

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**CLASIFICACIÓN VISUAL Y ESTRUCTURAL DE TABLAS DE *Pinus elliottii*
NACIONAL EN BASE A NORMA UNIT 1261**

por

**Gastón BRUZZONE GONZÁLEZ
Álvaro CHABÉN BONILLA**

**TESIS presentada como uno de
los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo.**

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2019**

Tesis aprobada por:

Director: -----
Ing. Agr. PhD. Luis Soria

Ing. Agr. Sebastián Quagliotti

Ing. MSc. Ana Paula Coelho

Fecha: 20 de junio de 2019

Autores: -----
Gastón Bruzzone González

Álvaro Chabén Bonilla

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias y amigos por su constante presencia y apoyo incondicional.

A Ing. Agr. Sebastián Quagliotti, Dr. Ing. Agr. Luis Soria y MSc Ing. Ana Paula Coelho por habernos transmitido su entusiasmo y por su dedicación a lo largo de todas las etapas de este trabajo.

Al equipo técnico del Departamento de Proyectos Forestales del LATU en especial a: Javier Doldán, Ignacio Torino, Ing. Agr. Alicia Sánchez por su colaboración y dedicación en este trabajo.

A Arq. Laura Moya, Ing. Vanesa Baño y Arq. Jorge Casaravilla por brindar su apoyo y conocimiento a este trabajo.

A la señora Lic. Sully Toledo por su amable y desinteresada colaboración.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1. LA MADERA	3
2.1.1. <u>Generalidades de la madera aserrada</u>	4
2.1.2. <u>Generalidades de <i>Pinus elliottii</i></u>	5
2.1.3. <u>Morfología macroscópica de la madera</u>	6
2.2. PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA	9
2.2.1. <u>Densidad de la madera</u>	10
2.2.2. <u>Contenido de humedad</u>	12
2.3. PROPIEDADES MECÁNICAS.....	14
2.3.1. <u>Módulo de elasticidad (MOE)</u>	14
2.4. RESEÑA HISTÓRICA DE LA NORMALIZACIÓN DE LA MADERA ESTRUCTURAL.....	18
2.4.1. <u>Clasificación visual y mecánica</u>	18
2.4.2. <u>Antecedentes de la norma UNIT 1261</u>	21
2.5. NORMA UNIT 1261	27
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	28
3.1. CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL EXPERIMENTAL	28
3.2. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	28
3.3. CLASIFICACIÓN VISUAL.....	30
3.3.1. <u>Dimensiones</u>	31

3.3.2.	<u>Nudos</u>	32
3.3.3.	<u>Bolsas de resina y cortezas incluidas</u>	36
3.3.4.	<u>Fisura pasante o rajadura</u>	36
3.3.5.	<u>Fisura no pasante o grieta</u>	36
3.3.6.	<u>Desviación de las fibras</u>	37
3.3.7.	<u>Aristas faltantes o gemas</u>	39
3.3.8.	<u>Médula</u>	39
3.3.9.	<u>Alteraciones de tipo biológico que pueda presentar la madera</u>	40
3.3.10.	<u>Curvatura de cara, combado o arqueadura (X)</u>	40
3.3.11.	<u>Curvatura de canto, encorvado o encorvadura (Y)</u>	40
3.3.12.	<u>Torcedura o alabeo (Z)</u>	41
3.4.	MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS	42
3.4.1.	<u>Fakopp</u>	42
3.4.2.	<u>Flexión estática con pesas</u>	44
3.5.	CONTENIDO DE HUMEDAD EN BASE SECA	45
3.6.	DENSIDAD	46
3.7.	ENSAYOS EN MÁQUINA UNIVERSAL	46
4.	<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	54
4.1.	CLASIFICACIÓN VISUAL	54
4.2.	PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS	57
4.2.1.	<u>Ensayos en máquina universal</u>	58
4.2.2.	<u>Métodos no destructivos</u>	60
4.2.3.	<u>Relación entre variables</u>	63
5.	<u>CONCLUSIONES</u>	73
6.	<u>RESUMEN</u>	75
7.	<u>SUMMARY</u>	76
8.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	77

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Especificaciones para la clasificación visual de piezas de sección rectangular de <i>Pinus taeda</i> y <i>P. elliottii</i> de acuerdo a la norma UNIT 1261.	31
2. Valores límites medios y característicos de calidad por UNIT 1261.	53
3. Clasificación de tablas según clase de calidad.	54
4. Valores promedios considerando criterios de calidad para la clase EC1.	55
5. Valores promedios considerando criterios de calidad para la clase EC0.	56
6. Porcentaje por defecto en rechazo.	57
7. Tablas ensayadas para estimar carga máxima y MOR.	58
8. Valores promedios y característicos estimados de las propiedades de la madera estructural clasificada visualmente como EC1.	59
9. Valores promedios y característicos estimados de las propiedades de la madera estructural clasificada visualmente como EC0.	60
10. Valores estimados de la densidad de la madera estructural para toda la población (EC1 y EC0) utilizando métodos no destructivos.	61
11. Valores estimados de la densidad de la madera estructural clasificada visualmente EC1 utilizando métodos no destructivos.	61
12. Valores estimados de la densidad de la madera estructural clasificada visualmente EC0 utilizando métodos no destructivos.	61
13. Valores estimados del MOE de la madera estructural clasificada visualmente EC1 utilizando Fakopp.	62
14. Valores estimados del MOE de la madera estructural clasificada visualmente EC0 utilizando Fakopp.	62
15. Valores estimados del MOE de la madera estructural clasificada visualmente EC1 utilizando flexión con pesas.	63
16. Valores estimados del MOE de la madera estructural clasificada visualmente EC0 utilizando flexión con pesas.	63

Figura No.

1. Direcciones principales en la anisotropía de la madera.	3
2. Partes de la escuadría.....	5
3. Muestreo M4.	28
4. Secuencia de ensayos realizados.	29
5. Tablas de madera estandarizadas.	29
6. Clases de calidad.	30
7. Medida de espesor con calibre digital.....	32
8. Medición del largo total.....	32
9. Criterio general de medición de nudos en cara y en canto.	33
10. Nudos superficiales en la cara interna.	33
11. Criterio de medición y evaluación de nudos de arista.	34
12. Medición de nudo de canto.....	34
13. Criterio de medición y evaluación de los nudos de arista cuando existen dudas para su evaluación.	35
14. Criterio de medición de nudos agrupados.....	35
15. Medición de nudos agrupados.	35
16. Bolsa de resina.	36
17. Criterio de medición de fisuras.....	37
18. Criterio para la medición de la desviación de la fibra.	37
19. Desviación de la fibra.....	38
20. Medición de desviación de la fibra.	38
21. Medición y evaluación de las aristas faltantes.	39
22. Arista faltante.	39
23. Hongos cromógenos.....	40
24. Curvatura de cara.....	40
25. Curvatura de canto.....	41
26. Torcedura o alabeo.	41
27. Fakopp.	42
28. Ensayo utilizando Fakopp.....	43
29. Instrumentos utilizados en flexión estática con pesas.	44
30. Utilización de xilohigrómetro.....	45
31. Ensayo en máquina universal.	47
32. Esquema máquina universal.	48

Gráfico No.

1. Tabla ensayada alcanzando el MOR.	49
2. Carga vs. deformación dentro de los márgenes de deformación elástica.	50
3. Relación entre densidad y MOE (máquina universal) considerando la totalidad de la población (EC1 y EC0).	64
4. Relación entre densidad y MOE (máquina universal) considerando la clase visual EC1.	64
5. Relación entre densidad y MOE (máquina universal) considerando la clase visual EC0.	65
6. Relación entre densidad y MOE (Fakopp) considerando la totalidad de la población (EC1 y EC0).	66
7. Relación entre densidad y MOE (Fakopp) considerando la clase visual EC1.	66
8. Relación entre densidad y MOE (Fakopp) considerando la clase visual EC0.	67
9. Relación entre densidad y MOE (flexión estática con pesas) considerando la totalidad de la población (EC1 y EC0).	68
10. Relación entre densidad y MOE (flexión estática con pesas) considerando la clase visual EC1.	68
11. Relación entre densidad y MOE (flexión estática con pesas) considerando la clase visual EC0.	69
12. Relación entre MOE a partir máquina universal y Fakopp.	70
13. Relación entre MOE a partir máquina universal y flexión estática con pesas.	71
14. Relación entre MOE a partir de Fakopp y flexión estática con pesas.	71

1. INTRODUCCIÓN

El inicio de los programas de forestación en Uruguay data de más de 100 años pero ha tenido un incremento muy importante en los últimos 30 años a partir de la ley forestal No. 15.939. Promulgada por una unanimidad parlamentaria el 28/12/87, sus decretos reglamentarios constituyeron los principales instrumentos para implementar la política forestal nacional. Los dos objetivos principales fueron la conservación de los bosques naturales y la ampliación de la base forestal del país para un posterior desarrollo industrial.

Hasta la entrada de vigencia de dicha ley, la superficie de bosques plantados con fines industriales era de 46.000 hectáreas, multiplicándose por más de 10 veces y alcanzando 1,2 millones de hectáreas al año 2016. Al año 2018 los bosques ocupan aproximadamente 2 millones de hectáreas, el 60% de bosques plantados y el 40% de bosques nativos.

El sector forestal fue evolucionando desde una fase en la que básicamente se desarrollaron las plantaciones, hacia una fase de desarrollo industrial y comercial con alrededor de dos a tres rotaciones.

Actualmente el país cuenta con un gran número de industrias cuya materia prima es el preciado sólido proveniente de los árboles rondando 25.000 puestos laborales.

Este trabajo hace referencia a la utilización de madera producida en Uruguay cuyos destinos son el aserrío y la construcción. Este último se encuentra poco desarrollado en el país debido a la falta de un cuerpo normativo nacional lo que resulta en un déficit cultural a la hora de utilizar dicha materia prima.

La madera utilizada para construcciones civiles y edificaciones requiere de propiedades y características que garanticen una estructura segura para la vida de las personas y animales. Actualmente para utilizar madera en la construcción existe madera importada clasificada. Esto deja en evidencia hasta la fecha la falta de un cuerpo normativo que determine apta o no apta la madera nacional (*Pinus* y *Eucalyptus*).

El profesional o trabajador que utiliza la madera nacional desconoce sus propiedades lo cual se ve forzado a adoptar valores tabulados en normas extranjeras y a recurrir a estrategias de análisis que le permitan lidiar con las incertidumbres del material nacional en el Uruguay.

UNIT (Instituto Uruguayo de Normalización Técnica) es el organismo rector de la normalización en Uruguay. La normalización se llevó a cabo mediante la creación de un comité especializado en madera conformado por entes públicos y privados.

En el presente, Uruguay espera solucionar el problema de desconocimiento de la madera nacional en base a UNIT, desarrollando el cuerpo normativo para poder incrementar la construcción con madera.

Existe un número reducido de normas UNIT que en su mayoría refieren a nomenclaturas, definiciones y metodologías de ensayo. La ausencia de una norma de cálculo estructural para uso en la construcción y obra civil, impulsó a las instituciones que la conforman a la realización de la norma 1261, primera norma de clasificación visual y estructural de madera de *Pinus*.

El presente trabajo se marca dentro de las líneas de investigación que lleva a cabo el grupo de investigación interinstitucional conformado por el Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), Facultad de Arquitectura de la Universidad ORT y Departamento de estructuras y transporte de Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República.

El objetivo general del presente trabajo es aplicar la norma 1261 de UNIT a un lote de tablas de *Pinus elliottii*, clasificándolas en las diferentes clases que define la norma.

Los objetivos específicos:

- Determinar los valores característicos para Módulo de elasticidad (MOE) y densidad de las clases obtenidas en la clasificación visual utilizando las normas EN 384 y 14358.
- Realizar una comparación del método de referencia para determinar el MOE con dos métodos no destructivos (Fakopp y flexión estática utilizando pesas).
- Buscar relaciones entre la densidad y el MOE obtenido mediante los tres métodos.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. LA MADERA

Según la Real Academia Española, la madera es la parte sólida de los árboles bajo la corteza (RAE, 2014).

La madera, independientemente de la especie que sea, puede ser considerada como un material biológico, higroscópico y anisotrópico. Material biológico ya que está formado primeramente por células vivas que luego mueren constituyendo la misma. Principalmente compuesta por moléculas de celulosa y lignina, que puede ser biodegradada por el ataque de hongos e insectos xilófagos. Por esta razón, a diferencia de otros materiales inorgánicos (ladrillo, acero y hormigón, entre otros), se deben conocer características técnicas que determinen la durabilidad frente a la exposición de agentes ambientales y biológicos (Fritz, 2004).

La madera es un material anisotrópico, lo que significa que según sea el plano o dirección que se considere respecto a la dirección longitudinal de sus fibras y anillos de crecimiento, el comportamiento tanto físico como mecánico del material, presenta resultados dispares y diferenciados. Para tener una idea de cómo se comporta, la madera resiste entre 20 y 200 veces más en el sentido del eje del árbol, que en el sentido transversal (Fritz, 2004).

En la figura 1 se observan los 3 planos existentes: eje tangencial, radial y axial o longitudinal.

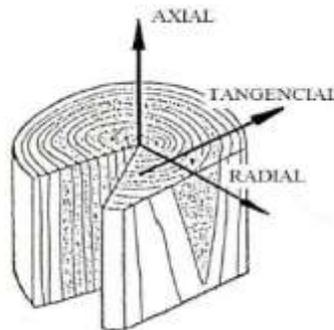


Figura 1. Direcciones principales en la anisotropía de la madera.
Fuente: Vignote y Martínez (2005).

La madera también es un material higroscópico, dado que, según las condiciones de humedad en el medio exterior absorbe o cede humedad de su interior hasta un punto de equilibrio. Este comportamiento provoca cambios dimensionales y deformaciones en la madera (Fritz, 2004).

2.1.1. Generalidades de la madera aserrada

La madera es históricamente uno de los materiales más utilizados por el hombre dado que es un recurso ampliamente disponible en la naturaleza. El hombre ha explotado las ventajas en la construcción de estructuras de todo tipo, predominando aquellas donde el esfuerzo de flexión y compresión es en dirección de la fibra. Al inicio, las estructuras eran los troncos enteros apilados horizontalmente y ensamblados en las esquinas. Los primeros aserraderos comenzaron a serrar los troncos por sus dos lados, de modo que optimizaron el uso y la estandarización de las medidas de las escuadrías de la materia prima. La madera de aserrío es la forma más elemental de aprovechamiento del tronco. Es el resultado de la industria de primera transformación mediante procesos simples de aserrado, secado y cepillado. Las piezas siguen el mismo patrón de tamaños, generalmente escuadradas, con caras paralelas entre si y cantos perpendicular a la misma (Montero, 2013).

A continuación, algunas definiciones sobre la madera estructural de escuadría rectangular, tal como se observa en la figura 2.

Canto: de los 4 lados de una pieza de sección rectangular, son los lados de menor dimensión (Fritz, 2004).

Cara: de los 4 lados de una pieza de sección rectangular, son los 2 lados de mayor dimensión, normalmente colocados en posición vertical en una pieza sometida a flexión (Fritz, 2004).

Altura: dimensión de la cara en sentido perpendicular a la pieza. Expresado como “h” en la literatura por tratarse de la altura del rectángulo que conforma la sección (Fritz, 2004).

Espesor: dimensión del canto en sentido perpendicular de la pieza. Se expresa como “b” por tratarse de la base del rectángulo que conforma la sección (Fritz, 2004).

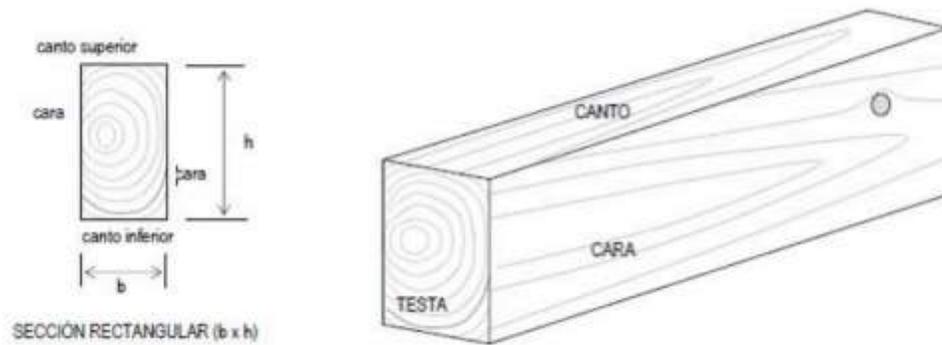


Figura 2. Partes de la escuadría.
Fuente: Montero (2013).

Actualmente, en la mayoría de los países desarrollados su uso como material estructural alcanza a más del 90% de la construcción habitacional de 1 a 4 pisos (Fritz, 2004).

2.1.2. Generalidades de *Pinus elliottii*

Específicamente en esta tesis de grado se desarrollan propiedades específicas de tablas de *Pinus elliottii*, lo cual es de debido interés conocer características propias (AEIM, 2016).

- Procedencia: Sur – Sureste de Estados Unidos de América.
- Denominación: pino amarillo del Sur, pino elliottii.
- Descripción de la madera: albura: blanco amarillenta, duramen: marrón rojizo.
- Defectos característicos: nudos, bolsas de resina, enteamiento y madera juvenil.
- Propiedades físicas: densidad aparente al 12% de humedad 510 kg/m³, madera semiligera.
- Propiedades mecánicas: resistencia a flexión estática 975 kg/cm², módulo de elasticidad 130000 kg/cm², resistencia a la compresión 492 kg/cm².

- Durabilidad: moderadamente durable a poco durable en cuanto al ataque de hongos.
- Impregnabilidad: duramen: no impregnable, albura: de medio a poco impregnable.
- Mecanización: aserrado: fácil, salvo que tenga exceso de resina.
- Secado: fácil y rápido, riesgo pequeño de fendas y deformaciones, exudaciones de resina.
- Encolado: problemas si existe exceso de resina.
- Clavado y atornillado: necesita pretaladros.
- Acabado: problemas cuando existe resina y es conveniente aplicar un fondo que homogenice la madera.
- Aplicaciones: muebles rústicos y juveniles de interior, carpintería de huecos y revestimientos, interior y semiexterior (puertas, ventanas, tarimas, frisos), carpintería de armar, chapas y tableros contrachapados.

2.1.3. Morfología macroscópica de la madera

El corte transversal de un árbol permite apreciar la estructura interior, la cual está formada por las siguientes partes que se presentan a continuación.

La médula es un elemento anatómico característico en el árbol (Vignote y Martínez, 2005). La misma está constituida por tejido parenquimatoso o blando, más o menos central del tronco y ramas del tronco (UNIT, 2018). La médula está situada generalmente en el interior del primer anillo, con propiedades mecánicas inferiores a las del leño que lo circunda. Generalmente a la presencia de médula se lo relaciona con la existencia de madera juvenil. En estado adulto es tejido inactivo (Baño et al., 2015).

El cambium vascular es el meristemo lateral que forma los tejidos secundarios. Se halla localizado entre el xilema y el floema, y en tallos y raíces, normalmente tiene la forma de un cilindro (Esau, 1985).

Los anillos de crecimiento son originados por el cambium vascular. Los más internos son los más viejos y los externos los más jóvenes. Teóricamente se formaría un anillo por año pero esto no es así, la actividad cambial puede

interrumpirse dentro de la misma estación de crecimiento y luego reanudarse, lo que hace que a veces aparezcan falsos anillos. Cada anillo tiene dos zonas: leño temprano (primavera) y leño tardío (verano – otoño). Las condiciones ambientales y la genética de la especie determinan el ancho de los anillos de crecimiento y las proporciones de leño temprano y tardío afectando propiedades físicas y mecánicas (Ziliani, 1978).

El duramen se define como aquellos anillos más internos de la madera que han perdido la funcionalidad en sentido de conducción y de reserva. Contiene menos porcentaje de agua que la albura, puede presentar diversas sustancias (productos de excreción finales del metabolismo) y tálides. Generalmente contiene sustancias solubles en agua (polisacáridos, alcaloides, taninos) que al oxidarse dan el color oscuro. En su estado natural el duramen tiene mayor durabilidad que la albura (Ziliani, 1978).

La albura se define como la parte externa de la madera, la cual contiene células vivas y reservas en donde se lleva a cabo la conducción de agua y de solutos inorgánicos. Generalmente de color más claro que el duramen (Ziliani, 1978).

Finalmente, la corteza está formada por materia muerta, de aspecto resquebrajado (Fritz, 2004). Su principal función es la protección del árbol contra los peligros del exterior. Se renueva constantemente, no permite que pase el agua de lluvia y evita que cuando incide el sol, se produzca una evaporación demasiado fuerte. Sirve además de protección contra el frío, el calor y la invasión de hongos e insectos (Presa, 2015).

A continuación se definen las singularidades ligadas a la anatomía de la madera.

El nudo es una inclusión de la porción basal de una rama dentro del tallo del árbol. Su influencia como defecto es muy variable, según sea el proceso seguido por la rama en el contexto del árbol, y según sea el tipo de transformación industrial de ese árbol (Vignote y Martínez, 2005). Los nudos afectan las propiedades de resistencia mecánica, sobre todo a la flexión, en relación con el tamaño y la ubicación en la pieza de madera; generalmente estos vienen acompañados por depósitos de resina u otras exudaciones, que ocasionan problemas en el terminado de la madera (cepillado, pintura, Tuset y Durán, 1979).

Los nudos pueden clasificarse de las siguientes maneras.

Según su estado (Vignote y Martínez, 2005).

- Nudo sano y adherente
- Nudo negro
- Nudo saltadizo
- Nudo vicioso o podrido

Según la rama que le dio origen (verde o seca al momento del apeo, Tuset y Durán, 1979).

- Nudo vivo
- Nudo muerto

Las bolsas de resina son defectos que puede encontrarse en maderas de coníferas y consisten en la acumulación de exudaciones en cavidades de diversos tamaños (Tuset y Durán, 1979). Estas cavidades tienen forma predominantemente alargada en dirección del eje del árbol. Su origen es fundamentalmente traumático, es decir el árbol como respuesta a un estímulo externo, posee uno de los tantos mecanismos de defensa, produciendo una secreción anormal de resina que se acumula en pequeñas bolsas en las proximidades de la zona afectada (Vignote y Martínez, 2005).

Las bolsas de resina afectan la apariencia de la madera y limitan su utilización al reducir sus propiedades de resistencia mecánica, sobre todo al corte o cizallamiento en uniones con otros elementos de madera (Tuset y Durán, 1979).

La corteza incluida hace referencia a la presencia de una masa de corteza total o parcialmente comprendida en la madera (UNIT, 2018).

Finalmente, la desviación de las fibras se refiere a la desviación de la dirección general de las fibras respecto al eje longitudinal de la pieza (UNIT, 2018).

Continuando, se definen las singularidades ligadas al aserradero de las piezas de madera.

La arista faltante es un defecto de aserrado. La misma puede ser considerada como un posible resultado de árboles con curvatura de fuste. Además en algunos casos puede aparecer cuando el operario aserrador busca

conseguir un buen rendimiento de un rollizo, a pesar que el diámetro limite, la posibilidad de anchos o de espesores correctamente encuadrados (Tuset y Durán, 1979).

Tuset y Durán (1979) definieron la rajadura como una separación de los elementos leñosos cuyo desarrollo afecta dos superficies opuestas o adyacentes de una pieza.

Tuset y Durán (1979) definieron a la grieta como una separación de los elementos leñosos cuyo desarrollo no alcanza a afectar dos superficies opuestas o adyacentes en una pieza.

A continuación se definen las deformaciones presentes en las piezas de madera.

El curvado de cara hace referencia a la curvatura por la cual las caras de una tabla se presentan cóncavas o convexas en sentido paralelo a la fibra (Álvarez Noves, 1986).

El curvado de canto es la distorsión por la que los cantos se curvan formando un arco poco pronunciado (Álvarez Noves, 1986).

Álvarez Noves (1986) definió al abarquillado como una distorsión por la cual la cara de una pieza aserrada se vuelve cóncava o convexa en sentido perpendicular a la fibra.

Por último, se define el alabeo simultáneo de las caras de una pieza escuadrada en las direcciones longitudinal y transversal, lo que da como resultado un retorcimiento de la madera a manera de tirabuzón. En la mayoría de los casos, la torcedura se manifiesta en madera con grano espiralado o entrecruzado pero también puede presentarse en piezas con grano recto como consecuencia de un secado desparejo o por tensiones de crecimiento (Tuset y Durán, 1979).

2.2. PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA

Las propiedades físicas de la madera son aquellas que determinan su comportamiento ante los factores que intervienen en el medio ambiente natural sin que éste actúe química ni mecánicamente en su estructura interna (Coronel, 1994).

Según Spavento et al. (2008) las propiedades físicas son:

- Densidad real y aparente.
- Contenido de humedad.
- Cambios dimensionales (higroscopicidad).

Según Olivera y Cardenas (2007) las propiedades físicas dependen de:

- La disposición y la orientación de la pared celular de la madera.
- La cantidad de sustancia básica que forma la pared celular.
- Los porcentajes de sustancias estructurales o de material celulósico que contiene el leño.
- La composición química de las sustancias básicas, que explica muchas diferencias cuantitativas en el comportamiento de la madera.
- Contenido de agua que se encuentre presente.

2.2.1. Densidad de la madera

Es uno de los parámetros de la madera de mayor cuantificación de las plantaciones y caracterización de las propiedades de la madera. Al ser la madera un material poroso se debe considerar la densidad real y densidad aparente para la misma pieza. La densidad real corresponde a la densidad de la pared celular, descontando en el volumen y todos los espacios huecos. El valor de la densidad real es constante y permanece en alrededor de 1.53 a 1.56 g/cm³ en todas las especies (Spavento et al., 2008).

La densidad aparente es la relación del peso al volumen de la muestra de la madera, sin descontar en esta última, los espacios huecos interiores (Coronel, 1994). Es un valor variable, ya que no depende solamente de la estructura de la madera, sino además de la humedad que contiene la pieza (Spavento et al., 2008).

Adicionalmente, es una de las propiedades físicas más importantes de la madera, de ella dependen la mayoría de las propiedades físicas y mecánicas. Es un excelente índice para predecir las siguientes características: resistencia a la flexión, rigidez, dureza, rendimiento pulpable y calidad de papel (Jozsa y Middleton, 1994). La variación de la densidad aparente es también muy importante para saber si el uso final asignado a la madera es el apropiado (Spavento et al., 2008).

Según Cisternas (1994) la densidad aparente corriente o también llamada como “densidad seca al aire”, es la densidad de la madera con un

contenido de humedad en equilibrio en una atmósfera estándar de 20°C y una humedad relativa de 65%. Esta atmósfera da un contenido de humedad de equilibrio para madera de 12%.

Como antecedentes de caracterización de madera, destacan los trabajos pioneros realizados por el Departamento de Proyectos Forestales del LATU en el marco de los Grupos Técnicos de Madera Aserrada de Pino GT3, y que dieran lugar a los informes para pinos, junto con varias notas técnicas e informes de investigación de las Series Forestales, que reportan resultados complementarios sobre estimación de propiedades de flexión de tablas de madera mediante ensayos no destructivos, y sobre el cumplimiento con los requisitos de la norma japonesa para madera estructural en el caso de piezas de madera aserrada de pino (Baño et al., 2015).

A continuación se presentan diferentes valores de densidad provenientes de trabajos llevados a cabo en la institución nombrada anteriormente.

Pérez del Castillo et al. (2000b) realizaron un estudio de 15 árboles de *Pinus taeda* procedentes del departamento de Rivera y encontró una densidad media de 0,378 g/cm³.

Pérez del Castillo (2001) observó una densidad de 0,487 g/cm³ de 80 tablas secas de *Pinus elliottii* de 43 años de edad del departamento de San José.

Böthig (2001) estudió árboles de *P. taeda* de 11-21 años de edad procedentes del departamento de Rivera y observó valores promedio de densidad de 0.378 g/cm³.

O'Neill et al. (2002) encontraron una densidad promedio de 0.391 g/cm³ ensayando un total de 216 tablas procedente de una plantación de *P. elliottii* de 25 años de edad del departamento de Río negro. El coeficiente de variación fue de 14,9%.

O'Neill et al. (2003b) establecieron una densidad promedio de 0,384 g/cm³ ensayando un total de 216 tablas procedente de una plantación de *P. taeda* de 26 años de edad del departamento de Río Negro. El coeficiente de variación fue de 12%.

O'Neill et al. (2004b) observaron una densidad de 0,391 g/cm³ de un total de 225 probetas de *P. taeda* de 39 años procedente del departamento de Rivera. El coeficiente de variación fue de 12%.

O'Neill y Tarigo (2008) trabajaron con una densidad de 0.396 g/cm^3 para 195 tablas secas de una plantación de *P. elliotii* de 28 años de edad del departamento de Rivera. El coeficiente de variación fue de 15%.

Quagliotti y O'Neill (2009) trabajaron con dos poblaciones de *P. taeda* ambas de 12 años de edad. La primera procedente de Tacuarembó, la cual se ensayaron un total de 88 tablas secas con densidad promedio de 0.435 g/cm^3 y la segunda procedente de Paysandú, la cual se ensayaron 92 tablas secas con una densidad básica promedio de 0.449 g/cm^3 . Los coeficientes de variación fueron de 4,6% y 5,4% respectivamente.

O'Neill et al. (2013) realizaron un trabajo que comprendía once muestreos del género *Pinus*, cuatro de *Pinus elliotii* de edades de 24 a 43 años de distintas procedencias y siete de *Pinus taeda* de 12 a 24 años de distintas procedencias. A partir de un total de 1418 vigas de dimensiones $5 \times 15 \times 2800$ a 3300 mm de ambas especies, se estimó una densidad igual a $0,443 \text{ g/cm}^3$ con un coeficiente de variación de 12,8%.

2.2.2. Contenido de humedad

Cuando un árbol es recién cortado, su madera contiene gran cantidad de agua, la cantidad va a depender del lugar de origen y de la especie forestal (Spavento et al., 2008).

La albura al estar formada por células encargadas de la conducción de agua presenta mayor contenido de humedad que el duramen. La albura puede llegar a acumular más del 100% de su peso seco en agua. La relación agua total sobre materia seca leñosa es muy variable en una pieza dada la influencia de diversos factores tales como la estructura celular y la densidad (Spavento et al., 2008).

El agua contenida en la madera se encuentra bajo 3 formas diferentes (Spavento et al., 2008).

- Agua libre: por encima al punto de saturación de fibras (28 – 30% de humedad aproximadamente), ocupa las cavidades celulares o lúmenes, dándole a la madera la condición de “verde”.
- Agua de saturación o higroscópica: agua comprendida en las paredes celulares, representa un contenido de humedad entre 1 a 28 – 30%,

entre estos márgenes de contenido de humedad es cuando se observa contracción e hinchazón.

- Agua de constitución: es el agua que forma la materia celular de la madera, su separación significa la destrucción del material (quemado).

Para valores de humedad entre 8 y 20% y piezas de madera libre de defectos se considera que existe una relación lineal entre las propiedades mecánicas y el contenido de humedad. Para niveles de humedad por debajo del 30% y madera comercial, a medida que aumenta la humedad de la madera, disminuye su resistencia y su módulo de elasticidad (Fernández-Golfín et al., 2003).

Convencionalmente, el contenido de humedad (CH) se define como la relación porcentual del peso del agua contenida en la madera, respecto al peso seco (libre de humedad) de la madera (Córdoba, 2005).

El contenido de humedad se puede calcular de la siguiente manera:

$$CH (\%) = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso seco al horno}} \times 100$$

El peso del agua se calcula en base a la diferencia entre el peso de la madera húmeda y el peso de la madera anhidra. De este modo, el contenido de humedad (CH) se define como la cantidad de agua que tiene la madera con respecto a su masa anhidra (Spavento et al., 2008).

Los métodos para determinar el contenido de humedad son los siguientes (Spavento et al., 2008).

- Métodos eléctricos.
- Secado en estufa (método de referencia).
- Destilación.

Dentro de este trabajo se utilizó un Xilohigrómetro chequeado con el método de referencia, correspondiendo a uno de tipo de resistencia en base a electrodos. Estos penetran la madera y miden la humedad en el aire dentro de los poros indicando en el computador (Spavento et al., 2008).

2.3. PROPIEDADES MECÁNICAS

Las propiedades mecánicas de la madera indican el comportamiento cuando sobre ella actúan cargas o sollicitaciones exteriores, principalmente a las deformaciones. En general la determinación de las propiedades mecánicas de la madera se realiza mediante la ejecución de ensayos planificados, conforme a métodos normalizados (Coronel, 1994).

2.3.1. Módulo de elasticidad (MOE)

El MOE se define como la relación del esfuerzo por unidad de superficie sobre la deformación por unidad de longitud. Es una medida de flexibilidad o de rigidez de la madera. Esta propiedad como otras se encuentra afectada por la anisotropía de la madera. Cuanto más alto sea el valor del MOE, mayor será su rigidez (Tuset y Durán, 1979).

El módulo de elasticidad se puede estimar a partir de los métodos no destructivos, que son aquellos métodos que pueden estimar propiedades mecánicas, o la aptitud para ciertos usos de la madera, sin destruirla. Los métodos no destructivos son variados. En pruebas sobre maderas se emplean por lo general los acústicos y los ultrasónicos (Olivera y Cardenas, 2007).

Además, Pérez del Castillo et al. (2000a) recomendaron que los métodos no destructivos sean confiables, racionales y rápidos.

En este trabajo se utilizó Fakopp y flexión estática por pesas.

Por otro lado, el MOE se puede estimar a partir de ensayos realizados en máquina universal. Los mismos son aquellos ensayos en los cuales las muestras se someten a cargas crecientes hasta alcanzar un estado límite que puede provocar la rotura de la madera o bien su agotamiento, lo que se traduce posteriormente en la imposibilidad de usarla nuevamente (Coronel, 1994).

Según Coronel (1994) estos ensayos dan resultados muy completos para las características de las propiedades mecánicas. Proporcionan el dato del módulo de rotura y módulo de elasticidad, el cual este último es el objetivo de este trabajo.

A continuación se presentan distintos valores de MOE provenientes de diferentes trabajos llevados a cabo en el LATU.

Pérez del Castillo et al. (2000a) estimaron un MOE promedio de 5789 MPa de 50 tablas de *P.taeda*. Se utilizó el método flexión con pesas con un

contenido humedad promedio de 25%. El coeficiente de variación estimado fue igual a 12,3%.

Pérez del Castillo (2001) observó un MOE promedio de 9600 MPa de 80 tablas secas de *P.elliottii* de 43 años de edad del departamento de San José. Se utilizó el método FFT y con un contenido promedio de humedad de 9,7%.

O'Neill et al. (2002) trabajaron con 130 tablas de árboles de *P. elliottii* de diferentes clases diamétricas de 25 años de edad del departamento de Río Negro. Obtuvieron datos de MOE promedio de 7630 MPa utilizando FFT, 7050 MPa utilizando máquina universal en tablas secas con un contenido de humedad de 10,5 %. Los coeficientes de variación fueron de 21,5% y 24,2% respectivamente.

O'Neill et al. (2003b) trabajaron con dos muestreos, el primero contaba con un total de 265 tablas de *Pinus taeda* y estimaron un MOE (mediante máquina universal) de 7910 MPa. En cuanto al segundo contaba con un total de 245 tablas de *Pinus elliottii* y estimaron un MOE (mediante máquina universal) de 6796 MPa. Cabe destacar que ambas plantaciones tenían 24 años de edad de procedencia del departamento de Río Negro. Además para ambos casos las tablas comprendían de dimensiones de 50 x 150 x 2800 mm. Por último es importante destacar que el *P. taeda* presenta valores promedios mayores que los de *P. elliottii* en el MOE, un 17 % mayor.

Pérez del Castillo y Venturino (2003a) realizaron distintos ensayos, el primero contaba de 96 tablas de tamaño real de *P. elliottii* de 24 años de edad procedente del departamento de Río Negro y encontró un MOE promedio de 8630 MPa. El segundo contaba de 80 tablas de tamaño real de *P. elliottii* de 40 años de edad procedente del departamento de San José y encontró un MOE promedio de 9629 MPa. El tercero contaba de 92 tablas de tamaño real de *P. taeda* de 24 años de edad procedente del departamento de Río Negro y encontró un MOE promedio de 9909 MPa. El último ensayo contaba de 50 tablas de tamaño real de *P. taeda* de 17 años de edad procedente del departamento de Rivera con un MOE promedio de 7082 MPa.

O'Neill (2004a) estimó un MOE promedio de 8354 MPa a partir de un total de 141 tablas ensayadas de la especie *Pinus taeda* L. de 24 años de edad procedente del litoral del Uruguay. Las tablas comprendían un dimensionamiento 50 x 150 x 2800 mm con un contenido de humedad entre 10 a 12%. El coeficiente de variación fue de 20,9%.

O'Neill et al. (2004b) llevaron a cabo ensayos en 151 tablas de *P. taeda* de 39 años de edad procedente del departamento de Rivera y obtuvieron

valores de MOE promedio de 8725 MPa utilizando FFT y 7893 MPa utilizando la máquina universal. Los coeficientes de variación para ambos fueron de 23%.

O'Neill y Tarigo (2008) llevaron a cabo ensayos en 122 tablas de *P. elliotii* de 28 años de edad procedente del departamento de Rivera y obtuvieron valores de MOE promedio de 8566 MPa utilizando FFT y 8396 MPa utilizando la máquina universal. Los coeficientes de variaciones fueron 26,4% y 31,3% respectivamente. El contenido de humedad fue de 10,7%. Adicionalmente estimó un valor de MOE promedio de 10347 MPa utilizando Fakopp para una muestra de 46 tablas.

Quagliotti y O'Neill (2009) trabajaron con dos muestreos de *Pinus taeda* de 12 años de edad ambos. El primero precedente de Tacuarembó, se ensayaron un total de 88 tablas y se estimó un MOE promedio de 5685 MPa utilizando FFT, un MOE promedio de 5979 MPa utilizando Fakopp, un MOE promedio de 5108 MPa utilizando máquina universal y un MOE promedio de 6532 MPa utilizando Sylvatest. Y en cuanto al segundo muestreo, procedente de Paysandú, se ensayaron un total de 92 tablas y se estimó un MOE promedio de 5868 MPa utilizando FFT, un MOE promedio de 5994 MPa utilizando Fakopp, un MOE promedio de 5284 MPa utilizando máquina universal y un MOE promedio de 6466 MPa.

O'Neill et al. (2013) llevaron a cabo un trabajo que comprendía de 11 muestreos del género *Pinus*, cuatro de *Pinus elliotii* de edades de 24 a 43 años de distintas procedencias y siete de *Pinus taeda* de edades de 12 a 24 años de distintas procedencias. A partir de un total de 1436 vigas de dimensiones 50 x 150 x 2800 a 3300mm de ambas especies, se estimó un MOE promedio igual a 7582 MPa utilizando FFT con un coeficiente de variación de 31,6% y un MOE promedio igual a 7085 MPa utilizando máquina universal con un coeficiente de variación de 32,5%.

A continuación se presenta una comparación de diferentes métodos para la estimación del MOE.

Pérez del Castillo et al. (2000a) calcularon el coeficiente de correlación entre los valores de MOE obtenidos utilizando el método de flexión estática con pesas con respecto a los otros cinco métodos (FFT vibración transversal, FFT vibración longitudinal, Fakopp, Sylvatest, Pundit). Para todos los casos los valores de las correlaciones fueron superiores a 0,90 lo que significa que los coeficientes son altos y positivos. Sin embargo la correlación entre el MOE obtenido por el método de flexión (pesas) y el MOE obtenido por el método FFT (vibración longitudinal y transversal) fue la que presentó un mayor valor con respecto a las otras. La especie estudiada fue *P. taeda*.

Pérez del Castillo (2001) estableció diferentes coeficientes de correlación entre el MOE obtenido utilizando el método de flexión estática con pesas y el MOE obtenido a partir de otros métodos utilizados (Pundit, Sylvatest, FFT trans, FFT long, máquina universal). Para todos los casos el valor de las correlaciones fueron superiores a 0,90 lo que significa que los coeficientes son altos y positivos. Cabe destacar que el coeficiente de correlación más elevado fue entre el MOE flexión estática por pesas y el MOE flexión estática por máquina universal. La especie estudiada fue *P. elliotii*.

O'Neill et al. (2002) realizaron una comparación entre los valores de MOE obtenidos por los métodos conocidos como máquina universal y FFT y obtuvieron un coeficiente de correlación de 0,914. La especie estudiada fue *P. elliotii*.

O'Neill et al. (2003b) determinaron un coeficiente de correlación de 0,948 a partir de la relación entre el MOE obtenido por la máquina universal y el FFT. Para esto se ensayaron un total de 212 tablas de la especie *P. taeda*. Los valores de MOE obtenidos mediante el FFT fueron ligeramente superiores a los obtenidos en ensayo de flexión estática en máquina universal.

O'Neill et al. (2004b) determinaron un coeficiente de correlación de 0,949 a partir de la relación entre el MOE obtenido por la máquina universal y el FFT. Para esto se ensayaron un total de 225 tablas de la especie *P. taeda*.

O'Neill y Tarigo (2008) calcularon distintos coeficientes de correlación a partir de los valores de MOE obtenidos por dos métodos. El coeficiente de correlación obtenido entre la máquina universal y el FFT tuvo un valor de 0,836 ensayando un total de 172 tablas. Luego el coeficiente de correlación obtenido entre la máquina universal y el Fakopp fue de 0,847 ensayando un total de 46 tablas denominadas "C" (zona cercana a la corteza). Por último el coeficiente de correlación entre la máquina universal y el FFT tuvo un valor de 0,821 ensayando un total de 46 tablas denominadas "C". La especie estudiada fue *P. elliotii*.

La importancia de conocer la relación entre la densidad y el MOE radica en la resistencia de la madera. Posteriormente se puede visualizar distintos valores estimados considerando dicha relación en trabajos llevados a cabo en el LATU.

Pérez del Castillo et al. (2000a) calcularon un coeficiente de correlación que mostró ser alto y positivo, cuyo valor fue igual a 0,837 a partir de un total de 50 tablas de *Pinus taeda*. El contenido de humedad promedio fue de 25%. Cabe destacar que el MOE establecido fue utilizando el método de pesas.

Pérez del Castillo (2001) encontró un coeficiente de correlación de -0,0767 en tablas secas de *Pinus elliottii*. Este valor negativo se debe seguramente a la existencia en estos especímenes de madera de compresión (madera principalmente en zonas alejadas de la médula) y madera con alto contenido de resina (madera rodeando la médula). Esto lleva a un aumento de la densidad que no va acompañada con un aumento del MOE. El MOE establecido fue utilizando el método de pesas.

O'Neill et al. (2002) establecieron un coeficiente de correlación de 0,23 para *P. elliottii*, lo cual significó ser una correlación no significativa. Además comprobaron que existió para un mismo valor de densidad una muy amplia dispersión de los valores de MOE. Este último se calculó a partir de la máquina universal.

O'Neill et al. (2003b) estimaron un coeficiente de correlación de 0,520 para tablas "B" (zona central) y "C" (zona cercana a la corteza) y un valor de 0,114 para tablas A (zona cercana a la médula). La especie estudiada fue *P. taeda*. El MOE se calculó a partir de la máquina universal.

O'Neill y Tarigo (2008) estimaron un coeficiente de correlación de 0,290 en tablas "A" (zona cercana a la médula), 0,494 en tablas "B" (zona central) y 0,624 en tablas "C" (zona cercana a la corteza). La especie estudiada fue *P. elliottii*. El MOE se calculó a partir de la máquina universal.

2.4. RESEÑA HISTÓRICA DE LA NORMALIZACIÓN DE LA MADERA ESTRUCTURAL

Históricamente existen 2 filosofías de clasificación estructural que son la base de las actuales normas, "Tensiones admisibles" de origen estadounidense, y "Estados límites" europeo. Hoy en día en cuestión de uso la segunda comenzó a sustituir la primera. En el método de tensiones admisibles se adopta un factor de seguridad único (FS global) que es aplicado a las propiedades del material, mientras que en el método de estados límites se utiliza una serie de factores de seguridad parciales (FS parciales) que varían para los diferentes ensayos y acciones exteriores a la madera. En el mundo estas dos filosofías fueron la base de la normalización en los países que desarrollaron normas en madera y demás materiales (Moya et al., 2015b).

2.4.1. Clasificación visual y mecánica

La gran variedad de maderas hace necesaria la existencia de clasificaciones para optimizar su uso. La clasificación de ésta permite ubicar cada pieza en distintos grupos según aspecto o resistencia, logrando así una

mejor utilización de ésta sacando provecho de sus ventajas y posibilidades. Es posible que al tratarse de un material natural puede tener variaciones en sus propiedades, sino que es posible también que tenga fallas o defectos que puedan afectar su comportamiento estructural, como nudos, desviaciones de fibra, rajaduras y otros. La clasificación puede ser por aspecto (revestimientos) o por resistencia. Por resistencia puede ser por clasificación visual o mecánica (Barreiro y Hirsch, 2011).

La clasificación visual es determinar la funcionalidad según la ausencia o presencia de sus defectos. Los defectos pueden ser naturales de la madera, problemas desde el campo, aserrado y/o secado determinando problemas de la seguridad y durabilidad en su empleo (Barreiro y Hirsch, 2011).

La clasificación visual en función del aspecto exterior de la madera ha sido, y es, el método más usado para decidir sobre la calidad mecánica de la madera. De 1923 data una de las primeras normas de clasificación visual, desarrollada y publicada por el Forest Products Laboratory de Madison (EE.UU). Hacia 1950 ya otros países europeos iban a desarrollar sus normas tal es el caso de Alemania (DIN), Inglaterra (BSI), Francia (AFNOR), etc (Fernández-Golfín et al., 2001).

Según Fernández–Golfín et al. (1998) las normas de clasificación visual subestiman mucho la calidad mecánica, en un 50 %, y de esta manera, el beneficio económico del productor. En base a la baja eficacia, se introdujeron nuevos métodos de clasificación con ensayos no destructivos (técnicas de ensayos, clasificación, equipos de clasificación automatizados).

Hasta la década de 1970, en España, el estudio del comportamiento mecánico en la madera se realizaba con probetas pequeñas y libres de defectos, no representando realmente el material utilizado en la construcción por lo cual se comienza a realizar ensayos de tamaños estructurales y con defectos en su sección (Montero, 2013).

A continuación se puede observar diferentes trabajos realizados en el Uruguay, utilizando distintas normas.

Pérez del Castillo y Venturino (2003a) realizaron una inspección visual en tablas de las especies *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* de diferentes edades procedentes de dos sitios del Uruguay (Río Negro y San José). Las tablas tenían un dimensionamiento de 50 x 150 x 2800 mm con un contenido de humedad promedio de 11%. Realizaron una clasificación visual a partir de dos normas, la norma AS 2082-1979 (norma Australiana) que se utilizó para

determinar el diámetro nudoso (KDR) y la norma NCh 1207.0-90 (norma Chilena) para determinar el área nudosa (KAR).

Moya et al. (2015a) llevaron a cabo un proyecto para caracterizar estructuralmente la madera aserrada de pinos cultivados en el Uruguay. Se utilizaron dos muestreos, el M1 (muestreo 1) compuesto por árboles de 25 años de edad procedente del litoral y el M2 (muestreo 2) compuesto por árboles de 15 años procedente del Sur-Oeste. Para ambos casos, la composición de especies consistió en 90% de *P. elliotii* y 10% de *P. taeda*. Además, las tablas tenían un dimensionamiento de 50 x 150 x 3200mm con un contenido de humedad cercano a 18%. Posteriormente realizaron una clasificación visual a 960 piezas utilizando la norma NCh (Chilena) 1207-2005 y se clasificaron en tres grados: grado selecto (GS), grado 1 (G1) y grado 2 (G2).

Moya et al. (2016) evaluaron parámetros visuales y propiedades mecánicas de madera del género *Pinus* de procedencia uruguaya, cuyos resultados se pueden agrupar en un grado visual con características similares a las de la clase europea de resistencia C14 en la norma UNE-EN 338. Además se determinó que el módulo de elasticidad y la resistencia de flexión fueron las características centrales para la asignación de la clase. La clasificación visual se basó en mediciones de nudos, inclinación de grano, declinación, deformación, fisuras, densidad y presencia de médula para cada pieza. Se estableció un solo grado visual definido como EC7 y se relacionó con los muestreos M1 y M2. Es importante destacar que los porcentajes de piezas rechazadas fueron 50% y 71% para M1 y M2 respectivamente. La primera razón de rechazo fue el tamaño de nudo del canto con porcentajes de 30% y 40% para M1 y M2 respectivamente. La segunda razón fue la elasticidad con 7% y 12% para M1 y M2 respectivamente.

Cardoso (2016) realizó un estudio con el objetivo de diseñar una metodología de clasificación visual estructural para madera de *Pinus elliotii* E. y *P. taeda* L. cultivados en Uruguay. La madera provenía de dos plantaciones, *P. taeda* de 14 años y *P. elliotii* de 27 años, procedentes de Tacuarembó y Rivera respectivamente. Sobre las piezas se midieron una serie de variables visuales (ejemplos: tamaño y posición de nudos, tamaño y número de áreas nudosas, número de anillos de crecimiento, presencia de médula, alabeos) y se estimó el módulo de elasticidad por ultrasonido (E_d), se determinaron rigidez (E_0) y resistencia de flexión (f_m) y densidad (ρ) utilizando la norma EN 384:2010. Además permitió definir una calidad visual estructural para las vigas que se asocia a una clase resistente del cuerpo normativo europeo (norma UNE-EN 338:2009), las mismas fueron similares a la clase de resistencia C14.

Baño et al. (2017) realizaron un análisis a partir de dos propuestas de clasificación visual estructural de pinos uruguayos, la misma sirvió como base de la norma UNIT 1261. Una de las propuestas planteadas, comprendía dos calidades visuales (EC1 y EC0) y observaron una disminución de un 40 % en el rechazo de madera con fines estructurales con respecto a la otra propuesta que comprendía una única calidad visual (EC7). Sin embargo, demostraron que la clase EC1 sufrió un incremento de un 5 % de rechazo al proponer dos calidades visuales en lugar de una única clase de calidad como la EC7. Además a la hora de asignar dos clases, en lugar de una, se tuvo que modificar los límites de aceptación de las singularidades. Por otro lado, comprobaron que las tablas clasificadas como EC1 o EC7 se ajustaron a las propiedades físico mecánicas correspondientes a la clase resistente C14 de la norma europea EN 338. La clase EC0 no se pudo asignar a ninguna clase resistente, debido a que presentó valores inferiores a la mínima reconocida en la EN 338.

2.4.2. Antecedentes de la norma UNIT 1261

Según Moya et al. (2015b) la generación de normas técnicas en Uruguay se realiza a través de comités especializados en el ámbito del Instituto Uruguayo de Normalización Técnica (UNIT), donde participan representantes de las empresas privadas y estatales, academias, institutos de investigación, etc. Las normas son aprobadas por consenso entre las partes interesadas, y son de aplicación voluntaria a menos que alguna disposición reglamentaria o contractual las haga de obligado cumplimiento, y están disponibles al público.

Los entes públicos y privados que participaron fueron el Ministerio de Industria, Energía y Minería, Ministerio de Vivienda, Ordenamiento y Medio Ambiente, Ministerio de Transporte y Obras Públicas, Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Agencia Nacional de Vivienda, Laboratorio Tecnológico del Uruguay, UTE, Asociación de Industriales de la Madera y Afines del Uruguay, Asociación de Ingenieros Agrónomos del Uruguay, Asociación de Ingenieros del Uruguay, Sociedad de Arquitectos del Uruguay, Sociedad de Productores Forestales, Cámara de la Construcción del Uruguay, Cámara de Industrias del Uruguay, Dirección de Innovación, Ciencia y Tecnología, Facultad de Agronomía UdelaR, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo UdelaR, Facultad de Ingeniería UdelaR, Facultad de Arquitectura – Universidad ORT, Universidad de Montevideo, Centro Universitario Tacuarembó, ANEP, LUMIN, Zona M, STEKO Uruguay S.A., PERCAT Adhesivos, Forestal Caja Bancaria, CIPROMA, Maderas Arazatí, FYMNSA S.A., URUFOR y FRUTIFOR (Baño et al., 2015).

El cuerpo de normas UNIT para materiales y proyectos de construcción es incompleto, inconsistente, y en general está desactualizado (Moya et al., 2015b).

Según Baño et al. (2015) en los años 2014 y 2015 en el Uruguay se desarrolló un proyecto denominado "Documentos técnicos base para la normalización de estructuras y construcción con madera". Se llevaron a cabo una serie de jornadas técnicas, donde participó el equipo de investigación, que estaba formado por integrantes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, Facultad de Arquitectura de la Universidad ORT y LATU junto con el apoyo de expertos de la comunidad internacional y nacional. El objetivo central era comparar experiencias normativas de Argentina, Brasil, Chile y España y discutir los motivos que incidieron en la elección del formato de cálculo en cada país, concluyendo en una serie de recomendaciones para el cuerpo normativo uruguayo. Las mismas fueron: adoptar el cuerpo normativo europeo por su consistencia y coherencia, generar normas UNIT de acompañamiento nacional, redactar anexos nacionales al Eurocódigo 5 para el cálculo estructural con madera en edificación, desarrollar documentos de aplicación nacional y actividades de apoyo al proyectista, y generar información mediante proyectos de investigación. Además éste incluye especificaciones técnicas de fabricación de materiales, metodología de ensayos, interpretación y análisis de resultados, reglas de diseño, etc. Esto resultó ser una opción práctica y al ser adoptada, también permitió ahorrar mucho tiempo de trabajo, lo cual fue necesario para generar una normativa de características similares. Adicionalmente, es importante destacar que con el paso del tiempo se contará con actualizaciones periódicas que ocurrirán con el avance del conocimiento y de la tecnología (Baño et al., 2015).

En Europa, la clasificación estructural de madera aserrada se realiza principalmente a partir de tres normas consecutivas del Comité Europeo de Normalización (CEN). En primer lugar se aplica la norma UNE-EN 408, que se basa en realización de ensayos que permiten determinar las propiedades mecánicas, contenido de humedad y densidad en cuerpos de prueba de tamaño estructural. A partir de los valores extraídos, se procede a la utilización de la segunda norma conocida como UNE-EN 384, la cual establece reglas de selección de material, análisis y ajuste de valores de ensayo de acuerdo a geometrías o condiciones climáticas. Por último se procede a la aplicación de la norma UNE-EN 338, la cual establece clases de resistencia (Baño et al., 2015).

Sin embargo, las normas nombradas anteriormente fueron propicias para el desarrollo de la norma Española UNE 56544. Posteriormente, las normas UNE-EN 408, UNE-EN 384, UNE-EN 338, UNE 56544 y UNE-EN

14358, se pueden definir como las normas base en la cual se construyó la norma Uruguaya UNIT 1261 (Baño et al., 2015).

A continuación se podrá visualizar una descripción más detallada de cada una de las normas nombradas anteriormente.

La norma Española UNE 56544 de clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural a partir de madera de coníferas, es utilizada para clasificar visualmente madera aserrada de uso estructural de sección rectangular para las principales especies de coníferas españolas. La misma no es aplicable para clasificar madera estructural con uniones dentadas. Se establecen dos calidades para piezas con grosor menor o igual a 70mm, denominadas como ME-1 y ME-2 (donde ME significa Madera Estructural). La primera corresponde a madera de primera calidad y la segunda a madera de segunda calidad. Para las piezas que presenten espesores mayores a 70 mm, la norma establece una única calidad denominada MEG (Madera Estructural de Grandes escuadrías). La clasificación se rige según las siguientes características: diámetro de los nudos sobre la cara, diámetro de los nudos sobre el canto, anchura máxima del anillo de crecimiento, fendas, acebolladuras, bolsas de resina y entrecasco, madera de compresión, desviación de las fibras, gemas, médula, alteraciones biológicas y deformaciones máximas (UNE, 2011a).

A continuación se pueden observar algunos trabajos realizados a partir de la norma UNE 56544.

Fernández-Golfín et al. (1998) ensayaron tablas de dimensiones de 150 x 50 x 3000 mm de tres especies de *Pinus* (*P. radiata*, *P. sylvestris*, *P. pinaster*) con un contenido de humedad de 10 a 12%, clasificándolas en ME1 y ME2. Determinaron valores promedios de MOE para ME1 de 13139 MPa y para ME2 de 10975 MPa. Además se observó que el 29% de las tablas correspondían a la clase ME1, el 48% a la clase ME2 y el 23% restante se rechazaron. Se evidenció que tanto la presencia de médula como de madera juvenil no afecta, de manera significativa, a la resistencia, pero sí el efecto de deformaciones en el uso, por lo cual la norma UNE 56544 no admite su presencia para clasificar como ME1, cuando se clasifica en húmedo. Por otra parte, las deformaciones en el secado no pueden superar el 15% de las tablas, sino es despreciable, por esta misma razón deben evitarse tablas con mayor a 20% de humedad, siendo aconsejable que tenga la misma o inferior a la humedad en servicio.

Díez et al. (2000) trabajaron con 776 tablas de dimensiones 150 x 50 x 3000 mm de la especie *Pinus nigra* procedente de Jaén, España. El contenido de humedad promedio fue de 12 ± 2 %. A partir de la clasificación visual se

obtuvieron los siguientes resultados, un 21,9% de las tablas correspondían a la clase ME1, un 47% a la clase ME2 y un 31,1% restante a la clase MER (rechazo). Por otro lado, con respecto a los valores de MOE promedio, para la clase ME1 fue de 16935 MPa y la clase ME2 fue de 13382 MPa.

Acuña et al. (2004) realizaron un estudio ensayando tablas de *Pinus pinaster* de dos procedencias diferentes, una de Bureba-Sierra de Oña y otra procedente de Gredos. Las primeras comprendían dimensiones de 130 x 60 x 2500 mm, la cual se ensayaron un total de 176 tablas y las segundas de 135 a 140 x 70 x 2700 a 2900 mm, ensayándose un total de 197 tablas. En cuanto a los resultados arrojados de la clasificación visual, se observó que en las tablas procedentes de Bureba-Sierra de Oña, solo el 2,8% de las tablas correspondían a la clase ME1, el 20,4% correspondían a la clase ME2 y 76,7% fueron rechazadas. Además se estableció un valor de MOE promedio igual a 8616,2 MPa. En cuanto a las tablas procedentes de Gredos, con respecto a la clasificación visual se observó que el 3,6% correspondían a la clase ME1, el 17,3% a la clase ME2 y el 79,2% fueron rechazadas. En cuanto al valor de MOE promedio fue igual a 7495,22 MPa.

Íñiguez et al. (2007) utilizaron tablas de diversas dimensiones de *Pinus radiata* con un contenido de humedad promedio de 14,4% y clasificaron visualmente bajo la norma UNE 56544, la cual dio lugar a un porcentaje de rechazo demasiado alto (44%). Además, en cuanto a las propiedades mecánicas estudiadas resultan muy similares para la madera clasificada y la madera rechazada. Se comprobó que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las calidades. Cabe destacar, que el tamaño de los nudos, principalmente los nudos de cara, junto con la longitud del entrecasco y las bolsas de resina son los parámetros más importantes en el rechazo. A la hora de realizar ciertas modificaciones de la norma, en primer lugar se propone reducir la exigencia del entrecasco y las bolsas de resina, debido a que el efecto no es importante en las propiedades mecánicas. En base a esto, el porcentaje de rechazo disminuye hasta el 28 %. En segundo lugar se propone reducir la exigencia del tamaño del nudo de cara, donde el porcentaje de rechazo se disminuye al 17 % pero se mantienen las propiedades mecánicas y aumenta la diferencia estadística entre las calidades sin llegar a ser significativa.

Montón et al. (2011) llevaron a cabo un estudio sobre tablas de dimensiones 80 x 120 x 2500 mm de *Pinus radiata* con un contenido de humedad promedio de 10,7%. Se realizaron dos clasificaciones, la primera dividió a las tablas en dos clases, MEG que representó el 53% de las tablas y el 47% restante correspondiente a la clase rechazo. En la segunda clasificación se consideró como madera de pequeña escuadría, y observaron que un 3% de las

tablas se clasificó como ME-1, un 42% como ME-2 y un 55% como rechazo. Las propiedades mecánicas de la calidad ME-2 no se alejan mucho de las de la calidad MEG. El rechazo de 47% en la clase MEG tuvo como principal factor el defecto de alabeo, representando un 39%. Si no se considera el alabeo en la clasificación, el porcentaje de rechazo desciende un 17%. Adicionalmente es importante destacar que la segunda clasificación mostró un mayor porcentaje de rechazo, lo que se concluyó que no es rentable su clasificación como madera de pequeña escuadría y que la asignación MEG es más adecuada. En cuanto al módulo de elasticidad se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre la clase MEG y el rechazo.

Castaño et al. (2011) trabajaron con tablas de madera de *Pinus sylvestris* de dimensiones aproximadamente 1600 x 150 mm y espesores variados (22, 27, 30 y 40 mm) con un contenido de humedad promedio de 12% y encontraron que un 33,3% de las tablas corresponde a la clasificación ME-1, el 16,3 % corresponde a la clasificación ME-2 y el 50,4 %, son clasificadas como rechazo. Por tanto, de dichos datos se puede concluir que el porcentaje de madera clasificada para el total de la muestra (ME-1+ME-2) supone un 49,6% y el valor de rechazos se sitúa muy por encima de la media de la especie. En cuanto al módulo de elasticidad (MOE) es superado por el 71% en las ME-1, por el 23% en las ME-2, y por el 10% en las R.

La norma Europea UNE-EN 408 de madera aserrada y madera laminada encolada de uso estructural para la determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. Dichas propiedades son el módulo de elasticidad en flexión, el módulo de elasticidad transversal, resistencia a la flexión, módulo de elasticidad en tracción paralela a la fibra, resistencia a la tracción paralela a la fibra, módulo de elasticidad en compresión paralela a la fibra, resistencia a la compresión paralela a la fibra, módulo de elasticidad en compresión perpendicular a la fibra, resistencia a compresión perpendicular a la fibra y resistencia cortante. Además define la determinación de las dimensiones, la humedad y la densidad de las probetas (UNE, 2011b).

Esta norma resulta también aplicable a las piezas estructurales de madera maciza de sección circular así como a las de secciones rectangulares unidas mediante entalladura multidentada. Además es una norma de laboratorio de ensayo ya que establece el método operativo a seguir para efectuar todos y cada uno de los ensayos contemplados en la norma de clases resistentes (UNE, 2011b).

Es importante destacar que es una norma destinada a la evaluación mecánica del producto acabado (Fernández-Golfín et al., 2003).

La norma UNE-EN 384 se basa en la determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad a partir de poblaciones clasificadas mediante calidades visuales y/o resistencia mecánica de madera aserrada, incluyendo un método para verificar la resistencia de una muestra de madera por comparación con un valor establecido. Los valores de las propiedades mecánicas y de densidad determinados conforme a esta norma, son adecuados para asignar calidades y especies a las clases resistentes de la norma UNE-EN 338 (UNE, 2016c).

Esta es una norma de laboratorio de ensayo ya que establece las exigencias, tanto de muestreo (número de variables, tamaño mínimo de las muestras, etc) como ensayo (ubicación de las secciones críticas, procedimientos de ensayos) y cálculo (penalizaciones por número insuficiente de muestras y/o número insuficiente de probetas por muestra, penalizaciones por método de clasificación, etc), necesarias para que los valores de la resistencia, módulo elástico o densidad que se aportan después de un ensayo de caracterización o de comprobación del producto tengan la fiabilidad necesaria (Fernández-Golfín et al., 2003).

La norma UNE-EN 14358 indica métodos estadísticos para la determinación de valores característicos partiendo de los resultados de un ensayo de una muestra procedente de una población de referencia claramente definida, como por ejemplo madera maciza, elementos de fijación, conectores y productos derivados de la madera. El valor característico es una estimación de la propiedad de la población de referencia y puede basarse en el valor correspondiente del percentil del 5% para la resistencia o la densidad, y en valor medio para la rigidez (UNE, 2016a).

El 5º. percentil de la resistencia a flexión y de la densidad de cada muestra se calculó de acuerdo al método paramétrico (P) definido en la norma UNE-EN 14358 (Baño et al., 2018). Se aportan métodos de cálculo paramétricos para la determinación de los valores correspondientes a los percentiles inferior y superior del 5%. El percentil del 5% superior es el percentil del 95% (UNE, 2016a).

Finalmente, la norma UNE-EN 338 define la clasificación de la madera estructural mediante clases resistentes designadas por la letra C al inicio, que corresponde a coníferas, seguidas de un número relativo al valor de la resistencia a la flexión (ejemplo: C14). Para la asignación de clases resistentes a calidades visuales es suficiente el cálculo de tres propiedades: el módulo de elasticidad (E), el módulo de rotura (f) y la densidad (ρ , Hermoso et al., 2007).

Esta norma establece los valores mínimos que, para cada clase resistente, han de tener cada una de las propiedades mecánicas consideradas como importantes para el uso constructivo de la madera, así como los criterios para que un determinado lote de madera pueda ser asignado a una clase de resistencia concreta (Fernández-Golfín et al., 2001). Es importante tener en cuenta qué clase resistente le corresponde a cada combinación de calidad y especie (Collar et al., 2009).

2.5. NORMA UNIT 1261

La norma UNIT 1261 forma parte del programa de normalización que lleva adelante UNIT para elaborar un conjunto de normas aplicables al uso de la madera en estructuras. Este conjunto de normas incluye entre otras, las correspondientes a la clasificación visual de madera aserrada, los productos derivados de la madera y las normas de cálculo estructural (UNIT, 2018). En relación a la normas de cálculo estructural son la de hormigón armado en estados límites, y las de madera y acero en tensiones admisibles, lo cual impide compatibilizar diseños con distintos materiales, y genera inconsistencias que pueden resultar en diseños poco seguros (Moya et al., 2015b).

La norma UNIT 1261 establece un procedimiento de clasificación visual aplicable a la madera aserrada para uso estructural, de sección rectangular, de las especies *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* cultivadas en Uruguay. Además, se incluyen valores característicos de algunas de sus propiedades físicas y mecánicas y su correspondencia con la asignación a una clase resistente de acuerdo con la Norma UNE-EN 338. La norma refiere únicamente a la madera clasificada en seco, o sea perteneciente a un lote y que ha sido clasificada intencionalmente con un contenido medio de humedad inferior o igual al 20%, sin que ninguna medida exceda al 24%. Adicionalmente, la misma es aplicable a la clasificación de madera para uso estructural formada por una única pieza. Para clasificar visualmente una pieza de madera se debe controlar la presencia, el tamaño, la ubicación y la frecuencia de las distintas singularidades de la madera, y los defectos generados por procesos de su manufactura. A partir de la asignación de la calidad visual, es posible atribuir a una pieza de madera ciertas características físicas y mecánicas (UNIT, 2018).

A la fecha no existen registros de utilización de la norma UNIT 1261.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se detallan los materiales (materia prima y equipos) y los métodos utilizados a lo largo del trabajo.

3.1. CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL EXPERIMENTAL

La materia prima denominada como Muestreo 4 (M4) consistió en 299 tablas cepilladas de 50x150x3000mm de la especie *Pinus elliotti* de 27 años de edad de procedencia nacional del departamento de Rivera. El proveedor fue el aserradero Pastorino. En la figura 3 se puede visualizar las pilas de madera que se utilizaron en el presente trabajo.



Figura 3. Muestreo M4.

3.2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

La figura 4 representa de forma esquemática la secuencia de operaciones realizadas durante el trabajo. El mismo se llevó a cabo en el Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU).

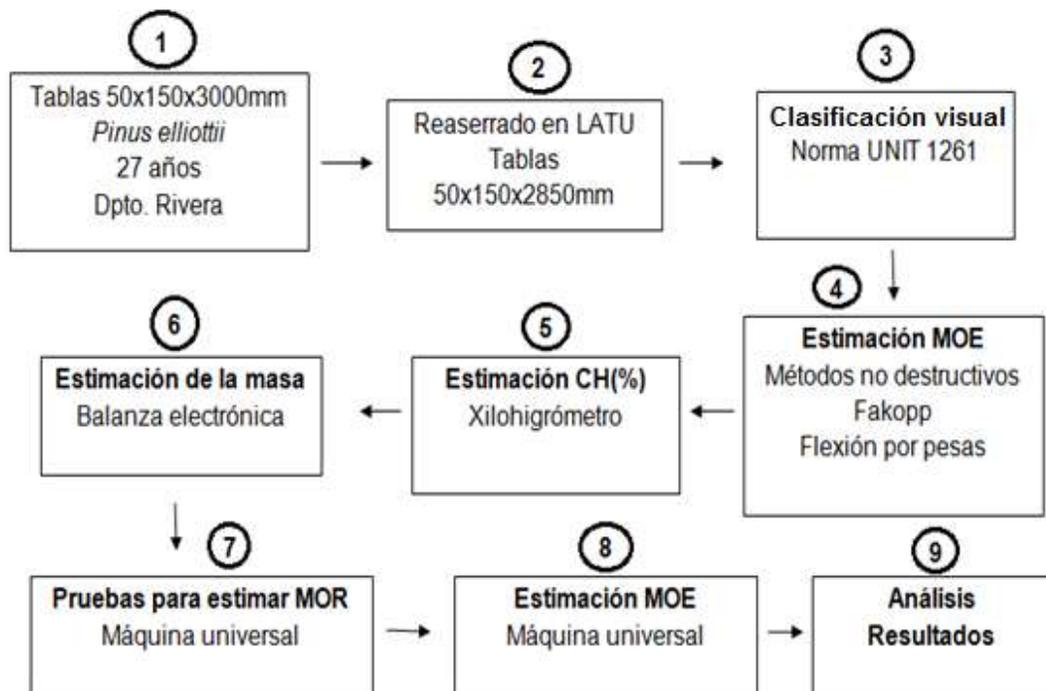


Figura 4. Secuencia de ensayos realizados.

Cabe destacar que las tablas inicialmente median 3000 mm de largo, lo cual mediante el reaserrado (corte y cepillado) en el aserradero del LATU, fueron estandarizadas a 50x150x2850mm, tal como se observa en la figura 5. Luego, se dio paso a la clasificación visual mediante la Norma UNIT 1261 y al resto de operaciones que serán descriptas posteriormente.



Figura 5. Tablas de madera estandarizadas.

3.3. CLASIFICACIÓN VISUAL

El objetivo principal de la clasificación visual es encontrar una manera práctica, en los aserraderos, de categorizar el producto de manera de darle distintos destinos a la madera aserrada.

La clasificación visual se realizó en una totalidad de 299 tablas utilizando la norma UNIT 1261.

La norma UNIT 1261, establece dos clases de calidad visual denominadas como EC1 y EC0 para la madera aserrada de las especies de *Pinus taeda* y *Pinus elliotti* cultivadas en Uruguay.

En dicha norma, la E se refiere a madera aserrada estructural y la C a coníferas. En tanto el número 1 hace referencia a madera de primera calidad y 0 madera de segunda calidad. Además la madera que no entra en ninguna de las dos clases de calidad, se denominan como rechazo (R). En la figura 6 se observa ejemplos de tablas de madera de ambas clases de calidad y de rechazo.

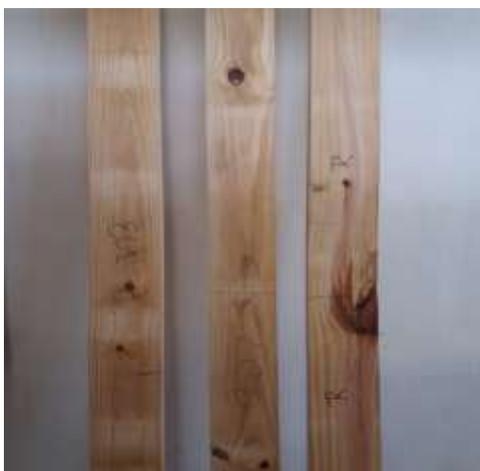


Figura 6. Clases de calidad.

La clasificación de la madera aserrada de uso estructural, que determina su calidad resistente, se basa en la evaluación de características y singularidades que serán descriptas posteriormente.

El cuadro 1, hace referencia a los valores límites y condiciones de las características y singularidades establecidas en dicha norma, que hace posible la asignación de las clases de calidad visual.

Cuadro 1. Especificaciones para la clasificación visual de piezas de sección rectangular de *Pinus taeda* y *P. elliottii* de acuerdo a la norma UNIT 1261.

Criterios de calidad	Calidad visual EC1	Calidad visual EC0
Diámetro de los nudos (d) sobre la cara (h)	$d \leq (1/4) h = 37,5$	$d \leq (2/3) h = 100$
Diámetro de los nudos (d) sobre el canto (b)	$d \leq (2/3) b = 33,3$	$d \leq (3/4) b = 37,5$
Presencia de médula	Permitida	Permitida
Dirección de las fibras	Desviación $\leq 1:8$ (12,5%)	Desviación $\leq 1:6$ (16,7%)
Ancho máximo del anillo de crecimiento	Sin limitación	Sin limitación
Fisuras de secado pasantes/Rajaduras	$\leq 0,75m$ ó $\leq (1/4)L^a$	$\leq 0,75m$ ó $\leq (1/4)L^a$
Fisuras de secado no pasantes/Grietas	$\leq 1,5m$ ó $\leq (1/2)L$	$\leq 1,5m$ ó $\leq (1/2)L$
Fisuras/fendas de rayos, heladura o abatimi	No permitido	No permitido
Bolsa de resina y corteza incluida	$\leq (1/5) h = 30$ mm	$\leq (1/5) h = 30$ mm
Madera de reacción: compresión	Sin limitación	Sin limitación
Alteraciones biológicas:		
Azulado	permitido	permitido
Hongos de pudrición	No permitidos	No permitidos
Galerías de insectos	Diámetro de los orificios menor a 2 mm	Diámetros de los orificios menor a 2 mm
Deformaciones :		
Curvatura de cara, combado o arqueadura	≤ 8 mm	≤ 16 mm
Curvatura de canto o encorvadura	≤ 8 mm	≤ 16 mm
Torcedura o alabeo	≤ 1 mm por cada 25 mm de h	≤ 2 mm por cada 25 mm de h
Abarquillado o acanaladura	Sin limitación	Sin limitación
Arista faltante	$\leq (1/4) h = 37,5$ mm	$\leq (1/3) h = 50$
^a : en los extremos su largo no debe ser mayor que 2 veces el ancho de la tabla.		

Fuente: UNIT (2018).

A continuación se dará a conocer los criterios de evaluación de las características y singularidades presentes en las tablas de madera.

3.3.1. Dimensiones

Con respecto a las dimensiones, en la totalidad de las tablas se midieron el espesor, ancho y largo. Para el caso del espesor y ancho se utilizó un calibre digital, tomándose tres medidas, una en cada extremo y una en el centro de cada tabla. En cuanto al largo se midió a partir de la utilización de la cinta métrica, realizando tres medidas, en el centro y extremos de cada tabla.

En las figuras 7 y 8 es posible observar el uso del calibre digital para medir el espesor y el uso de cinta métrica para el largo respectivamente.



Figura 7. Medida de espesor con calibre digital.



Figura 8. Medición del largo total.

3.3.2. Nudos

Los diámetros de los nudos se miden perpendicularmente al eje longitudinal de la pieza, tanto en la cara como en el canto, como es posible visualizar en la figura 9.

El instrumento utilizado para llevar a cabo la medición de los mismos fue una regla graduada en milímetros. Cabe destacar que el número validado por tabla en dicha norma es el nudo de mayor longitud en cara y canto.

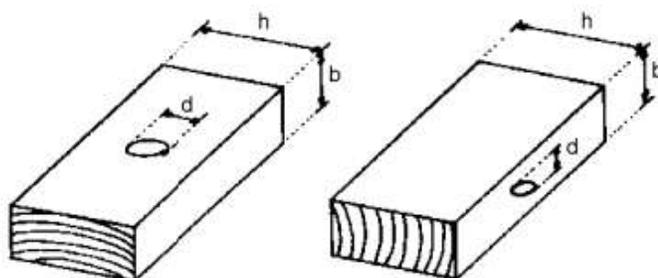


Figura 9. Criterio general de medición de nudos en cara y en canto.
Fuente: UNIT (2018).

En el caso de los nudos con diámetro inferior o igual a 10 mm, los mismos se pueden despreciar, excepto los nudos pasantes. Los mismos son aquellos que se manifiestan al menos en dos superficies opuestas.

Los nudos superficiales de la cara interna se desprecian. Se entiende por cara interna aquella cara que se encuentra más cerca de la médula y la contiene o está muy próxima a ella. En la figura 10 es posible observar lo anteriormente mencionado.

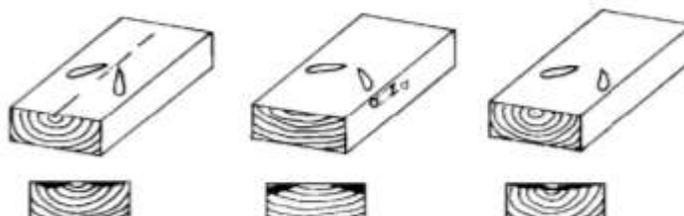


Figura 10. Nudos superficiales en la cara interna.
Fuente: UNIT (2018).

Para el cálculo de la dimensión de un nudo, se considera la corteza presente alrededor del mismo. Adicionalmente, si las irregularidades de la fibra presentes alrededor del nudo no fueran claramente distinguibles de éste, la medida del tamaño del nudo también deben incorporarse.

En el caso de los orificios dejados por los nudos sueltos se miden como si fueran nudos. El criterio consiste en que se deben medir los nudos en todas las superficies en que se manifiesten:

- Los nudos que se manifiestan en la cara se deben evaluar mediante la relación entre el diámetro del nudo y el ancho (d/h).

- Los nudos que se manifiestan en el canto se deben evaluar mediante la relación entre el diámetro del nudo y el espesor (d/b).

Por último, los nudos de arista son aquellos que se manifiestan en dos superficies contiguas, cara y canto, tal como en la figura 11. Se miden y evalúan en aquella superficie que los cortes sean más perpendiculares como en la figura 12. En caso de duda se toma la relación que resulte más desfavorable (entre $d1/b$ y $d2/h$), tal como en la imagen 13.

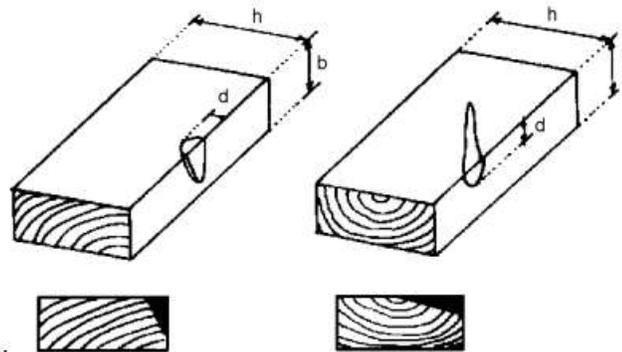


Figura 11. Criterio de medición y evaluación de nudos de arista.
Fuente: UNIT (2018).



Figura 12. Medición de nudo de canto.

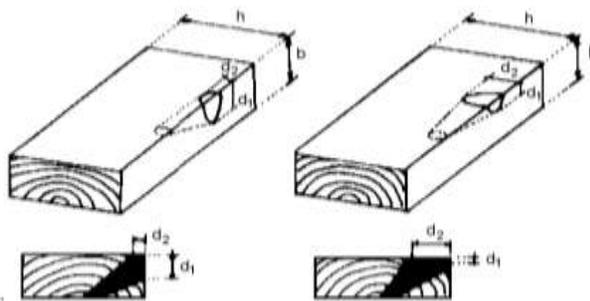


Figura 13. Criterio de medición y evaluación de los nudos de arista cuando existen dudas para su evaluación.
Fuente: UNIT (2018).

Los nudos agrupados que no se solapan sobre la dirección perpendicular al eje longitudinal de la pieza, se deben medir por la suma de sus diámetros. Cuando los nudos se solapan sobre la dirección perpendicular al eje longitudinal de la pieza, se deben medir globalmente. En las figuras 14 y 15 se puede observar lo anteriormente comentado.

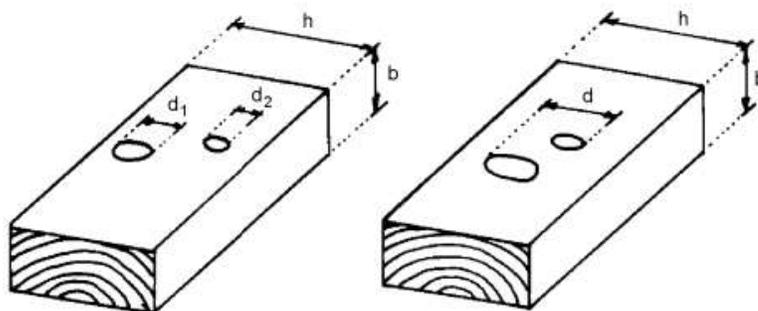


Figura 14. Criterio de medición de nudos agrupados.
Fuente: UNIT (2018).



Figura 15. Medición de nudos agrupados.

La medición de los nudos tomará un rol protagónico a la hora de determinar las clases estructurales en la norma UNIT 1261, lo cual será desarrollado posteriormente.

3.3.3. Bolsas de resina y cortezas incluidas

Ambas singularidades se midieron según su longitud en mm, en dirección paralela al eje de la pieza. El instrumento utilizado para dichas mediciones fue una regla graduada en milímetros.

Con respecto a la bolsa de resina, se midió la de mayor longitud en cada tabla que estuviese presente en la misma, tal como se observa en figura 16. Para la corteza incluida, se estimó la sumatoria de las mismas presentes en las tablas.



Figura 16. Bolsa de resina.

3.3.4. Fisura pasante o rajadura

Para cada fisura pasante o rajadura, se midió la longitud total; esto es, en las dos caras o cantos adyacentes. En caso de detectarse más de una rajadura se computa la longitud total como la suma de todas ellas. El instrumento utilizado fue una regla graduada en milímetros.

3.3.5. Fisura no pasante o grieta

Con respecto a la fisura no pasante o grieta, se mide la profundidad con una galga de 0,2 mm de espesor y la longitud de aquellas grietas que presenten profundidades mayores a un 1 cm. En caso de observarse más de una grieta, se computa la longitud total como la suma de todas.

En la figura 17 puede observarse los criterios de medición de las fisuras, utilizado tanto para las pasantes como para las no pasantes.

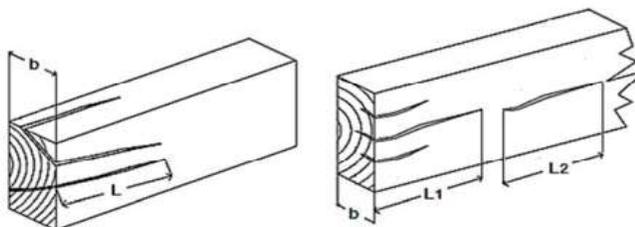


Figura 17. Criterio de medición de fisuras.
Fuente: UNIT (2018).

3.3.6. Desviación de las fibras

La desviación de las fibras se refiere a la desviación general, ignorándose la desviación local producida en las proximidades de los nudos.

El resultado debe expresarse como fracción (o porcentaje), haciendo uso de la expresión y/z donde Y es la desviación de la fibra, en mm y Z es la distancia sobre la cual se toma la medida, en mm, tal como en la figura 18.

Se debe intentar que esta distancia sea de aproximadamente un metro, y en una zona de la pieza libre de nudos, tal como en la figura 19. En dicha medida se utilizó papel contact, el cual en base a medidas estándar de la norma, se plasmaron líneas a determinados ángulos que delimitan las clases estructurales en función de la desviación de las fibras, tal como en la figura 19.

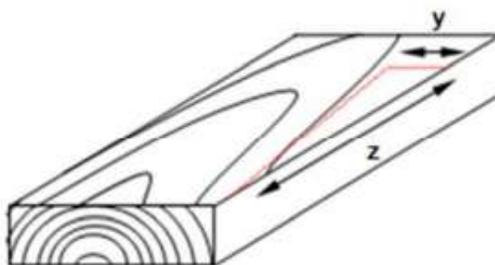


Figura 18. Criterio para la medición de la desviación de las fibras.
Fuente: UNIT (2018).



Figura 19. Desviación de las fibras.

El método para determinar la desviación general de las fibras es mediante el empleo de un trazador, tal como es posible visualizar en la figura 20. Este instrumento consiste en una manivela provista de un pomo articulado en un extremo y una aguja ligeramente inclinada en el otro. Se debe presionar la aguja sobre la superficie de la madera, aplicando una presión suficiente pero no excesiva, a la vez que el trazador es arrastrado a lo largo de la pieza en la dirección presumible de la fibra. De esta forma, si la presión es correcta, la aguja deja un trazo que indica precisamente la dirección de la fibra.



Figura 20. Medición de desviación de la fibra.

3.3.7. Aristas faltantes o gemas

Las aristas faltantes se evalúan por su dimensión transversal en relación a las dimensiones de la sección (g), en la sección de máxima pérdida de arista. El instrumento utilizado fue una regla graduada en milímetros.

La evaluación en la sección transversal se realiza de la siguiente manera: $g = \text{máx. } (h-h_1/h, b-b_1/b, b-b_2/b)$ donde b y h son el espesor y el ancho de la pieza respectivamente; $h - h_1$, $b - b_1$, $b - b_2$ son respectivamente el espesor o el ancho de las aristas faltantes. En las figuras 21 y 22 se observa lo anteriormente mencionado.

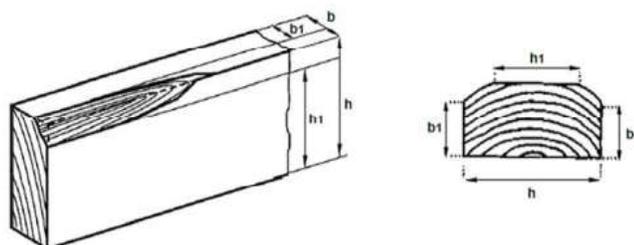


Figura 21. Medición y evaluación de las aristas faltantes.
Fuente: UNIT (2018).



Figura 22. Arista faltante.

3.3.8. Médula

Se evalúa únicamente su presencia.

3.3.9. Alteraciones de tipo biológico que pueda presentar la madera

Alteración por hongos (mancha azul, pasmo, pudriciones, etc) y/o alteraciones por insectos xilófagos (se evalúa su presencia). En la figura 23 se observa un típico caso de alteración por hongos causantes de la mancha azul.



Figura 23. Hongos cromógenos.

3.3.10. Curvatura de cara, combado o arqueadura (X)

La curvatura de cara, combado o arqueadura se evalúa como la deformación máxima X (en mm) en la cara de la pieza en un tramo de 2m de longitud, tal como en la figura 24. Si la longitud de la pieza L (en metro) es inferior a 2 m, se debe medir entre los extremos de la misma y calcular la curvatura de cara X' , según la siguiente ecuación: $X' = X \left(\frac{2}{L}\right)^2$.



Figura 24. Curvatura de cara.

Fuente: UNIT (2018).

3.3.11. Curvatura de canto, encorvado o encorvadura (Y)

La curvatura de canto, encorvado o encorvadura se evalúa como la deformación máxima Y (en mm) en el canto de la pieza en un tramo de 2 m de longitud, tal como en la figura 25. Si la longitud de la pieza L (en metro) es

inferior a 2m, se debe medir entre los extremos de la misma y calcular la curvatura de canto, Y' , según la siguiente ecuación: $Y' = Y \left(\frac{2}{L}\right)^2$.

Para ambos casos, el instrumento utilizado fue una regla graduada en milímetros y se realizaron las medidas en la sección central de cada una de las tablas.



Figura 25. Curvatura de canto.

3.3.12. Torcedura o alabeo (Z)

En cuanto a la torcedura o alabeo se evalúa como la deformación máxima de la superficie Z sobre una longitud representativa de 2 m desde el extremo de la pieza, tal como en la figura 26. Si la longitud de la pieza L (en metro) es inferior a 2 m, se debe medir entre los extremos de la misma y calcular la torcedura, Z' , según la ecuación: $Z' = Z \left(\frac{2}{L}\right)$.



Figura 26. Torcedura o alabeo.
Fuente: UNIT (2018).

Otros aspectos a tener en cuenta son irregularidades de crecimiento, y especial cuidado en daños mecánicos por manipulación como se observó en pocos casos en el trabajo.

Luego de clasificar visualmente las tablas, se procedió a la realización de ensayos mecánicos tanto por métodos destructivos como no destructivos. Es importante mencionar, que las tablas que han sido ensayadas mecánicamente, son únicamente aquellas pertenecientes a las clases de calidad visual EC1 y EC0. Por lo tanto, las tablas que fueron rechazadas no se le realizaron ningún ensayo mecánico.

A continuación se dará a conocer los métodos no destructivos utilizados para estimar el módulo de elasticidad (MOE).

3.4. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

Los métodos no destructivos utilizados fueron los siguientes.

3.4.1. Fakopp

Fakopp es un equipo de origen húngaro, fabricado por la empresa ALNU Bt. Su función es medir el tiempo de propagación de una onda inducida por un impacto, recorriendo la distancia entre dos transductores, tal como se observa en la figura 27. El nombre proviene de la combinación de dos palabras húngaras: “fa” y “kopp” que significan árbol y golpe.



Figura 27. Fakopp.

El procedimiento llevado a cabo mediante la utilización del Fakopp se resume en los siguientes pasos:

- Colocar la tabla de forma horizontal apoyada sobre dos caballetes, distantes entre sí a 2,7 metros.
- Clavar los sensores en los extremos de las tablas con la ayuda de una maceta de goma y conectarlos al equipo. Es importante que los sensores se encuentren bien alineados.
- Efectuar un golpe con un martillo en el transductor de inicio “start”, como se observa en la figura 28. El tiempo de propagación (en microsegundos) se lee inmediatamente en la pantalla. Repetir 3 veces este paso para promediar dicho valor.
- Extraer cuidadosamente los sensores sin dañar las conexiones del instrumento.
- Cálculo de la velocidad y evaluación del resultado.



Figura 28. Ensayo utilizando Fakopp.

A continuación se presentan las fórmulas de cálculo para estimar el Módulo de elasticidad (MOE):

$$\frac{1}{t} - sw = \frac{\left(Et - sw * \frac{g}{\rho} \right) 1}{2}$$

Donde,

Et-sw: MOE por propagación de onda de impacto.

t-sw: tiempo de propagación de la onda por unidad de distancia recorrida.

g : constante de aceleración gravitacional.

ρ : densidad $\rho = w / (l*b*h)$ donde,

w : peso de la madera
 l : largo de la madera
 b : ancho de la madera
 h : altura

3.4.2. Flexión estática con pesas

El otro método no destructivo fue el método de flexión estática con pesas, permite estimar el módulo de elasticidad estático en flexión mediante la aplicación de pesas (5, 10 y 15 kg) sobre la tabla en el intervalo elástico. En la figura 29 se observa los distintos instrumentos utilizados en dicho método no destructivo.

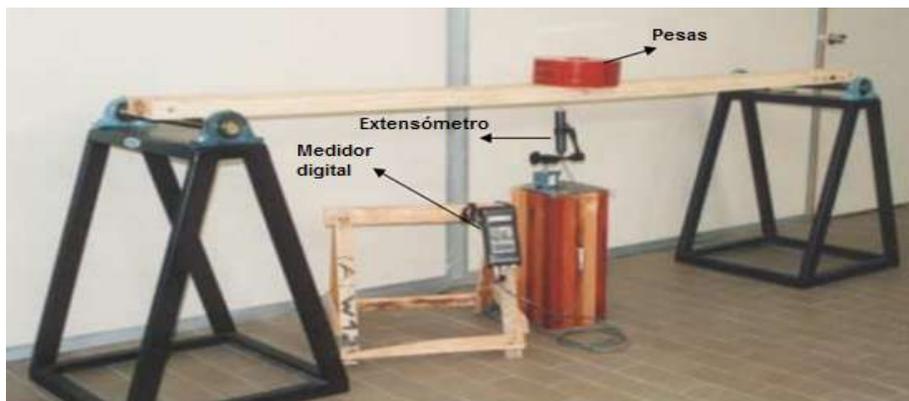


Figura 29. Instrumentos utilizados en flexión estática con pesas.
 Fuente: Pérez del Castillo et al. (2000a).

El procedimiento llevado a cabo mediante la flexión estática con pesas se resume en los siguientes pasos:

- Colocar las tablas de manera horizontal sobre dos caballetes, distantes entre sí a 2,7 metros.
- Fijar el extensómetro a un soporte y ubicarlo en la zona central entre los dos caballetes a una distancia 1,35 metros.
- Calibrar el extensómetro.
- Colocar las pesas de 5kg centradas a la ubicación del extensómetro. Es importante mencionar que se realiza la pesada de 5, 10 y 15 kg.
- Registrar datos en el computador electrónico en cada pesada.

A continuación se presentan las fórmulas de cálculo para estimar el MOE:

$$Eb = (\Delta P * s^3) / (4 * \Delta y * b * h^3)$$

Donde,

E_b = módulo de elasticidad

ΔP : carga de las pesas

s : distancia entre los apoyos de la tabla

Δy : deformación para ΔP

b : ancho

h : altura

3.5. CONTENIDO DE HUMEDAD EN BASE SECA

En el caso del presente trabajo, se estimó un contenido de humedad aproximado al 12% en las tablas ensayadas.

El contenido de humedad fue estimado mediante el instrumento conocido como xilohigrómetro marca LIGNOMAT modelo LIDNO METER KC, tal como se observa en la figura 30. Se realizaron tres medidas en cada tabla en tres secciones diferentes de las mismas, una en cada extremo y una en el centro. Posteriormente se calculó el promedio de las mismas.

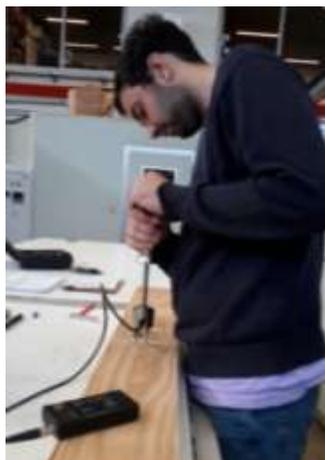


Figura 30. Utilización de xilohigrómetro.

Para verificar que los valores del contenido de humedad estimados mediante el xilohigrómetro sean correctos, se verificó previamente dicho instrumento con el método de referencia (estufa). El mismo se basa en la diferencia de peso de cada probeta antes y después del secado a estufa $103 \pm 2^\circ \text{C}$. Este valor está determinado en base seca.

Se utilizó la siguiente fórmula:

$$CH(\%) = \frac{(Ph - Pa)}{Pa} \times 100$$

Donde,

CH: contenido de humedad, en porcentaje

Ph: peso inicial de la muestra, antes de secar.

Pa: peso final, peso de la madera anhidra

3.6. DENSIDAD

En primer lugar, se estimó la masa de cada tabla con una balanza electrónica con capacidad de 120 kg marca KERN modelo ILB 120K1D con una apreciación al gramo.

Después, se tomó el promedio de tres medidas: largo, ancho y espesor de cada tabla para determinar el volumen de las mismas.

Finalmente, se calculó la densidad aparente corriente mediante la siguiente fórmula:

$$Dac = \frac{panh}{v12\%}$$

$$panh = masa(g) - CH(\%)$$

Dac= Densidad aparente corriente

panh= Peso anhidro

v12%= Volumen al 12%

3.7. ENSAYOS EN MÁQUINA UNIVERSAL

La máquina universal utilizada en este trabajo corresponde específicamente a un ejemplar Minebea modelo AL- 250 kNB, tal como es posible observar en la figura 31. Este equipamiento permite hacer una gran cantidad de ensayos con alta precisión y dependiendo de la carga que se utilizará en el ensayo, permite seleccionar dos capacidades distintas (50 kN, 250 kN). En este trabajo, se utilizó una carga de 250 kN.



Figura 31. Ensayo en máquina universal.

A continuación, se presenta el procedimiento práctico de la máquina universal en base a la norma UNE-EN 408.

Inicialmente, se debe cargar la probeta en flexión sobre dos puntos simétricos con una luz igual a 18 veces la altura y como se indica en la figura 32. Si la probeta y el dispositivo de ensayo no permiten aplicar exactamente estas condiciones, se admite modificar la distancia entre los puntos de carga y los apoyos a una longitud no mayor de 1,5 veces el canto de la probeta, y la luz y longitud de la probeta puede modificarse en una cantidad no superior a tres veces la altura como máximo, siempre conservando en el ensayo las condiciones de simetría. Es importante recordar que la probeta siempre debe quedar apoyada.

Entre la probeta y los apoyos o los puntos de aplicación de la carga, se pueden introducir unas pequeñas placas de acero, de longitud no mayor que la mitad de la altura de la probeta, con objeto de reducir el aplastamiento de la madera en esas zonas.

En caso que sea necesario, se pueden introducir topes laterales para evitar el pandeo lateral de la probeta. Estos topes deben permitir la deformación de la probeta sin resistencia de rozamiento significativa.

La carga se debe aplicar con una velocidad constante. La velocidad de desplazamiento de la cabeza de carga no debe superar los 0,003h mm/s, tal como se observa en la figura 32.

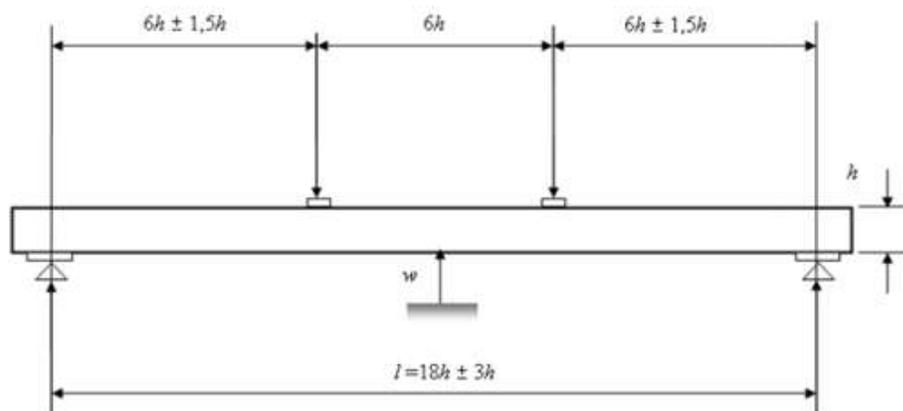
La carga máxima aplicada no debe superar $0,4 F_{\text{máx,est.}}$ (carga máxima estimada). El $F_{\text{máx,est.}}$ del material ensayado se obtiene con los resultados de diez probetas como mínimo, de la especie, tamaño y calidad adecuada o partiendo de datos de ensayo preexistentes adecuados.

El dispositivo de carga utilizado debe permitir la medición de la fuerza con una precisión del 1% de la carga aplicada a la probeta, o para cargas inferiores al 10% de la carga máxima, con una precisión del 0,1% de la carga máxima aplicada.

La deformación w debe medirse en el centro de la luz y en el centro del borde traccionado o comprimido. Cuando w se mide en el eje neutro, debe tomarse la media de las mediciones realizadas en ambas caras de la probeta.

Finalmente, el dispositivo de medición debe ser capaz de medir las deformaciones con una precisión del 1%, o para deformaciones inferiores a 2 mm, con precisión de 0,02 mm.

Es importante tener en cuenta que si la configuración del ensayo difiere de lo descrito anteriormente en cualquier aspecto, debe informarse de dichas diferencias y deben determinarse factores de corrección.



w = Deformación.

h = Altura de la sección en los ensayos de flexión, o dimensión mayor de la sección, o altura de la probeta en los ensayos en dirección perpendicular a la fibra.

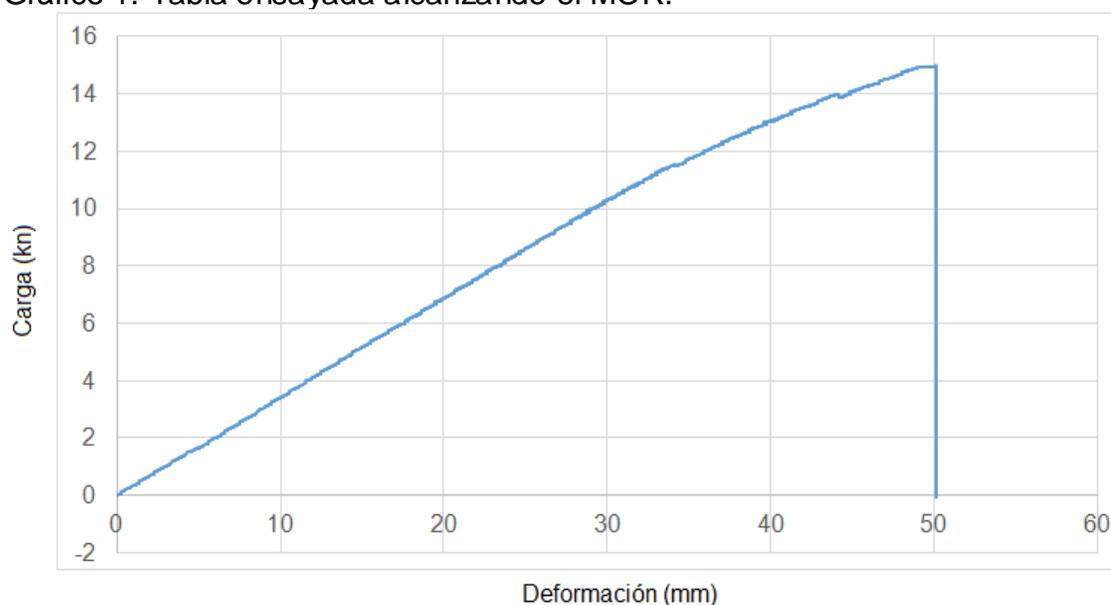
l = Luz en flexión, o longitud libre de la probeta entre las mordazas en los ensayos de compresión y tracción.

Figura 32. Esquema máquina universal.

Fuente: UNE (2011b).

Se determinó el módulo de rotura (MOR) en un total de 14 tablas, que se utilizaron como prueba y a partir de ese valor se estima entre 10% y 40% de la carga máxima, que es el rango para estimar el MOE de cada tabla. Además se tomaron en cuenta ciertas características que presentaban las tablas, que las hacían diferir entre unas y otras como el peso, densidad, clase de calidad, ubicación de nudos tanto de cara como de canto, presencia de médula y tamaño de nudos. En el gráfico 1 se observa un ejemplo de una tabla ensayada alcanzando el MOR.

Gráfico 1. Tabla ensayada alcanzando el MOR.



El Módulo de rotura (MOR) se calculó a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{MOR} = \left(\frac{3 \times F_{\text{max}} \times 900}{b \times h^2} \right)$$

Donde,

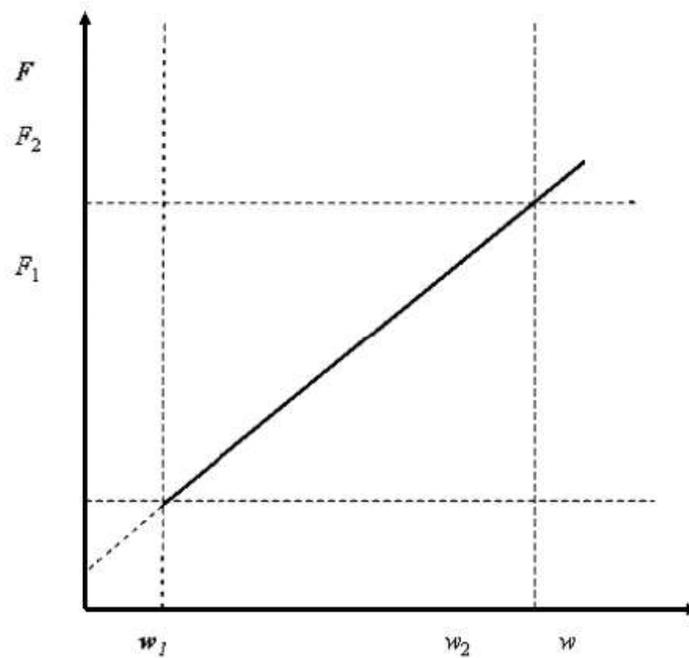
F_{max} = Carga máxima (N)

b = Espesor (mm)

h = Ancho (mm)

Luego se procedió a la determinación del módulo de elasticidad en cada tabla, obteniéndose del rango elástico tres valores de carga con sus respectivas deformaciones, tal como se observa en el gráfico 2.

Gráfico 2. Carga vs. deformación dentro de los márgenes de deformación elástica.



Fuente: UNE (2011b).

Los tres valores de carga y deformación se calculan a partir de las relaciones obtenidas en la norma UNE-EN 408.

$$w_2 = \frac{w_1}{f_2} - f_1$$

$$w_3 = \frac{w_1}{f_3} - f_1$$

$$w_3 = \frac{w_2}{f_3} - f_2$$

Donde,
 w = deformación
 f = carga

Posteriormente, se realizaron los cálculos de MOE global y MOE local según UNE-EN 408, como es posible observar a continuación.

Se estimaron tres MOE globales a partir de las siguientes fórmulas:

$$\text{MOE global} = \left[(3al^2 - 4a^3) \div \left((2bh^3) \times \left(2 \times w_2 - \frac{w_1}{f_2} - f_1 \right) \right) \right]$$

$$\text{MOE global} = \left[(3al^2 - 4a^3) \div \left((2bh^3) \times \left(2 \times w_3 - \frac{w_1}{f_3} - f_1 \right) \right) \right]$$

$$\text{MOE global} = \left[(3al^2 - 4a^3) \div \left((2bh^3) \times \left(2 \times w_3 - \frac{w_2}{f_3} - f_2 \right) \right) \right]$$

Donde,

$a = 6xh$

$l = 18xh$

$h =$ ancho promedio

$b =$ espesor promedio

A partir del promedio del MOE global calculado, se procedió a calcular el MOE local utilizando las siguientes fórmulas:

$$\text{MOE local} = \text{MOE global} - \left(\frac{6a}{5Gb} \right)$$

$$\frac{6a}{5Gb} = [(6 \times a) \div (5 \times G \times b \times h)]$$

$$G = \text{MOE} \frac{\text{global}}{16}$$

A los valores obtenidos de MOE y densidad se aplican las normas UNE-EN 384 y UNE-EN 14358 para determinar los valores medios y característicos.

A partir del promedio del MOE global se procedió a realizar una corrección por contenido de humedad a partir de la siguiente fórmula obtenida en la norma UNE-EN 384.

$$E_o = E_o(u) (1 + 0,001(u - u_{ref}))$$

En la cual,

$E_o =$ es el módulo de elasticidad en flexión paralela a la fibra

$u =$ es el contenido de humedad en el momento del ensayo ($8\% \leq u \leq 18\%$)

$u_{ref} =$ es el contenido de humedad de referencia, normalmente $u_{ref} = 12\%$

Luego se calculó el valor característico (M_{medio}) utilizando la siguiente fórmula a partir de la norma UNE-EN 14358.

$$M_{\text{medio}} = \bar{y} - k_s(n)s_y$$

Donde,

M_{medio} = valor medio poblacional de la variable aleatorio m

\bar{y} = valor medio de la muestra

n = es el número de probetas o tablas

s_y = desviación típica

$k_s(n)$ = coeficiente utilizado para calcular las propiedades características en el marco de los ensayos de tipo iniciales. Se puede calcular a partir de la siguiente fórmula:

$$k_s(n) = 0, \frac{78}{n^0}, 53$$

Posteriormente, se aplicó la siguiente fórmula a partir de la norma UNE-EN 384.

$$E_{o, \text{mean}} = \min \left[1, 1 \bar{E}_i, \min, \frac{\sum_{i=1}^{n_s} n_i \bar{E}_i}{n} \right] \times \frac{k_n}{0, 95}$$

Donde,

$E_{o, \text{mean}}$ = módulo de elasticidad característico

\bar{E}_i = es el valor medio del módulo de elasticidad de la submuestra i

$\bar{E}_{i, \text{min}}$ = es el menor valor medio del módulo de elasticidad de las i -submuestras

n_s = es el número de submuestras

n_i = es el número de probetas de la submuestra i

n = es el número total de probetas

k_n = es un factor de ajuste del número de submuestras. En este caso toma un valor de 0,88

Por otro lado a partir de la densidad estimada, se le realizó una corrección por contenido de humedad a partir de la siguiente fórmula expresada en la norma UNE-EN 384.

$$\rho = \rho(u)(1 - 0,005(u - u_{\text{ref}}))$$

Donde,

ρ = es la densidad.

Luego se estimó el valor característico de la muestra utilizándose la siguiente fórmula establecida en la norma UNE-EN 14358.

$$m_k = \bar{y} - k_s(n)s_y$$

Donde,

m_k = valor correspondiente al percentil del 5% de la variable aleatoria m .

$$k_s(n) = \frac{6,5n + 6}{3,7n - 3}$$

Continuando, se estimó la densidad característica (5°. percentil) a partir de la siguiente fórmula establecida en la norma UNE-EN 384.

$$\rho_k = \min \left[1, 1, \rho_{05,i, \min}, \frac{\sum_{i=1}^{n_s} n_i \rho_{05,i}}{n} \right] \times k_n$$

Donde,

$\rho_{05,i}$ = es el valor del 5°. percentil de la densidad de la submuestra i

$\rho_{05,i, \min}$ = es el menor valor del 5°. percentil de las densidades de todas las submuestras

n_s = es el número de submuestras

n_i = es el número de probetas de la submuestra i

n = es el número total de probetas

k_n = es un factor de ajuste del número de submuestras. En este caso toma un valor de 0,88 por ser solo una

Por último, en el cuadro 2 se presentan valores característicos del MOE y densidad correspondientes a las calidades visuales EC1 y EC0 determinados en la norma UNIT 1261. Estos valores característicos son válidos para piezas sometidas a cargas perpendiculares a sus cantos.

Cuadro 2. Valores límites medios y característicos de calidad por UNIT 1261.

Propiedad	Valor característico EC1	Valor característico EC0
Módulo de elasticidad medio paralelo a la fibra, $E_{0, \text{mean}}$ (MPa)	7139	5327
Densidad característica (5°. percentil), ρ_k (g/cm^3)	0,365	0,332

Fuente: UNIT (2018).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos durante la fase experimental de la tesis y su discusión pertinente.

4.1. CLASIFICACIÓN VISUAL

Mediante el análisis de características y singularidades anatómicas se obtiene el siguiente cuadro, en donde se observa el resultado de la clasificación de las 299 tablas ensayadas.

Cuadro 3. Clasificación de tablas según clase de calidad.

Clases visuales UNIT 1261	No. tablas	%
EC1	71	24
EC0	177	59
R	51	17
Total	299	100

De acuerdo a los resultados obtenidos se encontraron algunas similitudes con respecto a los estudios realizados por Fernández-Golfín et al. (1998) donde el 29% de las tablas correspondían a la clase ME1, el 48% a la clase ME2 y el 23% restante se rechazó para las especies *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris* y *Pinus pinaster* y Díez et al. (2000) encontraron un 21,9% de las tablas correspondían a la clase ME1, un 47% a la clase ME2 y un 31,1% restante se rechazó para la especie *Pinus nigra*.

Sin embargo se observaron diferencias significativas en estudios llevado a cabo por Acuña et al. (2004) donde el 2,8% de las tablas correspondían a la clase ME1, el 20,4% correspondían a la clase ME2 y 76,7% restante se rechazó para la especie *Pinus pinaster*, Montón et al. (2011) observaron un 3% de las tablas como ME-1, un 42% de las tablas como ME-2 y un 55% restante como rechazo para la especie *Pinus radiata* y Castaño et al. (2011) donde el 33,3% corresponde a la clasificación ME-1, el 16,3 % corresponde a la clasificación ME-2 y el 50,4 % restante como rechazo para la especie *Pinus sylvestris*.

Seguidamente se consideran los valores promedios según los criterios de calidad utilizados para las clases de calidad EC0 y EC1.

En los cuadros 4 y 5 es posible observar que todos los valores promedios de las singularidades y características que conforman el criterio de calidad son acordes a los valores establecidos en la norma UNIT 1261 para cada clase de calidad (EC1 y EC0). Adicionalmente, se puede visualizar que las dos características que presentan mayor predominancia son la presencia de hongos cromógenos y la presencia de médula.

Cuadro 4. Valores promedios considerando criterios de calidad para la clase EC1.

Clase EC1	
Largo (mm)	2850
Nudo mayor de cara (mm)	29,33
Nudo mayor de canto (mm)	19,99
Bolsa de resina (mm)	n=6; 29,66
Cortezas incluidas (mm)	n=1; 943
Desviación de la fibra (%)	0
Rajadura (mm)	0
Grieta (mm)	n=2; 232,47 mm
Aristas faltantes (mm)	n=8; 0,12 mm
Alteraciones por hongos	0
Alteraciones por insectos	0
Hongos cromógenos	38
Curvatura de cara (mm)	3,62
Curvatura de canto (mm)	1,55
Madera de reacción	0
Abarquillado	0
Torcedura (mm)	2,21
Médula	47
Anillo de crecimiento	no medido

Cuadro 5. Valores promedios considerando criterios de calidad para la clase EC0.

Clase EC0	
Largo (mm)	2850
Nudo mayor de cara (mm)	57,57
Nudo mayor de canto (mm)	25,72
Bolsa de resina (mm)	n=17; 68,82
Cortezas incluidas (mm)	0
Desviación de la fibra (%)	0
Rajadura (mm)	n=1; 185
Grieta (mm)	n=2; 652
Aristas faltantes	n=21; 0,15
Alteraciones por hongos	0
Alteraciones por insectos	0
Hongos cromógenos	89
Curvatura de cara (mm)	3,43
Curvatura de canto (mm)	1,72
Madera de reacción	0
Abarquillado	0
Torcedura (mm)	2,85
Médula	127
Anillo de crecimiento	no medido

En el cuadro 6 se visualiza los defectos que fueron determinantes en la clasificación para rechazar las 51 tablas.

Cuadro 6. Porcentaje por defecto en rechazo.

%	Defecto
86,3	nudo canto
5,9	nudo cara
7,8	nudo canto - nudo cara

El tamaño de los nudos de cara y los nudos de canto fueron los principales criterios para el rechazo de las tablas, resultado similar a los estudios llevados a cabo por Íñiguez et al. (2007), donde determinaron que el tamaño de los nudos, principalmente los nudos de cara fueron el principal parámetro de rechazo para la especie *Pinus radiata*, y Moya et al. (2016) demostraron que la primera razón de rechazo fue el tamaño de nudo del canto con porcentajes de 30% para M1 (muestreo 1), compuesto por árboles de 25 años de edad procedente del litoral, y 40% para M2 (muestreo 2), compuesto por árboles de 15 años procedente del Sur-Oeste.

Sin embargo, se encontraron diferencias como en el estudio llevado a cabo por Montón et al. (2011) donde el principal factor de rechazo fue el defecto de alabeo que representó un 39%.

4.2. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

El cuadro 7 hace referencia a los valores de carga máxima resultantes de las tablas ensayadas, que fueron tomadas como pruebas para llegar al MOR.

Cuadro 7. Tablas ensayadas para estimar carga máxima y MOR.

Tabla	Carga máx. (N)	Carga 1 (N)	Def. 1 (mm)	Carga 2 (N)	Def. 2 (mm)	MOR (N/mm ²)
1	15	2750	8,56	6810	19,87	36,0
2	23,25	4250	9,77	9370	21,1	55,8
3	12,5	2120	5,26	5120	12,77	30,0
4	10,18	2000	7,05	4250	14,8	24,4
5	12,25	1560	5,73	5180	18,59	29,4
6	5,25	1060	3,73	1930	6,92	12,6
7	12,43	1370	5,94	4430	19,09	29,8
8	14,15	1680	7,32	5500	23,79	34,0
9	11,93	1180	5,61	3810	18	28,6
10	3,87	430	1,98	1500	6,88	9,3
11	8,06	870	4,03	2930	13,8	19,3
12	8,12	810	3,23	2500	9,6	19,5
13	9,18	930	3,79	3370	13,92	22,0
14	13,31	1430	6,44	5120	22,91	31,9

Además, puede observarse que existe una diferencia significativa entre las tablas con respecto a los valores de carga máxima, y esto puede explicarse por las características mencionadas en el segmento anterior.

Las características que más influyeron fueron el tamaño de los nudos y la posición de los mismos. Una tabla que presente un nudo de mayor dimensión y cercano en la parte central de la tabla, presenta una carga máxima inferior (menor MOR), con respecto a una tabla que presente un nudo de menor dimensión y que se situó hacia uno de los extremos de la tabla.

A continuación se puede observar los valores promedios y característicos estimados considerando las propiedades físicas y mecánicas de la madera estructural clasificadas visualmente como EC1 y EC0.

4.2.1. Ensayos en máquina universal

En el cuadro 8 se registró un total de 71 tablas pertenecientes a la clase de calidad EC1. El módulo de elasticidad promedio fue igual a 6853 MPa con una desviación estándar de 1874 MPa. Además, se registró un módulo de elasticidad característico igual a 6348 MPa.

En cuanto a la densidad, el promedio registrado fue igual a 0,404 g/cm³ con un desvío estándar de 0,039 g/cm³. Adicionalmente se estimó una densidad característica igual a 0,324 g/cm³.

Cuadro 8. Valores promedios y característicos estimados de las propiedades de la madera estructural clasificada visualmente como EC1.

N	71
Módulo de elasticidad (E)	
\bar{E}	6853
Desv std	1874
$E_{0,mean}$	6348
Densidad (ρ)	
$\bar{\rho}$	0,404
Desv std	0,039
ρ_k	0,324

Con respecto a los valores estimados en los parámetros (ρ_k y $E_{0,mean}$), ambos son menores a los valores promedios establecidos según la norma UNIT 1261 que presenta $E_{0,mean}$ igual a 7139 MPa y ρ_k igual a 0,365 g/cm³.

En el cuadro 9 se registró un total de 177 tablas pertenecientes a la clase de calidad EC0. Con respecto al módulo de elasticidad, el promedio fue igual a 5967 MPa con una desviación estándar de 1488 MPa. Además, se registró un módulo de elasticidad característico igual a 5527 MPa.

Considerando la densidad, el promedio fue igual 0,403 g/cm³ con un desvío estándar de 0,035. Adicionalmente se estimó una densidad característica de 0,329 g/cm³.

Cuadro 9. Valores promedios y característicos estimados de las propiedades de la madera estructural clasificada visualmente como EC0.

N	177
Módulo de elasticidad (E)	
\bar{E}	5967
Desv std	1488
$E_{0,mean}$	5527
Densidad (ρ)	
$\bar{\rho}$	0,403
Desv std	0,035
ρ_k	0,329

Con respecto a los valores estimados en los parámetros, ρ_k es menor y $E_{0,mean}$ es mayor a los valores promedios establecidos según la norma UNIT 1261 que presenta $E_{0,mean}$ igual a 5327 MPa y ρ_k igual a 0,332 g/cm³.

Considerando los promedios de MOE para ambas clases de calidad visual, se observó una similitud con los estudios de O'Neill et al. (2002) con un valor igual a 7050 MPa para la especie *Pinus elliottii*, O'Neill y Tarigo (2003a) con un valor igual a 6796 MPa para la especie *Pinus elliottii*, O'Neill (2004a) con un valor igual a 8354 MPa para la especie *Pinus taeda*, O'Neill et al. (2004b) con un valor igual a 7893 MPa para la especie *Pinus taeda*, O'Neill y Tarigo (2008) con un valor igual a 8396 MPa para la especie *Pinus elliottii* y O'Neill et al. (2013) con un valor igual a 7085 MPa para las especies *Pinus elliottii* y *Pinus taeda*.

En cuanto a los promedios de densidad estimados para ambas clases, son acordes a los valores estimados en los estudios de Pérez del Castillo et al. (2000b) con un valor igual a 0,378 g/m³ para la especie *Pinus taeda* y O'Neill et al. (2013) con un valor igual a 0,443 g/cm³.

4.2.2. Métodos no destructivos

En el cuadro 10 se estableció un total de 239 tablas considerando la totalidad de la población (EC1 y EC0). El promedio de densidad fue igual a 0,442 g/cm³ con una desviación estándar de 0,080 g/cm³.

Cuadro 10. Valores estimados de la densidad de la madera estructural para toda la población (EC1 y EC0) utilizando métodos no destructivos.

Promedio	0,442
Desv std	0,080
N	239

En el cuadro 11 se contabilizó un total de 71 tablas pertenecientes a la clase de calidad EC1. El promedio de densidad fue de 0,442 g/cm³ con una desviación estándar de 0,080 g/cm³.

Cuadro 11. Valores estimados de la densidad de la madera estructural clasificada visualmente EC1 utilizando métodos no destructivos.

Promedio	0,442
Desv std	0,080
n	71

En el cuadro 12 se registró un total de 168 tablas pertenecientes a la clase de calidad EC0. El promedio de densidad fue de 0,441 g/cm³ con una desviación estándar de 0,081 g/cm³.

Cuadro 12. Valores estimados de la densidad de la madera estructural clasificada visualmente EC0 utilizando métodos no destructivos.

Promedio	0,441
Desv std	0,081
N	168

De acuerdo a los valores promedio de densidad para ambas clases de calidad resultan similares a los valores estimados en los estudios llevados a cabo por Pérez del Castillo (2001) con un valor igual a 0,487 g/cm³ para la especie *Pinus elliottii*, O'Neill et al. (2002) con un valor igual a 0,391 g/cm³, O'Neill et al. (2003b) con un valor igual a 0,384 g/cm³ para la especie *Pinus taeda*, O'Neill et al. (2004b) con un valor igual a 0,391 g/cm³, O'Neill y Tarigo (2008) 0,396 g/cm³ y Quagliotti y O'Neill (2009) con un valor igual a 0,435 para la especie *Pinus taeda*.

A continuación, se presentan los valores de MOE estimados para ambas clases de calidad utilizando Fakopp.

En el cuadro 13 se estableció un total de 71 tablas pertenecientes a la clase de calidad EC1. El promedio del módulo de elasticidad fue igual a 7919 MPa con una desviación estándar de 2032 MPa.

Cuadro 13. Valores estimados del MOE de la madera estructural clasificada visualmente EC1 utilizando Fakopp.

Promedio	7919
Desv std	2032
N	71

En el cuadro 14 se registró un total de 168 tablas pertenecientes a la clase de calidad EC0. El promedio del módulo de elasticidad fue igual a 7231 MPa con una desviación estándar de 1720 MPa.

Cuadro 14. Valores estimados del MOE de la madera estructural clasificada visualmente EC0 utilizando Fakopp.

Promedio	7231
Desv std	1720
N	168

Con respecto a los valores promedio de MOE para ambas clases se asemejan a los valores obtenidos por Quagliotti y O'Neill (2009), donde se observaron valores de MOE mediante Fakopp de 5979 MPa y 5994 MPa para dos muestras distintas.

Sin embargo existe una diferencia con el trabajo de O'Neill y Tarigo (2008) con un MOE igual a 10347 MPa.

Continuando, se presentan los valores de MOE estimados para ambas clases de calidad utilizando el método de flexión estática con pesas.

En el cuadro 15 se contabilizó un total de 71 tablas pertenecientes a la clase de calidad EC1. El promedio del módulo de elasticidad fue de 6671 MPa con una desviación estándar de 1875 MPa.

Cuadro 15. Valores estimados del MOE de la madera estructural clasificada visualmente EC1 utilizando flexión con pesas.

Promedio	6671
Desv std	1875
N	71

En el cuadro 16 se registró un total de 168 tablas pertenecientes a la clase de calidad EC0. El promedio del módulo de elasticidad fue de 5994 MPa con una desviación estándar de 1515 MPa.

Cuadro 16. Valores estimados del MOE de la madera estructural clasificada visualmente EC0 utilizando flexión con pesas.

Promedio	5994
Desv std	1515
N	168

Teniendo en cuenta los valores promedio de MOE para ambas clases se encontró una similitud con los valores obtenidos en el trabajo realizado por Pérez del Castillo et al. (2000a) que estimaron un MOE promedio de 5789 MPa para la especie *Pinus taeda*.

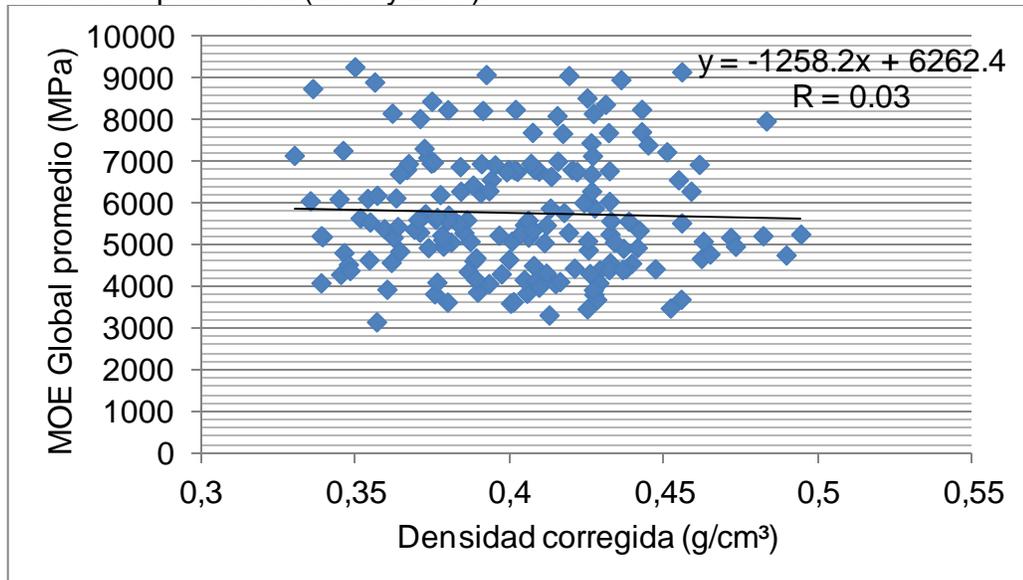
4.2.3. Relación entre variables

Anteriormente fueron definidas las relaciones estudiadas, a continuación se darán a conocer los resultados de las mismas.

La relación entre la densidad y el MOE es posible observarla en las siguientes gráficas. Además, se dan a conocer los valores de las correlaciones entre ambas variables.

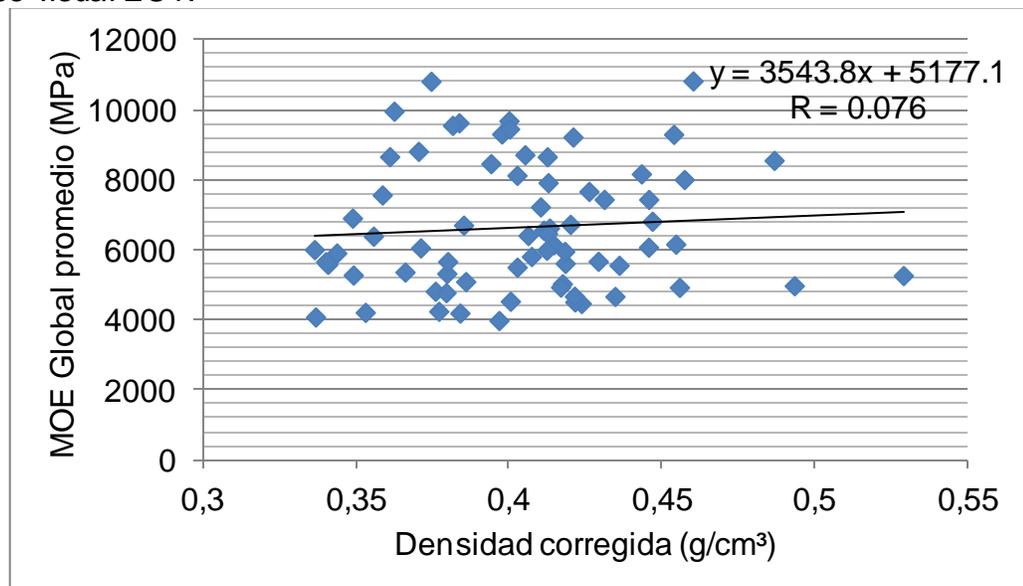
En el gráfico 3 se puede observar la relación entre la densidad y el MOE estimado a partir de la máquina universal, considerando la totalidad de la población (EC1 y EC0). Se estimó un coeficiente de correlación igual a 0.03.

Gráfico 3. Relación entre densidad y MOE (máquina universal) considerando la totalidad de la población (EC1 y EC0).



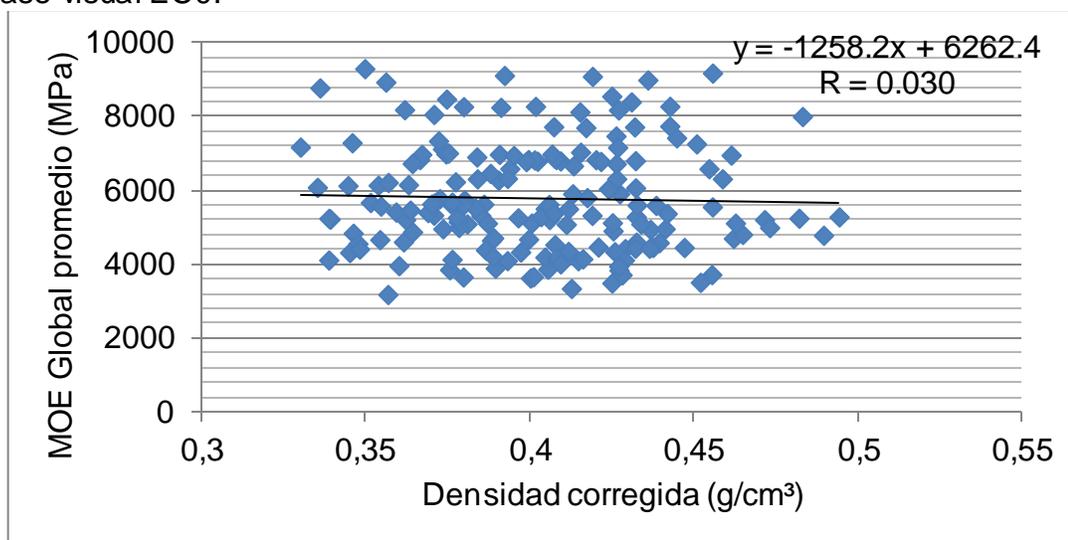
En el gráfico 4 se puede observar la relación entre la densidad y el MOE estimado a partir de la máquina universal considerando únicamente la clase visual EC1. Se estimó un coeficiente de correlación igual a 0,076.

Gráfico 4. Relación entre densidad y MOE (máquina universal) considerando la clase visual EC1.



En el gráfico 5 se puede observar la relación entre la densidad y el MOE estimado a partir de la máquina universal considerando únicamente la clase visual EC0. Se estimó un coeficiente de correlación igual a 0,030.

Gráfico 5. Relación entre densidad y MOE (máquina universal) considerando la clase visual EC0.



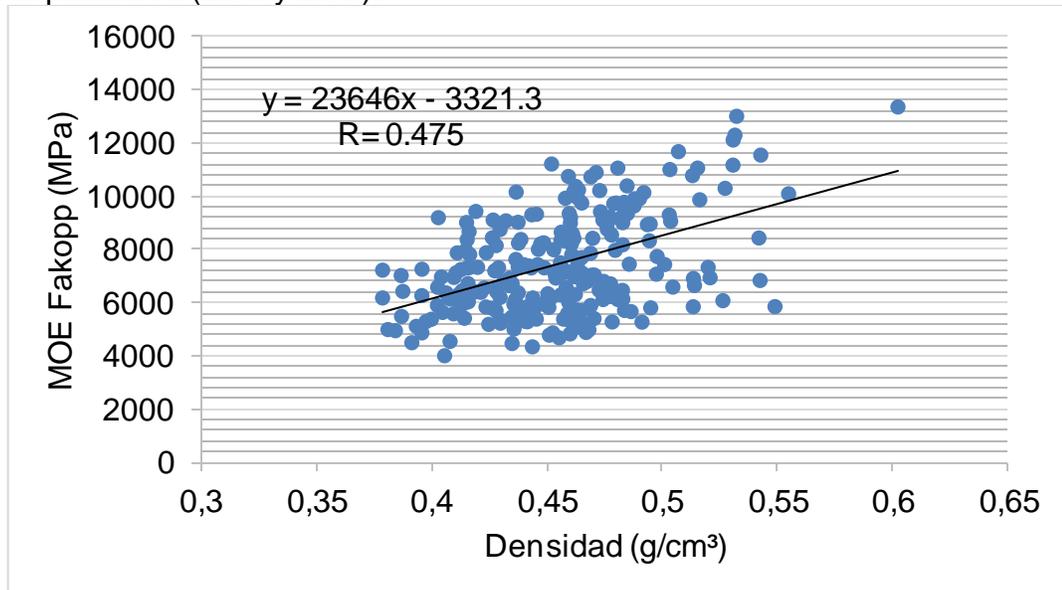
Considerando los coeficientes de correlación estimados tanto para la totalidad de la población (EC1 y EC0) como para cada clase de calidad visual por separada, no se encontró una buena correlación entre ambas variables.

Los valores estimados fueron similares a los valores presentados en el trabajo realizado por O'Neill et al. (2002), que consideraron que existió para un mismo valor de densidad una muy amplia dispersión de los valores de MOE.

Sin embargo, se observó una diferencia significativa con respecto a los valores calculados en los estudios realizados por O'Neill et al. (2003b) que determinaron un coeficiente de correlación de 0,520 para tablas "B" (zona central) y "C" (zona cercana a la corteza), O'Neill et al. (2004b) calcularon un coeficiente de correlación igual a 0,61 en tablas "C" (zona cercana a la corteza) y O'Neill y Tarigo (2008) estimaron un coeficiente de correlación igual a 0,494 en tablas "B" y 0,624 en tablas "C".

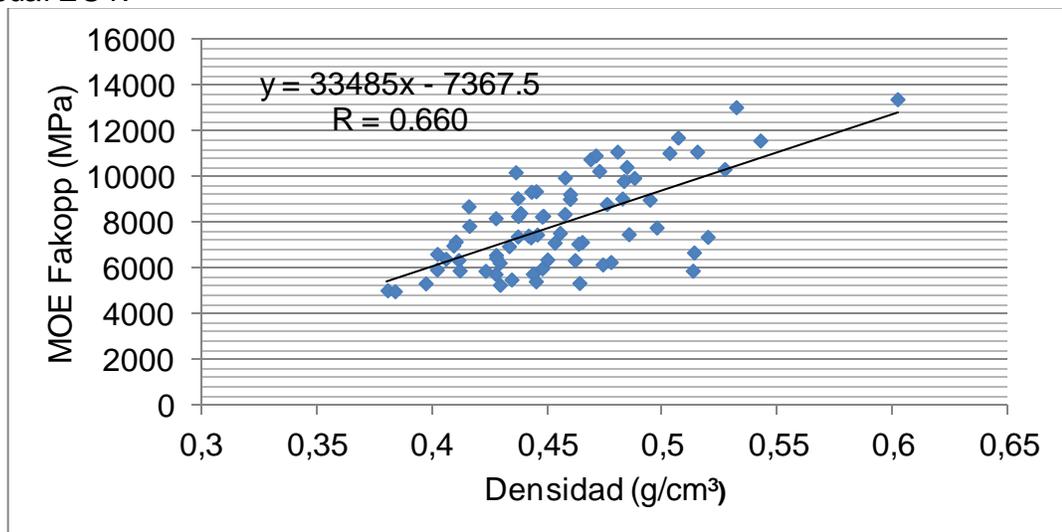
Continuando, en el gráfico 6 se puede visualizar la relación entre la densidad y el MOE estimado a partir del Fakopp, considerando la totalidad de la población (EC1 y EC0). El coeficiente de correlación estimado fue igual a 0,475.

Gráfico 6. Relación entre densidad y MOE (Fakopp) considerando la totalidad de la población (EC1 y EC0).



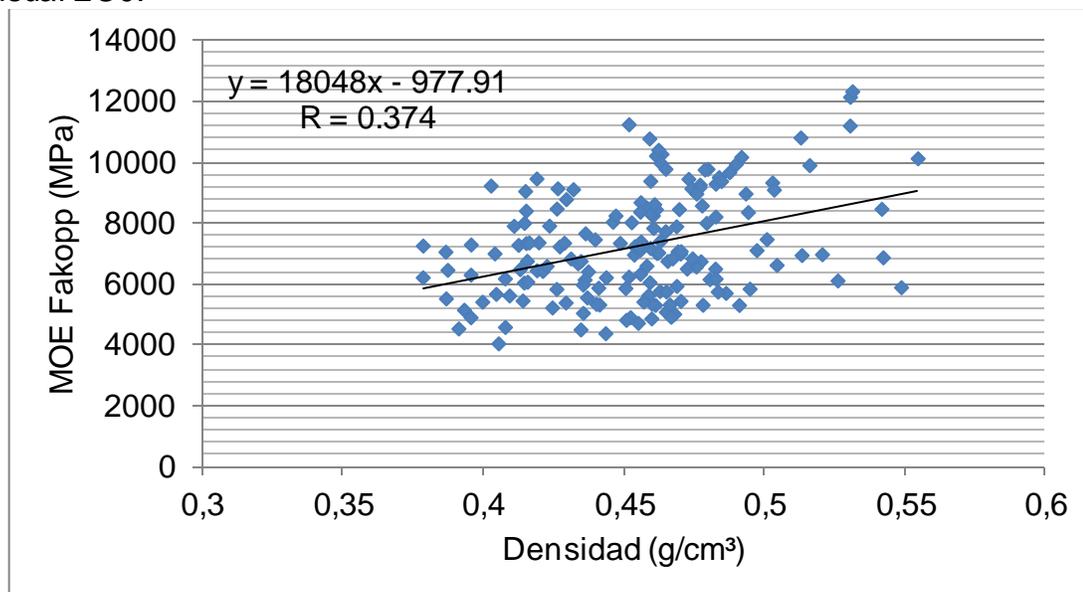
En el gráfico 7 se puede observar la relación entre la densidad y el MOE estimado a partir del Fakopp, considerando únicamente la clase visual EC1. Se estimó un coeficiente de correlación igual a 0,660.

Gráfico 7. Relación entre densidad y MOE (Fakopp) considerando la clase visual EC1.



En el gráfico 8 se puede observar la relación entre la densidad y el MOE estimado a partir del Fakopp, considerando únicamente la clase visual EC0. Se estimó un coeficiente de correlación igual a 0,374.

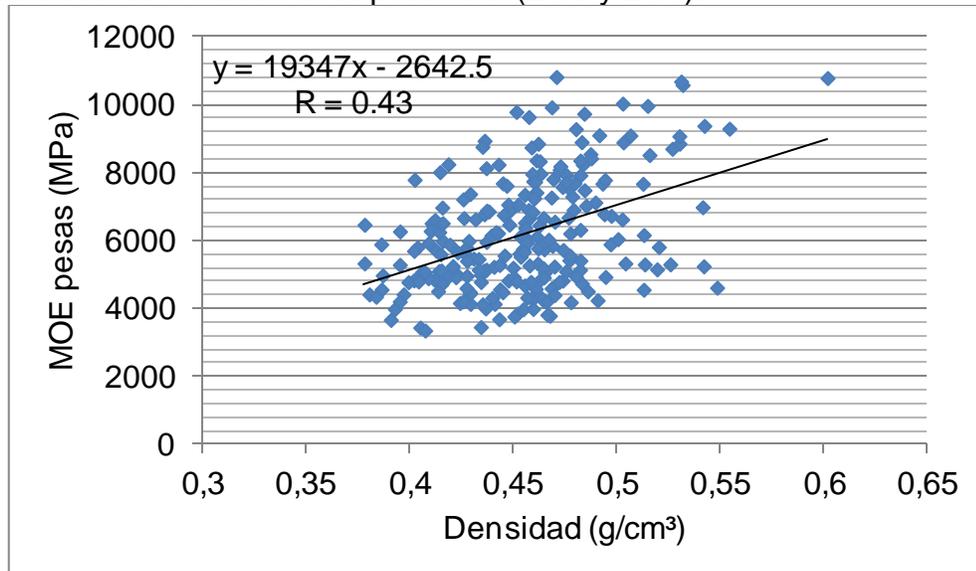
Gráfico 8. Relación entre densidad y MOE (Fakopp) considerando la clase visual EC0.



Considerando los coeficientes de correlación estimados, no se encontró una buena correlación entre ambas variables. Además, la clase visual EC1 presenta un valor más alto con respecto a la clase visual EC0 y la totalidad de la población (EC1 y EC0), debido a la menor presencia de defectos en dicha clase y obteniéndose mayores valores de módulo de elasticidad.

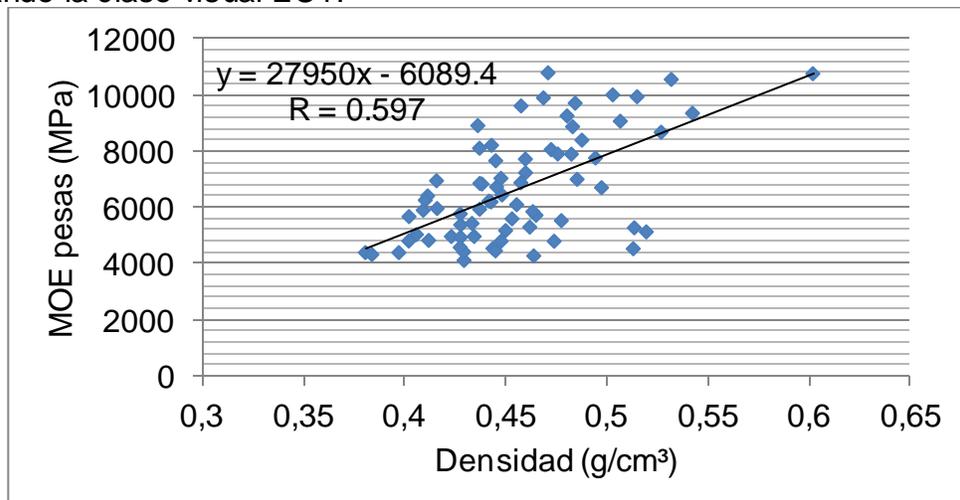
Por último, el gráfico 9 representa la relación entre la densidad y el MOE estimado a partir de la flexión estática con pesas, considerando la totalidad de la población (EC1 y EC0). El coeficiente de correlación calculado fue igual a 0,43.

Gráfico 9. Relación entre densidad y MOE (flexión estática con pesas) considerando la totalidad de la población (EC1 y EC0).



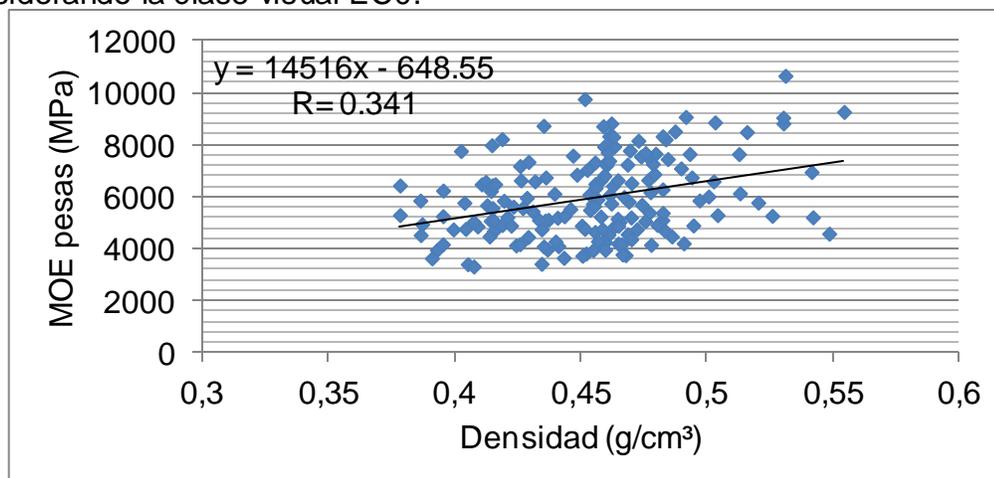
En el gráfico 10 se puede observar la relación entre la densidad y el MOE estimado a partir de la flexión estática con pesas, considerando únicamente la clase visual EC1. Se estimó un coeficiente de correlación igual a 0,597.

Gráfico 10. Relación entre densidad y MOE (flexión estática con pesas) considerando la clase visual EC1.



En el gráfico 11 se puede observar la relación entre la densidad y el MOE estimado a partir de la flexión estática con pesas, considerando únicamente la clase visual EC0. Se estimó un coeficiente de correlación igual a 0,341.

Gráfico 11. Relación entre densidad y MOE (flexión estática con pesas) considerando la clase visual EC0.



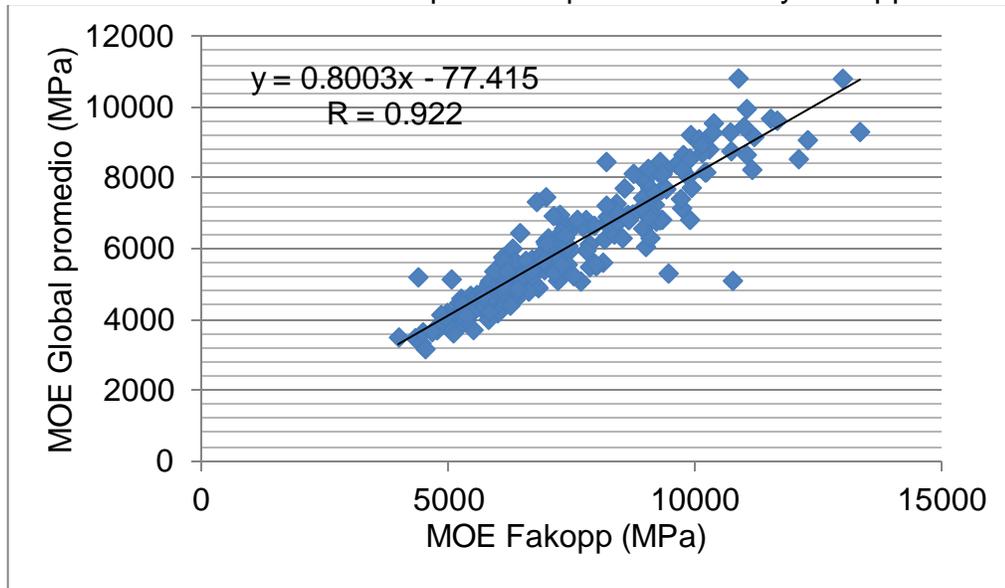
Considerando los coeficientes de correlación estimados, no se encontró una buena correlación entre ambas variables. Además, la clase visual EC1 presenta un valor más alto con respecto a la clase visual EC0 y la totalidad de la población (EC1 y EC0), debido a la menor presencia de defectos en dicha clase y obteniéndose mayores valores de módulo de elasticidad.

Adicionalmente, los valores estimados fueron significativamente menores con respecto al trabajo llevado a cabo por Pérez del Castillo et al. (2000b) que estimaron un coeficiente de correlación igual a 0,837.

Continuando, se estableció una relación entre los módulos de elasticidad a partir de los métodos definidos anteriormente. Este paso es importante para determinar lo correcto que fueron los resultados y la operativa.

En el gráfico 12 se observa la relación entre los módulos de elasticidad determinados por la máquina universal y el Fakopp. El coeficiente de correlación estimado es igual a 0,922.

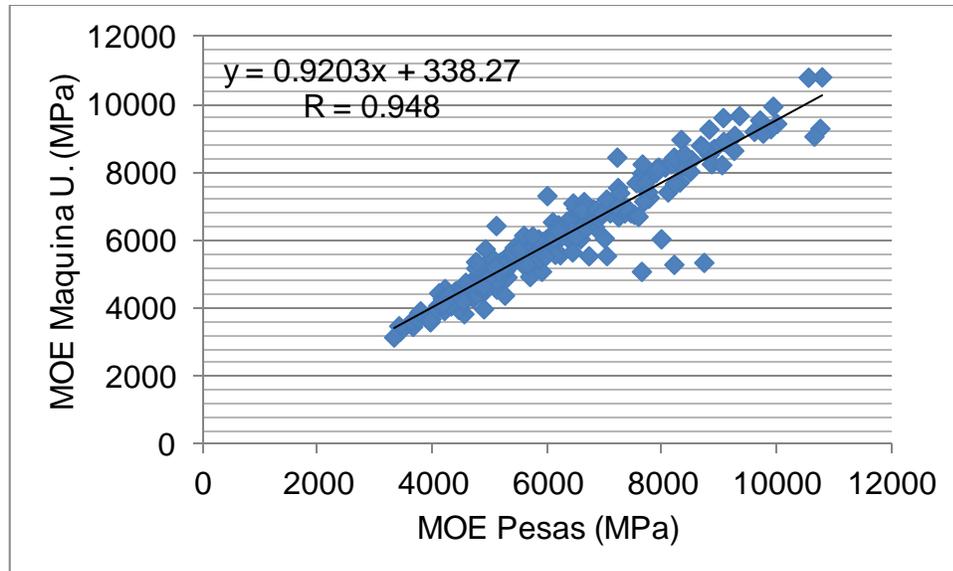
Gráfico 12. Relación entre MOE a partir máquina universal y Fakopp.



Considerando el coeficiente de correlación estimado resulta similar al valor estimado en el trabajo realizado por O'Neill y Tarigo (2008) con un valor igual a 0,847.

En el gráfico 13 se visualiza la relación entre los módulos de elasticidad determinados por la máquina universal y el de flexión estática con pesas. El coeficiente de correlación estimado es igual a 0,948.

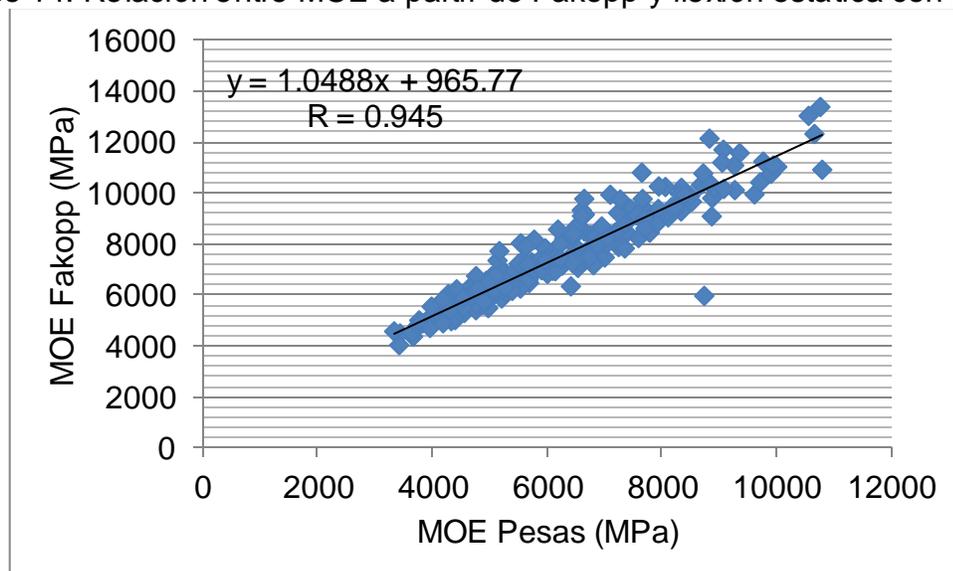
Gráfico 13. Relación entre MOE a partir máquina universal y flexión estática con pesas.



Con respecto al coeficiente de correlación calculado se asemeja al valor estimado en el estudio de Pérez del Castillo (2001) con un valor a 0,995.

En cuanto al gráfico 14 se establece la relación entre los módulos de elasticidad determinados por flexión estática con pesas y el Fakopp. El coeficiente de correlación estimado es igual a 0,945.

Gráfico 14. Relación entre MOE a partir de Fakopp y flexión estática con pesas.



De acuerdo al valor estimado se observó una similitud con respecto al coeficiente de correlación calculado en el estudio Pérez del Castillo et al. (2000a) con un valor de 0,958.

5. CONCLUSIONES

La aplicación de la norma UNIT 1261 permitió clasificar el lote de tablas ensayadas de manera que se pudieron diferenciar las tres calidades visuales (EC1, EC0 y R) en base a sus características y singularidades.

La clase más predominante en porcentaje de las 299 tablas ensayadas fue la clase estructural EC0 (segunda calidad) con 59,3%, seguido de las EC1 (primera calidad) con 23,7% y las rechazadas con 17%.

Las singularidades más importantes que determinaron las clases de calidad fueron el tamaño de los nudos de cara y de canto.

La norma no considera el número de nudos, sino el de mayor tamaño. Esto puede sobrestimar los valores de resistencia de las tablas. Además, la posición del nudo de mayor tamaño de la tabla tampoco se tiene en cuenta en la norma, esto puede subestimar o sobrestimar la resistencia de la misma.

Con respecto a la clase EC0, los valores medios y característicos estimados del MOE y densidad fueron 3,75% mayor y 0,90% menor, respectivamente a los valores establecidos para ambos parámetros en la norma UNIT 1261. En cuanto a la clase EC1, los valores estimados de MOE y densidad fueron 11,08% y 11,23% menores, respectivamente a los valores establecidos en dicha norma.

La correlación entre la densidad y el MOE estimado mediante los dos métodos no destructivos estudiados fue positiva. Para Fakopp fue de $R=0,48$, mientras que para la flexión estática con pesas fue de $R=0,43$.

Sin embargo, se observó que no hubo una buena correlación entre la determinación del MOE por máquina universal y la densidad de la madera con un valor de $R=0,03$. Este valor se puede explicar por la gran variación entre los módulos de elasticidad en las tablas ensayadas.

La correlación entre las diferentes formas de determinar y estimar el MOE de las tablas fue alta y positiva en todos los casos.

Se observó que el método de flexión con pesas, subestima los valores de MOE, mientras el Fakopp sobrestima los valores para el mismo. Independientemente de esto último se pudo concluir que las correlaciones fueron altas y positivas, lo cual a la hora de aplicar cualquiera de estos dos métodos es posible obtener el valor de MOE mediante máquina universal, que es el valor de referencia. Además a la hora de utilizar cualquiera de estos dos

instrumentos en un aserradero, es recomendable el uso del Fakopp por su mayor facilidad práctica.

Se recomendaría para futuros trabajos la inclusión de la determinación de la cantidad de nudos y su posición a lo largo de la tabla, debido a que esto puede influir en los valores de resistencia mecánica.

6. RESUMEN

Este trabajo es la primera aplicación de la norma UNIT 1261 fuera de dicho organismo, la cual es una clasificación visual y estructural de *Pinus elliottii* y *Pinus taeda*, en este caso el primero. Esta norma favorece la aplicación y conocimiento de madera nacional para uso civil en construcción y estructural. Las 288 tablas reaserradas (50mmx150mmx2850mm) provienen del aserradero Pastorino, ubicado en el departamento de Rivera. A las tablas se las clasificó primeramente de forma visual en base al protocolo de dicha norma observando características y singularidades anatómicas para determinar las distintas calidades, primera clase estructural EC1, segunda EC0 y rechazo (R). Una vez hecha la clasificación visual, se llevaron a cabo medidas físicas y mecánicas a tablas EC1 y EC0, específicamente densidad y MOE utilizando métodos no destructivos (Fakopp y flexión estática por pesas) y ensayos en máquina universal. Obtenidos los valores medios y característicos se realizó chequeo de los valores de forma que sean tales como lo dice la Norma 1261. Por último se concluye en base a dichos valores y análisis estadísticos de los mismos, midiendo correlaciones entre los resultados de cada magnitud de interés entre los diferentes métodos.

Palabras clave: Clasificación visual y estructural; UNIT 1261; *Pinus elliottii*; Densidad; MOE; Métodos no destructivos.

7. SUMMARY

This work is the first application of the norm UNIT 1261 outside said organization which is a visual and structural classification of *Pinus elliottii* and *Pinus taeda*, in this case the first. This norm favors the application and knowledge of national timber for civil construction and structural use. The 288 resurfaced tables (50mmx150mmx2850mm) come from the Pastorino sawmill, located in the department of Rivera. The tables were first classified visually in the base of the protocol of said norm observing anatomical features and singularities to determine the different qualities, first structural class EC1, second EC0 and rejection (R). Once the visual classification is done, physical and mechanical measurements were carried out on EC1 and EC0 tables specifically density and MOE using non-destructive methods (Fakopp and static bending by weights) and universal machine tests. Obtained the average and characteristic values, they were checked so that they are as the norm 1261 says. Finally, it is concluded based on said values and statistical analysis of them, measuring correlations between the results of each magnitude of interest between the different methods.

Keywords: Visual and structural classification; UNIT 1261; *Pinus elliotti*; Density; MOE; Non-destructive methods.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Acuña, L.; Casado, M.; Renedo, F.; Llorente, A.; Basterra, A.; Barranco, I.; De Caso, E. 2004. Evaluación resistente no destructiva de madera de *Pinus pinaster* Ait. de las regiones de procedencia "Gredos y Bureba - Sierra de Oña". (en línea). Valladolid, s.e. 9 p. Consultado dic. 2018. Disponible en <https://docplayer.es/87127889-Evaluacion-resistente-no-destructiva-de-madera-de-pinus-pinaster-ait-de-las-regiones-de-procedencia-gredos-y-bureba-sierra-de-ona.html>
2. AEIM (Asociación Española del Comercio e Industria de la Madera, ES). 2016. Especies de madera, por nombre comercial, corregidas en la guía. (en línea). Madrid. 80 p. Consultado dic. 2018. Disponible en <http://asmadera.com/wp-content/uploads/2014/11/mad16.pdf>
3. Álvarez Noves, H. 1986. Deformaciones de la madera aserrada, producidas durante y después del secado. (en línea). Hojas Divulgadoras. no. 8: 89-101. Consultado dic. 2018. Disponible en https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1986_08.pdf
4. Baño, V.; Moya, L.; Domenech, L.; O'Neill, H.; Cardoso, A.; Cagno, M.; Cetrangolo. 2015. Documentos técnicos base para la normalización de estructuras y construcción con madera. (en línea). Montevideo, Facultad de Ingeniería. 157 p. Consultado dic. 2018. Disponible en https://www.fing.edu.uy/sites/default/files/2016/25086/1.%20Ba%20C3%B1o%20et%20al.2015-PrFI-3823-013_InformeFinal.pdf
5. _____.; _____.; _____.; _____. 2017. Informes técnicos de normalización de madera estructural: madera aserrada de *Pinus elliotii/taeda*. (en línea). Montevideo, Facultad de Ingeniería. 22 p. (Informe no. 1). Consultado dic. 2018. Disponible en <https://www.fing.edu.uy/sites/default/files/2016/25086/Informe%201.%20Domenech%20et%20al.%202017.pdf>
6. _____.; _____.; _____.; Godoy, D.; Sánchez, A.; Quagliotti, S. 2018. Informes técnicos de normalización de madera estructural: madera aserrada de *Eucalyptus grandis*. (en línea). Montevideo, UdelaR. Facultad de Ingeniería/UdelaR. Facultad de Arquitectura/Universidad ORT/LATU. 13 p. (Informes Técnicos de Normalización de Madera Estructural no. 2). Consultado dic. 2018.

Disponible en

https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=2465

7. Barreiro, S.; Hirsch, T. 2011. Protección de la madera. (en línea). Montevideo, Facultad de Arquitectura. Diseño y Urbanismo. 60 p. Consultado dic. 2018. Disponible en <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/123456789/4703/1/BAR44.pdf>
8. Böthig, S. 2001. Indicadores de calidad para la evaluación de la madera de acuerdo a su uso final. Montevideo, LATU. 14 p.
9. Carballo, J.; Hermoso, E.; Díez, R. 2009. Ensayos no destructivos sobre madera estructural: una revisión de 30 años en España. (en línea). Kurú. 6(17): 26 - 41. Consultado nov. 2018. Disponible en <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/8023>
10. Cardoso, A. 2016. Diseño de una metodología de clasificación visual estructural para madera de *Pinus elliottii* E. y *Pinus taeda* L. cultivados en Uruguay. (en línea). In: Seminario de Maestrías en Ciencias Agrarias (2º., 2016, Montevideo). Resúmenes. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 1-2. Consultado dic. 2018. Disponible en http://www.eemac.edu.uy/images/stories/noticias/Resumen_seminario_2_A_Cardoso.pdf
11. Castaño, A.; Cobo, A.; González, M.; Llauradó, N. 2011. Caracterización mecánica de tablas de madera de pino silvestre, usadas como barandillas en sistemas provisionales de protección de borde. (en línea). In: Workshop sobre Investigación e Innovación en Protecciones Colectivas y Medios Auxiliares de Edificación (2011, Madrid). Trabajos presentados. Madrid, Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica UPM. pp. 163-175. Consultado dic. 2018. Disponible en <http://oa.upm.es/34739/>
12. Cisternas, A. 1994. Conversión de densidades de la madera. (en línea). Ciencia e Investigación Forestal. 2(8): 105 - 119. Consultado dic. 2018. Disponible en https://www.infor.cl/cifor/pdf/cifor8_2/CIFOR8_2_1994.pdf
13. Córdoba, R. 2005. Conceptos básicos sobre el secado de la madera. (en línea). Kurú. 2(5): 88 - 92. Consultado dic. 2018. Disponible en

<https://docplayer.es/69454430-Conceptos-basicos-sobre-el-secado-de-la-madera.html>

14. Coronel, E. 1994. Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas: aspectos teóricos y prácticos para la determinación de las propiedades, y sus aplicaciones. Santiago del Estero, Universidad Nacional de Santiago del Estero. Facultad de Ciencias Forestales. Instituto de Tecnología de la Madera (ITIM). 335 p.
15. Díez, M.; Conde, M.; Fernández-Golfín, J.; Roskopf, S. 2000. Clasificación visual de madera estructural de pino laricio: comparación de resultados usando las normas UNE 56.544 y DIN 4074. (en línea). INIA. Investigación Agraria, Sistemas y Recursos Forestales. 9(2): 375 - 380. Consultado dic. 2018. Disponible en <http://www.inia.es/IASPF/2000/vol9-2/DIEZ.PDF>
16. Esau, K. 1985. Anatomía vegetal. (en línea). 3a. ed. rev. y ampl. Barcelona, OMEGA. 776 p. Consultado dic. 2018. Disponible en <http://148.206.53.84/tesiMiami/Libros/Libros%20digitalizados%20ene2004/L21.pdf>
17. Fernández-Golfín, J.; Díez, M.; Gutiérrez, A. 1998. Caracterización mecánica de la madera aserrada de uso estructural, clasificada visualmente de acuerdo con la Norma UNE 56.544. (en línea). Materiales de Construcción. 48(252): 45 - 59. Consultado dic. 2018. Disponible en <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/463/511>
18. _____; _____; Hermoso, E. 2001. Análisis y estado del arte de la técnica de clasificación mecánica por máquina de la madera aserrada estructural. (en línea). Investigación Agraria, Sistemas y Recursos Forestales. 10(1): 5 - 19. Consultado dic. 2018. Disponible en <http://www.inia.es/IASPF/2001/vol10/ferna.PDF>
19. _____; _____; _____. 2003. Normas aplicables a las estructuras de madera laminada encolada: la normalización de la madera laminada avanza a pasos agigantados tanto en Europa como en España. (en línea). Asociación de Investigación de las Industrias de la Madera (AITIM). Boletín de Información Técnica. no. 221: 56-59. Consultado dic. 2018. Disponible en https://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_4571_13723.pdf

20. Fritz, A. 2004. La construcción de viviendas en madera. (en línea). Santiago, Corporación Chilena de la Madera (CORMA). 635 p. Consultado dic. 2018. Disponible en <https://es.slideshare.net/agos1585/manual-de-construccion-de-viviendas-en-madera-www-corma-cl-11-a-la-24>
21. Hermoso, E.; Carballo, J.; Fernández Golfín, J. I. 2007. Caracterización estructural de la madera de *Pinus radiata* D. Don del país vasco (España) acorde a las modificaciones normativas. (en línea). Maderas, Ciencia y Tecnología. 9(3): 223 - 232. Consultado dic. 2018. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/233882883_Caracterizacion_estructural_de_la_madera_de_Pinus_radiata_D_Don_del_Pais_Vasco_Espana_acorde_a_las_modificaciones_normativas
22. Iñiguez, G.; Arriaga, F.; Fernández Golfín, J.; Díez, R.; Hermoso, E.; Mier, R. 2007. Clasificación visual de la madera de pino radiata (*Pinus radiata* D.DON) en piezas de gran escuadría para uso estructural. (en línea). Madrid, s.e. 12 p. Consultado dic. 2018. Disponible en <https://studylib.es/doc/6076451/clasificaci%C3%B3n-visual-de-la-madera-de-pino-radiata--pinus-...>
23. Jozsa, L. A.; Middletonl, G. R. 1994. A discussion of wood quality attributes and their practicals implications. (en línea). Forintek Canada Corporation. Special Publication. no. 34. 42 p. Consultado dic. 2018. Disponible en <https://pdfs.semanticscholar.org/57b5/7386b0f5029e60812695c70ac34eb624069b.pdf>
24. Montero, M. J. 2013. Clasificación de madera estructural de gran escuadría de *Pinus sylvestris* L. mediante métodos no destructivos. (en línea). Tesis Dr. en Ciencias Agrarias. Madrid, España. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. 345 p. Consultado dic. 2018. Disponible en http://oa.upm.es/15201/1/MARIA_JOSE_MONTERO_GARCIA_A_NDRADE.pdf
25. Montón, J.; Arriaga, F.; Avellaneda, J.; Iñiguez González, G.; Ferras, J.; Plensa, R. 2011. Clasificación visual estructural de la madera de pino radiata procedente de Cataluña. (en línea). In: Congreso Ibero-latinoamericano de la Madera en la Construcción (1º., 2011,

- Coímbra). Trabajos presentados. Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña. pp. 1-8. Consultado dic. 2018. Disponible en https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/22868/INVE_M EM_2011_104981.pdf
26. Moya, L.; Cardoso, M.; O'Neill, H.; Cagno, A. 2015a. Caracterización estructural de madera aserrada de pinos cultivados en Uruguay. (en línea). Maderas, Ciencia y Tecnología. 17(3): 597 - 612. Consultado dic. 2018. Disponible en <https://scielo.conicyt.cl/pdf/maderas/v17n3/aop5315.pdf>
27. _____.; _____.; _____.; _____.; Gatto, F.; Laguarda, M. 2015b. Proyecto para la caracterización estructural de madera aserrada de pinos cultivados en Uruguay. (en línea). Montevideo, Universidad ORT. Facultad de Arquitectura. 20 p. (Documento de Investigación no. 3). Consultado dic. 2018. Disponible en <https://dspace.ort.edu.uy/bitstream/handle/20.500.11968/2847/documentodeinvestigacion3.pdf>
28. _____.; _____.; _____.; Baño, V.; Domenech, L. 2016. Proposal of visual strength grading rules of Uruguayan pine timber. (en línea). In: International Convention of Society of Wood Science and Technology (59th., 2016, Curitiba). Proceedings. Berlin, Springer. pp. 1-8. Consultado dic. 2018. Disponible en <https://docplayer.net/25573528-Proposal-of-visual-grading-rules-for-uruguayan-loblolly-and-slash-pine-timber.html>
29. Olivera, C.; Cardenas, P. 2007. Evaluación de las prioridades físicas fundamentales, mecánicas y clasificación visual de tablas de madera de una plantación de *Eucalyptus grandis* Maiden ex Hill del departamento de Durazno de 26 años de edad. (en línea). Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 82 p. Consultado dic. 2018. Disponible en <http://biblioteca.fagro.edu.uy/iah/textotesis/2007/3555oli.pdf>
30. O'Neill, H.; Tarigo, F.; Trambauer, C. 2002. Propiedades mecánicas de *P. elliotii* Eng. del litoral del Uruguay. (en línea). Montevideo, LATU/JICA. 43 p. (Informe no. 2). Consultado dic. 2018. Disponible en https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=554

31. _____.; Tarigo, F. 2003a. Comportamiento en flexión de *E. grandis*, *P. taeda* y *P. elliotii* de madera de tamaño real y de pequeñas probetas sin defectos. (en línea). Montevideo, LATU. 6 p. (Nota Técnica no. 2). Consultado dic. 2018. Disponible en https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=581
32. _____.; _____.; Trambauer, C. 2003b. Propiedades mecánicas de *P. taeda* L. del litoral del Uruguay. (en línea). Montevideo, LATU/JICA. 46 p. (Informe no. 2). Consultado dic. 2018. Disponible en https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=555
33. _____. 2004a. Estimación de la calidad de la madera producida en el Uruguay para uso estructural y su evaluación en servicio por métodos no destructivos. (en línea). Montevideo, LATU. 9 p. (Nota Técnica no. 4). Consultado dic. 2018. Disponible en https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=583
34. _____.; Tarigo, F.; Iraola, P. 2004b. Propiedades mecánicas de *P. taeda* L. del norte de Uruguay. (en línea). Montevideo, LATU/JICA. 48 p. (Informe no. 3). Consultado dic. 2018. Disponible en https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=556
35. _____.; _____. 2008. Propiedades mecánicas de *P. elliotii* Eng del Norte del Uruguay. (en línea). Montevideo, LATU/JICA. 41 p. (Informe no. 7). Consultado dic. 2018. Disponible en https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=557
36. _____.; Tarigo, F.; Cardoso, A.; Cagno, M. 2013. Comportamiento mecánico de la madera de *Pinus taeda* y *Pinus elliotii* proveniente de plantaciones de rápido crecimiento para uso estructural en la construcción en el Uruguay. (en línea). Montevideo, LATU. 9 p. (Nota Técnica no. 12). Consultado dic. 2018. Disponible en https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=1687
37. Pérez Del Castillo, A; De Castro, R; Ohta, S. 2000a. Ensayos de propiedades mecánicas de *Pinus taeda* por seis métodos no

- destructivos. (en línea). Montevideo, LATU. 23 p. (Informe de Investigación no. 1). Consultado dic. 2018. Disponible en https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=562
38. _____.; _____.; _____. 2000b. Índices de calidad de madera en *Pinus taeda* de Rivera para la optimización en el uso final. (en línea). Montevideo, LATU. 22 p. (Informe de Investigación no. 2). Consultado dic. 2018. Disponible en https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=565
39. _____. 2001. Módulo de elasticidad y módulo de rotura en tablas de tamaño real de *Pinus elliottii* del sur de Uruguay. (en línea). Montevideo, LATU. 26 p. (Informe de Investigación no. 7). Consultado dic. 2018. Disponible en https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=570
40. _____.; Venturino, A. 2003a. Inspección visual de tablas de tamaño real de *Eucalyptus grandis*, *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* de diferentes sitios del Uruguay. (en línea). Montevideo, LATU. 28 p. (Informe de Investigación no. 15). Consultado dic. 2018. Disponible en https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=578
41. _____.; _____. 2003b. Resumen de propiedades mecánicas de *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* de distintas zonas del Uruguay. (en línea). Montevideo, LATU. 31 p. (Informe de Investigación no. 14). Consultado dic. 2018. Disponible en https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=577
42. Presa, J. M. 2015. Estructura, composición y clasificación de la madera. (en línea). ALBURA, CEDRIA. no. 1: 1-5. Consultado dic. 2018. Disponible en <http://blog.cedria.es/wp-content/uploads/2015/04/ALBURA-N1-ESTRUCTURA-COMPOSICION-Y-CLASIFICACION-DE-LA-MADERA.pdf>

43. Quagliotti, S.; O'Neill, H. 2009. Alternativas para dar valor agregado a la madera nacional proveniente de árboles de raleos comerciales: vigas laminadas (GLULAM) y madera microlaminada (LVL). (en línea). Montevideo, LATU. 84 p. (Informe de Investigación no. 16). Consultado dic. 2018. Disponible en https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=579
44. RAE (Real Academia Española, ES). 2014. Diccionario de la lengua española. (en línea). Madrid. 2376 p. Consultado dic. 2018. Disponible en <http://lema.rae.es/drae2001/srv/search?id=ebUZPDCzYDXX2FqGXdx8>
45. Spavento, E.; Keil, G. D.; Monteoliva, S. 2008. Propiedades físicas de la madera. (en línea). La Plata, Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. 29 p. Consultado dic. 2018. Disponible en http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/1689/mod_resource/content/0/Propiedades_Fisicas_2008.pdf
46. Tuset, R.; Durán, F. 1979. Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización. Montevideo, Hemisferio Sur. 688 p.
47. UNE (Asociación Española de Normalización, ES). 2011a. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural: madera de coníferas. UNE 56544:2011. Madrid. 22 p.
48. _____. 2011b. Estructuras de madera: madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. UNE-EN 408:2011. Madrid. 38 p.
49. _____. 2016a. Estructuras de madera: determinación y verificación de los valores característicos. UNE-EN 14358:2016. Madrid. 18 p.
50. _____. 2016b. Madera estructural: clases resistentes. UNE-EN 338:2016. Madrid. 14 p.
51. _____. 2016c. Madera estructural: determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. UNE-EN 384:2016. Madrid. 22 p.
52. UNIT (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, UY). 2018. Madera aserrada de uso estructural: clasificación visual de madera de pino

taeda y pino ellioti (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*). UNIT 1261:2018. Montevideo. 28 p.

53. Vignote, S.; Martínez Rojas, I. 2005. Tecnología de la madera. 3a. ed. rev. y ampl. Madrid, Mundi–Prensa. 678 p.
54. Ziliani, G. 1978. Anatomía de maderas. Montevideo, Facultad de Agronomía. 38 p.