

Clasificación de las Láminas de Madera *Eucalyptus grandis* por Medio de la Técnica Del Ultrasonido para Confección de Vigas de Madera Laminada

Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco¹, Antonio Pires Azevedo Júnior²
Departamento de Engenharia de Estruturas; Universidade Federal de Minas Gerais
Avenida do Contorno, 842, 2º andar, CEP-30110-060, Belo Horizonte, Minas Gerais.
mantilla@dees.ufmg.br¹; azevedojr@yahoo.com.br²

Resumen

*Con la escasez de los recursos naturales no renovables la madera será el material del futuro. En comparación con otros materiales como el hormigón, el acero y los materiales de cerámica, la madera presenta ventajas insuperables. Las propiedades de la madera se pueden realizar considerablemente cuando se utiliza en la forma de madera laminada pegada (MLP). Cuando se distribuye las láminas en función de sus características mecánicas y de los esfuerzos actuantes, se consigue mejorar su desempeño, aumentar su confiabilidad y disminuir su costo. Sin embargo, determinar las características de las láminas por medio de ensayos destructivos no es una tarea fácil ni barata. Una opción ventajosa y eficiente son los ensayos no destructivos (NDT). La técnica del ultrasonido es la más prometedora, debido a la sencillez de la operación a costo bajo, a la precisión y confiabilidad de los resultados. Así este trabajo tuvo como objetivo principal la clasificación de láminas de madera de *Eucalyptus grandis* utilizando la técnica del ultrasonido. Los resultados experimentales permiten concluir que la clasificación de láminas de madera con ultrasonido es eficiente, segura y confiable, y podrá contribuir, de manera significativa, para el incremento en la fabricación optimizada de vigas de MLP de Eucalipto.*

Palabras Chaves: *Madera, Madera Laminada Pegada, Ultrasonido.*

Abstract

*Considering the possible shortage of non-renewable natural resources, it can be said that wood will be the future construction material. When compared to other materials, such as, concrete, steel and ceramic materials, wood presents peculiar and unbeatable advantages. Its properties and characteristic can be considerably improved when it is used in the form of laminated and glued wood (GLULAM). In addition, when the sheets are distributed in function of their mechanical properties and of the active efforts, being the best sheets in the areas more requested, there is an improvement in the performance, an increase in the reliability and a reduction in the wood structures cost. However, to determine representative properties of the sheets through destructive test is not an easy or inexpensive task. An advantageous and efficient option is the non destructive test, known as ENDS. This technique appears as one of the most promising options, due to the operation simplicity, at relatively low cost and, mainly, to the precision and reliability of the obtained results. Based on the experimental results of the present study it is possible to affirm that this technique is satisfactorily efficient, accurate and reliable, providing significant improve on the optimized production *Eucalyptus* GLULAM beams.*

Keywords: *Wood, laminated and glued wood, ultrasound.*

1. Introducción

Con la posibilidad de escasez de los recursos naturales no renovables, puede ser dicho que la madera será, por excelencia, el material de construcción del futuro. En comparación con otros materiales, como por ejemplo, el hormigón, el acero y los materiales de cerámica, la madera presenta ventajas insuperables. Es un material ecológico correcto, presenta la consumición de poca energía en su fabricación, cambia el gas carbónico del ambiente por el oxígeno, totalmente biodegradable, reciclable y todavía se utiliza como materia prima de diversos productos.

Las particularidades de la madera no se pueden considerar como factores limitadores o como obstáculos imposible de ser transpuesto para su uso, pero, sí, como desafíos que pueden ser vencidos a través de la investigación integrada entre los profesionales diversos que trabajan en este sector. De esta forma, a los ingenieros cabe la investigación en las áreas del manejo del bosque, desarrollo genético de la especie, técnicas del corte, despiece y el secado, determinación de las características físicas, mecánicas y anatómicas, entre otras. A los químicos, les compete seleccionar el tipo de tratamiento preservativo en función de las características de la madera y los agentes dañosos, inclusive escoger los productos utilizados como revestimientos. A los arquitectos y a los diseñadores les compete seleccionar la especie más apropiada de madera para el uso en la construcción civil, el uso de las técnicas constructivas adecuadas y los detalles que permiten la integración de la madera con el ambiente construido, sin el daño para su integridad estructural facilitando el mantenimiento de las estructuras.

Con la sustitución creciente de la madera nativa para la madera de reforestación, nuevas especies están siendo investigadas y sin duda, la especie *Eucalyptus* es la más prometedora. Todas estas especies de Eucaliptos, se están introduciendo gradualmente en el mercado a partir de la investigación desarrollada en las universidades y otros centros tecnológicos, que transmiten conocimiento a las industrias a través de acuerdos.

La madera laminada pegada o simplemente MLP, por ejemplo, es una tecnología que considera las aplicaciones de la carpintería tradicional, los conceptos del hormigón armado y prefabricado y de la construcción metálica, juntando los principios de base de cada técnica. Esta flexibilidad del material aliado, principalmente, al tema económico, ha sido responsable de la explosión verdadera del uso de la madera, verificado en Europa y Norteamérica después de la crisis de la energía de la década de 1970.

Si se puede decir que la madera será el material de la construcción del futuro, puede ser dicho,

también, que la madera laminada pegada será el material estructural del futuro. La madera laminada pegada de eucalipto se ha utilizado con eficacia probada en tipos diversos de construcciones, como edificios de uno o varios pisos, viviendas, almacenes, puentes y pasarelas y en algunas etapas de la misma construcción como los cimientos, la estructura de sustentación y las cubiertas. Su flexibilidad estructural, aliada a su plasticidad arquitectónica, permite configuraciones estructurales con elevada belleza y elegancia, estando apenas limitado a la imaginación y a la creatividad de los diseñadores, como puede ser visto en las Figuras 1, 2, 3 y 4, (obras ejecutadas en el estado de Minas Gerais, Brasil).



Figura 1. Estructura principal de una cubierta residencial.
Fuente: Azevedo Júnior.



Figura 2. Cubierta del almacén industrial con vigas curvas de MLC de eucalipto.
Fuente: ESMAD - Tecnología en Estructuras de Madera Colada.



Figura 3. Estructura del restaurante en vigas curva.
Fuente: Azevedo Júnior

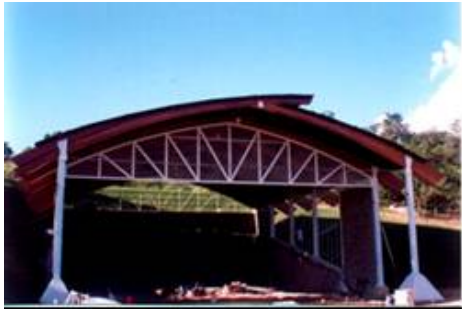


Figura 4. Estructura de un hangar de helicóptero con vigas curvas con sección variable.

Fuente: ESMAD - Tecnología en Estructuras de Madera Colada.

A seguir se presenta la metodología de fabricación de los encolados y luego la técnica usada para la clasificación de las láminas con el ultrasonido.

2. La madera laminada pegada

La madera laminada pegada es un producto que se fabrica pegando dos o más láminas localizadas con la dirección de las fibras paralelas al eje de la pieza, como puede ser visto en las Figuras. 5 y 6. Las láminas usadas deben ser secadas bajo condiciones controladas de la temperatura y humedad relativa del aire, con el objetivo de reducir los defectos que ocurren debido al secado. Cualquier especie de madera puede ser utilizada, desde que el pegamento sea compatible y proporcione una adherencia adecuada y segura de las láminas.

Una vez que la MLP es fabricada con láminas de pequeño espesor, su secado se facilita y sus defectos naturales como los nudos y los agujeros provocados por los insectos, pueden ser descubiertos fácilmente, eliminados o dispersados en las piezas. Otra gran ventaja de la MLP en lo referente a la madera natural es la posibilidad de fabricación de piezas con las formas y las dimensiones variadas.

La obtención de las piezas curvas, por ejemplo, a través del encurvamiento de las láminas durante el proceso de la fabricación es relativamente fácil y hace posible la creación de diversas formas arquitectónicas. El radio de curvatura se asocia al espesor de las láminas y a la densidad de la madera usada.

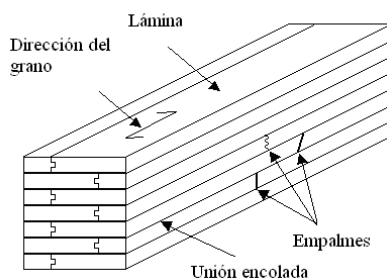


Figura 5. Tipos de uniones longitudinales y transversales en piezas de MLP.



Figura 6. Uniones longitudinales y transversales en vigas rectas de MLP.

El uso de la MLP no sólo permite un control de calidad más eficiente de las características de la madera, con la colocación de las láminas de mayor resistencia en las regiones más solicitadas de las piezas, así como una flexibilidad y una mayor variedad en las formas arquitectónicas.

2.1. Espesor de las láminas

Para determinar el espesor de las láminas usadas en las piezas de MLP, tres factores esenciales deben ser considerados. El primer factor es la resistencia, debido a que el uso de láminas de espesor pequeño proporciona mayor dispersión de los defectos de la madera en la pieza, de esta manera estos defectos tienen muy poca influencia en su resistencia. El segundo factor es el económico. El cual es influenciado por la cantidad de pegamento usado y el costo del tiempo con la mano de obra y las máquinas en la fabricación de las piezas. Cuánto menos el espesor de las láminas, mayor la cantidad necesaria de adhesivo, mayor el tiempo consumido con la mano de obra y las máquinas y, por lo tanto, menos económica es la pieza. El tercer factor es el secado de las láminas. Cuanto más finos son, más fácil es el secado y menos son los defectos ocasionados por este proceso, como rajaduras y torceduras. Por lo tanto, el espesor más adecuado es aquél que encuentra el equilibrio entre los tres factores discutidos.

En la práctica, el espesor de las láminas usadas varía de 1,0 cm a 5,0 cm, siendo más común el uso de espesores alrededor de 3,0 cm. Para asegurar un buen pegamento y la buena calidad del producto final, es fundamental que el espesor de las láminas sea constante a lo largo de toda la longitud de la pieza. Según Carrasco [1], la variación en el espesor de las láminas nunca debe ser mayor a 0,5 mm.

2.2. Pegamentos para la madera laminada

Una de las restricciones más grandes al uso de la MLP es el pegamento, pues es el gran responsable de la resistencia y del costo de las piezas. Según Sandoz [2], los primeros adhesivos utilizados fueron los pegamentos naturales manufacturado a partir de la

caseína de la leche, del hueso o pegamentos de pescado.

En la década de 1940, fueron sido introducidos, en el mercado, los derivados sintéticos orgánicos, como los formaldehidos y resorcinas, resistentes a la acción indeseada del agua. Al principio de la década de 1970, aparecen los pegamentos a base del poliuretano. En la industria Brasileña, se utilizan, actualmente, los adhesivos a base de las resinas resorcinas y poliuretano.

2.3. La localización de las láminas en las piezas de MLP

Para la manufactura de una viga en madera laminada, es de importancia básica el conocimiento de la distribución de las tensiones en la sección transversal de la pieza. En las vigas sometidas a la flexión, la distribución de los esfuerzos normales varía de acuerdo con la posición en la sección transversal, siendo mayores en los bordes y disminuyendo a medida que se aproxima del plano neutro, como puede ser visto en la Figura 7. Una otra consideración importante es el hecho de la madera presentar siempre una ruptura frágil a la tracción, al contrario de la ruptura a la compresión, que es normalmente dúctil.

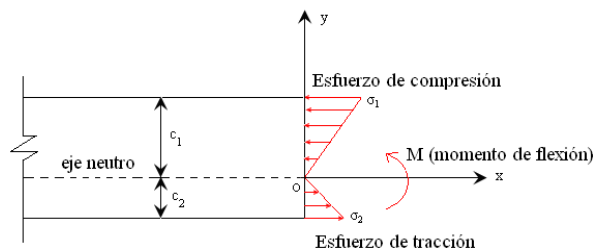


Figura 7. Distribución de tensiones a través de la sección transversal de la viga.

En una pieza de MLP, las láminas se pueden disponer horizontalmente o verticalmente. En las piezas sometidas a los esfuerzos de flexión, es común que las láminas estén posicionadas con la línea adhesiva perpendicular a la fuerza aplicada, como muestra la Figura 8. Estas piezas se llaman piezas laminadas horizontalmente. Este tipo de configuración permite una sección más económica y más resistente a través de la disposición selectiva de las láminas en función de los esfuerzos y de sus características mecánicas. La distribución selectiva permite mejor aprovechamiento de la madera, colocando las láminas de una resistencia mayor en los lugares donde la pieza es más solicitada, por supuesto también permite el uso de tablas con defectos o resistencia baja, localizándolos en las regiones de pocos esfuerzos.

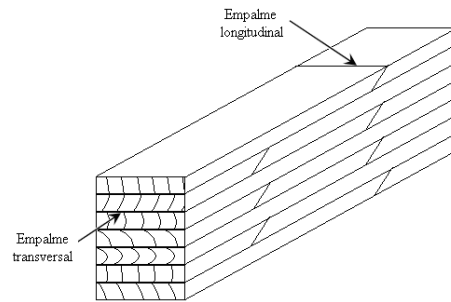


Figura 8. Disposición horizontal de las láminas en una pieza de MLP.

Esta configuración permite, también, utilizar láminas de diversas especies de madera en una misma sección, sin perjudicar la pieza de MLP. Sin embargo es válido recordar que la disposición selectiva de las láminas trae la obligación de la clasificación de todas las láminas usadas.

Las piezas solicitadas a flexión con la carga aplicada paralelamente a la línea adhesiva son llamadas de piezas laminadas verticalmente, como puede ser observado en la Figura 9. Esta configuración no permite la disposición selectiva de las láminas, porque una misma lámina podrá estar situada en regiones con sollicitaciones variadas, de pequeña a gran intensidad. Normalmente, las piezas en flexión con la disposición vertical de las láminas son menos eficientes y menos económicas que las piezas con la disposición horizontal de las láminas.

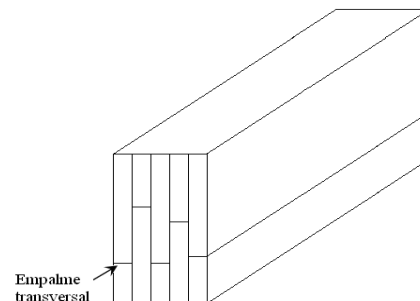


Figura 9. Disposición vertical de las láminas en una pieza de MLP.

Es importante mencionar que cuando las piezas de MLP serán solicitadas a flexión, por carga perpendicular a la línea adhesiva y también cargas axiales, deben ser usadas láminas con las mismas características en toda la sección transversal de la pieza, esto es debido a que el esfuerzo axial es constante a través de toda la sección transversal.

Cuando las vigas son de grandes longitudes y necesitan uniones longitudinales, las uniones en las láminas dispuestas horizontalmente son menos confiables que las uniones en las láminas dispuestas verticalmente. Las uniones longitudinales en las láminas dispuestas verticalmente distribuyen la responsabilidad igualmente entre todas las láminas localizadas en la sección transversal en vez de

solamente una lámina ser responsable de la mayor parte del esfuerzo, como sucede en la disposición horizontal de las láminas.

Para desarrollar piezas más resistentes y más confiables, Sandoz [2] sugiere la disposición alternada de las láminas a través de la sección transversal de las vigas de MLP, conocidas como vigas de MLP multidireccional, como muestra la Figura 10.

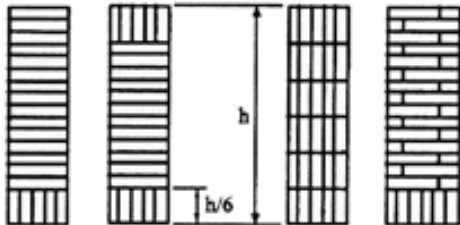


Figura 10. . Vigas de madera laminada pegada multidireccional

Fuente: SANDOZ, 1998, P. 554.

El uso de MLP multidireccional no elimina la posibilidad de la disposición selectiva de las láminas. El uso de láminas más resistentes en las regiones solicitadas hará posible un aumento en la resistencia de la pieza en su totalidad. Las láminas menos resistentes se pueden utilizar en las regiones con sollicitación baja, como por ejemplo, en la región central, sin perjudicar la resistencia de la pieza. La disposición multidireccional de las láminas de MLP proporciona piezas más resistentes, eficientes, confiables y seguras.

3. Clasificación de las láminas por medio de la técnica del ultrasonido

El buen funcionamiento de las piezas de MLP tiene relación intrínseca con el método de clasificación usado en las láminas. Por lo tanto, debido a las grandes variaciones de las características de la madera, para un uso racional y optimizado, es de importancia básica la determinación de las propiedades realistas y representativas de la madera usada. En la fabricación de vigas en MLP, la clasificación de las láminas de acuerdo con sus características es recomendable. Esta clasificación permite con facilidad la disposición de las láminas en las piezas y la determinación de las características de la pieza final de MLP.

Existen, básicamente, dos diversos tipos de ensayos para la determinación de las características físicas y mecánicas de un material:

a) ensayos destructivos: son los ensayos tradicionalmente usados en la determinación de las características de la madera. La ruptura de la cuerpo-de-prueba, impide su uso después del ensayo. Estos ensayos determinan las propiedades reales de la madera en los puntos donde habían sido extraídos la cuerpo-de-prueba, sin embargo, son laboriosos, demorados y de alto coste.

b) ensayos no-destructivos (NDT o END): son los ensayos donde el cuerpo-de-prueba no se daña. Los ensayos no-destructivos presentan ventajas cuando comparados con los ensayos destructivos, como bajo costo, facilidad y rapidez en la ejecución, posibilidad de la evaluación de las características de la madera en la cadena de producción y el incremento consiguiente en la calidad del producto final.

Entre los tipos diversos existentes de ensayos no destructivos en la madera, puede ser destacado la técnica del ultrasonido como la herramienta más prometedora y más importante para la evaluación no destructiva de la madera y de sus productos derivados, haciendo posible la predicción de características físico-mecánicas, la evaluación del estado fitosanitario e, principalmente, la clasificación de las piezas estructurales de madera y de láminas para la producción de MLP, aumentando la calidad, la seguridad estructural y la competitividad del material.

Los ultrasonidos son ondas mecánicas caracterizadas por frecuencias arriba de 20 kHz. Entre las ventajas innumerables de su uso como método no destructivo, pueden ser indicados:

- Los ultrasonidos son inaudibles;
- Las ondas asociadas a las alta frecuencia son más fácilmente direccionadas;
- Los coeficientes de absorción son generalmente más altos, por lo tanto, más fácilmente medidos en altas frecuencia;
- Bajo costo de adquisición del equipo, cuando comparado en el costo de las máquinas de clasificación automática;
- Entrenamiento y utilización relativamente, haciendo posible que la técnica sea fácilmente difundida en las industrias de madera y sus derivados.

La determinación de las características físico-mecánicas de la madera usando la propagación de pulsos ultrasónicos se basa en la relación física entre la velocidad del pulso, el módulo de la elasticidad o el módulo de Young y la densidad del material. Los equipos de ultrasonido usados en la evaluación no destructiva de la madera se utilizan, de la relación entre la velocidad de la propagación del pulso en la madera y las características mecánicas de la pieza. El equipo se puede utilizar tanto para estimar, a través de correlaciones estadísticas, la resistencia mecánica de una pieza individual, como también para clasificar grandes cantidades de madera en diversos niveles de rigidez.

La propagación de pulsos ultrasónicos en madera depende, principalmente, de las características mecánicas de la pared celular. La densidad de la pared puede ser considerada constante, pero hay variación del módulo de elasticidad debido a la variación de la estructura de la pared celular e, de este modo, los valores de la velocidad del ultrasonido dan como resultado intervalos de velocidad de acuerdo con las características anatómicas y la presencia de defectos en las piezas investigadas.

Básicamente, la técnica de evaluación no destructiva de madera por medio del ultrasonido consiste en la colocación de dos transductores, generalmente opuestos diametralmente en la pieza que se evaluará, como puede ser visto en la figura 11.

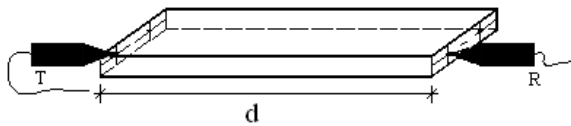


Figura 11. Colocación de los transductores en la lámina de madera.

El pulso se introduce en la pieza para uno de los transductores, (llamados T transmisor) y captado por el otro transductor (llamado R receptor), siendo la lectura de la hora es hecha por el mismo equipo, como mostrado en la Figura 12.

Diversas investigaciones demuestran la practicidad y la viabilidad de la técnica del ultrasonido, a través de correlaciones estadísticas entre el módulo de la elasticidad obtenido en ensayos destructivos y el módulo de la elasticidad dinámico, obtenido con el equipo de ultrasonido. Los resultados presentan correlaciones significativas, con coeficientes de determinación (R^2) variando entre 0,57 y 0,89, como se puede verificar en los trabajos de McDonald et al. [3], Halabe et al. [4], Baradit et al. [5], Machado [6], Bartholomeu [7], Oliveira [8], Emerson et al. [9], Carrasco y Azevedo Júnior [10], Nogueira [11].



Figura 12. Equipo de ultrasonido Sylvatest con transductores de 30 kHz.

3.1. Determinación de la velocidad de propagación del pulso ultrasónico a través de las láminas

3.1.1. Velocidad de fase y velocidad del grupo

Cuando un pulso ultrasónico mantiene su forma a medida que se disloca en un medio material, todas las ondas del armónico que lo componen tendrán la misma velocidad, qué sucederá solamente si las velocidades de estas ondas no dependen de la longitud de onda o de la frecuencia de las vibraciones. Un medio en el cual la velocidad de la propagación independe de la

longitud de onda, o de la frecuencia, se llama medio no dispersivo.

Sin embargo, en la madera, para ser un medio dispersivo, las velocidades de las ondas que constituyen el pulso dependerán de las frecuencias y de las longitudes de onda, y el pulso ultrasónico tendrá su forma modificada a la medida que avanza en ese material. En este caso, la velocidad del pulso (por ejemplo, la velocidad del centro del pulso) no es la misma que la velocidad media de las ondas que la constituyen. La velocidad media de las ondas armónicas se llama velocidad de la fase y la velocidad del pulso se llama velocidad del grupo. Rayleigh fue quien introdujo el concepto de la velocidad del grupo al estudio de las ondas. La velocidad de grupo se relaciona con la velocidad de fase a través de la expresión:

$$v_g = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda} \quad (1)$$

donde v_g es la velocidad de grupo e v la velocidad de fase.

Para medios donde no exista dispersión, es decir, $\frac{dv}{d\lambda} = 0$, la velocidad de grupo será igual a la velocidad de fase.

La velocidad de grupo se puede determinar usándose la siguiente relación cinemática:

$$v_g = \frac{d}{t} \quad (2)$$

donde d es la distancia recorrida por el pulso, es decir, la longitud de la lámina y t es el tiempo consumido para cubrirlo, proveído directamente por el equipo de ultrasonido.

Como puede ser verificado, la determinación experimental de la velocidad de fase del pulso ultrasónico a lo largo de la madera es considerablemente difícil.

Sin embargo, al propagarse a través de la madera, la velocidad del pulso (o la velocidad de grupo), así como la velocidad de fase, pueden ser afectadas por una serie de factores que se relacionan intrínsecamente con las características físicas y mecánicas del material. De esta manera, es posible establecer las relaciones estadísticas que pueden expresar estas características como función de esa velocidad.

3.1.2. Determinación de la velocidad de propagación del pulso ultrasónico a través de las láminas

Para la confección de un viga prototipo en MLP, fueron seleccionadas, aleatoriamente, ocho láminas con espesor ($2,70 \pm 0,05$) cm de un grupo de 5 m^3 de tablas de madera *Eucalyptus Grandis*, con humedad alrededor del 8%.

En seguida, fueron determinados los tiempos de la propagación del pulso en cada lámina por medio del

equipo de ultrasonido. Con los tiempos de la propagación del pulso, fue calculada la velocidad de la propagación a través de las láminas con la Ecuación 2. Los resultados conseguidos se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1. Velocidad de propagación del pulso.

Lámina	Velocidad de propagación del pulso (m/s)
01	5832 ± 10
02	4493 ± 10
03	5028 ± 10
04	6021 ± 10
05	5077 ± 10
06	4162 ± 10
07	5904 ± 10
08	6269 ± 10

Por medio de los ensayos destructivos, siguiendo las recomendaciones de la norma Brasileña [12], fueron determinadas las propiedades físico-mecánicas de cada lámina. Los resultados son mostrados en la Tabla 2

Tabla 2. Propiedades físico-mecánicas de las láminas.

Lámina	humedad (%)	Densidad aparente (kg/m ³)	Módulo de elasticidad paralelo (N/mm ²)
01	8,61 ± 0,02	917 ± 4	28816 ± 1
02	8,43 ± 0,02	1017 ± 4	16034 ± 1
03	8,62 ± 0,02	863 ± 4	23780 ± 1
04	8,74 ± 0,02	871 ± 4	22707 ± 1
05	11,25 ± 0,02	1015 ± 4	24970 ± 1
06	7,67 ± 0,02	958 ± 4	16804 ± 1
07	8,49 ± 0,02	888 ± 4	30322 ± 1
08	7,79 ± 0,02	716 ± 4	33364 ± 1

De acuerdo con Duarte, Azevedo Júnior y Carrasco [13], el módulo de Young de las tablas de madera de *Eucalyptus grandis* y la propagación del pulso se correlaciona con la velocidad v y con la densidad aparente ρ_{ap} a través de la ecuación (3)

$$E = 0,000934 v^2 + 13,6 \rho_{ap} - 14122 \quad (3)$$

Por medio de la ecuación 3, el módulo de Young de cada lámina fue determinado. En seguida, con el objetivo de optimizar la confección de la viga prototipo en MLP, las láminas fueron clasificadas en el orden decreciente del valor de la velocidad de la propagación del pulso y del módulo de Young. Tres clases de resistencia fueron establecidas para el

montaje posterior de la viga prototipo, como descrito en la tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de las láminas en clases de resistencia.

Clasificación de la lámina	Lámina	Velocidad de propagación del pulso (m/s)	Módulo de Young Ecua. 3 (N/mm ²)
C - 1	08	6269 ± 10	34430
	04	6021 ± 10	33569
	07	5904 ± 10	30171
	01	5832 ± 10	30117
C - 2	05	5077 ± 10	22982
	03	5028 ± 10	23294
C - 3	02	4493 ± 10	16810
	06	4162 ± 10	11795

4. Confección de la viga prototipo en función de la clasificación de las láminas

Después de la clasificación de las láminas, se realizó el procedimiento de confección de la viga prototipo, distribuyéndose las láminas de clase C - 1 en los bordes comprimidos y fraccionado de la viga, es decir, en las regiones de mayores solicitaciones. La clase C - 3, de menores valores de la velocidad de propagación y del módulo de Young, fueron colocados al lado del eje neutro de la viga, es decir, en la región donde son relativamente pequeñas las tensiones normales. Después del encolado y del prensado, la viga estaba con la configuración mostrada en la Figura 13 y la Figura 14.

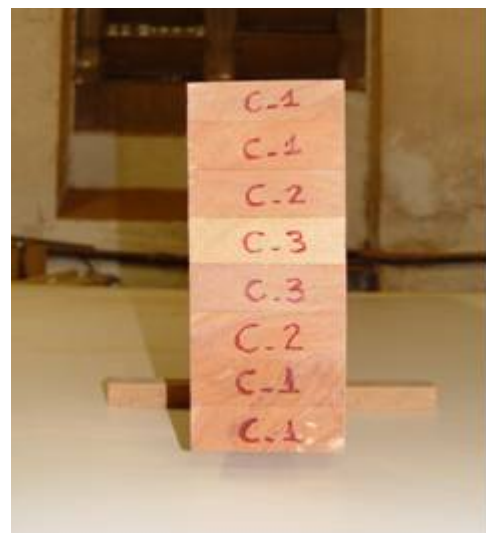


Figura 13. Localización de las láminas a través de la sección transversal en función de la clase de resistencia.



Figura 14. Viga prototipo después del encolado y del prensado de las láminas.

5. Conclusión

Puede ser verificado, por medio de los resultados conseguidos, una correlación fuerte entre la velocidad de propagación del pulso ultrasónico y las propiedades mecánicas de las láminas de madera, en particular, con el módulo de Young paralelo.

Puede ser concluido, de esta forma, que la técnica de la clasificación de láminas de madera con ultrasonido es suficientemente eficiente, segura y confiable, y podrá contribuir, de manera significativa, para el incremento en la fabricación optimizada de vigas en madera laminada pegada Eucalipto.

6. Agradecimientos

Expreso mis sinceros agradecimientos a la FAPEMIG, por aporte financiero que permitió la realización de este trabajo.

También agradezco a la ESMAD – Tecnologia en madera colada, por el auxilio en la fabricación de las piezas.

7. Referencias

- [1] Carrasco, E. V. M., “Resistência, elasticidade e distribuição de tensões nas vigas de madeira laminada colada (MLC)”, Tese Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, 1989.
- [2] Sandoz, Jean L., “Glued laminated timber: reliability and performance,” *Proceedings of the 5th World Conference on Timber Engineering*, August 17-20, 1998, pp. 549-556.
- [3] Macdonald, K. A. et al., “Nondestructive testing of wood products and structures: state of the art and research needs” *Forest Products Laboratory*, 1990.
- [4] Halabe, U. B. et al., “Assessment of defects and mechanical properties of wood members using ultrasonic frequency analysis”, 2003, pp. 314-322.
- [5] Baradit, E. et al., “Aplicación de ultrasonido en la evaluación de madera de pinus radiata”, *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, v. 1, 1998, pp. 27-33.
- [6] Machado, J. M. R. S., “Avaliação da variação das propriedades mecânicas de Pinho bravo (*Pinus pinaster* Ait.) por meio de ultra-sons”, Tese Doutorado, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2000.
- [7] Bartholomeu, A. “Classificação de Peças Estruturais de Madeira através do Ultra-som”, Tese Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, 2001.
- [8] Oliveira, F. G. R., “Estudo de Propriedades Mecânicas de Dicotiledôneas por meio de Ensaio Não-destrutivo utilizando Equipamento de Ultra-som”, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2001.
- [9] Emerson, R. et al., “Ultrasonic inspection of large bridge timbers”, *Forest Products Journal*, no 9, 2002, pp. 88 – 95.
- [10] Carrasco, E. V. M e Júnior, A. P. A., “Avaliação não destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através de ultra-som – Fundamentos físicos e resultados experimentais”. *Revista Engenharia Civil*, no 17, 2003, pp. 43 – 57.
- [11] Nogueira, M., “Determinação de módulos de elasticidade à compressão de madeira de *Pinus taeda* L. com o uso de ultra-som”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências Agrônômicas, 2003.
- [12] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR-7190, “Projeto de estruturas de madeira”. Rio de Janeiro, 1997.
- [13] Duarte, R. S.; Azevedo Júnior, A. P.; Carrasco, E. V. M., “Determinação de propriedades de tábuas de *Eucalyptus grandis* a partir de ensaios não destrutivos”, *Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural*, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina, 2004.