio colombiano.”

Cada día la explotación de bosque nativo se vuelve más inviable económicamente por lo que se debe pasar a prácticas en las se pueda aprovechar el recurso sin tantas implicaciones ambientales y legales. La plantación y explotación de bosques

reforestado es una opción medio ambiental y económicamente viable para disminuir la demanda sobre los recursos no renovables como lo es el bosque nativo.

El actual presidente de Colombia Juan Manuel Santos (2010-2014), dentro de la estrategia de crecimiento y sostenibilidad ha incluido el tema forestal en su plan de gobierno, la meta al finalizar el cuatrienio es llegar a 601.453 hectáreas de las 369.203 hectáreas de bosques comerciales con las que se cuenta actualmente, lo cual equivale a un crecimiento de 62,90% (Redacción M&M).

La madera laminada tiene grandes ventajas en aspectos ambientales ya que al ser producida con madera de bosque comercial ayuda a disminuir la demanda sobre los bosques nativos, además presenta ventajas en aspectos económicos lo que la hace un material con alto potencial para la construcción (Barrera).

La madera laminada se considera como la evolución en términos técnicos de la madera maciza al permitir la fabricación de elementos con mayores dimensiones y mejores propiedades físicas y mecánicas. En el mundo se ha estudiado la técnica de laminado con resultados muy satisfactorios al mejorar significativamente las propiedades mecánicas y físicas respecto a la madera simple aserrada y alcanzando propiedades comparables con las de otros materiales como el acero y el concreto, además de tener una mejor relación peso resistencia lo que la hace un material óptimo para la construcción (Barrera).

Para Javier Arbeláez, Gerente de Inmunizadora Colombia S. A. S (Arbeláez, entrevista personal, 15 de marzo de 2013) el consumo de este material en Colombia ha estado restringido por la falta de conocimiento de sus bondades, lo que explica que su principal uso hasta el momento sea en la fabricación de elementos de ornamentación como escaleras, marcos para ventanas, pisos, entre otros; pero muy pocos con vocación estructural.

Existen prejuicios contra las estructuras de madera laminada pues en sus comienzos el encolado se basaba en colas orgánica altamente sensibles a la humedad, lo que hacía que este producto tuviera altos costos de mantenimiento (Muebles domóticos, 2010). Para Edward Marín, Ingeniero Químico experto en pegantes de Azkonobel (Marín, entrevista personal, 3 de marzo de 2013) este problema ha quedado resuelto con el desarrollo de colas resistentes a la humedad que mejoran mucho el comportamiento de la madera.

1.1.2 Formulación del problema

En el mercado de madera maciza se vienen comercializando secciones que no se ajustan a las necesidades reales que se requieren estructuralmente para la construcción de edificaciones y las pocas que comercialmente se consiguen no son las más ventajosas para empleo estructural. Además, deben realizarse bajo pedidos que en ocasiones tardan entre 15 y 30 días para su producción (Castro).

Para Inmunizadora Colombia, empresa con 19 años de experiencia en el mercado de la madera, es importante implementar un producto de alta calidad que genere confianza como material de construcción y sea competitivo con los estándares de calidad.

Al ser la venta de elementos de madera para cubiertas tipo vigas y alfardas la principal fuente de ingresos de la empresa, se evidencia la necesidad de generar oferta al gremio de la construcción, presentando un producto con propiedades mecánicas obtenidas en laboratorios certificados que generen confianza, de tal manera que sea competitivo frente a otros materiales comunes de la construcción.

Al detectar que uno de los problemas de comercialización de la madera laminada en nuestro país es la falta de confianza en el material debido a los pocos estudios y empresas que han impulsado y promocionado este producto en Colombia, se hace necesario ofrecer un producto respaldado con una ficha técnica que permita orientar

de manera simple la elección de las dimensiones de los elementos estructurales de cubiertas.

En la construcción de estructuras de cubierta en madera se utilizan secciones mayores a las requeridas por solicitaciones de cargas, debido en parte al poco conocimiento que se tiene del material. Al presentar las fichas técnicas con propiedades mecánicas obtenidas por laboratorios homologados se logrará que la construcción de este tipo de estructuras tenga elementos acordes con las solicitaciones de cargas realmente requeridas, lo que disminuirá el costo de construcción apalancando el consumo del material.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.2.1 Objetivo General

Elaborar la ficha técnica para vigas laminadas en Pino Pátula (*Pinus Pátula*) de la empresa Inmunizadora Colombia S. A. S. con propiedades mecánicas a flexión.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Establecer los parámetros de laminación de acuerdo con criterios técnicos y económicos.
- Identificar las propiedades físicas y mecánicas a flexión de las vigas laminadas de la empresa Inmunizadora Colombia S. A. S.
- Elaborar una ficha técnica de vigas laminadas de pino Pátula fabricadas por la empresa Inmunizadora Colombia S. A. S enfocada a su uso en elemento tipo viga y alfarda en estructuras de cubiertas tradicionales de madera

1.3 MARCO DE REFERENCIA

El pino Pátula es una madera originaria de México, se encuentra en los pisos altitudinales Montano bajo y Montano de la región tropical con lluvias del tipo intermedio, entre monzónico y uniforme (Jiménez, 1983).

En la Tabla 1 Taxonomía del pino Pátula (*Pinus Pátula*) (Nacional) se muestra la taxonomía del pino Pátula

Tabla 1 Taxonomía del pino Pátula (*Pinus Pátula*) (Nacional)

Nombre científico	<i>Pinus Pátula schi et cham</i>
Familia	Pinaceae
Sub familia	<i>Abietinae</i>
Nombre vulgar	<i>Pino Pátula, Pino Candelabro, Pino llorón</i>

Se ha introducido en zonas que cumplen las exigencias de su hábitat, y se han obtenido resultados sorprendentes como en África, donde se obtienen hasta 500 metros cúbicos por hectárea (Jiménez, 1983). En Colombia se han obtenido resultados excelentes convirtiéndose en una especie maderable y útil para programas de reforestación (Munera Cardona & Giraldo Alzate, 2005).

El pino Pátula alcanza hasta 40 metros de altura y diámetros de hasta 1,2 metros. Tiene un tronco cónico con ramas desde su parte inferior, que son a su vez las causantes de los nudos que producen concentración de esfuerzos y posibles zonas de falla (Munera Cardona & Giraldo Alzate, 2005).

Las propiedades físico-mecánicas de la madera varían con la edad y con la localización. Por ejemplo, en algunos sitios en Brasil se tienen densidades de

0,322 $\frac{g}{cm^3}$, en Angola a los 15 años densidades de 0,488 $\frac{g}{cm^3}$ y en Kenia a los 17 años densidades de 0,401 $\frac{g}{cm^3}$ (Jimenez, 1983).

El laboratorio de productos forestales de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, ha encontrado que en Colombia las densidades varían entre 0,36 $\frac{g}{cm^3}$ y 0,64 $\frac{g}{cm^3}$ en árboles de la región Piedras Blancas, siendo 0,43 $\frac{g}{cm^3}$ la densidad básica (Jiménez, 1983).

En la Tabla 2 Propiedades mecánicas del Pino Pátula se muestran algunas propiedades mecánicas del pino Pátula encontradas en la región del oriente Antioqueño rotura elasticidad

Tabla 2 Propiedades mecánicas del Pino Pátula

Propiedades mecánicas	Condición de humedad			
			30%	12%
flexión	Esfuerzo en el límite proporcional (ELP)		23.73 MPa	45.7 MPa
	Módulo de rotura (MOR)		40.5 MPa	74.43 MPa
	Módulo de elasticidad x 10 ³ (MOE)		8.42 MPa	9.76 MPa
Compresión	Paralela	ELP	13.63 MPa	25 MPa
		MOR	17.16 MPa	36.48 MPa
		MOE x 10 ³	8.42 MPa	8.42 MPa
	Perpendicular	ELP	13.48 MPa	

1.3.1 Proceso de laminado

La madera laminada tiene un proceso relativamente sencillo pero muy sensible en cada uno de sus pasos, por lo tanto es importante controlar factores como la humedad ambiental, el tamaño de lamelas; cantidad y tipo de adhesivo a utilizar.

Este proceso consiste en pasos muy específicos que cuales son: dimensionamiento de la madera en lamelas, secado, bonificado de la madera, fabricación de las uniones dentadas o *finger joints*, encolado y la aplicación de presión. Cada uno de estos procesos se detalla a continuación.

- **Dimensionamiento de lamelas**

Se desorilla la madera aserrada procedente del bosque en cuartones de cinco centímetros de espesor. Este proceso se realiza en un aserrío horizontal que realiza los cortes con mucha precisión.

Para la elección del espesor del cuartón se tiene en cuenta la optimización de la madera, se recomienda que esta dimensión no sea mayor de 5 cm para obtener un secado en menor tiempo y de mejor calidad. Dimensiones menores de 3 cm son antieconómicas pues se debe utilizar mayor tiempo de máquina y mayor número de líneas de cola.

- **Bonificado**

El proceso de bonificado consiste en seleccionar y desechar los nudos y la madera podrida, lo que permite que este material tenga menos incertidumbre en sus propiedades mecánicas.

En el bonificado se descartan los nudos mayores de media pulgada, y se debe garantizar que los nudos restantes no queden en zonas críticas de esfuerzos cortantes y que no queden en la unión dentada.

La NSR-10 C.9.5 permite el uso de la madera de menor calidad en sitios donde se presenta esfuerzos menores reduciendo los desperdicios de madera al mínimo. La Ilustración 1 zona de menores esfuerzos en vigas (Rosboro, 2013). Muestra las zonas donde se puede utilizar madera de menor calidad.

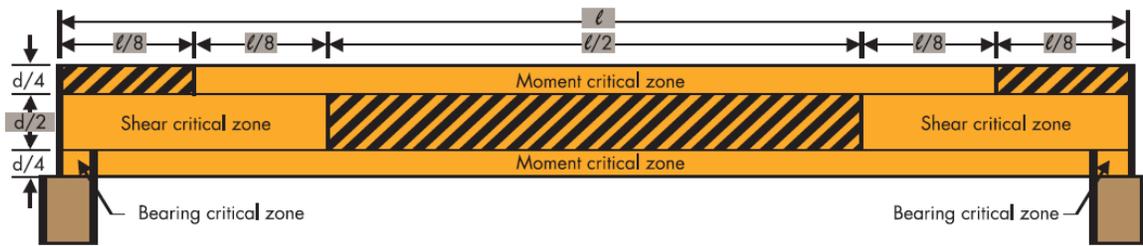


Ilustración 1 zona de menores esfuerzos en vigas (Rosboro, 2013).

○ **Secado**

El secado es uno de los aspectos más importantes en el proceso de la madera laminada, ya que de un buen secado se deriva un buen producto. Los beneficios de la madera seca son muchos, pero entre otros los más importantes para el proceso de laminado son (Foglia, 2005):

- Reducción del peso: la madera seca puede pesar entre un 25 % y 50 % menos que en estado verde.
- Estabilidad dimensional: Cuando la madera está en la humedad de equilibrio no sufre cambios apreciables en sus dimensiones.
- Resistencia mecánica: Cuando el agua libre ha sido eliminada por completo hasta llegar a una humedad cercana al 10 %, variando este valor entre especies, la resistencia mecánica sube aproximadamente un 33 %.
- Adhesivos: Con un secado adecuado se obtienen líneas de colas más estables y resistentes al disminuir al mínimo la migración de humedad.

El secado para la fabricación de madera laminada tiene que ser por métodos artificiales ya que estos garantizan secados mas uniformes y con mejor calidad en tiempos relativamente cortos.

Hay que tener especial cuidado con las diferencias de humedades de cada lámina, esta no debe ser superior al 4% entre tablas contiguas. Se debe tener un contenido

de humedad que se sitúe dentro de los límites aptos para su encolado. Las láminas deben tener un contenido de humedad menor del 15% para su óptimo funcionamiento. El secado artificial de la madera permite alcanzar este grado de precisión (Tellechea).

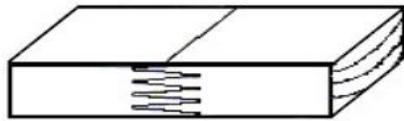
○ **Uniones**

Las lamelas se empalman unas con otras mediante un proceso conocido como *finger joints* o de uniones dentadas, que son entalladuras múltiples en sus extremos. Esta unión se debe hacer mediante el uso de un adhesivo que no tiene que ser estructural y se debe ejercer una presión mínima de 2 MPa. Luego se deja en reposo para permitir la soldadura química de las juntas (Tellechea).

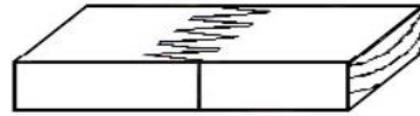
En este proceso se debe verificar que el contenido de humedad se encuentre entre un 12% y un 15%, con diferencias no mayores al 4 % entre tablas y no mayor al 2 % en la misma tabla. En lo posible la temperatura de este proceso se debe mantener en 15 C° (Demkoff, 2003).

El largo efectivo de los dientes del empalme debe ser de 15 mm asegurando el área suficiente de encolado para una adecuada unión estructural (Demkoff, 2003).

Existen dos tipos de uniones dentadas, vertical y horizontal, siendo la vertical la de principal uso en Europa y la horizontal en Estados Unidos, Canadá y Australia. El perfil vertical es un 9 % más resistente que el horizontal ya que presenta más área de encolado. La Ilustración 2 uniones dentadas (Batista, Rodrigo, Calil, & Mariano, 2002). Muestra los dos tipos de uniones dentadas más comunes.



Perfil horizontal



Perfil vertical

Ilustración 2 uniones dentadas (Batista, Rodrigo, Calil, & Mariano, 2002).

○ **Cepillado**

El cepillado es el proceso de preparación de las láminas para el encolado, este asegura una superficie uniforme que garantice una perfecta adherencia entre las láminas y la cola. Las láminas se deben cepillar con una tolerancia que depende del tipo de cola a utilizar, para el urea formaldehído se tiene una tolerancia de 0,1 mm por metro de largo y 0,2 mm cuando se usa urea resorcinol (Demkoff, 2003).

No debe pasar un periodo más largo de veinticuatro horas entre cepillada y encolada para evitar la contaminación de la superficie de encolado. Adicionalmente, se recomienda mantener las láminas en lugares libres de polvo y aserrín.

○ **Encolado**

Se agrega adhesivo en las caras superior e inferior de las láminas con un espesor constante de cola que varía de acuerdo con el tipo de pegante. Existen muchos tipos de colas y esta está condicionada con el uso final de las vigas laminadas. La cantidad de cola, el tiempo de fraguado y el tiempo de aplicación se detallara más adelante.

El gramaje a utilizar depende del uso del elemento estructural y del tipo de adhesivo, se puede verificar que esta cuantía es correcta si al aplicar la presión se nota un leve lagrimeo en las uniones a lo largo de la línea de cola. Un lagrimeo excesivo indica presiones muy altas o cuantías muy altas de adhesivos o combinación de estos factores (AkzoNobel, 2009).

- **Prensado**

Se colocan las pieza con las láminas encoladas en una prensa que aplica presión constante a lo largo de ella; es de vital importancia monitorear las condiciones ambientales ya que los adhesivos son muy sensibles a cambios en la temperatura y humedad. La temperatura óptima del recinto es de 15 °C.

La presión aplicada debe estar por el orden de 1 MPa, dependiendo del tipo de cola utilizado. La presión se aplica al centro de la pieza y avanza simétricamente hacia los extremos (Tellechea).

La presión se debe ejercer de forma uniforme, ya que si no se da esta situación la viga quedará con presiones localizadas, lo que puede generar un decremento significativo en sus propiedades mecánicas.

La presión de prensado depende del espesor de las lamelas y del tipo de madera; cuando se usa madera blanda se requiere una presión entre 0,6 y 0,8 MPa para lamelas con espesores de 33 mm, mientras que con lamelas de 45 mm se requiere entre 0,8 y 1 MPa. Para maderas duras se requiere mínimo 1 MPa (AkzoNobel, 2009).

Controlar la presión es muy importante ya que una presión excesiva puede generar lagrimeo excesivo lo que lleva a una línea de cola pobre, y poca presión genera pobre contacto entre las superficies. Es importante lograr niveles más exactos de presión realizando pruebas específicas para la planta de producción.

Se deben almacenar las vigas evitando golpes y flexiones indebidas hasta que se alcance la estabilidad higrométrica de las piezas encoladas. Este almacenaje se debe hacer en un lugar con condiciones de temperatura y humedad controladas.

1.3.2 Pegantes

○ Generalidades

El adhesivo es uno de los factores más importantes en la elaboración de la madera laminada, pues de éste depende la estética de la viga, las propiedades mecánicas, la capacidad de soportar condiciones de humedad y afección sobre el precio final, entre otras.

El adhesivo más utilizado en la producción de la madera laminada desde hace varios años es la cola de Resorcina Fenol Formol (RFF). En la actualidad se han desarrollado otras opciones como es la cola de Melanina Urea Formol (MUF) (Adhesivos para estructuras de madera laminada).

Los adhesivos trabajan por tres tipos de adhesiones; la adhesión mecánica depende de la penetración de la pega en la madera, la adhesión específica depende de las fuerzas moleculares entre la pega y la madera, y la adhesión química que depende de la reacción entre la pega y la madera (Asociación de investigación técnica de las industrias de la madera, 1995).

Las colas para madera estructural se clasifican según su resistencia a cambios de humedad y temperatura, y según sus características mecánicas. (Asociación de investigación técnica de las industrias de la madera, 1995).

En este grupo se encuentran:

- Las resinas urea formaldehído son económicas y se forman por la reacción de urea con formaldehído en un medio alcalino, que luego se acidifica y reacciona para formar un pre polímero. Esta resina se degrada fácilmente con el agua por lo que se descarta como cola para vigas que están expuestas a la intemperie.

- La melanina urea formaldehido se forma por la reacción de melanina con formaldehido y un endurecedor ácido. Esta resina presenta un mejor comportamiento frente al agua y al calor pero su costo es más elevado.
- Las resinas fenólicas se forman por la reacción del fenol y formaldehido en medio alcalino. Estas resinas deben fraguar a altas temperaturas pero se obtienen durezas mayores y mejor comportamiento cuando se expone a la intemperie.
- La resina fenol-resorcinol puede fraguar a temperatura ordinaria (5 °C) y es altamente resistente al calor y la humedad. Esta resina es la que mejor se acomoda a las necesidades de las vigas laminadas.

○ **Pegantes a utilizar**

A continuación se muestran los pegantes a utilizar escogidos por parámetros técnicos y económicos.

⇒ MUF (Melanina urea formaldehido)

Este producto se utiliza para los elementos estructurales mayores de seis metros, longitudes para las que la empresa considera es económico usarlo.

El sistema a utilizar es el MUF 1242/2542 de la empresa AksoNobel, este adhesivo está compuesto por el adhesivo Melanina Urea Formaldehido 1242 y el Hardener 2542. La Tabla 3 Propiedades MUF (AkzoNobel, 2009). muestra las especificaciones dadas por el fabricante.

Tabla 3 Propiedades MUF (AkzoNobel, 2009).

	UF 1242	HARDENER 2542
Contenido de sólidos	66 -- 69 %	N/A
Densidad	Aprox 1250 Kg/m ³	Aprox 1340 Kg/m ³
Propiedades de la línea de cola	Cumple con los requerimientos de la norma EN 301 (para uso tipo I y II, y servicios clase 1, 2, 3)	
Tiempo de prensa	10 h	
Tiempo de vida	1.67 h	

El tiempo de prensa y el tiempo de vida del producto están dados para una temperatura de 20 °C y una proporción de mezcla 100:20 adhesivo: catalizador, recomendaciones dadas por el fabricante.

La presión de ensamble para la madera blanda es de mínimo 0.5 MPa para lamelas de 45 mm de espesor, mínimo de 0.9 MPa

Como se mencionó antes se elige una relación 100:20 adhesivo: catalizador, esta debe hacerse preferiblemente en una mezcladora electrónica cuidando tener una exactitud de más o menos una parte en peso del catalizador.

Como este adhesivo se va utilizar para elementos estructurales de gran tamaño se decide utilizar el gramaje más alto especificado por el fabricante, 450 g/m² para tener más certeza en las propiedades de la línea de cola.

⇒ **EPI (Emulsión Polímero ISO cianato)**

El EPI es usado para pegar madera con madera, la línea de cola presenta una alta resistencia a factores climáticos y a agentes químicos así como una excelente resistencia a esfuerzos cortantes.

El sistema a utilizar es el EPI 1974 con Hardener 1993, que está aprobado por el instituto Fenestertechnik (IFT), Alemania, de acuerdo a la norma EN 204, Clase D4

y WATT 91 (AkzoNobel, 2011). La Tabla 4 Propiedades EPI (AkzoNobel, 2011). muestra la ficha técnica entregada por el fabricante.

Tabla 4 Propiedades EPI (AkzoNobel, 2011).

	EPI 1974	HARDENER 1993
Viscosidad (al momento de producción)	7000-13000 mPas	150-450 mPas
Densidad	Aprox 1200 Kg/m ³	Aprox 1240 Kg/m ³
Condiciones de almacenamiento	Debe estar en una temperatura entre 15 y 20 °C . Por ninguna razón este producto puede ser congelado	
Tiempo de prensa	30 min	
Tiempo de vida	30 min	
Tiempo de mezclado	40 s con mezclador eléctrico o 3 min con mezclado manual	

El tiempo de prensa y el tiempo de vida se dan para una relación 100:15 adhesivo: catalizador, la cual es sugerida por el fabricante, y una temperatura de 20 °C.

Este producto tiene un tiempo de ensamble para las condiciones dadas de 5 minutos en espacio abierto y 8 minutos en espacio cerrado. Se debe procurar no exceder estos tiempos ya que después de este tiempo se empieza el proceso de fraguado perdiendo calidad la línea de cola.

La cantidad de adhesivo a utilizar para laminación de madera estructural está entre 150 g/m² y 250 g/m². Para elementos estructurales de techo se sugiere 250 g/m² para tener buena resistencia mecánica.

2. METODOLOGÍA

El proyecto se divide en tres etapas las cuales ayudan al cumplimiento del objetivo propuesto por medio de los recursos brindados por Inmunizadora Colombia S. A. S.

2.1 ETAPA 1. ESTABLECIMIENTO DE PARÁMETROS DE LAMINACIÓN

2.1.1 Recolección de información técnica

La madera laminada en su filosofía es un proceso muy sencillo pero en el cual se debe tener riguroso cuidado con cada una de las acciones. Pasos aparentemente tan sencillos como el encolado (aplicación de la cola), debe tener estándares altos de calidad que al final serán los que llevarán a un producto terminado de calidad.

Cuidar la temperatura y la humedad ambiente, la preparación y dosificación del producto, la cantidad de partículas contaminantes en el ambiente, entre otras, son aspectos muy importantes a tener en cuenta a la hora de realizar el encolado, por eso se recoge información suficiente para cuidar cada aspecto a tener en cuenta y así proporcionar mayor calidad al producto final de la empresa.

Para la recolección de esta información se acude a bases de datos, fuentes de internet, entrevistas con expertos y documentación suministrada por personas del entorno maderero.

Con la información recogida en este paso se completará el marco teórico y se diseñará una tabla de control de calidad que garantice un riguroso control en cada paso de la fabricación de la madera laminada.

2.1.2 Establecimiento del proceso de fabricación

Con el fin de establecer y calibrar el proceso de producción se realiza un seguimiento de la fabricación de madera laminada de Inmunizadora Colombia S. A. S.

Para establecer dichos parámetros se hace el seguimiento de un bache de madera, definiéndose como bache la madera necesaria para llenar la capacidad del horno de secado de la empresa.

Para el llenado del horno de secado se requieren treinta y dos metros cúbicos de madera aserrada en dimensiones aptas para el secado, proveniente de madera rolliza de diferentes fuentes.

Uno de los puntos más importantes en la fabricación de madera laminada es el secado, pues este determinará el comportamiento dimensional de las lamelas y la calidad de la línea de cola.

Por esto se monitorea el programa de secado del horno, lo que permite verificar que el proceso haya sido correcto.

Este seguimiento se consigna en una tabla de control de calidad donde se controlan los parámetros más relevantes en la fabricación de la madera. Esto permitirá identificar posibles bajas en la calidad y tomar acciones correctivas a tiempo.

Para comprobar que los parámetros de fabricación hayan sido correctamente determinados y se hayan llevado a cabo correctamente, se realiza una prueba de calidad sobre las líneas de cola en conformidad con la norma BWS JAS 1152 en los laboratorios de AkzoNobel. Esta prueba presenta la información de la calidad de la línea de cola además de su resistencia a condiciones ambientales.

2.2 ETAPA 2. IDENTIFICACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS.

Se toma la decisión de fallar miembros estructurales ya que estos tienen mayor línea de cola y mayor cantidad de defectos propios de la madera, por lo cual se obtienen valores más confiables comparados con los obtenidos en la falla de probetas.

Este ensayo se realiza de acuerdo con la norma UNE EN 408 “Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas”. y se realiza en el laboratorio de la empresa.

Para la identificación de las propiedades mecánicas la empresa dispone de vigas con dimensiones de 6 cm de ancho por 12 cm de alto. Según la norma de ensayo, estas vigas deben tener una longitud entre 17 y 22 veces la altura de la viga por lo que se requieren vigas con longitudes de 2.05 m.

Después de elaborar las vigas con los parámetros de laminación establecidos, se obtienen las propiedades mecánicas a flexión. La empresa dispone de 12 vigas por cada tipo de pegante para la homologación de estos dos productos.

2.3 ETAPA 3. ELABORACIÓN DE FICHAS TÉCNICAS

Con las propiedades mecánicas encontradas en la etapa 2 se elaboran ayudas de diseño que faciliten la elección de las dimensiones de las vigas para un caso típico de cubierta.

3. DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 Fabricación

La fabricación de las vigas se realizó en la planta de laminados de Inmunizadora Colombia S. A. S. la cual dispuso tanto del material como de la maquinaria.

El proceso empieza con el acopio de la madera, la cual llega como se muestra en la Ilustración 3. A esta se le realizaron una serie de procesos los cuales se detallan a continuación.



Ilustración 3 Madera del bosque

3.1.1 Trozado y desorillado de la madera

La madera procedente del bosque se troza en tablones de 5 centímetros de espesor por el máximo ancho del tronco. Este proceso se realiza en un aserrío horizontal y se muestra en la Ilustración 4



Ilustración 4 Madera trozada

A los tablones se les extrae el cascarón mediante una cortadora sin fin, y este proceso se conoce como desorillado. La Ilustración 5 muestra la madera desorillada



Ilustración 5 Madera desorillada

3.1.2 Secado.

Los tablones se apilan en el horno de secado teniendo en cuenta dejar una separación vertical de tres centímetros entre cada uno y horizontal de un centímetro, ayudando a garantizar un secado uniforme. La Ilustración 6 muestra el horno de secado.



Ilustración 6 Horno de secado

El horno se alimenta mediante los desechos del bonificado y la temperatura se mantiene por medio de un proceso de auto alimentación de aserrín procedente del cepillado de la madera, lo que lo hace muy efectivo y amigable con el medio ambiente.

El proceso de secado se realiza mediante un programa pre cargado en el horno diseñado para madera de espesores entre 30 y 60 mm. Este proceso consiste en 8 fases:

Fase 1. Calentamiento: El horno se calienta desde la temperatura ambiente hasta una temperatura constante de 66 °C y acondiciona la humedad relativa en 15%. Este proceso lleva un tiempo de 4 h

Fase 2. Acondicionamiento: En este paso la temperatura del horno se mantiene en los 66 °C hasta que la madera iguale esta temperatura. Este proceso lleva un tiempo de 8 h.

Fase 3. Secado: La humedad relativa se baja a 14%, se mantiene la temperatura y se alcanza una humedad de la madera del 80%. Este proceso lleva un tiempo de 24 h.

Fase 4: Secado: En este proceso se inyecta vapor de agua para que la madera abra los poros y se realice un secado más parejo, se aumenta la temperatura a 70 °C y se baja la humedad de la madera del 80% al 40%. Esta fase dura 4 días.

Fase 5. Secado: Se aumenta la temperatura a los 72°C y se baja la humedad relativa al 11%, la madera alcanza el 30% de humedad. Esta fase dura 24 h

Fase 6 Secado: Se aumenta la temperatura hasta 80°C y la humedad relativa se baja hasta el 3.5%, la madera alcanza una humedad del 8%. Esta fase dura 24 h

Fase 8. Acondicionamiento: En esta fase la madera se enfría lentamente hasta 60°C y la humedad relativa sube al 7% para evitar dañar la madera por esfuerzos de temperatura. Esta fase dura 8 h

Todos los parámetros de temperatura, humedad relativa y humedad de la madera son medidos mediante 8 sondas dispuestas en la madera.

3.1.3 Fabricación de lamelas.

Los tablones secos se pasan por un cepillo que empareja y endereza la superficie, luego se pasan por una cortadora tipo *Ripsaw* que de manera muy precisa y con ayuda de una guía laser le da el ancho comercial a la madera.

La empresa maneja unos anchos comerciales estándares de: 6, 8, 10, 12, y 14 cm. Anchos mayores se elaboran bajo pedido. La Ilustración 7 muestra la cortadora tipo *Ripsaw*



Ilustración 7 Cortadora tipo Ripsaw

El último proceso de preparación para la unión de las lamelas es desechar las imperfecciones mediante un proceso de bonificado, este proceso se realiza mediante clasificación visual y con el uso de una sierra circular se procede a eliminar toda imperfección y nudo mayor de media pulgada. La Ilustración 8 muestra el proceso de bonificado



Ilustración 8 Proceso de bonificado

3.1.4 Unión de lamelas.

La fabricación de las lamelas se hace mediante el uso de una fresadora tipo *finger joints*, la cual realiza cortes perpendiculares a la longitud de las lamelas.

Las lamelas se unen en longitudes dependientes de la longitud final del producto, estas uniones se realizan mediante el adhesivo PVA y se les aplica presión instantánea para fijar el anclaje en las dos caras.

El PVA es un adhesivo termoplástico que a medida que va llegando a su estado de polimerización la viscosidad aumenta hasta que finalmente se convierte en una pasta sólida muy resistente. Este al momento de ser aplicado es una emulsión acuosa, de color blanco y fragua a temperatura ambiente. Su principal ventaja es que es muy estable a la luz y al calor.

La presión en el *finger joints* se aplica mediante prensas en una mesa de armado, esta presión debe ser tal que se logre un buen anclaje entre las lamelas pero sin generar daños en la unión dentada. La presión aplicada es de 0,82 MPa. La Ilustración 9 muestra la mesa de armado



Ilustración 9 Mesa de armado

3.1.5 Cepillado

Se toman las lamelas y se pasan por un proceso de cepillado el cual prepara la superficie para una correcta adherencia del pegante con la madera. En este proceso se da también el espesor final de la lamela; que para el caso específico será cuatro centímetros.

Este proceso se realiza en un cepillo de dos caras y se ejecuta inmediatamente antes del encolado para evitar la adherencia de suciedades en los poros recién abiertos. La Ilustración 10 muestra un cepillo dos caras



Ilustración 10 Cepillo dos caras

3.1.6 Encolado

EL proceso de encolado se realiza mediante una encoladora de rodillo que aplica la línea de cola mediante un rodillo dentado impregnando las lamelas por una sola cara. Este proceso se lleva a cabo mediante las dosificaciones anteriormente descritas dadas por el fabricante de las colas.

Para EPI se aplica por cada cara de lamela $250 \frac{g}{m^2}$, este proceso se realiza en un tiempo máximo de 8 min para evitar la polimerización del pegante.

Para MUF se aplica $450 \frac{g}{m^2}$ por cara de lamela, este se realiza en un tiempo menor de 1 h para evitar la polimerización del pegante.

3.1.7 Prensado

Inmediatamente después del encolado se arman las lamelas en la prensa y se aplica una presión uniforme de 1 MPa a lo largo de las vigas. Se deja en la prensa durante un tiempo de 10 horas si la cola es MUF y 1 hora si la cola es EPI.

3.1.8 Acabados finales

Se cepillan las vigas por las cuatro caras para dar la dimensión final y un acabado estético a las vigas.

3.1.9 Pruebas sobre la línea de cola

Para verificar la calidad del proceso se evalúan las líneas de cola EPI 1974/1993 y MUF 1242/2542 bajo las exigencias de la BWS JAS 1152, Clase C para EPI y Clase A para MUF, en la producción de vigas de madera laminada, en pino Pátula.

Definición condición de servicio Clase C

Elemento en el cual la línea de cola tiene capacidad de resistencia normal a humedad eventualmente por encima de 19%, expuesto a altas temperaturas ocasionadas por la acción del sol.

Definición condición de servicio Clase A

Condiciones en las cuales el contenido de humedad puede ser mayor al 19% de manera continua o intermitente por largos periodos de tiempo, donde la exposición a espacios abiertos es directa, donde se tiene exposición a alta temperatura, causada por la luz directa del sol y donde una alta calidad de adhesión se requiere en caso de fuego de los materiales de la construcción u otras condiciones de

exposición que requieran alta resistencia al agua, al clima o al calor por parte del adhesivo dentro del elemento laminado.

Esta prueba se realiza en los laboratorios de Interquim con ayuda del Ingeniero químico Fernando Álvarez (Alvarez, 2013). A continuación se detalla el proceso seguido:

Se cortan 10 piezas de 75 mm de longitud, conservando el área de la sección transversal de la viga, (Alto x Ancho).

- Se pesa cada pieza.
- Las piezas se sumergen en agua hirviendo por 4 horas.
- Las piezas se sumergen en agua a temperatura ambiente por 1 hora.
- Se secan las piezas a 70 °C hasta que alcancen el peso original determinado en el comienzo.
- Se marcan y miden todas las delaminaciones. Se considera delaminación toda abertura que sea superior a 3 mm de longitud y que tenga 0,05 mm de ancho.

Para elementos que van a estar expuestos a condición de servicio C este ciclo se repite una vez, para elementos expuestos a condición de servicio A este ciclo se repite 2 veces.

Criterios de aceptación de la prueba

- No pueden presentarse delaminaciones superiores a un cuarto de la longitud de la línea de cola evaluada.

- La sumatoria de los tramos delaminados dividida por la sumatoria de la longitud de línea de cola evaluada no puede tener una relación superior al 5%.
- El 90% de las piezas deben pasar los dos criterios anteriores.

3.2 OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

Las propiedades mecánicas se obtendrán en conformidad con la norma “UNE EN 408. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas”.

3.2.1 Conformación del ensayo

El ensayo fue realizado en el laboratorio de Inmunizadora Colombia S. A. S., que dispone de la instrumentación necesaria para las pruebas.

○ Instrumento de aplicación de carga

La carga se aplica mediante una prensa hidráulica con capacidad de 3000 kN, fabricada por la empresa, montada en un marco de reacción que soporta la viga a ensayar. Esta se muestra en la Ilustración 11.



Ilustración 11 Marco a reacción

- **Dispositivo de medición de carga**

La medición de la carga se realiza mediante una celda de carga de compresión miniatura LCGB-15K de la marca Omega con capacidad de medir fuerzas de 66.6 kN. La Ilustración 12 muestra la celda de carga. (Omega engineering, 2013)



Ilustración 12 Celda de carga (Omega engineering, 2013)

- **Dispositivo de medición de deformaciones**

La medición de la deformación se realiza directamente en la viga con un potenciómetro de 102 mm LP803-05 de la marca Omega. La Ilustración 13 muestra el potenciómetro (Omega engineering, 2013).



Ilustración 13 Potenciómetro (Omega engineering, 2013)

- **Elementos de prueba**

Los elementos de prueba serán fabricados con el procedimiento anteriormente descrito y con las dimensiones cumpliendo con los requerimientos de la norma de ensayo.

3.2.2 Metodología del ensayo

El ensayo se debe realizar sobre probetas acondicionadas al ambiente normal de 20 ± 2 C° de temperatura y la humedad relativa en 65 ± 5 %.

Este ensayo se realiza sobre una viga simplemente apoyada de luz igual a 18 veces su altura y se carga con dos fuerzas puntuales ubicadas en los tercios de la viga.

El ensayo se lleva a cabo teniendo en cuenta que la fuerza de rotura (F_{max}) se alcance en un tiempo de 300 ± 120 segundos.

El módulo de elasticidad se obtiene a partir de las deformaciones medidas en el eje neutro de la viga, ubicado en el centro de esta.

El módulo de elasticidad de flexión, E_m , se deduce de la siguiente expresión:

$$E_m = \frac{a l_1^2 \Delta F}{16 I \Delta W}$$

Donde:

$a = 6h \pm 1.5 h$, tercio de la viga donde se aplica la carga

$l_1 = 5 h$, distancia entre fuerzas aplicadas.

ΔF = Incremento de carga en la zona recta de la curva carga-deformación.

ΔW = Incremento de la deformación correspondiente a ΔF

I = Momento de inercia de la sección.

h = Altura

El módulo de elasticidad aquí obtenido se denomina verdadero ya que la aplicación de las cargas en el tercio de la viga elimina la deformación por cortante.

La resistencia última de la sección f_m se obtiene llevando la viga a la falla y se calcula así:

$$f_m = \frac{a F_{max}}{2W}$$

Donde:

F_{\max} = Fuerza de falla.

$W = \frac{bh^2}{6}$, Módulo resistente de la sección.

3.2.3 Valores característicos

Los valores característicos de resistencia se calculan como el quinto percentil de la población obtenida de los ensayos con la duración, temperatura y humedad estipulados en la norma UNE EN 408.

El valor característico correspondiente al quinto percentil se calcula como el valor que separa los datos de la muestra dejando por debajo un 5 % y por encima el 95 % restante. Este análisis estadístico asegura que solo existe un 5 % de probabilidad de encontrar valores inferiores al calculado. Este valor se obtiene ordenando de menor a mayor los datos de ensayo de la muestra, el valor del quinto percentil es el que ocupa el puesto correspondiente al número de datos dividido 20. Si este valor no es entero se interpola linealmente entre los valores más cercanos (Argüelles, Arriaga Martitegui, & Martínez Calleja, 2000)

Para el cálculo de las deflexiones en la etapa de diseño se utiliza el valor característico del módulo de elasticidad (MOE) correspondiente al valor medio calculado de la serie de datos

3.2.4 Asignación de las clases resistente de la madera laminada encolada.

El sistema de clases resistentes de madera laminada se define en la norma UNE EN 1194 "Estructuras de madera. Madera laminada encolada. Clases resistentes y determinación de los valores característicos".

Esta norma plantea un sistema para simplificar la oferta al mercado de madera laminada estructural reduciendo el número de opciones a 8 grupos estructurales (4

madera laminada homogénea, 4 madera laminada combinada). La madera laminada se define combinada cuando se mezclan clases resistentes de madera en su fabricación.

Para la determinación de los valores característicos de resistencia y rigidez de la madera laminada encolada existen dos métodos (Argüelles, Arriaga Martitegui, & Martínez Calleja, 2000)

-Usando ensayos directos de piezas de madera laminada

-Mediante expresiones de cálculo que relacionan los parámetros de resistencia de la madera aserrada de la cual se forman las lamelas.

Para la asignación de las clases resistentes en este trabajo se utiliza el primer método ya que se obtienen resultados más confiables.

El proceso de asignación por ensayos directos consiste en comparar los parámetros de esfuerzos y módulo de elasticidad a flexión con los presentados en los grupos estructurales, estos deben ser iguales o mayores a los registrados en uno de los grupos resistentes. La Ilustración 14 muestra las clases resistentes para madera laminada homogénea.

CLASES RESISTENTES	COMPOSICIÓN HOMOGÉNEA			
	GL 24h	GL 28h	GL 32h	GL 36h
Valores característicos N/mm ²				
Resistencia flexión	24	28	32	36
Resistencia tracción				
- paralela	16,5	19,5	22,5	26,0
- perpendicular	0,4	0,45	0,5	0,6
Resistencia compresión				
- paralela	24	26,5	29	31
- perpendicular	2,7	3,0	3,3	3,6
Resistencia cortante				
- cortadura y torsión	2,7	3,2	3,8	4,3
Módulo de elasticidad				
- paralelo: - medio	11.600	12.600	13.700	14.700
- característico	9.400	10.200	11.100	11.900
- perpendicular	390	420	420	490
Módulo de cortante (medio)	720	780	850	910
Densidad característica (kg/m ³)	380	410	430	450

Ilustración 14 Clases resistentes madera laminada homogénea

Si la resistencia a flexión, el módulo de elasticidad medio y el módulo de elasticidad característico cumplen con los requisitos anteriormente descritos, los demás valores pueden ser tomados directamente del grupo característico al cual fue asignado el producto.

3.3 ELABORACIÓN DE FICHAS TÉCNICAS

3.3.1 Bases de cálculo

○ Método de los estados límites

El diseño se revisa por estados límites de resistencia y de servicio:

Los estados límites de resistencia son aquellos asociados con el colapso, o falla estructural, las cuales ponen en riesgo la integridad de la estructura y de las personas que la utilizan (Facultad Regional Concepción del Uruguay, 2010).

Los estados límites de resistencia que requieren consideración son pérdida del equilibrio de la estructura y excesiva deformación, falla por rotura, o pérdida de estabilidad de la estructura o alguna parte de ella.

Los estados límite de utilización se definen como el estado que inutiliza la estructura para las funciones que presta sin presentar falla estructural. Los estados que requieren consideración incluyen deformaciones o flechas que afectan el aspecto o utilización efectiva de la estructura, daños a elementos no estructurales y vibraciones que causen molestias e inseguridad a las personas.

- **Condiciones de servicio**

Las “condiciones de servicio” son tres, y se describen a continuación (Facultad Regional Concepción del Uruguay, 2010):

La “condición 1” son estructuras que durante su vida útil se ubicarán en un ambiente con aproximadamente 20°C de temperatura y solo unas pocas semanas al año una humedad relativa del aire supere el 65%. Estas condiciones aseguran para las coníferas en su mayoría una humedad de equilibrio no mayor al 12%.

La “condición 2” son estructuras que durante su vida útil se ubicarán en un ambiente con aproximadamente 20°C y una humedad relativa ambiente del 85% ocasionalmente. De esta manera, la humedad de equilibrio en la mayoría de las maderas de coníferas no supera el 20%.

La “condición 3” involucra las condiciones no tratadas en la condición 1 y 2.

- **Verificación por estados límites últimos**

El cumplimiento del estado límite último se da cuando el cociente del esfuerzo máximo del material y los esfuerzos de diseño es menor que uno:

$$\frac{F_d}{X_d} \leq 1$$

El esfuerzo máximo del material se calcula como:

$$X_d = k_{mod} * k_h \frac{X_k}{\gamma_M}$$

Donde:

X_k : Valor correspondiente al quinto percentil de la propiedad mecánica analizada

γ_M : Coeficiente parcial de seguridad según EC5 BS EN 1995 (tabla 2.3), 1.25 para madera laminada

k_{mod} : Factor de modificación por efectos de duración de carga y clase de servicio según BS EN 1995 (tabla 3.1), por la cláusula 2.3.2.1 se toma el valor de la duración más corta 0,9.

k_h : Factor de amplificación para vigas con altura menor de 600 mm, según EC5 BS EN 1995, cláusula 3.2 (3) ecuación 3.1 y se calcula como:

$$k_h = \left(\frac{600}{h}\right)^{0.2}$$

Se toma el menor valor de k_h entre el calculado con la formula y 1.15

La combinación de fuerzas actuantes sobre la estructura se calcula con la siguiente expresión:

$$F_d = \Sigma \gamma_F F_k$$

γ_F : Coeficiente parcial de seguridad para las acciones. Este varía según la naturaleza de ésta y tiene en cuenta la probabilidad de excedencia de la carga propuesta.

Según la BS EN 1990 Tabla NA.A11.2 (B) los coeficientes se calculan a

sí:

-Acciones permanentes: 1.35

-Acciones Variables: 1.5

Si se aplican simultáneamente dos acciones variables el coeficiente toma el valor de 1.35

Se definen 3 casos de cargas para el caso analizado.

$$\text{Caso 1: } F_d = 1.35CM + 1.5CV$$

$$\text{Caso 2: } F_d = 1.35CM + 1.5Cviento$$

$$\text{Caso 3: } F_d = 1.35CM + 1.35CV + 1.35Cviento$$

Las fuerzas internas de los elementos se calculan como:

Para el esfuerzo a flexión

$$\sigma_u = \frac{M}{W}$$

Donde:

$$M = \frac{F_d l^2}{8}$$

$$w = \frac{bh^2}{6}$$

Para esfuerzo cortante:

$$\tau_d = \frac{3V}{2bh}$$

Donde:

$$V = \frac{F_d l}{2}$$

○ **Verificación por estados límites de servicio**

Para la verificación del estado límite de servicio se tiene en cuenta dos aspectos; la deformación inicial y la deformación diferida.

• Deformación inicial

La deformación inicial se realiza con base en el módulo de elasticidad medio, para una viga simplemente apoyada con una carga distribuida. La deformación se calcula con la siguiente expresión

$$u_f = \frac{5ql^4}{384EI_m}$$

Donde:

I_m : modulo de inercia medio de la sección el cual depende de su geometría

• Deformación diferida

En la madera la deformación en el tiempo es un factor muy importante. Esta deformación se simplifica mediante un factor de influencia k_{def} que depende de la clase de servicio y de la duración de la carga. Según BS EN 1995-1-1 la tabla 3.2 para cargas permanentes de clase de servicio 2 este valor es 0,8.

La deformación total por cargas permanentes se calcula como:

$$u_{tp} = u_p(1 + k_{def})$$

Para cargas variables en clase de servicio 2 según BS EN 1995-1-1

$$u_{tv} = u_v(1 + \Psi k_{def})$$

Donde:

k_{def} : 0.8 para madera laminada en clase de servicio 2

Ψ : 0.3 para categoría A viviendas.

- Limitación de la deformación

Estas limitaciones obedecen a tres razones: funcionalidad y aspecto, requisitos estructurales y requisitos de instalaciones.

El Eurocódigo 5 recomienda dos criterios para limitar la deformación en estructuras

Para evitar daños en elementos no estructurales la deformación debida a cargas variables no debe ser mayor a la luz del elemento dividido por 300

Para cumplir criterios de aspecto y funcionalidad la deformación total no debe superar el valor de la división de la luz del elemento dividido por 200.

3.3.2 Cargas de diseño

Para el cálculo de las cargas de diseño se toma un techo a dos aguas ya que esta es la configuración más simple pero la más común en el mercado objetivo de la madera laminada de Inmunizadora Colombia S. A. S. la Ilustración 15 muestra un esquema de este tipo de techos

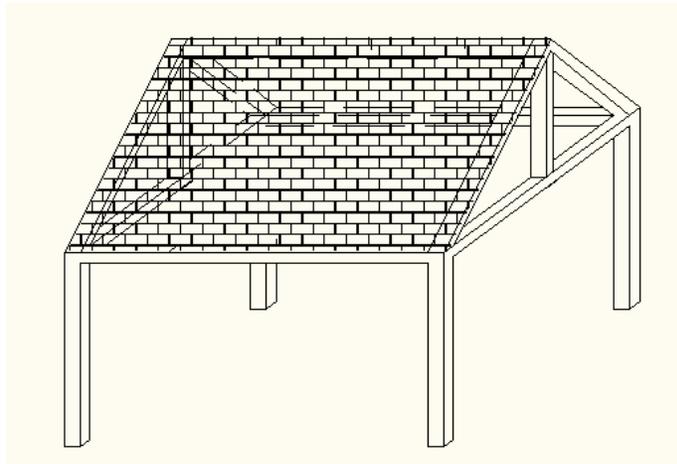


Ilustración 15 Esquema cubierta típica

○ **Sistemas principales resistentes a cargas**

Estos son los elementos que van a tener la responsabilidad de la integridad estructural del techo.

Elementos estructurales secundarios o alfileres: estos elementos son los encargados de sostener las cargas del techo y llevarla a los elementos estructurales principales. Para estos elementos se tienen las siguientes dimensiones: 6x12, 5x10, 4x8, 8x16 en centímetros, siendo ancho y alto respectivamente.

Estos elementos generalmente no superan longitudes de 6 m, y están expuestos a condición de servicio C por lo que se fabrican con el sistema de encolado EPI.

Elementos estructurales principales o vigas: estos reciben la carga de los elementos secundarios y deben estar diseñados para este propósito. Son los elementos con mayor responsabilidad dentro de la estructura. Las dimensiones comerciales de estos elementos son: 8x16, 8x20, 10x16, 10x20, 12x20, 12x24, 14x24, 14x28 en centímetros, siendo ancho y alto respectivamente.

La longitud comercial máxima de estos elementos es de 12 m y en algunas ocasiones pueden estar expuestos a condiciones de servicio A, por lo que se fabrican con el sistema de encolado MUF.

La ficha técnica se enfoca a la elección de elementos tipo alfarda y viga para techos en teja, los cuales estarán sometidos a las fuerzas por peso propio o carga muerta, carga viva y carga de viento.

- **Carga muerta**

La carga muerta la componen todos los elementos que conforman la estructura y generan una acción permanente de peso sobre esta. Para su cálculo se toma la conformación más común de techo, esta se compone de:

- **Elementos de cubierta**

Para este caso se elige la teja de barro como elemento de cubierta por ser la más usada en el mercado objetivo de la empresa. Para la teja de barro se recomienda tener pendientes entre 28 % y el 60 %.

Peso teja de barro rustica según (Almacen canaima, 2013)

Peso por unidad 1,5 kg generalmente de utilizan $36 \text{ unidades}/\text{m}^2$

Peso de teja por metro cuadrado en cubierta = $0,54 \text{ KN}/\text{m}^2$

En la mayoría de los casos se hace necesario un manto edil para ayudar a la impermeabilización de los techos pero el peso de estos no es significativo para el cálculo.

- **Elemento de soporte de la cubierta**

El elemento de soporte más común es la tablilla, pero actualmente se está reemplazando por placas de Eterboard las cuales contribuyen mayor peso muerto a

la estructura, por esto se tomara la carga de este elemento con el fin de que cumpla para ambos casos.

Peso de Eterboard de 10 mm según (Decodrywalleril, 2013)

=0,136 KN/m^2 en cubierta

Para el Eterboard se requiere un apoyo cada 61 centímetros.

- **Elementos estructurales**

La carga muerta depende de las dimensiones del elemento y se calcula como:

$$\text{peso propio de elementos estructurales} = A_t * \gamma$$

Donde:

A_t = Área transversal del elemento

γ = Peso específico de la madera.

- **Carga viva**

La carga viva según Tabla B.4.2.1-2 Cargas vivas mínimas en cubiertas para cubiertas inclinadas con pendientes mayores del 15% es de 0,35 KN/m^2

- **Carga de viento**

Debido a que la acción generada por el viento depende de tantos factores, el cálculo de esta necesita de un detallado específico para cada situación. La norma sismo resistente colombiana (NSR-10) especifica que la carga de diseño mínima que se debe tener en cuenta para sistemas principales resistentes a carga de viento según NSR-10 B.6.1.3.1 no debe ser menor que 0,4 KN/m^2 por el área afectada proyectada a un plano vertical normal a la dirección del viento.

3.3.3 Tablas de diseño

Se realizan dos tablas de diseño, una enfocada a los elementos estructurales secundarios o alfardas y otra a los elementos estructurales principales o vigas. Cada una de estas se realiza con los métodos de diseños y cargas supuestas comentadas anteriormente.

- **Tabla de diseño de alfardas**

Para el diseño de las alfardas se toma un área aferente de cargas como se muestra en la Ilustración 16

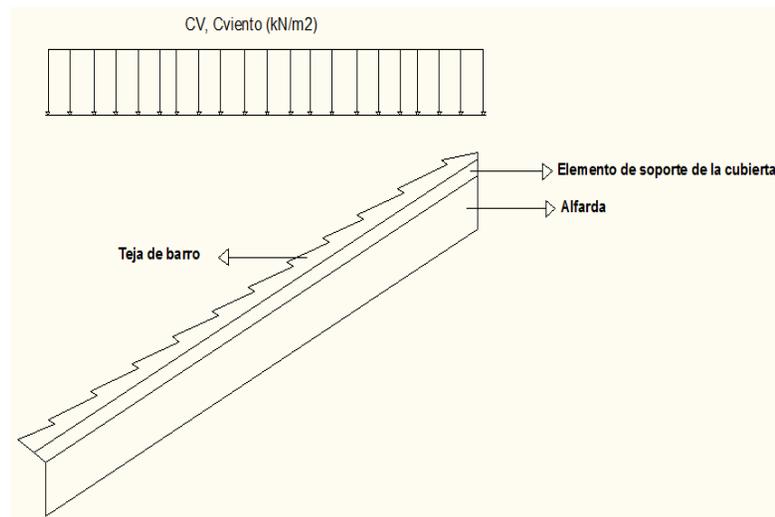


Ilustración 16 Cargas de alfardas

La longitud máxima comercial de alfardas es 6 metros, se varía el valor de (L_a : longitud entre apoyos de la alfarda) de 1 m a 6 m y se utilizan las secciones comerciales anteriormente comentadas.

Para el diseño de las alfardas se tienen en cuenta cargas actuantes perpendiculares a la dirección del elemento y estas se calculan para flexión, cortante y deformaciones para estos casos.

- **Tabla ayuda de diseño de vigas**

Para las tablas de diseño de vigas se tienen dos variables:

La variable (L_e) es la longitud aferente de techo que carga la viga, generalmente esta longitud es la mitad de la alfarda que une a las dos vigas, y varía entre 1 m y 3 m.

La longitud para vigas (L_v) es la distancia entre apoyos de las vigas y varía entre 1 y 12 m, se utilizan las secciones anteriormente comentadas.

Para el diseño de vigas se tiene en cuenta cargas actuantes perpendiculares a la dirección del elemento, esta se calcula para flexión, cortante y deformaciones para estos casos.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 PRUEBA DE CALIDAD SOBRE LA LÍNEA DE COLA.

Para la prueba de calidad se utiliza el ensayo de delaminaciones en conformidad con la BWS JAS 1152. Las probetas se obtienen de las vigas fabricadas para la determinación de las propiedades mecánicas, los parámetros de laminación se muestran en la Tabla 5 Parámetros de laminación

Tabla 5 Parámetros de laminación

Condicion	EPI 1971/1993	MUF1242/2542
Proporcion de mezcla	100/15	100/20
Gramaje (g/cm ²)	250	450
Tiempo de ensamble (min)	11	11
Tiempo abierto (min)	3	3
Tiempo cerrado (min)	8	15
Temperatura de prensado (C°)	20	20
Humedad relativa (%)	14	14
Presion especifica (Kg/cm ²)	9	9
Tiempo de prensa (h)	2	8

Para cada tipo de pegante se sacan probetas con dimensiones como lo indica la BWS JAS 1152. La Tabla 6 muestra los pesos de las probetas elaboradas con EPI y MUF.

Tabla 6 Peso probetas

Probeta EPI	Peso (g)	Probeta MUF	Peso (g)
DE1	247,4	DM1	345,2
DE2	269,4	DM2	283,0
DE3	229,8	DM3	273,2
DE4	245,9	DM4	228,4
DE5	225,5	DM5	239,3
DE6	267,3	DM6	223,6
DE7	285,6	DM7	229,2
DE8	247,7	DM8	242,2
DE9	269,3	DM9	262,1
DE10	254,1	DM10	247,7
DE11	260,1	DM11	-
DE12	281,9	DM12	-

Los resultados basados en los criterios de aprobación de la prueba BWS JAS 1152 comentados anteriormente se muestran en la Tabla 7

Tabla 7 Resultados de aprobación

Probeta EPI	Criterio	Probeta MUF	Criterio
DE1	PASA	DM1	PASA
DE2	PASA	DM2	PASA
DE3	PASA	DM3	PASA
DE4	PASA	DM4	PASA
DE5	PASA	DM5	PASA
DE6	REPRUEBA	DM6	PASA
DE7	PASA	DM7	PASA
DE8	PASA	DM8	PASA
DE9	REPRUEBA	DM9	REPRUEBA
DE10	PASA	DM10	PASA
DE11	PASA	DM11	-
DE12	REPREUBA	DM12	-
SERIE	REPROBADA		APROBADA

En MUF se obtiene un 90 % de probetas sin delaminaciones mayores a lo especificado por la norma, por lo que estas vigas pasan la prueba de calidad. En el caso del EPI 3 de 12 probetas reprobaban los estándares de delaminación, sólo un 75% de las probetas aprueban por lo que este sistema reprueba el ensayo.

En la Tabla 8 se muestra el detalle de la probeta reprobada para el sistema de vigas con MUF.

Tabla 8 Probetas reprobadas MUF

Probeta	MUF1242/2542		
	Delaminacion generada (mm)	Max delaminacion permitida	% delaminacion
9	25,52	17,05	14,41%

En la tabla 9 se muestra el detalle de las probetas reprobadas para el sistema de vigas con EPI

Tabla 9 Probetas reprobadas EPI

Probeta	EPI 1971/1993		
	Delaminacion generada (mm)	Max delaminacion permitida	% delaminacion
6	20,33	17,05	14,41%
9	42,86	16,77	15,95%
12	35,07	16,15	13,56%

4.2 HIPÓTESIS DE FALLA EN LA CALIDAD DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN EN EPI.

Las probetas que reprobaban el ensayo de delaminación son todos elementos de extremo de viga, sitios en los cuales la presión ejercida por la prensa no llega uniforme como en el caso del centro, lo que evidencia la importancia de una aplicación uniforme de la presión a lo largo de toda la viga. En la Ilustración 17 probetas reprobadas se puede observar que las delaminaciones se producen en el mismo sector en los tres casos.



Ilustración 17 probetas reprobadas

Por lo anterior se decide repetir este ensayo tomando una viga de la misma línea de producción y cuidando que las probetas sean del centro de la viga. En la Tabla 10 Re testeo EPI se muestra los resultados del re testeo.

Tabla 10 Re testeo EPI

Probeta EPI	Peso (g)
DE1	PASA
DE2	REPRUEBA
DE3	PASA
DE4	PASA
DE5	PASA
DE6	PASA
DE7	PASA
DE8	PASA
DE9	PASA
DE10	PASA
SERIE	APROBADA

En la Tabla 11 se muestra el detalle de las probetas del re testeo reprobadas para el sistema con vigas con EPI

Tabla 11 Probetas reprobadas re testeo EPI

Probeta	EPI 1971/1993 retesteo		
	Delaminacion generada (mm)	Max delaminacion permitida	% delaminacion
2	16,53	15,25	6,77%

El re testeo demuestra que el problema de calidad se encuentra solo en las puntas ya que al realizar la prueba en probetas obtenidas del centro de viga, el 90% de estas aprueban el ensayo, por lo que el sistema de vigas laminadas con cola EPI cumple con los estándares del BWS JAS 1152 para condición de calidad C.

Esto muestra la necesidad de hacer un proceso de corte de las puntas como proceso final, pues si bien estas no van a generar un problema de estabilidad estructural ya que no se encuentran en un lugar de alta demanda estructural, pueden generar problemas estéticos que se deben evitar para futuras garantías.

4.3 Caracterización mecánica de vigas laminadas

4.3.1 Resultados obtenidos

De cada tipo de pegante la empresa dispuso 12 vigas para la prueba, de las cuales una de EPI fue utilizada en el re testeo de calidad de la línea de cola y una de MUF fue descartada por error en la bonificación. Deflexión en el límite proporcional.

Los datos fueron recolectados mediante el programa desarrollado en *LabView* con la ayuda del Ingeniero Civil Carlos Blandón Uribe. Para el procesamiento de los datos se tomaron las cargas cuando la deflexión aumenta en 2 mm con el fin de facilitar el manejo de la información obtenida.

La Tabla 12 Resultados de ensayo MUF muestra el resumen de los resultados obtenidos del ensayo a flexión estática para las vigas fabricadas con MUF.

Tabla 12 Resultados de ensayo MUF

	Carga (KN)	Deflexion maxima (mm)	MOR (Mpa)	Deflexion en el limite proporcional (mm)	MOE (Mpa)
M1	15,79	40,05	36,83	32,00	10333,01
M2	10,75	19,34	25,08	19,34	12870,15
M3	17,70	38,96	41,30	32,00	12118,05
M4	10,12	18,00	23,62	18,00	13021,72
M5	10,50	15,67	24,50	15,67	15516,77
M6	14,35	35,50	33,49	35,50	9363,36
M7	12,49	23,15	29,14	23,15	12494,33
M8	21,04	35,40	49,08	35,40	13760,34
M9	12,29	29,90	28,67	29,90	9515,66
M10	17,67	39,85	41,23	39,85	10268,12
M11	11,55	28,00	26,95	28,00	9550,86

La Tabla 13 Resultados de ensayo EPI muestra los resultados obtenidos del ensayo a flexión estática para las vigas fabricadas con EPI

Tabla 13 Resultados de ensayo EPI

	Carga (KN)	Deflexion maxima (mm)	MOR (Mpa)	Deflexion en el limite proporcional (mm)	MOE (Mpa)
E1	16,35	31,40	38,14	31,40	12054,40
E2	15,80	28,00	36,86	28,00	13065,82
E3	14,58	27,53	34,01	27,53	12260,47
E4	13,54	25,76	31,58	25,76	12168,24
E5	13,70	29,98	31,96	26,00	12199,56
E7	14,39	27,45	33,57	27,45	12136,55
E8	14,19	27,95	33,12	27,95	11760,53
E9	19,71	36,23	45,99	36,23	12598,94
E10	12,19	27,93	28,43	27,93	10102,78
E11	15,35	31,63	35,81	31,63	11234,63
E12	13,55	37,2	31,61	31,45	9974,63

Las fallas fueron frágiles en su mayoría exceptuando dos vigas M1 y M3, estas fallaron por desprendimiento en la línea de cola de la unión dentada.

4.3.2 Hipótesis de falla

En general se identificaron tres tipos de falla las cuales se detallan a continuación:

- **Falla de la madera a flexión**

La madera llega a su punto de rotura ya que alcanza la máxima tracción paralela a la fibra debido a esfuerzos de flexión. En la Ilustración 18 Falla de la madera a flexión se puede observar una falla típica de este tipo generada en el centro de la luz, en la parte inferior de la viga se genera tracción, la cual lleva a la rotura, y en la parte superior se genera aplastamiento debido a las fuerzas de compresión generados por los esfuerzos flectores.



Ilustración 18 Falla de la madera a flexión

- **Falla por diferencia de densidad de la madera**

Esta falla ocurre cuando dos lamelas unidas por la unión dentada presentan una diferencia significativa de la densidad y esta diferencia se ubica en la zona crítica de esfuerzos de tracción. La lamela de menor densidad presenta menor capacidad de resistir esfuerzos por lo que esta se convierte en una zona crítica de falla en la viga.

En la Ilustración 19 Falla por diferencia de densidad en la madera se puede observar la falla típica por diferencia de densidades de la madera.



Ilustración 19 Falla por diferencia de densidad en la madera

Esta falla se caracteriza por ocurrir inmediatamente después de la unión dentada donde hay diferencia de densidades, pues en esta se presenta un punto de menor área de madera resistente. En la Ilustración 20 se muestra el estado de la unión dentada después de la falla.



Ilustración 20 Falla de la madera en el *finger joints*

De manera cualitativa se puede identificar la diferencia de densidades, la madera de baja densidad en el pino Pátula presenta un color más claro que la de alta densidad.

Esta diferencia de densidades ocurre principalmente por las siguientes razones:

Al tener diferentes proveedores de madera no se puede garantizar que toda la materia prima tenga el mismo cuidado forestal y la misma edad.

El pino Pátula presenta grandes diferencias de densidad entre lamelas obtenidas de la albura y del duramen. La Ilustración 21 albura y duramen muestra el corte de un tronco y la diferencia del albura y duramen. (Raven, Evert, & Thornton, 2004)

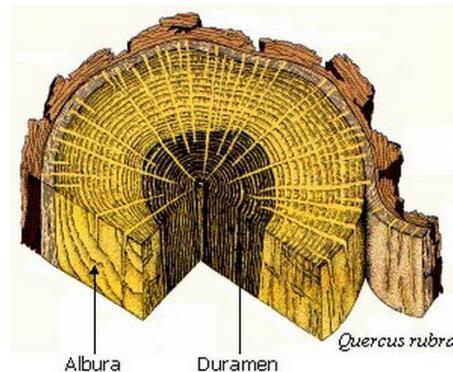


Ilustración 21 albura y duramen

- **Desprendimiento en la línea de cola de la unión dentada**

Esta falla ocurre cuando hay un desprendimiento de la unión dentada sin haber rompimiento de los dientes, la Ilustración 22 muestra la falla típica por desprendimiento en la línea de cola de la unión dentada.



Ilustración 22 Falla en la unión dentada

Este tipo de falla solo se presentó en dos vigas M1 y M3, en ambos casos se obtuvieron esfuerzos de rotura por encima de la media del ensayo por lo que se puede concluir que esta falla no fue crítica en la disminución de la resistencia. Mediante inspección cualitativa se determinó que no se presentan diferencias significativas en las densidades entre lamelas contiguas en el punto de falla.

4.3.3 Determinación de las propiedades mecánicas

En la Tabla 14 y Tabla 15 se muestra el módulo de rotura (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE) para los sistemas de vigas fabricados con MUF y EPI respectivamente calculados con las fórmulas descritas en la metodología.

La Tabla 14 muestra la media y el quinto percentil del MOR y MOE para las vigas fabricadas con MUF

Tabla 14 Propiedades mecánicas MUF

	MOR (MPa)	MOE (MPa)
M1	36,83	10333,01
M2	25,08	12870,15
M3	41,30	12118,05
M4	23,62	13021,72
M5	24,50	15516,77
M6	33,49	9363,36
M7	29,14	12494,33
M8	49,08	13760,34
M9	28,67	9515,66
M10	41,23	10268,12
M11	26,95	9550,86
MUF	MOR (MPa)	MOE (MPa)
MEDIA MUESTRAL	32,72	11710,22
QUINTO PERCENTIL	24,06	9439,51
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	8,38	2037,22
DESVIACIÓN ESTÁNDAR CORREGIDA	8,79	2136,65
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	26,87%	18,25%

La Tabla 15 muestra la media y el quinto percentil del MOR y MOE para las vigas

Tabla 15 Propiedades mecánicas EPI

	MOR (MPa)	MOE (MPa)
E1	38,14	12054,40
E2	36,86	13065,82
E3	34,01	12260,47
E4	31,58	12168,24
E5	31,96	12199,56
E7	33,57	12136,55
E8	33,12	11760,53
E9	45,99	12598,94
E10	28,43	10102,78
E11	35,81	11234,63
E12	31,61	9974,63
EPI	MOR (MPa)	MOE (MPa)
MEDIA MUESTRAL	34,64	11777,87
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	4,64	972,33
DESVIACIÓN ESTÁNDAR CORREGIDA	4,87	1019,79
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	14,06%	8,66%

En el caso de las vigas fabricadas con MUF se tiene una diferencia alta entre la media y el valor del quinto percentil, esta diferencia es significativamente menor en

las vigas encoladas con EPI. Esto se debe a que en el momento de la fabricación de las lamelas de EPI se contó con un bache de madera más homogénea y de mejor calidad que para el caso del MUF. La Ilustración 23 muestra la diferencia entre los valores característicos para los dos pegantes.

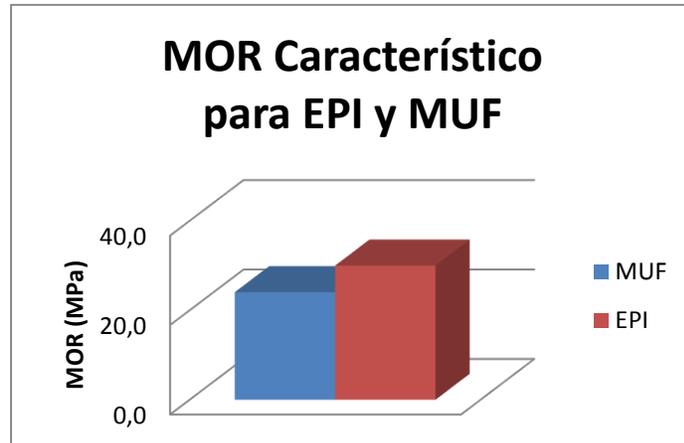


Ilustración 23 MOR para EPI y MUF

El valor de la media del módulo de rotura no presenta una variación muy importante entre los dos tipos de adhesivos por lo que se puede concluir que el limitante en la resistencia de las vigas es la calidad de la madera, la línea de cola en ninguno de los ensayos alcanza la resistencia de falla por lo cual no se presentan diferencias significativas en resistencia para los dos sistemas. Ilustración 24 muestra la diferencia para las medias del módulo de elasticidad para las vigas fabricadas con los dos tipos de cola.

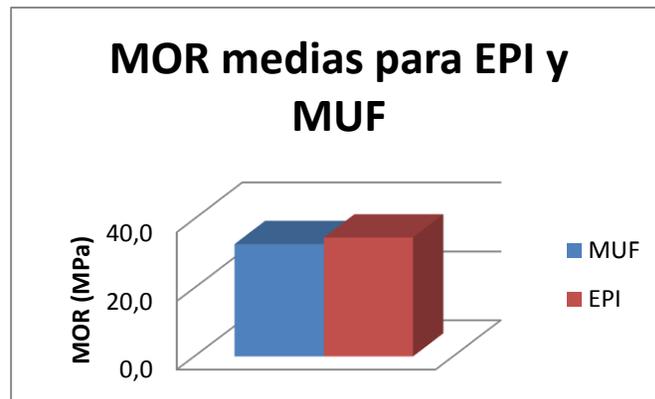


Ilustración 24 MOE para EPI y MUF

Según el ingeniero químico Fernando Álvarez de la empresa Akzonobel (Álvarez, 2013) la diferencia de uso de las colas está en las condiciones de servicio a las cuales pueden ser expuestas las vigas. El EPI presenta una menor estabilidad a condiciones climáticas que el MUF, por esto el fabricante no recomienda el uso de estos elementos para condiciones que sobrepasen las condiciones de servicio C y elementos con longitudes mayores a 6 m.

La Ilustración 25 se muestra la gráfica de capacidad para MUF.

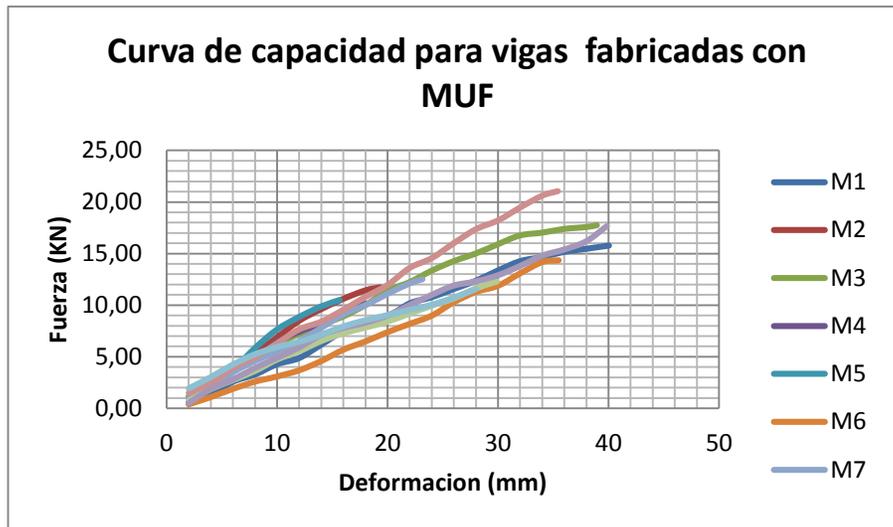


Ilustración 25 Curva capacidad MUF

La Ilustración 26 muestra las graficas de capacidad para las vigas fabricadas con EPI.

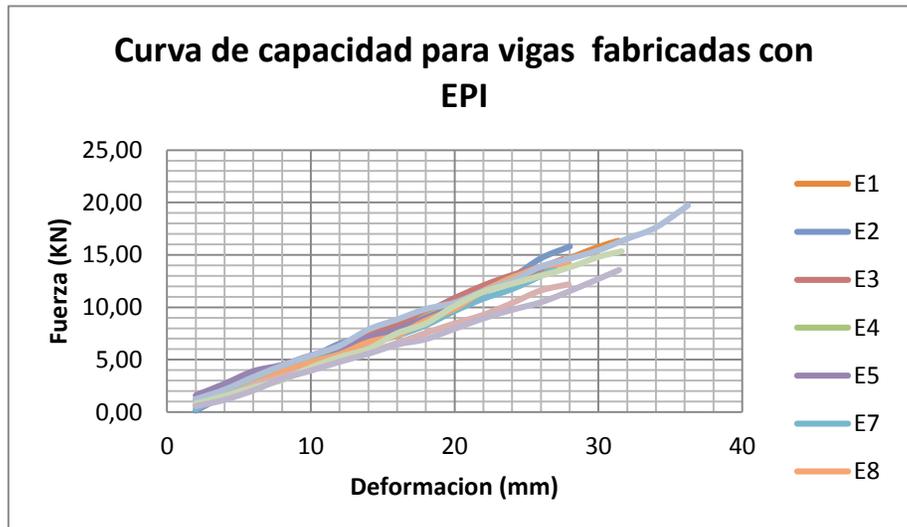


Ilustración 26 Curva capacidad EPI

El módulo de elasticidad (MOE) muestra una menor variación entre los datos obtenidos, esto se debe principalmente a que esta propiedad no se relaciona al MOR y depende solamente de la rigidez del elemento fallado.

4.3.4 Asignación de las clases resistente.

La asignación de clase resistente se realiza con los criterios descritos en la metodología. Para ambos sistemas la clase resistente en la cual sus propiedades a flexión cumplen los criterios es el GL24h. la Tabla 16 muestra las propiedades a flexión relevantes para la asignación de clase resistente.

Tabla 16 propiedades a flexión relevantes para la asignación de clase resistente

	GL24h	MUF	EPI
Resistencia a la flexión (Mpa)	24	24.1	30.01
Módulo de elasticidad medio (Mpa)	11600	11740.5	11777.8
Módulo de elasticidad característico (Mpa)	9400	9437	1038.71

En el caso del MUF los valores se acomodan sin mucha variación a las propiedades del la clase resistente GL24h, en el caso del EPI la resistencia a flexión supera el valor de la clase resistente pero el módulo de elasticidad limita la asignación de esta en un grupo estructural más resistente.

La Tabla 17 muestra las propiedades mecánicas del grupo estructural en el cual fueron asignadas las vigas fabricadas con EPI y MUF.

Tabla 17 clase resistente GL24h

Resistencia flexión (Mpa)	24
Resistencia tracción paralela (Mpa)	16.5
Resistencia tracción perpendicular (Mpa)	0.4
Resistencia compresión paralela (Mpa)	24
Resistencia compresión perpendicular (Mpa)	2.7
Resistencia cortante (Mpa)	2.7
Módulo de elasticidad paralelo medio (Mpa)	11600
Módulo de elasticidad característico (Mpa)	9400
Módulo de elasticidad perpendicular (Mpa)	390
Módulo de cortante (medio) (Mpa)	720

4.4 Tablas de diseño

Con las propiedades mecánicas obtenidas en el numeral anterior y la metodología descrita para el cálculo de elementos a flexión en estructuras típicas de techo a dos aguas, se realizaron las tablas de diseño que orientan a la elección de secciones económica y técnicamente viables para elementos tipo viga y alfarda.

Las dimensiones aquí descritas son validas para elementos tipo viga y alfarda de uso en cubierta tipo techo en teja de barro, para otras configuraciones es necesario el criterio de un profesional en el tema.

Las cargas aquí descritas son las sugeridas por la NSR-10 titulo B, para techos con pendientes entre el 28 % y el 35 %, para cargas diferentes es necesario el criterio de un profesional en el tema.

4.4.1 Tabla diseño de alfardas

Para el diseño de este tipo de elementos el parámetro que limitó las secciones fue la resistencia última a flexión, y donde se observó como con el aumento de la luz entre apoyos se requiere una mayor sección de alfarda.

La línea de cola de EPI tiene mayor rendimiento y menor precio que el MUF pero se limita longitudes de 6 m, además longitudes mayores serian antieconómicas por la secciones a utilizar, si se requieren longitudes mayores se debe utilizar vigas intermedias.

Como se comentó anteriormente, las secciones comerciales empleadas fueron 6x12, 5x10, 4x8, 8x16 en centímetros, siendo ancho y alto respectivamente; para cada una de estas secciones se obtuvo la máxima longitud para la que puede ser utilizada cada sección.

La Tabla 18 muestra las máximas longitudes que pueden ser empleadas para cada sección en elementos tipo alfardas de madera laminada encolada con EPI de la empresa Inmunizadora Colombia S. A. S.

Tabla 18 Tablas ayuda de diseño de alfardas

Secciones (cm)	Longitud entre apoyos (m)
4x8	2
5x10	3
6x12	4
8x16	6

El anexo 1 muestra en detalle la revisión de cada una de estas secciones por estados límites últimos (ELU) y estados límites de servicio (ELS).

4.4.2 Tabla diseño de vigas

Al igual que en el diseño de las alfardas, los estados límites últimos rigieron el diseño siendo la flexión la variable más importante. En este caso la longitud aferente de techo (L_e) restringió la longitud de la viga, que estuvo entre 1 m y 3 m.

La Tabla 19 muestra la máxima longitud de viga por sección que resiste ésta para una longitud de techo determinada.

Tabla 19 Tablas ayuda de diseño de vigas

Secciones (cm)	Le (m)	Lv (m)
8x16	1	4.5
	2	3
	3	2.5
10x16	1	4.5
	2	3.5
	3	3
8x20	1	5
	2	4
	3	3
10x20	1	5.5
	2	4.5
	3	3.5
12x20	1	6
	2	4.5
	3	4
12x24	1	7
	2	5.5
	3	4
14x28	1	8
	2	6.5
	3	5.5

El anexo 2 muestra en detalle la revisión de cada una de estas secciones por estados límites últimos (ELU) y estados límites de servicio (ELS).

5. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

5.1 CONCLUSIONES

La fabricación de madera laminada es un proceso sencillo en su concepción, pero requiere tener especial cuidado en donde cada uno de sus procesos contribuyan a garantizar la calidad al producto final, por esto es de vital importancia tanto conocer la teoría de los aspectos a cuidar en su proceso como el estudio del producto de cada empresa. Mediante los ensayos realizados se constató que el proceso de fabricación consultado y puesto en marcha fue exitoso, pues los resultados obtenidos para las resistencias mecánicas estuvieron dentro de los rangos esperados.

Se confirmó que el pino Pátula es una madera apta para la fabricación de madera laminada estructural la cual mediante el proceso del laminado aumenta considerablemente sus características mecánicas y la hacen competitiva frente a maderas macizas estructurales comúnmente utilizadas.

Con la aplicación de la prueba de calidad de línea de cola realizada bajo la norma BWS JAS 1152 se constató que las vigas fabricadas con la cola EPI cumplen los estándares para las condición de servicio C y las vigas fabricadas con MUF cumple con los estándares para la condición de servicio A.

Mediante la patología de las fallas obtenidas en los ensayos de resistencia mecánica se puede concluir que la línea de cola no fue ningún limitante en la resistencia de los elementos, pues en su mayoría la madera alcanzó su punto de rotura antes que la línea de cola.

Se identificó que una de las limitantes de la resistencia en la madera laminada y causante del aumento en la dispersión de los datos es la variabilidad en la resistencia de las lamelas. Esta variabilidad obedece a dos principios, la diferencia

de edades de la madera y la diferencia de resistencias de la albura y el duramen en las lamelas.

Bajo los estándares del Eurocode 5 se obtuvieron ayudas de diseño para la elección de elementos estructurales para una estructura típica de cubierta a dos aguas en teja de barro. La metodología aquí aplicada puede ser utilizada para la ampliación de estas ayudas a otras configuraciones de cubiertas en madera laminada.

5.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar otros estudios sobre la línea de cola del EPI, pues con los resultados obtenidos en este trabajo no se encontró diferencia en la resistencia del EPI y el MUF. El uso del EPI en la madera laminada se ve reflejado en una disminución de costo del producto, por lo cual se recomienda hacer ensayos de envejecimiento de la línea de cola y posteriormente evaluarla bajo la norma EN 302-1 Adhesivos para madera de uso estructural. Métodos de ensayo Parte 1: Determinación de la resistencia al cizallamiento por tracción longitudinal y así determinar la máxima extensión de su uso.

En cuanto a la fabricación se recomienda hacer mejor selección de la materia prima, pues de esta depende en gran parte la resistencia y la variabilidad de los datos. La madera de bosque reforestado debe llevar un control estricto desde su plantación y crecimiento, para obtener madera con menos defectos, y poder controlar su edad y su densidad.

La norma UNE EN permite el uso de madera combinada, se sugiere a la empresa implementar este tipo de productos para optimizar la resistencia de la madera.

BIBLIOGRAFIA

- Adhesivos para estructuras de madera laminada.* (s.f.). Recuperado el 10 de Febrero de 2013, de Infomaderas: http://www.infomadera.net/uploads/articulos/archivo_2670_13937.pdf?PHPSESSID=9c28e012efbe5093e28cc2be6bfa50ac
- AkzoNobel. (2009). *Informacion de producto, Sistema MUF 1242/2542 para vigas laminadas.* Medellin.
- AkzoNobel. (2011). *Sistema EPI 1974/1994.* Medellin.
- Almacen canaima. (11 de 10 de 2013). *Almacen canaima.* Obtenido de http://www.almacencanaima.com/producto-detalles-id-463-nombre-teja_tubo_rustica.htm
- Alvarez, F. (1 de 11 de 2013). Pegantes para madera laminada. (J. D. Arbelaez, Entrevistador)
- Alvarez, F. (23 de Febrero de 2013). Pegantes para madera laminada. (J. D. Arbelaez, Entrevistador)
- Arbelaez Alzate, E. M., & Gomez Chica, M. A. (2010). Caracterización de las propiedades mecánicas de vigas en madera laminada con acacia (*Acacia Mangium Willd.*). Medellin, Antioquia, Colombia.
- Arbelaez, A. M. (2 de Marzo de 2013). Restricciones legales de la tala de bosque nativo. (J. D. Arbelaez, Entrevistador)
- Arbelaez, J. (8 de febrero de 2013). Entrevista personal. (J. D. Arbelaez, Entrevistador)
- Archila, A. J. (s.f.). ¿Por qué Normalizar beneficia la Industria? *M&M*, 82-86.
- Argüelles, R., Arriaga Martitegui, F., & Martinez Calleja, J. J. (2000). *Estructuras de madera. Diseño y cálculo.* Madrid.
- Arriaga Martitegui, F., & Blasco Casanovas, J. R. (s.f.). *ESTRUCTURAS DE MADERA.*
- Asociación de investigación técnica de las industrias de la madera. (1995). Adhesivos estructurales. *AITIM*, 35-36.
- Asociación de investigación técnica de las industrias de la madera. (1996). Nuevas tendencias en los adhesivos empleados en tableros. *AITIM*, 82-84.
- Barrera, J. A. (s.f.). *La Madera Laminada: Una alternativa estructural y ambiental.* Recuperado el 13 de Marzo de 2013, de Revista el mueble y la madera: http://www.revista-mm.com/ediciones/rev70/arquitectura_madera.pdf

- Batista, A., Rodrigo, M., Calil, C., & Mariano, M. (2002). EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE MADERA CON UNIONES DENTADAS. *Madera ciencia y tecnología*, 168-178.
- Castro, A. C. (s.f.). *Revista el mueble y la madera*. Recuperado el 17 de marzo de 2013, de Edificar en madera entre prejuicios y temores un recurso subvalorado: <http://revista-mm.com/ediciones/rev30/edi.htm>
- Demkoff, M. L. (2003). VIGAS LAMINADAS ESTRUCTURALES DE MADERA, SU FABRICACIÓN Y EMPLEO. *XVIII Jornadas Forestales de Entre Ríos*, (págs. 1-6). Entre Ríos.
- Echeverri, F. (2012). *Primer Encuentro de Adelantos Tecnológicos en Productos Madereros y sus derivados*. Bogota.
- Facultad Regional Concepción del Uruguay. (2010). DISEÑO EN FLEXION SEGÚN EL EUROCODIGO 5 PARTE. En G. -G. Maderas.
- Foglia, R. C. (2005). Conceptos básicos sobre el secado de la madera. *Revista Forestal*, 1-5.
- INGENIERIA FORESTAL. (29 de Agosto de 2010). *Ingeniería forestal un portal para la ingeniería forestal*. Recuperado el 08 de febrero de 2013, de <http://ingenieriaforestalut.blogspot.com/2010/08/informacion-sobre-certificado-de.html>
- Jimenez, F. J. (1983). *Madera laminada de Pino Patula*. Medellín, Antioquia, Colombia.
- Márquez Rincón, G. A., & Pando López, M. (2003). CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO EN FLEXIÓN DE VIGAS LAMINADAS CON PINO CARIBE (*Pinus caribaea*). Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (Enero del 2010). *REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCION SISMO RESITENCIA*. Bogotá D.C.
- Muebles domoticos. (2 de Octubre de 2010). *POTENCIAL DE LA MADERA LAMINADA EN COLOMBIA*. Recuperado el 24 de Febrero de 2013, de <http://mueblesdomoticos.blogspot.com/2010/10/potencial-de-la-madera-laminada-en.html>
- Munera Cardona, A., & Giraldo Alzate, M. M. (2005). Obtencion de una viga en I con madera laminada enconlada y tableros en madera aglomerada. Medellín, Antioquia, Colombia.
- Omega engineering. (10 de 2013). *Omega Inc*. Obtenido de www.omega.com
- Polanco, C. (11 de Diciembre de 2007). *REFOCOSTA*. Recuperado el 8 de Febrero de 2013,

http://www.econegociosforestales.com/enf/files/Comercializacion_de_Madera_en_Colombia.pdf

Raven, P. H., Evert, R. F., & Thornton, R. M. (2004). *Botany. A Brief Introduction To Plant Biology*. New York: Omega. Barcelona.

Redacción M&M. (s.f.). *Revista del mueble y la madera*. Recuperado el 3 de marzo de 2013, de Cadena Maderera Obtiene Resultados Positivos y Negocio Forestal en la Mira de los chilenos: http://revista-mm.com/ediciones/rev70/astillas_70.pdf

Rosboro. (10 de Agosto de 2013). Glulam technical guide. Springfield.

Tellechea, J. A. (s.f.). *LA FABRICACION DE LA MADERA LAMINADA ENCOLADA*. Recuperado el 9 de febrero de 2013, de http://dspace.unav.es/dspace/bitstream/10171/17453/1/RE_Vol%2029_08.pdf

Universidad Nacional de Colombia. (s.f.). *Universidad Nacional de Colombia*. Recuperado el 10 de Marzo de 2013, de Laboratorio de productos forestales: <http://www.unalmed.edu.co/~lpforest/PDF/Pino%20patula.pdf>

Universidad Nacional de Colombia. (s.f.). *Universidad Nacional de Colombia sede Manizales*. Recuperado el 9 de Febrero de 2013, de Dirección Nacional de Servicios Académicos Virtuales: <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080020/Lecciones/Capitulo%203/MADERA%20LAMINADA.HTM>

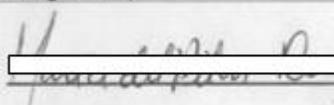
Vantir web solutions. (2009). *Vantir*. Recuperado el 13 de 10 de 2012, de <http://www.vantir.com/>



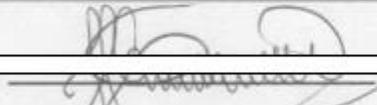
ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA

ACTA DE EVALUACIÓN FINAL DE TRABAJO DE GRADO

Fecha: (dd/mm/aa)	18/11/2013						
Nombre del proyecto:	Ficha técnica madera laminada en pino Pátula						
Director del proyecto:	Javier Arbeláez Gómez						
<table border="1"><thead><tr><th>Nombre del estudiante</th><th>Programa académico</th></tr></thead><tbody><tr><td>Juan Diego Arbeláez</td><td>Ingeniería Civil</td></tr><tr><td> </td><td> </td></tr></tbody></table>		Nombre del estudiante	Programa académico	Juan Diego Arbeláez	Ingeniería Civil		
Nombre del estudiante	Programa académico						
Juan Diego Arbeláez	Ingeniería Civil						
Nombre del Jurado:							
Evaluación del proyecto:							
<input type="checkbox"/> No aprobado <input checked="" type="checkbox"/> Aprobado							
Espacio exclusivo para jurado							
<input type="checkbox"/> Mención Pública <input type="checkbox"/> Mención honorífica <input type="checkbox"/> Trabajo laureado							
Justificación del reconocimiento: (Artículo 28 del Acuerdo 11: "El director del Programa presentará el acta final de evaluación al Consejo Académico, donde consta la solicitud de mención especial debidamente justificada y el Consejo determinará si se otorga o no")							



Director del Programa



Director del Trabajo de Grado

Jurado

