

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL

FACULTAD REGIONAL CONCEPCIÓN DEL URUGUAY

CARRERA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA, MENCIÓN MATERIALES

TESIS DE DOCTORADO

**Caracterización físico-mecánica del pino resinoso
(*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*)
cultivado en el nordeste argentino para uso estructural**

Tesista:

Fank, Pamela Yohana

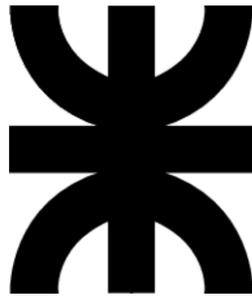
Director:

Dr. Ing. Piter Juan Carlos J.

Co-Director:

Dr. Stefani Pablo Marcelo

2018



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL

FACULTAD REGIONAL CONCEPCIÓN DEL URUGUAY

CARRERA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA, MENCIÓN MATERIALES

TESIS DE DOCTORADO

Caracterización físico-mecánica del pino resinoso

(*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*)

cultivado en el nordeste argentino para uso estructural

Tesis presentada en cumplimiento a las exigencias de la Carrera de Doctorado en Ingeniería, mención Materiales de la Facultad Regional Concepción del Uruguay, realizada por la Ing. Civil Pamela Yohana Fank

Director:

Dr. Ing. Piter Juan Carlos J.

Concepción del Uruguay, Entre Ríos

Argentina

Año 2018

Dedico este gran esfuerzo personal a mi ahijado *Pablo* por ser la luz de mis ojos y a mi
abuela *Erica* que ilumina mis pasos desde el cielo.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi profundo agradecimiento a todas aquellas personas que de alguna forma me han ayudado y animado durante la elaboración de este trabajo, en particular:

A mi director de tesis, Juan Carlos, por su admirable dedicación, sin sus conocimientos y enseñanzas no habría podido emprender y concluir este trabajo.

Al CONICET por el apoyo económico a través del programa de becas doctorales.

A la Facultad Regional Concepción del Uruguay de la Universidad Tecnológica Nacional, especialmente al director del Departamento de Ing. Civil, Ing. Raúl Martín, por su apoyo y confianza durante todos estos años; y al jefe de Laboratorio, Ing. Ricardo Gómez, por su colaboración en la operación de los equipos.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones, en especial al Ing. Hugo Reinert por su estímulo para emprender este desafío.

A Luis Chodorge, presidente de Laharrague-Chodorge SA, por confiar en este proyecto y donar el material necesario para poder llevarlo a cabo.

A los becarios del grupo GEMA por su valiosa colaboración y buena predisposición en todo momento, lo que me permitió afrontar el arduo trabajo experimental.

A mis colegas de trabajo, Rocío, Eduardo, Alexandra y Andrea, por su buena energía y apoyo incondicional en todo el transcurso de este largo camino recorrido.

A mi FAMILIA y AMIGOS por ser un gran soporte emocional durante el desarrollo de esta tesis doctoral.

RESUMEN

El objetivo principal de esta Tesis es la caracterización físico-mecánica de la madera aserrada estructural de pino resinoso (*Pinus taeda*, *Pinus elliottii*) cultivado en el nordeste argentino. Para alcanzar dicho objetivo se diseñó una investigación empírica sobre 7 muestras integradas por un total de 574 piezas en tamaño estructural.

Se investigó la influencia de las características visuales sobre las propiedades mecánicas, confirmándose que la nudosidad, la médula y los anillos de crecimiento constituyen las singularidades de mayor relevancia en la madera estudiada. Se analizaron diferentes perfiles de resistencia, rigidez y densidad con los correspondientes límites para los principales parámetros visuales. Asimismo se estudió la aplicabilidad de los métodos de clasificación visual vigentes en Argentina para el pino del nordeste. De la comparación entre las dos especies estudiadas se corroboró que ambas presentan un comportamiento mecánico similar. También se compararon las propiedades mecánicas en flexión con las de tracción paralela a las fibras.

Fue estudiada la eficiencia de parámetros mecánicos para predecir la resistencia a flexión, obteniéndose la mayor correlación para la combinación del módulo elástico, densidad y nudosidad. Se analizaron perfiles de resistencia, rigidez y densidad basados en el parámetro combinado y en el módulo de elasticidad, probándose la aptitud de estas especies para ser clasificadas mecánicamente. Además se evaluó la aplicabilidad de un método acústico por vibraciones para la predicción de la rigidez del material estudiado.

También se contemplaron otros aspectos relacionadas con el comportamiento estructural de la madera aserrada, destacándose la relación entre el módulo de elasticidad

global y el local en flexión, la influencia del tamaño de la sección transversal sobre la resistencia y el efecto de las cargas de larga duración.

Los resultados obtenidos alientan a la revisión de la normativa argentina vigente sobre ambas especies estudiadas y a futuros estudios relacionados con la obtención experimental de aquellas propiedades mecánicas indispensables para la aplicación de modelos numéricos que permitan optimizar el uso estructural de este material renovable.

Palabras clave: *madera aserrada; resistencia, rigidez y densidad; clasificación visual; clasificación mecánica; flexión y tracción; deformación diferida.*

ABSTRACT

The main objective of this Thesis is the physico-mechanical characterization of structural sawn timber from resinous pine (*Pinus taeda*, *Pinus elliottii*) which is grown in the Northeast of Argentina. For this purpose, an empirical research project with 7 samples containing a total of 574 specimens in structural sizes was designed.

The influence of the visual characteristics on mechanical properties was investigated, and this had proved that knots, pith and growth rings are the most relevant singularities in the studied material. Different strength, stiffness and density profiles with the corresponding limits for the main visual parameters were analyzed. Likewise, the applicability of the Argentinean visual strength grading methods for the Northeast pine was studied. After comparing the two species studied, it was verified that both show a similar mechanical behavior. The relationship between mechanical properties of bending and tension parallel to the grain were also analyzed.

Efficiency of the mechanical parameters to predict bending strength was studied, the highest correlation was obtained for the combination of modulus of elasticity, density and knot ratio. Strength, stiffness and density profiles based on both the combined grading parameter and the modulus of elasticity were analyzed, proving that these timber species may advantageously perform in a machine strength grading process. In addition, the suitability of using an acoustic method to determine the stiffness of the studied material was evaluated.

Other aspects connected to the performance of structural sawn timber were also presented, in which the relationship between global and local modulus of elasticity in bending, the size effect on bending strength and the effect of long-term loads.

The results obtained encourage the revision of the current Argentinian standards regarding both studied species and further experimental studies regarding other indispensable mechanical properties for numerical models application that optimize the structural use of this renewable material.

Keywords: sawn timber; strength, stiffness and density; visual strength grading; machine strength grading; bending and tension; creep.

ÍNDICE

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Presentación del problema	1
1.2. Fundamentación	4
1.3. Objetivos del trabajo de tesis	8
1.3.1. Objetivo general.....	8
1.3.2. Objetivos específicos	8
1.4. Metodología de desarrollo	9
1.5. Resultados	10

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. El árbol y la madera de coníferas	13
2.1.1. Estructura submicroscópica	15
2.1.2. Estructura microscópica	16
2.1.3. Estructura macroscópica	18
- Albura y duramen	18
- Anillos de crecimiento	19
- Médula	20
- Radios leñosos	20
- Madera de reacción	20
- Madera juvenil	21

2.2. Madera como material estructural.....	21
2.2.1. Particularidades de la estructura interna de la madera aserrada	22
- Nudos	23
- Médula	25
- Anillos de crecimiento	25
- Dirección de las fibras	26
- Depósitos de Resina	27
- Fisuras	27
- Arista faltante.....	28
- Deformaciones	28
- Alteraciones biológicas.....	29
- Otros.....	29
2.2.2. Propiedades físicas de la madera.....	30
- Contenido de humedad	30
- Densidad.....	32
2.2.3. Propiedades mecánicas de la madera	33
- Resistencia y rigidez asociadas a cada tipo de esfuerzo mecánico	34
- Ensayos para la determinación de las propiedades mecánicas	37
- Influencia del esfuerzo de corte en la rigidez	39
2.2.4. Factores que afectan a las propiedades de la madera.....	40
- Calidad de la madera para uso estructural	41
- Temperatura	44
- Contenido de humedad	44
- Tamaño de la pieza	45
- Duración de la carga	48
2.3. Clasificación de la madera aserrada	52
2.3.1. Clasificación visual por resistencia	55
- Grados de calidad	55
- Indicadores de calidad	57
- Diseño del método	60
- Ventajas y desventajas	60
2.3.2. Clasificación mecánica por resistencia	61
- Tipos de máquinas para ensayos no destructivos	62
- Parámetros predictores de la resistencia	66

- Diseño del método	66
- Ventajas y desventajas	68
2.4. Características de las plantaciones y de la madera <i>Pinus elliottii</i> y <i>Pinus taeda</i>	68
2.4.1. Generalidades de las especies	69
2.4.2. Plantaciones y producción de madera aserrada	71
2.4.3. Características particulares de la madera	74
2.4.4. Uso estructural de la madera	76
- Situación en Argentina	77
- Situación en Estados Unidos, Brasil y Uruguay	82

CAPÍTULO III. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. Materiales	85
3.1.1. Obtención del material	85
3.1.2. Preparación de las muestras	88
3.2. Ejecución del programa experimental	90
3.2.1. Registro de las dimensiones y características visuales	91
- Nudos	92
- Médula.....	96
- Anillos de crecimiento.....	96
- Dirección de las fibras	97
- Depósitos de Resina.....	97
- Fisuras.....	98
- Arista faltante.....	98
- Deformaciones.....	99
- Ataques biológicos y coloración	99
3.2.2. Ensayos acústicos por vibraciones	100
3.2.3. Ensayos estáticos	102
- Ensayos de flexión	102
- Ensayos de tracción paralela a las fibras	105
- Determinación de la densidad aparente y el contenido de humedad.....	106
3.2.4. Ensayos con cargas de larga duración	107
3.2.5. Procesamiento de datos	109

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Clasificación visual por resistencia	113
4.1.1. Parámetros visuales registrados en las muestras ensayadas a flexión	114
4.1.2. Propiedades mecánicas y densidad de las muestras ensayadas a flexión	121
4.1.3. Relación entre los parámetros visuales y las propiedades físico-mecánicas	129
- Nudosidad	129
- Médula	137
- Anillos de crecimiento	140
4.1.4. Perfiles de calidad para las muestras ensayadas a flexión	147
- Perfiles de calidad asociados a las tablas	148
- Perfiles de calidad asociados a las vigas	153
4.2. Clasificación mecánica por resistencia	161
4.2.1. Diseño de modelos de clasificación mecánica por resistencia de tablas	162
- Determinación de los principales parámetros mecánicos	163
- Desarrollo de modelos mecánicos de clasificación y comparación de su eficiencia con la del método visual adoptado por la norma IRAM 9662-3 (2015)	165
- Aplicación de los modelos mecánicos a la muestra ensayada en tracción paralela a las fibras	167
4.2.2. Determinación del módulo de elasticidad a través de la frecuencia fundamental de vibración	170
4.3. Análisis comparativo de la madera de <i>Pinus elliottii</i> y <i>Pinus taeda</i> a través de las propiedades físico-mecánicas	176
4.4. Relaciones entre las propiedades mecánicas de flexión y tracción	181
4.4.1. Análisis de los resultados correspondientes a las muestras sin clasificar	182
4.4.2. Análisis de los resultados correspondientes a cada clase resistente	185
4.5. Comparación entre el módulo de elasticidad global y el módulo de elasticidad local en flexión	191
4.5.1. Valores determinados experimentalmente para el módulo de elasticidad global y para el módulo de elasticidad local	192
4.5.2. Valores calculados para el módulo de elasticidad local a partir de los valores determinados experimentalmente para el módulo de elasticidad global	198
4.6. Influencia del tamaño de la sección transversal sobre la resistencia a flexión	199

4.7. Evaluación de las deformaciones diferidas en piezas sometidas a cargas de larga duración	207
4.7.1. Las deformaciones instantáneas	208
4.7.2. Las deformaciones diferidas	210
4.7.3. El criterio del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera	213

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones relacionadas con la clasificación visual por resistencia	217
5.1.1. Respecto a la influencia de los parámetros visuales sobre las propiedades físico-mecánicas.....	217
5.1.2. Respecto a los perfiles de calidad para las muestras ensayadas a flexión.....	218
- Tablas.....	219
- Vigas	220
5.2. Conclusiones relacionadas con la clasificación mecánica por resistencia	221
5.2.1. Respecto al diseño de modelos de clasificación mecánica.....	221
5.2.2. Respecto a la estimación del módulo de elasticidad a través de la frecuencia fundamental de vibración	222
5.3. Conclusiones respecto al análisis comparativo de la madera de <i>Pinus elliottii</i> y <i>Pinus taeda</i>	223
5.4. Conclusiones respecto de la relación entre propiedades mecánicas de flexión y tracción	223
5.5. Conclusiones respecto de la relación entre el módulo de elasticidad global y el módulo de elasticidad local en flexión	224
5.6. Conclusiones respecto de la influencia del tamaño de la sección transversal sobre la resistencia a flexión	225
5.7. Conclusiones respecto de las deformaciones diferidas en piezas sometidas a cargas de larga duración	225
5.8. Futuras investigaciones	226

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía.....	229
--------------------------	------------

ANEXO. DATOS

A.1. Registro de las características visuales	241
A.2. Datos particulares de cada cuerpo de prueba	243

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

En este primer capítulo se presenta el problema que dio origen al desarrollo de esta Tesis Doctoral, se mencionan los antecedentes relacionados al tema tratado y los fundamentos que justifican la realización de la investigación. También se detallan los objetivos trazados con una breve descripción de la metodología utilizada para alcanzarlos. Finalmente se expone una síntesis de los resultados logrados.

1.1. Presentación del problema

La superficie de bosques cultivados en Argentina alcanza aproximadamente 1,12 millones de hectáreas de las cuales el 65% está constituido por coníferas, el 22% por eucaliptos, el 9% por salicáceas y el 4% restante por otras especies latifoliadas de menor relevancia (Dirección de Producción Forestal 2016). El 78% de los bosques de coníferas (560000 hectáreas) se ubica en el nordeste del país, en las provincias de Misiones y Corrientes, siendo el *Pinus taeda* y el *Pinus elliottii* los que representan el mayor porcentaje (SIFIP 2009). Por el impacto socioeconómico que generan ambas especies mencionadas resulta de singular importancia aportar conocimientos con rigor científico orientados a un uso eficiente de este recurso natural.

A pesar de que el país posee una riqueza forestal importante, la utilización de la madera en construcciones, y en particular en estructuras, no ha sido significativa. Diversos motivos han influido en ese sentido, dentro de los que pueden señalarse particularmente los 3 siguientes: i) motivos de índole cultural, ligados a la procedencia de las principales corrientes inmigratorias que recibió Argentina, ii) la percepción de mala

calidad que se generó en la población a partir de muchos fracasos ocasionados por la utilización de malas prácticas constructivas y, iii) la generación de un círculo vicioso a partir de esas malas experiencias, que redundó en una escasa enseñanza de la construcción con madera en los distintos niveles de educación del país y la consecuente degradación de una oferta de calidad tanto en el diseño como en la producción de materiales y en la ejecución misma de las obras. No obstante esa situación, a partir del año 2000, con la fundación de la Red de Instituciones de Desarrollo Tecnológico de la Industria Maderera (RITIM, Asociación Civil con Personería Jurídica Insp. Gral Justicia N° 001031), comenzó una etapa de trabajo conjunto entre algunas universidades, el sector productivo y profesionales vinculados a la temática.

Por otra parte, consideraciones de tipo ambiental hacen que el uso estructural de la madera proveniente de especies cultivadas se incremente en el futuro. Su empleo ofrece importantes ventajas frente a otros materiales como el hormigón, el acero y el aluminio, entre otros, que requieren un consumo energético mucho mayor al que necesita la madera para ser transformada en un material estructural (Vihavainen 1995). La preservación de los bosques nativos, que en el país alcanzan en la actualidad aproximadamente 33,2 millones de ha (FAO 2004), constituye un objetivo central desde el punto de vista ecológico y, por lo tanto, también desde esta óptica el empleo de especies implantadas como las que son objeto de la presente investigación implica un impacto altamente positivo.

Para fines estructurales, tanto en calidad de madera aserrada como de madera laminada encolada, las especies renovables más utilizadas en nuestro país son el *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* cultivado en Misiones y el nordeste de Corrientes, el *Eucalyptus grandis* forestado en la Mesopotamia y el Pino Paraná (*Araucaria angustifolia*) cultivado en Misiones. A su vez, la escasa normativa nacional orientada a favorecer un uso adecuado de estos productos se refiere a las especies antes mencionadas. Tal es el caso de las normas IRAM 9660-1, 9660-2, 9661, 9662-1, 9662-2 y 9662-3, todas puestas en vigencia en 2006, que establecen requisitos de fabricación y control para la madera laminada encolada estructural. Estas normas fueron revisadas y publicadas nuevamente en el año 2015 al incorporarse la madera de álamo a través de la IRAM 9662-4 que establece un método visual de clasificación por resistencia para el *Populus deltoides* procedente del delta del río Paraná. En el mismo sentido, pero con referencia a la madera aserrada de pino resinoso

del nordeste destinada a vigas, puede citarse la norma IRAM 9670 (2002). Es de destacar que estas normas han constituido una primera aproximación al conocimiento y difusión del comportamiento mecánico de las especies más importantes, pero es imprescindible profundizar y ampliar su estudio para lograr un diseño estructural moderno y confiable.

El Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601 está basado en maderas de origen nacional y constituye el primer reglamento del país en la materia, el mismo fue puesto en vigencia legal en el año 2016. Esta normativa define los métodos y disposiciones generales a ser empleados en el diseño y construcción de estructuras para edificaciones y obras civiles con madera aserrada, madera laminada encolada y productos derivados de la madera. Este trabajo científico-técnico (INTI CIRSOC 601 2016) es una importante actualización de los conocimientos del uso estructural de la madera en nuestro país ya que además de proveer reglas de diseño, incorpora a sus suplementos valores de diseño de referencia para las propiedades mecánicas de las maderas cultivadas en el país, los que están a disposición de los proyectistas estructurales. Más allá de la oportunidad que este proyecto brinda para mejorar la confiabilidad del diseño estructural, su aparición ha puesto también de manifiesto la imperiosa necesidad de investigar el comportamiento mecánico de nuestras especies conforme a las modernas tendencias establecidas internacionalmente.

Un aspecto particular de la madera procedente tanto del *Pinus taeda* como del *Pinus elliottii* es que la misma se caracteriza por presentar un alto índice de nudosidad, siendo usual la existencia de nudos agrupados debido a la particular forma de crecimiento de estos árboles. Teniendo en cuenta que los nudos modifican la estructura interna de la madera afectando sus propiedades mecánicas, el análisis de esta singularidad adquiere suma importancia resultando una tarea compleja, la cual adquiere cierta dificultad adicional puesto que los criterios para evaluar la nudosidad contemplados por las normas de clasificación vigentes (IRAM 9662-3 2015; IRAM 9670 2002) difieren entre sí. Por otra parte, como estas especies de crecimiento rápido suelen presentar turnos de rotación cortos, en piezas aserradas es frecuente la presencia de médula y una abundante proporción de madera juvenil caracterizada por contar con propiedades mecánicas reducidas respecto de la madera madura (Chan Martín *et al.* 2002). Esto conduce a que los valores del módulo de elasticidad propuestos por la norma (IRAM 9662-3 2015) sean difíciles de alcanzar, situación también puesta de manifiesto para las mismas especies

cultivadas en otros países vecinos como Brasil y Uruguay (Ballarin *et al.* 2017; Melchiorretto y Eleotério 2003; Moya *et al.* 2017).

La existencia de pocos y a su vez parciales estudios referidos al comportamiento estructural del pino resinoso cultivado en el nordeste de Argentina, algunos de los cuales se han volcado en las normas IRAM mencionadas anteriormente, y el elevado impacto nacional y regional del recurso, justifican la realización de la investigación que se presenta en este Trabajo de Tesis. Ésta ha sido desarrollada teniendo en cuenta las modernas tendencias internacionales (ABNT 2010; EN 1995-1-1 2006; NCh 1198 2014; NDS 2012) y los criterios de diseño adoptados por el reglamento argentino (INTI CIRSOC 601 2016). A su vez, se orienta al conocimiento integral de aquellos aspectos del comportamiento mecánico que resultan de mayor importancia para el diseño estructural. Los nuevos conocimientos adquiridos impactan, además del sector científico, en el profesional y el productivo a través de la transferencia de resultados que posibilitarán un cálculo más confiable y una producción de materiales y ejecución de obras con mejor calidad.

1.2. Fundamentación

Conforme a los modernos conceptos de diseño estructural, una especie o grupo de especies debe ser investigada indisolublemente vinculada a su región de cultivo (Glos 1995a, 1995b), ya que tanto razones climáticas como las características del suelo pueden provocar que maderas de una misma especie cultivadas en distintas regiones presenten diferencias significativas en su comportamiento mecánico. Se han publicado resultados de investigaciones llevadas a cabo conforme a estos modernos lineamientos sobre madera aserrada y laminada encolada de *Eucalyptus grandis* cultivado en la Mesopotamia (Piter *et al.* 2004a, 2004b; Piter 2012; Sosa Zitto *et al.* 2012; Torrán *et al.* 2008). Existen reportes referidos al comportamiento estructural de la madera aserrada de *Araucaria angustifolia* (Pino Paraná) cultivada en Misiones (Guillaumet *et al.* 2007, 2008) pero no se conocen estudios integrales sobre la madera aserrada de pino resinoso (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*) cultivado en el nordeste de Argentina. Como lo ya señalado, para este último caso las normas IRAM 9662-3 (2015) e IRAM 9670 (2002) presentan métodos de clasificación por resistencia para tablas y para vigas respectivamente, con criterios que difieren entre sí. Esta situación, junto a la ausencia total del estudio de aspectos tales como el

comportamiento bajo cargas de larga duración, la influencia del tamaño de la sección transversal sobre el comportamiento mecánico, entre otros temas de gran importancia para el diseño estructural, hace imprescindible la realización de un estudio integral sobre las especies antes mencionadas.

Los actuales criterios de diseño estructural basados en conceptos semiprobabilísticos (EN 1995-1-1 2006) requieren que el conocimiento de las propiedades mecánicas y físicas que resultan básicas para el cálculo de la resistencia y la deformación de los miembros sometidos a esfuerzos, se fundamente en una base estadística confiable (IRAM 9664 2013; EN 384 2016). A su vez, razones tanto técnicas como económicas han provocado el desarrollo de métodos de clasificación por resistencia y la aparición de sistemas de clases resistentes tanto para madera aserrada como para madera laminada encolada estructural (EN 338 2016; Glos 1995a; IRAM 9660-1 2015; IRAM 9662-3 2015).

La clasificación por resistencia conduce a dividir, sobre la base de un análisis individual de cada pieza estructural, una población de madera en clases o grupos de distinta calidad. Esta inspección puede ser visual o mecánica y tiene en cuenta el nivel de los parámetros considerados y, en función de los límites establecidos para los mismos, origina la asignación de cada elemento a una determinada clase resistente. A diferencia de la clasificación relacionada a aspectos estéticos, la clasificación por resistencia se fundamenta en la influencia que los parámetros ejercen sobre las propiedades mecánicas del material, por lo que la medición de los mismos se realiza con ese objetivo (Hoffmeyer 1995). Existen actualmente en el mundo dos sistemas de clasificación por resistencia de madera aserrada para uso estructural, el visual y el mecánico. Los países con mayor tradición en la temática han desarrollado a través del tiempo sus propios métodos, basados en su experiencia y conocimiento de las especies utilizadas. Hasta comienzos del siglo veinte la clasificación visual se realizaba fundamentalmente apoyándose en experiencias regionales, habiéndose comenzado a desarrollar las primeras reglas detalladas en la década de 1920 en Estados Unidos y en la de 1930 en varios países europeos (Glos 1995b). Las máquinas de clasificar fueron introducidas a partir de la década de 1960 permitiendo evaluar parámetros no percibidos visualmente e incorporando mayor precisión y velocidad al proceso (Glos y Diebold 1994). Las numerosas normas de clasificación redactadas en las décadas posteriores a la de 1960 difieren en los parámetros empleados y/o en la forma de medirlos, pues recogen

experiencias propias de cada país o región y, a su vez, se orientan a distintas especies o a especies de diferentes procedencias. No obstante, todas tienen en común la consideración de la correlación existente entre los parámetros y la resistencia y rigidez del material evaluado. Una población de madera aserrada sin clasificar conduce a la obtención de valores característicos muy bajos, como consecuencia de la naturalmente alta dispersión de sus propiedades. Por el contrario, la división de la población original en clases, que constituyen sub-poblaciones de características más homogéneas, permite sacar provecho de las piezas de mayor calidad y a su vez trabajar con mayor confiabilidad. Razones técnicas y económicas son, entonces, las que justifican la clasificación por resistencia de este material (Blaß y Görlacher 1996; Glos y Lederer 2000).

Asociada a la modernización de los conceptos de diseño y a la conformación de grandes bloques culturales y económicos, existe actualmente una fuerte tendencia hacia la adopción de criterios técnicos de equivalencia internacional. Un claro ejemplo en este sentido es el desarrollo de las normas europeas que, para el caso particular de las estructuras de madera, acompañan a los criterios de diseño establecidos en el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2006). La norma EN 338 (2016) establece un sistema internacional de clases resistentes que permite insertar grados de calidad para distintas especies y procedencias. Los requerimientos cada vez más exigentes en materia de seguridad y economía han originado a su vez estudios relativos a la búsqueda de funciones que relacionen las distintas propiedades de una especie o grupo de ellas, lo cual posibilita la derivación de propiedades secundarias a partir de las fundamentales. Tal es el caso de las relaciones que vinculan la resistencia característica en flexión con las correspondientes a tracción y compresión, el módulo de elasticidad en estado de flexión pura con aquel influenciado por el esfuerzo de corte (ASTM D198 2015; Denzler *et al.* 2008; EN 384 2016; IRAM 9664 2013) entre otros. De igual modo, el avance en el conocimiento ha originado que las reglas de diseño consideren la influencia del tamaño de la sección transversal sobre la resistencia (ASTM D1990 2016; INTI CIRSOC 2016; Denzler y Glos 2008; NDS 2012; Piter 2012) y adopten criterios para evaluar la influencia de las condiciones de servicio y la duración de la carga sobre las deformaciones diferidas (ABNT 2010; INTI CIRSOC 2016; Hunt 1999; NCh 1198 2014; Torrán *et al.* 2008).

En Argentina, factores de naturaleza técnica y política de los últimos años han generado un ambiente propicio para el desarrollo de la construcción con madera y sus

productos derivados. Dentro de los primeros se destacan actividades llevadas a cabo entre el sector científico-tecnológico y el productivo que permitieron editar modernas normas referidas al estudio del comportamiento mecánico de la madera estructural y a los procesos de fabricación y control de la madera laminada encolada, las cuales ya han sido citadas anteriormente. Dentro de los segundos se destaca la puesta en vigencia legal del primer Reglamento Argentino de Estructuras de Madera (INTI CIRSOC 601 2016), lo que sitúa al país en condiciones de consolidar la utilización de este material en estructuras, como ya lo han hecho países vecinos como Chile (NCh 1198 2014) y Brasil (ABNT 2010). Gracias a este impulso nacional la madera aparece como un material de construcción en el mismo plano que el hormigón y el acero, abriéndose un campo de aplicación para los profesionales del rubro de la construcción como ingenieros, arquitectos y maestros mayores de obra.

Sumado a lo antedicho, en el año 2017 la construcción con madera y sus productos derivados ha recibido un impulso oficial de gran envergadura. En primer lugar se suscribió el Convenio de Colaboración para la Promoción de la Construcción con Madera con el sector foresto-industrial para construir viviendas sociales de madera, lo que dará un fuerte impulso a la cadena de valor foresto-industrial y está vinculado con la reciente aprobación de una guía para el proyecto de estructuras de madera con bajo compromiso estructural en base al CIRSOC 601 (Piter *et al.* 2018). En segundo lugar se conformó oficialmente la Mesa Nacional de la Construcción con Madera, que entre otras tareas deberá establecer acciones de comunicación sobre los beneficios de este tipo de construcción, como ser la reducción de los tiempos de ejecución de las obras, el carácter renovable, reciclable y capturador de dióxido de carbono de la madera, la menor demanda energética que ofrece este material frente a la construcción tradicional, entre otras.

No obstante los avances señalados, es necesario que el proyectista cuente con un conocimiento acabado del comportamiento mecánico del material, por lo que es indispensable una revisión profunda de la información disponible sobre las características físico-mecánicas de las especies forestales de cultivo en nuestro país y la realización de ensayos de piezas en tamaño estructural para complementar los ya existentes. La determinación de las propiedades físicas y mecánicas debe ser realizada a través de un método normalizado para que los resultados puedan ser comparables internacionalmente.

Las primeras normas nacionales referidas al estudio experimental de la madera estructural (IRAM 9663 2013; IRAM 9664 2013), basadas en el criterio europeo expresado en las normas EN 384 y EN 408 vigentes al momento de su redacción, proveen modernos criterios de análisis estadístico para propósitos estructurales y procedimientos de ensayos estáticos en tamaño estructural.

1.3. Objetivos del trabajo de tesis

Esta tesis persigue un objetivo general del cual se desprenden una serie de objetivos específicos.

1.3.1. Objetivo general

- Conocer el comportamiento mecánico de la madera del pino resinoso (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*) cultivado en el nordeste argentino de acuerdo con las modernas tendencias internacionales del diseño estructural, y aportar para la actualización de la normativa nacional.

1.3.2. Objetivos específicos

- Evaluar, sobre piezas de tamaño estructural usual, la influencia que los principales parámetros de determinación visual ejercen sobre la resistencia y la rigidez.
- Elaborar perfiles de calidad con valores característicos para las propiedades mecánicas y de densidad aplicables a la totalidad de secciones transversales producidas para uso estructural, y verificar a su vez la aplicabilidad de los métodos visuales de clasificación por resistencia provistos por las normas IRAM 9662-3 (2015) e IRAM 9670 (2002).
- Desarrollar modelos para una clasificación mecánica por resistencia de las tablas destinadas a la elaboración de madera laminada encolada estructural, que permitan superar la eficiencia de los métodos visuales.

- Determinar el nivel de significación de la diferencia en el comportamiento mecánico de ambas especies de pino resinoso (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*).
- Analizar la relación existente entre las propiedades mecánicas en flexión y tracción, entre el módulo de elasticidad global y el local en flexión, y la influencia del tamaño de la sección transversal sobre la resistencia a flexión.
- Evaluar las deformaciones diferidas (creep) producidas en vigas flexionadas sometidas a una carga constante de 1 año de duración.

1.4. Metodología de desarrollo

Teniendo en cuenta los objetivos planteados, se diseñó una investigación empírica sobre un total de 574 cuerpos de prueba en tamaño estructural procedentes de plantaciones de *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* ubicadas en la provincia de Misiones. Estos fueron distribuidos en siete muestras: cuatro de vigas y una de tablas sometidas a flexión estática, una de tablas ensayada a tracción paralela a las fibras y la restante integrada por vigas sometidas a flexión con cargas de larga duración. El tamaño de las piezas respondió a las medidas estructurales más usuales para el país y el criterio de selección de las mismas estuvo orientado a lograr una muestra representativa de la calidad general del material producido.

Todas las determinaciones experimentales fueron llevadas a cabo en el Laboratorio de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Concepción del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional (FRCU-UTN). Para que los resultados de las mismas puedan ser comparables tanto a nivel nacional como internacional, los ensayos estáticos y las determinaciones correspondientes fueron llevados a cabo siguiendo las prescripciones establecidas en la normativa argentina (IRAM 9663 2013; IRAM 9664 2013) que adoptó el criterio europeo en la materia.

Un detalle de los materiales y métodos empleados es expuesto en el Capítulo III, mientras que el marco teórico de referencia para el análisis y discusión de los resultados es presentado en el Capítulo II. En la sección Bibliografía figura toda la información bibliográfica que respalda y nutre a la presente investigación.

1.5. Resultados

El desarrollo de esta tesis permitió conocer importantes particularidades del pino resinoso (*Pinus taeda*, *Pinus elliottii*) del nordeste argentino. En el Capítulo IV se presentan y discuten en detalle los resultados obtenidos a través de los cuales fue posible alcanzar tanto el objetivo general como los específicos. Tanto las conclusiones alcanzadas como las futuras investigaciones que derivan de esta Tesis Doctoral aparecen en el Capítulo V. Como anexo figuran los datos particulares de cada cuerpo de prueba, tales valores son los empleados en el desarrollo del trabajo y permiten, por lo tanto, verificar los resultados presentados y discutidos.

En forma paralela al desarrollo de las actividades previstas, los avances en la obtención, análisis y discusión de resultados fueron puestos a consideración de los sectores científico-tecnológico, académico, profesional y productivo a través de su publicación y presentación en distintos medios y eventos. Dentro de ellos se citan a continuación dos artículos publicados en revistas científicas de relieve para la temática abordada, una internacional y otra nacional, y cinco contribuciones a congresos de jerarquía, en todos los casos con alcance internacional.

- Fank, P.; Stefani, P.; Piter, J. C. (2018). Relationship between bending and tension mechanical properties in structural timber of resinous pine from the northeast of Argentina. XVI Latin-American Polymer Symposium (SLAP 2018), XIV Iberoamerican Polymer Congress (CIP 2018). Mar del Plata, Argentina, 6 al 9 de Noviembre de 2018. Publicado en formato electrónico en la página 281 de los Anales, disponible en página web <<http://www.slap2018.com>>.

- Fank, P. Y.; Stefani, P. M.; Piter, J. C. (2017). Clasificación mecánica de tablas de pinos resinados cultivados en el nordeste de Argentina. Maderas: Ciencia y Tecnología 19(3): 247-264.

- Fank, P. Y.; Mastrandrea, C. A. (2017). Validación de un método acústico no destructivo para la determinación de la rigidez de tablas aserradas de pino resinado (*Pinus elliotti* y *Pinus taeda*) cultivado en el nordeste de Argentina. Yvyrareta, Revista Forestal País de Árboles 24(1): 114-121.

- Fank, P. Y.; Ramos, R.; Stefani, P. M.; Piter, J. C. (2017). Evaluación de las deformaciones diferidas en piezas estructurales de pino resinado cultivado en el

nordeste de Argentina. II Congreso Latinoamericano de Estructuras de Madera, II Congreso Ibero-Latinoamericano de la Madera en la Construcción (CLEM + CIMAD 2017). Junín, Buenos Aires, Argentina, 17 al 19 de Mayo de 2017. Publicado completo en formato electrónico con 11 pág., pdf disponible en <<http://clem-cimad2017.unnoba.edu.ar/papers/T3-08.pdf>>.

- Fank, P. Y.; Piter, J. C. (2016). Influencia del esfuerzo de corte en la determinación del módulo de elasticidad de vigas de madera aserrada. Análisis para el pino resinoso cultivado en el nordeste de Argentina. 24 Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural (JAIE). Buenos Aires, Argentina, 28 al 30 de septiembre de 2016. Publicado completo en formato electrónico en 14 pág., pdf disponible en página web de las jornadas (<<http://jornadasaie.org.ar>>) bajo el código 077 (<<http://goo.gl/LTts1p>>). Resumen en anales, pág. 42/43, con el código 077 (ISBN 978-987-23292-3-5).

- Fank, P. Y.; Stefani, P. M.; Piter, J. C. (2016). Análisis de la relación entre las propiedades mecánicas en flexión y tracción paralela a las fibras en la madera de pino resinoso cultivado en el nordeste de Argentina. XV EBRAMEM Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. Curitiba, PR, Brasil, 09 al 11 de marzo de 2016. Publicado completo con el código 47 en 13 pág., pdf disponible <<http://www.ebramem.com.br/ebramem2015/artigos/Resultado>>.

- Fank, P. Y.; Stefani, P. M.; Piter, J. C. (2014). Efecto de la altura en la resistencia a flexión en piezas de pino resinoso del noreste de Argentina. XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural (JSAIE). Montevideo, Uruguay, 19 al 21 de noviembre de 2014. Publicado completo en formato electrónico con el código 263 en 13 pág. Resumen en anales pág. 105 y en <<http://goo.gl/XBx5gi>> pág. 129 (ISBN: 978-9974-0-1168-7).

- Fank, P. Y.; Stefani, P. M.; Piter, J. C. (2014). Resistencia y rigidez de tablas destinadas a la fabricación de madera laminada encolada estructural. Análisis comparativo entre el pino resinoso (*Pinus taeda/elliottii*) y el álamo (*Populus deltoides* ‘Australiano 129/60’ y ‘Stoneville 67’). Jornadas de Salicáceas 2014. IV Congreso Internacional de Salicáceas en Argentina. La Plata, Buenos Aires, Argentina, 18 al 22 de marzo de 2014. Publicado completo en CD ROM ISSN 1850-3543 en 8 pág. pdf. <<http://goo.gl/sb09E2>>.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se desarrolla el marco teórico de referencia necesario tanto para el diseño y ejecución de la investigación, como para la discusión de los resultados que la misma produce. Se exponen las propiedades más significativas orientadas a la clasificación por resistencia de la madera, presentándose el estado actual del conocimiento en lo referente al desarrollo de métodos de clasificación tanto visuales como mecánicos. También se analizan aspectos particulares del desempeño de la madera para uso en estructuras y, para finalizar, se describen las características particulares del pino resinoso de ambas especies en estudio: *Pinus taeda* y *Pinus elliottii*.

2.1. El árbol y la madera de coníferas

Las maderas provienen de dos categorías de árboles conocidos como angiospermas y gimnospermas, al primer grupo pertenecen las especies latifoliadas y al segundo lo integran las coníferas. La madera procedente de coníferas cuenta con una estructura anatómica más simple que la de las latifoliadas, siendo tales diferencias las que otorgan ciertas características básicas a cada grupo, las cuales a su vez tienen gran influencia en las propiedades físicas y mecánicas (Argüelles Á. y Arriaga M. 2000; Hoffmeyer 1995). Como el género *Pinus* pertenece al grupo integrado por las coníferas, durante el desarrollo del presente apartado se hará referencia exclusivamente a dicha categoría.

Se puede afirmar que las propiedades de la madera varían de la misma forma que cualquier especie vegetal, según las zonas geográficas y los climas. De esta manera, una especie forestal desarrollada en la misma zona pero en terrenos diferentes en cuanto a

altitud, humedad o composición, acusa notables diferencias. Del mismo modo que las propiedades de la madera varían de un árbol a otro, lo hacen incluso dentro de un mismo árbol, porque al tratarse de un ser vivo cada zona del tronco es dotada con características acordes a sus necesidades (Coronel 1994; Steer 1995).

La madera, con relación a lo antedicho, puede ser descripta como un material orgánico de estructura compleja compuesto fundamentalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina, formado por células vegetales dispuestas con dirección predominantemente longitudinal, lo que determina su carácter heterogéneo. Esta heterogeneidad da lugar a la anisotropía, es decir, el comportamiento desigual de la madera frente a una propiedad física o mecánica según la dirección que se considere (Hoffmeyer 1995). Dicha condición es el motivo por el cual para su análisis se establecen tres planos de corte como los representados en la Figura 2.1. El corte transversal es perpendicular al eje de crecimiento del árbol, el corte radial pasa por el eje y un radio del tronco y el tangencial es paralelo a un plano tangente al tronco o al anillo de crecimiento (Walker 2007).

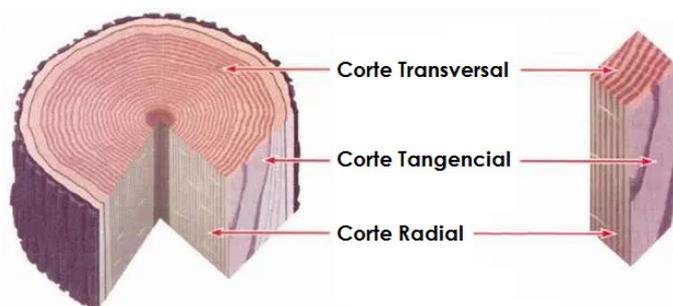


Figura 2.1. Secciones principales de la madera (Adaptada de Chavesta 2006)

Al analizar un trozo de madera se puede comprobar que las propiedades anatómicas, químicas, físicas y mecánicas están íntimamente vinculadas con la composición, disposición y orientación de los elementos que forman la pared celular, es decir, están influenciadas por las particularidades de la estructura interna de la madera (Álvarez Lazo *et al.* 2011). Entonces, para el abordaje de un estudio integral de este material se deben distinguir tres niveles dentro de los cuales se explican todas las características de su comportamiento físico-mecánico. Éstos son la estructura de la pared celular (estructura submicroscópica), la agregación de las células para formar el tejido xilema o madera (estructura microscópica) y la consideración de la madera comercial con defectos (estructura macroscópica) (Argüelles Á. y Arriaga M. 2000), los que son descriptos a continuación.

2.1.1. Estructura submicroscópica

Con un microscopio electrónico de transmisión -que barre la superficie con un bombardeo de electrones- se logra identificar la ultraestructura y constitución de la pared celular, la cual está formada por multitud de filamentos enrollados helicoidalmente con relación al eje de la célula, llamados fibrillas, separados entre sí pero unidos a través de un material amorfo denominado lignina. Cada fibrilla se crea a partir de agregados más finos que se llaman microfibrillas que, a su vez, se componen de agrupaciones de fibrillas elementales y éstas por cadenas de celulosa. Como los espacios existentes entre las fibrillas elementales son accesibles a las moléculas de agua, una microfibrilla es hidrófila.

En la mayoría de las especies las características fundamentales de la pared celular son comunes, distinguiéndose la siguiente estructura (Hoffmeyer 1995; Vignote P. y Martínez R. 2006):

- Laminilla media: es la capa más externa que divide dos células vecinas existente entre las células individuales y es la que mantiene la cohesión necesaria para formar el tejido. Es isótropa y está compuesta fundamentalmente por lignina y pectina.
- Pared primaria: es de espesor muy delgado, se encuentra en contacto con la laminilla media y está emplazada en la parte más superficial, las microfibrillas de celulosa están dispuestas de forma aleatoria en un fondo de lignina. La orientación de estas microfibrillas forma un ángulo grande con el eje de la célula y están muy desordenadas. Es anisótropa.
- Pared secundaria: constituida por celulosa con pequeñas incrustaciones de lignina debido al mayor empaquetamiento de las fibrillas, se puede descomponer en tres capas bien diferenciadas:
 - S1: es una capa muy delgada (representa 5-10% del espesor de la pared secundaria) que presenta un promedio de inclinación de las microfibrillas de entre 50° y 70° con respecto al eje de la célula.
 - S2: es una capa intermedia, la más gruesa de las tres (representa 75-85% del espesor de la pared secundaria) y la que mayor influencia tiene en el comportamiento mecánico. En ésta las microfibrillas se encuentran orientadas mayoritariamente en la dirección longitudinal (de 5° a 20°).

- S3: es la capa más delgada e interior de la pared, ubicándose contra el espacio interior de la célula llamado lumen.

En la Figura 2.2 se muestra esquemáticamente la organización estructural de una célula detallándose cada una de sus capas conforme a la descripción efectuada anteriormente.

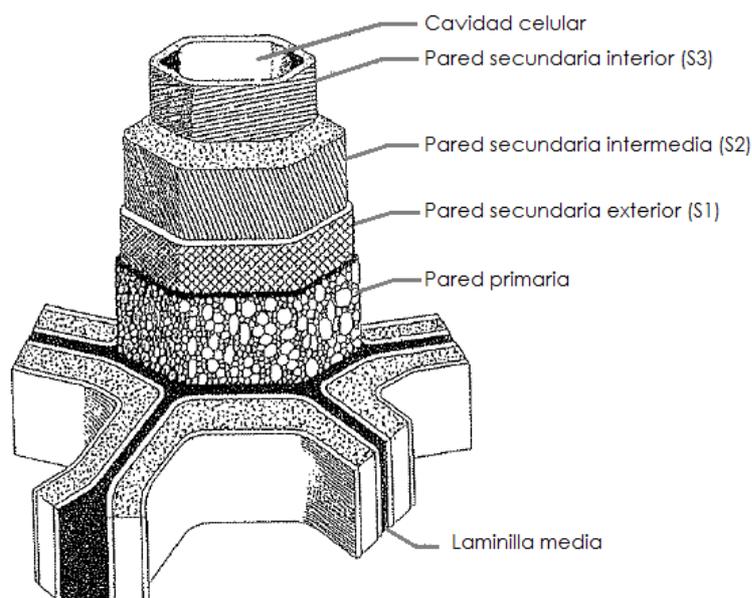


Figura 2.2. Estructura de una célula (Adaptada de Vignote P. y Martínez R. 2006)

La estructura de la pared celular puede analizarse también desde el punto de vista de su comportamiento estructural. Los esfuerzos de tracción pueden ser absorbidos favorablemente por la capa media de la pared secundaria debido a la orientación predominantemente longitudinal de las microfibrillas que la integran. A su vez, cuando ésta es sometida a esfuerzos de compresión paralela, la capa media es contenida y arriestrada contra el pandeo flexional tanto por la capa externa como por la interna de la pared secundaria, las que tienen una mayor inclinación de las fibras.

2.1.2. Estructura microscópica

Con un microscopio las coníferas muestran una estructura relativamente sencilla - cuyo aspecto puede apreciarse en la Figura 2.3, en la que entre el 90% al 95% son elementos longitudinales de tejido que cumplen con la función de dar resistencia y transportar agua y nutrientes. Dicho tejido está compuesto por células denominadas traqueidas, éstas tienen

forma alargada con una longitud variable entre 2 mm y 5 mm, y una esbeltez muy grande ya que su diámetro es aproximadamente la centésima parte de su longitud. Estas traqueidas crecen en sucesivas capas anulares y tienen su eje longitudinal paralelo al eje del tronco del árbol, presentando paredes más gruesas y menores diámetros en la madera tardía que en la temprana. A la vez pueden poseer inclusiones de resina (traqueidas resinosas) o ser un tejido prosenquimatoso que pierde el protoplasma rápidamente (traqueidas en cadena). De forma secundaria, y solo en algunos géneros, se advierten células columnares paralelas a las traqueidas de paredes más delgadas (parénquima longitudinal) encargadas del almacenamiento y transporte radial de sustancias, y unas cavidades longitudinales donde las células resinógenas vierten su resina (canales resiníferos).

Los elementos transversales de la madera de coníferas están constituidos exclusivamente por los radios leñosos. Su constitución anatómica no es exactamente igual a la del tejido vertical, formado por parénquima radial y, en algunos casos, por traqueidas radiales y/o canales resiníferos. Cuando el radio está formado íntegramente por parénquima constituye lo que se llama radio homogéneo, mientras que si incluye traqueidas se denomina heterogéneo, y si adicionalmente muestra canales resiníferos recibe el nombre de radio fusiforme.

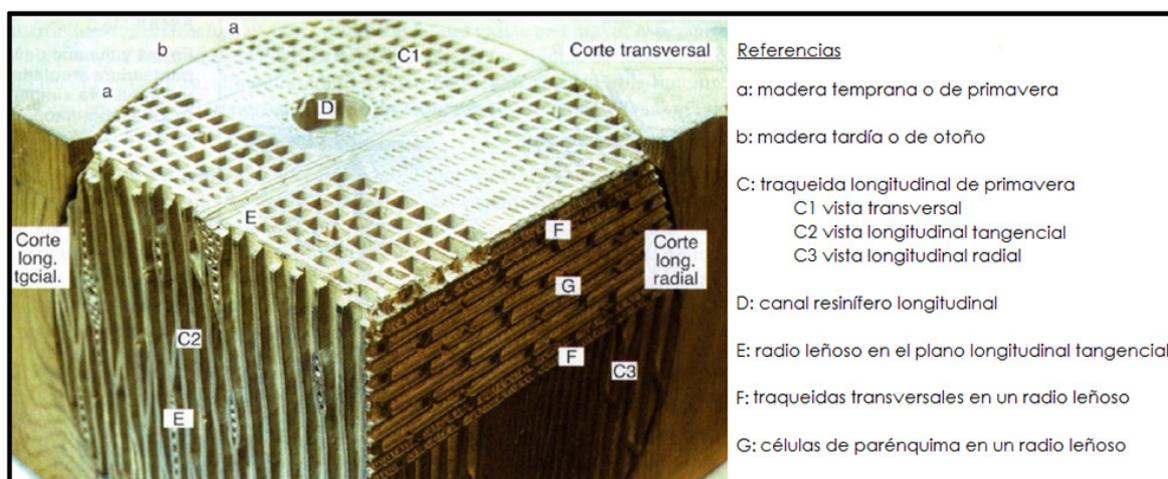


Figura 2.3. Esquema de la estructura microscópica de la madera de coníferas (Adaptada de Vignote P. y Martínez R. 2006)

Al observar la Figura 2.3 se comprueba que la estructura microscópica de la madera de coníferas está constituida por células en general alargadas y dispuestas en su mayoría en dirección del eje del árbol, y que solo un pequeño porcentaje de células tienen formas

más o menos rectangulares y/o están orientadas transversalmente al eje del árbol en una dirección radial (Álvarez Lazo *et al.* 2011; Hoffmeyer 1995; Vignote P. y Martínez R. 2006).

2.1.3. Estructura macroscópica

La estructura macroscópica del tronco del árbol de coníferas, como puede observarse en la Figura 2.4, está compuesta por: i) la corteza externa -o corteza propiamente dicha- que está constituida por células muertas, ii) la corteza interna o liber por donde circula la savia descendente, iii) el cambium, capa delgada de células vivas generadoras del crecimiento en espesor del árbol, que produce la madera o xilema hacia el interior y el floema hacia el exterior, y iv) el leño o tejido leñoso que, al formar la mayor parte del tronco del árbol, está integrado por diversas estructuras, las cuales son descriptas seguidamente.

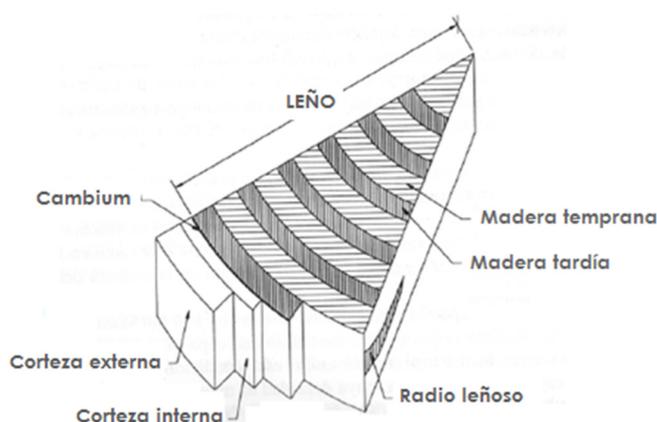


Figura 2.4. Estructura macroscópica (Adaptada de Argüelles Á. y Arriaga M. 2000)

Albura y duramen

La albura, ubicada en la zona más exterior del leño, se corresponde con la última madera formada, es de color más o menos claro o blanquecino y es la encargada del transporte de agua y nutrientes desde las raíces hasta la copa del árbol, por lo que sus elementos conductores están libres de obturaciones por depósitos. Con el paso del tiempo las células detienen su función fisiológica y, debido a la formación de compuestos que impregnan la pared celular y obturan el lumen celular, sufren una serie de transformaciones químicas y anatómicas. Estos procesos le confieren a la madera un color más oscuro y una mayor densidad, lo que implica mayor resistencia mecánica y al ataque de los insectos. Esta nueva zona formada recibe el nombre de duramen y su misión consiste únicamente en

brindar resistencia al árbol. Los extractivos que impregnan la pared celular y en algunos casos el lumen son los que le otorgan al duramen su aspecto coloreado, reduciendo los fenómenos de hinchazón y merma, así como la penetración de líquidos (Álvarez Lazo *et al.* 2011; Argüelles Á. y Arriaga M. 2000). En la Figura 2.5 se presenta la sección de un tronco de pino resinoso donde se puede observar claramente una diferenciada coloración entre albura y duramen.

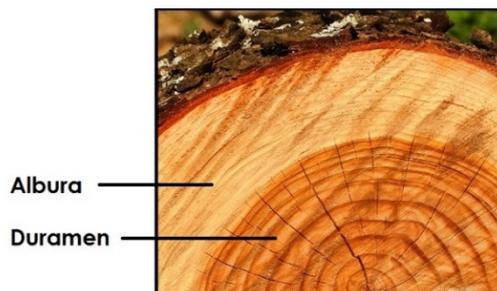


Figura 2.5. Albura y duramen correspondiente a una sección de pino resinoso

Anillos de crecimiento

Los anillos de crecimiento anuales, como puede apreciarse en el esquema de la Figura 2.4, están formados por una capa de madera temprana y otra tardía. La primera cuenta con paredes delgadas y cavidades grandes, mientras que la segunda presenta células de cavidades pequeñas con paredes gruesas, lo cual le confiere una mayor densidad. La capa tardía suele aparecer en franjas de espesor prácticamente constante por lo que la variación del espesor del anillo está originada por la variación del espesor de la capa temprana. El contraste entre ambas maderas, a su vez, es bien definido gracias a la coloración más oscura que adquiere la capa tardía, tal como puede observarse en la Figura 2.6. La forma que toman los anillos de crecimiento depende del plano de corte observado, en un corte transversal aparecen en forma de círculos concéntricos cuyo origen es la médula (Figura 2.6), en el radial como líneas paralelas según la dirección longitudinal de la pieza y en el tangencial en forma de V invertida (Álvarez Lazo *et al.* 2011; Hoffmeyer 1995; Walker 2007).



Figura 2.6. Anillos de crecimiento en una sección de madera de pino resinoso

Médula

La médula se ubica en la zona concéntrica de los anillos de crecimiento discurriendo por el eje del árbol, es de pequeña dimensión y su sección transversal puede tomar forma circular, poligonal o estrellada. La misma está constituida por células de parénquima representando una zona débil y fácilmente degradable (Chan Martín *et al.* 2002). En la Figura 2.7 se presenta la fotografía de una pieza aserrada de pino resinoso donde puede apreciarse claramente la presencia de médula, tanto en la cabeza como en la cara lateral.



Figura 2.7. Médula en una pieza aserrada de pino resinoso

Radios leñosos

Los radios leñosos son células en disposición radial, perpendiculares al eje del árbol, que contribuyen a ligar las fibras longitudinales y comunicar los diferentes años calendario del sistema axial. Éstos tienen importancia en las propiedades de la madera ya que son responsables, en parte, de las propiedades de contracción de este material y, como representan una discontinuidad del tejido axial, su presencia también afecta a la resistencia, disminuyendo la resistencia a la rajadura pero aumentando la concerniente a la compresión radial (Argüelles Á. y Arriaga M. 2000).

Madera de reacción

La madera de reacción es aquella que se forma como reacción del árbol ante aquellos esfuerzos que se presentan cuando el mismo crece inclinado, por ejemplo, debido a la acción de tensiones mecánicas por la pendiente del terreno o a un viento predominante. En las coníferas este desarrollo se produce bajo la acción de una fuerza de compresión y por ello recibe el nombre de madera de compresión. Como puede apreciarse en la Figura 2.8, este tipo de madera se forma en el lado que tiende a hacerse cóncavo, parte inferior del tronco

y de las ramas. Al suponer un crecimiento excéntrico del árbol, la madera de reacción se produce en aquella zona en que los anillos de crecimiento son más anchos. En las coníferas la misma se caracteriza por presentar un color más oscuro con ausencia de brillo y características mecánicas inferiores a la madera normal, además de problemas de hinchazón y merma longitudinal más acusados de lo habitual (Chan Martín *et al.* 2002).

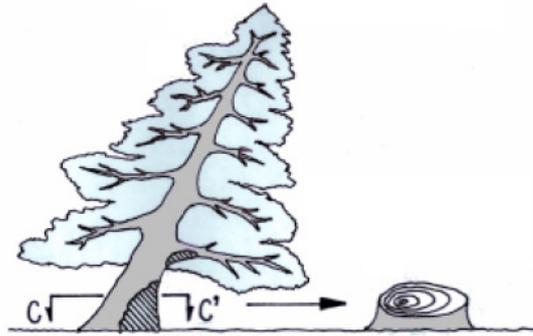


Figura 2.8. Madera de reacción en coníferas (Adaptada de Chan Martín *et al.* 2002)

Madera juvenil

La madera juvenil representa las células del xilema formadas por un cambium inmaduro durante los primeros años de vida del árbol, que para las coníferas se produce hasta los 5 y 20 años dependiendo de la especie. Es una madera que presenta elementos longitudinales más cortos y paredes más delgadas, lo que le confiere un aspecto más ligero, con mayor desviación de la fibra e hinchazón y merma en la dirección longitudinal que la madera normal. Consecuentemente las propiedades de la madera juvenil difieren de la del resto del árbol presentando una mayor variabilidad junto a cualidades mecánicas inferiores respecto a la madera madura (Argüelles Á. y Arriaga M. 2000).

2.2. Madera como material estructural

La madera es un material renovable de origen biológico, lo que le confiere su carácter altamente complejo y heterogéneo. La misma al ser relativamente liviana puede ser transportada sin grandes esfuerzos y, a su vez, trabajada con facilidad. La madera se contrae y dilata poco con los cambios de temperatura, absorbe choques y vibraciones mejor que otros materiales y, desde el punto de vista mecánico, se comporta de manera extremadamente eficiente exhibiendo una rigidez y resistencia muy elevadas en relación a

su peso, respondiendo ante influencias externas -en condiciones normales- de una manera muy flexible. Asimismo, las estructuras construidas con madera pueden desmontarse fácilmente, recuperándose el material original casi en su totalidad (Guindos 2011; Tinto 1997).

Las particularidades antes mencionadas hacen que este material de construcción se distinga de los más utilizados por la ingeniería moderna, resultando primordial el conocimiento de sus propiedades, entre las que prevalecen aquellas físicas y mecánicas requeridas para un apropiado abordaje de los cálculos estructurales. Principalmente la variabilidad propia de la madera es la que justifica que aún hoy en día desde la comunidad científica se orienten grandes esfuerzos para profundizar en aspectos básicos como ser la predicción de resistencia, con la finalidad de que estos conocimientos permitan importantes avances en la optimización de las soluciones estructurales. A continuación se presentan las particularidades anatómicas de la madera aserrada y sus propiedades físico-mecánicas vinculadas al uso estructural.

2.2.1. Particularidades de la estructura interna de la madera aserrada

Las anomalías que se analizan a continuación, desde el punto de vista fisiológico, no responden al concepto de defecto, dado que son particularidades de la estructura de la madera como consecuencia de la arquitectura del árbol. El concepto defecto fue introducido debido a los problemas que desde el punto de vista del usuario de la madera llevan consigo estas particularidades, alguna de las cuales, como los nudos, son muy importantes hasta el punto de ser el elemento restrictivo más utilizado para la clasificación de la madera según calidades (Vignote P. y Martínez R. 2006).

Los defectos de la madera en rollo ocasionan una merma de rendimientos en el proceso de obtención de la madera aserrada -como es el caso de la curvatura y conicidad- o bien una transmisión de esas anomalías a un porcentaje más o menos variable de las piezas obtenidas en dicho proceso de transformación. Por ello se puede decir que los defectos provienen tanto de las condiciones de crecimiento del árbol como del proceso de producción de la madera aserrada, siendo de importancia para el uso estructural de la madera aquellos que influyen sobre sus propiedades de resistencia y rigidez, los cuales son descriptos a continuación.

Nudos

Las ramas parten del cuerpo principal del árbol y aumentan su diámetro en la medida que los sucesivos anillos de crecimiento engrosan su parte exterior, formando un cono que se desarrolla junto con el tronco. Un nudo aparece cuando el corte de la pieza extraída involucra a dicho cono. Por lo tanto, a los nudos se los define como el área de tejido leñoso resultante del rastro dejado por el desarrollo de una rama, y sus características organolépticas y propiedades difieren de las de la madera circundante (Hoffmeyer 1995). En una pieza de madera aserrada se pueden diferenciar distintos tipos de nudos, ya sea según el estado en que se encuentren (sano, muerto o hueco), la forma (redondo, ovalado o alargado) y la disposición (individual, en racimo, agrupados).

Respecto a los nudos clasificados según su estado, en la Figura 2.9 se puede observar un ejemplo de cada uno de los que integran dicho grupo. Un nudo sano, vivo o fijo es la porción de la rama interconectada con el resto de la madera que no se soltará o aflojará durante los procesos de secado y uso, tampoco muestra indicios de descomposición ya que este tipo de nudo se forma cuando las ramas están vivas y son envueltas por el material del tronco, por ello sus tejidos son continuos con los del xilema del fuste principal. Un nudo muerto o flojo se forma cuando una rama muere y queda un muñón que acaba rodeado por los tejidos del tronco, por lo que en este caso no existe continuidad entre los tejidos del nudo y los del tronco. Un nudo hueco o ciego es la cavidad que deja un nudo muerto que se desprende del leño circundante (Chan Martín *et al.* 2002; Moglia *et al.* 2005).



Figura 2.9. Nudo sano, muerto y hueco (izq. a der.)

Con relación a la forma del nudo, ésta varía según la orientación del plano de corte respecto a la rama. Cuando el corte es perpendicular a ésta, el nudo aparece redondo; si el corte es oblicuo, el nudo aparece ovalado; y si es paralelo al eje, resultan formas alargadas tipo espiga (Forest Products Laboratory 1999). En la Figura 2.10 se ilustran las diversas formas en que los nudos pueden aparecer sobre las superficies aserradas.



Figura 2.10. Nudo redondo, ovalado y alargado (izq. a der.)

De acuerdo al tercer grupo -según la disposición- es necesario destacar que en la madera aserrada de coníferas en general se encuentran espacios sin nudos seguidos luego de grupos de los mismos, tal como puede apreciarse en la fotografía expuesta en la Figura 2.11. Esto se debe a que tales árboles cuentan con un tronco dominante del cual se desarrollan ramas a una misma altura, las cuales al momento del aserrado se traducen en nudos dispuestos en agrupamientos.



Figura 2.11. Disposición de nudos a intervalos en una pieza aserrada de pino resinoso

Los agrupamientos se pueden diferenciar entre nudos en racimo y nudos agrupados. Los primeros consisten en un conjunto de nudos que representan una unidad que queda totalmente rodeada por las fibras del leño que la circunda. Los agrupados, por su parte, se componen de dos o más nudos individuales que se encuentran agrupados en una determinada superficie de la pieza, siendo cada uno de ellos una unidad separada y totalmente rodeada por las fibras de la madera (Vignote P. y Martínez R. 2006). En la Figura 2.12 se puede observar un ejemplo de ambos tipos de agrupamientos, los cuales se corresponden a una pieza aserrada de pino resinoso.



Figura 2.12. Nudos en racimo y agrupados (izq. a der.)

Los nudos constituyen un defecto al que se le atribuye una gran importancia en el uso estructural de la madera debido a la reducción que producen en las propiedades mecánicas, resultando beneficiosa la aplicación de una adecuada técnica de poda. Ésta consiste en eliminar las ramas de forma temprana para que, al aserrar el tronco, los nudos queden solamente en la zona interior cercana a la médula, generándose así un volumen de madera externa libre de nudos. A través de este procedimiento, a partir del año de cicatrización de las heridas se consigue eliminar los nudos en toda la longitud del fuste sobre el que se realizó la poda (Hoffmeyer 1995; Winck *et al.* 2015).

Médula

La médula del árbol es un elemento anatómico característico (ver Apartado 2.1.3), pero se la considera como defecto debido a su constitución, ya que presenta características de escasa resistencia y dureza. Además, alrededor de la médula se forma la madera juvenil, la cual es mucho más blanda, menos densa y de anillos más anchos que la del resto del tronco, por lo que su presencia genera un efecto negativo al alterar sensiblemente la función estructural de una pieza. A la vez, su existencia se traduce en importantes deformaciones de la madera aserrada que se manifiestan durante la fase del secado. Dado que la presencia de la médula no puede evitarse, no existen medidas silvícolas que puedan reducir el tamaño de esta anomalía, sólo se puede reducir su porcentaje en el total de la madera aumentando el turno de corte del árbol y jugando con diferentes tipos de despieces al momento de aserrar el tronco (Vignote P. y Martínez R. 2006).

Anillos de crecimiento

La tasa de crecimiento del árbol se evalúa en la sección transversal de la pieza midiendo el espesor de los anillos. Como lo ya expuesto en el Apartado 2.1.3, en la mayoría de las especies de coníferas los anillos de crecimiento son claramente visibles debido a la diferencia entre la madera tardía o de verano (oscura, densa) y la temprana o de primavera (clara, ligera). En las coníferas, por lo general, los anillos suelen ser un indicador fuerte de la densidad ya que normalmente anillos más estrechos se corresponden con piezas más pesadas y, a su vez, previsiblemente más resistentes (Hoffmeyer 1995). No obstante, esta afirmación no puede ser generalizada para todas las maderas ya que dicho comportamiento depende de la combinación especie/procedencia (Coronel 1994).

Por otra parte, la presencia de anillos de crecimiento grandes -además de denotar una menor densidad- suele ser un indicador de la presencia de madera juvenil. En consecuencia existe una relación entre el tamaño máximo de anillo y las deformaciones que puede experimentar una pieza durante el secado, por lo que resulta útil la medición de este parámetro cuando se clasifican las piezas en estado verde (Hermoso Prieto 2001).

Dirección de las fibras

La dirección de la fibra -o inclinación del grano- se refiere a la desviación angular que presenta el sistema axial de la misma con respecto al eje longitudinal de la pieza de madera, afectando considerablemente el comportamiento mecánico de ésta debido a su naturaleza anisótropa. Por lo general se distinguen tres formas diferentes de desviación de las fibras (Vignote P. y Martínez R. 2006):

- Fibra ondulada, las fibras siguen una trayectoria sinuosa que puede deberse a cuestiones genéticas o a la presencia de una bifurcación en la zona inmediatamente anterior a ésta.
- Fibra entrelazada, las fibras adquieren una ligera inclinación respecto el eje del árbol que varía además anualmente, al igual que el caso anterior suele ser debido a causas genéticas o provocada por la presencia de alguna herida o la existencia de un cambio acentuado en la dirección de la capa cambial.
- Fibra revirada, la fibra adopta un patrón helicoidal que puede ser diestro o de izquierda, es de fundamento genético aunque factores como el medio puede tener cierta influencia.

A su vez, como puede apreciarse en la Figura 2.13, la desviación puede ser del tipo general o local. La primera se debe a la conicidad del fuste del árbol y la segunda se relaciona con las distorsiones locales, por ejemplo aquellas encontradas alrededor de los nudos.



Figura 2.13. Desviación de la fibra. Izq.: General. Der.: Local

Generalmente la desviación local no es considerada en la evaluación de la calidad de la madera bajo el nombre de esta singularidad, algunas normas lo hacen de forma indirecta incluyendo las fibras más cercanas al nudo como parte de éste al medir su diámetro (Glos 1995b).

Depósitos de Resina

Los depósitos de resina se forman durante el crecimiento de las coníferas como respuesta defensiva ante algún fenómeno traumático (agresión física o herida). Como puede observarse en la Figura 2.14, éstos constituyen cavidades entre los estratos que componen los anillos de crecimiento y suelen tener una forma alargada en la dirección del eje del árbol. Al representar una discontinuidad real de la madera, sus efectos sobre la resistencia dependen de su abundancia, tamaño y localización en la pieza, pero en general su repercusión sobre la capacidad resistente es pequeña. La resina, especialmente en la madera de pinos, en ocasiones impregna fuertemente ciertas áreas lo que dificulta el barnizado o pintado de las superficies. Por otra parte, ésta tiende a fluir con el calor, situación que se evita al cristalizarla a través del secado de la madera en estufa (Chan Martín *et al.* 2002).



Figura 2.14. Depósito de resina presente en una pieza de *Pinus elliottii*

Fisuras

Las fisuras involucran a grietas y rajaduras. Las primeras consisten en la separación de los elementos constitutivos de la madera y se manifiestan superficialmente, es decir, su profundidad no atraviesa la pieza aserrada. Las rajaduras, como puede apreciarse en la Figura 2.15, también consisten en la separación entre las fibras de la madera pero afectan totalmente el espesor de la pieza (Chan Martín *et al.* 2002). Ambos tipos de fisuras suelen originarse sobre la madera aserrada como resultado de la acción de agentes atmosféricos o por las tensiones producidas durante el crecimiento del árbol. También pueden generarse como consecuencia de la diferencia entre la contracción radial y la tangencial que tiene lugar durante el secado de la pieza, puesto que si el proceso es demasiado rápido, las fisuras

tienden a acentuarse debido a que el interior de la madera pierde humedad más lentamente que la superficie (Coronel 1996).



Figura 2.15. Rajadura en una pieza aserrada de pino resinoso

Arista faltante

La arista faltante, también conocida como gema, consiste en la presencia de una arista redondeada que se produce por mal corte de la pieza en el aserradero, la misma puede o no incluir corteza. En la mayoría de los casos no afecta a las cualidades resistentes de la madera, es decir, el efecto de las gemas sobre la capacidad portante de la pieza suele ser pequeño y tan sólo puede ocasionar dificultades a nivel constructivo cuando se produce una pérdida de material y una modificación de la geometría de la sección. Lo antedicho podría explicarse por el hecho de que esta anomalía no supone una rotura en la continuidad de la fibra (Arriaga Martitegui *et al.* 2007). En la Figura 2.16 se presenta una tabla aserrada de *Pinus taeda* donde pueden apreciarse claramente las aristas faltantes.



Figura 2.16. Arista faltante en una pieza aserrada de *Pinus taeda*

Deformaciones

Las deformaciones que experimenta una pieza de madera hacen referencia al alabeo que genera una desviación espacial de la misma respecto a sus dimensiones originales. Éste se manifiesta por la curvatura de su plano longitudinal, transversal o de ambos, dando origen al: i) combado o alabeo de la cara en la dirección longitudinal, ii) encorvado o alabeo

de los cantos en sentido longitudinal, iii) revirado o alabeo simultáneo en las direcciones longitudinal y transversal, y iv) abarquillado o alabeo en la dirección transversal.

Los motivos que provocan la aparición de estos defectos son varios, entre ellos se puede destacar el rápido e intenso secado de las piezas aserradas, el apilado deficiente en el secado, la existencia de tensiones internas sobre la madera en rollo, el comportamiento diferencial de este material en la contracción e hinchamiento en sentido radial y tangencial, la presencia de una excesiva desviación de la fibra, así como de altos porcentajes de madera de compresión.

Aunque las desviaciones de la geometría prevista no afectan generalmente las propiedades mecánicas, éstas son limitadas por razones de índole constructiva (Hoffmeyer 1995). Estudios llevados a cabo (Peña-Hernández *et al.* 2011) destacan que las torceduras por alabeo en las piezas aserradas tienden a decrecer con la distancia a la médula, con la disminución del ancho de los anillos de crecimiento y con la declinación del ángulo de inclinación de la fibra.

Alteraciones biológicas

Bajo este concepto se recogen todos aquellos términos que son provocados por la acción de agentes bióticos y que tienen como consecuencia una progresiva disminución de la resistencia de la madera. Estas alteraciones pueden deberse al ataque producido por hongos, insectos, plantas epifitas u otros organismos. Comúnmente son los hongos xilófagos y algunos insectos los que pueden ocasionar los mayores daños con una repercusión estructural importante (Sagot 1995).

Otros

Existen otros defectos de menor importancia por ser menos frecuentes o por no afectar demasiado a las propiedades mecánicas. Entre ellos se pueden nombrar las fendas de acebolladura y la corteza incluida. El primero se produce por una separación de la madera en capas concéntricas que tiene lugar entre los anillos de crecimiento, a pesar de ser variadas las causas que la pueden generar, las más frecuentes son las heladas que han producido daños durante el crecimiento del árbol. La segunda anomalía consiste en la madera de corteza externa o interna localizada en una o varias partes de la pieza. Ésta suele producirse cuando el tronco sufre algún daño que deja al descubierto el cambium, dando

lugar a una formación de corteza que poco a poco va siendo embebida por el crecimiento en diámetro.

2.2.2. Propiedades físicas de la madera

Las propiedades físicas son aquellas que determinan el comportamiento del material ante los factores que intervienen en el medio ambiente natural, sin que éste actúe química ni mecánicamente en su estructura interna. Estas propiedades, al ser la madera un producto de naturaleza orgánica, están relacionadas principalmente con la conformación y tamaño de los elementos que constituyen el leño dependiendo fundamentalmente de: i) la disposición y orientación de los materiales que forman las paredes celulares, ii) la cantidad relativa de los componentes mayoritarios que constituyen la pared celular, iii) el porcentaje de material celulósico estructural que contiene el leño y iv) el contenido de agua que se encuentra presente (Coronel 1994).

Las propiedades más destacadas para el uso estructural de este material son el contenido de humedad y la densidad aparente. Si bien desde el punto de vista de la utilización en construcciones existen otras propiedades físicas de consideración -como las térmicas, eléctricas, acústicas y de rozamiento- no son desarrolladas en el presente trabajo porque escapan del objetivo que persigue esta investigación.

Contenido de humedad

La madera de un árbol recién cortado contiene una importante cantidad de agua (50% al 110%) que varía según la época del año, la región de procedencia y la especie forestal de que se trate. Dicha proporción se reduce a valores inferiores al 20% por secado natural y, en contraste, puede alcanzar valores del 100% al 200% al estar sumergida (Argüelles Á. y Arriaga M. 2000).

El agua contenida en la madera puede presentarse bajo tres formas diferentes (Álvarez Lazo *et al.* 2011):

- Agua de constitución: forma parte de los compuestos químicos que constituyen sus moléculas y para eliminarla es necesario destruir el material, es decir, su variación constituye un cambio de la naturaleza química de la madera.

- Agua de impregnación: es el agua retenida por la pared celular, responsable de los fenómenos de hinchazón y contracción de la madera, alcanzándose el punto de saturación de las fibras cuando la saturación de la pared es completa, lo que es equivalente a un 28-30% de humedad para las coníferas.
- Agua libre: es la existente dentro del lumen de las células cuando se supera el punto de saturación de las fibras. Una vez perdida no puede ser tomada a partir de la humedad atmosférica por lo que ésta no influye en la hinchazón o contracción de la madera ni en las propiedades mecánicas.

El contenido de humedad se define como el porcentaje de peso del agua retenida en la madera respecto al de la madera anhidra o seca. Como ésta es un material higroscópico, tiende a perder o absorber agua en función de la humedad relativa y de la temperatura del ambiente en que se encuentre sometido hasta corresponder a un estado de equilibrio con el aire, estableciéndose así un estado de equilibrio higroscópico. El contenido de humedad correspondiente con ese punto se denomina humedad de equilibrio de la madera y varía de acuerdo al clima y la especie. Como la influencia de esta última variable es prácticamente insignificante, conociendo previamente los datos de la temperatura y de la humedad relativa del ambiente, la humedad de equilibrio puede ser obtenida para cualquier madera a través del ábaco de Kollmann. El mismo fue determinado originariamente para la especie *Picea sitchensis* en el año 1931 (Coronel 1994) y es expuesto en la Figura 2.17.

Desde el punto de vista de la construcción, el conocimiento del punto de equilibrio higroscópico es importante para evitar la sorción o desorción de humedad de la madera puesta en obra, resultando de suma importancia que la misma disponga de una humedad similar a la del equilibrio higroscópico correspondiente a las condiciones del medio ambiente en que ha de ser utilizada. Siempre que la madera se halle con un porcentaje de agua inferior al punto de saturación de las fibras, los aumentos en el contenido de humedad conllevan incrementos de volumen (hinchazón) así como las disminuciones provocan contracciones (merma). La anisotropía de este material provoca que esas variaciones volumétricas sean distintas de acuerdo a las direcciones principales, siendo la diferencia registrada entre la contracción radial y la tangencial la razón por la que las maderas se deforman durante el proceso de secado. En la mayoría de las coníferas se toma como coeficiente medio de contracción unitaria longitudinal y transversal los valores de 0,01% y 0,20% respectivamente (Álvarez Lazo *et al.* 2011, Argüelles Á. y Arriaga M. 2000).

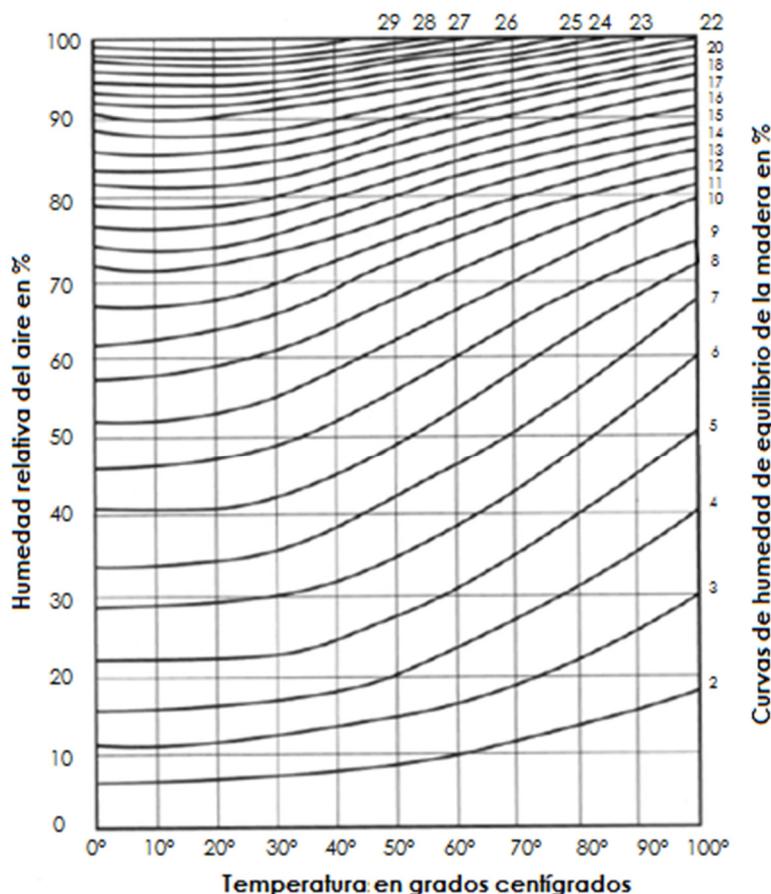


Figura 2.17. Ábaco de humedad de Kollman (Adaptado de Guindos 2011)

Densidad

La densidad se define como el cociente entre la masa y el volumen correspondiente y, como en todo cuerpo poroso, en la madera es importante distinguir entre la densidad real y la aparente. En la primera solo se considera como volumen el ocupado por las paredes de las células, es decir, representa la densidad de la pared celular y su valor es del orden de 1500 kg/m^3 , resultando prácticamente el mismo para todas las especies. Por su parte, la densidad aparente considera como volumen el aparentemente ocupado por la pared celular y los espacios interiores a las células, es decir, la misma varía según la mayor o menor proporción de poros existentes, por lo que resulta un parámetro de marcada utilidad práctica (Álvarez Lazo *et al.* 2011). A partir de ahora, y a lo largo del desarrollo de este trabajo, cuando se mencione la densidad se hará referencia únicamente a la aparente.

Considerando que tanto el peso como el volumen de la madera están afectados por el porcentaje de humedad, al hablar de densidad siempre se debe definir el contenido de humedad para el cual se calcula la densidad. En tecnología de maderas existen dos

porcentajes de humedad que son los más frecuentemente empleados: 0% correspondiente a la madera secada al horno -sin contenido de humedad excepto la de constitución- y utilizado para calcular la densidad anhidra, y 12% propio de la madera acondicionada -bajo clima normalizado- y empleado para el cálculo de la densidad normal (Vignote P. y Martínez R. 2006).

La densidad también depende de la especie, alcanzando valores comprendidos entre los 400 kg/m³ y los 550 kg/m³ para los pinos más utilizados en la construcción. Estas cifras resultan relativamente bajas al ser comparada con sus correspondientes valores de resistencia y rigidez, situación que convierte a la madera en un material especialmente adecuado para aplicaciones estructurales. Sin embargo, una baja densidad también puede constituir una desventaja, por ejemplo en uniones. A su vez, como esta propiedad física tiene una correlación positiva con la mayoría de las propiedades mecánicas, es usualmente empleada como un parámetro indicativo de las mismas (Argüelles Á. y Arriaga M. 2000).

2.2.3. Propiedades mecánicas de la madera

Las propiedades mecánicas son aquellas que indican el comportamiento de la madera bajo la acción de cargas o sollicitaciones exteriores. Si éstas toman valores inferiores al límite elástico, la pieza se deforma recuperando su estado original en el momento que cesa dicha aplicación. En compresión, cuando se aplican cargas superan al límite elástico, la madera también se comporta como un material plástico ya que al retirar la fuerza el material continúa deformado. A su vez, si las cargas sometidas a la madera se mantienen en el tiempo se produce la fluencia del material, es decir, la deformación inicial se ve incrementada por acción del tiempo de aplicación (Vignote P. y Martínez R. 2006).

Estas propiedades pueden ser clasificadas en resistentes (estáticas y dinámicas), elásticas y de dureza, presentando variantes dentro de cada categoría en función de la dirección del esfuerzo respecto del cual se las analiza como consecuencia de la anisotropía de la madera, particularidad ya descrita en el Apartado 2.1. No obstante, este material puede ser considerado como ortótropo si las propiedades de la pieza en estudio son determinadas respecto de tres direcciones principales: axial (paralela al eje de crecimiento del árbol), radial (perpendicular a la primera y cortando el eje del árbol) y tangencial (normal a las anteriores). Además, gracias a la orientación de las fibras la madera puede ser contemplada como un material formado por un haz de tubos huecos y, como su estructura

está específicamente diseñada para resistir tensiones paralelas a las mismas, a los fines prácticos la mayoría de los valores mecánicos se expresan solamente en dos direcciones: longitudinal en sentido paralelo a las fibras y transversal en sentido perpendicular a las fibras. Esta última resume tanto la dirección radial como la tangencial (Álvarez Lazo *et al.* 2011, Argüelles Á. y Arriaga M. 2000).

Resistencia y rigidez asociadas a cada tipo de esfuerzo mecánico

Teniendo en cuenta los objetivos de la presente investigación, a continuación se describen aquellas propiedades mecánicas vinculadas al diseño estructural asociadas a cada tipo de sollicitación –las que son expuestas en la Figura 2.18- considerando en cada caso las direcciones principales de análisis.

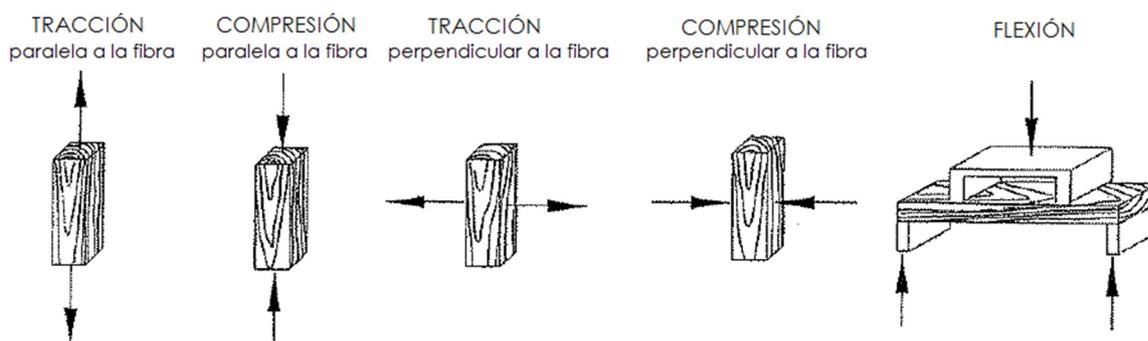


Figura 2.18. Esfuerzos mecánicos en la madera (Adaptado de Vignote P. y Martínez R. 2006)

Una pieza libre de defectos sometida a tracción paralela a la fibra presenta una relación entre tensión y deformación prácticamente lineal hasta la rotura, alcanzando una resistencia elevada. Una situación similar se da para la resistencia a compresión paralela a la fibra, que suele tomar valores característicos aún mayores. No obstante, ésta se ve disminuida ante elementos esbeltos, debiendo incluirse en tales situaciones la comprobación de inestabilidad de la pieza (pandeo), donde influye decisivamente el módulo de elasticidad. En la Figura 2.19 se presenta para una pieza de madera libre de defectos la relación existente entre tensión y deformación en compresión y tracción paralelas a la fibra. Como puede observarse en dicho gráfico, la curva tensión-deformación del ensayo a compresión presenta un comportamiento lineal en la primera fase y no lineal en la segunda. Del mismo también se puede deducir que para la madera libre de defectos tanto el módulo de elasticidad como la resistencia son menores en compresión que en tracción, lo que está en línea con lo reportado por Baño *et al.* (2012). En contraposición, para

la madera en tamaño estructural de coníferas (madera con defectos) la relación tensión-deformación no resulta tan lineal y se invierte, es decir, en este caso la resistencia a compresión paralela a la fibra supera a la resistencia a tracción paralela a la fibra como resultado de la influencia negativa que ejercen los defectos, en especial los nudos, sobre las propiedades mecánicas.

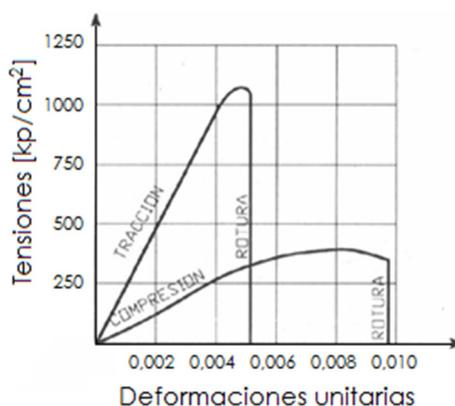


Figura 2.19. Relación entre tensión y deformación en compresión y tracción paralelas a la fibra (Adaptado de Argüelles Á. y Arriaga M. 2000)

Como el comportamiento mecánico a tracción y a compresión es diferente en la madera, resulta importante referirse a la capacidad en flexión pues engloba estos dos conceptos en uno solo. Dicho esfuerzo se origina por un momento flector que produce tensiones de compresión y de tracción paralelas a la fibra en la sección de la pieza, alcanzando valores máximos en los extremos y nulos en la fibra neutra. La resistencia a flexión asociada a las coníferas acusa valores característicos entre 14 y 50 N/mm² (EN 338 2016), los cuales resultan elevados al relacionarlos con el peso de este material.

Cuando se analizan los esfuerzos aplicados en sentido perpendicular a la fibra de la madera, los valores resistentes resultan inferiores que los alcanzados en la dirección paralela. Particularmente la resistencia a tracción perpendicular a la fibra es muy baja, del orden de 18 a 84 veces menor que en la otra dirección de análisis (EN 338 2016), lo cual se justifica por las escasas fibras que dispone la madera en la dirección perpendicular al eje del árbol y la consiguiente falta de arriostamiento transversal de las fibras longitudinales. Este tipo de esfuerzo suele aparecer en piezas de directriz curva e indefectiblemente debe tenerse en cuenta en el diseño estructural. La resistencia a compresión perpendicular a la fibra en las coníferas, por su parte, representa hasta una décima parte de la resistencia en el otro sentido (EN 338 2016). En este caso la relación tensión-deformación de ensayo es lineal

en el primer tramo, produciéndose el fallo por aplastamiento sin llegar a la rotura clara. Este tipo de esfuerzo aparece en las zonas de apoyo de las vigas, es decir, en aquellas pequeñas superficies donde se concentra toda la carga que debe ser transmitida, las cuales no deben sufrir deformaciones importantes.

Respecto al esfuerzo cortante, las tensiones tangenciales originadas en la madera se clasifican en i) Tensiones tangenciales de cortadura: las fibras son cortadas transversalmente por el esfuerzo produciéndose el fallo por aplastamiento; ii) Tensiones tangenciales de deslizamiento: el fallo se produce por el deslizamiento de unas fibras con respecto a otras en la dirección longitudinal; y iii) Tensiones tangenciales de rodadura: el fallo se produce por rodadura de unas fibras sobre otras. En aquellas piezas sometidas tanto a solicitaciones de flexión como de corte intervienen tensiones de cortadura y de deslizamiento, produciéndose la rotura a través del plano más débil. En el caso específico de las vigas de madera, las fallas por corte se deben al esfuerzo horizontal (tensiones rasantes) como consecuencia de la menor resistencia de este material en el sentido paralelo a la fibra (Parker y Ambrose 2000).

En lo que al módulo de elasticidad se refiere, el conocimiento del mismo resulta de gran importancia para el diseño de estructuras de madera ya que es un dato esencial tanto para la estimación de las deformaciones (Thelandersson 1995b) como para el cálculo de barras comprimidas (Blaß 1995). Esta propiedad adquiere valores diferentes según se trate de solicitaciones de compresión o de tracción, existiendo una diversidad de estudios sobre el tema. Baño *et al.* (2012) indican que en madera libre de defectos el módulo de elasticidad es superior en tracción que en compresión. En contraposición, Gehri (1997) publica resultados que afirman que el valor de dicha propiedad es independiente del tipo de esfuerzo que solicita a la pieza. Sumado a esto, una serie de autores (Burger y Glos 1995a, 1997; Steiger *et al.* 2006, 2010; Steiger y Arnold 2009) sostienen que en madera estructural lo que realmente afecta a la relación entre módulos de elasticidad es la presencia de defectos. No obstante, en la práctica suele ser utilizado un único valor de rigidez, es así que en la dirección paralela a la fibra generalmente se adopta el valor aparente del módulo de elasticidad obtenido en flexión (valor intermedio entre el de tracción y el de compresión) mientras que en la dirección perpendicular a la fibra se suele tomar un valor aproximadamente 30 veces inferior al anterior. Cabe destacar que el módulo de elasticidad asociado a las vigas de madera acusa un valor aproximadamente 5% menor respecto al de

las piezas sometidas a flexión pura, lo cual se debe a la importancia que adquiere en este material el efecto de la fuerza cortante que actúa en dirección perpendicular a la fibra (Parker y Ambrose 2000).

Ensayos para la determinación de las propiedades mecánicas

Para un gran número de especies, durante años han sido estudiadas sus propiedades mediante la realización de ensayos sobre muestras de madera libre de defectos, por lo que existen una gran variedad de fichas técnicas que recogen tal información. Como es lógico, para disponer de “madera pura” se recurre a probetas de pequeño tamaño que sólo alcanzan algunos centímetros de longitud, las cuales no sirven para construir estructuras. La utilizada para fines estructurales es en esencia la misma, pero al requerirse piezas de mayores dimensiones es necesario tener en cuenta la influencia de algunas particularidades, como ser la presencia de nudos, la desviación de la fibra, las gemas, etc. (Herrero 2003).

Estudios comparativos demuestran que no se puede esperar una predicción correcta del comportamiento mecánico de la madera estructural a partir de un material tan diferente como es la madera libre de defectos. A modo de ejemplo se puede citar que una viga de pino silvestre con algunos nudos puede presentar una resistencia a flexión diez veces menor que la que se obtendría con una probeta libre de defectos. En consecuencia, para el cálculo de una estructura no pueden ser utilizadas las propiedades conocidas para probetas libres de defectos, siendo necesaria la realización de ensayos que involucren piezas de tamaño estructural y con la calidad comercial correspondiente a la existente en el mercado (Hanhijärvi y Ranta-Maunus 2008; Hermoso Pietro 2001; Íñiguez González 2007).

Como el presente trabajo de investigación se focaliza en la caracterización del pino resinoso del nordeste argentino para uso estructural, únicamente se hará referencia a la determinación de las propiedades mecánicas a través de ensayos estáticos que emplean probetas de madera en tamaño comercial. Estos se efectúan bajo condiciones normalizadas y pueden o no requerir de la destrucción total de la pieza. Es así que la obtención del módulo de elasticidad se realiza a través de pruebas de carga evaluando las deformaciones, mientras que para conocer la resistencia del material es fundamental la rotura del cuerpo de prueba, por lo que en este caso se recurre a técnicas mecánicas del tipo destructivas (Argüelles Á. y Arriaga M. 2000).

La determinación de las propiedades físicas y mecánicas debe ser llevada a cabo a través de un método normalizado para que los códigos estructurales sean operativos. En Argentina la norma IRAM 9663 (2013), basada en la norma europea EN 408 (2012), es la que especifica los métodos para la determinación en laboratorio de las propiedades físicas y mecánicas más importantes de la madera aserrada y laminada encolada en sus dimensiones reales de empleo. Básicamente ésta contiene métodos de ensayo para determinar el módulo de elasticidad local y global en flexión, la resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad y la resistencia tanto a tracción como a compresión en sentido paralelo a la fibra. Además, la misma define la determinación de las dimensiones, del contenido de humedad y la densidad de las probetas.

En la caracterización completa de una población de madera, orientada al diseño y cálculo de estructuras, se requiere del conocimiento de los valores característicos de resistencia, rigidez y densidad. Por lo tanto, los resultados obtenidos a través de las pruebas de laboratorio (EN 408 2012; IRAM 9663 2013) deben ser procesados para la obtención de los parámetros requeridos. Persiguiendo tal fin, en Argentina se recurre al empleo de la norma IRAM 9664 (2013), basada en la versión del año 2010 de la norma europea EN 384, que trata específicamente de las etapas a seguir para la definición de la población, muestreo, ensayos y análisis de resultados para la determinación de los valores característicos a partir de las magnitudes obtenidas experimentalmente. Además, en caso de no disponer de resultados de ensayo, ésta brinda relaciones que permiten deducir los valores característicos de algunas propiedades mecánicas a partir de los valores característicos de resistencia a flexión, módulo de elasticidad y densidad.

Por otra parte, existe otro tipo de pruebas orientadas fundamentalmente a la determinación de las propiedades elásticas sin deformar mecánicamente la pieza. En general éstas consisten en un ensayo no destructivo a partir del cual se calcula el módulo de elasticidad, y de éste se estiman los restantes parámetros de resistencia mediante el uso de relaciones conocidas entre ambas variables. Dentro de esta categoría se pueden citar los métodos acústicos que se basan en la determinación de la velocidad de transmisión del sonido a través del material, siendo las técnicas de ultrasonidos y el análisis de vibraciones flexionales o longitudinales las más empleadas en madera aserrada (Coronel 1996; Herrero 2003; Ilic 2001; Íñiguez González 2007; Quil Villa 2009). No obstante, cabe destacar que debido a la heterogeneidad que caracteriza a este material -el cual procede de una amplia

variedad de especies asociadas a diversas zonas de cultivo-, para la correcta aplicación de los métodos no destructivos se requiere de una calibración previa de los equipos considerando como parámetros de comparación aquellos determinados a través de los respectivos ensayos destructivos.

Influencia del esfuerzo de corte en la rigidez

En las piezas de madera sometidas a esfuerzos de flexión, como lo ya mencionado en el presente Apartado, el efecto de la fuerza cortante sobre el módulo de elasticidad resulta relevante gracias a la particular configuración de este material. Por ende, las normas (EN 408 2012; IRAM 9663 2013) proveen un método para determinar el módulo de elasticidad a flexión pura (módulo de elasticidad local) y otro para aquel donde también interviene el corte (módulo de elasticidad global). Ambos procedimientos presentan ciertas ventajas y desventajas (Bogensperger *et al.* 2006, Boström *et al.* 1996), pudiéndose señalar que la medición del módulo de elasticidad local ($E_{m,l}$) está sujeta a mayores riesgos debido a la necesidad de una mayor precisión en la determinación de las deformaciones, considerando que este ensayo involucra solo una pequeña proporción del cuerpo de prueba y, en consecuencia, las mismas están asociadas a una menor longitud. En contraste, el módulo de elasticidad global ($E_{m,g}$) es representativo de toda la pieza sometida a ensayo por lo que está sujeto a menores errores en la medición, presentando como gran ventaja respecto al anterior, la facilidad para llevar a cabo la medición de las deformaciones durante el ensayo, particularmente en el caso de vigas de baja altura y de tablas ensayadas de plano.

Actualmente existen distintos criterios en cuanto a la consideración de la influencia del esfuerzo de corte en el cálculo de las deformaciones de elementos de madera sometidos a flexión. El Reglamento Argentino de Estructuras de Madera (INTI CIRSOC 601 2016), en línea con el criterio del National Design Specification de EEUU (NDS 2012), provee un valor del módulo de elasticidad que incluye la influencia del esfuerzo de corte, la que es asumida como un 5% de la correspondiente a la flexión. Por su parte, conforme al criterio europeo expresado en las reglas adoptadas por el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2006), las deformaciones se calculan teniendo en cuenta el módulo de elasticidad obtenido en flexión pura. También dicho valor ($E_{m,l}$) se encuentra dentro de aquellos característicos que exige la norma EN 338 (2016) para la inserción de una combinación clase/especie/procedencia en el sistema internacional de clases resistentes.

Con el propósito de disminuir el trabajo experimental y minimizar potenciales errores de medición cuando las deformaciones son muy pequeñas, la norma EN 384 (2016) proporciona una ecuación con la cual calcular el valor del $E_{m,l}$ a partir del valor $E_{m,g}$ obtenido experimentalmente. A su vez, la misma provee una ecuación de la cual es posible deducir $E_{m,l}$ si se conoce el valor del módulo de elasticidad transversal (G). Por otra parte, disponiendo del valor G , también puede ser calculado el valor de $E_{m,g}$ a través del empleo de una expresión propuesta por la norma EN 408 (2012). Sin embargo, la determinación experimental del módulo G presenta mayor complejidad respecto de los dos primeros.

En un estudio llevada a cabo por Denzler *et al.* (2008) se analizó la efectividad de la relación entre $E_{m,l}$ y $E_{m,g}$ -propuesta por la norma EN 384 (2016)- al ser aplicada en madera de abetos, piceas, pinos y alerces cultivados en Alemania, lo cual condujo a la formulación de una nueva expresión para relacionar ambos módulos ($E_{m,l}$, $E_{m,g}$) que se ajusta mejor al comportamiento de dichas coníferas alemanas. Por su parte, también la normativa norteamericana (ASTM D198 2015) propone una fórmula alternativa para corregir la influencia del esfuerzo de corte sobre el valor del módulo de elasticidad, la cual permite derivar el valor de $E_{m,l}$ a partir del valor de $E_{m,g}$.

2.2.4. Factores que afectan a las propiedades de la madera

Debido a su origen biológico, la madera presenta propiedades con notables variaciones. De acuerdo con lo mencionado en el Apartado 2.1, existen diferencias importantes entre los valores obtenidos de las propiedades físico-mecánicas entre árboles de distintas especies y también entre ejemplares de la misma especie. Incluso dentro de un mismo árbol pueden presentarse variaciones considerables debido a que, tanto en altura como en la sección transversal del tronco, el peso específico aparente es variable. Normalmente cuanto más elevado resulta el valor del mismo, tanto mayor es la resistencia de la madera a las acciones mecánicas, lo que se fundamenta en una mayor cantidad de pared celular en un volumen dado (Coronel 1996).

En virtud de lo antedicho, según el modelo propuesto por Burdon *et al.* (2004) para las coníferas, se distinguen dos patrones generales de variación de las propiedades dentro del fuste del árbol: i) variación desde la médula hacia el exterior, es inicialmente rápida desde la médula disminuyendo casi asintóticamente -a un determinado valor final- hacia la corteza, y ii) variación desde el nivel del suelo hacia el ápice del árbol, también ésta es

rápida al inicio y decrece progresivamente alcanzando asintóticamente valores estables. Por lo tanto, para obtener resultados sin riesgos y permitir el cálculo del error de estimación de las medias del muestreo, es conveniente que cada parte utilizable o comercial del tronco tenga igual oportunidad de ser tomada como muestra, es decir, que el muestreo de las piezas de ensayo sea realizado al azar (Coronel 1996). Asimismo existen otros factores que afectan el comportamiento y resistencia de la madera, entre los que se encuentran los relacionados con la naturaleza del material (anomalías o defectos de la madera), los concernientes a las condiciones ambientales (temperatura y contenido de humedad) y aquellos relacionados con los ensayos (tiempo de carga y dimensiones de las probetas), los cuales son analizados seguidamente con mayor detalle.

Calidad de la madera para uso estructural

La presencia de anomalías (ver Apartado 2.2.1) ligadas al crecimiento (nudos, desviación de las fibras, etc.), las originadas en los procesos de secado y producción (fisuras, gemas, etc.) y los ataques biológicos, entre otros, determinan la calidad de la madera para uso estructural. Ésta constituye el factor de mayor relevancia en la resistencia y rigidez porque las diferentes singularidades afectan de forma negativa y con distinto nivel de importancia a las propiedades mecánicas en general (Argüelles Á. y Arriaga M. 2000). Estudios llevados a cabo sobre piezas de tamaño estructural han demostrado que, en comparación con la resistencia a flexión, la resistencia a tracción es afectada en mayor grado por aquellos defectos del material que producen debilitamiento de la sección transversal y la modificación del desarrollo normal de las fibras (Glos 1995b). A su vez, se han publicado resultados que muestran que la relación entre la resistencia a tracción y la obtenida en flexión tiende a aumentar al incrementarse la calidad del material (Burger y Glos 1997; Steiger *et al.* 2006, 2010; Steiger y Arnold 2009).

La nudosidad en general constituye un factor decisivo para la asignación de calidades porque, al tener una relación directa con la variación de la estructura interna de la madera, su influencia sobre las propiedades mecánicas es notable. Particularmente esta singularidad adquiere suma importancia en la madera aserrada de conífera, lo que es respaldado por numerosas investigaciones que reportaron elevados coeficientes de correlación negativos entre nudosidad y resistencia (Cardoso *et al.* 2017; Carreira y Alves Dias 2006; Guindos 2011; Hanhijärvi y Ranta-Maunus 2008; Hermoso Prieto 2001). Independientemente de tratarse de nudos o grupos de nudos, ya sean sanos, podridos o perdidos, es despreciable la

contribución de esa parte de la sección transversal porque los mismos se corresponden con material inserto, generando así una disminución de la cantidad de material resistente (Dávalos-Sotelo y Ordóñez 2011). Dicho efecto es mayor en piezas sometidas a tracción que a compresión, mientras que en flexión depende principalmente de la localización y área que ocupa el nudo en la sección transversal de la pieza, siendo más desfavorables aquellos ubicados en el margen correspondiente al sector donde ocurren las mayores tensiones normales de tracción (Glos 1995b).

Los nudos también están asociados a otros defectos como ser la desviación local de las fibras, ya que éstas son interrumpidas o desviadas dando lugar a la aparición de tensiones tangenciales. Asimismo se los puede relacionar con la pudrición, ya que algunas veces ésta aparece como resultado del ingreso de agentes de descomposición a la zona del nudo luego de desprenderse la rama, sector que a su vez suele llenarse de resinas protectoras (Moglia *et al.* 2005). Por su parte, el efecto de las bolsas de resina sobre la resistencia mecánica depende de su abundancia, tamaño y localización en las piezas, por lo que podría asemejarse al de la nudosidad. Como estos depósitos representan una discontinuidad real de la madera, los que se ubican cerca o en el plano neutro de piezas sujetas a flexión tienden a reducir el área disponible para resistir esfuerzos cortantes horizontales. También existe una disminución del área resistente en aquellos casos donde aparecen esfuerzos de tracción perpendicular a las fibras. Además, como frecuentemente se presenta una desviación local de las fibras en el lado convexo de la bolsa, se ve debilitada la resistencia de la pieza en compresión y tracción paralela a las fibras (Chan Martín *et al.* 2002).

La inclinación general de las fibras afecta a la resistencia a flexión disminuyendo apreciablemente para una inclinación de 1 a 20, sin embargo, sobre la resistencia a compresión incide poco mientras no supere la relación de 1 a 10. El módulo de elasticidad, por su parte, disminuye rápidamente para una inclinación de 1 a 15 (Coronel 1996). Consecuentemente las diferentes normas establecen límites para esta singularidad, por ejemplo la DIN 4074-1 (2012) fija un valor de 1/14 como desviación máxima de las fibras permitida en piezas destinadas a fines estructurales.

La presencia de médula, la madera juvenil y el espesor de los anillos de crecimiento afectan a las propiedades mecánicas y se encuentran estrechamente relacionadas con las deformaciones de las piezas de madera aserrada (Glos 1995b; Hermoso Prieto 2001;

Hoffmeyer 1995). Las distorsiones generalmente surgen durante el proceso de secado del material, decrecen con la distancia a la médula, con la disminución del ancho de los anillos de crecimiento y con la declinación del ángulo de inclinación de la fibra. El efecto de las distorsiones sobre la resistencia no suele ser importante pero si es necesaria su limitación para el uso según el destino, puesto que el alabeo altera la forma de la madera aserrada dificultando así el maquinado y corte a medida. Vinculado al proceso de aserrado también pueden aparecer aristas faltantes o gemas, las cuales consisten en la falta de sección de una determinada parte de la pieza. En este caso la pérdida de resistencia es proporcional a la falta de madera.

Las fisuras que pueden aparecer en la madera aserrada dependen de la especie y del proceso de secado. Éstas se caracterizan por reducir la resistencia al esfuerzo de corte, por lo que su efecto es más notorio en piezas sometidas a flexión donde además de tensiones normales se generan esfuerzos de cizalladura. Cabe señalar que la influencia de las rajaduras en el sentido de las fibras depende del área de la sección transversal que cubren, afectando seriamente la resistencia a tracción perpendicular a las fibras. Particularmente las rajaduras en columnas tienen poco efecto sobre la resistencia, básicamente sus limitaciones son más importantes desde el punto de vista estético y para reducir la posibilidad de penetración de hongos e insectos (Coronel 1996).

En cuanto a las alteraciones biológicas, se pueden señalar el azulado y la pudrición. La primera es una alteración provocada por algunas especies de hongos cromógenos y el único efecto importante que produce en la madera es un cambio de coloración, que al no alterar la pared celular tampoco afecta a su resistencia. En contraste, la pudrición es una alteración provocada por algunas especies de hongos xilófagos (basidiomicetos, ascomicetos, entre otros) que se han especializado en alimentarse de los componentes constitutivos de la pared celular, causando por ello una pérdida de resistencia en función del nivel de ataque (Vignote P. y Martínez R. 2006). Cabe destacar que las causas de las enfermedades biológicas en la madera dependen de la especie, del tipo de hongo y del tiempo e intensidad de la acción micótica.

Como en general resulta difícil eliminar los defectos de la madera, es indispensable limitar la influencia de los mismos sobre la resistencia y rigidez de los elementos estructurales. Esta limitación se materializa separando a las piezas de madera en diversos grados de calidad de acuerdo a ciertos parámetros, siendo la clasificación visual por

resistencia el método más generalizado. En el Apartado 2.3.1 se presenta una descripción detallada de dicho método.

Temperatura

El efecto de la temperatura en la resistencia de la madera es muy reducido. Se ha comprobado que al estar expuesta de forma continua a temperaturas de 37 °C, alcanzando incluso los 50 °C, las propiedades no se ven afectadas. Para cifras inferiores a 0 °C los valores característicos de la resistencia a flexión y compresión son ligeramente mayores que a temperatura normal. No obstante, cuando la madera es sometida a temperaturas muy elevadas puede sufrir una pérdida de resistencia debido a los cambios irreversibles que se producen en sus propiedades, se estima que una destrucción lenta del material comienza aproximadamente a los 110 °C como consecuencia de la dilatación térmica y de los movimientos moleculares (Argüelles Á. y Arriaga M. 2000).

El Reglamento Argentino de Estructuras de Madera (INTI CIRSOC 601 2016) incorpora un factor de ajuste por temperatura (C_t) para los valores de diseño de referencia empleados en el cálculo de miembros estructurales, tanto de madera aserrada como de MLEE. En la mayoría de las estructuras la temperatura supera ocasionalmente, y por períodos breves de tiempo, los 40 °C (sin sobrepasar 65 °C) y los valores de diseño no se ven afectados ($C_t = 1$). En condiciones especiales, para miembros estructurales expuestos a temperaturas comprendidas entre 40 °C y 65 °C por un tiempo prolongado, el factor C_t toma valores menores a la unidad. Aquellas estructuras expuestas a una temperatura que supera 65 °C quedan fuera del alcance de dicho reglamento.

Contenido de humedad

Como se expresó en el Apartado 2.2.2, la madera es un material higroscópico que intercambia permanentemente agua con el aire que la rodea, por lo que su contenido de humedad depende de la temperatura y de la humedad relativa del ambiente. Una pieza de madera alcanza la humedad de equilibrio interno luego de un tiempo variable de acuerdo a las dimensiones de ésta (Coronel 1994). Porcentajes de equilibrio inferiores al 12% pueden ser obtenidos de forma natural en climas muy secos, mientras que un tenor de humedad del 0% solo puede ser logrado en estufa.

Las propiedades mecánicas varían de acuerdo al contenido de humedad y esta dependencia tiene lugar para contenidos inferiores al punto de saturación de las fibras. El

agua perdida a partir de dicho punto es extraída de las paredes celulares y por lo tanto las modifica, produciendo alteraciones tanto de las dimensiones como del comportamiento resistente y elástico de las piezas (Argüelles Á. y Arriaga M. 2000). Por esta razón, los ensayos mecánicos que se realizan para determinar las propiedades de la madera se efectúan bajo condiciones ambientales normalizadas. El clima denominado normal es el correspondiente a 20 °C de temperatura y 65% de humedad relativa ambiente, lo que origina una humedad de equilibrio de aproximadamente 12% en la mayoría de las maderas. Este valor es tomado como referencia internacional para la determinación de las propiedades mecánicas (EN 408 2012; IRAM 9663 2013).

Por lo general, la resistencia y rigidez mejoran con la pérdida de humedad ya que las paredes celulares se densifican y se vuelven más rígidas, produciéndose de esta forma un aumento de la cantidad de material leñoso por unidad de volumen (Coronel 1996). Es decir, las propiedades mecánicas se ven desfavorecidas con el incremento de humedad, y su efecto variable de acuerdo al tipo de sollicitación y de la calidad de las piezas. La resistencia a tracción paralela a la fibra es prácticamente independiente del contenido de humedad si la madera es de baja calidad (con grandes defectos). En cambio, la resistencia a compresión paralela a la fibra es sensible a la variación de la humedad y su influencia es prácticamente la misma para cualquier calidad. La resistencia a la flexión, como es de esperarse, muestra un comportamiento intermedio entre las anteriores (Argüelles Á. y Arriaga M. 2000). La influencia negativa que ejerce el incremento de humedad también se manifiesta en los valores que alcanzan las deformaciones diferidas en vigas sometidas a esfuerzos de larga duración, donde es de fundamental importancia no sólo el contenido de humedad inicial sino también las variaciones que éste experimenta mientras el elemento estructural se encuentra cargado (Andriamitantsoa 1995).

Tamaño de la pieza

El tamaño de la pieza se relaciona con la resistencia de la madera, en general un mayor volumen se corresponde con una menor tensión de rotura (Argüelles Á. y Arriaga M. 2000). En consecuencia, tanto el tamaño como la forma de la probeta tienen gran influencia sobre los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos, por lo que deben ser llevados a cabo sobre cuerpos de prueba de dimensiones normalizadas (EN 408 2012; IRAM 9663 2013). Este fenómeno ha sido objeto de numerosas investigaciones pues constituye un problema complejo en el que influyen multitud de factores, como ser el tipo de sollicitación, la especie

y la calidad, entre otros. Entonces, considerando la relevancia que adquiere el efecto del tamaño de la sección sobre la resistencia, seguidamente se presenta un análisis del mismo orientado a piezas de madera sometidas a flexión.

Varios estudios sobre madera estructural han demostrado que las propiedades mecánicas -tales como la resistencia a flexión, compresión y tracción- varían con el tamaño de la sección, con la longitud de la pieza y con las condiciones de carga. En particular, una viga sometida a flexión presenta una pérdida de resistencia a medida que aumenta su tamaño. Este fenómeno es generalmente conocido como “efecto de tamaño” (Rouger y Barrett 1995) y ha sido ampliamente estudiado para varios materiales.

A partir de la segunda década del siglo XX fueron llevadas a cabo las primeras investigaciones sobre el efecto del tamaño en la resistencia de la madera y, principalmente, éstas se relacionaban con el efecto de la altura en piezas sometidas a flexión. Newlin y Traver (1924) sugirieron la primera teoría para explicar por qué la resistencia aumentaba al disminuir la altura de la viga, la cual fue conocida como la “teoría del apoyo”. Según esta teoría, cuando las diminutas fibras de madera se someten a compresión a lo largo de su longitud, actúan individualmente como pequeñas columnas de Euler más o menos unidas. En el caso de una viga trabajando a flexión, las fibras más altamente comprimidas se ubican cerca del borde superior y se encuentran con su movimiento restringido por el efecto de las fibras relativamente poco comprimidas que se localizan cerca de la línea neutra. Según este criterio, esto explica los mayores valores del módulo resistente que se obtienen en piezas de reducida altura, donde las fibras de la zona neutra se encuentran más cerca del borde comprimido.

Posteriormente, hacia fines de la década del 30, surgió una interpretación más amplia sobre el efecto del tamaño, lo que dio origen a la “teoría del eslabón más débil” desarrollada por Weibull, quien estudió diferentes materiales de tipo frágil. Esta teoría se basa en la concepción estadística de la resistencia y establece una relación entre ésta y el volumen de la pieza (Rouger y Barrett 1995). La misma hace referencia a que una cadena sujeta a tensión es tan resistente como su eslabón más débil, es decir, supone que el fallo de la pieza se produce cuando la tensión alcanza el mismo valor que la tensión que produciría el fallo del elemento más débil contenido en su volumen si se ensayara independientemente (Rouger 1995).

Considerando que es más probable que aparezca una zona de baja resistencia en una pieza de gran volumen frente a otra de pequeño volumen, la teoría de Weibull ofrece una explicación razonable del motivo por el cual elementos de menor altura presentan mayor resistencia a flexión que aquellos de mayor altura. En el caso particular de las piezas de madera, la sección más débil será aquella determinada por la existencia de singularidades, pudiéndose destacar principalmente la presencia de nudos y la inclinación de las fibras. Los nudos suponen una interrupción de la continuidad de la madera y una pérdida de sección efectiva, dando lugar a una elevada concentración local de tensiones. Mientras que la desviación de las fibras afecta considerablemente el comportamiento mecánico debido a la naturaleza anisótropa de la madera (Dávalos-Sotelo y Ordóñez Candelaria 2011; Coronel 1996).

La “teoría del eslabón más débil” ha sido aplicada satisfactoriamente para explicar el comportamiento de piezas de madera bajo tracción y corte. No obstante, el uso de la misma es cuestionable cuando las solicitaciones aplicadas son de compresión y fundamentalmente de flexión, por tratarse de una mezcla de dos modos de falla (Rouger 1995). Dicha teoría se basa en un comportamiento de material frágil, particularidad que los miembros sometidos a flexión no la exhiben, puesto que estos trabajan como un material dúctil, es decir, cuando una pieza alcanza la tensión máxima es posible la redistribución de las tensiones logrando una carga de rotura mayor (Rouger y Barrett 1995).

Debido a la relevancia del efecto del tamaño en la resistencia a flexión, en la práctica del cálculo este fenómeno es contemplado bajo diferentes criterios por los distintos países del mundo, por consiguiente, es incorporado en las normas (ASTM D1990 2016; EN 384 2016; IRAM 9664 2013) y reglas de diseño (INTI CIRSOC 601 2016; EN 1995-1-1 2006; NCh 1198 2014; NDS 2012). Teniendo en cuenta que varios estudios concluyeron que el incremento del ancho de la viga no afecta de forma significativa la resistencia a flexión (Rouger y Barrett 1995), ciertas reglamentaciones -como ser las europeas y las argentinas- contemplan el efecto del tamaño de forma simplificada a través de un parámetro dependiente únicamente de la altura de la sección.

En el caso particular de Argentina, el Reglamento de estructuras de madera (INTI CIRSOC 601 2016) define los métodos y disposiciones generales que se deben emplear en el diseño y construcción de estructuras para edificaciones y obras civiles con madera, mientras que la norma IRAM 9664 (2013), como lo ya expuesto en el Apartado 2.2.3, trata

sobre las etapas a seguir para la definición de la población, muestreo, ensayos y análisis de resultados que permiten determinar los valores característicos para ser utilizados en el cálculo. Específicamente para la determinación de la resistencia característica a flexión, ambas reglas adoptan el mismo criterio que la norma europea EN 384 (2016), la cual fija una corrección por el tamaño de la pieza referida a una altura de referencia de 150 mm. Entonces, la resistencia a flexión obtenida a través de ensayos normalizados (EN 408 2012; IRAM 9663 2013) debe dividirse por un factor de altura $k_h = (150/h)^{0,2}$, siendo h la altura de la sección. Estudios llevados a cabo sobre el *Pinus sylvestris L.* de España (Hermoso Prieto 2001), el *Eucalyptus grandis* procedente de la Mesopotamia argentina (Piter 2003) y dos clones de *Populus deltoides* también cultivados en Argentina (Guillaumet *et al.* 2016), ratifican la idoneidad del exponente 0,2 adoptado en dicha fórmula. No obstante, como sucede con el *Pinus nigra* de procedencia española (Fernández-Golfín *et al.* 2002), existen especies que ponen de manifiesto un exponente con valores diferentes al adoptado, lo que implica que en algunos casos concretos el efecto de la altura puede diferir del establecido por las normas como valor medio para todas las especies.

Duración de la carga

En relación con la duración de la carga, la madera presenta un comportamiento que se diferencia del resto de los materiales estructurales puesto que sus propiedades mecánicas dependen en alto grado del tiempo durante el cual actúa la sollicitación. Es por ello que dicho factor debe ser contemplado tanto en la determinación de la resistencia y rigidez como en el cálculo de las estructuras de madera. Resulta oportuno señalar que en el diseño de elementos estructurales de madera se deben satisfacer dos requerimientos esenciales, uno referido a las condiciones de seguridad y otro a las de servicio. El primero se encuentra relacionado con la capacidad portante del elemento estructural y el segundo con el adecuado funcionamiento de éste durante la vida útil de la estructura, lo que se vincula directamente con la deformación que dicho elemento exhibe al ser sometido a cargas con diferente tiempo de duración (Coronel 1996; Thelandersson 1995a).

La evaluación de la influencia de la duración de la carga en la resistencia ha sido objeto de numerosas investigaciones, las primeras se efectuaron a partir de los años 40 sobre probetas de pequeñas dimensiones y libres de defectos, posteriormente se llevaron a cabo ensayos sobre madera comercial. Como resultado se obtuvo que cuanto mayor sea el tiempo durante el cual actúa la sollicitación, menor será el valor que alcanzará la carga para

producir la falla de la pieza. Éste es el motivo por el cual los ensayos para la determinación de las propiedades mecánicas deben realizarse con una duración normalizada, de tal forma que la rotura se produzca dentro de un cierto período de tiempo. En general, la resistencia obtenida ante cargas de duración permanente es del orden de un 60% de la deducida en un ensayo de laboratorio (5 ± 2 min) (EN 408 2012; IRAM 9663 2013). Los estudios llevados a cabo también demostraron que el efecto de la duración de la carga era algo más atenuado en aquellas piezas de calidad comercial (con defectos). En otras palabras, la influencia de la duración de la carga depende de la calidad de la madera, resultando significativamente menor en calidades bajas que en las que se aproximan a la madera libre de defectos (Argüelles Á. y Arriaga M. 2000).

En cuanto a la evaluación de las deformaciones, el tiempo de duración de las cargas causa un incremento de la deformación lenta aunque las condiciones de servicio, y en consecuencia el contenido de humedad de la pieza, se mantengan invariables. Bajo carga constante es posible encontrar que luego de veinte años la deformación diferida alcance valores iguales a dos veces, o incluso cuatro veces, al que experimentaba a los seis meses (Andriamitantsoa 1995). Para el caso particular de una viga sometida a flexión, el análisis de las deformaciones suele determinar las dimensiones finales de dicho elemento estructural, siendo la falta de consideración de este aspecto -o una interpretación errónea de los factores que inciden sobre el mismo- una causa frecuente de comportamientos insatisfactorios.

Al cabo de un cierto período de tiempo, la deformación final que experimenta un elemento estructural puede descomponerse en dos partes: una deformación elástica instantánea y una deformación diferida. La primera está vinculada con la rigidez de la madera y la segunda varía en función del tiempo así como de otros factores, entre los que aparecen la duración e intensidad de las cargas y las condiciones de servicio, aspecto que determina el contenido de humedad de la pieza y su variación. La deformación diferida también es conocida como creep y, a su vez, está originada por diversos fenómenos que se dividen en dos categorías: los mecano-sortivos y los viscoelásticos (Nordström y Sandberg 1994).

La deformación diferida (creep) mecano-sortivo es aquel que se produce debido al cambio en el contenido de humedad del material mientras éste se encuentra sometido a una carga permanente. Esta deformación crece con el contenido de humedad de la pieza y se

acelera alcanzando valores aún mayores cuando experimenta cambios de humedad bajo carga, resultando de mayor importancia la intensidad de las variaciones de humedad que el contenido absoluto de la misma (Thelandersson 1995a, 1995b). Como la madera es un material higroscópico, la misma resulta especialmente afectada por el fenómeno mecano-sortivo que se manifiesta con un aumento de la deformación en la etapa de desorción y una disminución de ésta durante la absorción (Nordström y Sandberg 1994). Cuando las piezas presentan secciones transversales grandes, en general la deflexión no se ve afectada cuando el ciclo de humedad es corto (variaciones diarias o semanales del clima). Sin embargo, ésta adquiere gran importancia cuando el ciclo climático es anual, particularmente en presencia de excepcionales temporadas secas y húmedas consecutivas. Investigaciones llevadas a cabo sobre piezas flexionadas sometidas a variadas condiciones de humedad durante el período de carga han demostrado la importancia de este factor en el comportamiento de las mismas, obteniéndose una mayor relación entre la deformación final y la instantánea en aquellos casos donde la madera perdió humedad durante el período de prueba (Gowda *et al.* 1996; Piter *et al.* 2006; Ranta-Maunus y Korttesmaa 2000; Torrán *et al.* 2008).

La deformación viscoelástica, por su parte, es aquella que se produce en una pieza debido a la permanencia de la carga. Tanto la intensidad de ésta como el contenido de humedad del material, y en menor proporción la variación de la temperatura en el ambiente, son factores que afectan a dicha deformación (Coronel 1996). Estudios experimentales han demostrado que a mayor nivel de tensión aplicada se corresponde una mayor tasa de crecimiento de la deformación diferida. Para un nivel de tensión inferior al 35% de la resistencia instantánea, la evolución de las deformaciones en función del tiempo se mantiene estable luego de experimentar un rápido crecimiento inicial, el que ocurre de forma inmediatamente posterior a la deformación instantánea. En cuanto al contenido de humedad del material, informes sostienen que el valor de la deformación diferida es mayor para piezas en estado verde respecto de piezas en estado seco, siempre y cuando éste permanezca invariable. No obstante, la deformación diferida relativa (cociente entre la deformación final y la instantánea) es prácticamente independiente del tenor de humedad de la madera. Acerca de la influencia de la temperatura puede afirmarse que cuanto mayor resulte ésta, mayor será la deformación. No obstante, en general su influencia es despreciable para temperaturas inferiores a los 50 °C, valor límite que no suele ser superado en las estructuras convencionales (Andriamitantsoa 1995; Nordström y Sandberg 1994).

El estudio de las deformaciones adquiere fundamental importancia en aquellas especies de rápido crecimiento donde los árboles son cortados a temprana edad (12-20 años). Éstos suelen contener una gran proporción de madera juvenil que se caracteriza por un comportamiento mecánico y físico diferente al de la madera madura (Chan Martín *et al.* 2002). Usualmente la madera juvenil brinda menores valores de resistencia y rigidez como consecuencia de la conformación que adquiere la capa intermedia S2 de la pared secundaria en la estructura celular (Cave y Walker 1994; Donaldson 2008; Hoffmeyer 1995; Yin *et al.* 2011), la cual está asociada a una mayor inclinación de las microfibrillas. Esta situación cobra importancia porque se ha demostrado que las propiedades reológicas de la madera se ven afectadas por las características de su estructura interna, destacándose las componentes de la pared celular -las microfibrillas y su orientación- como así también los enlaces químicos entre las unidades estructurales (Nordström y Sandberg 1994). La intensidad de la deformación diferida en aquellas piezas de madera con un alto contenido de humedad constante y sometida a esfuerzos de tracción, es mayor cuanto mayor es el ángulo de las microfibrillas en la capa S2. Por el contrario, en piezas con un bajo contenido de humedad no siempre se observa dicha correlación, lo que podría relacionarse con la necesidad de una mayor energía para iniciar la movilidad de las cadenas de celulosa en la matriz circundante. Roszyk *et al.* (2010, 2012) han demostrado, por otra parte, que la deformación total registra un incremento marcado cuando el ángulo de las microfibrillas supera los 18 grados de inclinación, mientras que ésta permanece prácticamente independiente de dicha variable para ángulos menores.

Considerando que las deformaciones son mayores en dirección perpendicular a las fibras que en dirección paralela a las mismas, experimentalmente resulta más sencillo medir las deflexiones que las pequeñas deformaciones longitudinales que ocurren bajo compresión o tensión. Además, como en las estructuras convencionales bajo condiciones de servicio también resultan más relevantes las deformaciones en los elementos flexionados que en aquellos sometidos a esfuerzo axial, la mayoría de las pruebas llevadas a cabo a lo largo de los años se han realizado sobre elementos sometidos a flexión. Si bien el comportamiento de este material no es exactamente igual frente a los distintos tipos de esfuerzo debido a la anisotropía que lo caracteriza (ver Apartado 2.2.3), a los fines prácticos se puede asumir un comportamiento común (Ranta-Maunus 1995).

Diversos proyectos experimentales (Calvo *et al.* 2002; Gowda *et al.* 1996; Ranta-Maunus 1995; Piter *et al.* 2006, 2007b; Shen y Gupta 1997; Torrán *et al.* 2008) han abarcado el estudio de las deformaciones diferidas tanto para pequeñas probetas libres de defectos como para piezas en tamaño estructural. Los resultados pusieron en evidencia diferencias significativas en el comportamiento reológico para ambas categorías. En pequeñas probetas libres de defectos cobran gran importancia las variaciones en el contenido de humedad, resultando de menor peso la componente viscoelástica. En piezas de tamaño estructural, por el contrario, es esta última la que adquiere mayor relevancia ya que los efectos de las variaciones de humedad se ven minimizados por el mayor tamaño de la sección transversal. En este caso también intervienen los defectos (nudos, médula, inclinación de las fibras, entre otros) cuya presencia en general reduce el valor del módulo de elasticidad aumentando así la deformación instantánea.

Teniendo en cuenta que la deformación diferida es normalmente considerada como un incremento en la deflexión de las vigas, las diferentes reglas de diseño de estructuras de madera (INTI CIRSOC 601 2016; EN 1995-1-1 2006; NCh 1198 2014; NDS 2012) proporcionan un factor para ser multiplicado a la deformación elástica instantánea y poder calcular de un modo sencillo la deformación diferida (Ranta-Maunus 1995). El reglamento Argentino de estructuras de madera (INTI CIRSOC 601 2016), en línea con el NDS (2012) de EEUU, adopta un factor de deformación dependiente del tiempo (K_{cr}), el cual varía en función del tipo de pieza y de su contenido de humedad, así como de las condiciones de servicio a la que la misma será expuesta. Este factor no considera la calidad de la pieza de madera puesto que la misma ya es contemplada en la determinación de la deformación instantánea. Adicionalmente, dicho reglamento (INTI CIRSOC 601 2016) recomienda valores límites –expresados en función de la longitud de la viga– que se deben verificar para el control de las deformaciones, éstos varían con el destino de la estructura y con los requerimientos del proyecto.

2.3. Clasificación de la madera aserrada

La clasificación de la madera puede realizarse considerando criterios de apariencia o de resistencia. La primera está orientada a la madera utilizada en la construcción con fines no estructurales, por lo que su objetivo es determinar la calidad desde el punto de vista

estético. Ésta se basa en una inspección visual de las características físicas de las piezas, dando especial importancia a la apariencia estética, la trabajabilidad y/o la adecuación a posibles usos. La segunda está destinada a madera para uso en estructuras, por lo que se sustenta en el empleo de indicadores de fácil evaluación y de estrecha relación con las propiedades mecánicas del material. Su objetivo consiste en asegurar que una determinada pieza de madera, al ser colocada como un elemento estructural particular, disponga de la capacidad adecuada para llevar la carga de diseño (Argüelles Á. y Arriaga M. 2000; Hanhijärvi *et al.* 2008). Como el presente trabajo de investigación está orientado a la caracterización de la madera para fines estructurales, se hará referencia únicamente a este último criterio.

La clasificación por resistencia consiste en dividir una población de madera en grupos de distinta calidad resistente, lo cual se lleva a cabo sobre la base de un análisis individual de cada pieza estructural. Esta inspección tiene en cuenta el nivel de los parámetros considerados y, en función de los límites establecidos para los mismos, origina la asignación de cada elemento a una determinada clase resistente. El empleo de este método se justifica tanto por razones técnicas como económicas, las primeras se relacionan con el conocimiento preciso de los valores característicos de las propiedades mecánicas del material -dato indispensable para el diseño estructural-, mientras que las segundas se refieren al buen uso de las piezas aserradas, lo que involucra la clasificación de la misma. Si la población de madera fuera analizada sin clasificar se obtendrían valores característicos muy bajos como consecuencia de la naturalmente alta dispersión de sus propiedades. Por el contrario, si ésta es dividida en clases que constituyen sub-poblaciones de características más homogéneas, es posible sacar provecho de las piezas de calidad superior y, a su vez, trabajar con mayor confiabilidad (Blaß y Görlacher 1996; Glos 1995b; Glos y Lederer 2000).

Cada clase resistente se encuentra asociada a ciertas propiedades físicas y mecánicas, éstas resultan indispensables para el diseño estructural y son determinadas directa o indirectamente en el proceso de caracterización mecánica de cada una de las especies de madera. Autores como Hermoso Pietro (2001), Herrero (2003), Íñiguez González (2007) y Weber (2005), entre otros, abordaron estudios sobre caracterización de ciertas coníferas vinculadas a una zona específica de cultivo. Según los criterios europeos (EN 408 2012), adoptados por la normativa argentina IRAM 9663 (2013), las propiedades consideradas fundamentales para la asignación de las clases de resistencia son: i) la resistencia a la flexión,

ii) el módulo de elasticidad longitudinal en flexión y iii) la densidad. Otras propiedades relacionadas con el uso estructural de la madera son: i) la resistencia a tracción y a compresión paralela y perpendicular a la fibra, ii) la resistencia al corte y iii) el módulo de elasticidad en cortante (EN 408 2012). La asignación de cada pieza a una determinada clase resistente (asociada a las propiedades fundamentales) puede ser llevada a cabo a través de una clasificación visual y/o una clasificación mecánica (Íñiguez González 2007; Quil Villa 2009). A su vez, conociendo las propiedades fundamentales, pueden ser derivadas las demás a través de ciertas ecuaciones que las relacionan (EN 384 2016; IRAM 9664 2013).

La clasificación visual es el método más antiguo y consiste en la medición de los defectos de la pieza en función de su aspecto exterior, para finalmente asignarle una determinada calidad (Argüelles Á. y Arriaga M. 2000). La clasificación mecánica, por su parte, se basa en un ensayo no destructivo a partir del cual se calcula un parámetro clasificador estrechamente relacionado con la resistencia (usualmente el módulo de elasticidad), a partir del cual se le asigna a la pieza su correspondiente grado de calidad resistente (Glos 1995b). Ambos métodos de clasificación, en general, son sistemas normalizados y muy extendidos a nivel mundial. También existen otros métodos experimentales que no se encuentran normalizados pero que actualmente están sujetos a un intenso desarrollo e implementación, siendo las técnicas de ultrasonidos y vibraciones las más empleadas en madera aserrada. Al aplicarse simultáneamente más de un método (visual y/o mecánico más nuevas técnicas no destructivas) en algunos casos se han observado mejoras en la predicción de las propiedades, lo que se traduce tanto en un incremento del rendimiento como en la optimización del material (Íñiguez González 2007).

Los países con mayor tradición en la temática han desarrollado a través del tiempo sus propios métodos, los cuales están basados en la experiencia y el conocimiento de las especies utilizadas. La clasificación visual estuvo basada fundamentalmente en experiencias regionales hasta comienzos del siglo veinte, y recién se comenzaron a desarrollar las primeras reglas detalladas para la década de 1920 en Estados Unidos y la de 1930 en varios países europeos. Las máquinas de clasificar fueron introducidas a partir de la década de 1960, permitiendo evaluar parámetros no percibidos visualmente e incorporando mayor precisión y velocidad al proceso (Glos y Diebold 1994; Glos 1995b).

Las numerosas normas de clasificación redactadas a lo largo de los años recogen experiencias propias de cada país o región y se orientan a distintas especies -o a grupos de

especies- de diferentes procedencias. En general, dichas normas difieren en los parámetros considerados y/o en la forma de medirlos, no obstante todas tienen en común la consideración de la correlación existente entre tales parámetros y las propiedades mecánicas del material evaluado. En este sentido y en relación con las coníferas pueden consultarse, entre otras, la norma alemana DIN 4074-1 (2012), la española UNE 56544 (2011), las estadounidenses ASTM D245 (2011) y SPIB (2014), las chilenas NCh 1970/2 (1988) y NCh 1207 (2017), y las argentinas IRAM 9662-3 (2015) e IRAM 9670 (2002). Las dos últimas presentan métodos de clasificación visual por resistencia para la madera aserrada de pino resinoso del nordeste argentino, los cuales difieren (en general) y podría deberse a que ambas hacen referencia a diferentes elementos estructurales, tablas y vigas respectivamente.

Sintetizando, los métodos de clasificación por resistencia encuentran su fundamento en la correlación existente entre las propiedades y las características consideradas como variables independientes. La eficiencia de un determinado parámetro, sea de detección visual o mecánica, se verifica por su capacidad para predecir la resistencia, la rigidez y la densidad aparente del material analizado, ya que estas propiedades son las que definen la calidad y el comportamiento estructural del mismo. A continuación se expone una descripción más profunda de cada uno de los métodos de clasificación.

2.3.1. Clasificación visual por resistencia

Los métodos de clasificación visual por resistencia se fundamentan en la existencia de una correlación conocida entre los parámetros visuales y las propiedades mecánicas. Cuanto más clara es esta relación, más eficiente es el método pues permite dividir con mayor precisión a la población inicial en sub-poblaciones constituidas por los distintos grados de calidad elegidos, los que están asociados a ciertos valores característicos de resistencia, rigidez y densidad.

Grados de calidad

Como se hizo referencia anteriormente, la determinación de las propiedades mecánicas para la población completa (sin clasificar) lleva implícita una disminución de los valores característicos debido a la gran heterogeneidad que caracteriza a este material. La distribución de las piezas de madera en diferentes niveles de calidad, en cambio, permite

utilizar el potencial de cada grupo. No obstante, la cantidad de grados de calidad elegidos deben ser evaluados convenientemente con el fin de posibilitar una aplicación real y eficiente de los métodos en los procesos ligados a la producción, comercialización y utilización del material. Cuando el número de calidades es elevado, la diferencia entre grados consecutivos se hace menos evidente resultando más difícil y lenta su determinación. Por lo tanto no sería lógico establecer una gran cantidad de clases si no se cuenta con un método de clasificación confiable y eficiente que permita distinguir con precisión las propiedades de cada grupo y que, a la vez, resulte de simple aplicación por parte de las personas que deben llevar a cabo dicha tarea. Al mismo tiempo, debe considerarse el aprovechamiento económico del material, siendo fundamental que la producción real de los aserraderos quede contemplada en el sistema.

Actualmente en el mundo existen numerosas normas de clasificación visual por resistencia destinadas a diferentes combinaciones de especie/procedencia. Éstas difieren en sus particularidades pero tienen en común la asignación de una cantidad no muy numerosa de grados de calidad. La norma norteamericana (SPIB 2014) desarrollada para el pino del sur prescribe cuatro grados estructurales. La norma chilena (NCh 1207 2017) para el Pino radiata, *P. oregón* y *P. ponderosa* fija tres calidades, al igual que la norma alemana DIN 4074-1 (2012) y la española UNE 56544 (2011), ambas destinadas a la clasificación de madera aserrada proveniente de especies de coníferas. Las normas argentinas (IRAM 9670 2002; IRAM 9662-3 2015) formuladas para el pino resinoso del nordeste, por su parte, establecen dos calidades. Cabe destacar que en numerosos casos (DIN 4074-1 2012; NCh 1207 2017) los valores característicos de resistencia, rigidez y densidad -asociados a cada calidad- no son expresados en la misma norma que prescribe el método de clasificación visual.

Por otra parte, cada calidad visual asociada a una especie -o grupos de especies- y procedencia, obtenida a través de alguna norma de clasificación, puede ser asignada a una clase de resistencia del sistema europeo establecido en la norma EN 338 (2016). Este sistema internacional de clases resistentes reagrupa las calidades que tienen niveles de resistencia similares, haciéndolas de esta forma intercambiables. La asignación de una calidad al sistema europeo se realiza contemplando que los valores característicos de la resistencia a flexión y densidad sean iguales o mayores que los valores establecidos para la clase

resistente y, a la vez, que el valor característico medio del módulo de elasticidad en flexión sea igual o mayor que el percentil del 95% del valor indicado para la misma.

Los distintos grados de calidad quedan definidos al fijarse límites para las características visuales adoptadas como parámetros de clasificación. Las limitaciones normalmente consideradas se relacionan con (Glos 1995b; Hoffmeyer, 1995; Vignote P. y Martínez R. 2006):

- Las características ligadas al crecimiento del árbol o a los procesos de producción que afectan las propiedades mecánicas (nudos, desviación de las fibras, espesor de los anillos de crecimiento anual o densidad, madera de reacción, médula o madera juvenil y fisuras, entre otros).
- Los deterioros causados por ataques biológicos (hongos, insectos).
- Los defectos especiales y desviaciones de la geometría prevista (deformaciones, aristas faltantes).

Indicadores de calidad

En los procesos de clasificación, el peso de cada indicador de calidad depende de los efectos perjudiciales que éste produce sobre las propiedades mecánicas, resultando determinantes aquellos que tienen una relación directa con la variación de la estructura interna de la madera (Carreira *et al.* 2006; Hermoso Prieto 2001).

La nudosidad, como lo ya expresado en el Apartado 2.2.4, constituye el defecto de mayor relevancia en la madera procedente de coníferas. Su incidencia es evaluada por las normas de clasificación visual al intentar traducir el área ocupada por los nudos en la sección transversal de la pieza. Esto es llevado a cabo a través del empleo de diferentes métodos de medición, los cuales pueden englobarse en dos categorías:

- Medida de apariencia. El nudo es considerado únicamente donde aparece. Para la clasificación de tablas, la norma estadounidense ASTM D245 (2011) y la alemana DIN 4074-1 (2012) consideran a la nudosidad como el cociente entre el promedio de la medida del nudo en ambas caras y el ancho de la superficie en la cual se manifiesta, mientras que la norma argentina IRAM 9662-3 (2015) contempla directamente la medida del nudo mayor. Para la clasificación de vigas, la norma argentina IRAM 9670 (2002), que adopta el mismo criterio establecido como

método alternativo por la ASTM D245 (2011), considera como dimensión del nudo -en la cara ancha de la pieza- al promedio de los diámetros menor y mayor del mismo, mientras que la DIN 4074-1 (2012) asume como dimensión determinante al diámetro menor. Por otra parte, para ambos elementos estructurales las normas antes mencionadas contemplan a los agrupamientos de nudos. Las argentinas lo hacen considerando los nudos que aparecen en una longitud de lado igual al ancho de la pieza donde se manifiestan, mientras que las demás, en una longitud igual a 150 mm.

- Desplazamiento de las fibras. La nudosidad se expresa como la relación entre la proyección del nudo sobre la sección transversal y el área total de ésta. Este método es adoptado por la norma chilena NCh 1207 (2017) y también está previsto para las vigas en la norma ASTM D 245 (2011). Las limitaciones pueden ser establecidas para el nudo mayor, para todos los nudos intersecados en una sección y para aquellos comprendidos en una longitud de 150 mm. También incorpora el concepto de zonas para los elementos sometidos a esfuerzos de flexión, limitando en forma especial la relación de la proyección sobre las áreas de margen (equivalente a la cuarta parte de la sección transversal de la pieza desde ambos bordes).

La médula está asociada a la presencia de madera juvenil, siendo mayor su efecto negativo sobre las propiedades mecánicas en las piezas aserradas con secciones transversales de menores dimensiones. Esta singularidad no es admitida por la norma IRAM 9662-3 (2015) y tampoco por la DIN 4074-1 (2012) en las tablas estructurales de mejor calidad.

El espesor de los anillos de crecimiento anual es registrado en la dirección radial, descartándose la zona cercana a la médula. La norma IRAM 9670 (2002) prescribe ignorar una longitud igual a 13 mm respecto del eje de crecimiento, mientras que en otras (DIN 4074-1 2012; IRAM 9662-3 2015) se establece una distancia de 25 mm. La restricción se realiza generalmente a través del establecimiento de un límite superior para el espesor, ya sea el valor promedio o el mayor, o de una cantidad máxima de anillos en un radio determinado. Este parámetro suele utilizarse como indicativo de la densidad en las especies de coníferas (Hermoso Prieto 2001).

La desviación general de las fibras respecto del eje longitudinal de la pieza puede ser determinada por (DIN 4074-1 2012; IRAM 9670 2002; NCh 1207 2017):

- Apreciación visual, observando el desarrollo longitudinal de los anillos de crecimiento en las caras radiales de la pieza, o bien examinando las fisuras de contracción o grietas del secado.
- Empleo de un trazador, aparato que consiste en una manivela con una manija articulada en un extremo y una aguja en el otro.

La presencia de depósitos de resina y de corteza debe contemplarse en el caso particular de la madera procedente de coníferas. Ambos son registrados y evaluados de modo diferente de acuerdo a cada norma. Por ejemplo, la IRAM 9670 (2002) los considera como un defecto no admisible mientras que otras normas, como la IRAM 9662-3 (2015) y la NCh 1207 (2017), lo asimilan a alguna característica visual que provoque similar debilitamiento de la sección transversal de la pieza.

Las fisuras se dividen entre grietas (no pasantes) y rajaduras (pasantes), ambas son limitadas por su tamaño, considerando restricciones tanto para su longitud como profundidad, en función de los diferentes grados de calidad contemplados (DIN 4074-1 2012; IRAM 9670 2002; SPIB 2014).

La arista faltante se expresa como una fracción decimal entre el mayor ancho de la arista afectada, transversal y perpendicularmente al eje de la pieza, y el ancho de la cara y el canto donde ésta aparece (DIN 4074-1 2012; IRAM 9662-3 2015; NCh 1207 2017). Los defectos ligados a los procesos de producción, como severas reducciones de la sección transversal por efecto del aserrado, habitualmente no son aceptados.

Las desviaciones de la geometría prevista -descriptas en el Apartado 2.2.1- en general son limitadas por razones de índole constructiva. No obstante, en algunos elementos como los sometidos a compresión, éstas tienen importancia por la excentricidad que generan las cargas. El abarquillado se expresa como la deformación máxima referida a la dimensión transversal mayor de la pieza, mientras que las restantes (combado, encorvado y revirado) se limitan sobre la extensión total de la pieza (IRAM 9670 2002) o considerando su mayor valor sobre una longitud de 2 m (DIN 4074-1 2012; IRAM 9662-3 2015) o 3 m (NCh 1207 2017).

Los deterioros causados por ataques biológicos, como hongos e insectos, se encuentran limitados en función de su tipo e intensidad. Por ejemplo, la norma IRAM 9662-3 (2015) no admite piezas con zonas atacadas por hongos causantes de pudrición, pero admite aquellas piezas con zonas afectadas por hongos cromógenos y/o con orificios de diámetro menor a 2 mm causados por insectos.

Diseño del método

En el establecimiento de los límites para cada grado de calidad resulta de suma importancia que los valores característicos alcanzados en cada clase seleccionada permitan un buen desempeño de la especie/procedencia estudiada y que, a la vez, se logre el mejor aprovechamiento posible evitando así que un elevado porcentaje del material sea rechazado. Teniendo en cuenta ambos aspectos, los límites entre clases se fijan estudiando la correlación existente entre las variables independientes, que son las características visuales, y la variable dependiente, constituida por las propiedades mecánicas.

Para aquellas características expresables cuantitativamente (nudosidad, espesor de los anillos de crecimiento, etc.), la relación existente entre variables puede ser representada adecuadamente por medio del coeficiente de correlación de Pearson. A través de un análisis de regresión lineal simple, junto al correspondiente diagrama de dispersión, es posible fijar los límites necesarios para alcanzar los valores mecánicos requeridos. En cambio, para aquellas características visuales que se expresan cualitativamente (presencia de médula, madera de reacción, etc.) solo se puede destacar su presencia o ausencia, por lo que su relación con las propiedades mecánicas se analiza separadamente para ambos grupos, es decir, el conformado por aquellos cuerpos de prueba libres del parámetro analizado de aquellos que si lo contienen.

Teniendo en cuenta que cada pieza debe ser clasificada de acuerdo a su sección más débil, a través de un examen visual de las cuatro caras y con el auxilio de las reglas de clasificación, las características de los defectos observables son usadas para la asignación de una determinada calidad.

Ventajas y desventajas

Las ventajas de los métodos visuales radican en que no requieren inversiones elevadas para su implementación, es decir, son procedimientos sencillos que no demandan un equipo costoso. No obstante, la eficiencia y rapidez de estos métodos dependen de la

pericia de la persona que realiza la tarea y están expuestos a los errores propios de la intervención de un ser humano. En unos pocos segundos el clasificador debe observar las cuatro superficies de una pieza aserrada y decidir, en función de su observación, el grado de calidad que se corresponde para la misma. Por lo tanto es importante que las reglas de clasificación sean simples de comprender y que las personas que lo implementan reciban una capacitación adecuada (Hermoso Pietro 2001).

Un aspecto negativo del método visual es que el mismo no permite apreciar parámetros de elevada correlación con la resistencia, como ser el módulo de elasticidad, lo cual impide el aprovechamiento como material estructural de algunas piezas de elevada calidad cuyas características registrables visualmente no lo revelan. Es así que el patrón común a todas las normas de clasificación visual es su elevado conservadurismo al subestimar fuertemente la calidad mecánica del material y, por tanto, el beneficio económico del productor (Argüelles Á. y Arriaga M. 2000; Glos 1995b).

2.3.2. Clasificación mecánica por resistencia

Con el fin de mejorar la precisión de los métodos visuales de clasificación, en la década de 1960 se comenzaron a desarrollar técnicas mecánicas para determinar la calidad de la madera estructural, lo que dio origen a la clasificación mecánica por resistencia. Estos métodos se basan en la predicción de la resistencia de cada pieza, habitualmente a través de relaciones conocidas con el módulo elástico, el cual es determinado en un ensayo no destructivo. Los países pioneros en el desarrollo de las diversas técnicas de clasificación automática que existen en la actualidad fueron Estados Unidos, Gran Bretaña, Australia, Sudáfrica y Japón (Fernández-Golfín Seco *et al.* 2001; Glos 1995b).

La experiencia internacional ha probado que los métodos basados en parámetros mecánicos de elevada eficiencia permiten alcanzar grados de calidad y rendimientos mayores que los visuales, mejorando la confiabilidad del material y su potencial técnico-económico (Diebold y Glos 1994; Sauter y Diebold 1997). La incorporación de la clasificación mecánica como un medio de garantizar la calidad de la madera estructural -y alcanzar una mayor homogeneidad en la rigidez- recibió un importante impulso en Brasil durante la última revisión de la norma NBR 7190 (ABNT 2010). Este documento destaca la conveniencia de clasificar mecánicamente la madera de coníferas y reconoce las ventajas de incorporar este proceso, admitiendo una significativa mejora en los valores de cálculo de

las propiedades. En Argentina no hay empresas que utilicen actualmente procesos de clasificación mecánica, pero factores de naturaleza técnica y política han generado un ambiente propicio para su implementación en el mediano plazo, y por lo tanto justifican su estudio.

Tipos de máquinas para ensayos no destructivos

En las últimas décadas se han desarrollado diferentes tipos de máquinas para clasificar la madera estructural, siendo el módulo de elasticidad el parámetro más empleado debido a su elevada correlación con la resistencia (Diebold 1997; Fernández-Golfín Seco *et al.* 2001; Görlacher 1997; Green y Kretschmann 1997). O'Neill y Tarigo (2008) obtuvieron un coeficiente de correlación de Pearson (R) de 0,69 para el *Pinus elliottii* cultivado en Uruguay. Hermoso Prieto (2001) obtuvo coeficientes R entre 0,73 y 0,78 para el *Pinus sylvestris* de España, mientras que Piter (2003) un R de 0,81 para el *Eucalyptus grandis* de Argentina. Sin embargo, para algunas combinaciones especie/procedencia la correlación con la rigidez no fue tan buena. O'Neill *et al.* (2004) obtuvieron un R de 0,46 para tablas de *Eucalyptus grandis* cultivado en Uruguay. Esto podría deberse a que la resistencia está muy condicionada por los defectos de la madera como los nudos, cosa que no sucede con el módulo de elasticidad. Como la presencia de defectos es inevitable en la madera estructural, para mejorar la predicción de la resistencia por parte de la rigidez se ha incorporado la medición de otros parámetros (singularidades, densidad) en forma conjunta con la determinación del módulo de elasticidad (Blaß y Görlacher 1996; Glos y Diebold 1994).

Las máquinas más antiguas y simples son aquellas que determinan, a través de ensayos no destructivos a flexión, el valor del módulo de elasticidad sobre tramos comprendidos entre 0,5 m y 1,2 m. También se han desarrollado técnicas que no requieren deformar mecánicamente la pieza, tales como la aplicación de vibraciones (Görlacher 1984; Ilic 2001), ultrasonidos, microondas, entre otros, que hacen posible la clasificación de elementos estructurales de importantes dimensiones (Blaß y Görlacher 1996). De acuerdo a lo expuesto, las máquinas clasificadoras automáticas se pueden dividir en dos grandes grupos según el método empleado, las de tipo mecánico y no mecánico.

Las máquinas de tipo mecánico, también conocidas como máquinas de flexión, se dividen a su vez en dos clases: i) las que se basan en la aplicación de una fuerza constante y en el registro de la deformación a intervalos regulares, siendo la Computermatic

(Measuring and Process Control Ltd.) la más conocida comercialmente, y ii) aquellas cuyo principio de funcionamiento consiste en la medición de la fuerza que se necesita aplicar para conseguir una deformación determinada, distinguiéndose la Cook-Bolinder (Cook-Bolinder Ltd.) cuya fotografía puede observarse en la Figura 2.20 (Íñiguez González 2007). En ambos casos las máquinas son alimentadas, de manera continua, con piezas de madera que son sometidas a flexión respecto del eje de menor momento de inercia. La clasificación se realiza tomando en consideración el menor valor promedio del módulo de elasticidad registrado en el tramo flexionado, lo que origina un marcado automático de la pieza con la clase resistente a la que pertenece (Fernández-Golfín Seco *et al.* 2001; Piter 2003). Además de las descritas, también existe una máquina mixta denominada Ersson (John Ersson Engineering AB) que incorpora una parte mecánica y otra de visión artificial, registrando la deformación mediante técnica láser. Ésta es de origen sueco y fue introducida en el mercado en 1998 (Hermoso Pietro 2001).

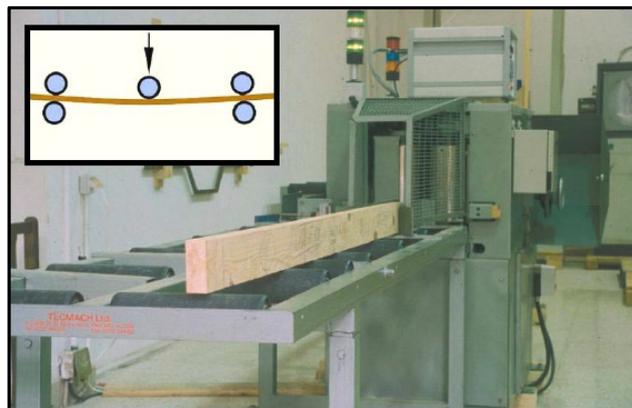


Figura 2.20. Máquina de clasificación mecánica Cook-Bolinder (Íñiguez González 2007)

Las máquinas de tipo no mecánico abarcan tecnologías completamente distintas. Por un lado están aquellas que determinan la resistencia a través del sondeo de la dureza del material, donde aparecen el penetrómetro y el arranque de tornillo. El primero tiene como objeto la medición de la profundidad de penetración, que se relaciona con la densidad e indirectamente con la resistencia, y el segundo consiste en insertar un tirafondo en la pieza y evaluar la resistencia que ofrece su extracción, la que depende de la densidad del material (Guindos 2011; Íñiguez González 2007). Por otro lado están las máquinas que se basan en la determinación de los defectos, densidad y humedad de la pieza con el fin de conocer la resistencia a partir de ellos. En este caso aparecen las técnicas de radiofrecuencia (microondas) y de absorción de radiaciones ionizantes (Finnograder) (Denzler y

Weidenhiller 2014; Fernández-Golfín Seco *et al.* 2001). Por último se encuentran las tecnologías basadas en mediciones de naturaleza acústica, a través de las mismas se determina el módulo de elasticidad dinámico, predictor de la resistencia. Las más utilizadas en madera estructural son la técnica de ultrasonidos (Sylvatest), las ondas de impacto (Microsecond Timer de la empresa Fakopp), la emisión acústica y el análisis de vibraciones (Portable Lumber Grader de la empresa Fakopp) (Glos 1995b; Guindos 2011; Pérez del Castillo 2001).

En los últimos años se han publicado resultados de investigaciones (Cagno *et al.* 2014; Denzler y Weidenhiller 2014; Dowse y Wessels 2013; Ribas de A. y Alves D. 2017; Roblot *et al.* 2010) donde se aplican estas nuevas técnicas no mecánicas a la clasificación por resistencia de diversas combinaciones especie/procedencia, particularmente en tablas destinadas a la fabricación de madera laminada encolada estructural (MLEE). En un lugar destacado se ubican los métodos acústicos porque presentan una serie de ventajas, entre las cuales aparecen la facilidad de aplicación de los diferentes equipos, la rapidez de ejecución del ensayo, la obtención de buenos resultados y la posibilidad de estudiar piezas de variadas dimensiones.

En general los métodos acústicos se fundamentan en el principio de la transmisión directa de una onda acústica, pero difieren en el equipo utilizado y en el tratamiento de la señal generada y recibida. El procedimiento consiste en calcular el tiempo de propagación de la onda entre dos puntos de distancia conocida para determinar posteriormente la velocidad de transmisión (Coronel 1996). Se debe tener en cuenta que una discontinuidad en el material (nudos, médula, depósitos de resina, fisuras, etc.) tiene por efecto un aumento del tiempo transcurrido hasta que la onda llega al receptor, puesto que el camino seguido por la misma es mayor al tener que sortear un obstáculo (Pérez del Castillo *et al.* 2000; Quil Villa 2009). Conociendo el valor de la velocidad y la densidad de la madera es posible calcular el módulo de elasticidad dinámico, el cual suele presentar una muy buena correlación con el módulo de elasticidad estático, aunque generalmente sobrestima los valores de rigidez reales (Íñiguez González 2007; O'Neill 2004; Ribas de A. y Alves D. 2017).

Los resultados obtenidos a través de numerosas investigaciones sobre la técnica de frecuencia fundamental de vibración afirman que su empleo podría lograr, a un bajo costo de instalación, una mayor velocidad en la clasificación de piezas estructurales (Ilic 2001; Pérez del Castillo 2001). El procedimiento de ensayo consiste básicamente en producir una

excitación en la pieza por medio de un golpe, lo que hace que ésta comience a vibrar en su frecuencia natural de forma longitudinal o flexional de acuerdo a la localización del punto de impacto, como puede apreciarse en la Figura 2.21. La amplitud y frecuencia de la vibración de resonancia son obtenidas utilizando un analizador de espectro que determina las frecuencias relativas mediante la transformada rápida de Fourier (Íñiguez González 2007; Quil Villa 2009). Con tales datos son determinadas las propiedades elásticas de la madera y consecutivamente pueden ser estimadas sus propiedades resistentes.

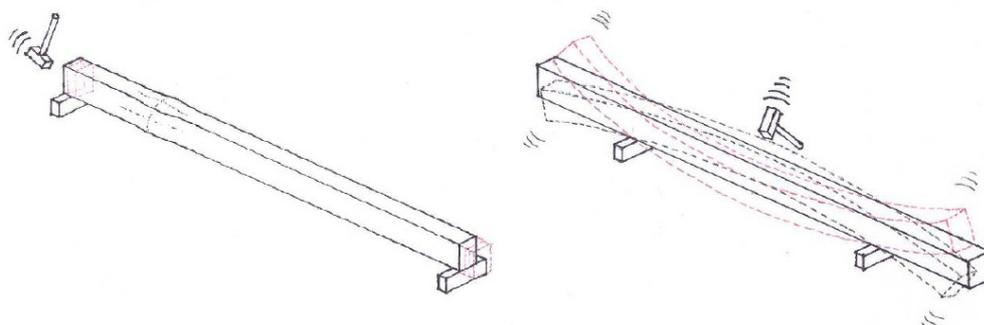


Figura 2.21. Modos de vibración. Izq.: longitudinal. Der.: flexional (Adaptada de Íñiguez González 2007)

Por otra parte, aquellas máquinas de clasificar que combinan varios parámetros se diferencian en la modalidad utilizada para registrarlos (Diebold 1997; Görlacher 1997). La nudosidad puede ser determinada ópticamente, empleando cámaras o a través de radiaciones. La densidad puede ser calculada disponiendo de la masa y del volumen de la pieza, o también por medio de radiaciones. El módulo de elasticidad, como lo expresado en párrafos anteriores, puede ser evaluado al deformar la pieza o de forma dinámica, ambos procedimientos presentan ciertas diferencias a ser contempladas. El módulo de elasticidad obtenido a través del método acústico indica un valor promedio a lo largo de toda la pieza, mientras que el procedimiento mecánico arroja un valor medio que se corresponde con el tramo flexionado, el cual tiene una longitud reducida (0,5 m a 1,2 m) y por ende posibilita la obtención del menor valor correspondiente a la pieza. Por otro lado, el método dinámico permite el análisis de elementos de una gran variedad de tamaños, en contraste, las máquinas que flexionan los cuerpos encuentran una restricción en el tamaño de las secciones, pues para grandes dimensiones pueden originarse daños ante la necesidad de aplicar fuerzas importantes (Blaß y Görlacher 1996; Glos 1995b).

Parámetros predictores de la resistencia

El análisis individual de cada pieza a través del registro de uno o más parámetros en forma mecánica y la consecuente asignación a la clase correspondiente, permite aprovechar al máximo las propiedades de cada elemento. Si el proceso de clasificación está ajustado convenientemente, la precisión lograda será mayor cuanto más estrecha sea la relación existente entre las variables independientes y la resistencia. Es por ello que el parámetro individual más utilizado lo constituye el módulo de elasticidad, que además resulta de fácil medición a un ritmo elevado (Blaß y Görlacher 1996; Fernández-Golfín Seco *et al.* 2001). La relación existente entre esta variable predictiva y la resistencia, expresada en forma de coeficientes de correlación, puede alcanzar valores del nivel de 0,85 (Johansson *et al.* 1992). Cagno *et al.* (2014) reportaron valores de 0,72 para madera de *Pinus taeda/elliottii* del Uruguay, mientras que Hermoso Prieto (2001) informó valores comprendidos entre 0,72 y 0,81 para el *Pinus sylvestris* cultivado en distintas regiones de España.

La incorporación de otros parámetros actuando en forma combinada con el módulo de elasticidad permite elevar aún más la correlación con la resistencia (Blaß y Görlacher 1996; Glos y Diebold 1994). Dowse y Wessels (2013) encontraron que, para tablas de *Pinus patula* de Sudáfrica, la eficiencia predictiva de la rigidez se optimiza al combinarla con la densidad y la nudosidad. A similar conclusión también llegaron Cagno *et al.* (2014) y Ehrhart *et al.* (2016) al realizar un estudio sobre madera de *Pinus taeda/elliottii* cultivada en Uruguay y de Haya proveniente de Suiza, respectivamente. Por ende, de acuerdo a la bibliografía citada, el parámetro combinado que permite lograr una mayor eficiencia en el proceso de clasificación es aquel integrado por el módulo de elasticidad, la densidad y la nudosidad. Para dicha combinación específica, Glos y Diebold (1987) reportaron valores de correlación con la resistencia de hasta 0,88. Particularmente, Hanhijärvi y Ranta-Maunus (2008) informan un valor de 0,84 para tablas de *Pinus sylvestris* de Europa, mientras que Dávalos-Sotelo y Limón G. (2009) obtuvieron valores algo más elevados (0,94) para el pino de México.

Diseño del método

El diseño de un método mecánico de clasificación por resistencia requiere, en primera instancia, investigar la correlación existente entre cada una de las variables independientes consideradas como parámetros (módulo de elasticidad, nudosidad, densidad) y la variable dependiente (resistencia). La variación entre ambas puede ser estudiada a través del

análisis de regresión lineal múltiple, el cual permite estimar el modelo más adecuado para predecir los valores de la variable dependiente. Para tal fin se deben analizar distintos modelos de clasificación utilizando tanto parámetros individuales como combinados y verificar, en cada caso, si el incremento en la complejidad (mayor número de parámetros) junto a la consecuente mayor inversión se ven reflejados adecuadamente en los rendimientos obtenidos. Una vez determinada la aptitud de los parámetros como predictores de la resistencia en la especie evaluada, se debe seleccionar la máquina de clasificar más adecuada y proceder al ajuste de los procesos que ésta debe llevar a cabo (Hermoso Prieto 2001; Piter 2003).

Para la correspondiente asignación de cada pieza a un determinado grado, como lo ya mencionado oportunamente, la normativa argentina adopta el criterio europeo que considera como fundamentales a la resistencia en flexión, el módulo de elasticidad y la densidad (Glos 1995a). Es por ello que las máquinas clasificadoras registran en forma directa las dos últimas propiedades -algunas incorporan otros parámetros más- mientras que a través del modelo de regresión adoptado es estimada la resistencia. Las restantes propiedades mecánicas necesarias para el diseño estructural son determinadas a través de relaciones ya establecidas que las vinculan con las fundamentales (IRAM 9664 2013). Cabe destacar que, como las máquinas no pueden registrar todas las características, es necesario incorporar una inspección visual adicional al proceso mecánico orientada a detectar la presencia de grandes defectos. Actualmente existen normas que contemplan todos estos aspectos y también los referidos tanto al ajuste como al control de máquinas y procesos (EN 14081-1. 2016; EN 14081-2. 2010; EN 14081-3. 2012; SPIB 2014).

Las propiedades mecánicas de flexión, como ya fue expresado, son las fundamentales para la asignación de las clases resistentes. No obstante, tanto en el plano internacional (Colling 1995; EN 14080 2013) como en el nacional (IRAM 9662-3 2015), la tracción paralela a las fibras de la madera adquiere una importancia similar a las de flexión para el caso particular de las láminas destinadas a la fabricación de madera laminada encolada estructural (MLEE) (Burger y Glos 1995a; Glos y Lederer 2000). En nuestro país, la fabricación de este tipo de vigas ha experimentado un desarrollo que ha sido acompañado por la redacción de una serie de normas específicas (IRAM 9660-1,2 2015; IRAM 9661 2015; IRAM 9662-1,2,3,4 2015). En este sentido y teniendo en cuenta que a nivel mundial las máquinas de clasificar son instaladas ventajosamente en fábricas de MLEE, resulta

necesario también la realización de estudios de correlación entre la propiedades mecánicas de tracción y los diversos parámetros de clasificación para las distintas especies/procedencias, algunas de las cuales ya han sido abordadas en los últimos años (Cardoso *et al.* 2017; Fiorelli *et al.* 2009; Glos y Diebold 1994; Steiger *et al.* 2006, 2010).

Ventajas y desventajas

La clasificación mecánica convenientemente ajustada presenta una serie de ventajas respecto de la visual. Una de las principales lo constituye la posibilidad de alcanzar grados de calidad más elevados gracias a la mayor precisión del método. Los resultados obtenidos presentan una menor variabilidad como consecuencia del empleo de parámetros más estrechamente relacionados con la resistencia, tales como el módulo de elasticidad y la densidad, que aquellos apreciables visualmente. Otra ventaja constituye la asignación en forma directa de cada pieza a un determinado grado de calidad junto a una elevada velocidad de operación -en este sentido debe señalarse que las máquinas pueden clasificar más de 100 metros lineales de tabla por minuto- lo que, a su vez, disminuye la probabilidad de que se produzcan errores humanos.

Este sistema, sin embargo, tiene la desventaja de presentar un costo elevado que es mayor aún cuanto mejor sea su precisión. Por ende es necesario tener en cuenta el nivel de la inversión económica de acuerdo a la cantidad de material a clasificar, en otras palabras, este método se justifica sólo si existen volúmenes importantes. Las máquinas de flexión también presentan el inconveniente de que sólo clasifican piezas de una escuadría limitada. No obstante, considerando que los métodos mecánicos de clasificación por resistencia han adquirido un desarrollo importante para su aplicación en tablas destinadas a la construcción de MLEE, estas maquinarias pueden suponer una alternativa rentable para su instalación en fábricas de madera laminada encolada (Glos y Diebold 1994; Hermoso Prieto 2001; Herrero 2003).

2.4. Características de las plantaciones y de la madera de *Pinus elliottii* y *Pinus taeda*

En los apartados anteriores se analizaron las propiedades y aspectos más importantes de la madera como material estructural, también se presentó el estado actual del conocimiento en lo concerniente a la clasificación por resistencia, tanto visual como

mecánica. En este apartado se describen aspectos relacionados con el origen, disponibilidad y producción de las plantaciones de *Pinus elliottii* y *Pinus taeda*, asimismo se detallan los posibles usos y las características particulares de la madera proveniente de ambas especies. Finalmente se presentan aspectos relacionados al uso estructural de las piezas aserradas, focalizando en la normativa argentina y también en los avances logrados por parte de otros países.

2.4.1. Generalidades de las especies

Tanto el *Pinus taeda* como el *Pinus elliottii* son coníferas pertenecientes a la familia de las Pináceas y nativas del sudeste de Estados Unidos, donde se los conoce bajo el nombre vulgar de Loblolly Pine y Slash Pine respectivamente, y también se los suele llamar pino amarillo del sur debido a la coloración amarillenta que presenta su madera. Estas coníferas son de rápido crecimiento y se desarrollan en suelos de características variables, adaptándose mejor a los rojos profundos con buen drenaje (Di Marco 2014; Gilman y Watson 1994). En la Figura 2.22 se muestra la fotografía de una plantación joven de *Pinus taeda* en Misiones.



Figura 2.22. Plantación de 2 a 3 años de *Pinus taeda* (Dirección de Producción Forestal 2016)

Existen reportes que indican que tanto el *Pinus taeda* como el *Pinus elliottii* fueron introducidos en Argentina a comienzos de la década de los 70 con el fin de reemplazar a la madera de fibra larga empleada en las plantas celulósicas que hasta el momento era aportada por los montes nativos de *Araucaria angustifolia* que, para aquel entonces, habían presentado una merma importante (Bunse 2012). No obstante, Pereyra (1997) sostiene que el desarrollo de los bosques cultivados ya data de la década del 50 persiguiendo similar necesidad, la obtención de pasta de fibra larga. Tal postura también coincide con lo reportado por Di Marco (2014) y Fassola (2004), quienes señalan que el *P. taeda* ya había

sido introducido a finales de la década de 1940 aunque su importación masiva se dio años más tarde.

Estos pinos exóticos dieron excelentes resultados en nuestro país a pesar de las notables diferencias ecológicas de ambas regiones de cultivo, lo que demuestra la admirable adaptación de dichas especies (Tinto 1997). La alta tasa de crecimiento de los árboles y la buena trabajabilidad de su madera, junto al conocimiento de su aplicabilidad en el mercado de Estados Unidos, entre otros, fueron motivos de la gran aceptación de ambas especies por parte de la industria argentina, siendo a la vez elegidas por la mayoría de las empresas papeleras y aserraderos para su cultivo (Fassola 2004).

En cuanto a la apariencia de los árboles, ambas especies exhiben un aspecto exterior similar. Son pinos de gran porte que cuentan con una copa densa y piramidal con ramas inclinadas hacia arriba, y un tronco recto con corteza gruesa de color castaño y profundas hendiduras (Di Marco 2014), tal como puede observarse en la Figura 2.23. No obstante, el *P. taeda* se distingue por presentar un fuste más recto, ramas más gruesas y una mayor altura (30-35 metros) respecto del *P. elliotii* (18-30 metros) (Zaderenko 2000). Este último, a la vez, se destaca por sus cualidades para la extracción de resinas siendo considerado un excelente productor de miera. En contraste, el *P. taeda* se caracteriza por una escasa producción de dicha sustancia por lo que su explotación en tal ámbito no resulta conveniente (Pereira Mendes 2017).

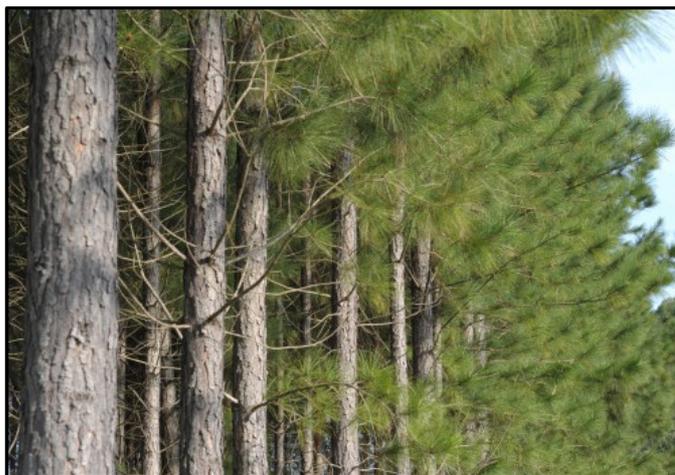


Figura 2.23. Pino resinoso del nordeste

2.4.2. Plantaciones y producción de madera aserrada

La madera es un recurso renovable que se integra perfectamente en las actuales tendencias encaminadas a preservar el medio ambiente, por lo que la legislación argentina no establece restricciones ambientales que limiten la actividad forestal. Además, como Argentina dispone de una gran variedad de climas y suelos junto a tierras aptas para forestación, la producción de diversas especies es económicamente competitiva. Por lo tanto, actualmente en nuestro país la productividad de las plantaciones es alta, e iguala o supera a la de muchos países tradicionalmente forestales. Los bosques implantados cubren aproximadamente una superficie de 1,12 millones de hectáreas de las cuales el 64% está constituido por coníferas, fundamentalmente *Pinus taeda/elliottii* y en menor medida otras especies como *Araucaria angustifolia*, *Pinus ponderosa* y *Pseudotsuga menziesii*, el 23% por eucaliptos, el 9% por salicáceas (sauces y álamos) y el 4% restante por otras de menor entidad como *Grevillea sp.*, *Paulownia sp.*, *Melia sp.*, *Robinia sp.*, *Prosopis sp.* y *Toona sp.* (Dirección de Producción Forestal 2016).

La mayor concentración de bosques cultivados del país se ubica en la Mesopotamia, conformada por las provincias de Misiones, Corrientes y Entre Ríos. La densidad de plantación comúnmente utilizada en esta región varía entre 800 y 1.600 plantas por hectárea (Di Marco 2014), destacándose principalmente los bosques implantados con coníferas. Éstos ascienden a 560.000 hectáreas solamente considerando las provincias de Misiones y Corrientes, lo que representa el 78% del total nacional forestado con dicho género. A la vez, de las 307.000 hectáreas ubicadas en la provincia de Misiones, el 83% se corresponde con plantaciones de pino resinoso, siendo los más difundidos el *Pinus taeda* seguido por el *Pinus elliottii* (Dirección de Producción Forestal 2016; SIFIP 2009). En la Figura 2.24 se presenta un gráfico con la distribución de las diferentes forestaciones de la provincia de Misiones discriminadas por género botánico y departamento.

Los pinos cultivados en el nordeste argentino suelen presentar turnos de rotación cortos gracias a la alta tasa de crecimiento anual de estos bosques, los que son favorecidos por el clima y la calidad de los suelos. Generalmente las rotaciones para madera aserrada están comprendidas entre los 16 y 30 años dependiendo de las especies, las características ecológicas de los sitios y el destino de la plantación o finalidad de la madera a ser producida (Chifarelli 2008; Dirección de Producción Forestal 2016), aspecto que determina a su vez la aplicación o no de tratamientos de silvicultura en los montes, tales como la práctica de poda

y la intensidad de los raleos (Di Marco 2014; Fassola 2004). En la Figura 2.25 puede observarse una plantación de pino resinoso ubicada en la provincia de Misiones.

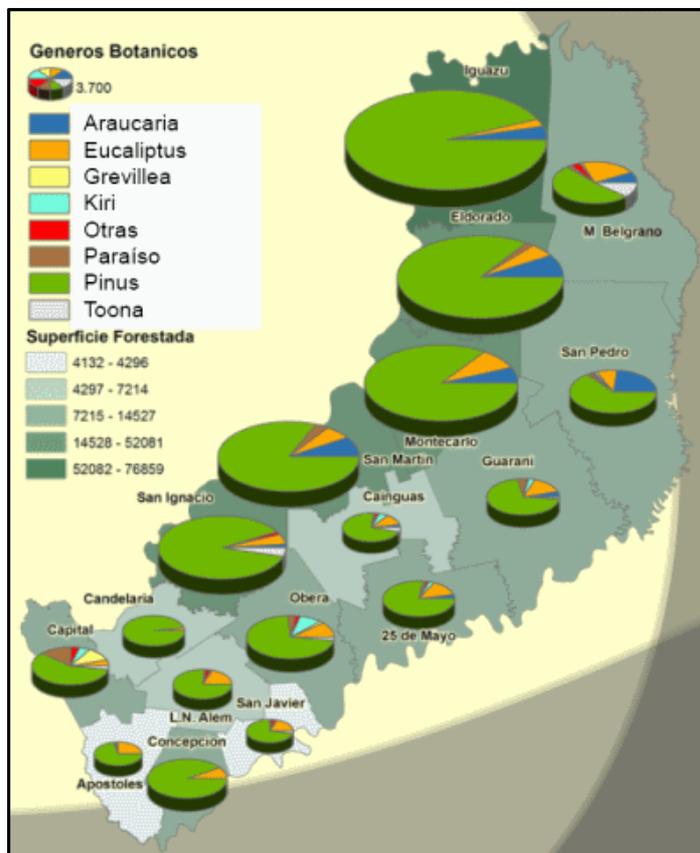


Figura 2.24. Especies forestadas en la provincia de Misiones (SIFIP 2009)



Figura 2.25. Plantación de pino resinoso en la provincia de Misiones

La producción de *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* en el país se ubica en un rango de 27 m³/ha a 30 m³/ha por año, pudiéndose alcanzar con plantas seleccionadas los 40 m³/ha por año. Cabe señalar que tal rendimiento únicamente es superado por el *Pinus caribaea* variedad hondurensis pero, como éste presenta una baja resistencia a las heladas, es de escasa difusión (Zaderenko 2000). No obstante, estas cifras aventajan ampliamente al crecimiento de ambas especies en su lugar de origen (Estados Unidos de América), el cual asciende solamente a 10 m³/ha por año.

Las extracciones de rollizos de los bosques implantados en Argentina, a nivel general, se han ido incrementando paulatinamente a lo largo de los años. En el 2012 se alcanzaron los 13.903.112 m³ (11.278.174 toneladas) de los cuales el 49% se destinó a la industria del aserrado, el 36% a la elaboración de pastas y el 15% a la industria de tableros y otras (Dirección de Producción Forestal 2016). Como se puede observar en el gráfico expuesto en la Figura 2.26, la madera de pino representa más del 50% de la materia prima rolliza consumida por la industria, superando ampliamente a las demás especies cultivadas (eucaliptos, salicáceas, etc.). Cabe destacar que Misiones aporta el 55% de la materia prima para la industria maderera del país, siendo la economía forestal la primera en orden de importancia económico productiva de dicha provincia (Zaderenko 2000).

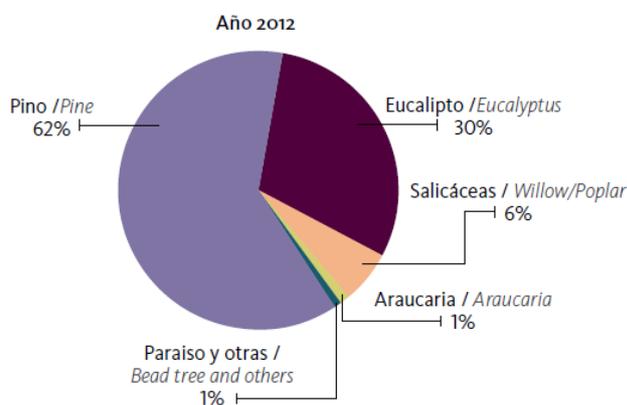


Figura 2.26. Consumo aparente de rollizos de madera de especies cultivadas (Dirección de Producción Forestal 2016)

La producción de madera aserrada, según estimaciones de la Dirección de Producción Forestal (2016), en el año 2012 fue de 3 millones de metros cúbicos aproximadamente y, conforme a diferentes relevamientos, en el año 2013 el sector contaba con 2.500 aserraderos, en su mayoría con un alto grado de automatización. Estas industrias se clasifican en grandes, medianas y chicas de acuerdo al volumen de producción, y presentan un

rendimiento variable entre 40% y 60% dependiendo del diámetro de los rollos, las escuadrías producidas y el método de aserrado (Zaderenko 2000). El principal segmento consumidor de madera aserrada del país es la construcción civil, se estima que un 45% del consumo está concentrado en dicho segmento, seguido por un 30% correspondiente a remanufacturas y muebles, y por un 20% correspondiente al sector de envases y pallets (Weber 2005). Cabe destacar que la madera aserrada proveniente del *Pinus taeda* como del *Pinus elliottii* es comercializada en forma conjunta, generalmente bajo la denominación de pino resinoso del nordeste. Esto se vincula a la dificultad para distinguirlos en forma práctica, considerando que sin un seguimiento del rollo dentro del aserradero resulta difícil su diferenciación luego del proceso de aserrado.

2.4.3. Características particulares de la madera

El *P. taeda* y el *P. elliottii* exhiben características anatómicas macroscópicas similares. Su madera es clasificada como liviana y presenta una textura fina y de grano derecho, presentando brillo mediano y aroma característico a resina. Su diseño es marcado y, como puede apreciarse en la Figura 2.27, presenta un veteado de franjas paralelas (rayado) en el corte longitudinal radial y arcos superpuestos (floreado) en el corte longitudinal tangencial. La albura es de tonalidad amarillenta y el duramen anaranjado a marrón rojizo (IFONA 2004; INTI. Maderas y Muebles 2010).



Figura 2.27. Veteado de una pieza de *Pinus elliottii*. Sup.: floreado. Inf.: rayado

Los anillos de crecimiento se hallan bien demarcados debido a que el leño tardío presenta un color más oscuro y bien notable respecto del leño temprano, lo cual genera una transición brusca entre ellos como puede observarse en la Figura 2.28. Los radios leñosos son poco visibles con lupa. Los canales resiníferos aparecen en la porción central del anillo y en el leño tardío, siendo visibles a simple vista en un corte transversal, mientras que son poco visibles y aparecen como manchitas blancuzcas cuando el mismo es tangencial (Di Marco 2014; INTI. Maderas y Muebles 2010).

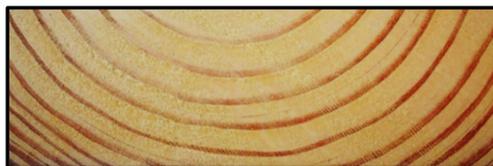


Figura 2.28. Anillos de crecimiento de una pieza de *Pinus taeda*

La madera de ambas especies presenta similar porosidad (64%), sin embargo se la clasifica como semipesada a la procedente del *Pinus elliottii* y como liviana a la del *Pinus taeda* puesto que la densidad aparente al 15% de humedad es un 20% mayor en la primera (540 kg/m³) respecto de la segunda (450 kg/m³). Por su parte, el *P. elliottii* es catalogado como dimensionalmente estable mientras que el *P. taeda* como medianamente estable, registrándose valores de la relación entre el índice de contracción tangencial y el de contracción radial (T/R) de 1,60 y 1,83, respectivamente (INTI. Maderas y Muebles 2010).

Respecto a la durabilidad natural, la madera proveniente de ambas especies es clasificada como poco durable, siendo la del *Pinus taeda* menor aún que la del *Pinus elliottii*. Se estima una durabilidad de 5 años para piezas enterradas en ambiente exterior, la cual puede incrementarse en usos sin contacto con el suelo. Como lo señalado en el Apartado 2.1.3, ambas zonas del leño presentan diferentes características lo cual también le confiere particularidades respecto a la durabilidad. El duramen es poco resistente al ataque de hongos y es susceptible al ataque de insectos crambícidos, anóbidos y termitas, mientras que la albura es muy sensible al ataque de hongos cromógenos que son los causantes de la mancha azul, efecto apreciable en la Figura 2.29. Estos hongos inician su acción sobre los troncos (rollizos) y luego la continúan en el material fresco aserrado, por lo que se recomienda un tratamiento preventivo anti-mohos, así como la utilización de equipos de pre-secado acelerado para evitar el ataque. Ante tratamientos que involucran líquidos impregnantes, en general se observa que el duramen resulta poco penetrado mientras que la albura se impregna con cierta facilidad (Di Marco 2014; Tinto 1997).



Figura 2.29. Pieza aserrada de *Pinus elliottii* afectada por hongos cromógenos

Ante el proceso de secado, ambas especies exhiben un comportamiento similar. El secado natural de las piezas se realiza sin mayores inconvenientes, a excepción de un posible ataque de hongos cromógenos. Frente al secado artificial, dicha madera también responde perfectamente, con nula o baja tendencia a rajarse, agrietarse o deformarse, admitiendo normas de secado acelerado (Di Marco 2014; INTI. Maderas y Muebles 2010). Para piezas provenientes de *Pinus taeda* implantado en Misiones, Zaderenko (2000) determinó el tiempo óptimo de secado por difusión en cámaras convencionales, el cual puede ser calculado a través de la aplicación de una expresión en la cual intervienen como variables el espesor y el contenido de humedad inicial de la madera, así como la temperatura y el potencial de secado de la cámara empleada.

Ambos pinos resinosos también presentan similares características frente a la trabajabilidad de su madera. Ésta no ofrece dificultades ante el aserrado, salvo que el contenido de resina llegue a embotar las sierras, por lo que suelen emplearse aquellas con dientes de gran longitud. A la vez, la misma puede ser trabajada con facilidad mostrando una buena terminación en el cepillado, sin embargo, ante ciertos recubrimientos superficiales pueden aparecer inconvenientes de adherencia debido a la presencia de resinas (Di Marco 2014; IFONA 2004).

La finalidad del *Pinus taeda/elliottii* es variada y los posibles usos dependen de la calidad de su madera. Parte de los rollizos son utilizados como postes impregnados, mientras que aquellos ejemplares de mejor conformación y dimensiones son aserrados para su posterior empleo en la construcción civil. Éstos también son destinados a la industria de remanufactura generando machimbres, molduras, tableros, listones, muebles, revestimientos interiores, pisos de poco tránsito, entre otros. La madera de grados inferiores, incluyendo la procedente de raleos, es destinada en forma masiva a la producción de pasta celulósica y paneles aglomerados (IFONA 2004; Tinto 1997).

2.4.4. Uso estructural de la madera

Los antecedentes sobre normativas y reglamentaciones referidas al empleo de la madera para fines estructurales en Argentina son relativamente recientes, siendo las especies renovables *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* las principales proveedoras de la materia prima destinada a la producción de madera aserrada para la construcción.

Otros países sudamericanos como Brasil y Uruguay tampoco cuentan con tradición en la materia, ambos han avanzado sobre estudios relacionados a la caracterización físico-mecánica del pino resinoso de ambas especies y actualmente se encuentran trabajando en la elaboración de sus respectivas normativas. En cambio, la situación contraria se da en los Estados Unidos, donde la madera fue desde el principio -y sigue siendo- el material de construcción más consumido, por lo que dicho país cuenta con una gran trayectoria en el tema.

Seguidamente se presenta una descripción detallada sobre la regulación del uso de la madera aserrada estructural en nuestro país, focalizando especialmente en la procedente del *Pinus taeda* y *Pinus elliottii*. Además se hace referencia a los avances logrados por parte de los demás países antes nombrados, los que también cultivan ambas especies.

Situación en Argentina

El “Reglamento Argentino de Estructuras de Madera (INTI CIRSOC 601 2016)” define los métodos y disposiciones generales a ser empleados en el diseño y construcción de estructuras para edificaciones y obras civiles con madera aserrada, madera laminada encolada y productos derivados de la madera. Este constituye el primer reglamento del país en la materia y fue desarrollado entre los años 2009 y 2010 por el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) y la Facultad Regional Concepción del Uruguay de la Universidad Tecnológica Nacional (FRCU-UTN). En 2011/2012 el documento estuvo abierto a discusión pública y la versión final fue presentada a finales del 2012, la que fue aprobada en el 2013 y puesta en vigencia legal recién a partir del año 2016.

Este trabajo científico-técnico es una importante actualización de los conocimientos del uso estructural de la madera en nuestro país. La redacción del texto sigue los lineamientos internacionales adoptados para desarrollar la segunda generación de Reglamentos Nacionales de Seguridad Estructural de la Secretaría de Obras Públicas de la Nación, es decir, el proyecto está basado en el documento National Design Specification (NDS) for Wood Construction - edición 2005 de la American Wood Council (AWC).

Esta nueva normativa (INTI CIRSOC 601 2016) se basa en maderas de origen nacional y cuenta con una serie de suplementos. En el Suplemento 1, particularmente, se muestran los valores de diseño de referencia de las propiedades correspondientes a la madera aserrada para uso estructural asociada a las distintas clases resistentes de cada combinación

especie/procedencia considerada. Por lo que, para el abordaje del diseño y cálculo de una estructura de madera, el calculista simplemente debe seleccionar de dicho suplemento el valor de diseño de referencia asociado a la calidad de madera adquirida en el mercado, la cual debió ser clasificada oportunamente de acuerdo a las especificaciones establecidas por la norma de clasificación visual por resistencia pertinente a cada caso.

Las normas de aplicación en vigas y tablas aserradas de pino resinoso (*P. elliotii* y *P. taeda*) del nordeste argentino se corresponden con la IRAM 9670 (2002) e IRAM 9662-3 (2015), respectivamente. Ambas fijan dos grados estructurales y establecen los requisitos que deben reunir las piezas que integran cada uno. El procedimiento a seguir con cada pieza consiste en ubicar visualmente el defecto de mayor incidencia (sección más débil) y determinar en base a él la correspondiente clase, es decir, la asignación a una determinada calidad queda definida por la situación más desfavorable.

Cabe destacar que, tanto las reglas nacionales de diseño estructural (INTI CIRSOC 601 2016) como las normas vigentes de clasificación visual por resistencia (IRAM 9662-3 2015; IRAM 9670 2002) consideran al *P. elliotii* y *P. taeda* como un grupo de especies puesto que, además de la dificultad para distinguirlas luego del proceso de aserrado, aún no se ha comprobado una diferencia significativa entre las propiedades físico-mecánicas de la madera procedente de ambas (Fank *et al.* 2017; Moya *et al.* 2015a, 2015b; Santini *et al.* 2000).

La norma IRAM 9670 (2002) es aplicable sobre aquellos elementos estructurales ubicados de canto y sometidos principalmente a esfuerzos de flexión, cuyas escuadrías nominales van de 1-3 pulgadas de espesor por 3-10 pulgadas de ancho y presentan un contenido de humedad del $15\% \pm 3\%$ al momento de clasificarlos. Los criterios de clasificación se presentan de forma resumida en la Tabla 1 de la norma (IRAM 9670 2002), la cual es exhibida en la Figura 2.30. En esta aparecen los defectos admisibles, las unidades de medida y los límites pertinentes que debe cumplir cada pieza para pertenecer a una determinada clase. La norma, a su vez, en su texto aclara que las piezas deben estar libres de defectos no admisibles, tales como acebolladuras, madera de compresión, madera de pudrición, madera con perforaciones de insectos, colapso y nudos en racimo. Por otra parte, para los grados de calidad definidos, dicha norma también brinda los valores correspondientes a la resistencia característica en flexión, tracción, compresión y corte, además del módulo de elasticidad en flexión (Anexo B de la IRAM 9670 2002, ver Figura 2.31).

Defectos admisibles de la madera	Característica	Unidad	Requisitos	
			Grado 1	Grado 2
Inclinación de grano	Inclinación de grano	cm/cm	1/10	1/8
Nudo en zona central de la cara ¹⁾	Diámetro medio	mm	Menor o igual a 0,37 a	Menor o igual a 0,62 a
Sumatoria de los diámetros de nudos en una longitud igual al ancho de la cara ¹⁾	Dimensión en la cara o canto	mm	Menor o igual a 2 veces el diámetro máximo permitido en la cara	Menor o igual a 2 veces el diámetro máximo permitido en la cara
Nudo en zona de borde de la cara ¹⁾	Dimensión en la cara	mm	Menor o igual a 0,24 a.	Menor o igual a 0,44 a
Nudo en el canto ¹⁾	Dimensión en el canto	mm	Menor o igual a 0,50 e.	Menor o igual a 0,75 e
Rajaduras en los extremos	Largo	mm	Igual al ancho	1,5 del ancho
Grietas superficiales de secado	-	-	Admitidas	Admitidas
Grietas laterales	Profundidad	mm	0,25 e	0,60 e
Combado	-	mm/100 mm	0,50 % del largo	0,90 % del largo
Encurvado	-	mm/100 mm	0,25 % del largo	0,50 % del largo
Revirado	-	mm/100 mm	0,50 % del largo	0,90 % del largo
Abarquillado	-	mm/100 mm	1 % del ancho	2 % del ancho
Manchado	-	-	Se admite siempre y cuando no afecte la terminación final	Se admite siempre y cuando no afecte la terminación final
Agujeros de nudo, Nudos saltadizos	-	-	Se evalúan como nudos sanos pero se admiten hasta 1 por metro lineal.	Se evalúan como nudos sanos pero se admiten hasta 3 por metro lineal.
Médula	-	-	Se admite	Se admite
Arista faltante	-	-	No se admite	Se admite una sola arista faltante que abarque hasta 1/4 del espesor, 1/4 del ancho, y que esté ubicada en los cuartos extremos de la viga.
Número promedio de anillos por pulgada	-	-	Igual o mayor que 2	Menor que 2

Figura 2.30. Resumen de los criterios de clasificación visual de la norma IRAM 9670 (2002)

Valores de la madera de Grado 1

Resistencia característica en flexión	23,9 N/mm ²
Resistencia característica en tracción	12,0 N/mm ²
Resistencia característica en compresión paralela a las fibras	23,9 N/mm ²
Resistencia característica en compresión perpendicular a las fibras (aplastamiento)	5,8 N/mm ²
Resistencia característica en corte	2,7 N/mm ²
Módulo de elasticidad a la flexión	9000 N/mm ²

Valores de la madera de Grado 2

Resistencia característica en flexión	11,9 N/mm ²
Resistencia característica en tracción	6,0 N/mm ²
Resistencia característica en compresión paralela a las fibras	11,9 N/mm ²
Resistencia característica compresión perpendicular a las fibras (aplastamiento)	5,8 N/mm ²
Resistencia característica en corte	2,7 N/mm ²
Módulo de elasticidad a la flexión	7500 N/mm ²

Figura 2.31. Valores característicos que se espera presenten las piezas de madera que cumplan con la norma IRAM 9670 (2002)

La norma IRAM 9662-3 (2015), por su parte, es aplicable a tablas para uso estructural flexionadas de plano y para aquellas destinadas a la fabricación de madera laminada encolada estructural (MLEE). En ambos casos las piezas aserradas deben contar con un espesor menor o igual a 50 mm junto a una relación espesor-ancho menor o igual a 1:2 y, además, la madera debe acusar un contenido de humedad del 16% como máximo. Valor coincidente con el establecido por la norma IRAM 9660-1 (2015), la cual fija que el contenido

de humedad de las láminas al momento del encolado debe estar comprendido entre 7% y 16%. Un resumen de los criterios de clasificación visual establecidos por la IRAM 9662-3 (2015) aparece en la Tabla 1 de la misma, la cual es expuesta en la Figura 2.32. Los daños mecánicos, los depósitos de resina y otros defectos no contemplados en dicha tabla se registran y definen por el debilitamiento que originan sobre la sección transversal de la pieza observada, asimilándolos a alguna característica definida que provoque similar efecto sobre las propiedades mecánicas. Esta norma también provee los valores característicos para la resistencia a flexión y a tracción, el módulo de elasticidad y la densidad asociados a las dos clases resistentes establecidas (Anexo B de la IRAM 9662-3 2015, ver Figura 2.33).

Defecto		Unidad	Clase 1	Clase 2
Médula		–	No se admite	Se admite
Nudosidad		cm/cm	Menor o igual a 1/3	Menor o igual a 2/3
Dirección de las fibras		cm/cm	Desviación menor que 1:9	Desviación menor que 1:7
Anillos de crecimiento		mm	Menor que 10	Menor que 15
Fisuras	No pasantes	m	El largo de las fisuras no pasantes no debe ser mayor que 1,50 m y que 1/2 del largo de la pieza.	
	Pasantes	m	El largo de las fisuras pasantes no debe ser mayor que 1,0 y que 1/4 del largo de la pieza. En los extremos, su largo no debe ser mayor que 2 veces al ancho de la tabla.	
Combadado y encorvado		mm	Menor a 12	
Revirado		mm/mm	Menor que 2 mm por cada 25 mm de ancho.	
Abarquillado			Sin restricciones para el abarquillado	
Arista faltante		mm/mm	Transversalmente menor que 1/3 de la cara o canto donde aparece Sin restricciones para la longitud	
Ataques biológicos		–	No se admiten zonas atacadas por hongos causantes de pudrición. Se admiten zonas atacadas por hongos cromógenos. Se admiten orificios causados por insectos con diámetro inferior a 2 mm	
Madera de reacción		mm/mm	Menor o igual a 2/5.	Menor o igual a 3/5.
Otros		–	Daños mecánicos, depósitos de resina y otros defectos se limitan por analogía con alguna característica similar.	

Figura 2.32. Resumen de los criterios de clasificación visual de la norma IRAM 9662-3 (2015)

Clase de resistencia	Resistencia a la flexión (N/mm ²)	Resistencia a la tracción (N/mm ²)	Módulo de elasticidad (N/mm ²)	Densidad (kg/m ³)
1	18,0	11,0	12 000	420
2	11,0	7,0	7 000	390

Figura 2.33. Valores característicos de las propiedades mecánicas y densidad para cada clase de resistencia (IRAM 9662-3 2015)

En cuanto a los procesos de clasificación mecánica, como lo señalado en el Apartado 2.3.2, en las empresas argentinas aún no han sido implementados. No obstante, las actividades llevadas a cabo en los últimos años entre el sector científico-tecnológico y el productivo -donde se destacan la edición de modernas normas referidas al estudio de la madera estructural y a los procesos de fabricación y control de la MLEE- hacen que el diseño de un método mecánico de clasificación por resistencia emerja como un medio adecuado para potenciar el avance que significó -en 2006- la adopción del método visual aún vigente y, a la vez, superar los problemas que actualmente presenta su implementación.

El panorama actual de Argentina frente a la construcción con madera es muy optimista, ya que la puesta en vigencia del primer reglamento sobre estructuras de madera (INTI CIRSOC 601 2016) coloca a este material de construcción en el mismo plano que el hormigón y el acero, abriendo así un campo de aplicación para los profesionales del rubro. En el año 2017 la construcción con madera recibió un impulso oficial de gran envergadura. En primer lugar se conformó la Mesa Nacional de la Construcción con Madera con el objetivo de impulsar el crecimiento cuantitativo de este tipo de construcción y el mejoramiento de la calidad mediante la incorporación de tecnología y la normalización de procedimientos. A su vez, la Secretaría de Obras Públicas de la Nación invitó a las provincias a actualizar los códigos de edificación que rigen sus obras. Sumado a lo antedicho, ese mismo año también se suscribió un Convenio de colaboración para la promoción de la construcción con madera para construir viviendas sociales de dicho material. Esto está vinculado, a su vez, con la reciente aprobación de una guía para proyectar estructuras de madera con bajo compromiso estructural en base al CIRSOC 601 (Piter *et al.* 2018).

La implementación del reglamento (INTI CIRSOC 601 2016) también conduce a tareas de revisión de la información disponible sobre las características físico-mecánicas de las especies forestales de cultivo en nuestro país, la realización de más ensayos de resistencia de la madera para complementar las ya existentes, y el desarrollo local de elementos de unión que respondan a las nuevas exigencias, entre otros. En relación con la madera aserrada para uso estructural de pino resinoso (*P. elliotii*, *P. taeda*) cultivado en el nordeste argentino, actualmente no se disponen de estudios integrales y gran parte de la información existente es la que se encuentra plasmada en las normas antes descriptas (IRAM 9662-3 2015; IRAM 9670 2002).

Situación en Estados Unidos, Brasil y Uruguay

Estados Unidos es un país que se destaca por presentar una larga trayectoria en el empleo de la madera para fines estructurales, lo que lo transforma en el mayor consumidor de productos forestales a nivel mundial. A la vez, gracias al rendimiento de sus bosques se posiciona en el segundo lugar entre los países productores (FAO 2000). Aquellas especies de apariencia semejante con similares propiedades mecánicas y/o por conveniencias comerciales, usualmente son consideradas agrupadas bajo cierta denominación. Por ejemplo, el pino del sur (Southern Pine) está integrado por 4 especies entre las cuales están incluidas el *Pinus elliottii* y el *Pinus taeda*. En relación a este grupo, en el año 1915 se formó la Southern Pine Association (SPA) para promover la creación de normas de regulación comunes para todo el país, ya que anteriormente cada región publicaba sus propias reglas adoptando diferentes métodos. En el año 1941 fue creada la Southern Pine Inspection Bureau (SPIB) como una organización sin fines de lucro dedicada a la industria del pino del sur de los Estados Unidos.

Actualmente el SPIB cuenta con un equipo de supervisores de calidad encargado de la inspección de las prácticas de clasificación, brindando capacitaciones dirigidas a los clasificadores para que los aserraderos puedan sostener un alto grado de eficiencia en la clasificación y en el cumplimiento de las exigencias relacionadas con los productos terminados. Además de las tareas de inspección, el SPIB ofrece un amplio programa de estandarización de prácticas de clasificación y fabricación. En resumen, este organismo desempeña un papel integral en el apoyo a la industria de la madera de pino, ya que al mantener los estándares de calidad del producto inspira confianza entre los fabricantes, compradores y consumidores, lo que beneficia a la industria en general (Carreira y Alves Dias 2006).

Se estima que actualmente más del 95% de la producción industrial de pino en EEUU es clasificada y comercializada conforme a la regla “Standard Grading Rules for Southern Pine Lumber” (SPIB 2014). Ésta fue escrita y publicada por el SPIB y, al igual que todas las demás reglas de clasificación de Estados Unidos, está fundamentada en la norma ASTM D245 (2011). SPIB (2014) proporciona las características permitidas en la madera de pino del sur para cada una de las diferentes calidades consideradas dependiendo de la finalidad del elemento analizado. Por ejemplo, para la madera aserrada de uso estructural fija 4 grados estándares (Selecto estructural, N° 1, N° 2, N° 3). A su vez, discrimina previamente

a las maderas de coníferas entre densas y no densas, lo cual es evaluado a través de los anillos de crecimiento. Los valores de diseño asociados a cada calidad son proporcionados por la norma norteamericana NDS (2012), la cual en el Suplemento “valores de diseño para la construcción en madera” los expone en una serie de tablas. En tal normativa también aparecen bajo la categoría “madera no densa” los valores para el pino resinoso proveniente de Misiones (Argentina). Por su parte, la norma argentina de clasificación IRAM 9670 (2002) presenta en carácter informativo la relación existente entre las calidades propuestas por ésta y las reglas SPIB (2014).

Un caso completamente diferente al antes descrito se da en los países Sudamericanos. Además de Argentina, también Brasil y Uruguay producen *Pinus elliottii/taeda* y están avanzando en estudios sobre caracterización de ambas especies así como en la elaboración de normativas. En estos países el uso estructural de la madera ha ido en crecimiento y hoy en día es común la producción en ciclos cortos debido a la falta de oferta de árboles adultos. Brasil es uno de los cinco países que concentran la mitad de la superficie boscosa a nivel mundial. Uruguay, por su parte, presenta un desarrollo de la foresto-industria menor que Brasil pero, como consecuencia de políticas gubernamentales para promover las plantaciones, a partir del 2000 la extracción de madera viene registrando un incremento permanente (Biani *et al.* 2009).

Brasil dispone del reglamento “Proyecto de estructuras de madera NBR 7190 (1997)” que establece los requisitos generales que se deben seguir para el diseño, construcción y control de las estructuras de madera. Una renovación del mismo fue aprobada en el año 2011, pero no se encuentra en vigencia legal por no incorporar ciertos métodos capaces de garantizar el cumplimiento de todas las especificaciones de la NBR. Por ejemplo, esta reglamentación no permite el empleo de madera de coníferas sin clasificar pero tampoco abarca los procedimientos para su correspondiente clasificación por resistencia. En los últimos años una comisión conformada por investigadores ha estado trabajando en un proyecto sobre ensayos complementarios a la NBR 7190 con el fin de que formen parte de dicho reglamento. Este proyecto, que aún no ha sido aprobado oficialmente, es llamado “Método de ensaio para classificação e caracterização de peças estruturais de madeira” y proporciona recomendaciones para la clasificación y caracterización de la madera estructural basándose en las reglas establecidas por el SPIB (2014), el método permite

separar las piezas por clase de resistencia (Selecto Estructural, S1, S2 y S3) pero no proporciona valores característicos de diseño.

Actualmente el Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) junto a la Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo (EESC-USP) están trabajando en un proyecto de clasificación visual por resistencia para la madera aserrada estructural del *Pinus elliottii/taeda* cultivado en Brasil. Dicha propuesta fue elaborada teniendo en cuenta los criterios contemplados por las reglas SPIB (2014) y por la norma IRAM 9662-3 (2015), y como parámetros clasificatorios fueron adoptados solamente aquellos defectos fácilmente verificables por graduadores humanos (nudos, fisuras, médula, etc.). El proyecto de clasificación visual fija tres calidades estructurales (C1, C2, C3) que se vinculan a ciertos valores característicos de resistencia y rigidez, los cuales fueron determinados a través de ensayos de laboratorio en escala estructural (Ballarin *et al.* 2017).

Uruguay, por su parte, no cuenta hoy en día con reglas de diseño para la construcción en madera. No obstante, se está trabajando en una propuesta de norma para madera estructural cuyo objetivo es adoptar al Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2006) como reglamento base para el diseño y cálculo estructural. A su vez, se contempla la redacción de anexos nacionales conformados por documentos técnicos destinados a presentar los parámetros de determinación nacional y, opcionalmente, información complementaria. Desde hace algunos años en este país se está avanzando sobre estudios de caracterización de especies para la subsecuente elaboración de normativas (Cardoso *et al.* 2017; Moya *et al.* 2015a, 2015b, 2017; Pérez del Castillo 2001; Pérez del Castillo *et al.* 2000). En el año 2015 fue presentado un proyecto para la caracterización estructural de madera aserrada de pinos resinosos cultivados en Uruguay (Moya *et al.* 2015a), y en el 2017 fue elaborada una propuesta de clasificación visual del *Pinus taeda/elliottii* uruguayo (Moya *et al.* 2017), la cual establecía un único grado visual llamado EC7 (Madera de conífera estructural) cuyas propiedades características corresponden a las del grado C14 del sistema internacional de clases resistentes adoptado en Europa (EN 338 2016). Finalmente en el año 2017 se conformó el comité "Madera estructural" del Instituto Uruguayo de Normas técnicas (UNIT), el cual publicó recientemente la norma UNIT 1261 (2018) con la clasificación visual del pino resinoso (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*). La misma establece dos calidades (EC1 y EC0) - modificando la propuesta inicial de Moya *et al.* (2017)- y presenta los valores característicos de resistencia a flexión, módulo de elasticidad y densidad asociados.

CAPITULO III

PROGRAMA EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se describen los materiales y métodos involucrados en el desarrollo del programa experimental de este trabajo de investigación. El Apartado 3.1 hace referencia a la obtención de los materiales y a la preparación de las diferentes muestras, mientras que el Apartado 3.2 detalla los métodos de ensayo, abarcando el proceso desarrollado desde la preparación de los cuerpos de prueba hasta la determinación de las propiedades, como así también las técnicas utilizadas para el procesamiento de los datos.

3.1. Materiales

3.1.1. Obtención del material

El material destinado a la investigación empírica estuvo constituido por piezas de madera aserrada en tamaño estructural de pino resinoso de las especies *Pinus taeda* y *Pinus elliottii*, el mismo provino de plantaciones con origen certificado cultivadas en Misiones (Argentina) y fue suministrado por una reconocida empresa maderera oriunda de dicha provincia.

Los árboles de *Pinus taeda* fueron obtenidos de tres plantaciones localizadas en el departamento Montecarlo, la de 30 años de edad fue sometida a dos turnos de poda, la de 15 años a dos raleos y un turno de poda y la restante, de 19 años de edad, a un raleo. Por su parte, los de *Pinus elliottii* fueron extraídos de dos forestaciones, una de 27 años de edad ubicada en el departamento antes mencionado, sobre la cual no registró práctica de

silvicultura alguna, y otra de 29 años de edad localizada en el departamento Libertador General San Martín, la que fue sometida a dos raleos y un turno de poda.

El criterio de selección de las piezas aserradas se orientó a lograr una muestra representativa de la calidad general del material producido, es decir, estas fueron elegidas al azar con el propósito que el material destinado a ensayos represente adecuadamente las características naturales de las especies estudiadas y los procesos de producción empleados para su transformación en piezas estructurales (IRAM 9664 2013). En cuanto a las dimensiones, fueron consideradas aquellas secciones transversales representativas de los tamaños estructurales usuales para este material en Argentina. Se adoptaron 4 secciones típicas de vigas (50x100 mm, 50x150 mm, 75x150 mm y 75x200 mm) y 1 sección de tablas (100x25 mm), la cual es de uso frecuente tanto en calidad de madera aserrada estructural como en la condición de lámina destinada a la construcción de vigas laminadas encoladas.

Luego de realizado el apeo y corte de trozas, el aserrado se produjo siguiendo los procesos habituales del establecimiento que la empresa proveedora del material utiliza para su producción. Posteriormente, la madera producida fue sometida a un tratamiento de estabilización y secado técnico con un contenido de humedad máximo del 12% a través de cámaras especiales de secado. Las piezas aserradas ya secas fueron trasladadas al Laboratorio de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Concepción del Uruguay de la Universidad Tecnológica Nacional (FRCU-UTN), donde fueron identificadas adecuadamente por especie y lote (ver Figura 3.1).



Figura 3.1. Piezas aserradas sin cepillar dispuestas en el laboratorio

Con la madera ya dispuesta en el laboratorio, se procedió al cepillado por las cuatro caras de cada una de las piezas para conseguir las dimensiones transversales finales requeridas, tarea que fue llevada a cabo a través de una cepilladora a una cara (MARZICA

ZC 406) como puede apreciarse en la Figura 3.2. Un detalle de la madera aserrada cepillada destinada a la preparación de las diferentes muestras es presentado en la Tabla 3.1. En ésta aparecen, discriminadas por tamaño de la sección transversal nominal de las piezas, las cantidades asociadas a cada una y la dimensión real promedio de éstas junto a la especie y edad del árbol del cual provienen.

Tabla 3.1. Detalle de las piezas aserradas cepilladas

Piezas	Especie	Edad del árbol [años]	Cantidad de piezas	Dimensión real promedio [mm]
Vigas de sección nominal 50 mm x100 mm	<i>Pinus elliottii</i>	27	25	45,3 x 100,1 x 3659,8
		29	7	45,5 x 100,2 x 4276,0
	<i>Pinus taeda</i>	30	25	45,1 x 100,1 x 4270,4
		15	7	45,7 x 100,2 x 4276,0
Vigas de sección nominal 50 mm x 150 mm	<i>Pinus elliottii</i>	27	25	44,4 x 150,1 x 4268,8
		29	4	45,7 x 149,7 x 4269,8
	<i>Pinus taeda</i>	30	25	45,0 x 150,1 x 4269,7
		15	7	45,2 x 149,9 x 4275,9
Vigas de sección nominal 75 mm x 150 mm	<i>Pinus elliottii</i>	27	25	70,0 x 150,1 x 4275,2
	<i>Pinus taeda</i>	19	25	69,8 x 150,4 x 4272,0
Vigas de sección nominal 75 mm x 200 mm	<i>Pinus elliottii</i>	27	25	68,7 x 193,5 x 4269,0
	<i>Pinus taeda</i>	30	25	68,6 x 197,6 x 4269,1
Tablas de sección nominal 100 mm x 25 mm	<i>Pinus elliottii</i>	27	100	106,0 x 24,4 x 3658,4
	<i>Pinus taeda</i>	30	100	104,6 x 24,4 x 3658,1



Figura 3.2. Proceso de cepillado de las piezas aserradas

3.1.2. Preparación de las muestras

Del conjunto de piezas de madera aserrada recibidas en el laboratorio (ver Tabla 3.1) se diseñaron 7 muestras, de las cuales 5 fueron destinadas para ensayos a flexión estática, 1 para ensayos a tracción paralela a las fibras y la restante para ensayos a flexión con carga de larga duración, buscando en cada caso que la proporción de madera de *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* fuera similar dentro de lo posible.

Conforme a la base estadística que requiere la calibración de la seguridad según los modernos lineamientos del diseño estructural (INTI CIRSOC 601 2016; IRAM 9664 2013), cada muestra se preparó con más de 40 cuerpos de prueba en tamaño estructural. Cabe señalar que la muestra M7 se conformó con un menor número de piezas ($n = 14$) debido a que la misma está destinada a ensayos de flexión con cargas de larga duración, lo cual implica la disposición de un espacio físico adecuado como así también del instrumental requerido por un período de tiempo no menor a un año. Asimismo, cada muestra se conformó por piezas con dimensiones nominales iguales entre sí pero variables entre muestras, representando en su conjunto las secciones típicas destinadas a fines portantes en el país. En la Figura 3.3 puede ser apreciada una pieza aserrada representativa de cada una de las secciones transversales adoptadas en el presente trabajo de investigación.



Figura 3.3. De izq. a der.: Secciones transversales correspondiente a piezas aserradas 100x25 mm, 50x100 mm, 50x150 mm, 75x150 mm y 75x200 mm

Para la preparación de los diferentes cuerpos de prueba se tuvo en cuenta la longitud total mínima que debe satisfacer cada probeta. La norma IRAM 9663 (2013) fija: i) una separación entre apoyos igual a 18 veces la altura de la sección para probetas destinadas a ensayos a flexión, y ii) una longitud libre entre mordazas de al menos 9 veces la mayor medida de la sección transversal para aquellas destinadas a ensayos a tracción paralela a las fibras. La zona crítica de cada cuerpo de prueba fue ubicada de forma tal

que sea sometida a ensayo (IRAM 9663 2013). Contemplando la longitud reglamentaria mínima y teniendo en cuenta las secciones más débiles de cada pieza, la selección de los cuerpos de prueba se realizó disponiendo el tramo con los mayores defectos de la pieza en la zona de máximo esfuerzo prevista para los ensayos a flexión, el cual se corresponde con el tercio central (ver Figura 3.4), y dentro de la longitud libre entre mordazas para los ensayos de tracción. Esto pudo ser llevado a cabo en todos aquellos casos donde tanto el largo total de la pieza como la ubicación de los peores defectos así lo permitieron.

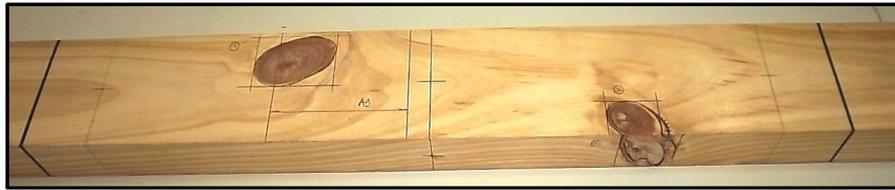


Figura 3.4. Tercio central correspondiente a un cuerpo de prueba de sección 50x100 mm

De cada viga completa (ver Tabla 3.1) se seleccionó un solo cuerpo de prueba, a excepción de algunos casos puntuales pertenecientes al grupo de vigas de sección transversal nominal 50x100 mm donde fue posible la selección de 2 probetas. De cada tabla completa (ver Tabla 3.1), en cambio, se obtuvieron al menos tres cuerpos de prueba de los cuales uno fue destinado para ensayos a tracción paralela a las fibras y los restantes para ensayos a flexión. En este último caso se escogió más de una probeta con el objetivo de abarcar un rango de nudosidad más amplio, considerando que un vasto número de tablas presentaban nudos que ocupaban un gran porcentaje de la sección transversal de la pieza. En la Tabla 3.2 se exhibe un detalle de las muestras preparadas para el trabajo experimental, en la misma se especifica la especie, la cantidad de cuerpos de prueba junto a las correspondientes dimensiones nominales. En la Figura 3.5 se puede apreciar un cuerpo de prueba de la especie *Pinus elliottii* perteneciente a la muestra M5 destinada a ensayo de flexión estática.

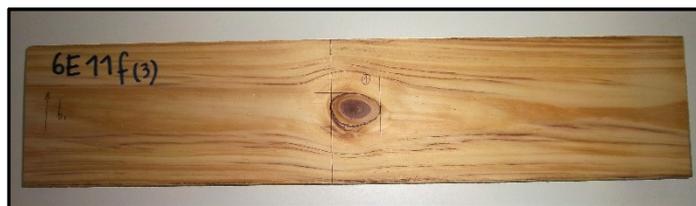


Figura 3.5. Cuerpo de prueba perteneciente a la muestra M5

Tabla 3.2. Detalle de las muestras diseñadas

Muestra	Especie	n	Dimensiones nominales [mm]
M1 (Ensayos a flexión estática)	<i>Pinus elliottii</i>	25	45 x 100 x 2000
	<i>Pinus taeda</i>	39	
	Total	64	
M2 (Ensayos a flexión estática)	<i>Pinus elliottii</i>	29	45 x 150 x 3000
	<i>Pinus taeda</i>	32	
	Total	61	
M3 (Ensayos a flexión estática)	<i>Pinus elliottii</i>	25	70 x 150 x 3000
	<i>Pinus taeda</i>	25	
	Total	50	
M4 (Ensayos a flexión estática)	<i>Pinus elliottii</i>	25	70 x 200 x 4000
	<i>Pinus taeda</i>	25	
	Total	50	
M5 (Ensayos a flexión estática)	<i>Pinus elliottii</i>	116	105 x 25 x 500
	<i>Pinus taeda</i>	117	
	Total	233	
M6 (Ensayos a tracción paralela a las fibras)	<i>Pinus elliottii</i>	50	105 x 25 x 1300
	<i>Pinus taeda</i>	51	
	Total	101	
M7 (Ensayos a flexión con cargas de larga duración)	<i>Pinus elliottii</i>	7	45 x 100 x 2500
	<i>Pinus taeda</i>	7	
	Total	14	

Nota. n: cantidad de cuerpos de prueba.

3.2. Ejecución del programa experimental

En el Laboratorio de Ingeniería Civil de la FRCU-UTN fueron llevadas a cabo todas las determinaciones experimentales. Para que los resultados de las mismas puedan ser comparables tanto a nivel nacional como internacional, los cuerpos de prueba fueron previamente acondicionados en una cámara climatizada a 20 ± 2 °C de temperatura y 65

+/- 5% de humedad relativa ambiente conforme a los requerimientos de la norma argentina IRAM 9663 (2013), basada en la norma europea EN 408 (2012).

3.2.1. Registro de las dimensiones y características visuales

Todos los cuerpos de prueba fueron identificados con marcas resistentes. Las dimensiones reales de cada uno fueron registradas con una precisión del 1% de acuerdo a lo establecido por la norma IRAM 9663 (2013). Las medidas del ancho y alto de la sección transversal fueron estimadas como la media de tres comprobaciones efectuadas al 0,01 mm en diferentes puntos de la longitud (ambos extremos y centro), mientras que la del largo fue registrada al milímetro sobre el eje longitudinal, en la zona central de la cara de mayor dimensión.

Los tipos de corte pertinentes a ambos extremos de cada cuerpo de prueba también fueron asentados, indicando en cada caso el correspondiente (central con médula, central sin médula, radial, tangencial o intermedio) junto a la posición de la médula en aquellos casos donde ésta estaba presente. En la Figura 3.6 se pueden apreciar los tipos de corte más usuales que presentaron las piezas aserradas que integran el material de esta investigación.



Figura 3.6. Tipos de corte. De izq. a der.: Central con médula, central sin médula, tangencial

En cada uno de los cuerpos de prueba fueron registradas aquellas características visuales que afectan a la estructura interna de la madera, es decir, que pueden influir sobre las propiedades mecánicas y físicas del material en estudio. Asimismo, también fueron relevadas aquellas características geométricas, tales como deformaciones, que adquieren importancia en aspectos complementarios y además pueden afectar indirectamente en el comportamiento resistente.

La descripción y registro de las características antes señaladas fue llevada a cabo a través de planillas confeccionadas (ver Anexo) conforme al análisis teórico efectuado en el

Apartado 2.2. y teniendo en cuenta los modernos lineamientos tanto nacionales (IRAM 9662-3 2015; IRAM 9670 2002) como internacionales (ASTM D245 2011; DIN 4074-1 2012; EN 1310 1997; Nch 1207 2017; SPIB 2014; UNE 56544 2011) referidos a la madera aserrada estructural de coníferas. A continuación se especifica el modo adoptado para medir y registrar cada uno de los parámetros considerados en la presente investigación.

Nudos

Se relevaron los nudos de todas las caras de cada cuerpo de prueba ignorándose únicamente aquellos con dimensiones menores a 5 mm. Dicha tarea consistió en delimitar, marcar y enumerar cada nudo, luego en una planilla fueron registradas las dimensiones correspondientes a cada uno junto a su ubicación relativa dentro de la pieza, incorporándose también una descripción de los mismos y, de forma complementaria, fueron tomadas fotografías. De igual modo fueron delimitados los agrupamientos de nudos y nudos en racimo, cuya información también fue asentada en la misma planilla. En la Figura 3.7 puede observarse el relevamiento de los nudos representado a través de un cuerpo de prueba y la planilla de registro.

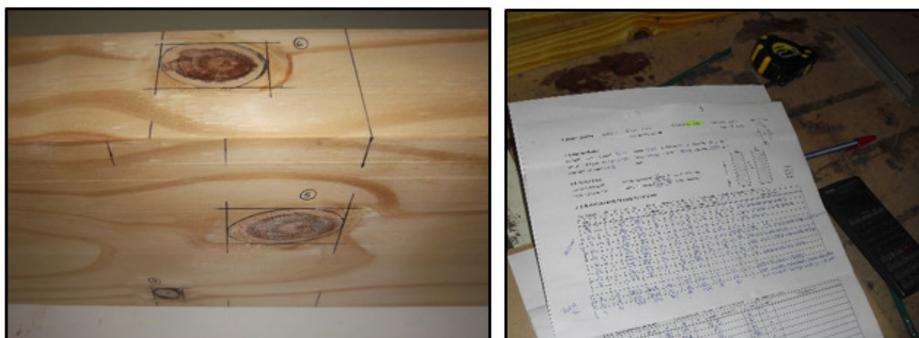


Figura 3.7. Relevamiento de nudos

Como los nudos son más frecuentes en las maderas resinosas y constituyen una singularidad que produce un gran efecto perjudicial sobre la resistencia, resulta oportuno investigar en profundidad la influencia que ejerce este parámetro visual sobre las propiedades mecánicas del *Pinus taeda/elliottii* en estudio. Con tal finalidad fueron considerados 5 criterios para medir la nudosidad, denominándolos bajo las siglas K, KAR, KAR 150, KARM y KARM 150. Todos tratan de interpretar lo que sucede dentro de la pieza y son aplicables de forma indistinta tanto en vigas como en tablas. El primero está basado en el principio de la medida de apariencia y expresa la relación entre el tamaño

del nudo y la dimensión de la superficie externa en la cual se manifiesta. Mientras que los demás (KAR: Knot Area Ratio) analizan el desplazamiento que genera el nudo (o nudos) en la sección transversal de la pieza en la cual aparece, es decir, indican la relación entre la proyección del nudo sobre la sección transversal de la probeta y el área de ésta. En la Figura 3.8 se esquematizan ambos principios de medición de la nudosidad: por apariencia y por desplazamiento.



Figura 3.8. Medición de un nudo. Izq.: por apariencia. Der.: por desplazamiento

El criterio de nudosidad K resulta coincidente con el adoptado por el método propuesto por la norma IRAM 9662-3 (2015) para la clasificación por resistencia de tablas, asimismo es contemplado por la norma española de clasificación visual de madera estructural de coníferas (UNE 56544 2011) y también fue considerado al momento de establecer los valores de diseño de referencia para las propiedades mecánicas de piezas aserradas en dimensiones estructurales provenientes de *Araucaria angustifolia* como de *Eucalyptus grandis* cultivadas en nuestro país (IRAM 9662-1/2 2015), los cuales fueron incorporados en los suplementos del Reglamento argentino de estructuras de madera (INTI CIRSOC 601 2016).

Según la nudosidad K, como puede apreciarse en la Figura 3.9 Izq., la dimensión de un nudo individual es igual a la distancia entre las tangentes a él y paralelas al eje de la pieza ($d//$), mientras que la nudosidad se determina como la relación entre esa dimensión y el ancho de la superficie en la cual el nudo se manifiesta. Si un mismo nudo aparece en distintas superficies de la pieza, la nudosidad se calcula en forma independiente en cada una de ellas, prevaleciendo la mayor relación. Ante la presencia de un nudo de arista, la nudosidad se expresa como el menor valor de los correspondientes a las dos superficies donde se manifiesta, es decir, rige la menor de ambas relaciones. Este criterio también contempla a los agrupamientos de nudos que aparecen en una misma sección o en una longitud de la tabla igual a su ancho. Para este caso la nudosidad se expresa como la

relación entre la suma (sin solapamientos) de las dimensiones de los nudos que lo conforman y el ancho de la cara o del canto donde se manifiestan, como se muestra en la Figura 3.9 Der.

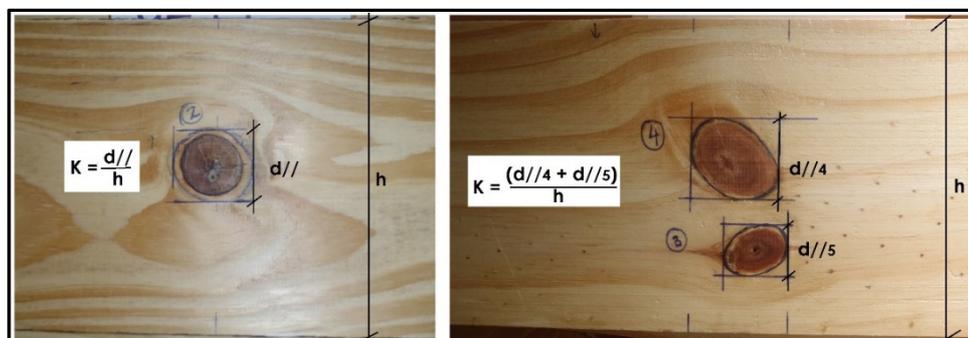


Figura 3.9. Determinación de la nudosidad K. Izq.: nudo individual. Der.: Agrupamiento de nudos

Los demás modos de medición de la nudosidad (KAR, KAR 150, KARM y KARM 150) contemplan la proyección del área nudosa sobre la sección transversal del cuerpo de prueba. Este criterio es adoptado por varias normativas, entre las cuales se pueden señalar las reglas de clasificación del pino amarillo del sur de Estados Unidos (SPIB 2014) y la del pino radiata, pino oregón y pino ponderosa chileno (Nch 1207 2017), entre otras. Los 4 criterios son similares en cuanto al método de medición de los nudos pero se diferencian en los valores de nudosidad representados. KAR (Knot Area Ratio) expresa la nudosidad como el cociente entre el área de la proyección (sin solapamientos) de los nudos cortados por una sección transversal y el área de ésta, un esquema de las áreas involucradas puede observarse en la Figura 3.10 Izq. La nudosidad KAR 150 se calcula aplicando el criterio anterior a la proyección de todos los nudos existentes en una longitud de la pieza igual a 150 mm. KARM es similar a KAR pero considera únicamente el área que involucra ambos márgenes de la sección transversal de la pieza, es decir, los cuartos exteriores como se indica en la Figura 3.10 Der. KARM 150 se calcula aplicando el criterio anterior pero con la consideración explicada para KAR 150.

Para la obtención de la nudosidad a través de los 4 criterios antes mencionados se diseñó un formato de registro. En primer lugar se eligió la sección crítica de cada cuerpo de prueba, es decir, aquella con el mayor defecto representado a través de un nudo individual o varios nudos agrupados. Luego, a través de un software de diseño asistido por computadora, se dibujó a escala la sección transversal de la pieza y se identificaron en

la misma los nudos involucrados, ubicándose la posición de la médula para poder inferir la dirección y forma de cada nudo en el interior de la misma. Posteriormente se trazaron las proyecciones, tanto de las nudosidades ubicadas en una sección de corte como también aquellas comprendidas en un tramo de longitud menor o igual a 150 mm. Finalmente se delimitó la proyección del área nudosa en la sección transversal y también en los cuartos extremos y, a través del mismo software, se determinó el área de la sección completa y aquella ocupada por los nudos, ambas se obtuvieron tanto para la sección total como para la de margen (cuartos exteriores). Los factores KAR, KAR 150, KARM y KARM 150 fueron calculados como lo ya indicado en el párrafo anterior e ilustrado en la Figura 3.10.

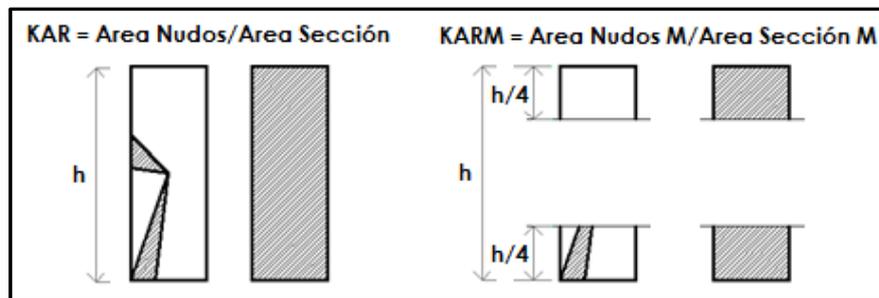


Figura 3.10. Determinación de la nudosidad. Izq.: KAR. Der.: KARM

Por otra parte, también fue determinado el módulo resistente remanente (S_{rem}), el cual consiste en el módulo resistente calculado considerando a los nudos que aparecen en la sección transversal como espacios vacíos. El módulo S_{rem} fue evaluado en la sección crítica correspondiente a cada pieza considerando los 4 criterios de medición de nudosidad antes mencionados. Persiguiendo tal fin, a través del software se dibujó a escala cada sección descartando el espacio ocupado por los nudos, lo cual coincide con la esencia del concepto de desplazamiento llevado a las tensiones de flexión y está en línea con lo reportado por Guillaumet *et al.* (2008) al estudiar la nudosidad versus las características resistentes de la *Araucaria angustifolia* (Pino paraná).

La sección neta asociada a la nudosidad KAR, KAR 150, KARM y KARM 150 correspondiente a cada viga fue generada tal como puede observarse en la Figura 3.11. Ya definidas las secciones, se determinó el momento de inercia (I) de cada una de ellas por medio del mismo software empleado para el diseño. Conociendo I y la distancia desde el eje a la fibra más alejada de la sección (y), fue calculado el módulo resistente a través de la teoría de la resistencia de los materiales ($S = I/y$).

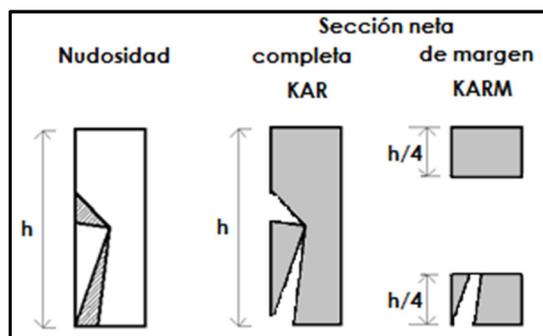


Figura 3.11. Determinación de la sección neta asociada a la nudosidad KAR y KARM

Médula

La presencia de médula fue registrada tanto en las superficies laterales como en los extremos de cada pieza, indicando en ambos casos su ubicación relativa respecto a la longitud y la cara o canto en la que aparece, junto a observaciones relevantes. La Figura 3.12 muestra una tabla de pino resinoso donde claramente puede observarse la médula sobre una de sus caras.



Figura 3.12. Registro de la presencia de médula en la cara lateral de una pieza aserrada

Anillos de crecimiento

Los anillos de crecimiento, como se indica en la Figura 3.13, fueron determinados sobre la mayor línea recta radial que fue posible trazar en ambos extremos de cada cuerpo de prueba. Para su registro fueron seleccionados dos modos de medición: i) el adoptado por la norma IRAM 9662-3 (2015) que considera el espesor del mayor anillo de crecimiento y, ii) el adoptado por la norma IRAM 9670 (2002) que cuantifica la cantidad de anillos promedio que aparecen en una pulgada, valor que surge del número de anillos comprendidos sobre una línea radial (coincidente con la adoptada) de 76 mm de largo o lo más cercano a ello.

En piezas con presencia de médula (ver Figura 3.13) fueron descartados aquellos anillos de crecimiento ubicados próximos a ésta en un radio de 25 mm al considerar el

primer modo de medición (IRAM 9662-3 2015) y aquellos ubicados a $\frac{1}{4}$ de la mínima dimensión de la pieza, al contemplar el segundo (IRAM 9670 2002). La proporción de madera de verano y primavera también fue registrada. Dicho parámetro es necesario - junto a la cantidad de anillos por pulgada de la sección final cepillada- para dividir a las piezas entre densas y no densas de acuerdo a las reglas de clasificación del pino amarillo del sur de Estados Unidos (SPIB 2014).



Figura 3.13. Medición de los anillos de crecimiento

Dirección de las fibras

La dirección de las fibras fue medida con relación al eje longitudinal de la pieza en las superficies de las caras anchas de cada cuerpo de prueba. Su desviación se expresó como el cociente entre la medida que se aparta del eje (B) y la longitud de la pieza sobre la cual se efectuó la medida (A), tales dimensiones pueden observarse en la Figura 3.14. Cabe señalar que solamente fue registrada la dirección general de las fibras, descartándose aquellas desviaciones locales como las que ocurren alrededor de los nudos.

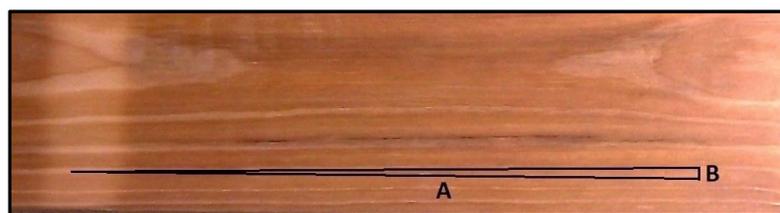


Figura 3.14. Medición de la dirección de las fibras

Depósitos de Resina

Los depósitos de resina fueron relevados en todas las caras de cada cuerpo de prueba y, como puede observarse en la Figura 3.15, fueron delimitados, marcados y enumerados de un modo similar al adoptado para los nudos. En cada caso fueron registradas las dimensiones y la ubicación relativa dentro de la pieza junto a su correspondiente descripción.



Figura 3.15. Registro de un depósito de resina

Fisuras

Las fisuras, tanto pasantes (rajaduras) como no pasantes (grietas) y aquellas superficiales de secado, fueron ubicadas y enumeradas en las cuatro superficies laterales de cada cuerpo de prueba como puede apreciarse en la Figura 3.16. De cada una se registró su longitud en la dirección del eje longitudinal de la pieza junto a su respectivo ancho y profundidad, indicándose en cada caso su ubicación relativa dentro de la misma.

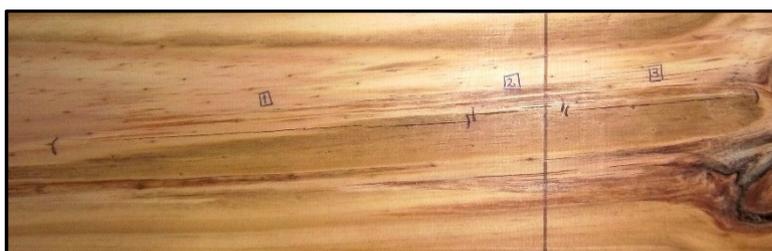


Figura 3.16. Registro de fisuras

Arista Faltante

De cada arista faltante fueron registradas la longitud y el mayor ancho en sentido transversal (perpendicularmente al eje de la pieza) y cada una se expresó como la fracción decimal del ancho de la cara y el canto donde la misma se encontraba. En la Figura 3.17 se puede observar la demarcación de una arista faltante en una tabla aserrada de pino resinoso.

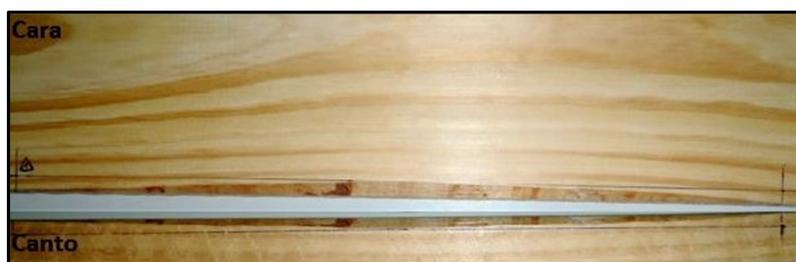


Figura 3.17. Registro de una arista faltante

Deformaciones

Las deformaciones evaluadas en cada cuerpo de prueba fueron las siguientes:

- Combado y encorvado (ver Figura 3.18): para las flechas de cara y canto se registró la deformación máxima (d) en una longitud de 2 m con respecto al eje longitudinal. En aquellas piezas de menor longitud se midió la deformación existente en todo el largo de las mismas.

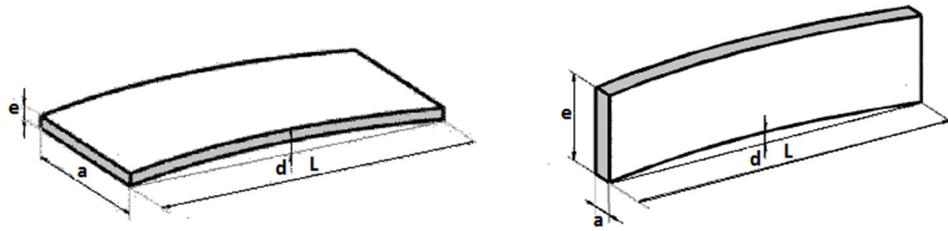


Figura 3.18. Deformaciones. Izq.: Combado. Der.: Encorvado

- Revirado (ver Figura 3.19 Izq.): se midió la deformación máxima (d) de la superficie sobre el largo (L) de la pieza.
- Abarquillado (ver Figura 3.19 Der.): se registró la deformación máxima (d) sobre el ancho (a) de la pieza.

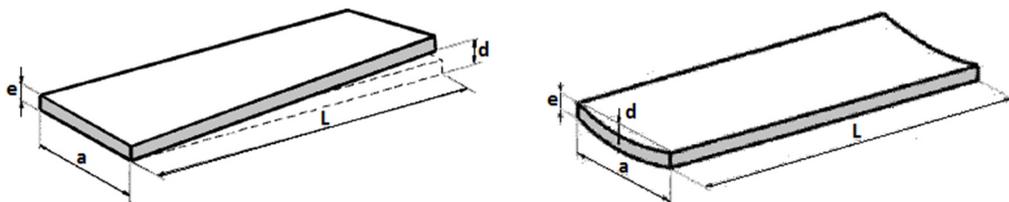


Figura 3.19. Deformaciones. Izq.: Revirado. Der.: Abarquillado

Ataques biológicos y coloración

En cada pieza fue registrada cualitativamente la presencia de zonas atacadas por hongos destructores de la madera causantes de pudrición y por hongos cromógenos causantes de azulado y enmohecimiento. A la vez, se inspeccionó la presencia de orificios originados por ataques de insectos. Además, para cada cuerpo de prueba se efectuó una descripción de su coloración, cuya gama de tonalidades puede ser apreciada en la Figura 3.20.



Figura 3.20. De izq. a der.: Tonalidad clara a oscura

3.2.2. Ensayos acústicos por vibraciones

Luego de registradas las dimensiones de todos los cuerpos de prueba se procedió a la ejecución de los ensayos no destructivos por vibraciones sobre las piezas pertenecientes a las muestras M5 y M6. La determinación de la frecuencia natural de vibración longitudinal se obtuvo a través del empleo del equipo Portable Lumber Grader (PLG) pertenecientes a la firma FAKOPP, para lo que fue necesario el empleo de una computadora con el software correspondiente. Cada cuerpo de prueba fue posicionado sobre soportes con apoyos que permitieron su libre vibración, aquellos de menor longitud (500 mm) fueron colocados sobre un soporte central único que actuaba simultáneamente como balanza, como puede observarse en la Figura 3.21, mientras que los de mayor longitud (1300 mm) fueron dispuestos sobre dos apoyos situados en los extremos donde uno de los cuales actuaba a la vez como soporte y balanza, un esquema del mismo es presentado en la Figura 3.22.



Figura 3.21. Disposición de una pieza con soporte único

De forma previa e inmediata a cada prueba, utilizando un higrómetro de contacto (marca GANN, modelo Hydromette Compact "A") fue determinado el contenido de humedad de cada pieza como el promedio de tres mediciones (ambos extremos y centro) y en la ventana de configuración del software fueron ingresados los datos correspondientes a las dimensiones de la pieza evaluada junto su peso, el que fue obtenido con precisión de 10 g a través de la balanza antes mencionada.

El micrófono encargado de registrar la onda acústica fue situado en uno de los extremos, próximo al centro de la sección del canto, tal como puede observarse en la Figura 3.21 al igual que en el esquema de la Figura 3.22. El ensayo propiamente dicho consistió en producir la vibración de la pieza mediante un impacto de martillo en el extremo opuesto donde estaba ubicado el micrófono, teniendo en cuenta que la dirección del golpe fuera lo más paralela posible a la dirección principal de la pieza. Un esquema de la disposición del equipo para la realización del ensayo destinado a la obtención de la frecuencia de vibración longitudinal puede ser apreciado en la Figura 3.22.

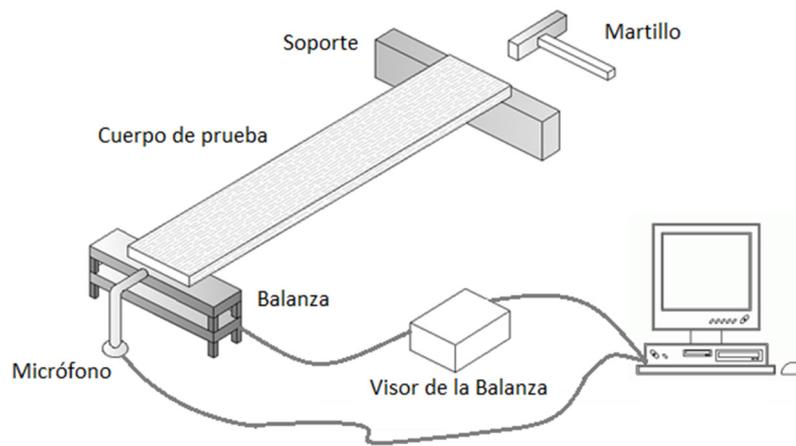


Figura 3.22. Disposición del equipo de medida de la frecuencia de vibración longitudinal

El micrófono fue el responsable de captar el sonido procedente de la vibración inducida y trasladarlo hasta el programa informático encargado de procesar dicha señal acústica. El equipo PLG arrojó instantáneamente como resultado la frecuencia de vibración de la pieza (f) junto a la densidad aparente (ρ) ajustada por humedad, la cual fue determinada por el software haciendo uso de los datos (dimensiones, peso y humedad) previamente ingresados. Conociendo ambos valores (f, ρ) y la longitud de la pieza (L) fue posible determinar la velocidad de propagación del sonido (V) y posteriormente el módulo de elasticidad dinámico (E_d) asociado. Ambos parámetros fueron obtenidos a través de las siguientes relaciones:

$$V = 2Lf \quad (\text{Velocidad de propagación del sonido})$$

$$E_d = V^2 \rho \quad (\text{Módulo de elasticidad dinámico})$$

El módulo E_d no requiere de ajuste por humedad puesto que el parámetro ρ se corresponde a la humedad de referencia del 12%.

3.2.3. Ensayos estáticos

Una vez registradas las características visuales y dimensiones de los cuerpos de prueba, luego de la realización de los ensayos no destructivos, se procedió a la preparación de cada uno con las marcas necesarias para poder llevar a cabo adecuadamente los ensayos estáticos de flexión y tracción paralela a las fibras siguiendo, en ambos casos, las prescripciones establecidas en la norma IRAM 9663 (2013) basada en la EN 408 (2012). Estas marcas incluyeron las indicaciones de apoyos, aplicación de cargas y de ubicación de los correspondientes dispositivos de medición.

Ensayos de flexión

Los ensayos de flexión de plano fueron llevados a cabo sobre las tablas correspondientes a la muestra M5 a través de una máquina de ensayos universales (marca EMIC) de accionamiento eléctrico con 100 kN de capacidad de carga máxima. En tanto que los ensayos de flexión de canto, que involucraron a las muestras M1, M2, M3 y M4, fueron ejecutados con una máquina de ensayos universales (marca SHIMADZU) de accionamiento hidráulico con 1000 kN de capacidad máxima. Ambos equipos cuentan con capacidad para desplazar el cabezal a velocidad constante y registrar cargas con una precisión igual al 1% del valor aplicado. En la Figura 3.23 pueden observarse, a la izquierda, un cuerpo de prueba siendo flexionado de plano y, a la derecha, otro sometido a flexión de canto.



Figura 3.23. Ensayo de flexión estática. Izq.: Flexión de plano. Der.: Flexión de canto

Al momento del ensayo los cuerpos de prueba fueron colocados con el borde sometido a tracción seleccionado al azar. Asimismo, en todos los casos fueron ubicados con una separación entre apoyos igual a $18h$ y cargados simétricamente a una distancia igual a $6h$ de cada apoyo, siendo h la altura de la sección transversal. La disposición general para el ensayo de flexión estática aparece esquematizado en la Figura 3.24. Con el objeto de reducir el aplastamiento localizado de la madera, en los puntos de apoyo y de carga se colocaron placas de acero de ancho no mayor que la mitad de la altura de la probeta. También se dispusieron topes laterales para evitar el pandeo lateral de la pieza, tal como se aprecia en la fotografía derecha de la Figura 3.23.

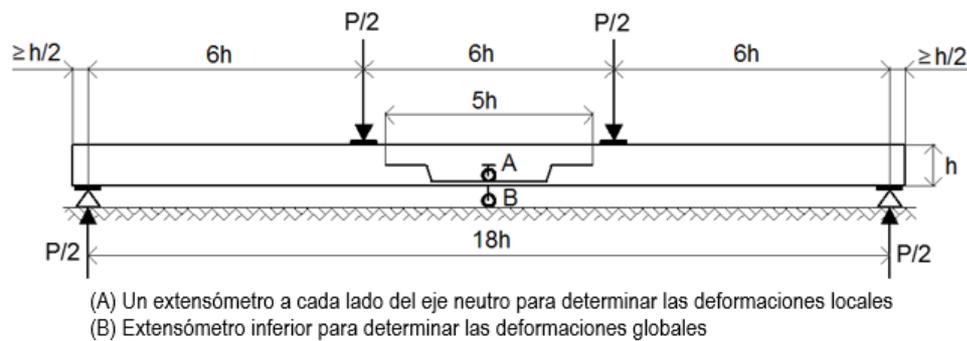


Figura 3.24. Disposición general para el ensayo de flexión estática

Durante el ensayo la velocidad de desplazamiento del cabezal de carga no superó el valor de $0,003$ de la altura de la probeta (mm/s) y fueron registradas las deformaciones correspondientes a escalones de carga dentro del período elástico por medio de comparadores micrométricos con precisión de $0,01$ mm.

El módulo de elasticidad global ($E_{m,g}$) fue obtenido para todas las muestras, su determinación fue llevada a cabo ubicando al comparador en la parte inferior del centro de la luz de la pieza y las deformaciones fueron medidas respecto de los apoyos, tal como puede observarse en el esquema expuesto en la Figura 3.24. El módulo de elasticidad local ($E_{m,l}$), en cambio, fue obtenido únicamente para las muestras flexionadas de canto (M1, M2, M3 y M4) las cuales presentaban una altura adecuada para la correcta ubicación de los distintos elementos de medición. Para la determinación del mismo se definió un segmento de longitud igual a $5h$ ubicado dentro del tercio central de la probeta sobre el eje neutro. El descenso del punto medio con respecto a los extremos del segmento mencionado fue registrado en ambas caras del cuerpo de prueba, como se indica en la Figura 3.24.

El ensayo se continuó hasta alcanzar la rotura de la pieza en el tiempo establecido (300 +/- 120 s) por la norma (IRAM 9663 2013), registrándose finalmente la carga máxima, la duración del mismo y observaciones relevantes acompañadas de fotografías. Además, en cada caso se localizó la sección de rotura y se codificó la forma de fallo.

Los valores de la tensión de rotura (F_m), del módulo de elasticidad global ($E_{m,g}$) y del módulo de elasticidad local ($E_{m,l}$) fueron calculados con las expresiones provistas por la norma IRAM 9663 (2013), las cuales se exponen a continuación:

$$F_m = \frac{3 P_{máx} a}{b h^2} \quad (\text{Tensión de rotura en flexión})$$

$$E_{m,g} = \frac{3 a l^2 - 4 a^3}{2 b h^3 \left(2 \frac{(w_2 - w_1)}{(P_2 - P_1)} \right)} \quad (\text{Módulo de elasticidad global en flexión})$$

$$E_{m,l} = \frac{a l_1^2 (P_2 - P_1)}{16 I (w_2 - w_1)} \quad (\text{Módulo de elasticidad local en flexión})$$

Siendo $P_{máx}$: carga máxima, a : distancia entre el punto de carga y el apoyo más próximo, b : ancho de la sección transversal, h : altura de la sección, I : momento de inercia, l : luz en flexión, l_1 : longitud igual a $5h$, $P_2 - P_1$: incremento de carga sobre la línea de regresión, $w_2 - w_1$: incremento de deformación correspondiente a $P_2 - P_1$.

Por su parte, también fueron derivados los valores del módulo de elasticidad local conforme al criterio adoptado por la norma EN 384 (2016), al propuesto por Denzler *et al.* (2008) y al establecido en la norma ASTM D198 (2015), los cuales fueron expuestos en el Apartado 2.2.3. Las ecuaciones para la determinación de los distintos valores $E_{m,l}$ correspondientes a cada criterio son presentadas seguidamente:

$$E_{m,EN384} = \sum \left[\frac{E_{m,g}}{n} \right] 1,3 - 2690 \quad (E_{m,l} \text{ según EN 384 (2016)})$$

$$E_{m,Denzler} = 1,2 E_{m,g} - 1400 \quad (E_{m,l} \text{ según Denzler et al. (2008)})$$

$$E_{m,ASTM} = \frac{E_{m,g}}{\left(1 - \frac{l(P_2 - P_1)}{5 b h G (w_2 - w_1)} \right)} \quad (E_{m,l} \text{ según ASTM D 198 (2015)})$$

Siendo $E_{m,g}$: módulo de elasticidad global calculado experimentalmente, n : cantidad de cuerpos de prueba, l : luz en flexión, b : ancho de la sección transversal, h : altura de la sección, G : módulo de elasticidad transversal igual a $E_{m,g}/16$, $P_2 - P_1$: incremento de carga sobre la línea de regresión, $w_2 - w_1$: incremento de deformación correspondiente a $P_2 - P_1$.

Ensayos de tracción paralela a las fibras

Los ensayos de tracción paralela a la dirección de las fibras fueron llevados a cabo sobre las tablas correspondientes a la muestra M6 a través de una máquina de ensayos universales (marca SHIMADZU) de accionamiento hidráulico, la cual cuenta con capacidad de desplazar el cabezal a velocidad constante y con precisión igual al 1% de la carga aplicada hasta un máximo de 1000 kN. Cada cuerpo de prueba fue ubicado en la máquina como puede apreciarse en la Figura 3.25, respetando una longitud libre entre mordazas igual a 9 veces su ancho.

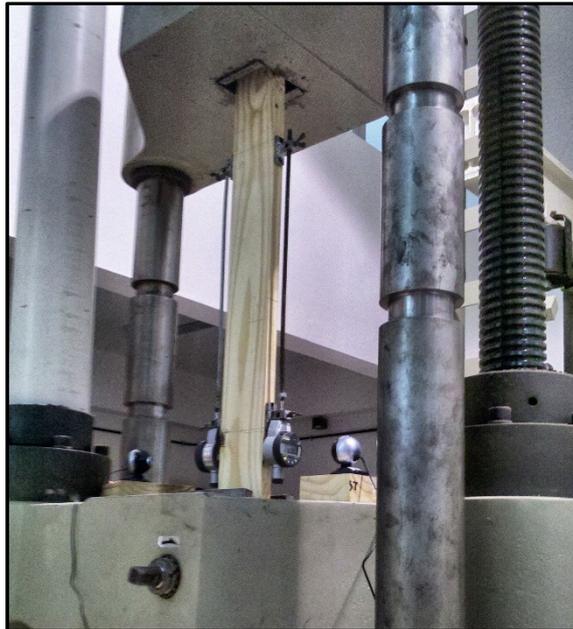


Figura 3.25. Disposición del ensayo de tracción paralela a las fibras

Durante la primera etapa del ensayo, la velocidad de desplazamiento del cabezal de cargas fue constante y menor a 0,00005 de la luz libre entre mordazas (mm/s) con el fin de obtener los valores de carga y deformación en período elástico, datos necesarios para el cálculo del correspondiente módulo de elasticidad. Para evitar los efectos de posibles distorsiones, las deformaciones fueron registradas con dos comparadores micrométricos de 0,001 mm de precisión colocados sobre los cantos opuestos y posicionados en un

segmento central de longitud igual a 5 veces el ancho de la tabla, tal como se observa en la Figura 3.25.

Después de la etapa inicial, los ensayos fueron detenidos y reiniciados con una velocidad constante adecuada para lograr la rotura de la pieza en el tiempo establecido por la norma (300 +/- 120 s). En cada caso se registró la carga máxima, la duración del ensayo, la forma de falla y observaciones relevantes acompañadas de fotografías.

Los valores de la tensión de rotura (F_t) y del módulo de elasticidad (E_t) en tracción paralela a las fibras se calcularon empleando las ecuaciones provistas por la norma IRAM 9663 (2013), las cuales se detallan a continuación:

$$F_t = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A} \quad (\text{Tensi3n de rotura en tracci3n})$$

$$E_t = \frac{l_1(P_2 - P_1)}{A(w_2 - w_1)} \quad (\text{M3dulo de elasticidad en tracci3n})$$

Siendo $P_{m\acute{a}x}$: carga m\acute{a}xima, A : \u00e1rea de la secci3n transversal, l_1 : longitud base de medida igual a 5 veces la mayor medida de la secci3n transversal, $P_2 - P_1$: incremento de carga en la parte recta de la curva de carga/deformaci3n, $w_2 - w_1$: incremento de deformaci3n correspondiente a $P_2 - P_1$.

Determinaci3n de la densidad aparente y el contenido de humedad

La densidad aparente y el contenido de humedad de cada cuerpo de prueba fueron determinados inmediatamente despu3s de finalizado el correspondiente ensayo est\u00e1tico conforme a los lineamientos de las normas ISO 3130 (1975) e ISO 3131 (1975), tomando para tal fin una rebanada de la secci3n completa, libre de nudos y bolsas de resina, cortada de un lugar cercano a la zona de rotura.

Las dimensiones necesarias para la obtenci3n del volumen se registraron con un calibre (marca Mitutoyo) de 0,01 mm de precisi3n. La determinaci3n de la masa se llev3 a cabo a trav3s de una balanza electr3nica (marca OHAUS modelo Explorer Pro) con capacidad de registrar 0,01 g. El secado del trozo se realiz3 en estufa (GTMN205DXX) a una temperatura de 103 +/- 2 \u00b0C, hasta lograr su masa anhidra. Condici3n que es alcanzada cuando la diferencia entre dos pesadas sucesivas con intervalos de 6 horas es igual o menor al 5% de la masa de la pieza.

Los valores de la densidad aparente (ρ) y el contenido de humedad (H) fueron calculados con las siguientes expresiones:

$$\rho = \frac{m_t}{V_t} \quad (\text{Densidad aparente})$$

$$H = \frac{m_t - m_a}{m_a} \quad (\text{Contenido de humedad})$$

Siendo m_t : masa del trozo libre de defectos, m_a : masa anhidra del trozo libre de defectos, V_t : volumen del trozo libre de defectos.

3.2.4. Ensayos con cargas de larga duración

Las piezas de la muestra M7 fueron destinadas para la realización de los ensayos a flexión con cargas de larga duración. De forma previa e inmediata a la disposición definitiva de los cuerpos de prueba, fueron determinados el contenido de humedad y la densidad de cada uno. El primer valor se obtuvo como el promedio de 6 mediciones (extremos y centro en ambas caras anchas) realizadas con un xilohigrómetro de resistencia eléctrica (HOLZMEISTER LG9), como puede observarse en la Figura 3.26. El segundo parámetro se calculó como la razón entre la masa del cuerpo y su volumen. La determinación del peso se llevó a cabo por medio de una balanza electrónica (OHAUS Explorer Pro) de alta capacidad (32000 g).



Figura 3.26. Medición de la humedad con un xilohigrómetro

Para la realización de los ensayos a flexión bajo carga de larga duración las piezas fueron dispuestas en un recinto destinado especialmente para tal fin, situado dentro de las instalaciones de la Facultad Regional Concepción del Uruguay - UTN, reflejando las

condiciones normales de uso en ambientes cerrados, sin climatización, para la región de la provincia de Entre Ríos. Como se puede observar en el esquema expuesto en la Figura 3.27, los cuerpos de prueba fueron sometidos a un ensayo de flexión en tres puntos, con una separación entre apoyos igual a 2,50 m y una carga puntual constante de 641 N ubicada en el centro de la pieza, la cual fue aplicada por el término de un año y un mes (392 días).

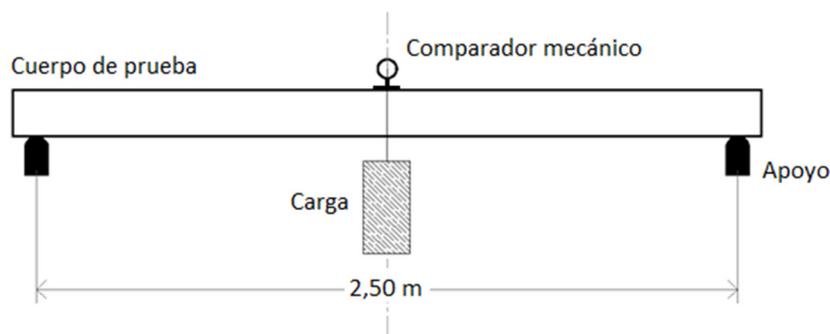


Figura 3.27. Esquema del dispositivo de carga

El nivel de la carga respondió a condiciones normales de uso en estructuras y fue establecido con el objetivo de lograr una deformación final -con relación a la separación entre apoyos- de $1/240$, nivel admitido normalmente en estructuras destinadas para fines comerciales, recreacionales e institucionales (Tabla 3.2.3-1 INTI CIRSOC 601 2016). Como se estudiaron vigas de diferentes calidades, para la estimación de la carga aplicada se consideró un módulo de elasticidad en flexión igual 8000 N/mm^2 , valor intermedio entre los establecidos para vigas aserradas de pino resinoso de ambas clases resistentes especificadas en la norma IRAM 9670 (2002).

Teniendo en cuenta el esquema estático adoptado (Figura 3.27), el valor nominal de las cargas y las dimensiones de la sección transversal de las piezas, los valores de tensión máxima esperados resultaron comprendidos entre $5,1 \text{ N/mm}^2$ y $5,3 \text{ N/mm}^2$, representando aproximadamente el 35% del 5-percentil de la resistencia en flexión, valor obtenido experimentalmente sobre vigas de las mismas especies y con idénticas dimensiones que las utilizadas en este proyecto (Fank *et al.* 2014).

La deformación vertical o flecha (Δ) se determinó en el punto central de cada viga utilizando comparadores mecánicos (marca Mitutoyo) con precisión de 0,01 mm, como se puede apreciar en la Figura 3.28. La deformación instantánea (Δ_{inst}), ocurrida inicialmente debido a la aplicación de la carga, fue determinada luego de aproximadamente 5 minutos

de su aplicación. El valor relativo de la deformación en función del tiempo fue obtenido realizando el cociente entre la deformación total a un tiempo dado y su correspondiente deformación instantánea (Δ/Δ_{inst}).

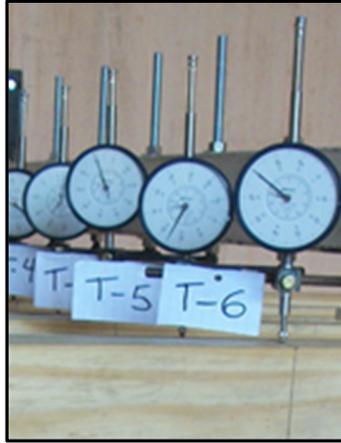


Figura 3.28. Medición de la deformación vertical

A mediados del mes de septiembre del 2015 se dio inicio al ensayo, registrándose los valores de la deformación total -en función del tiempo- a diario durante 3 meses, luego cada dos días hasta completar los 6 meses y, posteriormente, con periodicidad de 2 veces por semana hasta alcanzar 392 días desde el inicio. Simultáneamente durante el transcurso del ensayo se registraron las condiciones de humedad relativa y temperatura ambiente a través del empleo de un termo-higrómetro digital (FITVALV modelo 303).

3.2.5. Procesamiento de datos

Luego de finalizadas las tareas de laboratorio, los datos obtenidos fueron ordenados y procesados utilizando un software adecuado para darles tratamiento estadístico. Los resultados de los ensayos fueron ajustados -de forma individual- a las condiciones de referencia detalladas en la norma IRAM 9664 (2013). El valor del módulo de elasticidad en flexión y tracción paralela a las fibras fue ajustado a un contenido de humedad común del 12%, aumentándose el valor obtenido en el ensayo en un 1% por cada 1% de exceso en el contenido de humedad sobre la condición normalizada, y viceversa. Los valores de la densidad aparente también fueron corregidos respecto al contenido de humedad normal (12%) disminuyéndose en un 0,5% por cada 1% de exceso, y viceversa. Por su parte, los resultados obtenidos en los ensayos para la resistencia en flexión y en tracción paralela a

las fibras no debieron ser ajustados por humedad pero si corregidos a la dimensión de referencia ($h = 150$ mm), dividiéndolos por el factor $k_h = (150/h)^{0,2}$, donde h es la altura de la sección en los ensayos de flexión o el ancho en los ensayos de tracción.

Para el análisis estadístico, la media aritmética fue adoptada como medida de centralidad y el coeficiente de variación junto a los valores mínimo y máximo como medidas de la dispersión. Los valores medios de las propiedades analizadas se consideraron como la media aritmética de los resultados individuales y los percentiles 5% fueron determinados por ordenamiento siguiendo los lineamientos de la norma IRAM 9664 (2013). Los valores característicos también fueron evaluados de acuerdo a la norma antes mencionada. Los correspondientes a la resistencia a flexión y tracción paralela a las fibras fueron determinados de acuerdo a la expresión:

$$F_k = \bar{F}_{0,5} k_s k_v \quad (\text{Valor característico de la resistencia})$$

Siendo $\bar{F}_{0,5}$: media de los valores corregidos del percentil 5%, k_s : factor de corrección en función del número y tamaño de las muestras cuyos valores se obtienen de la Figura 1 expuesta en la norma IRAM 9664 (2013), k_v : factor que tiene en cuenta la menor variabilidad de los percentiles, éste toma un valor igual a 1,00 para la resistencia a tracción como también para la resistencia a flexión obtenida por métodos visuales, mientras que asciende a 1,12 si ésta última es determinada por métodos mecánicos y su valor característico es menor o igual a 30 N/mm².

La relación entre una variable independiente o predictiva y otra dependiente fue analizada por medio del coeficiente de correlación de Pearson (R). La ecuación de la recta de regresión se obtuvo a través de la técnica del análisis de regresión lineal simple y la misma se expresó para cada caso en el diagrama de dispersión de valores correspondiente. A través del análisis de la varianza ANOVA se analizó el nivel de significancia de la relación entre las dos variables. La hipótesis nula establece que no hay asociación entre ambas, por lo que un nivel de significancia de 0,05 indica un riesgo del 5% de concluir que existe una asociación cuando no hay una asociación real. Entonces, el valor-P debe ser menor a 0,05 para que efectivamente exista una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95%.

Por su parte, la relación entre dos o más variables predictivas y una dependiente fue estudiada a través de la técnica del análisis de regresión lineal múltiple, con la cual se

estimó el modelo adecuado para predecir los valores de la variable dependiente. La cuantificación de esa relación se expresó por medio del coeficiente de correlación de Pearson (R).

Para comprobar la hipótesis de normalidad necesaria para que el resultado de algunos análisis sea fiable, se aplicó la prueba de significación estadística Kolmogorov-Smirnov (K-S), método no paramétrico que se utiliza para probar la medida de la bondad de ajuste de una distribución de frecuencia observada y otra de frecuencia teórica. El mismo puede ser empleado cuando el tamaño muestral es mayor de 50 y las variables son cuantitativas continuas. Si la hipótesis nula del test K-S considera que la distribución de la variable seleccionada proviene de una distribución normal, ésta no puede ser rechazada a un nivel de significación o valor-P mayor a 0,05.

Verificada la normalidad de los datos, la comparación entre los valores medios de dos grupos se llevó a cabo a través de la prueba de la diferencia de las medias con el modelo de t-Student. En aquellos casos donde no fue verificada la normalidad de ambas distribuciones intervinientes, en cambio, las comparaciones entre medias fueron realizadas a través de la prueba no paramétrica K-S. Cabe destacar que ambas pruebas fueron llevadas a cabo a través de un software específico de análisis de datos estadístico y gráfico.

III - Programa experimental

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos a partir del programa experimental. La primera parte hace referencia a la clasificación visual por resistencia, donde se plantean diferentes perfiles de calidad con miras al desarrollo de un método de clasificación, analizándose, a la vez, la aplicabilidad de aquellos que se encuentran vigentes en el país. Posteriormente se proponen posibles modelos teóricos para una clasificación mecánica por resistencia y, finalmente, se exponen otros aspectos complementarios con el fin de ampliar el conocimiento del material investigado en lo referente a su uso estructural.

4.1. Clasificación visual por resistencia

En el presente apartado se analizan los diferentes parámetros visuales relevados y los resultados obtenidos para las propiedades físico-mecánicas de las muestras sometidas a ensayos estáticos de flexión, presentándose la influencia que ejercen sobre éstas aquellas características que resultaron significativas para la madera en estudio. También se plantean distintos perfiles de calidad y se verifica la aplicabilidad de los métodos de clasificación visual por resistencia propuestos por la normativa argentina. Finalmente se incluyen los valores determinados para las propiedades físico-mecánicas de la muestra sometida a ensayos de tracción paralela a las fibras, y éstos son comparados con aquellos obtenidos previamente bajo cargas de flexión. Cabe destacar que los resultados expuestos no son discriminados por especie ya que, en Argentina, los árboles de *Pinus taeda* y de *Pinus elliottii* suelen ser cultivados y comercializados de forma conjunta debido a que la madera obtenida a partir de ambas especies presenta una apariencia similar y, a la vez, no existen estudios

que evidencien una diferencia significativa entre sus propiedades resistentes (Fank *et al.* 2017; Melchiorretto y Eleotério 2003; Moya *et al.* 2015a; Muñiz, G. 1993; Santini *et al.* 2000). No obstante, un análisis comparativo entre ambas será incluido en el desarrollo de este capítulo.

4.1.1. Parámetros visuales registrados en las muestras ensayadas a flexión

Los resultados de las características visuales relevadas (ver Apartado 3.2.1) para ser utilizadas como parámetros en la clasificación por resistencia son expuestos del siguiente modo: en la Tabla 4.1 se presentan únicamente los valores correspondientes a la nudosidad por ser la característica más relevante en la madera de pino, en la Tabla 4.2 se enseñan los restantes parámetros evaluados con influencia sobre las propiedades mecánicas y en la Tabla 4.3 aparecen aquellas singularidades que generalmente no afectan a las propiedades de resistencia y rigidez de las piezas.

Antes de analizar los valores presentados en la Tabla 4.1, es oportuno señalar que en todas las piezas flexionadas fueron registrados los nudos ubicados en el tercio central, excepto en aquellos casos donde la rotura se produjo fuera de dicho tramo, situación donde se contemplaron aquellos nudos involucrados en la misma. Cada pieza fue analizada bajo los 5 criterios expuestos en el Apartado 3.2.1 (Nudos) a excepción de aquellas que forman parte de la muestra M5, para las cuales no se llevó a cabo el registro de los criterios KARM y KARM 150 debido a que, al tratarse de tablas flexionadas de plano, la escasa altura no justificaba el registro de la nudosidad en los márgenes.

Como puede observarse en la Tabla 4.1, la nudosidad determinada para la muestra integrada por todas las piezas presenta un valor medio que supera 0,27 bajo todos los criterios evaluados, alcanzándose valores máximos que se aproximan a la unidad en la mayoría de los casos. Este resultado se condice con la particular forma de crecimiento de las coníferas cuyo tronco -en condiciones naturales- presenta una gran cantidad de ramas que, al convertirse en madera aserrada, se manifiestan como nudos de variadas formas (ver Apartado 2.2.1). Esto, a su vez, conduce a que el relevamiento de la nudosidad se torne una tarea sumamente laboriosa (ver Apartado 3.2.1).

De los tres criterios aptos para medir la nudosidad tanto en tablas como en vigas, K es el que exhibe los mayores valores medios y máximos junto a los mayores coeficientes de

variación (ver Tabla 4.1). Si se agrupan todas las vigas (M1+M2+M3+M4) se obtiene un valor medio de nudosidad de 0,46, 0,28 y 0,32 bajo el criterio K, KAR y KAR 150 respectivamente. En todos los casos dichas cifras superan a las obtenidas para las tablas (M5), registrándose la mayor diferencia (31%) para la nudosidad K.

Tabla 4.1. Nudosidad para las muestras ensayadas a flexión

Parámetro		M1 [45x100]* (n = 64)	M2 [45x150]* (n = 61)	M3 [70x150]* (n = 50)	M4 [70x200]* (n = 50)	M5 [105x25]* (n = 233)	Todas (n = ⁽¹⁾)
K**	Mínimo	0,00	0,00	0,08	0,16	0,00	0,00
	Medio	0,42	0,45	0,49	0,49	0,35	0,40
	Máximo	0,90	0,94	0,94	0,92	0,96	0,96
	CV [%]	41	42	38	39	60	51
KAR**	Mínimo	0,01	0,00	0,07	0,09	0,00	0,00
	Medio	0,26	0,27	0,29	0,32	0,25	0,27
	Máximo	0,59	0,59	0,60	0,63	0,72	0,72
	CV [%]	45	52	47	39	61	54
KARM**	Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,01	-	0,00
	Medio	0,23	0,25	0,26	0,33	-	0,27
	Máximo	0,86	0,88	0,76	0,75	-	0,88
	CV [%]	69	82	67	55	-	69
KAR 150**	Mínimo	0,01	0,00	0,09	0,13	0,00	0,00
	Medio	0,31	0,30	0,32	0,34	0,27	0,29
	Máximo	0,66	0,79	0,60	0,63	0,84	0,84
	CV [%]	43	53	43	34	62	53
KARM 150**	Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,01	-	0,00
	Medio	0,28	0,28	0,31	0,33	-	0,29
	Máximo	0,90	0,88	0,76	0,75	-	0,90
	CV [%]	63	82	58	54	-	65

Nota. * Dimensiones de la sección transversal en mm; ** Símbolos expuestos en el Apartado 3.2.1. Nudos. (1) n = 458, excepto en las filas donde no existen datos para la muestra M5, en tales casos n = 225. CV: coeficiente de variación; n: cantidad de cuerpos de prueba.

Como el criterio K considera los nudos agrupados en un largo igual al ancho de la tabla (aproximadamente 100 mm para el caso en estudio) o de 150 mm para el caso de las

vigas, puede ser comparado con el KAR 150. De los datos presentados en la Tabla 4.1 se obtiene que el valor medio K es un 38% mayor que el correspondiente a KAR 150 para la muestra total, mientras que tal diferencia asciende a un 45% si se contemplan únicamente las vigas y la misma desciende a un 30% al considerar solo las tablas. Como el criterio KAR mide el desplazamiento real de los nudos dentro de la pieza mientras que el criterio K lo realiza por aproximación considerando la proyección del mayor nudo sobre la cara, dicha diferencia entre resultados es coherente con las discrepancias entre criterios. Además como en las vigas la sección analizada es mayor, involucra un mayor volumen de nudos, por lo que resulta razonable las diferencias registradas entre vigas y tablas.

Los criterios aplicados únicamente a las vigas, como lo ya señalado, son aquellos que consideran a los nudos ubicados en los márgenes. La muestra total presentó un valor medio de la nudosidad un 7,4% mayor para el criterio KARM 150 respecto del KARM, lo cual resulta lógico porque el primero contempla la presencia de nudos dentro de un volumen mayor. Cabe señalar que una diferencia semejante se mantiene al examinar los valores correspondientes a KAR 150 y KAR.

A continuación son analizados los restantes parámetros con influencia sobre las propiedades mecánicas, entre los mismos se encuentran la presencia de médula, los anillos de crecimiento, la inclinación de la fibra, los depósitos de resina, las fisuras y las aristas faltantes. Los resultados obtenidos para cada uno de éstos son expuestos en la Tabla 4.2. Cabe destacar que ningún cuerpo de prueba presentó afecciones biológicas y tampoco fueron encontrados grandes defectos debido al proceso de aserrado y preparación de las piezas.

La médula fue registrada en el tercio central de cada uno de los cuerpos de prueba como se detalla en el Apéndice 3.2.1, pero para el análisis de los resultados se la tuvo en cuenta exclusivamente al discriminar entre piezas con y sin presencia de esta singularidad. Como puede observarse en la Tabla 4.2, la médula se manifestó en un 33% del total analizado, lo que es equivalente a 150 cuerpos de prueba. Las muestras M3 y M4 registraron los mayores índices alcanzando valores de 68% y 56% respectivamente. En cambio, la muestra integrada por las tablas (M5) presentó la menor proporción de piezas con esta singularidad, acusando un valor de tan sólo 20%. Estos resultados son razonables considerando la dificultad que implica disponer de trozas de diámetro suficiente para el

aserrado de piezas exentas de médula en aquellas secciones de mayores dimensiones (M3 y M4) respecto de las menores (M5).

Tabla 4.2. Otros parámetros visuales para las muestras ensayadas a flexión

Parámetro		M1 [45x100]*	M2 [45x150]*	M3 [70x150]*	M4 [70x200]*	M5 [105x25]*	Todas
<i>Médula</i> ⁽¹⁾	n (n [%])	22 (34)	20 (33)	34 (68)	28 (56)	46 (20)	150 (33)
	Mín [mm]	4,5	8,0	10,0	10,0	5,0	4,5
<i>Ancho de los anillos de crecimiento</i>	Med [mm]	12,8	14,8	15,4	15,3	12,9	13,7
	Máx[mm]	22,0	24,0	21,0	19,0	27,0	27,0
	CV [%]	27	27	14	17	31	28
	n	64	61	50	50	233	458
<i>Número promedio de anillos por pulgada</i>	Mín	1,3	1,1	1,5	1,5	1,1	1,1
	Med	3,1	2,5	2,7	2,7	2,8	2,8
	Máx	6,6	5,6	4,4	4,7	7,6	7,6
	CV [%]	40	39	27	28	42	39
	n	64	61	50	50	233	458
<i>Inclinación de las fibras</i>	n (n [%])	4 (6)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	4 (2)	8 (2)
<i>Depósitos de resina y corteza</i> ⁽¹⁾	n (n [%])	6 (9)	20 (33)	29 (58)	20 (40)	10 (4)	85 (19)
<i>Rajaduras</i>	n (n [%])	1 (2)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2 (1)	3 (1)
<i>Grietas</i>	n (n [%])	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
<i>Arista faltante</i> ⁽¹⁾	n (n [%])	2 (3)	0 (0)	0 (0)	2 (4)	5 (2)	9 (2)

Nota. * Dimensiones de la sección transversal en mm; (1) Registrados en el tercio central de la pieza, coincidente con la zona de máximo esfuerzo de flexión. CV: coeficiente de variación; n: cantidad de cuerpos de prueba.

Los anillos de crecimiento fueron evaluados bajo dos criterios de medición: el adoptado por la norma IRAM 9662-3 (2015) que considera únicamente el espesor del mayor anillo de crecimiento, y el establecido por la norma IRAM 9670 (2002) que cuantifica la cantidad de anillos promedio que aparecen en una pulgada. En la Tabla 4.2 puede observarse que, en el caso de las vigas, a mayor sección transversal se corresponde un mayor ancho del anillo de crecimiento. Esto podría estar asociado al esquema de corte adoptado al momento del aserrío, puesto que al incrementarse el tamaño de la sección transversal de la pieza también es acaparada una mayor proporción del tronco, cuya sección se caracteriza por contar con anillos de crecimiento que disminuyen gradualmente desde la

médula hacia la corteza. Nahuelpán López (2007) obtuvo para el *Pinus taeda* de 32 años cultivado en Chile un valor de anillo promedio igual a 15 mm, lo cual resulta congruente con el valor registrado para las vigas de las muestras M2 (14,8 mm), M3 (15,4 mm) y M4 (15,3 mm). La muestra compuesta por tablas (M5), por su parte, registró un valor de anillo promedio menor (12,9 mm), lo cual podría asociarse también a los patrones de corte, considerando que las tablas generalmente son extraídas de los laterales del tronco. En cuanto al segundo criterio de medición, se registraron valores comprendidos entre 2,5 a 3,1 anillos por pulgada, los cuales se encuentran asociados a las muestras M2 y M1, respectivamente. Estos valores, de acuerdo a lo establecido por la regla norteamericana SPIB (2014), indican que la madera es no densa, lo que resulta congruente con el hecho de que la mayor parte de los pinos de crecimiento rápido producen madera blanda. Por otra parte, los coeficientes de variación asociados a cada muestra siguen una tendencia similar bajo ambos criterios, pero con valores en promedio un 50% mayor para el segundo respecto del primero.

La inclinación general de las fibras fue contabilizada únicamente en aquellas piezas que presentaron una desviación mayor a 1/14. Este límite surge a partir del análisis de una serie de normas (DIN 4074-1 2012; IRAM 9662-3 2015; IRAM 9670 2002; NCh 1207 2017; SPIB 2014) de las cuales fue adoptada la relación menos restrictiva. Los resultados expuestos en la Tabla 4.2 indican que solamente en 8 cuerpos de prueba del total analizado (458), es decir un 2%, se observó esta singularidad, mientras que por lo general en los demás se registró una desviación prácticamente nula. Estos resultados implican que la inclinación de las fibras puede ser desestimada como parámetro visual en el presente estudio.

Los depósitos de resina y/o de corteza fueron localizados en 85 piezas, representando un 19% del total estudiado (458). Como puede apreciarse en la Tabla 4.2, la muestra M3 registró el mayor porcentaje (58%), seguida por las muestras M4 y M2, para las cuales se contabilizaron un 40% y 33% respectivamente. Estos depósitos exhibieron una gran variación tanto en su tamaño como en su forma, los más significativos fueron aquellos asociados a nudos mientras que no resultaron de importancia los ubicados aisladamente. Es conocido que los efectos de los depósitos sobre la resistencia mecánica dependen de su abundancia, tamaño y ubicación en las piezas (Chan Martín *et al.* 2002). Tanto la norma IRAM 9662-3 (2015) como la NCh 1207 (2017) lo limitan por analogía con alguna característica que provoque similar efecto sobre las propiedades mecánicas, sin embargo,

existen normas como la IRAM 9670 (2002) que los considera como un defecto inadmisibles. En la presente investigación fueron contemplados solamente aquellos depósitos de importancia y, como los mismos se encuentran solidarios a los nudos, fueron cuantificados como parte de éstos por lo que su análisis fue realizado en forma conjunta con la nudosidad.

Las fisuras fueron discriminadas entre rajaduras y grietas, las primeras se corresponden con aquellas pasantes localizadas en los extremos y, las segundas, con las no pasantes de indistinta ubicación. Fueron contabilizadas aquellas rajaduras cuyo largo superó al ancho de la pieza, y aquellas grietas que superaron el menor valor entre 600 mm, $\frac{1}{4}$ de la longitud total de la pieza y $\frac{1}{4}$ del ancho de la sección de ésta. Éstos límites fueron adoptados analizando las condiciones impuestas por las normas DIN 4074-1 (2012), IRAM 9662-3 (2015), IRAM 9670 (2002) y NCh 1207 (2017). En general los cuerpos de prueba presentaron micro-fisuras superficiales de secado de escasa significación y, como indican los valores expuestos en la Tabla 4.2, únicamente 3 (equivalente a 1% del total) exhibieron rajaduras de longitud mayor al ancho de la pieza, mientras que en ningún caso se observaron grietas de un largo mayor a 600 mm o $\frac{1}{4}$ de la longitud total de la pieza. Teniendo en cuenta el escaso número de cuerpos de prueba que presentan esta singularidad en las muestras estudiadas, no es posible alcanzar conclusiones respecto a su incidencia sobre las propiedades mecánicas. No obstante, autores como Esteban *et al.* (2010) respaldan una influencia prácticamente nula de las fisuras sobre la capacidad resistente a flexión para vigas de pino silvestre de gran escuadría. También la norma europea EN 14081-1 (2016) que identifica las características para las que se deben establecer limitaciones en las normas de clasificación visual de madera estructural, considera que las fisuras pueden despreciarse salvo en aquellos casos donde la experiencia y/o la investigación demuestren que las mismas tienen un efecto significativo en la resistencia de los componentes analizados. Consecuentemente, en la presente investigación las fisuras serán despreciadas como parámetro visual.

Las aristas faltantes fueron registradas únicamente dentro del tercio central de cada cuerpo de prueba, siendo contabilizadas aquellas que presentaron una pérdida de material mayor al 20% del alto o ancho de la sección transversal. Este porcentaje fue adoptado considerando los límites impuestos por las distintas normas (DIN 4074-1 2012; IRAM 9662-3 2015; IRAM 9670 2002; NCh 1207 2017; SPIB 2014) y, a la vez, es respaldado por un estudio llevado a cabo sobre elementos estructurales de *Pinus sylvestris* L. y *Pinus pinaster* Ait., el

cual afirma que gemas de hasta un tamaño similar al considerado no afectan a la resistencia a flexión en dichas especies (Arriaga Martitegui *et al.* 2007). En la Tabla 4.2 puede observarse que tan sólo 9 (2%) cuerpos de prueba de los 458 (100%) registrados fueron afectados por dicho parámetro, por lo tanto, debido a su baja incidencia sobre la madera aserrada perteneciente a esta investigación, el mismo no será contemplado en los análisis posteriores.

Finalmente, en la Tabla 4.3 aparecen aquellas singularidades que en general no afectan directamente a las propiedades de resistencia y rigidez de la madera estructural, pero al estar relacionadas con la presencia de madera juvenil podrían predecir propiedades físico-mecánicas (Moya *et al.* 2017). Éstas hacen referencia a las deformaciones que, a su vez, son limitadas por razones de índole constructiva al establecerse requisitos de apariencia y rectitud para que los productos sean adecuados al uso final previsto (Dowse 2010; Hoffmeyer 1995; Montón *et al.* 2014). En el presente estudio las mismas fueron analizadas a partir de la cuantificación del número de piezas rechazadas al considerar aisladamente el combado, el encorvado, el revirado y el abarquillado (ver Apartado 3.2.1. Deformaciones). Como límites se fijaron aquellos impuestos por la normativa argentina para la madera aserrada de pino resinoso del nordeste, es así que, para el caso de las muestras conformadas por vigas (M1, M2, M3, M4) se empleó la IRAM 9670 (2002) y para las tablas (M5), la IRAM 9662-3 (2015).

Tabla 4.3. Rechazos por deformaciones excesivas para las muestras ensayadas a flexión

Parámetro		M1 ⁽¹⁾ [45x100]*	M2 ⁽¹⁾ [45x150]*	M3 ⁽¹⁾ [70x150]*	M4 ⁽¹⁾ [70x200]*	M5 ⁽²⁾ [105x25]*	Todas
<i>Combado</i>	n (n [%])	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
<i>Encorvado</i>	n (n [%])	1 (2)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (0)
<i>Revirado</i>	n (n [%])	1 (2)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	21 (9)	22 (5)
<i>Abarquillado</i>	n (n [%])	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)

Nota. * Dimensiones de la sección transversal en mm; (1) Límites según norma IRAM 9670 (2002); (2) Límites según IRAM 9662-3 (2015); n: cantidad de cuerpos de prueba.

En la Tabla 4.3 puede observarse que el número de rechazos por alabeos es reducido, los valores obtenidos para el combado, encorvado y abarquillado son irrelevantes, mientras que el revirado se destaca como principal deformación afectando casi exclusivamente a las tablas, con un 9% de piezas descartadas para M5. Estos resultados están en línea con un estudio llevado a cabo sobre piezas de *Pinus sylvestris* (Hermoso *et al.* 2016), el cual establece

al revirado como deformación clave para la clasificación visual, principalmente en secciones transversales más pequeñas. También se obtuvo un resultado similar para tablas de *Pinus patula* (Dowse 2010) donde se registraron valores bajos de rechazos (1%) para el combado y el encorvado, y relativamente altos (57%) para el revirado, lo cual podría estar relacionado con la presencia de médula y madera juvenil. Dicha conjetura queda confirmada para la madera estructural de pino radiata (Montón *et al.* 2011) y, a la vez, se ha comprobado en piezas aserradas de *Pinus caribaea* Morelet var. *Caribaea* (Peña-Hernández *et al.* 2011) que las torceduras por alabeo aparecen durante el proceso de secado, y que éstas decrecen con la distancia a la médula, con la disminución del ancho de los anillos de crecimiento y con la declinación del ángulo de inclinación de la fibra. No obstante, sobre el material en estudio no es posible alcanzar conclusiones respecto a la incidencia de las deformaciones sobre las propiedades mecánicas puesto que el mismo presentó un bajo número de cuerpos de prueba alabeados. En consecuencia, esta singularidad no será contemplada para el diseño de un método de clasificación visual por resistencia.

Como síntesis del presente apartado, los defectos más relevantes registrados en la madera aserrada de *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* que forman parte de esta investigación fueron: la nudosidad, la presencia de médula y el tamaño de los anillos de crecimiento. Un análisis detallado de cada uno de estos parámetros con su correspondiente influencia sobre las propiedades mecánicas es expuesto posteriormente (Apartado 4.1.3).

4.1.2. Propiedades mecánicas y densidad de las muestras ensayadas a flexión

En la Tabla 4.4 se presentan discriminados por muestra los resultados correspondientes a las propiedades mecánicas y la densidad aparente obtenidos a través de los ensayos de flexión estática. Para que los mismos puedan ser comparables, tanto los valores de rigidez como de densidad fueron ajustados a una humedad de referencia del 12% conforme a los lineamientos establecidos en la norma IRAM 9664 (2013). Esta corrección resulta fundamental porque, de acuerdo a lo expuesto en el Apartado 2.2.4, dicho parámetro se encuentra estrechamente relacionado con las propiedades mecánicas de la madera.

El contenido de humedad medio de todos los cuerpos de prueba estudiados (458) fue de 12,3% asociado a un coeficiente de variación del 7%, mientras que los resultados discriminados por muestra arrojaron un valor medio del 12,3%, 13,3%, 12,1%, 12,9% y 11,9%

para M1, M2, M3, M4 y M5, respectivamente. Como en todos los casos el contenido de humedad resultó cercano al 12% asociado a un bajo coeficiente de variación (2 a 5% para las vigas y 9% para las tablas) se puede descartar una influencia desigual de esta variable sobre las propiedades mecánicas de las distintas muestras.

Tabla 4.4. Propiedades mecánicas y densidad para las muestras ensayadas a flexión

Propiedad		M1 [45x100]* (n = 64)	M2 [45x150]* (n = 61)	M3 [70x150]* (n = 50)	M4 [70x200]* (n = 50)	M5 [105x25]* (n = 233)
Resistencia a flexión	Mín [N/mm ²]	8,8	10,1	9,9	7,2	17,3
	Med [N/mm ²]	41,3	33,1	30,7	24,6	44,3
	Máx [N/mm ²]	82,3	87,9	80,6	59,4	95,2
	CV [%]	39	47	50	48	38
Módulo de Elasticidad en flexión (1)	Mín [N/mm ²]	4241	5291	4646	5568	2747
	Med [N/mm ²]	9212	9264	8713	9140	7354
	Máx [N/mm ²]	14079	14665	12995	12849	16003
	CV [%]	26	25	21	24	40
Densidad (1)	Mín [kg/m ³]	415	386	387	381	333
	Med [kg/m ³]	538	510	502	497	473
	Máx [kg/m ³]	730	724	691	652	711
	CV [%]	14	14	15	13	15

Nota. * Dimensiones de la sección transversal en mm; CV: coeficiente de variación; n: cantidad de cuerpos de prueba. (1) Valores corregidos al contenido de humedad de referencia (12%) de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013).

La resistencia a flexión media, como puede observarse en la Tabla 4.4, presentó una amplia variación entre las distintas muestras (24,6 a 44,3 N/mm²), el test de Student arrojó un valor-P < 0,05 indicando que la diferencia registrada es estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95%. Esto está en línea con resultados obtenidos a través de varios estudios (Fernández-Golfín *et al.* 2002; Piter 2012; Rouger y Barrett 1995) que corroboran el efecto del tamaño de la sección de la pieza sobre las propiedades mecánicas de la madera. Las diferencias registradas no pueden ser atribuidas a la edad de la muestra ni a la realización de podas y raleos puesto que las muestras, tanto M1 y M2 como M4 y M5, presentaron cuerpos de prueba que provenían de árboles con las mismas edades a los cuales se les habían aplicado similares tratamientos de silvicultura. Por su parte, en todos

los casos los coeficientes de variación (CV) asociados a dicha propiedad resultaron elevados, registrándose valores entre 38% y 50%. O'Neil (2004) obtuvo una cifra similar (CV = 42%) para el *Pinus taeda* cultivado en el litoral de la República Oriental del Uruguay.

El módulo de elasticidad medio también presentó cierta variación, pero en este caso se encontró una diferencia marcada entre las muestras conformadas por vigas (M1, M2, M3, M4) respecto de la constituida por tablas (M5), que resultó estadísticamente significativa (valor-P de la prueba Kolmogorov-Smirnov < 0,05 con un nivel de confianza del 95%). El mayor registro coincide con la muestra M2 (9264 N/mm²) y el menor con la muestra M5 (7354 N/mm²) que, a su vez, está asociado a un mayor coeficiente de variación (CV = 40%). Tanto Weber (2005) como O'Neil (2004) obtuvieron resultados similares para el *Pinus taeda*. El primero reportó un valor de 8816 N/mm² (CV = 31%) para madera proveniente de árboles de 16 años de edad cultivados en la provincia de Misiones y, el segundo, de 8354 N/mm² (CV = 21%) para piezas obtenidas de una forestación de 24 años ubicada en el litoral de la República Oriental del Uruguay. No obstante, existen reportes que revelan rigideces inferiores a las antes señaladas. Ramos *et al.* (2015) obtuvieron para el *Pinus elliottii* cultivado en la provincia de Entre Ríos valores de 5979 N/mm² y 5750 N/mm² relacionados con plantaciones de 37 y 19 años de edad, respectivamente. Asimismo, Moya *et al.* (2015a) determinaron para el *Pinus elliottii/taeda* proveniente de la R. O. del Uruguay un módulo medio de 6631 N/mm² vinculado a una forestación de 25 años de edad. Considerando únicamente la especie taeda cultivada en la R. O. del Uruguay, Pérez del Castillo *et al.* (2000) también obtuvieron un valor relativamente similar (6249 N/mm²).

La densidad aparente obtenida para las diferentes muestras acusó valores medios que van desde los 473 kg/m³ hasta los 538 kg/m³, asociados a coeficientes de variación que oscilaron entre 13% y 15%. Estos resultados están en línea con los reportados por Ramos *et al.* (2015) para el *Pinus elliottii* de 19 y 37 años de edad cultivado en la provincia de Entre Ríos (474 kg/m³ y 543 kg/m³ respectivamente) y, a la vez, se condicen con el obtenido por Weber (2005) para el *Pinus taeda* de 16 años de edad procedente de la provincia de Misiones (462 kg/m³).

Con el fin de evaluar la influencia de los principales parámetros visuales sobre las propiedades mecánicas y la densidad, todos los cuerpos de prueba fueron considerados como una gran muestra y cada uno de los valores fue ajustado a las condiciones de referencia. Como la rigidez y la densidad ya han sido ajustadas a una humedad de

referencia del 12%, en esta instancia sólo debió ser ajustado cada valor correspondiente a la resistencia a flexión. Dicha corrección se realizó considerando una altura de referencia de 150 mm conforme a los lineamientos establecidos en la norma IRAM 9664 (2013), la cual está en línea con la europea EN 384 (2016).

En la Tabla 4.5 se presentan los resultados, ajustados a las condiciones de referencia, para las propiedades mecánicas y la densidad aparente obtenidos a través de los ensayos de flexión estática. Los mismos se exhiben discriminados por muestra y, asimismo, se incluye un grupo conformado por vigas (M_{vigas}) correspondiente a las muestras M1, M2, M3 y M4, junto a otro grupo integrado por el total de piezas analizadas (M_{Total}). Cabe destacar que la muestra M5 se corresponde con el grupo formado únicamente por tablas. En comparación con la Tabla 4.4 y por resultar de fundamental importancia para la asignación de clases resistentes, en la Tabla 4.5 también se incluye el percentil 5% de la resistencia a flexión (f_m) y de la densidad aparente (ρ).

Con relación a las propiedades mecánicas, en la Tabla 4.5 puede apreciarse que al comparar los resultados obtenidos para las muestras conformadas por vigas (M_{vigas}) y tablas (M5), la resistencia a flexión (f_m) presentó un valor medio similar para ambas, resultando tan sólo un 5% mayor la primera respecto de la segunda, el valor-P calculado a través de la prueba K-S arrojó un valor igual a 0,10 ($> 0,05$) por lo que no se puede rechazar la hipótesis nula de igualdad entre medias con un nivel de confianza del 95%. No obstante, esta situación se invierte para el percentil 5%, ya que el valor correspondiente a M5 resultó un 28% mayor que el asociado a las vigas. En cuanto al módulo de elasticidad, $E_{m,g}$ correspondiente a la muestra M_{vigas} acusó un valor medio 24% mayor respecto de M5, es decir, las vigas presentaron una mayor rigidez con relación a las tablas.

La información exhibida en la Tabla 4.5 también muestra una elevada dispersión de valores para las propiedades mecánicas, lo cual se manifiesta en coeficientes de variación asociados a M_{total} que alcanzaron cifras de 43% y 33% para f_m y $E_{m,g}$ respectivamente. Una relativamente alta variabilidad también ha sido reportada para las propiedades mecánicas de las mismas especies pero cultivadas en la República Oriental del Uruguay. Para este material, Moya *et al.* (2015) publicaron resultados del CV que variaron entre 31% y 45% para f_m , y entre 24% y 44% para $E_{m,g}$, los cuales fueron obtenidos sobre un total de 251 vigas de *Pinus taeda/elliottii* divididas en dos muestras y, a su vez, en 3 grados estructurales. Se han informado también valores relativamente elevados del CV para otras especies de *Pinus*.

Fernandez-Golfín S. y Díez B. (1996) publicaron un CV de 46% para f_m y de 36% para $E_{m,g}$ para madera de *Pinus pinaster* cultivado en España. Carballo *et al.* (2009) reportaron valores de 32% y de 21% asociados f_m y $E_{m,g}$, respectivamente, para el *Pinus pinaster* Ait. ssp. *atlantica* de España. Stöd *et al.* (2016) informaron un CV de 36% para f_m y de 27% para $E_{m,g}$ para el *Pinus sylvestris* L. cultivado en Finlandia.

Tabla 4.5. Propiedades mecánicas y densidad discriminadas por muestra, vigas, tablas y el total para las piezas ensayadas a flexión

Propiedad	M1* [45x100] (n = 64)	M2* [45x150] (n = 61)	M3* [70x150] (n = 50)	M4* [70x200] (n = 50)	M _{Vigas} (n= 225)	M5* [105x25] (n= 233)	M _{Total} (n= 458)	
f_m ⁽¹⁾	Mín [N/mm ²]	8,1	10,1	9,9	7,6	7,6	12,0	7,6
	Med [N/mm ²]	38,1	33,1	30,8	25,9	32,4	30,8	31,6
	Máx [N/mm ²]	75,9	87,9	80,6	62,8	87,9	66,4	87,9
	CV [%]	39	47	50	47	47	38	43
	p _{0,05} [N/mm ²]	13,5	12,4	13,1	11,6	12,2	15,6	14,2
$E_{m,g}$ ⁽²⁾	Mín [N/mm ²]	4241	5291	4646	5568	4241	2747	2747
	Med [N/mm ²]	9212	9264	8713	9140	9099	7354	8212
	Máx [N/mm ²]	14079	14665	12995	12849	14665	16003	16003
	CV [%]	26	25	21	24	24	40	33
ρ ⁽²⁾	Mín [kg/m ³]	415	386	387	381	381	333	333
	Med [kg/m ³]	538	510	502	497	513	473	493
	Máx [kg/m ³]	730	724	691	652	730	711	730
	CV [%]	14	14	15	13	14	15	15
	p _{0,05} [kg/m ³]	426	425	413	398	415	387	399

Nota. * Dimensiones de la sección transversal en mm; (1) Valor ajustado a la altura de referencia de 150 mm de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); (2) Valores corregidos al contenido de humedad de referencia (12%) de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); f_m : resistencia a flexión; $E_{m,g}$: módulo de elasticidad global; ρ : densidad aparente; CV: coeficiente de variación; p_{0,05}: percentil 5%; n: cantidad de cuerpos de prueba; M_{Vigas} = M1 + M2 + M3 + M4; M_{Total} = M1 + M2 + M3 + M4 + M5.

Por su parte, es de destacar que la variabilidad de las propiedades encontrada es muy superior a la reportada para las especies que ocupan el segundo y tercer lugar de importancia en la producción de madera estructural en Argentina. Para el *Eucalyptus grandis*, que le sigue en importancia al pino resinoso, Piter *et al.* (2004a) publicaron valores del CV de 25% y 20% para f_m y $E_{m,g}$, respectivamente, obtenidos de 149 tablas ensayadas a

flexión de plano con las mismas dimensiones que las adoptadas en este proyecto. Para el *Populus deltoides* 'Australiano 129/60', Guillaumet *et al.* (2014) reportaron valores del CV iguales a 21% y 17% para f_m , y de 14% y 13% para $E_{m,g}$, obtenidos sobre dos muestras conteniendo un total de 299 tablas de las mismas dimensiones que las ensayadas en este proyecto.

Respecto a las propiedades físicas, en la Tabla 4.5 puede observarse que para el total de piezas analizadas (M_{total}) la densidad alcanzó un valor medio de 493 kg/m³ asociado a un coeficiente de variación (CV) del 15%. Estas cifras son levemente superiores a las publicadas para el *Pinus elliottii* ($\rho = 460$ kg/m³, CV = 9%) y *Pinus taeda* ($\rho = 450$ kg/m³, CV=13%) cultivado en Brasil (Melchiorretto y Eleotério 2003). En cuanto al percentil 5%, para M_{total} se registró un valor de 399 kg/m³, cifra 8% mayor a la reportada para el *Pinus taeda/elliottii* procedente de la República Oriental del Uruguay (Moya *et al.* 2017). Al compararse los resultados obtenidos para las muestras integradas por vigas y tablas, se observa que la densidad media mostró similar tendencia que el valor medio de la resistencia, presentándose una diferencia del 8% entre las M_{vigas} y M_5 .

Las propiedades analizadas (f_m , $E_{m,g}$, ρ) junto a las características visuales y a las correlaciones que las vinculan constituyen la base para el diseño de un método de clasificación visual por resistencia. A continuación se presenta el histograma de frecuencias de cada propiedad junto a la curva de distribución normal que mejor se adapta a cada caso específico. Para comprobar dicha normalidad fue aplicada la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov (K-S), la cual indica que no puede ser rechazada la hipótesis de que los datos provienen de una distribución normal con 95% de confianza si el valor-P más pequeño obtenido es mayor a 0,05. En la Figura 4.1 se exhibe el gráfico correspondiente a la resistencia a flexión (f_m) ajustada a una altura de referencia de 150 mm (IRAM 9664 2013), mientras que en la Figura 4.2 y en la Figura 4.3 aparecen los pertinentes al módulo de elasticidad ($E_{m,g}$) y a la densidad aparente (ρ) ajustadas a un contenido de humedad del 12% (IRAM 9664 2013), respectivamente.

Los datos correspondientes a la resistencia a flexión (f_m) se ajustan a una distribución normal con una media igual a 31,6 N/mm² asociada a una desviación estándar de 13,5N/mm² (ver Figura 4.1). La prueba K-S indica que puede ser rechazada la hipótesis de normalidad a un nivel de significación del 5%. No obstante, Hermoso Prieto (2001) obtuvo una gráfica similar al estudiar la madera de *Pinus sylvestris* L. proveniente de España,

comprobando a la vez que la no-normalidad no afectaba la fiabilidad de los análisis realizados para la caracterización de tal especie. Asimismo, Piter (2003) también llegó a un resultado semejante al caracterizar el *Eucalyptus grandis* de rápido crecimiento cultivado en Argentina.

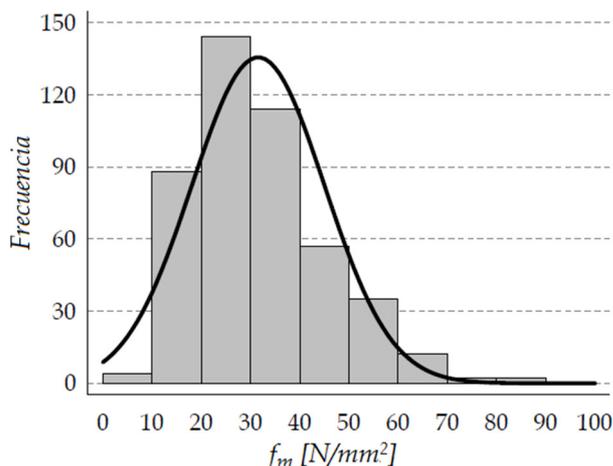


Figura 4.1. Histograma de frecuencias y curva normal asociada para la resistencia a flexión (f_m) correspondiente al total de piezas ensayadas a flexión

Por su parte, la norma EN 14358 (2016) contempla que los parámetros de resistencia pueden ajustarse alternativamente a una distribución log-normal. El análisis de los datos a través de la prueba de bondad de ajuste K-S arrojó un valor-P = 0,56 ($> 0,05$) por lo que no puede ser rechazada la hipótesis de que la resistencia a flexión proviene de una distribución log-normal con 95% de confianza. Dicha distribución (f_m) presenta una media igual a 31,7N/mm² asociada a una desviación estándar de 14,3 N/mm².

Respecto al módulo de elasticidad ($E_{m,g}$), los datos se ajustan a una distribución normal con una media igual 8212 N/mm² asociada a una desviación estándar de 2743N/mm² (ver Figura 4.2). Como el nivel de significancia (valor-P más pequeño = 0,42) de la prueba Kolmogorov-Smirnov resultó mayor al nivel de significación adoptado (0,05), se acepta la hipótesis de que los datos proceden de una población con distribución normal. Este resultado está en línea con el criterio adoptado por el reglamento argentino de estructuras de madera (INTI CIRSOC 601 2016), el cual asume la normalidad del módulo de elasticidad, derivando a partir de esta distribución un valor del módulo para ser empleado en el cálculo de la estabilidad de vigas y columnas, y otro para ser utilizado en la determinación de las deformaciones en aquellas situaciones de diseño críticas.

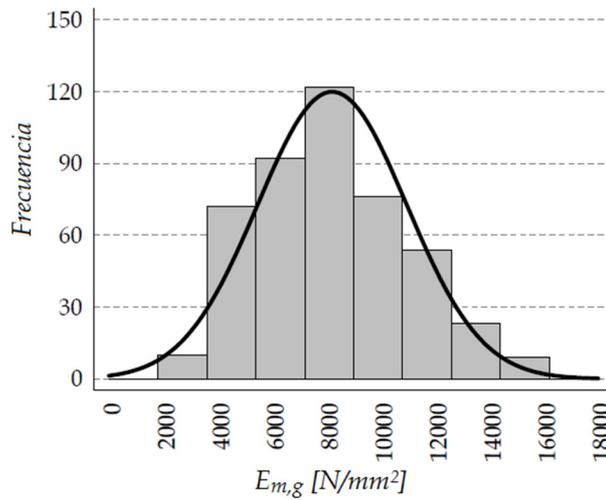


Figura 4.2. Histograma de frecuencias y curva normal asociada para el módulo de elasticidad global en flexión ($E_{m,g}$) correspondiente al total de piezas ensayadas a flexión

En cuanto a la densidad (ρ), los datos se ajustan a una distribución normal con media igual a 493 kg/m^3 asociada a una desviación estándar de 74 kg/m^3 (ver Figura 4.3). Al igual que en el caso de la resistencia a flexión, el valor-P más pequeño (≈ 0) indica que puede ser rechazada la hipótesis de normalidad a un nivel de significación del 5%. Hermoso Prieto (2001) también obtuvo una gráfica similar para el *Pinus sylvestris* L. proveniente de España, comprobando a su vez que la no-normalidad de los datos correspondientes a este parámetro no afectaban la fiabilidad de los análisis realizados para la caracterización de dicha especie.

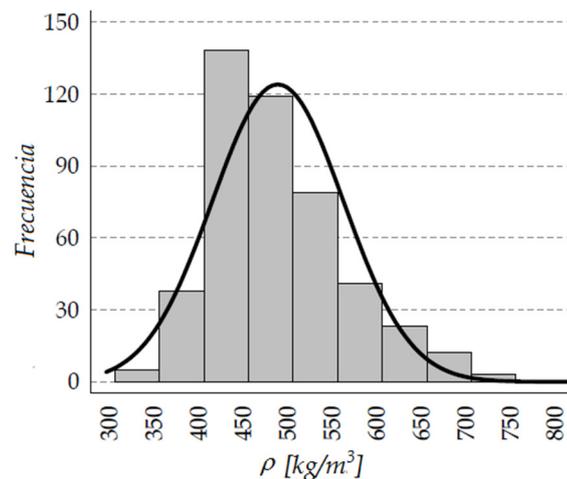


Figura 4.3. Histograma de frecuencias y curva normal asociada para la densidad (ρ) correspondiente al total de piezas ensayadas a flexión

Al igual que en el caso de la resistencia, se analiza la posibilidad de que los valores correspondientes a la densidad se ajusten a una distribución log-normal (EN 14358 2016). La prueba de bondad de ajuste K-S arrojó un valor-P = 0,11 ($> 0,05$) indicando que no puede ser rechazada la hipótesis de que ρ proviene de una distribución log-normal con 95% de confianza. Dicha distribución presenta una media igual a 493 kg/m³ asociada a una desviación estándar de 72 kg/m³.

No obstante, la hipótesis de normalidad de las distribuciones será verificada en aquellos análisis específicos que se efectúen asumiendo la normalidad de los datos involucrados, garantizando así la fiabilidad de los resultados obtenidos.

4.1.3. Relación entre los parámetros visuales y las propiedades físico-mecánicas

La nudosidad, la presencia de médula y el tamaño de los anillos de crecimiento han sido seleccionados -a partir del análisis desarrollado en el Apartado 4.1.1- como los defectos más relevantes registrados en las piezas de madera aserrada involucradas en esta investigación. Con el fin de evaluar la influencia que tales parámetros visuales ejercen sobre las propiedades físico-mecánicas, a continuación se presenta el estudio de la correlación existente entre ambas variables. El análisis individual de cada singularidad conformará la base requerida para la posterior selección de los distintos perfiles de calidad.

Nudosidad

Aplicación de criterios estandarizados

Dada la importancia de esta singularidad para el material investigado, en primer lugar se estudia la correlación existente entre los valores de la resistencia a flexión (f_m) y los correspondientes a la nudosidad determinada según los distintos criterios de relevancia, tanto en el plano nacional como internacional, adoptados para tablas y vigas: K, KAR, KARM, KAR 150 y KARM 150, los cuales fueron previamente descritos en el Apartado 3.2.1 (Nudos). Los resultados obtenidos tanto para el coeficiente de determinación (R^2) como para el de correlación de Pearson (R) son expuestos en la Tabla 4.6. Los valores se presentan de forma independiente para cada una de las muestras y también discriminados entre vigas ($M_{vigas} = M1+M2+M3+M4$) y tablas (M5).

Tabla 4.6. Relación entre la resistencia y la nudosidad para las muestras ensayadas a flexión

Criterio		M1	M2	M3	M4	M _{Vigas}	M5
		[45x100]* (n = 64)	[45x150]* (n = 61)	[70x150]* (n = 50)	[70x200]* (n = 50)	(n = 225)	[105x25]* (n = 233)
K	R ²	0,14	0,32	0,24	0,21	0,24	0,46
	R	- 0,37	- 0,57	- 0,49	- 0,46	- 0,49	- 0,68
KAR	R ²	0,28	0,59	0,36	0,32	0,41	0,43
	R	- 0,53	- 0,77	- 0,60	- 0,56	- 0,64	- 0,66
KARM	R ²	0,23	0,47	0,51	0,33	0,40	-
	R	- 0,48	- 0,68	- 0,72	- 0,58	- 0,63	-
KAR 150	R ²	0,31	0,56	0,37	0,36	0,40	0,43
	R	- 0,56	- 0,75	- 0,61	- 0,60	- 0,64	- 0,66
KARM 150	R ²	0,27	0,45	0,55	0,34	0,39	-
	R	- 0,52	- 0,67	- 0,74	- 0,58	- 0,63	-

Nota. * Dimensiones de la sección transversal en mm; R²: Coeficiente de determinación. R: Coeficiente de correlación de Pearson. M_{Vigas} = M1+M2+M3+M4; M_{Tablas} = M5.

En la Tabla 4.6 puede observarse que la relación entre la resistencia a flexión (f_m) y la nudosidad -bajo todos los criterios analizados- presenta una correlación negativa moderadamente fuerte; en todos los casos existe una relación estadísticamente significativa entre los valores f_m y nudosidad con un nivel de confianza del 95% (valor-P < 0,05, ANOVA). Esto corrobora la importancia del efecto de esta singularidad sobre el material en estudio y, a su vez, está en línea con lo reportado para la madera de pino de diferentes combinaciones especie/procedencia (Cardoso *et al.* 2017; Carreira y Alves Dias 2006; Dávalos-Sotelo y Ordóñez 2011; Hermoso Prieto 2001).

Siguiendo la modalidad de las normas argentinas -sobre clasificación del pino resinoso del nordeste- que consideran a las tablas flexionadas de plano (IRAM 9662-3 2015) en forma independiente de las vigas flexionadas de canto (IRAM 9670 2002), el análisis de los resultados expuestos en la Tabla 4.6 se presenta también de ese modo, en primer lugar se analizan las tablas y luego las vigas.

Las tablas están representadas por la muestra M5 y, según los datos expuestos en la Tabla 4.6, el criterio de nudosidad que mejor predice la resistencia f_m asociada a dicha muestra es el K (R² = 0,46). Este criterio es congruente con el sistema de medición adoptado por la norma de clasificación visual por resistencia IRAM 9662-3 (2015). Bajo los criterios

KAR y KAR 150, por su parte, la predicción de f_m fue levemente inferior a la obtenida con el anterior (7% de diferencia entre valores R^2), registrándose un coeficiente de determinación de 0,43 en ambos casos, valor que se condice con aquellos reportados (R^2 entre 0,35 y 0,60) para tablas de *Picea abies* y *Pinus sylvestris* provenientes de Finlandia y Rusia (Hanhijärvi y Ranta-Maunus 2008).

Del análisis anterior surge que el criterio de nudosidad K es el que mejor predice la resistencia de la muestra M5, por lo que el mismo será adoptado para el registro y determinación de los nudos asociados a las tablas. En la Figura 4.4 se grafica la relación encontrada entre la nudosidad K y la resistencia a flexión, indicándose también el valor del coeficiente de determinación (R^2) junto a la ecuación de la recta de regresión.

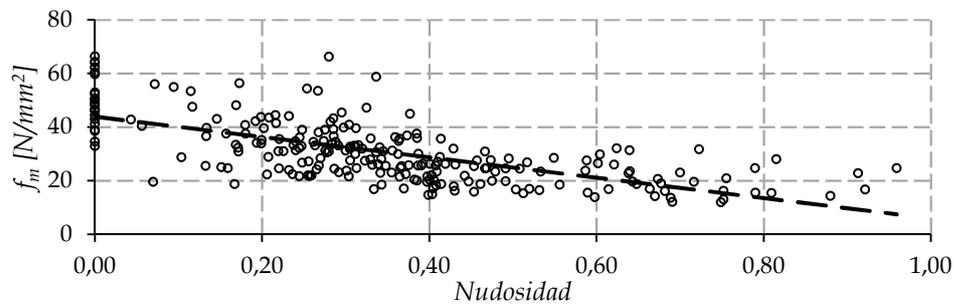


Figura 4.4. Relación entre nudosidad y resistencia a flexión (f_m) en tablas. (○) Criterio K. $R^2 = 0,46$; (— —) recta de regresión: $f_m = -37,983x + 43,912$

Las vigas están representadas por las muestras M1, M2, M3 y M4, y en su conjunto por la muestra M_{vigas} . La mejor correlación f_m -Nudosidad se obtuvo al considerar la proyección del área nudosa sobre la sección transversal completa de la pieza. De acuerdo a los valores presentados en la Tabla 4.6, la nudosidad KAR explica entre un 28% y un 59% la variación de la resistencia a flexión. Estas cifras superan a las obtenidas por Dávalos-Sotelo y Ordóñez C. (2011) para la madera de pino procedente de México ($R^2 = 0,22$) pero están en línea con las reportadas por Guillaumet *et al.* (2008) para la *Araucaria angustifolia* cultivada en Misiones ($R^2 = 0,40$ a $0,56$). Bajo el criterio KAR 150, por su parte, el coeficiente R^2 para M_{vigas} tomó un valor igual a 0,40, el que se compara de manera favorable con el registrado por Dávalos-Sotelo y Limón G. (2009) para la madera del género *Pinus* de Durango ($R^2 = 0,41$).

Los criterios KARM y KARM 150, que consideran únicamente los nudos ubicados en los cuartos extremos de la sección transversal de cada viga, arrojaron valores de correlación

f_m -Nudosidad ligeramente inferiores que los obtenidos bajo los criterios KAR o KAR 150, respectivamente. La muestra M3, sin embargo, representa una excepción y podría deberse a una marcada presencia de nudos ubicados en el borde traccionado de las piezas ensayadas a flexión, considerando que las mismas fueron dispuestas al azar. En la Tabla 4.6 puede observarse que la correlación obtenida para M_{vigas} a través de la relación f_m -KARM resultó semejante a la alcanzada por f_m -KARM 150, registrándose un coeficiente R igual a -0,63. Esta cifra se compara de manera favorable con la registrada para vigas de *Araucaria angustifolia* procedente de Misiones (R = -0,60), para las cuales también se obtuvo una correlación sensiblemente menor al considerar los nudos de margen respecto de aquellos que ocupan la sección transversal completa (R = -0,66) (Guillaumet *et al.* 2008).

El criterio de nudosidad K, por su parte, mostró la menor eficiencia en cuanto a la predicción de la resistencia de las vigas. La muestra M_{vigas} arrojó un valor R negativo de 0,49 (ver Tabla 4.6), cifra menor a las publicadas por Guillaumet *et al.* (2008) y Adell Almazán (2005) para piezas aserradas de *Araucaria angustifolia* cultivada en Misiones (R = -0,56) y de *Pinus sylvestris* L. procedente de Alemania (R = -0,58), respectivamente. La menor precisión de este criterio, sin embargo, se ve compensada con la simpleza de su aplicación respecto de la complejidad que involucran aquellos orientados a determinar la proyección del área nudosa sobre la sección transversal de la pieza.

Análisis considerando la sección transversal remanente de las vigas

Como se describió en el Capítulo 3, los criterios basados en la relación de nudo a área de la sección transversal (KAR -Knot Area Ratio-) o en la relación de nudos de margen a área (KARM) tienen por objetivo medir la pérdida de sección (desplazamiento) que produce el nudo. El segundo de ellos, y en particular para los esfuerzos de flexión, persigue evaluar la pérdida de sección transversal en las zonas más alejadas del eje neutro. Estos criterios han sido adoptados por reglas de clasificación de relevancia internacional tales como las del Southern Pine Inspection Bureau (SPIB 2014), las que establecen limitaciones más estrictas sobre los nudos de margen que sobre los cercanos al eje neutro en base a la hipótesis de que los primeros producen un mayor impacto sobre el momento de inercia y el módulo resistente de la sección.

Sin embargo, los resultados presentados en la Tabla 4.6 no indican una mayor correlación (con la resistencia a flexión) para los criterios KARM y KARM 150, lo cual

cuestiona la hipótesis mencionada en el párrafo anterior. Con el propósito de comprobar la importancia de conocer el valor del módulo resistente de la sección remanente, se llevó a cabo un análisis detallado (según la teoría de la resistencia de materiales) a partir de los resultados experimentales obtenidos sobre las muestras integradas por vigas.

Para tal fin se consideraron como vacíos los espacios ocupados por los nudos (ver Apartado 3.2.1. Nudos) y, definidas las secciones netas aplicando los criterios KAR, KARM, KAR 150 y KARM 150, se determinó el momento de inercia para luego proceder al cálculo de los respectivos módulos resistentes. Para relacionar de forma clara las variables de interés, cada valor calculado fue expresado como el porcentaje del módulo remanente (S_{rem}) respecto al obtenido considerando la sección completa. Con esta información se procedió a estudiar la relación existente entre S_{rem} y las siguientes variables: i) la resistencia a flexión y ii) la nudosidad según los cuatro criterios antes señalados.

La relación estadística entre S_{rem} y la resistencia a flexión se estableció mediante un análisis de regresión lineal. Los resultados obtenidos, tanto para el coeficiente de determinación (R^2) como para el de correlación de Pearson (R), se presentan en la Tabla 4.7 discriminados por muestra y por criterio de nudosidad.

Tabla 4.7. Resistencia versus Módulo resistente remanente para las muestras conformadas por vigas ensayadas a flexión

Criterio		M1	M2	M3	M4	M _{Vigas}
		[45x100]* (n = 64)	[45x150]* (n = 61)	[70x150]* (n = 50)	[70x200]* (n = 50)	(n = 225)
KAR	R ²	0,28	0,51	0,56	0,34	0,44
	R	0,53	0,71	0,75	0,58	0,67
KARM	R ²	0,22	0,46	0,55	0,34	0,41
	R	0,47	0,68	0,74	0,58	0,64
KAR 150	R ²	0,30	0,49	0,58	0,34	0,42
	R	0,54	0,70	0,76	0,58	0,65
KARM 150	R ²	0,25	0,45	0,59	0,33	0,39
	R	0,50	0,67	0,77	0,57	0,63

Nota. * Dimensiones de la sección transversal en mm; R²: Coeficiente de determinación; R: Coeficiente de correlación de Pearson.

De acuerdo a los datos expuestos en la Tabla 4.7, entre un 22% y un 59% de la variación de la resistencia a flexión (f_m) es explicada por el módulo resistente remanente (S_{rem}), los menores valores de R^2 se corresponden con M1 y los mayores con M3. Considerando de forma independiente cada una de las muestras, se puede observar que los resultados obtenidos para el coeficiente de Pearson (R) bajo los 4 criterios de nudosidad fueron similares, sin evidenciarse tendencia alguna entre muestras. Para la totalidad de las vigas (M_{vigas}), la relación f_m - S_{rem} presentó una correlación levemente superior (2%) bajo los 2 criterios que consideran los nudos en una sección (KAR y KARM) respecto de los agrupados en un largo igual a 150 mm (KAR 150 y KARM 150).

Al comparar estos resultados con los presentados en la Tabla 4.6 para la relación f_m - *Nudosidad*, puede constatarse que los valores obtenidos resultan similares. Es decir, la determinación de S_{rem} no aportó en este caso una información adicional a la ya obtenida a través del análisis considerando los criterios estandarizados para expresar la nudosidad.

Es interesante observar a su vez en la Tabla 4.7 que la correlación registrada entre S_{rem} y f_m para los criterios que contemplan el desplazamiento de los nudos en toda la sección (KAR y KAR 150) resultó en general ligeramente superior a la obtenida para aquellos que consideran sólo el desplazamiento de los nudos ubicados en los márgenes exteriores (KARM y KARM 150). Estos resultados están en línea con los presentados anteriormente en la Tabla 4.6 e insinúan que la consideración del módulo resistente remanente no es suficiente para explicar adecuadamente el comportamiento mecánico de estas vigas; cuestionando a su vez el criterio de normas de relevancia internacional (SPIB 2014) que asignan al desplazamiento producido por los nudos de margen (relación entre el área proyectada de los nudos ubicados en los cuartos exteriores de la pieza y el área de esas márgenes) una importancia significativa en la reducción de la capacidad portante de las vigas. Como el objetivo perseguido es la clasificación por resistencia se desconoce la ubicación de los nudos puesto que, tal como lo establece la norma IRAM 9664 (2013), al momento de ensayo el borde sometido a tracción fue elegido al azar.

Lo expresado en el párrafo anterior confirma la necesidad de estudiar la relación entre S_{rem} y la nudosidad para comprobar la suposición de que los criterios KARM y KARM 150 expresan con mayor precisión el valor de S_{rem} que los restantes. La confirmación de esta conjetura implicaría la existencia de otras variables no consideradas que influyen sobre el comportamiento resistente del material. Éstas podrían ser atribuibles a la elevada

anisotropía y heterogeneidad del material, causantes de un comportamiento mecánico que no puede explicarse satisfactoriamente por la simple consideración de la sección transversal remanente o útil. Los resultados del análisis realizado se exhiben en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Módulo resistente remanente versus Nudosidad para las muestras conformadas por vigas ensayadas a flexión

Criterio		M1	M2	M3	M4	M _{vigas}
		[45x100]* (n = 64)	[45x150]* (n = 61)	[70x150]* (n = 50)	[70x200]* (n = 50)	(n = 225)
KAR	R ²	0,42	0,67	0,70	0,77	0,65
	R	- 0,64	- 0,82	- 0,84	- 0,88	- 0,80
KARM	R ²	0,93	0,96	0,97	0,97	0,96
	R	- 0,96	- 0,98	- 0,99	- 0,98	- 0,98
KAR 150	R ²	0,59	0,74	0,73	0,77	0,70
	R	- 0,77	- 0,86	- 0,85	- 0,88	- 0,84
KARM 150	R ²	0,94	0,96	0,97	0,96	0,96
	R	- 0,97	- 0,98	- 0,99	- 0,98	- 0,98

Nota. * Dimensiones de la sección transversal en mm; R²: Coeficiente de determinación; R: Coeficiente de correlación de Pearson.

En la Tabla 4.8 puede apreciarse en general la existencia de una alta correlación negativa entre el módulo resistente remanente (S_{rem}) y la nudosidad, en congruencia con el hecho de que un incremento del área ocupada por los nudos va acompañado por una disminución del área útil de la sección transversal. El área de los nudos se elimina independientemente a la ubicación de los mismos (en borde comprimido o traccionado) porque en un proceso de clasificación por resistencia se desconoce como irá ubicada la pieza en obra, es decir, al buscar un método para ser utilizado en la práctica habitual los nudos podrían ocupar cualquier ubicación. El coeficiente de correlación asociado al criterio KAR 150 resultó ligeramente superior al obtenido a través de KAR, registrándose una diferencia del 5% para la totalidad de las muestras (M_{vigas}), mientras que los valores R asociados a KARM 150 y KARM resultaron prácticamente coincidentes en todos los casos y cercanos a la unidad.

El hecho de que los criterios que expresan la nudosidad en los márgenes externos de la sección transversal exhiban un valor de R cercano a 1 (comprendidos entre 0,96 y 0,99), y en consecuencia exhiban una relación con S_{rem} que puede considerarse lineal a los fines

prácticos, confirma que esos criterios predicen con elevada fidelidad la pérdida de módulo resistente (Tabla 4.8) pero con moderada eficiencia la resistencia a flexión (Tabla 4.6). Estos resultados evidencian la influencia de variables, vinculadas a la heterogeneidad y anisotropía del material (Baño 2009), no consideradas en el análisis precedente. Éstas ocasionaron que la resistencia a flexión no haya podido ser explicada totalmente a través del módulo resistente de la sección transversal a la cual se le descontó la proyección de los nudos. Una explicación parcial de esto podría deberse a que no se discriminaron entre nudos de distintos tipos (suelto, firme, etc.) y tampoco se diferenció su ubicación (zona traccionada o comprimida).

Selección de los criterios más eficientes para las vigas

El estudio llevado a cabo sobre los distintos criterios de nudosidad puso de relieve que el criterio de mayor eficiencia general para predecir la resistencia de las vigas fue el KAR 150 (Tabla 4.6), si bien con diferencias no importantes respecto de los restantes que expresan la proyección del área nudosa (KAR, KARM y KARM 150). Este resultado está en línea con resultados previamente publicados para otras especies cultivadas en nuestro país tales como la *Araucaria angustifolia* (Guillaumet *et al.* 2008) y el *Eucalyptus grandis* (Piter 2012). Por otra parte, el criterio K, que presentó la mejor relación con la resistencia de las tablas fue el menos correlacionado con la resistencia de las vigas (Figura 4.4 y Tabla 4.6). No obstante esta circunstancia, la ventaja que representa su fácil determinación y el hecho de estar incorporado a la normativa del país (INTI CIRSOC 601 2016; IRAM 9662-3 2015) fue especialmente considerada y se decidió continuar el estudio de la nudosidad de las vigas sobre la base de los dos criterios destacados: i) K por lo expuesto anteriormente y, KAR 150 por su eficiencia para predecir la resistencia. La relación encontrada entre la resistencia a flexión y la nudosidad determinada a través de ambos criterios se presenta en el gráfico expuesto en la Figura 4.5.

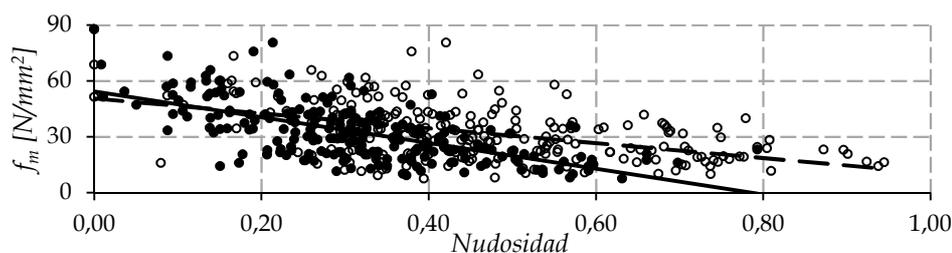


Figura 4.5. Relación entre nudosidad y resistencia a flexión (f_m) en vigas. (○) Criterio K. $R^2 = 0,24$; (—) recta: $f_m = -39,969x + 50,677$. (●) Criterio KAR 150. $R^2 = 0,40$; (—) recta: $f_m = -69,079x + 54,384$

Médula

Para el total de piezas en estudio, los resultados obtenidos respecto de la influencia de la médula sobre las propiedades de resistencia y rigidez se presentan en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9. Propiedades mecánicas y densidad para los cuerpos de prueba ensayados a flexión. Comparación de resultados para piezas con médula, sin médula y el total.

Propiedad	Todas (n = 458)	Sin médula (n = 308)	Con médula (n = 150)
$f_m^{(1)}$	Mínimo [N/mm ²]	7,6	8,1
	Medio [N/mm ²]	31,6	27,4
	Máximo [N/mm ²]	87,9	66,0
	Desvío [N/mm ²]	13,5	11,8
	CV [%]	43	43
$E_{m,g}^{(2)}$	Mínimo [N/mm ²]	2747	3031
	Medio [N/mm ²]	8212	7331
	Máximo [N/mm ²]	16003	14059
	Desvío [N/mm ²]	2743	2382
	CV [%]	33	32
$\rho^{(2)}$	Mínimo [kg/m ³]	333	374
	Medio [kg/m ³]	493	484
	Máximo [kg/m ³]	730	691
	Desvío [kg/m ³]	74	67
	CV [%]	15	14

Nota. (1) Valor ajustado a la altura de referencia de 150 mm de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); (2) Valores corregidos al contenido de humedad de referencia (12%) de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); CV: coeficiente de variación; n: cantidad de cuerpos de prueba.

Para la resistencia a flexión (f_m) se obtuvo un valor medio de 33,6 N/mm² asociado a los cuerpos de prueba libres de médula, siendo el mismo un 23% mayor que el correspondiente al grupo que si la involucra (27,4 N/mm²). Para el módulo de elasticidad ($E_{m,g}$) la diferencia registrada entre valores medios fue algo menor (18%). Para ambos casos (f_m , $E_{m,g}$) la Prueba K-S arrojó un valor-P < 0,05 indicando que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones con un nivel de confianza del 95%. Estos resultados están en línea con el criterio de la norma IRAM 9662-3 (2015) y del National Design Specification (NDS 2012) que considera a la médula como un parámetro

que afecta el desempeño mecánico del *Pinus taeda/elliottii* y, a la vez, son congruentes con los reportados para varias especies de rápido crecimiento en las cuales la presencia de médula, al estar asociada a la madera juvenil que se desarrolla en los primeros años de vida del árbol, reduce significativamente la resistencia y rigidez de las piezas (Ballarin y Lara P. 2003; Haselein *et al.* 2000; Hermoso Prieto *et al.* 2013; Pérez del Castillo 2001; Piter 2003).

Sobre la densidad aparente, contrariamente a lo encontrado para f_m y $E_{m,g}$ la influencia de la médula no fue significativa con un 95% de confianza (la prueba K-S arrojó un valor-P de 0,23). De la Tabla 4.9 se puede inferir que los cuerpos de prueba libres de médula exhibieron un valor medio solamente 3% mayor que el correspondiente a los que si la contienen y, en ambos casos, los coeficientes de correlación resultaron prácticamente iguales, acusando una diferencia de tan sólo 1%. Un comportamiento similar fue registrado para el *Eucaliptus grandis* cultivado en Argentina (Piter 2003).

Siguiendo la modalidad adoptada para el análisis de la nudosidad, el efecto de la presencia de médula sobre las propiedades mecánicas y la densidad es analizado a continuación de forma independiente para las vigas (M1+M2+M3+M4) cargadas de canto y las tablas (M5) cargadas de plano. Los resultados obtenidos para ambos grupos se exhiben en la Tabla 4.10 y, además, en la Figura 4.6 y Figura 4.7 se puede apreciar de forma gráfica la influencia que ejerce la médula sobre la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad, respectivamente.

A partir del análisis de los datos expuesto en la Tabla 4.10 se puso en evidencia una mayor influencia de este parámetro visual sobre las tablas respecto de las vigas. En ambos casos la diferencia entre valores medios de resistencia y rigidez fue estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95% (valor-P de la prueba K-S < 0,05). Entre cuerpos de prueba con y sin médula, para f_m medio la diferencia registrada ascendió al 20% para el grupo conformado por vigas y al 39% para el integrado por tablas, mientras que al considerar $E_{m,g}$ medio tales diferencias alcanzaron cifras de 17% y 58%, respectivamente.

Esta marcada desigualdad se puede asociar al hecho de que las tablas cuentan con una sección transversal más reducida, entonces en aquellas piezas donde aparece la médula, la presencia de madera juvenil es prácticamente completa. En las tablas, asimismo, se evidencia que el módulo de elasticidad fue el mayormente afectado, lo cual resulta lógico porque el ángulo de las microfibrillas asociadas a la capa S2 de la pared celular secundaria -especialmente en las especies de rápido crecimiento- presenta una mayor inclinación en la

madera juvenil respecto a la normal, afectando principalmente a la rigidez de la pieza y en menor grado a la resistencia (Cave y Walker 1994; Hoffmeyer 1995; Donaldson 2008; Yin *et al.* 2011).

Los resultados obtenidos confirman el efecto negativo de la presencia de médula sobre las propiedades mecánicas de la madera aserrada de *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* cultivado en el nordeste de Argentina. Como la influencia de dicho parámetro visual es significativa en aquellas piezas de menor sección transversal, para las tablas resulta de fundamental importancia su consideración en el desarrollo de un método de clasificación visual por resistencia.

Tabla 4.10. Propiedades mecánicas y densidad para las vigas y tablas ensayadas a flexión. Comparación de resultados para piezas con y sin médula.

Propiedad	Vigas (M1+M2+M3+M4)		Tablas (M5)	
	Sin médula (n = 121)	Con médula (n = 104)	Sin médula (n = 187)	Con médula (n = 46)
Mínimo [N/mm ²]	7,6	8,1	12,1	12,0
Medio [N/mm ²]	35,1	29,2	32,6	23,4
$f_m^{(1)}$ Máximo [N/mm ²]	87,9	66,0	66,4	44,6
Desvío [N/mm ²]	16,4	12,9	11,8	7,5
CV [%]	47	44	36	32
Mínimo [N/mm ²]	4913	4241	2747	3031
Medio [N/mm ²]	9740	8354	7929	5019
$E_{m,g}^{(2)}$ Máximo [N/mm ²]	14665	14059	16003	9782
Desvío [N/mm ²]	2243	1927	2909	1552
CV [%]	23	23	37	31
Mínimo [kg/m ³]	396	381	333	374
Medio [kg/m ³]	527	498	478	454
$\rho^{(2)}$ Máximo [kg/m ³]	730	691	711	662
Desvío [kg/m ³]	76	67	70	59
CV [%]	14	13	15	13

Nota. (1) Valor ajustado a la altura de referencia de 150 mm de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); (2) Valores corregidos al contenido de humedad de referencia (12%) de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); CV: coeficiente de variación; n: cantidad de cuerpos de prueba.

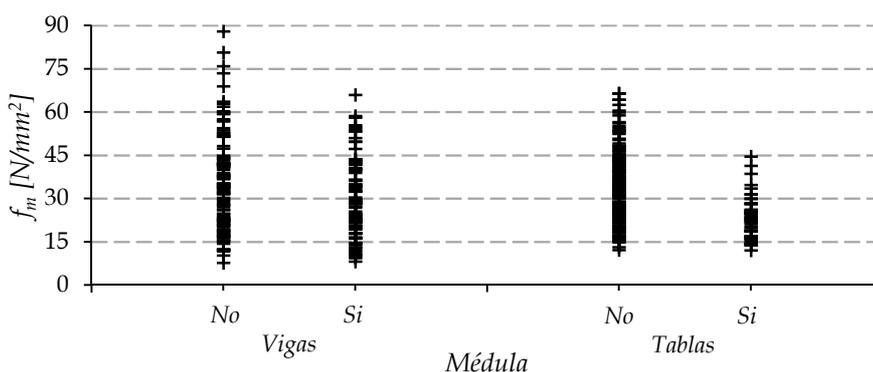


Figura 4.6. Relación entre la presencia de médula y la resistencia a flexión (f_m) discriminada para vigas y tablas

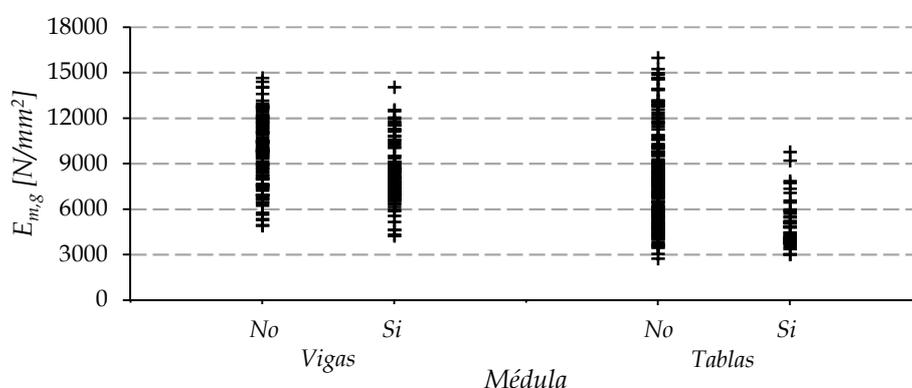


Figura 4.7. Relación entre la presencia de médula y el módulo de elasticidad ($E_{m,g}$) discriminada para vigas y tablas

Anillos de crecimiento

Los anillos de crecimiento, como se expresó en el Apartado 4.1.1, fueron registrados bajo dos modos de medición: el adoptado por la norma IRAM 9662-3 (2015) que considera únicamente el espesor del mayor anillo, y el establecido por la norma IRAM 9670 (2002) que cuantifica la cantidad de anillos promedio que aparecen en una pulgada. Los histogramas de frecuencia correspondientes al primer y segundo modo se exhiben en la Figura 4.8 y Figura 4.9 respectivamente, en ambos casos los resultados fueron discriminados entre vigas (M1+M2+M3+M4) y tablas (M5).

Del primer histograma (Figura 4.8) se deduce que la mayoría de las piezas (47%) presentaron anillos de crecimiento entre 10 mm y 15 mm de ancho, registrándose proporciones similares tanto en vigas (45%) como en tablas (48%). Sin embargo ambos elementos se diferencian en que el 88% de las vigas se ubicaron en un rango comprendido entre 10 mm y 20 mm, mientras que el 72% de las tablas, entre 5 mm y 15 mm. Esta

divergencia podría deberse al plan de corte aplicado al rollizo al momento de producir la madera aserrada de las distintas escuadrías que conformaron el material de estudio.

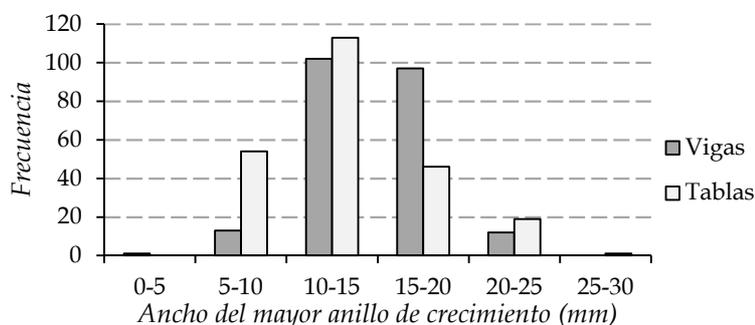


Figura 4.8. Histograma de frecuencias del ancho del mayor anillo de crecimiento

En relación al segundo modo de medición, en el histograma de la Figura 4.9 se observa que para ambos elementos estructurales la mayor proporción de piezas se ubicó dentro del rango 2-3 anillos por pulgada, revelando un valor de 51% y 36% para vigas y tablas respectivamente. Asimismo, el intervalo que abarca de 1 a 3 anillos por pulgada resultó ser el más recurrente al incluir un 71% de vigas y un 64% de tablas. Las reglas norteamericanas para clasificación del pino del sur (SPIB 2014) y el proyecto de revisión de la norma de Brasil NBR 7190 sobre estructuras de madera (ABNT 2010) adoptaron esta forma de medición para preclasificar las piezas entre densas y no densas. De acuerdo a tales reglas, una madera densa es aquella que contiene 6 o más anillos de crecimiento por pulgada y al menos un tercio de madera de verano, o bien 4 anillos de crecimiento por pulgada y al menos el 50% de madera de verano. Una madera que no reúne tales requisitos es considerada como no densa.

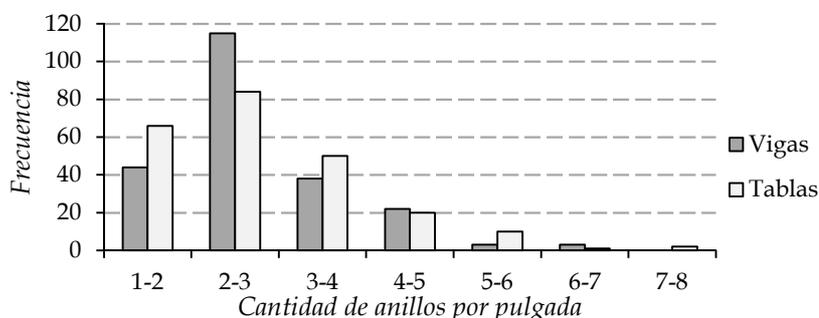


Figura 4.9. Histograma de frecuencias de la cantidad de anillos por pulgada

Si el criterio antes expuesto es aplicado a la madera de pino resinoso en estudio, el histograma presentado en la Figura 4.9 indica que tan sólo 1% del total de cuerpos de

prueba (458) contaron con 6 o más anillos de crecimiento por pulgada. Esta cifra ascendió a 12% para el rango comprendido entre 4 y 6 anillos por pulgada pero, en contraposición, dichas piezas no satisficieron la condición impuesta sobre la proporción mínima de madera de verano. En síntesis, la madera de *Pinus taeda/elliottii* del nordeste de Argentina puede ser catalogada como “no densa”. Estos resultados coinciden con el criterio adoptado por las reglas de diseño de EEUU NDS (2012), que en el suplemento destinado a proveer valores de diseño de referencia para maderas importadas incluye al pino resinoso proveniente de Misiones (Argentina) únicamente bajo la categoría de “madera no densa”.

Con el fin de analizar el grado de predicción de las propiedades de resistencia (f_m), rigidez ($E_{m,g}$) y densidad (ρ) por parte de los anillos de crecimiento, en la Tabla 4.11 se exponen los resultados de las relaciones encontradas entre las propiedades físico-mecánicas obtenidas experimentalmente y el parámetro visual determinado bajo ambos criterios adoptados, los valores se presentan discriminados entre vigas (M1+M2+M3+M4) y tablas (M5). Cabe señalar que en todos los casos la relación entre las variables analizadas es estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95% (valor-P < 0,05 del análisis ANOVA).

Tabla 4.11. Relación entre las propiedades físico-mecánicas y los anillos de crecimiento para las piezas discriminadas entre vigas y tablas

Parámetro		Ancho del mayor anillo [mm]		Cantidad de anillos por pulgada [-]	
		Vigas (n = 225)	Tablas (n = 233)	Vigas (n = 225)	Tablas (n = 233)
$f_m^{(1)}$	R ²	0,11	0,27	0,12	0,28
	R	- 0,34	- 0,52	0,35	0,53
$E_{m,g}^{(2)}$	R ²	0,12	0,43	0,19	0,46
	R	- 0,34	- 0,65	0,44	0,68
$\rho^{(2)}$	R ²	0,23	0,23	0,34	0,29
	R	- 0,48	- 0,48	0,58	0,53

Nota. (1) Valor ajustado a la altura de referencia de 150 mm de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); (2) Valores corregidos al contenido de humedad de referencia (12%) de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); n: cantidad de cuerpos de prueba; R²: Coeficiente de determinación; R: Coeficiente de correlación de Pearson.

Las tres relaciones que involucran el “ancho del mayor anillo de crecimiento” se exhiben gráficamente en la Figura 4.10, Figura 4.11 y Figura 4.12 para f_m , $E_{m,g}$ y ρ respectivamente. En éstas también se indica el valor del coeficiente de determinación (R²)

junto a la ecuación de la recta de regresión. Para las vigas, como puede apreciarse en la Tabla 4.11, el coeficiente de correlación obtenido para ambas propiedades mecánicas fue igual ($R = -0,34$), explicándose a través del mismo tan solo un 11% y 12% de la variabilidad de f_m y $E_{m,g}$ respectivamente. Estudios llevados a cabo sobre piezas estructurales de *Pinus pinaster*, *P. radiata* y *P. sylvestris* cultivados en Europa también arrojaron una reducida predicción de la calidad de las vigas a través de la consideración del ancho de los anillos de crecimiento (Diéz B. y Fernández-Golfín 1998; Fernández-Golfín S. y Diéz B. 1994; Hermoso Prieto 2001). No obstante, la correlación alcanzada por parte de las tablas fue superior, registrándose valores incrementados en un 55% ($R = -0,52$) para f_m y en un 90% ($R = -0,65$) para $E_{m,g}$ respecto al obtenido para las vigas. Además, estos resultados dejaron en evidencia una mayor influencia de este parámetro visual sobre la rigidez respecto de la resistencia, considerando que a través del mismo se explica un 27% y un 42% de la variabilidad de f_m y $E_{m,g}$ respectivamente. En relación con la densidad, tanto en la Tabla 4.11 como en la Figura 4.12 se puede observar que ambos grupos (vigas y tablas) presentaron idéntica correlación ($R = -0,48$) asociada a un coeficiente de determinación de 0,23.

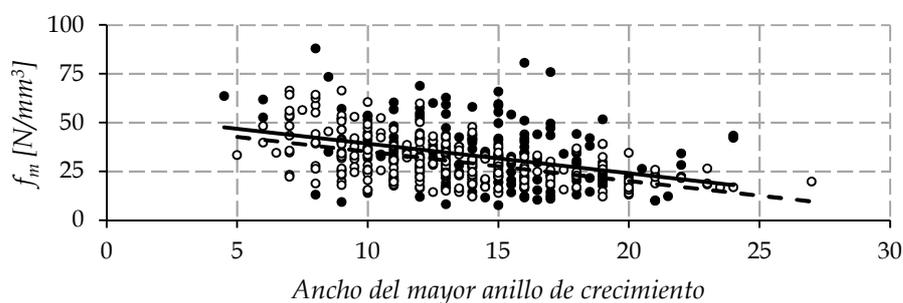


Figura 4.10. Relación entre el ancho del mayor anillo de crecimiento y la resistencia a flexión (f_m). (○) Tablas. $R^2 = 0,27$; (---) recta de regresión: $f_m = -1,5041x + 50,217$. (●) Vigas. $R^2 = 0,11$; (—) recta de regresión: $f_m = -1,5193x + 54,398$

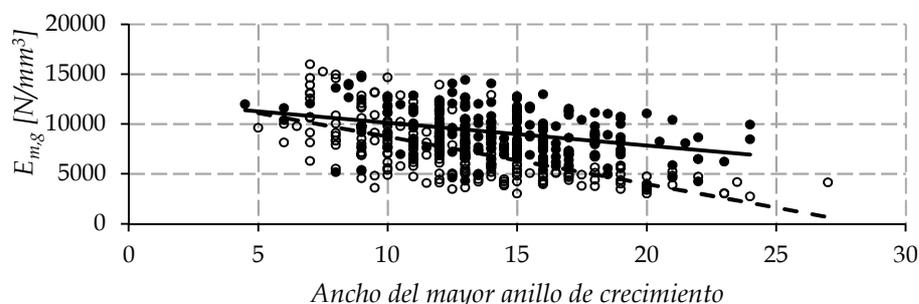


Figura 4.11. Relación entre el ancho del mayor anillo de crecimiento y el módulo de elasticidad en flexión ($E_{m,g}$). (○) Tablas. $R^2 = 0,43$; (---) recta de regresión: $E_{m,g} = -473,94x + 13474$. (●) Vigas. $R^2 = 0,12$; (—) recta de regresión: $E_{m,g} = -227,53x + 12394$

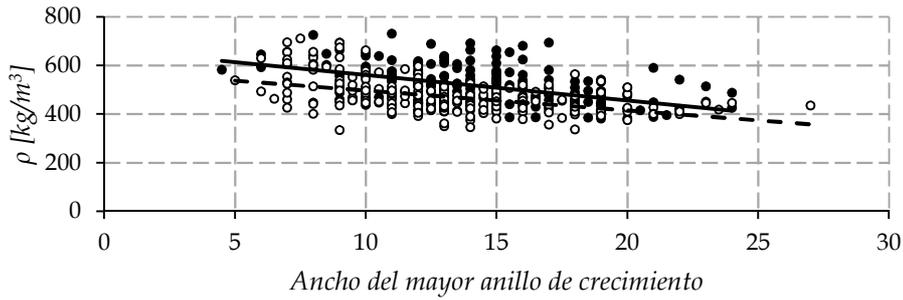


Figura 4.12. Relación entre el ancho del mayor anillo de crecimiento y la densidad (ρ). (○) Tablas. $R^2 = 0,23$; (---) recta de regresión: $\rho = -8,1618x + 578,54$. (●) Vigas. $R^2 = 0,23$; (—) recta de regresión: $\rho = -10,539x + 666,02$

A través del segundo criterio “cantidad de anillos por pulgada”, como puede observarse en las gráficas exhibidas en la Figura 4.13, Figura 4.14 y Figura 4.15, se obtuvieron correlaciones positivas para todas las propiedades analizadas.

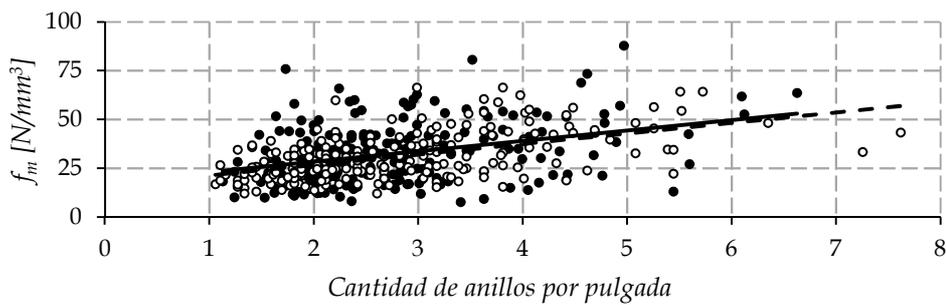


Figura 4.13. Relación entre la cantidad de anillos por pulgada y la resistencia a flexión (f_m). (○) Tablas. $R^2 = 0,28$; (---) recta de regresión: $f_m = -5,383x + 15,946$. (●) Vigas. $R^2 = 0,12$; (—) recta de regresión: $f_m = 5,3438x + 17,643$

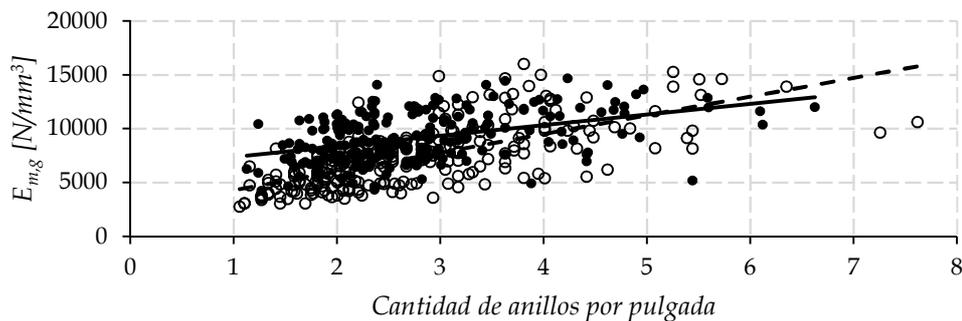


Figura 4.14. Relación entre la cantidad de anillos por pulgada y el módulo de elasticidad en flexión ($E_{m,g}$). (○) Tablas. $R^2 = 0,46$; (---) recta de regresión: $E_{m,g} = 1737,5x + 2561,3$. (●) Vigas. $R^2 = 0,19$; (—) recta de regresión: $E_{m,g} = 985,79x + 6378,1$

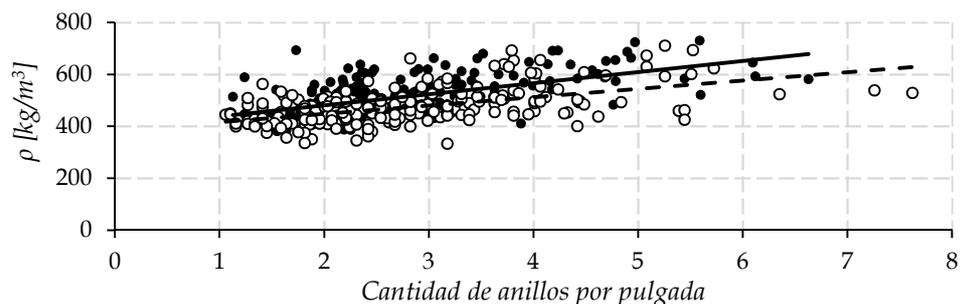


Figura 4.15. Relación entre la cantidad de anillos por pulgada y la densidad (ρ). (○) Tablas. $R^2 = 0,29$; (---) recta de regresión: $\rho = 32,128x + 384,52$. (●) Vigas. $R^2 = 0,34$; (—) recta de regresión: $\rho = 42,86x + 395,07$

Además, los datos presentados en la Tabla 4.11 ponen en evidencia que los coeficientes de correlación resultaron superiores a los obtenidos bajo el primer criterio, obteniéndose para la resistencia a flexión y para el módulo de elasticidad valores R de 0,35 y 0,44 para las vigas y de 0,53 y 0,68 para las tablas, respectivamente. En este caso también existe una mejor correlación para las tablas respecto de las vigas, acusándose valores superiores en un 52% y 54% para f_m y $E_{m,gr}$ respectivamente. En cuanto a la densidad, a través del anillo pudo explicarse aproximadamente un 30% de su variabilidad y, como puede observarse en Figura 4.15 y Tabla 4.11, ambos grupos presentaron una correlación similar, siendo 8% mayor para las vigas ($R = 0,58$) respecto de las tablas ($R = 0,53$).

De los resultados obtenidos se puede inferir que la predicción de la resistencia por parte de los anillos de crecimiento es reducida, sobre todo al considerar las vigas. Respecto a la rigidez, únicamente en las tablas la correlación R adquiere importancia y, en cuanto a la densidad, la predicción es similar para ambos elementos estructurales. En correspondencia con el resultado alcanzado, algunas normativas sobre clasificación visual por resistencia, como la NCh 1207 (2017) referida al Pino radiata cultivado en Chile, no contemplan como parámetro clasificatorio a los anillos de crecimiento con el fin de no condicionar inadecuadamente la madera aserrada de ciertas combinaciones especie/procedencia a las exigencias de velocidad de crecimiento imperantes en los mercados de coníferas de crecimiento lento (Wagner 2008). Tampoco fue considerada esta singularidad en la reciente propuesta de clasificación visual del pino procedente de Brasil (Ballarin *et al.* 2017) como en la caracterización estructural del *Pinus elliottii/taeda* cultivado en Uruguay (Moya *et al.* 2015a, 2015b).

En congruencia con los resultados obtenidos en este trabajo, existen publicaciones que recomiendan considerar en forma directa a la densidad como parámetro, en lugar de

evaluarla a través de los anillos de crecimiento, en aquellas especies de crecimiento rápido donde la influencia de esa singularidad sobre los módulos de rotura y elasticidad resulta casi trivial (Diéz B. y Fernández-Golfín 1998; Fernández-Golfín S. y Diéz B. 1994). En esta dirección, la reciente propuesta de clasificación visual del pino resinoso procedente de Uruguay (Moya *et al.* 2017) no establece restricciones para el ancho del anillo pero en cambio fija un valor mínimo de densidad para que las piezas puedan ser consideradas estructurales. Si bien esta propiedad física no es un parámetro mensurable visualmente, un clasificador experimentado puede detectar cuando su valor se ubica por debajo de determinados límites.

Con el fin de conocer la relación existente entre densidad y las propiedades mecánicas de flexión en el material investigado, se realizó un análisis de regresión lineal simple. Los resultados son exhibidos en el gráfico de la Figura 4.16 para la resistencia y en la Figura 4.17 para el módulo de elasticidad. Tanto en vigas como en tablas se verificó la existencia de una relación estadísticamente significativa (valor-P < 0,05 del análisis ANOVA) entre ρ - f_m y ρ - $E_{m,g}$ con un nivel de confianza del 95%.

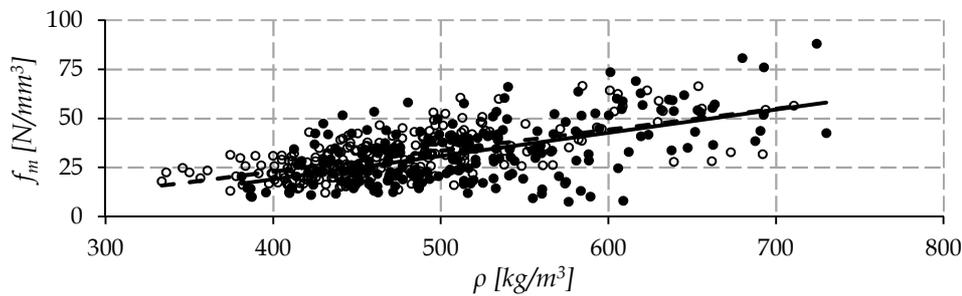


Figura 4.16. Relación entre la densidad (ρ) y la resistencia a flexión (f_m). (○) Tablas. $R^2 = 0,40$; (---) recta de regresión: $f_m = 0,1069x - 19,779$. (●) Vigas. $R^2 = 0,33$; (—) recta de regresión: $f_m = 0,1181x - 28,24$

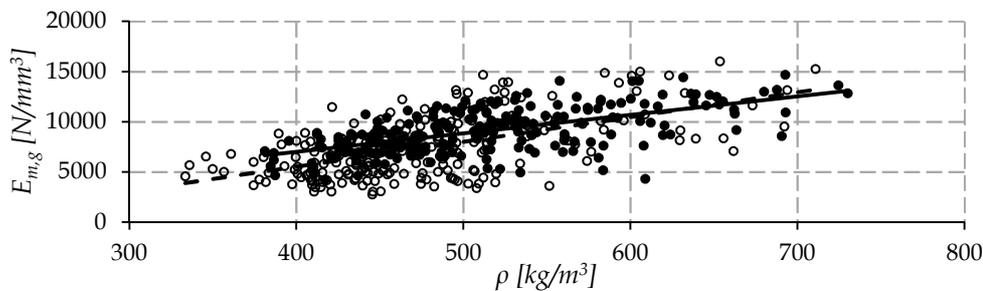


Figura 4.17. Relación entre la densidad (ρ) y el módulo de elasticidad en flexión ($E_{m,g}$). (○) Tablas. $R^2 = 0,34$; (---) recta de regresión: $E_{m,g} = 24,687x - 4326,4$. (●) Vigas. $R^2 = 0,37$; (—) recta de regresión: $E_{m,g} = 18,339x - 315,65$

De la Figura 4.16 surge que la densidad explica un 40% de la variabilidad de f_m en las tablas y un 33% en las vigas, mientras que de la Figura 4.17 se obtiene que esa propiedad física explica un 34% y 37% de la variabilidad de $E_{m,g}$ para las tablas y vigas, respectivamente. Estos resultados superan a los reportados para el *Pinus patula* del sur de África, cuyos valores R^2 fueron de 0,29 y 0,20 para la resistencia y rigidez respectivamente (Dowse 2010), y también a los publicados para la madera de pino silvestre y p. laricio de procedencia española, donde ρ tampoco llegó a explicar siquiera el 30% de la variabilidad observada en la predicción de ambas propiedades mecánicas (Fernández-Golfín *et al.* 2003).

En resumen, las deducciones extraídas a través del análisis de los resultados varían de acuerdo al elemento estructural contemplado. Respecto a las vigas, la predicción de las propiedades resistentes a través de los anillos de crecimiento (como indicador indirecto de la densidad) resultó poco relevante, por lo que no resulta fundamental que dicho parámetro sea contemplado al momento de diseñar perfiles de calidad con miras a una clasificación visual por resistencia. No obstante, teniendo en cuenta que la madera en estudio debe ser considerada “no densa” y que la predicción de las propiedades mecánicas resultó mayor a través de la densidad que de los anillos, resulta conveniente la adopción de un límite inferior para el valor de la densidad. Con relación a las tablas, en cambio, la correlación entre anillos y propiedades resistentes resultó notoriamente superior (más del doble) a la registrada en las vigas y, a la vez, similar bajo ambos modos de medición. Dicha diferencia puede ser explicada por el hecho de que la sección transversal de las vigas abarca un mayor número de anillos de crecimiento, en contraste con lo que ocurre en las tablas donde, debido a sus dimensiones más reducidas, cada anillo involucra una proporción mayor de la sección transversal de la pieza convirtiéndose en un parámetro de mayor peso en la predicción de las propiedades mecánicas. Esto deja en evidencia la importancia de incorporar este parámetro visual en las propuestas de clasificación por resistencia correspondientes a las tablas.

4.1.4. Perfiles de calidad para las muestras ensayadas a flexión

Teniendo en cuenta que la principal causa de variación de las propiedades físico-mecánicas en piezas de madera reside en la aparición aleatoria de defectos (Diez B. y Fernández-Golfín 1998), a través de distintos perfiles de calidad se analizan de forma

combinada las principales características visuales estudiados anteriormente: nudosidad, médula y anillos de crecimiento.

Para el desarrollo de los perfiles, al igual que lo adoptado en el Apartado 4.1.3, se consideran las tablas flexionadas de plano en forma independiente de las vigas flexionadas de canto. En ambos casos se presentan posibles alternativas estableciendo límites para los parámetros visuales, para luego determinar la resistencia, rigidez y densidad asociadas a cada una. A su vez, ambos elementos estructurales fueron clasificados de acuerdo a los lineamientos fijados por las normas argentinas vigentes, las tablas a través de la IRAM 9662-3 (2015) mientras que las vigas por la IRAM 9670 (2002).

Perfiles de calidad asociados a las tablas

Perfiles conformados a partir del análisis de los resultados experimentales

Para el diseño de los distintos perfiles de calidad asociados a las tablas se tuvieron en cuenta las 3 características visuales fundamentales que, como lo ya expresado en el Apartado 4.1.3, ejercen una influencia importante sobre las propiedades mecánicas de las mismas. La nudosidad fue contemplada a través del criterio K por ser el que presentó el mejor ajuste de acuerdo a lo analizado en el Apartado 4.1.3 (Nudosidad). Los anillos de crecimiento fueron considerados a través del anillo de mayor espesor por resultar de más simple determinación y, a su vez, el adoptado por la norma IRAM 9662-3 (2015) para la clasificación de tablas. Cabe señalar que, de acuerdo al análisis llevado a cabo en el Apartado 4.1.3 (Anillos de crecimiento), bajo este criterio no se presentó la mayor correlación con la resistencia, rigidez y densidad, no obstante las diferencias registradas respecto del otro criterio (cantidad de anillos por pulgada) fueron leves, de tan solo de 2%, 4% y 9%, respectivamente. Estableciendo límites para los parámetros visuales adoptados se plantearon diferentes combinaciones, para las cuales fueron determinadas las propiedades mecánicas asociadas.

En la Tabla 4.12 se presentan los perfiles propuestos para las tablas (M5) junto a los resultados obtenidos para las propiedades físico-mecánicas, se exhiben el percentil 5% de la resistencia a flexión ($f_{m,05}$) y el valor medio tanto del módulo de elasticidad ($\bar{E}_{m,g}$) como de la densidad aparente (ρ_m). Con el fin de posibilitar la comparación de los valores calculados con los presentados en la correspondiente norma de clasificación vigente (IRAM 9662-3 2015), también se exponen los valores característicos de la resistencia ($f_{m,k}$) y la densidad (ρ_k).

Tabla 4.12. Perfiles de calidad propuestos para las tablas

Perfil	$f_{m,05}^{(1)}/f_{m,k}^{(1)}$ [N/mm ²]	$\bar{E}_{m,g}^{(2)}$ [N/mm ²]	$\rho_m^{(2)}/\rho_k^{(2)}$ [kg/m ³]	n (%)	
A) Todos los cuerpos de prueba	15,6/14,0	7354	473/387	233 (100)	
B)	No admite médula	16,8/15,0	7929	478/390	187 (80)
	Admite médula	14,0/11,0	5019	454/386	46 (20)
C)	No admite médula, $K \leq 1/4$	24,7/19,9	9698	500/405	62 (27)
	Admite médula, $K \leq 1/2$	17,4/15,1	7037	468/393	126 (54)
	Restantes	13,2/10,3	5016	451/381	45 (19)
D)	No admite médula, $K \leq 1/3$	23,3/19,7	9140	495/400	104 (45)
	Admite médula, $K \leq 2/3$	16,1/13,7	6097	457/381	108 (46)
	Restantes	12,1/9,0	4981	452/382	21 (9)
E)	No admite médula, $K \leq 1/3$, Anillo mayor ≤ 12 mm	25,0/20,4	10307	517/433	69 (30)
	Admite médula, $K \leq 2/3$, Anillo mayor ≤ 17 mm	17,0/14,5	6695	459/377	116 (49)
	Restantes	13,4/10,5	4784	445/382	50 (21)

Nota. (1) Valor ajustado a la altura de referencia de 150 mm de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); (2) Valores corregidos al contenido de humedad de referencia (12%) de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); $f_{m,05}$: percentil 5% de la resistencia a flexión; $f_{m,k}$: resistencia a flexión característica; $\bar{E}_{m,g}$: módulo de elasticidad global medio; ρ_m : densidad media; ρ_k : densidad característica; n: cantidad de cuerpos de prueba.

El perfil A presenta las propiedades para el conjunto de cuerpos de prueba considerados como una gran muestra, mientras que el perfil B considera dos calidades teniendo en cuenta la relevancia del efecto de la presencia de médula. Se constata que el grupo libre de médula presentó un valor de $f_{m,k}$ superior en un 36% respecto de aquel que la admite. Similar comportamiento exhibe la rigidez $\bar{E}_{m,g}$, pero en este caso la diferencia fue aún mayor (58%), lo que confirma la significativa influencia de este parámetro visual sobre las propiedades de elasticidad de las tablas. Por el contrario, los valores obtenidos para la densidad resultaron similares para ambas calidades, registrándose una diferencia de tan sólo 1% para ρ_k .

El perfil C incorpora una restricción adicional por nudosidad y establece también dos clases de calidad, apareciendo a la vez una categoría adicional denominada “Restantes” donde se ubican aquellas piezas que no reúnen las condiciones necesarias para pertenecer a las dos primeras. En este caso la resistencia característica y el módulo de elasticidad medio

de la mejor calidad superaron en un 32% y en un 38% a la segunda clase, respectivamente. Al igual que lo obtenido en el perfil B, también fue reducida la diferencia registrada para la densidad, siendo tan sólo de un 3% para el valor característico.

El perfil D es similar al C pero con diferentes límites para la nudosidad. En esta alternativa las discrepancias entre clases resultaron más notorias, registrándose una diferencia de 44% y 50% para $f_{m,k}$ y $\bar{E}_{m,g}$ respectivamente. Si se comparan los resultados obtenidos para la clase superior en los perfiles C y D se comprueba que las propiedades resistentes obtenidas fueron similares registrándose diferencias que no superan el 6%, sin embargo, el segundo incluyó un porcentaje significativamente mayor de piezas (45%) que el primero (27%). Al analizar la segunda clase se comprueba que la brecha entre propiedades es mayor, con diferencias que llegan hasta el 15%. Bajo ambas alternativas se supera el valor $f_{m,k}$ establecido por la norma IRAM 9662-3 (2015), el cual asciende a 18,0N/mm² y 11,0 N/mm² para la Clase 1 y Clase 2 respectivamente. Por el contrario, ninguno de los dos perfiles cumple totalmente con los límites establecidos por dicha norma para el módulo de elasticidad (12000 N/mm² y 7000 N/mm²) ni para la densidad (420kg/m³ y 390 kg/m³), lo que da lugar a la formulación de una nueva alternativa.

El perfil E también considera una restricción para el ancho de los anillos de crecimiento. Las diferencias registradas entre clases asciende a 41% para $f_{m,k}$ y a 54% para $\bar{E}_{m,g}$. Los resultados de las propiedades mecánicas obtenidas para este caso fueron algo mayores en relación con las alcanzadas bajo el perfil D. Los valores de $f_{m,k}$ y $\bar{E}_{m,g}$ registrados para la mejor calidad crecen desde 19,7 N/mm² a 20,4 N/mm² y desde 9140 N/mm² a 10307N/mm² respectivamente, mientras que la cantidad de cuerpos de prueba involucrados disminuyen desde 45% a 30%. Para la segunda calidad los valores correspondientes crecieron desde 13,7 N/mm² a 14,5 N/mm² y desde 6097 N/mm² a 6695N/mm² respectivamente, mientras el rendimiento aumentó levemente de 46% a 49%. A través de estos resultados se confirma que la mayor influencia de los anillos de crecimiento se da sobre el módulo de elasticidad, lo cual es congruente con el análisis desarrollado en el Apartado 4.1.3. No obstante, bajo el perfil E no se cumple con los valores $\bar{E}_{m,g}$ y ρ_k establecidos por la norma IRAM 9662-3 (2015) en la segunda clase (7000 N/mm² y 390 kg/m³) y produce un descarte de piezas (21%) superior al perfil D (9%).

Perfiles conformados aplicando el método de la norma IRAM 9662-3 (2015) a las tablas ensayadas

Con el fin de verificar la eficiencia del criterio adoptado por la norma IRAM 9662-3 (2015) y a su vez compararla con el último perfil propuesto (E), cada una de las piezas pertenecientes a la muestra M5 fue asignada a un determinado grado de calidad (Clase 1, Clase 2, Descarte) de acuerdo a los lineamientos establecidos por la misma. En la Tabla 4.13 se exponen los resultados obtenidos para la resistencia, rigidez y densidad discriminados por clase, anexándose en la misma los valores característicos propuestos por la norma. Cabe destacar que, de acuerdo a lo analizado en el Apartado 4.1.1, los cuerpos de prueba no presentaron otros defectos significativos aparte de los relacionados con la nudosidad, la presencia de médula y el espesor de los anillos de crecimiento, por lo que al momento de clasificar las piezas únicamente intervinieron estos 3 parámetros visuales.

Tabla 4.13. Clasificación de las tablas a través del método visual por resistencia propuesto por la norma IRAM 9662-3 (2015)

IRAM 9662-3 (2015)	$f_{m,05}^{(1)}/f_{m,k}^{(1)}$ [N/mm ²]	$\bar{E}_{m,g}^{(2)}$ [N/mm ²]	$\rho_m^{(2)}/\rho_k^{(2)}$ [kg/m ³]	n (%)
Clase 1	27,2/21,1 (18,0)*	10860 (12000)*	543/456 (420)*	41 (18)
Clase 2	17,7/15,2 (11,0)*	7694 (7000)*	466/390 (390)*	114 (49)
Descarte	13,8/11,4	5016	446/380	78 (33)

Nota. (1) Valor ajustado a la altura de referencia de 150 mm de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); (2) Valores corregidos al contenido de humedad de referencia (12%) de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); $f_{m,05}$: percentil 5% de la resistencia a flexión; $f_{m,k}$: resistencia a flexión característica; $\bar{E}_{m,g}$: módulo de elasticidad global medio; ρ_m : densidad media; ρ_k : densidad característica; n: cantidad de cuerpos de prueba. * Entre paréntesis valor de referencia según norma IRAM 9662-3 (2015).

En relación a las categorías expuestas en la Tabla 4.13, la Clase 1 no admite médula, establece un valor menor a 10 mm como máximo espesor del mayor anillo de crecimiento y fija en 1/3 el límite superior de la nudosidad, mientras que la Clase 2 admite piezas con médula, anillos de crecimiento menores a 15 mm y una nudosidad de hasta 2/3. Todas aquellas piezas que no cumplen con los requisitos necesarios para pertenecer a las clases 1 o 2 aparecen como Descarte. Puede observarse que las piezas asignadas a la Clase 1 respecto de la Clase 2 acusaron diferencias de 39%, 41% y 17% para $f_{m,k}$, $\bar{E}_{m,g}$ y ρ_k respectivamente. Por otra parte, todas las propiedades evaluadas mostraron valores superiores a los obtenidos a través del perfil E (Tabla 4.12), siendo la Clase 2 la que presentó las mayores diferencias. Éstas ascienden a 5% para $f_{m,k}$ y a 15% para $\bar{E}_{m,g}$. Para la Clase 1, sin embargo, las diferencias

entre propiedades fueron leves (3% para $f_{m,k}$ y 5% para \bar{E}_{mg}) pero la cantidad de cuerpos de prueba involucrados (n) sufrió una importante disminución, pasando de 30% (asociado al perfil E) a 18%. Esto no se registró para la Clase 2, donde n se mantuvo constante (49%).

La comparación de los valores característicos determinados experimentalmente con los adoptados por la norma –indicados entre paréntesis en la Tabla 4.13-, indica que para $f_{m,k}$ los primeros superan a los segundos en ambas calidades, con diferencias de 17% y 38% para la Clase 1 y 2 respectivamente. Por su parte, el valor experimental de \bar{E}_{mg} resultó un 9% menor al de referencia en la Clase 1 (12000 N/mm²) y un 10% superior en la Clase 2 (7000 N/mm²). La densidad característica (ρ_k) resultó un 9% mayor a la de referencia (420kg/m³) en la clase superior y presentó el mismo valor en la Clase 2 (390 kg/m³). En síntesis, la aplicación del método visual propuesto por la norma IRAM 9662-3 (2015) tampoco permitió alcanzar el valor requerido para $\bar{E}_{m,g}$ en la Clase 1 (12000 N/mm²) y, en contraposición, a través del mismo se logran valores de resistencia significativamente superiores a los esperados (18 N/mm², 11 N/mm²). Una situación similar fue reportada por Ramos *et al.* (2015) al estudiar las propiedades resistentes de tablas de *Pinus elliottii* cultivado en Entre Ríos, donde obtuvieron resultados que satisfacen los requerimientos de la norma IRAM 9662-3 (2015) para la resistencia y la densidad pero no así para el módulo de elasticidad. Este fenómeno también es observado en otras especies de pino de crecimiento rápido, como ser el P. patula procedente del sur de África, para el cual Dowse (2010) obtuvo una muy baja rigidez que no alcanza a la establecida por la norma africana SANS 10163-1 (2003) para el uso de madera estructural.

Observaciones y aportes al método adoptado por la norma IRAM 9662-3 (2015)

Del análisis llevado a cabo en el presente apartado a partir de los resultados exhibidos en la Tabla 4.12 y la Tabla 4.13 emerge la posibilidad de efectuar aportes para elevar la eficiencia del método vigente en el país para la clasificación visual por resistencia de tablas IRAM 9662-3 (2015).

En relación con el criterio adoptado para considerar las singularidades (y sus límites) se destaca que:

- La médula altera negativamente tanto a las propiedades de resistencia como de rigidez, por lo que resulta apropiado que no sea admitida en la clase superior.

- La nudosidad, singularidad que repercute directamente sobre la resistencia de las piezas, presenta límites entre clases resistentes que optimiza el resultado si se consideran simultáneamente la combinación de los niveles alcanzados para las propiedades mecánicas y el rendimiento económico del material.
- El espesor del máximo anillo de crecimiento constituye un parámetro visual de significativo efecto sobre las propiedades de rigidez, resultando oportuna su consideración. No obstante, el límite establecido para la clase 1 (10 mm) resulta conservador. Se estima adecuado elevar dicha cifra a 12 mm, lo que traería aparejado un crecimiento (del 68%) de la cantidad de piezas asignadas a esa clase sin efectos notorios sobre las propiedades resistentes (diferencias menores al 5%).

En relación a los valores característicos adoptados para las propiedades físico-mecánicas fundamentales se señala que:

- La resistencia característica a flexión indicada en la norma para ambos grados de calidad (18 N/mm², 11 N/mm²) es claramente inferior a la realmente alcanzada por las piezas en estudio.
- El módulo de elasticidad medio correspondiente a la Clase 1 (12000 N/mm²) resulta muy elevado en relación al valor registrado experimentalmente (10860N/mm²). En cambio, el valor de referencia de la Clase 2 (7000 N/mm²) se corresponde con el valor determinado en los ensayos (7694 N/mm²). La diferencia encontrada se puede explicar por la relativa precisión de los parámetros visuales utilizados, desconociéndose por otra parte el detalle del muestreo que dio base a la norma (IRAM 9662-3 2015).
- La densidad característica ajusta adecuadamente con los valores experimentales para las dos clases resistentes.

Perfiles de calidad asociados a las vigas

Para el diseño de los distintos perfiles de calidad asociados a las vigas se tuvieron en cuenta todos los cuerpos de prueba pertenecientes a las muestras M1, M2, M3 y M4. Los parámetros visuales que intervinieron fueron únicamente la nudosidad y la presencia de médula. En este caso no se contemplan los anillos de crecimiento porque, como lo ya expresado en el Apartado 4.1.3, los resultados mostraron que no ejercen una influencia importante sobre las propiedades mecánicas de estos elementos estructurales.

Perfiles conformados en base a la nudosidad KAR 150

En primera instancia, la nudosidad fue evaluada de acuerdo al criterio KAR 150 por ser el de mayor precisión (ver Apartado 4.1.3 Nudosidad). Los perfiles de mejor desempeño son expuestos en la Tabla 4.14, donde para cada uno se exhiben el percentil 5% ($f_{m,05}$) y el valor característico ($f_{m,k}$) de la resistencia a flexión, el valor medio del módulo de elasticidad ($\bar{E}_{m,g}$), así como el valor medio (ρ_m) y el característico (ρ_k) de la densidad aparente.

Tabla 4.14. Perfiles de calidad propuestos para las vigas considerando la nudosidad KAR 150

Perfil	$f_{m,05}^{(1)}/f_{m,k}^{(1)}$ [N/mm ²]	$\bar{E}_{m,g}^{(2)}$ [N/mm ²]	$\rho_m^{(2)}/\rho_k^{(2)}$ [kg/m ³]	n (%)	
A) Todos los cuerpos de prueba	12,3/11,1	9099	513/416	225 (100)	
B)	No admite médula	12,3/10,6	9740	527/425	121 (54)
	Admite médula	11,7/9,9	8354	498/413	104 (46)
C)	KAR 150 ≤ 1/4	20,4/16,6	10019	545/447	67 (30)
	KAR 150 ≤ 1/2	13,6/11,8	8933	504/423	133 (59)
	Restantes	8,4/6,4	7521	481/387	25 (11)
D)	KAR 150 ≤ 1/3	17,2/15,0	9585	528/430	132 (59)
	KAR 150 ≤ 2/3	10,3/8,6	8458	493/402	91 (40)
	Restantes	16,6/11,9	5894	467/448	2 (1)
	No admite médula, KAR 150 ≤ 1/3	19,8/16,3	10274	539/430	76 (34)
E)	Admite médula, KAR 150 ≤ 2/3	11,7/10,2	8526	501/412	140 (62)
	Restantes	11,0/8,1	8096	494/411	9 (4)

Nota. (1) Valor ajustado a la altura de referencia de 150 mm de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); (2) Valores corregidos al contenido de humedad de referencia (12%) de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); $f_{m,05}$: percentil 5% de la resistencia a flexión; $f_{m,k}$: resistencia a flexión característica; $\bar{E}_{m,g}$: módulo de elasticidad global medio; ρ_m : densidad media; ρ_k : densidad caracterísitca; n: cantidad de cuerpos de prueba.

El perfil A presenta las propiedades para el conjunto de vigas como una gran muestra, en tanto que el perfil B las divide en dos calidades teniendo en cuenta la presencia de médula. A partir del análisis de los datos mostrados en la Tabla 4.14 se puede constatar que el efecto de la presencia de médula sobre la resistencia y la densidad resulta bajo, en ningún caso la diferencia entre clases fue mayor al 7%. Sin embargo esta singularidad adquiere mayor significación sobre la rigidez, donde la diferencia alcanzó un valor de 17%.

El perfil C cuenta con tres categorías, dos estructurales y una denominada Restantes donde aparecen aquellas piezas que presentaron una nudosidad mayor a $\frac{1}{2}$, requisito impuesto para la segunda calidad. El valor de $f_{m,k}$ asociado a la mejor clase superó en 41% al de la segunda clase. Similar tendencia también fue observada en la rigidez $\bar{E}_{m,g}$ y la densidad ρ_k , con diferencias del 12% y 6% respectivamente. Estas cifras evidencian, en contraste con lo obtenido bajo el perfil B, la mayor influencia de los nudos sobre la resistencia que sobre la rigidez.

El perfil D se diferencia del C únicamente por presentar límites menos restrictivos para la nudosidad. En este caso las discrepancias entre las propiedades mecánicas de las clases son más notorias, registrándose diferencias de 74% y 13% para $f_{m,k}$ y $\bar{E}_{m,g}$ respectivamente. Los valores correspondientes a la categoría Restantes de este perfil no pueden considerarse representativos pues solamente 2 vigas fueron asignadas a la misma. La disminución de los valores de las propiedades mecánicas del perfil D respecto del C indica claramente la influencia negativa de aceptar mayores límites para la nudosidad. A su vez hay que tener en cuenta que esos mayores límites ocasionan un mejor aprovechamiento económico del material en las dos clases estructurales.

El perfil E, como se puede apreciar en la Tabla 4.14, surge de la combinación de los perfiles B y D. Bajo estas condiciones las diferencias registradas entre clases ascienden a 60%, 21% y 4% para $f_{m,k}$, $\bar{E}_{m,g}$ y ρ_k , respectivamente. Al comparar los resultados obtenidos a través del perfil E con los del D, se comprueba que tanto la resistencia como la rigidez resultan superiores para el primero, presentándose diferencias relacionadas a la Clase 1 y Clase 2 que ascienden a 9% y 19% para $f_{m,k}$ y a 7% y 1% para $\bar{E}_{m,g}$, respectivamente. Ambos perfiles presentaron un reducido número de piezas rechazadas, pero la distribución de las mismas entre clases resistentes resultó desigual, registrándose para el perfil E un mayor número de piezas para la Clase 2 (62%), tendencia que se invierte para el perfil D.

Perfiles conformados en base a la nudosidad K

Los perfiles previamente analizados consideran a la nudosidad a través del criterio KAR 150 porque mostró la mayor eficiencia para predecir las propiedades mecánicas de las vigas. No obstante, dada la complejidad de su determinación se plantean a continuación 2 perfiles de calidad adicionales que contemplan a la nudosidad a través del criterio K, que a pesar de presentar menor precisión en vigas, es de simple aplicación (ver Apartado 4.1.3

Nudosidad). Como este criterio resulta coincidente con el adoptado por la norma de clasificación visual de tablas IRAM 9662-3 (2015), ambas propuestas fueron definidas considerando los límites establecidos en la misma. La primera alternativa (perfil F) contempla como parámetro clasificatorio sólo a la nudosidad mientras que la segunda (perfil G) también incorpora a la médula. No se aplicaron restricciones para los anillos de crecimiento por no resultar una singularidad determinante en las vigas. Estos nuevos perfiles son expuestos en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15. Perfiles de calidad propuestos para las vigas considerando la nudosidad K

Perfil	$f_{m,05}^{(1)}/f_{m,k}^{(1)}$ [N/mm ²]	$\bar{E}_{m,g}^{(2)}$ [N/mm ²]	$\rho_m^{(2)}/\rho_k^{(2)}$ [kg/m ³]	n (%)
K ≤ 1/3	15,8/12,5	9996	538/435	54 (24)
F) K ≤ 2/3	12,3/10,7	9085	509/414	133 (59)
Descarte	11,4/8,8	7877	495/407	38 (17)
No admite médula, K ≤ 1/3	18,7/14,3	10762	561/442	31 (14)
G) Admite médula, K ≤ 2/3	12,3/10,9	9067	509/415	156 (69)
Descarte	11,4/8,8	7877	495/407	38 (17)

Nota. (1) Valor ajustado a la altura de referencia de 150 mm de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); (2) Valores corregidos al contenido de humedad de referencia (12%) de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); $f_{m,05}$: percentil 5% de la resistencia a flexión; $f_{m,k}$: resistencia a flexión característica; $\bar{E}_{m,g}$: módulo de elasticidad global medio; ρ_m : densidad media; ρ_k : densidad característica; n: cantidad de cuerpos de prueba.

En el perfil F los valores $f_{m,k}$, $\bar{E}_{m,g}$ y ρ_k asociados a la mejor calidad superan en 17%, 10% y 5% a los de segunda clase, respectivamente. Los valores obtenidos fueron cotejados con los reportados por Moya *et al.* (2017) para la madera aserrada estructural de *Pinus taeda/elliottii* procedente de la República Oriental del Uruguay, la cual no limita anillos de crecimiento, admite piezas con médula y nudosidad $K \leq 2/5$. La resistencia característica del pino uruguayo acusó un valor de 14,6 N/mm², superando en un 17% al valor calculado bajo la mejor calidad del perfil F (12,5 N/mm²). Para el módulo de elasticidad medio se constató la situación inversa, el valor registrado en la Tabla 4.15 supera al publicado (7040N/mm²) por Moya *et al.* (2017) con una diferencia que asciende al 42% para la Clase 1 y al 29% para la Clase 2. La densidad, por su parte, presentó similar tendencia que $\bar{E}_{m,g}$, registrándose una disparidad entre procedencias del 25% y 18%, respectivamente.

El perfil G, además de las limitaciones impuestas a K en el perfil F, no admite médula en la calidad superior. Las diferencias registradas entre clases resultaron superiores al caso anterior ratificando el efecto negativo de la presencia de médula, éstas ascienden a 31%, 19% y 7% para $f_{m,k}$, \bar{E}_{mg} y ρ_k respectivamente. Los valores obtenidos de \bar{E}_{mg} son superiores a los publicados por Ballarin *et al.* (2017) para la madera estructural de pino resinoso procedente de Brasil y clasificada según un criterio similar al empleado en este caso, constatándose una diferencia que asciende 24% y 34% para la Clase 1 y 2, respectivamente.

Por otra parte, considerando que tanto el perfil G (Tabla 4.14) como el perfil E (Tabla 4.15) plantean restricciones similares variando únicamente el criterio de medición de la nudosidad, resulta oportuno comparar los resultados obtenidos con ambos. $f_{m,k}$ en la Clase 1 acusó un valor 14% mayor para el perfil E respecto del G, mientras que para la Clase 2 la situación se invierte, resultando un 6% menor. \bar{E}_{mg} resultó superior en el perfil G respecto del perfil E con diferencias que ascendieron al 5% y 6% para la primera y segunda clase, respectivamente. La densidad presentó similar tendencia que \bar{E}_{mg} pero con diferencias menores al 4%. En cuanto a la cantidad de cuerpos de prueba, el porcentaje de rechazos fue mayor para el perfil G (17%) respecto del E (4%), lo que a su vez se tradujo en una menor cantidad de piezas asociadas a la clase superior, pasando de un 34% para el perfil E a un 14% para el G.

Perfiles conformados aplicando el método de la norma IRAM 9670 (2002) a las vigas ensayadas

Con el fin de verificar la eficiencia del método adoptado por la norma IRAM 9670 (2002) para la clasificación visual por resistencia de vigas de este material, cada uno de los cuerpos de prueba pertenecientes a las muestras M1, M2, M3 y M4 fue asignado a una determinada calidad: Grado 1, Grado 2 o Descarte. En esta última categoría se ubicaron todas aquellas piezas que no cumplieron con los requisitos necesarios para pertenecer al Grado 1 o 2.

En la Tabla 4.16 se exponen los resultados obtenidos para las propiedades físico-mecánicas junto (entre paréntesis) a aquellos valores característicos que se espera presenten las piezas según lo expuesto por la norma antes mencionada. Los datos aparecen discriminados por clase y se exhiben el percentil 5% de la resistencia a flexión ($f_{m,05}$), el valor medio del módulo de elasticidad ($\bar{E}_{m,g}$) y de la densidad aparente (ρ_m), además, los valores característicos de la resistencia ($f_{m,k}$) y la densidad (ρ_k).

Tabla 4.16. Clasificación de las vigas a través del método visual por resistencia propuesto por la norma IRAM 9670 (2002)

IRAM 9670 (2002)	$f_{m,05}^{(1)}/f_{m,k}^{(1)}$ [N/mm ²]	$\bar{E}_{m,g}^{(2)}$ [N/mm ²]	$\rho_m^{(2)}/\rho_k^{(2)}$ [kg/m ³]	n (%)
Grado 1	25,9/20,8 (23,9)*	10090 (9000)*	558/449	61 (27)
Ia) Grado 2	13,5/11,5 (11,9)*	8897 (7500)*	494/403	112 (50)
Descarte	9,8/7,7	8372	503/435	52 (23)
Grado 1	27,6/24,1 (23,9)*	10883 (9000)*	575/458	38 (17)
Ib) Grado 2	17,1/14,2 (11,9)*	9352 (7500)*	508/418	85 (38)
Descarte	10,4/8,8	8225	495/396	102 (45)

Nota. (1) Valor ajustado a la altura de referencia de 150 mm de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); (2) Valores corregidos al contenido de humedad de referencia (12%) de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); $f_{m,05}$: percentil 5% de la resistencia a flexión; $f_{m,k}$: resistencia a flexión característica; $\bar{E}_{m,g}$: módulo de elasticidad global medio; ρ_m : densidad media; ρ_k : densidad característica; n: cantidad de cuerpos de prueba. * Entre paréntesis valor de referencia según norma IRAM 9670 (2002).

La norma IRAM 9670 (2002) admite médula en ambas clases estructurales, fija límites para la cantidad de anillos que pueden aparecer por pulgada y en cuanto a los nudos, establece diferentes restricciones en función de la localización de los mismos contemplándolos tanto de forma individual como agrupados (ver el Apartado 2.4.4). La medición de la nudosidad se basa en los lineamientos expuestos en la norma ASTM D245 (2011) y, como particularidad, considera a los nudos en racimo como un defecto inadmisibles, estableciendo además limitaciones a la cantidad permitida de nudos saltadizos y agujeros de nudos. Debido a estas últimas condiciones impuestas, se consideró conveniente presentar dos alternativas: Ia) admite nudos saltadizos, agujeros y racimos, Ib) adopta todas las limitaciones impuestas por la norma para la nudosidad. Cabe destacar que las 3 singularidades descritas anteriormente constituyen los únicos defectos significativos registrados en los cuerpos de prueba involucrados en esta investigación (ver el Apartado 4.1.1).

Para la alternativa Ia, la Tabla 4.16 muestra que las piezas asignadas al Grado 1 acusaron, respecto del Grado 2, diferencias de 81% para $f_{m,k}$, 13% para $\bar{E}_{m,g}$ y de 11% para ρ_k . En la alternativa Ib esas diferencias ascendieron a 70%, 16% y 10%, respectivamente. Como era de esperar en función de las limitaciones especiales adoptadas en la calidad Ib, las propiedades mecánicas determinadas para ésta resultaron superiores a las obtenidas para Ia. En el Grado 1, $f_{m,k}$ creció desde 20,8 N/mm² a 24,1 N/mm² y $\bar{E}_{m,g}$ desde 10090 N/mm² a

10883 N/mm², mientras que el rendimiento descendió desde de 27% a 17%. Al contemplar los valores obtenidos para el Grado 2, se comprueba que la tendencia fue similar al Grado 1 tanto en relación con las propiedades mecánicas como con el número de piezas involucradas.

Los resultados experimentales obtenidos a través de ambas alternativas, a la vez, fueron comparados con los valores propuestos por la norma IRAM 9670 (2002). El valor de $f_{m,k}$ asociado al Grado 1 (23,9 N/mm²) y al Grado 2 (11,9 N/mm²), ambos adoptados por la norma, fueron superados por los respectivos valores experimentales bajo la alternativa Ib, registrándose diferencias del 1% y 19% respectivamente. Por el contrario, en la alternativa Ia, el valor experimental de $f_{m,k}$ resultó un 13% y 3% inferior que el adoptado por la norma para el Grado 1 y el Grado 2, respectivamente. En relación a \bar{E}_{mg} , el valor de referencia asociado al Grado 1 (9000 N/mm²) y al Grado 2 (7500 N/mm²) fue superado bajo ambos perfiles por los obtenidos empíricamente, registrándose las mayores diferencias para el Ib, donde las mismas ascendieron a 21% y 25% respectivamente. En cuanto a la asignación de los cuerpos de prueba (rendimiento), el mayor porcentaje de piezas aptas para fines estructurales (77%) estuvo asociado al perfil Ia, mientras que el perfil Ib se destacó por acusar un notorio número de rechazos (45%), el cual se debió casi exclusivamente a la presencia de nudos en racimo, defecto inadmisibles por la norma IRAM 9670 (2002).

Resulta también oportuno comparar los valores de referencia para las vigas (IRAM 9670 2002) con aquellos determinados experimentalmente bajo el perfil E (KAR 150), presentados en la Tabla 4.14 y el perfil G (K), presentados en la Tabla 4.15. Puede observarse que en ambos casos se verificaron holgadamente los valores adoptados por la norma para \bar{E}_{mg} pero no así para $f_{m,k}$. Para esta última propiedad, la mayor diferencia fue constatada para el grupo de mejor calidad, donde $f_{m,k}$ determinada experimentalmente en el perfil E y en el G fue 32% y 40% menor, respectivamente, que los valores adoptados por la norma. Las diferencias fueron notoriamente menores para la segunda calidad, alcanzando 14% y 8% para E y G, respectivamente. Respecto de la distribución de los cuerpos de prueba, bajo ambos perfiles el número de rechazos para uso estructural fue claramente inferior (4% para el perfil E y 17% para el perfil G) al registrado por el método de clasificación IRAM 9670 (2002), para el cual se constató un 45% de material descartado (perfil Ib).

Contribuciones al conocimiento del material y aportes al método adoptado por la norma IRAM 9670 (2002)

Del análisis llevado a cabo en el presente apartado a partir de los resultados exhibidos en la Tabla 4.14, Tabla 4.15 y Tabla 4.16 surgen aportes que elevan el conocimiento del comportamiento físico-mecánico del material estudiado y permiten efectuar una crítica fundada del método vigente en el país para la clasificación visual por resistencia de vigas IRAM 9662-3 (2015).

En relación con las singularidades con influencia sobre el comportamiento físico-mecánico (y sus límites) se destaca que:

- La nudosidad es el parámetro visual con mayor influencia sobre las propiedades mecánicas de las vigas, en especial sobre la resistencia.
- La presencia de médula, si bien afecta las propiedades mecánicas de las vigas, su influencia es menor a la registrada en las tablas.
- Los anillos de crecimiento mostraron una influencia reducida sobre la resistencia y rigidez y, en consecuencia, puede ser descartada su consideración como parámetro visual.
- El estudio de perfiles basados en la nudosidad según los criterios KAR 150 y K, así como en la presencia de médula y con iguales límites entre clases, no mostraron diferencias relevantes entre sus propiedades mecánicas. La mayor complejidad que implica la determinación visual del criterio KAR 150 constituye un obstáculo en un país sin tradición en la temática como Argentina. No obstante, el estudio fue llevado a cabo para analizar qué beneficios se obtendrían al aplicar dicho criterio puesto que la decisión sobre los detalles del método de clasificación debe ser tomada en forma conjunta con el sector productivo que lo va a implementar, tal como lo determinan los procedimientos adoptados por la normativa IRAM vigente.

En relación al método vigente en el país para clasificar visualmente por resistencia las vigas del material investigado se señala que:

- La clasificación de las vigas ensayadas según el método de la norma IRAM 9670 (2002) permitió alcanzar los valores característicos de las propiedades establecidos en la norma para cada clase resistente.

- Las dificultades prácticas que implica la evaluación de los parámetros visuales y el perjuicio económico que representa el volumen de material descartado (45%) ameritan una revisión del método. Se destaca la necesidad de analizar ciertas restricciones impuestas por la norma a la presencia de nudos en racimo, entre otras características típicas de las especies en estudio, que afectan el rendimiento del material.
- Un perfil basado en la nudosidad K, de más fácil detección, y la presencia de médula permitió alcanzar el módulo de elasticidad pero no la resistencia que requiere la norma IRAM 9670 (2002). Este perfil exhibió un razonable rendimiento con un 17% de piezas rechazadas, alentando la continuidad de análisis orientados a encontrar alternativas superadoras al método vigente.

4.2. Clasificación mecánica por resistencia

En el Apartado 4.1 se analizaron los diferentes parámetros que intervienen en la clasificación visual por resistencia de la madera aserrada estructural de pino resinoso (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*) cultivado en el nordeste de Argentina. En el mismo se presentaron y discutieron los resultados de los parámetros visuales relevados y de los ensayos mecánicos a flexión llevados a cabo.

En el presente apartado se utilizarán muchos de esos valores y se analizarán otros parámetros cuya capacidad de aportar eficiencia a los modelos debe ser probada, no siendo un impedimento la complejidad de su medición en razón de la naturaleza mecánica del proceso de selección. Por otra parte, los modelos mecánicos para la clasificación por resistencia serán diseñados exclusivamente para su aplicación en tablas -orientadas a la elaboración de vigas laminadas encoladas- con el propósito de mejorar la eficiencia lograda aplicando únicamente el método visual.

Si bien la adopción del método visual contribuyó a mejorar el uso estructural de este material, existen actualmente dos problemas que atentan contra la confiabilidad requerida por las reglas de diseño. Uno se refiere a las dificultades que existen para medir parámetros visuales de importancia, lo que origina errores y desalienta la aplicación del método. En este aspecto es de destacar la complejidad que presenta la evaluación de la nudosidad en la madera cercana a la médula, la que se incrementa ante la ausencia de tratamientos

silviculturales. El otro problema se relaciona a que la aplicación del método visual frecuentemente no permite alcanzar el valor medio del módulo de elasticidad adoptado por la norma IRAM 9662-3 (2015) para la clase superior (12000 N/mm²), sobre lo cual ya se ha hecho referencia en el Apartado 4.1.4. A este último problema puede atribuirse una particular importancia debido a sus consecuencias negativas sobre el desempeño de este material, ya que los valores de sus propiedades fueron incorporados a las reglas de diseño estructural (INTI CIRSOC 601 2016).

Como una manera de dar otro paso al avance iniciado con la normalización de la clasificación visual de tablas de *P. taeda/elliottii* a partir del año 2006 y con el fin de lograr un mejor rendimiento del material proveniente de bosques implantados de crecimiento rápido y turnos de rotación cortos, a continuación se presentan y discuten modelos mecánicos para clasificar por resistencia las tablas de ambas especies en estudio. Asimismo se contempla la posibilidad de predecir el módulo de elasticidad de las piezas a través de ensayos no destructivos por vibraciones, lo que también permitiría la asignación de propiedades más precisas y de un modo más rápido de lo que actualmente es posible con apreciación visual.

4.2.1. Diseño de modelos de clasificación mecánica por resistencia de tablas

Para el diseño de modelos de clasificación mecánica por resistencia se trabajó sobre el conjunto de tablas sometidas a ensayos de flexión estática (M5) y, para comprobar la eficiencia de los mismos, sobre aquellas sometidas a ensayos de tracción en sentido paralelo a las fibras (M6). Es decir, esta última muestra se destinó a chequear los modelos mecánicos para clasificar tablas sometidas a tracción paralela, lo cual resulta esencial dada la importancia de estas propiedades en las láminas destinadas a la fabricación de madera laminada encolada estructural (MLEE) según normas (EN 14080 2013; IRAM 9662-3 2015) y reportes de investigaciones (Colling 1995; Glos y Diebold 1994; Glos y Lederer 2000; Görlacher 1990; Piter *et al.* 2007a).

Los principales resultados experimentales de las propiedades mecánicas y la densidad de las 233 tablas ensayadas a flexión ya fueron incluidos en la información presentada en la Tabla 4.5 (Apartado 4.1.2). No obstante, en la Tabla 4.17 se reiteran los resultados más relevantes que serán tomados en consideración en este estudio específico. Debido a que las propiedades exhibidas son las más importantes para el diseño estructural

en el país según IRAM 9664 (2013), en línea con el criterio europeo (EN 384 2016), estos resultados proveen un soporte indispensable para el diseño de los modelos mecánicos de clasificación. Como lo ya señalado en el Apartado 4.1.2, los cuerpos de prueba de la muestra M5 se encontraban al momento de ser ensayados dentro del rango de humedad establecido por la norma IRAM 9664 (2013). Como la normativa de Argentina (IRAM 9662-3 2015; INTI CIRSOC 601 2016) agrupa al *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* bajo la denominación de pino resinoso del nordeste, los resultados son analizados de igual modo considerando ambas especies en forma conjunta.

Tabla 4.17. Principales resultados de la tensión de rotura (f_m), del módulo de elasticidad ($E_{m,g}$) y de la densidad (ρ) obtenidos para la muestra ensayada en flexión (M5)

	$f_m^{(1)}$ [N/mm ²]	$E_{m,g}^{(1)}$ [N/mm ²]	$\rho^{(2)}$ [kg/m ³]
Mínimo	12,0	2747	333
Medio	30,8	7354	473
Máximo	66,4	16003	711
CV [%]	38	40	15
n	233	233	233

Nota. (1) Valor ajustado a la altura de referencia de 150 mm de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); (2) Valores corregidos al contenido de humedad de referencia (12%) de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); CV: coeficiente de variación; n: cantidad de cuerpos de prueba.

Determinación de los principales parámetros mecánicos

Con el fin de complementar la información presentada en la Tabla 4.17 para el módulo de elasticidad y la densidad, se determinaron los coeficientes de correlación de Pearson (R) entre la resistencia a flexión (f_m) y distintos parámetros simples: módulo de elasticidad global ($E_{m,g}$), densidad (ρ) y nudosidad (K). Esta última fue determinada bajo el criterio de medición K, coincidente con el adoptado por la norma IRAM 9662-3 (2015), por ser el que presenta un mejor ajuste en tablas (ver Apartado 4.1.3. Nudosidad). Como no se han reportado resultados referidos a la eficiencia de parámetros mecánicos para clasificar este material, en la Tabla 4.18 la información se presenta para la muestra completa (M5) y también por separado para las tablas de *P. taeda* y *P. elliottii*.

Tabla 4.18. Coeficiente de correlación de Pearson (R) entre la resistencia a flexión (f_m) y distintos parámetros simples

	$E_{m,g}$	ρ	K
<i>Pinus elliottii</i> (n = 116)	0,84	0,68	- 0,64
<i>Pinus taeda</i> (n = 117)	0,84	0,60	- 0,60
Total (n = 233)	0,83	0,63	- 0,63

Nota. $E_{m,g}$: módulo de elasticidad global; ρ : densidad aparente; K: nudosidad según norma IRAM 9662-3 (2015); n: cantidad de cuerpos de prueba.

Los resultados de la Tabla 4.18 confirman que la eficiencia de los parámetros para predecir f_m es similar en las dos especies que componen el pino resinoso. El valor de R coincide en ambas para $E_{m,g}$, es moderadamente mayor (13%) en el *Pinus elliottii* para ρ , mientras que muestra un valor algo superior en el *Pinus taeda* para la nudosidad, con diferencias que varían entre 11% y 18% para los distintos criterios analizados. Las diferencias señaladas pueden descartarse para propósitos prácticos vinculados a la clasificación por resistencia de la madera estructural y, en consecuencia, en adelante el análisis se continuará desarrollando sobre los valores de R correspondientes a la muestra completa.

$E_{m,g}$ es el parámetro individual que presenta el mayor valor de R (0,83), y por lo tanto la mayor eficacia para predecir f_m , explicando el 69% ($R^2 = 0,69$) de su variabilidad en la muestra completa. Este valor del coeficiente de determinación es mayor que el reportado por Cagno *et al.* (2014) para madera de *Pinus taeda/elliottii* cultivado en Uruguay ($R^2 = 0,52$), y también al que informa Hermoso Prieto (2001) para el *Pinus sylvestris* cultivado en España ($R^2 = 0,55$). El parámetro que le sigue en importancia a $E_{m,g}$ es la nudosidad K ($R = -0,68$), ocupando ρ el tercer lugar ($R = 0,63$). El análisis estadístico confirmó una correlación altamente significativa entre la resistencia y los 3 parámetros simples señalados anteriormente, con una probabilidad asociada (p) menor a 0,0005.

El parámetro combinado (PC) que optimiza la correlación con f_m se determinó a través de un análisis de regresión lineal múltiple. Este parámetro incluye como variables independientes (portadoras) a los 3 parámetros simples mencionados en el párrafo anterior. Los coeficientes de regresión fueron estimados por el método de los mínimos cuadrados y el modelo que expresa al parámetro combinado queda definido como: $PC = 0,00203 E_{m,g} + 0,0413 \rho - 17,246 K + 2,305$. PC alcanza una elevada correlación con f_m ($R = 0,89$) y explica

un 78% de su variabilidad. Una correlación aún más elevada ($R = 0,94$) entre la resistencia y un parámetro combinado por el módulo de elasticidad, la densidad y la nudosidad fue reportada por Dávalos-Sotelo y Limón Godina (2009) para el Pinus de Durango, México. Por su parte, Hanhijärvi y Ranta-Maunus (2008) informan que un parámetro combinado como el mencionado les permitió alcanzar una correlación con la resistencia, en tablas de *Pinus sylvestris* del norte de Europa, algo menor ($R = 0,84$) que la encontrada en este estudio.

Los resultados presentados proveen la base para desarrollar dos modelos de clasificación mecánica basados en procesos de distinta complejidad. Uno sustentado en $E_{m,g}$ que es el parámetro individual mejor correlacionado con la resistencia. El otro, más complejo, fundado en PC . La Figura 4.18, que despliega -a la izquierda- la relación de f_m con $E_{m,g}$ y -a la derecha- de f_m con PC respectivamente, confirman que en ambos casos la asociación entre las variables queda adecuadamente representada por las relaciones lineales adoptadas.

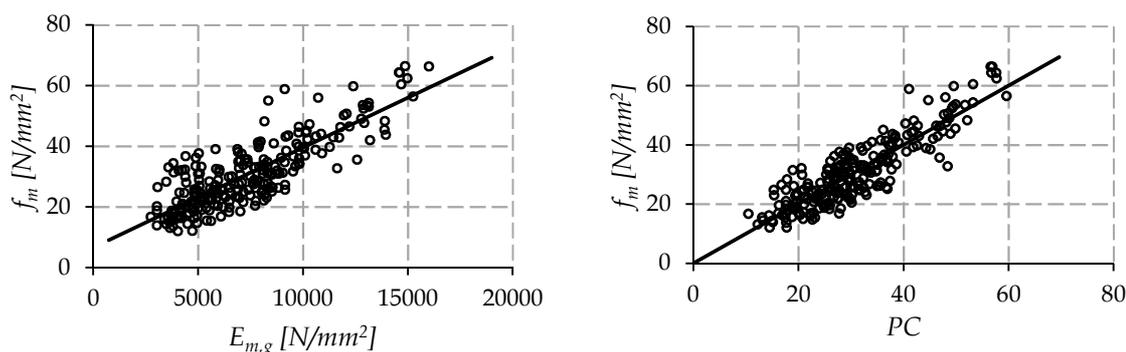


Figura 4.18. (Izq.) Relación entre la resistencia a flexión (f_m) y el módulo de elasticidad global ($E_{m,g}$) encontrada para la muestra M5. $R^2 = 0,69$ (—) recta de regresión: $f_m = 0,0033 E_{m,g} + 6,56$. **(Der.)** Relación entre la resistencia a flexión (f_m) y el parámetro combinado (PC) encontrada para la muestra M5. $R^2 = 0,78$ (—) recta de regresión: $f_m = 0,9995 PC - 0,0079$.

Desarrollo de modelos mecánicos de clasificación y comparación de su eficiencia con la del método visual adoptado por la norma IRAM 9662-3 (2015)

Los límites de los parámetros mecánicos se determinaron teniendo en cuenta el propósito de alcanzar los valores medios del módulo de elasticidad requeridos por la norma IRAM 9662-3 (2015). Luego de clasificar la muestra M5 aplicando los dos modelos, se obtuvieron los perfiles de resistencia, rigidez y densidad -con sus correspondientes rendimientos- que se presentan en la Tabla 4.19. Para facilitar la comparación de la eficiencia de estos modelos con la alcanzada a través del método visual vigente, M5 también fue clasificada según este último criterio y los resultados se incorporaron a la misma tabla.

Tabla 4.19. Rendimiento y valores de la resistencia característica ($f_{m,k}$), el módulo de elasticidad medio ($\bar{E}_{m,g}$) y la densidad característica (ρ_k), obtenidos clasificando la muestra ensayada a flexión (M5) con los modelos mecánicos y con el método visual vigente (IRAM 9662-3 2015)

	Límites de los parámetros		n	$f_{m,k}^{(1)}$ [N/mm ²]	$\bar{E}_{m,g}^{(1)}$ [N/mm ²]	$\rho_k^{(1)}$ [kg/m ³]
Modelo mecánico basado en PC ⁽²⁾	PC ≥ 39,0	Clase 1	43 (18%)	29,5	12048	465
	39,0 > PC ≥ 23,1	Clase 2	134 (58%)	18,2	7057	399
	PC < 23,1	Descarte	56 (24%)	12,0	4463	374
Modelo mecánico basado en $E_{m,g}$	$E_{m,g} \geq 9782$	Clase 1	46 (20%)	27,1	12028	452
	$9782 > E_{m,g} \geq 5022$	Clase 2	127 (54%)	18,6	7160	390
	$E_{m,g} < 5022$	Descarte	60 (26%)	12,3	4183	378
Método visual adoptado por la norma IRAM 9662-3 (2015)		Clase 1	41 (18%)	21,1	10860	456
		Clase 2	115 (49%)	14,7	7657	391
		Descarte	77 (33%)	11,3	5036	380

Nota. (1) valores característicos determinados según la norma IRAM 9664 (2013); (2) Parámetro combinado, $PC = 0,00203 E_{m,g} + 0,0413 \rho - 17,246 K + 2,305$; n: cantidad de cuerpos de prueba asignados a cada clase, entre paréntesis se expresa el porcentaje respecto del total.

Los resultados exhibidos muestran que los dos modelos mecánicos permiten alcanzar todos los valores característicos de las propiedades requeridos por la norma IRAM 9662-3 (2015) para la Clase 1 ($f_{m,k} = 18,0$ N/mm², $\bar{E}_{m,g} = 12000$ N/mm² y $\rho_k = 420$ kg/m³) y para la Clase 2 ($f_{m,k} = 11,0$ N/mm², $\bar{E}_{m,g} = 7000$ N/mm² y $\rho_k = 390$ kg/m³). Si bien la obtención del valor requerido de $\bar{E}_{m,g}$ constituyó un objetivo central en el diseño de los modelos, son de destacar también los elevados valores alcanzados para $f_{m,k}$, que superan ampliamente los requeridos para las dos clases superiores a pesar de las penalizaciones estadísticas aplicadas por tamaño y cantidad de muestras (IRAM 9664 2013). Desde el punto de vista económico, la cantidad de piezas asignadas a cada clase resistente (n) indica un rendimiento similar en ambos modelos mecánicos. Este rendimiento podría mejorarse en las clases 1 y 2 cuando el material se destina a la fabricación de MLEE, ya que para este producto el proceso constructivo permite cortar la tabla, eliminando el defecto que define su clase resistente.

La aplicación del método visual no permitió alcanzar el valor requerido para la rigidez $\bar{E}_{m,g}$ en la Clase 1 (12000 N/mm²), lo cual está en línea con lo reportado previamente en el Apéndice 4.1.4. Este método condujo a un rendimiento inferior al logrado con los modelos mecánicos en la Clase 2 y a un mayor Descarte, el cual totalizó un 33% habiendo alcanzado 24% con el parámetro PC y 26% con $E_{m,g}$. Un estudio detallado permitió conocer

los parámetros visuales que motivaron el descarte de 77 tablas. En 57 casos se debió a un excesivo espesor de los anillos de crecimiento, en 11 tablas fue motivado por la nudosidad y en 9 casos por un exceso en el valor de ambas características. En consecuencia, puede afirmarse que la relativamente baja eficacia de los parámetros visuales para predecir el comportamiento mecánico de este material produjo como resultados negativos más salientes: i) una rigidez ($\bar{E}_{m,g}$) menor a la requerida por la norma en la clase superior y, ii) un descarte de material 9% mayor que el obtenido con el modelo mecánico basado en PC y 7% mayor en relación al modelo basado en $E_{m,g}$.

A través de un análisis de la variabilidad de $E_{m,g}$ dentro de cada clase se comprobó que CV osciló entre 16% y 20% en los 3 grados obtenidos con el modelo basado en PC y entre 14% y 18% con el basado en $E_{m,g}$. Estos valores muestran que la elevada variabilidad de $E_{m,g}$ en la muestra completa (CV = 40%, ver Tabla 4.17) fue reducida con los dos modelos mecánicos hasta alcanzar, dentro de cada clase, el valor de CV (20%) adoptado en las reglas de diseño del país (INTI CIRSOC 601 2016). Contrariamente, el análisis mostró que este valor fue superado en las 3 clases obtenidas con el método visual, donde CV varió entre 26% y 30%. Estos resultados están en línea con el criterio adoptado en Brasil en la última revisión de la norma NBR 7190 (ABNT 2010), que incorpora la clasificación mecánica como un medio para mejorar la homogeneidad de la rigidez en la madera estructural.

Cabe destacar que en la clasificación mecánica propuesta los cuerpos con médula no son separados inicialmente, a diferencia de lo que ocurre en la clasificación visual. La influencia negativa de la médula encontrada para las especies en estudio (ver Apartado 4.1.3), en los modelos mecánicos se tiene en cuenta a través de la disminución que ésta produce en el valor del parámetro. Los cuerpos de prueba que presentan médula exhiben un valor del módulo de elasticidad mucho menor y una densidad aparente un poco más baja que los libres de ella y, en consecuencia, su menor resistencia es detectada por el nivel bajo del parámetro, ya sea combinado (PC) o simple ($E_{m,g}$), lo que provoca automáticamente su asignación a un grado de calidad menor a los que no la poseen.

Aplicación de los modelos mecánicos a la muestra ensayada en tracción paralela a las fibras

La clasificación mecánica de la muestra ensayada en tracción paralela a las fibras (M6) es útil en relación a dos aspectos vinculados al objetivo de este trabajo: i) probar la eficiencia de los modelos para clasificar tablas destinadas a la fabricación de MLEE, ya que en el plano

internacional (Colling 1995; EN 14080 2013) y en el nacional (IRAM 9662-3 2015), se atribuye una destacada importancia a las propiedades mecánicas en tracción de las láminas y, ii) ampliar la base estadística sobre la cual los modelos fueron desarrollados.

En la Tabla 4.20 se presentan los principales resultados de las propiedades mecánicas en tracción y la densidad obtenidos para la muestra M6 parcial (n = 100), puesto que del total de cuerpos de prueba (n = 101) fue descartado uno por no contar con el valor de la rigidez. El contenido de humedad de las 100 tablas alcanzó un valor medio de 12,7% con un CV igual a 6%, lo cual confirma que las mismas se encontraban dentro del rango de humedad establecido por la norma IRAM 9664 (2013) al momento de ser ensayadas.

Tabla 4.20. Principales resultados de la tensión de rotura (f_t), del módulo de elasticidad (E_t) y de la densidad (ρ) obtenidos para la muestra ensayada a tracción paralela a las fibras

	f_t ⁽¹⁾ [N/mm ²]	E_t ⁽²⁾ [N/mm ²]	ρ ⁽²⁾ [kg/m ³]
Mínimo	5,8	3282	342
Medio	18,3	7842	460
Máximo	43,8	17003	631
CV [%]	36	35	13
n	100	100	100

Nota. (1) Valor ajustado a un ancho de referencia de 150 mm según la norma IRAM 9664 (2013); (2) Valores corregidos al contenido de humedad de referencia (12%) según IRAM 9664 (2013); CV: coeficiente de variación; n: cantidad de cuerpos de prueba.

En primer lugar resulta de interés señalar que, como es corroborado en el Apartado 4.4, el comportamiento elástico del material en estudio es adecuadamente interpretado por el criterio europeo (EN 384 2016; EN 1995-1-1 2006) -adoptado en Argentina (IRAM 9664 2013, INTI CIRSOC 601 2016)- que considera para el diseño estructural un valor único para el módulo de elasticidad en flexión y en tracción paralela a las fibras. A su vez, existen antecedentes sobre clasificación mecánica para madera destinada a fines estructurales que asumen un único valor para el módulo de elasticidad tal como lo hacen las reglas de cálculo (Fank *et al.* 2017, Piter *et al.* 2004b). En consecuencia es posible asumir valores equivalentes para el módulo de elasticidad global ($E_{m,g}$) y para el módulo de elasticidad en tracción paralela a las fibras (E_t), por lo que el valor de $E_{m,g}$ fue sustituido por el de E_t en los dos modelos mecánicos y éstos fueron utilizados para clasificar las 100 tablas de la muestra M6,

presentándose los resultados en la Tabla 4.21. Para comparar la eficiencia de estos modelos con la del método visual vigente (IRAM 9662-3 2015), la muestra también fue clasificada según este criterio y los resultados se agregaron a la Tabla 4.21.

Tabla 4.21. Rendimiento y valores de la resistencia característica ($f_{t,k}$), el módulo de elasticidad medio (\bar{E}_t) y la densidad característica (ρ_k), obtenidos clasificando la muestra ensayada a tracción paralela a las fibras (M6) con los modelos mecánicos y con el método visual vigente (IRAM 9662-3 2015)

		n	$f_{t,k}^{(1)}$ [N/mm ²]	$\bar{E}_t^{(1)}$ [N/mm ²]	$\rho_k^{(1)}$ [kg/m ³]
Modelo mecánico basado en $PC^{(2)(3)}$	Clase 1	15 (15%)	15,8	12252	497
	Clase 2	60 (60%)	9,0	7839	396
	Descarte	25 (25%)	5,2	5202	370
Modelo mecánico basado en $E_t^{(3)}$	Clase 1	20 (20%)	11,6	12206	422
	Clase 2	67 (67%)	8,5	7243	369
	Descarte	13 (13%)	4,7	4213	402
Método visual adoptado por la norma IRAM 9662-3 (2015)	Clase 1	17 (17%)	13,7	10746	425
	Clase 2	51 (51%)	8,4	8021	370
	Descarte	32 (32%)	5,6	6012	375

Nota. (1) Valores determinados según el criterio de la norma IRAM 9664 (2013); (2) Parámetro combinado, $PC = 0,00203 E_t + 0,0413 \rho - 17,246 K + 2,305$; (3) Los límites de los parámetros mecánicos para cada clase resistente se explicitan en la Tabla 4.19; n: cantidad de cuerpos de prueba asignados a cada clase, entre paréntesis se expresa el porcentaje respecto del total.

La información exhibida en esta tabla muestra que los dos modelos mecánicos permiten superar los valores requeridos por la norma IRAM 9662-3 (2015) para las propiedades mecánicas de tracción en la Clase 1 ($f_{t,k} = 11,0$ N/mm², $\bar{E}_t = 12000$ N/mm²) y en la Clase 2 ($f_{t,k} = 7,0$ N/mm², $\bar{E}_t = 7000$ N/mm²). Los resultados confirman también para esta muestra que por medio del método visual no es posible alcanzar el valor medio del módulo de elasticidad requerido en la Clase 1. Respecto del rendimiento, el modelo mecánico basado en E_t es el que provee los mejores resultados, con la mayor cantidad de tablas en la Clase 1 (20%) y el menor descarte (13%). El método visual conduce al peor rendimiento, con la mayor cantidad de material descartado (32%), en concordancia con lo ocurrido al clasificar la muestra M5 (ver la Tabla 4.19). Los valores de la densidad presentan cierta inconsistencia en la Clase 2 y en el Descarte para el modelo mecánico basado en E_t y para el método visual. En ambos casos ρ_k es mayor en el Descarte que en la Clase 2,

obteniéndose en esta última un valor de ρ_k que es 5% inferior al requerido por la norma (390 kg /m³). Esta inconsistencia, que puede ser explicada por el tamaño relativamente pequeño de la muestra M6, no se presenta en el modelo basado en PC debido a que éste incluye a la densidad como uno de los parámetros simples que lo integran.

Los resultados presentados y discutidos más arriba prueban que los dos modelos mecánicos ofrecen una eficiencia superior a la del método visual. Esa mayor eficiencia permite alcanzar un rendimiento superior al logrado con el método visual y resolver los problemas principales que surgen de su aplicación, los cuales ya fueron mencionados anteriormente. No obstante, la elección de un modelo y su implementación en una máquina de clasificación requiere tener en cuenta tanto la eficiencia del proceso como el monto de la inversión necesaria, ya que ambos difieren en precisión pero también en complejidad. A su vez, y con independencia del modelo adoptado, es necesario contemplar una inspección visual complementaria para detectar aquellas características que no sean censadas mecánicamente y que se consideren de importancia para el uso estructural del material, tales como la presencia de fisuras y deformaciones, entre otras (EN 14081-1 2016).

4.2.2. Determinación del módulo de elasticidad a través de la frecuencia fundamental de vibración

La determinación de las propiedades elásticas de los elementos estructurales de madera a través de métodos no destructivos ha adquirido importancia los últimos años y la tendencia es creciente. Entre las diferentes técnicas adoptadas se destaca, por su sencillez y bajo costo de aplicación, aquella basada en la frecuencia fundamental de vibración. En el Apartado 2.3.2 se hizo referencia a este método dinámico que puede ser empleado ventajosamente para la determinación del módulo de elasticidad en las máquinas de clasificar por resistencia. Entonces, con el objetivo de comprobar la eficiencia de esta técnica para estimar el módulo de elasticidad en cuerpos de prueba con tamaño estructural de la especie investigada, se utilizaron 194 tablas ensayadas a flexión pertenecientes a la muestra M5 (94 de *P. elliotii* y 100 de *P. taeda*) y 99 tablas ensayadas a tracción paralela a las fibras correspondientes a la M6 (50 de *P. elliotii* y 49 de *P. taeda*). Al no ser analizados el total de cuerpos de pruebas involucrados en cada muestra, en este apartado las mismas serán nombradas como muestra M5d (flexión) y M6d (tracción), evitando así posibles confusiones.

Los ensayos acústicos destinados a determinar la frecuencia fundamental de vibración de los cuerpos de prueba fueron efectuados de forma previa a la realización de los ensayos estáticos, conforme al método descrito en el Apartado 3.2.2. El contenido de humedad de ambas muestras fue determinado de forma independiente para cada prueba de laboratorio, considerando que las mismas fueron llevadas a cabo en diferentes períodos de tiempo. Para los ensayos por vibraciones, esta variable arrojó como resultado un valor medio igual a 10,9% y 10,5% para M5d y M6d respectivamente, ambos asociados a un coeficiente de variación (CV) del 11%. Mientras que para las pruebas estáticas se registraron valores del 11,7% (CV = 6%) y 12,8% (CV = 7%), respectivamente. La diferencia entre los valores del contenido de humedad puede ser atribuida, en parte, al hecho de que los registros fueron llevados a cabo a través de distintas técnicas de medición (ver Apartados 3.2.2 y 3.2.3). El ajuste al valor de humedad normal del 12% en los ensayos no destructivos fue aplicado a la densidad, lo que indirectamente derivó en el ajuste del módulo de elasticidad dinámico (ver Apartado 3.2.2), mientras que en los ensayos destructivos dicho ajuste fue aplicado directamente sobre el módulo de elasticidad estático, tal como lo establece la norma IRAM 9664 (2013). Por lo tanto, puede descartarse una influencia desigual de esta variable sobre la rigidez de las distintas muestras.

En la Tabla 4.22 se presentan los resultados obtenidos para el módulo de elasticidad dinámico (E_d) a través de vibraciones longitudinales y del módulo de elasticidad estático (E_g), tanto en flexión (M5d) como en tracción paralela a las fibras (M6d). Cabe destacar que se exponen únicamente los valores promedio puesto que son los empleados para el cálculo de las deformaciones instantáneas en estructuras usuales (INTI CIRSOC 601 2016). La densidad aparente (ver Tabla 4.22) acusó un valor medio similar para ambas muestras asociado también a CV análogos, por lo que se descarta una influencia desigual por parte de la misma sobre el comportamiento mecánico de las dos muestras estudiadas.

Tabla 4.22. Valor medio del módulo de elasticidad dinámico (E_d), del módulo de elasticidad estático (E_g) y de la densidad (ρ) discriminados por muestra

Muestra	n	E_d [N/mm ²]	E_g [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]
M5d	194	7082 (CV = 34%)	6666 (CV = 36%)	463 (CV = 14%)
M6d	99	8600 (CV = 30%)	7777 (CV = 34%)	459 (CV = 13%)

Nota. CV: Coeficiente de variación; n: cantidad de cuerpos de prueba.

El módulo de elasticidad dinámico (E_d), como puede observarse en la Tabla 4.22, arrojó valores superiores a los del estático (E_g), registrándose para la muestra M5d una diferencia del 6% estadísticamente significativa con un 95% de confianza (valor-P = 0,02 de la prueba K-S), mientras que para la muestra M6d dicha diferencia fue del 11% sin resultar estadísticamente significativa a un nivel de confianza del 95% (valor-P = 0,08 de la prueba K-S). Esta tendencia ($E_d > E_g$) también fue encontrada para otras especies de coníferas, como ser el *Pinus radiata*, *P. sylvestris* y *P. nigra* de procedencia española (Íñiguez González 2007), y el *P. taeda* y *P. elliottii* cultivado en Uruguay (O'Neill 2004). Sotomayor C. y Villaseñor A. (2006) sostienen que este fenómeno puede ser explicado por el efecto de la velocidad de la sollicitación, la cual en pruebas dinámicas provoca una respuesta de carácter viscoelástico de la madera aumentando así la resistencia elástica aparente del espécimen en estudio.

El grado de predicción de la rigidez se evaluó a partir del análisis de regresión lineal entre el módulo E_d calculado con la frecuencia de vibración longitudinal y el E_g obtenido de los ensayos estáticos. La relación existente entre ambas variables para las dos muestras en estudio resultó estadísticamente significativa (valor-P < 0,05 del análisis ANOVA) con un nivel de confianza del 95%. Los resultados obtenidos para la relación E_d - E_g se presentan en la Figura 4.19

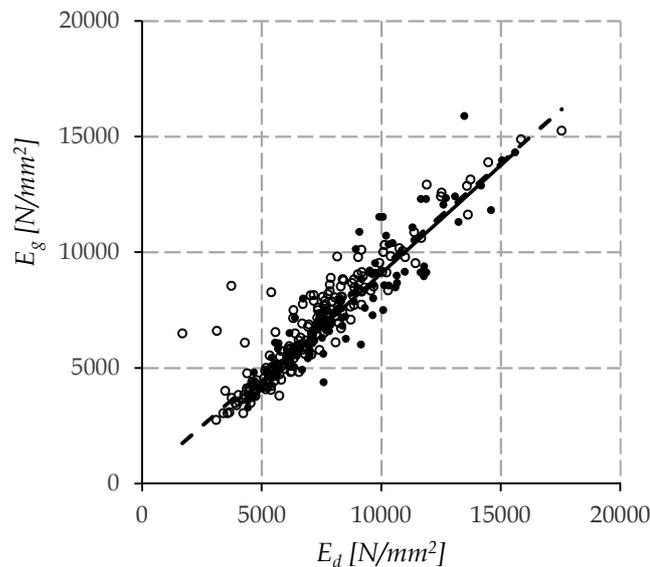


Figura 4.19. Relación entre el módulo de elasticidad dinámico (E_d) y el módulo de elasticidad estático (E_g) para ambas muestras. (○) M5d. $R^2 = 0,85$; (---) recta de regresión: $E_g = 0,9102 E_d + 220,63$. (●)M6d. $R^2 = 0,84$ (—) recta de regresión: $E_g = 0,9350 E_d - 264,10$.

La bondad de ajuste para la relación E_d-E_g (ver Figura 4.19) se estimó mediante el coeficiente de determinación (R^2), el cual arrojó un valor igual a 0,85 y 0,84 para las muestras M5d y M6d, respectivamente. Un resultado similar fue obtenido para el pino laricio (*Pinus nigra subsp. salzmannii*) cultivado en España ($R^2 = 0,83$) (Iñiguez González *et al.* 2007) y para el *Eucalyptus grandis* proveniente de Uruguay ($R^2 = 0,84$) (O’Neill 2004), mientras que valores R^2 superiores (entre 0,89 y 0,96) fueron reportados para madera de *Pinus taeda* uruguayo (Pérez del Castillo *et al.* 2000).

Para evaluar el efecto que ejercen las principales características visuales (médula, nudosidad y anillo de crecimiento) sobre la determinación de la rigidez de las piezas por ambos métodos, también se analiza la relación existente entre módulos de elasticidad E_d/E_g contemplando 3 perfiles de calidad que involucran dichas singularidades de forma independiente. Los límites que definen cada grupo se fijaron de acuerdo a los propuestos por la norma de clasificación visual por resistencia IRAM 9662-3 (2015). En la Tabla 4.23 se presentan los resultados obtenidos para el valor medio de E_g y E_d , además del valor de la relación E_d/E_g junto a la cantidad de cuerpos de prueba (n) asociados a cada categoría contemplada y discriminados por muestra.

En términos generales, en la Tabla 4.23 se advierte que en todos los casos analizados los valores E_d promedio resultaron superiores a los valores E_g promedio, similar tendencia encontrada ($E_d > E_g$) para las muestras completas (Tabla 4.22). Al agrupar las piezas de acuerdo a la presencia de médula, para ambas muestras la estimación de E_g a través de E_d fue más precisa en aquel grupo que no contenía tal singularidad. Como la velocidad de propagación del sonido varía con las características del medio donde la onda sonora atraviesa, la mayor diferencia registrada para el grupo que admite médula (15% para M5d y 16% para M6d) puede ser explicada por la presencia de un alto porcentaje de madera juvenil, la que se encuentra asociada a importantes diferencias en sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y anatómicas con respecto a la madera adulta, en la cual la calidad se mantiene casi constante (Pérez del Castillo *et al.* 2000).

En cuanto a la nudosidad, como puede apreciarse en la Tabla 4.23, la relación E_d/E_g crece a medida que aumenta el límite permitido, es decir, en este caso también se obtuvo una mayor precisión en la estimación del módulo de elasticidad estático para el material de mejor calidad (menor índice de nudos). Lo cual está en línea con reportes que demuestran que la velocidad de propagación de la onda acústica de vibración asociada disminuye

cuando aumenta el porcentaje de nudosidad de la madera como consecuencia de la mayor variabilidad y dispersión de las mediciones (Quil Villa 2009).

Respecto del tercer parámetro de calidad, tanto para la muestra M5d como para la M6d, el grupo integrado por piezas con anillos de crecimiento menores a 10 mm presentó la mejor precisión en la estimación del módulo de elasticidad E_g . Esto se condice con el hecho de que la velocidad del sonido depende del medio en el cual se transmite, siendo mayor en los materiales más densos (Niemz *et al.* 1994). No obstante, en los demás rangos no se evidenció una tendencia clara para la relación E_d/E_g , lo que puede estar asociado tanto a la presencia de médula como al índice de nudosidad.

Tabla 4.23. Valores medios del módulo de elasticidad dinámico (E_d) y del módulo de elasticidad estático (E_g) para distintas calidades de madera discriminados por muestra

Parámetros	Límites	n	E_d [N/mm ²]	E_g [N/mm ²]	E_d/E_g	
Muestra M5d	Médula	No	150	7484	7168	1,04
		Si	44	5709	4955	1,15
	Nudosidad	< 1/3	82	7983	7687	1,04
		1/3 a 2/3	92	6479	6105	1,06
		> 2/3	20	6156	5057	1,22
	Anillos de crecimiento	< 10 mm	32	9763	9332	1,05
		10 a 15 mm	97	7252	6952	1,04
		>= 15 mm	65	5507	4927	1,12
	Muestra M6d	Médula	No	66	9517	8759
Si			33	6767	5814	1,16
Nudosidad		< 1/3	41	9890	9092	1,09
		1/3 a 2/3	46	7974	7187	1,11
		> 2/3	12	6593	5546	1,19
Anillos de crecimiento		< 10 mm	28	10788	9991	1,08
		10 a 15 mm	45	8367	7437	1,13
	>= 15 mm	26	6648	5983	1,11	

Nota. n: cantidad de cuerpos de prueba.

Para evaluar el efecto conjunto que ejercen las principales características visuales sobre la rigidez, las piezas fueron clasificadas de acuerdo a los lineamientos fijados por la

norma IRAM 9662-3 (2015). Los resultados obtenidos para E_g , E_d , E_d/E_g junto a la cantidad de cuerpos de prueba asociados (n) son expuestos en la Tabla 4.24. Tales valores evidencian una mejor predicción del módulo de elasticidad para ambas clases estructurales respecto del grupo de piezas descartadas, lo cual resulta razonable teniendo en cuenta el análisis previo realizado para cada parámetro en forma independiente. Para ambas clases estructurales, el valor de elasticidad estimado por el método de las vibraciones (E_d) resultó levemente mayor al real obtenido a través de los ensayos estáticos (E_g), registrándose una mayor diferencia al considerar las tablas traccionadas (M6d) respecto de las flexionadas (M5d), pero en ningún caso superó al 10%.

Tabla 4.24. Valores medios del módulo de elasticidad dinámico (E_d) y del módulo de elasticidad estático (E_g) para las muestras discriminadas por clase resistente de acuerdo al método de clasificación visual vigente (IRAM 9662-3 2015)

	Calidad	n (%)	E_d [N/mm ²]	E_g [N/mm ²]	E_d/E_g
M5d	Clase 1	19 (10)	11330	10671	1,06
	Clase 2	99 (51)	7327	7150	1,02
	Descarte	76 (39)	5699	5035	1,13
M6d	Clase 1	16 (16)	11402	10355	1,10
	Clase 2	51 (52)	8865	8076	1,10
	Descarte	32 (32)	6777	6012	1,13

Nota. n: cantidad de cuerpos de prueba.

En síntesis, la técnica dinámica basada en la frecuencia fundamental de vibración para determinar el valor del módulo de elasticidad en tablas de pino resinoso (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*) demostró que, si bien sobreestima levemente al valor del módulo de elasticidad estático, el empleo de la misma presenta una ventaja operativa a los fines prácticos para determinar las propiedades elásticas de este material. Los resultados obtenidos son consistentes con otros publicados (Cagno *et al.* 2014; Casado *et al.* 2007; Íñiguez González 2007; Quil Villa 2009; Sotomayor Castellanos 2014) para ensayos realizados con probetas pequeñas, libres de defectos y en tamaño estructural de diversas especies y, por lo tanto, alientan la utilización de este método con piezas de distinto tamaño y variada calidad de la especie investigada.

4.3. Análisis comparativo de la madera de *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* a través de las propiedades físico-mecánicas

En nuestro país, como lo ya expresado, los árboles de *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* son comercializados y utilizados en forma conjunta debido a que la madera obtenida a partir de ambas especies presenta apariencia similar y, a la vez, tampoco existen estudios que evidencien una diferencia significativa entre sus propiedades físico-mecánicas (Fank *et al.* 2017; Melchiorretto y Eleotério 2003; Moya *et al.* 2015b; Muñoz 1993; Santini *et al.* 2000). En este apartado se lleva a cabo un análisis comparativo entre las propiedades de resistencia, rigidez y densidad de ambas. Para tal fin se consideró la muestra M5 conformada por tablas ensayadas a flexión, puesto que además de contar con el mayor número de cuerpos de prueba asociados a cada especie (116 *P. elliottii*, 117 *P. taeda*), tales piezas provienen de plantaciones con similar edad de corte (27 años *P. elliottii*, 30 años *P. taeda*).

Los resultados obtenidos a través de los ensayos de flexión estática para M5 se presentan en la Tabla 4.25 discriminados por especie. Tanto los valores de las propiedades mecánicas como de la densidad aparente fueron ajustados a las condiciones de referencia establecidas en la norma IRAM 9664 (2013). El contenido de humedad medio de todos los cuerpos de prueba (233) fue de 11,9% asociado a un coeficiente de variación (CV) de 8%, mientras que los resultados diferenciados por especie arrojaron un valor medio de 11,4% (CV = 8%) y 12,5% (CV = 8%) para el *P. elliottii* y *P. taeda*, respectivamente. Como el contenido de humedad resultó similar al 12% asociado a un bajo coeficiente de variación, se puede descartar una influencia desigual de esta variable sobre la resistencia de ambas sub-muestras.

La resistencia a flexión, como puede apreciarse en la Tabla 4.25, acusó un valor medio similar para ambas especies ($f_m \approx 31 \text{ N/mm}^2$) asociado a elevados coeficientes de variación (CV promedio = 38%). O'Neill (2004) reportó valores algo mayores ($f_m = 37,9 \text{ N/mm}^2$, CV=42%) para el *Pinus taeda* de 24 años de edad cultivado en Uruguay, igualmente Moya *et al.* (2017) publicaron una resistencia f_m de $39,5 \text{ N/mm}^2$ (CV = 42%) para la madera aserrada de *Pinus taeda/elliottii* de calidad estructural. Melchiorretto y Eleotério (2003) determinaron valores de resistencia aún mayores para el *P. elliottii* ($f_m = 46,4 \text{ N/mm}^2$, CV=13%) y *P. taeda* ($f_m = 49,0 \text{ N/mm}^2$, CV = 18%) de 25 años de edad procedente de Brasil, donde los bajos CV indican madera de calidad. Ballarin *et al.* (2017) reportaron para el pino brasileiro (*Pinus taeda/elliottii*) una f_m media de $46,1 \text{ N/mm}^2$ para madera aserrada de alta

calidad mientras que esta cifra desciende a 32,0 N/mm² en aquellas piezas estructurales pero de segunda clase.

Tabla 4.25. Propiedades mecánicas y densidad discriminadas por especie para las piezas de la muestra M5 ensayadas a flexión

Propiedad		<i>Pinus elliottii</i> (n = 116)	<i>Pinus taeda</i> (n= 117)
$f_m^{(1)}$	Mínimo [N/mm ²]	13,1	12,0
	Medio [N/mm ²]	31,0	30,6
	Máximo [N/mm ²]	66,4	66,4
	CV [%]	40	36
$E_{m,g}^{(2)}$	Mínimo [N/mm ²]	3031	2747
	Medio [N/mm ²]	6964	7742
	Máximo [N/mm ²]	16003	14876
	CV [%]	43	36
$\rho^{(2)}$	Mínimo [kg/m ³]	356	333
	Medio [kg/m ³]	490	456
	Máximo [kg/m ³]	711	609
	CV [%]	16	12

Nota. (1) Valor ajustado a la altura de referencia de 150 mm de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); (2) Valores corregidos al contenido de humedad de referencia (12%) de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); f_m : resistencia a flexión; $E_{m,g}$: módulo de elasticidad; ρ : densidad aparente; CV: coeficiente de variación; n: cantidad de cuerpos de prueba.

El módulo de elasticidad ($E_{m,g}$), por su parte, presentó un valor medio un 11% inferior para el *P. elliottii* (6964 N/mm²) respecto del *P. taeda* (7742 N/mm²), ambos relacionados con elevados coeficientes de variación (ver Tabla 4.25). Resultados similares fueron obtenidos por O'Neill (2004) para el pino taeda cultivado en Uruguay (8354 N/mm²) y por Santini *et al.* (2000) para el pino elliotis procedente de Brasil (7185 N/mm²). No obstante, Muñiz 1993 determinó valores superiores para ambas especies (aproximadamente 12000N/mm²) mientras que Melchiorretto y Eleotério (2003) reportaron cifras algo menores a las determinadas en este trabajo, 5288 N/mm² (CV = 24%) y 6329 N/mm² (CV = 27%) para el *P. elliottii* y *P. taeda* respectivamente, donde también se evidencia una mayor rigidez por parte del segundo.

La densidad mostró una tendencia inversa a la observada para la rigidez, de los datos presentados en la Tabla 4.25 se deduce que el valor medio asociado al *P. elliottii* resultó un 7% superior al del *P. taeda*. Este resultado está en línea con lo publicado por Pereira Mendes (2017), quien reportó cifras entre 500-560 kg/m³ y 470-510 kg/m³ para el *P. elliottii* y el *P. taeda* en edad adulta, respectivamente. Similar tendencia también fue registrada en pinos de 25 años de edad cultivados en Brasil (Melchiorretto y Eleotério 2003). La densidad media obtenida para el *P. elliottii* (490 kg/m³) resultó levemente inferior a la señalada por Pereira Mendes (2017) pero superior al valor reportado (460 kg/m³) por Melchiorretto y Eleotério (2003). La densidad media del *P. taeda* (456 kg/m³), por su parte, acusó un valor semejante al informado por Melchiorretto y Eleotério (2003) y Weber (2005) para árboles de 25 y 16 años de edad respectivamente, y superior al reportado (402 kg/m³) por Zaderenko (2000) para árboles de 14 años.

Un análisis estadístico comparativo entre cada una de las sub-muestras (*P. elliottii* y *P. taeda*) y cada una de las propiedades físico-mecánicas antes analizadas (resistencia a flexión, módulo de elasticidad y densidad) es presentado a continuación. En cada caso y de forma previa fue verificada la normalidad de los datos analizados. Los resultados se exhiben tanto numérica como gráficamente a través de histogramas de frecuencia y curvas de densidad suavizada.

Los datos correspondientes a la resistencia a flexión (f_m) son representados en la Figura 4.20, aquellos relacionados a la sub-muestra de *Pinus elliottii* se ajustan a una distribución normal con 31,0 N/mm² de media y 12,4 N/mm² de desviación estándar, mientras que los del *Pinus taeda* con parámetros iguales a 30,6 N/mm² y 10,9 N/mm², respectivamente. Al aplicarse la prueba estadística Kolmogorov-Smirnov, el valor-P más pequeño acusó una cifra de 0,22 para el *P. elliottii* y de 0,08 para el *P. taeda*, como ambos resultaron mayores a 0,05, la hipótesis de que los datos proceden de poblaciones con distribución normal no es rechazada con un 95% de confianza. En consecuencia, los valores f_m de ambas sub-muestras fueron comparados a través del test de Student cuyo resultado arrojó un valor-P igual a 0,77, lo cual prueba que a un nivel de significación de 0,05 (5%) no puede ser rechazada la hipótesis de igualdad entre los valores medios de la resistencia. La coincidencia de ambas distribuciones resulta evidente al observarse el gráfico de densidad suavizada representado en la Figura 4.20.

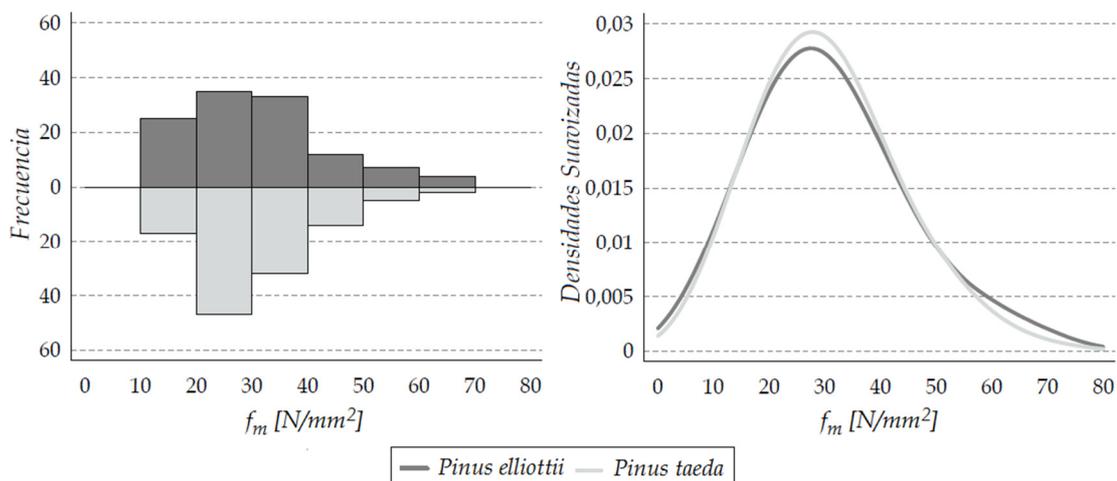


Figura 4.20. Distribución de la resistencia a flexión (f_m) asociada a cada sub-muestra (*P. elliottii*, *P. taeda*). Izq.: Histograma de frecuencia. Der.: Gráfico de densidad suavizada.

Respecto a la rigidez (ver Figura 4.21), los datos del módulo de elasticidad ($E_{m,g}$) se pueden ajustar a una distribución normal con una media igual a 6964 N/mm^2 y 7742 N/mm^2 asociada a una desviación estándar de 3009 N/mm^2 y 2814 N/mm^2 para el *P. elliottii* y el *P. taeda*, respectivamente. La prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S) indicó que únicamente los datos correspondientes al *P. taeda* (valor-P más pequeño = 0,70) provienen de una distribución normal, por lo que, al no verificarse la normalidad de aquellos asociados a la otra sub-muestra (valor-P más pequeño = 0,04 < 0,05), se utilizó la prueba no paramétrica de K-S para poder compararlas. La misma arrojó un valor-P aproximado de 0,01 (< 0,05) lo que implica una diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones pudiendo ser rechazada la hipótesis de igualdad entre especies. No obstante, al tratarse de un material caracterizado por su gran heterogeneidad, no resulta determinante una diferencia del 11% entre los valores medios del módulo de elasticidad para madera estructural. En este sentido Melchiorretto y Eleotério (2003) reportaron como no significativa una diferencia del 20% entre valores $E_{m,g}$ del *P. taeda* respecto del *P. elliottii*.

En el gráfico de densidad suavizada representado en la Figura 4.21 se pone en evidencia la brecha existente entre las distribuciones del $E_{m,g}$ de las dos especies en estudio. Ambas curvas presentaron una desviación estándar similar por lo que divergen únicamente debido a la pequeña diferencia existente entre los valores medios obtenidos. Esta discrepancia podría estar asociada a las prácticas de silvicultura aplicadas a los bosques considerando que el mayor $E_{m,g}$ se corresponde con la sub-muestra *Pinus taeda*, cuya madera proviene de una forestación que fue sometida a dos turnos de poda, mientras que la

correspondiente al *Pinus elliotii* no fue sometida a tratamiento alguno. Estos resultados se conciben con informes que indican que la madera extraída de plantaciones donde fueron aplicadas prácticas de poda presenta una mejor aptitud mecánica debido a que estos tratamientos mejoran la calidad de los rollizos basales, lo que repercute directamente en un mayor módulo de elasticidad de la madera (Winck *et al.* 2015).

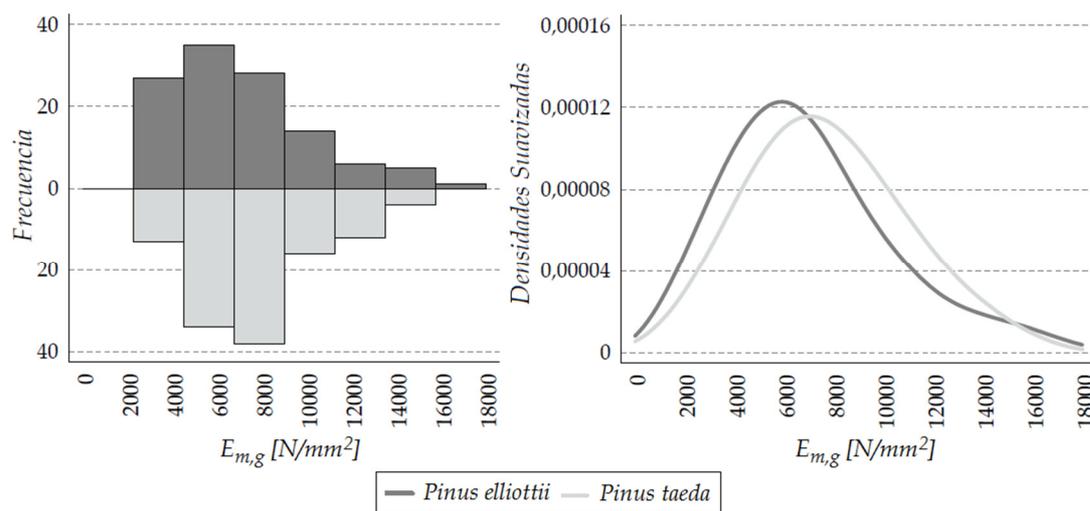


Figura 4.21. Distribución del módulo de elasticidad en flexión ($E_{m,g}$) asociada a cada sub-muestra (*P. elliotii*, *P. taeda*). Izq.: Histograma de frecuencia. Der.: Gráfico de densidad suavizada.

Los datos de densidad (ρ) son representados gráficamente en la Figura 4.22, aquellos asociados al *Pinus elliotii* se pueden ajustar a una distribución normal con media igual a 490 kg/m³ y desviación estándar de 77 kg/m³, mientras que los del *Pinus taeda*, con media igual a 456 kg/m³ y desviación estándar de 54 kg/m³. Al igual que en el caso anterior ($E_{m,g}$), para la densidad la prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S) reveló la normalidad de los datos asociados al *Pinus taeda* (valor-P = 0,29) pero no de los correspondientes al *Pinus elliotii* (valor-P \approx 0). A través de la prueba no paramétrica K-S se determinó con un 95% de confianza que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones y puede ser rechazada la hipótesis de igualdad (valor-P \approx 0,01 < 0,05). Esta diferencia puede ser atribuida, en gran medida, a la mayor densidad registrada por parte del *Pinus elliotii*, que probablemente se corresponde con la abundante producción de resinas que caracteriza a dicha especie, particularidad que la distingue del *Pinus taeda* (Pereira Mendes 2017). El efecto de las resinas sobre la densidad fue corroborado por Hermoso Prieto (2001), quien al comparar la madera del pino silvestre con la del pino

pinaster (más resinoso) observó una similitud entre las propiedades resistentes pero no así entre densidades, resultando más densa la madera con mayor contenido de resina.

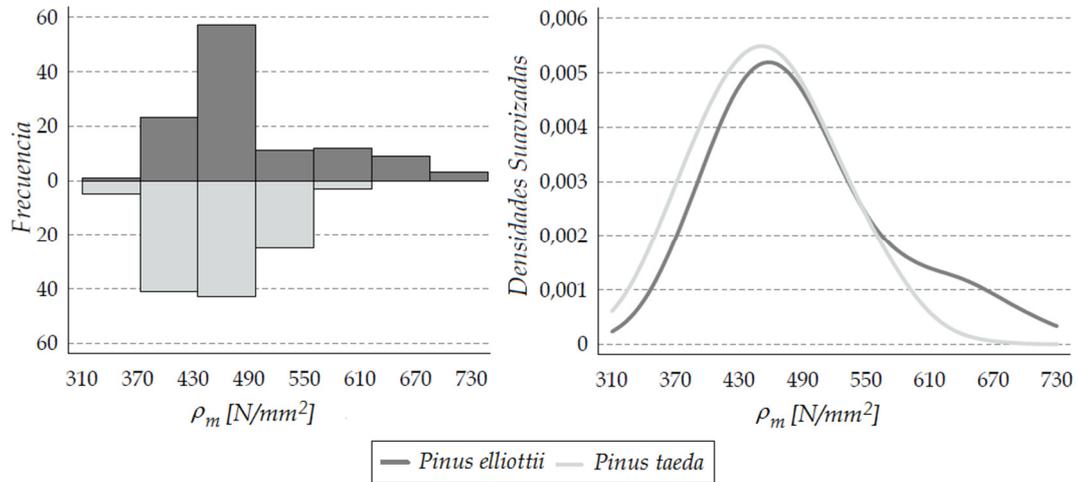


Figura 4.22. Distribución de la densidad (ρ) asociada a cada sub-muestra (*P. elliotii*, *P. taeda*). Izq.: Histograma de frecuencia. Der.: Gráfico de densidad suavizada.

En resumen, a través del análisis llevado a cabo en el presente apartado se puede confirmar que la madera procedente del *Pinus elliotii* y del *Pinus taeda*, a pesar de que mostró cierta discrepancia ante la densidad, presentó un comportamiento mecánico similar (f_m y $E_{m,g}$) por lo que los resultados obtenidos ponen en evidencia que ambas especies en estudio pueden ser empleadas de manera indistinta y, en consecuencia, confirman el criterio de las reglas de diseño (INTI CIRSOC 601 2016) y normas (IRAM 9662-3 2015; IRAM 9670 2002) de Argentina que consideran las dos especies en forma conjunta para uso estructural.

4.4. Relaciones entre las propiedades mecánicas de flexión y tracción

Para la determinación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada estructural, como lo ya expresado en el Apartado 2.2.3, en Argentina (IRAM 9663 2013, IRAM 9664 2013) se han adoptado los lineamientos europeos (EN 384 versión 2010; EN 408 2012). Conforme a este criterio, las propiedades fundamentales que se deben determinar experimentalmente para una determinada combinación especie/procedencia son la resistencia a flexión, el módulo de elasticidad en flexión y la densidad (Glos 1995a),

pudiendo derivarse a partir de ellas las restantes propiedades mecánicas empleadas en el diseño. No obstante, considerando la importante variabilidad que caracteriza a este material estructural, así como la diversidad de especies y de regiones de cultivo (Guillaumet *et al.* 2014), se considera conveniente verificar para cada caso la eficacia de las relaciones encontradas por la experiencia europea.

En particular, la norma de clasificación visual por resistencia IRAM 9662-3 (2015) provee los valores característicos de la resistencia a flexión y a tracción de tablas de *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* para cada una de las clases resistentes contempladas. El primero de ellos fue determinado experimentalmente y el segundo fue estimado igual al 60% del anterior en congruencia con la experiencia europea. Asimismo, en línea con este criterio, las normas IRAM 9662-3 (2015) e IRAM 9664 (2013) consideran un único valor medio del módulo de elasticidad, el cual es obtenido experimentalmente del ensayo a flexión sobre piezas de tamaño estructural y es empleado en el diseño para calcular las deformaciones tanto en miembros sometidos a flexión, como a tracción y compresión paralela a las fibras.

Entonces, con el fin de verificar experimentalmente si el criterio adoptado por la normativa argentina para relacionar las propiedades mecánicas en flexión y en tracción paralela a las fibras expresa adecuadamente el comportamiento de la madera aserrada de *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* cultivados en el nordeste de Argentina, en el presente apartado fueron analizados los resultados de los ensayos llevados a cabo sobre las tablas correspondientes a las muestras M5 (flexión) y M6 (tracción).

Los resultados obtenidos para el contenido de humedad arrojaron un valor medio de 11,9% y 12,7% asociados a un coeficiente de variación de 9,3% y 5,6% para la muestra M5 y M6, respectivamente. Estos resultados permiten descartar una influencia desigual del contenido de humedad sobre las propiedades mecánicas de las dos muestras.

4.4.1. Análisis de los resultados correspondientes a las muestras sin clasificar

En la Tabla 4.26 se resumen los principales resultados obtenidos para la resistencia, el módulo de elasticidad y la densidad en las dos muestras analizadas (M5, M6). En la misma se presentan los valores mínimos, medios y máximos obtenidos de los ensayos, el correspondiente coeficiente de variación (CV) y la cantidad de cuerpos de prueba (n). Para la resistencia y la densidad también se presenta el valor correspondiente al percentil 5%,

puesto que estas magnitudes -al estar vinculadas con la seguridad- normalmente se emplean para el cálculo resistente en el diseño estructural (Glos 1995b).

Tabla 4.26. Propiedades mecánicas y densidad para tablas ensayadas a flexión y tracción paralela a las fibras

Propiedad	M5 Flexión	M6 Tracción	
Resistencia ⁽¹⁾	Mínimo [N/mm ²]	12,0	5,8
	Medio [N/mm ²]	30,8	18,2
	Máximo [N/mm ²]	66,4	43,8
	CV [%]	38	36
	p _{0,05} [N/mm ²]	15,6	9,1
	n	233	101
Módulo de Elasticidad ⁽²⁾	Mínimo [N/mm ²]	2747	3282
	Medio [N/mm ²]	7354	7842
	Máximo [N/mm ²]	16003	17003
	CV [%]	40	35
	n	233	100
Densidad ⁽²⁾	Mínimo [kg/m ³]	333	342
	Medio [kg/m ³]	473	460
	Máximo [kg/m ³]	711	631
	CV [%]	15	13
	p _{0,05} [kg/m ³]	387	373
	n	233	101

Nota. (1) Valor ajustado a la altura de referencia de 150 mm de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); (2) Valores corregidos al contenido de humedad de referencia (12%) de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); CV: coeficiente de variación; p_{0,05}: percentil 5%; n: cantidad de cuerpos de prueba.

La resistencia a tracción paralela a la fibra (f_t) arrojó un valor menor que el determinado para la resistencia a flexión (f_m) y, del análisis de los datos presentados en la Tabla 4.26, se obtiene que la relación existente entre ambas variables (f_t/f_m) ascendió a 0,59 tanto para el valor medio como para el percentil 5%, lo cual ratifica la aplicabilidad del criterio europeo ($f_t/f_m = 0,6$) que fue adoptado por la norma IRAM 9662-3 (2015).

El módulo de elasticidad medio resultó similar en ambas muestras, siendo el de tracción (E_t) un 7% mayor que el de flexión ($E_{m,g}$), lo cual está en línea ($E_t > E_{m,g}$) con lo publicado para el *Pinus sylvestris* de procedencia española (Baño *et al.* 2012). Si bien diferencias de este rango fueron reportadas en coníferas de Europa (Burger y Glos 1995b; Johansson *et al.* 1992), para conocer su nivel de significación se empleó el test de Student, el cual confirmó que no puede rechazarse la hipótesis de igualdad entre los valores medios de E_t y $E_{m,g}$ a un nivel de significación del 5% (valor-P = 0,16). Consecuentemente, la diferencia entre ellos puede atribuirse a la variabilidad natural de las propiedades comparadas y, por lo tanto, la misma puede ser ignorada para propósitos prácticos vinculados al diseño estructural, facilitando así la tarea del proyectista. Este criterio está avalado por la experiencia europea (EN 384 2016) y aceptado por la norma IRAM 9664 (2013).

La densidad mostró valores similares para ambas muestras, acusando una diferencia entre ellas de 3% y 4% para el valor medio y el percentil 5%, respectivamente. No obstante, para descartar alguna influencia sobre las propiedades mecánicas por parte de esta variable se verifica la igualdad entre ambas distribuciones. En la Figura 4.23 se presentan las gráficas de distribución de la densidad asociada a cada muestra (M5, M6).

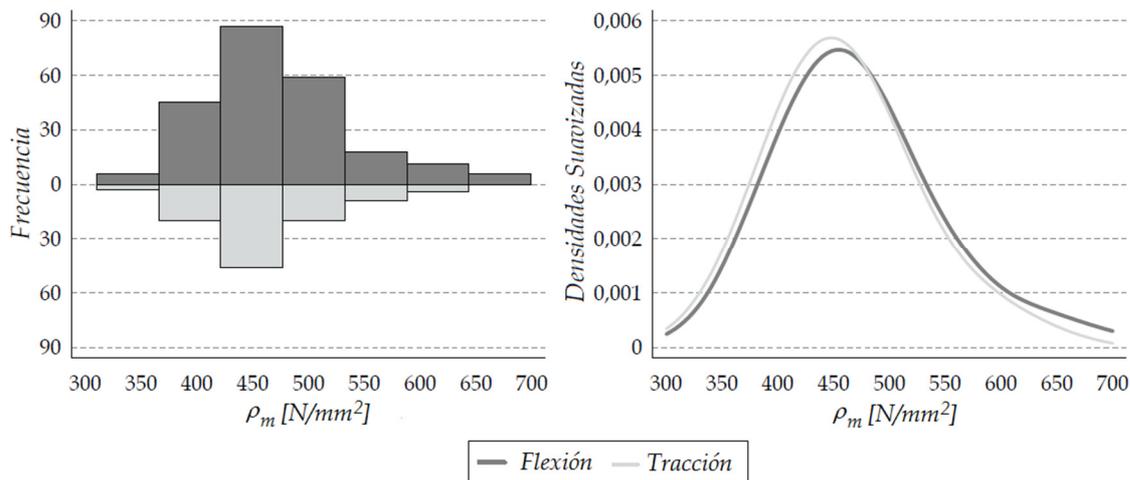


Figura 4.23. Distribución de la densidad (ρ) asociada a cada muestra (M5: Flexión, M6: Tracción). Izq.: Histograma de frecuencia. Der.: Gráfico de densidad suavizada

En primer lugar se analizaron las muestras de forma independiente por medio de la prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov, la cual reveló con un 95% de confianza la normalidad de los datos asociados a la muestra M6 (valor-P = 0,18) pero no así de los

correspondientes a la muestra M5 (valor-P < 0,05). Por lo que ambas muestras fueron comparadas a través de una prueba no paramétrica (K-S), confirmándose que -a un nivel de significación del 5%- no puede ser rechazada la hipótesis de igualdad entre M5 y M6 (valor-P \approx 0,34). En los gráficos expuestos en la Figura 4.23 también puede observarse claramente que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones. En consecuencia, y de igual manera que para el contenido de humedad, se descarta que esta propiedad pueda ejercer una influencia desigual sobre el comportamiento mecánico de las dos muestras estudiadas.

4.4.2. Análisis de los resultados correspondientes a cada clase resistente

La información referida a las muestras completas -presentada en la Tabla 4.26- permitió confirmar que la relación entre las propiedades mecánicas en flexión y en tracción está en línea con la experiencia europea, la cual fue incorporada a la normativa argentina como lo ya mencionado. No obstante, la madera para usos estructurales se emplea clasificada en grados de resistencia y como diversos estudios afirman que la relación entre f_t y f_m depende también de la calidad del material (Burger y Glos 1997; Steiger *et al.* 2010; Steiger y Arnold 2009), se analiza dicha relación para cada una de las diferentes calidades (clase 1, clase 2, descarte) a las que se pueden asignar las tablas que conforman ambas muestras en estudio.

De forma previa al análisis por clase se considera oportuno incorporar un estudio de la influencia que ejercen de forma independiente los parámetros visuales adoptados para clasificar las piezas (nudosidad, presencia de médula y espesor de los anillos de crecimiento según Apartado 4.1.4) tanto sobre la resistencia a flexión como a tracción paralela a las fibras. En el Apartado 4.1.3 ya fueron contempladas las relaciones existentes entre cada uno de los parámetros visuales considerados y las propiedades mecánicas de las muestras sometidas a flexión discriminadas entre vigas y tablas, en esta oportunidad el estudio se basa fundamentalmente en la relación existente entre sollicitaciones de flexión (M5) y tracción (M6).

La nudosidad produce una interrupción del tejido desviando las fibras adyacentes lo que origina una disminución de la capacidad resistente de la madera. En la Figura 4.24 se exhiben los resultados de la relación encontrada entre la nudosidad y la resistencia tanto a flexión como a tracción paralela a las fibras. En ambos casos la relación entre las variables

analizadas resultó estadísticamente significativa (valor-P < 0,05 del análisis ANOVA) con un nivel de confianza del 95%.

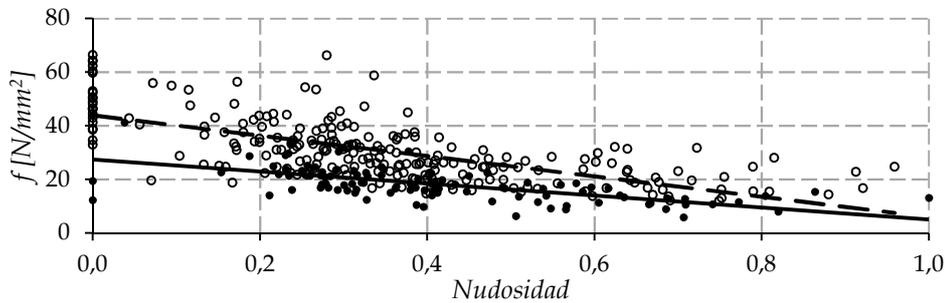


Figura 4.24. Relación entre nudosidad y resistencia (f). (○) M5: Flexión. $R^2 = 0,46$; (---) recta de regresión: $f_m = -37,983 x + 43,912$. (●) M6: Tracción. $R^2 = 0,41$; (—) recta reg.: $f_t = -22,289 x + 27,381$

El coeficiente de correlación (R) resultó igual a $-0,68$ y $-0,64$ para la muestra M5 (Flexión) y la M6 (Tracción), respectivamente. Cardoso *et al.* (2017) obtuvieron correlaciones algo menores ($R = -0,51$) en piezas traccionadas de *Pinus taeda/elliottii* cultivado en Uruguay. Curiosamente y en contraposición a resultados previamente publicados (Glos 1995b), los valores obtenidos muestran una influencia mayor –si bien leve– de la nudosidad sobre la resistencia a flexión que a tracción.

La Figura 4.25, por su parte, presenta la relación encontrada entre la nudosidad y la rigidez. La misma resultó estadísticamente significativa (valor-P < 0,05 del análisis ANOVA) con un nivel de confianza del 95% tanto al analizar la muestra sometida a flexión como a tracción. Para M5 se obtuvo una correlación (R) igual a $-0,58$ y para M6 igual a $-0,49$, observándose –al igual que en el caso anterior– una mayor influencia de esta singularidad sobre las piezas flexionadas.

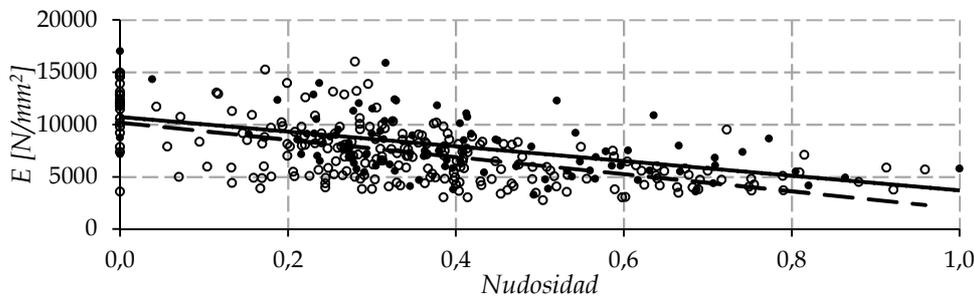


Figura 4.25. Relación entre nudosidad y módulo de elasticidad (E). (○) M5: Flexión. $R^2 = 0,34$; (---) recta de regresión: $E_m = -8212,6 x + 10190$. (●) M6: Tracción. $R^2 = 0,24$; (—) recta de regresión: $E_t = -7013,5 x + 10719$.

La médula, como lo ya mencionado en el Apartado 4.1.3, al estar asociada a la presencia de madera juvenil también es reductora de la capacidad resistente. En la Figura 4.26 puede apreciarse el efecto negativo que la misma ejerce sobre la resistencia de ambas muestras investigadas.

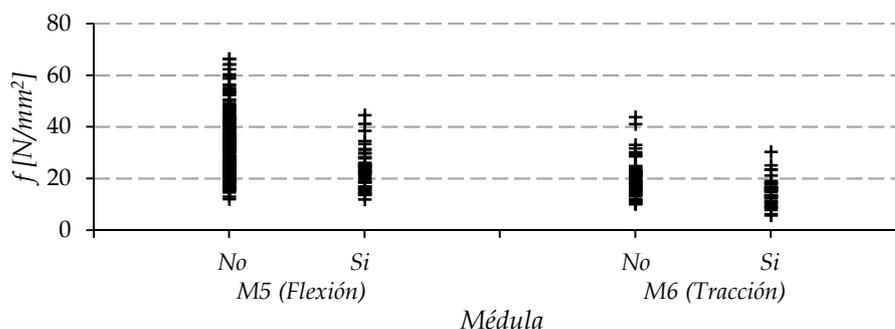


Figura 4.26. Relación entre la presencia de médula y la resistencia a flexión (f) discriminada por muestra

Los resultados de la M5 (flexión) arrojaron un valor medio 39% mayor para las piezas sin médula (32,6 N/mm², n = 187) respecto de las que la contienen (23,4 N/mm², n = 46). Idéntica diferencia fue obtenida por Haselein *et al.* (2000) al comparar la resistencia de la madera próxima a la corteza con la contigua a la médula del *Pinus elliottii* de 30 años de edad cultivado en Brasil. La M6 (tracción) presentó un valor de 19,9 N/mm² para las piezas sin médula (n = 67) y de 15,0 N/mm² para las restantes (n = 34), siendo la primera un 33% mayor que la segunda. Una diferencia ligeramente inferior (27%) fue registrada para la madera de *Pinus taeda/elliottii* proveniente de forestaciones uruguayas de 27 años (Cardoso *et al.* 2017).

La relación entre la médula y el módulo de elasticidad se exhibe en la Figura 4.27. Para la M5 (flexión) se obtuvieron valores de 7929 N/mm² para las piezas sin médula (n=187) y de 5019 N/mm² para las restantes (n = 46), mientras que para la M6 (tracción) las cifras ascendieron a 8841 N/mm² (n = 67) y de 5814 N/mm² (n = 33), respectivamente. De los mismos se deduce que las piezas sin médula registraron una rigidez 58% y 52% mayor ante esfuerzos de flexión y tracción, respectivamente. Haselein *et al.* (2000) reportaron una diferencia menor (36%) al comparar la rigidez de la madera próxima a la corteza con la contigua a la médula del *Pinus elliottii* de 30 años de edad cultivado en Brasil. En síntesis, el efecto de la médula sobre la elasticidad fue similar bajo ambas sollicitaciones y a la vez éste fue mayor que el registrado por la resistencia. Esto último podría relacionarse con el

mayor ángulo de inclinación de las microfibrillas asociadas a la capa S2 de la pared celular secundaria en la madera juvenil respecto de la normal, teniendo en cuenta que el mismo repercute directamente sobre la rigidez de la pieza (Cave y Walker 1994; Hoffmeyer 1995; Donaldson 2008; Larson *et al.* 2001; Yin *et al.* 2011).

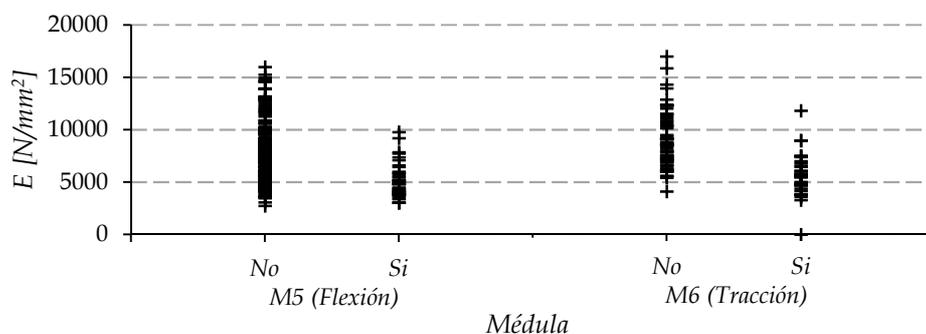


Figura 4.27. Relación entre la presencia de médula y el módulo de elasticidad (E) discriminada por muestra

El espesor de los anillos de crecimiento presenta una relación estadísticamente significativa (valor-P < 0,05 del análisis ANOVA) con las propiedades mecánicas a un nivel de confianza del 95%. De acuerdo a lo analizado en el Apartado 4.1.3, este parámetro visual afecta especialmente a la resistencia y rigidez en piezas de menores secciones transversales. Los resultados encontrados para la relación entre el espesor del mayor anillo de crecimiento y las propiedades mecánicas se exhiben en la Figura 4.28 y Figura 4.29.

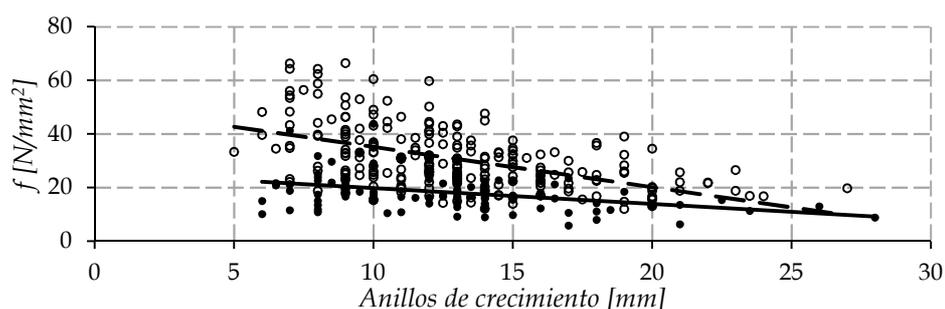


Figura 4.28. Relación entre el ancho del mayor anillo de crecimiento y la resistencia (f). (○) M5: Flexión. $R^2 = 0,27$; (---) recta de regresión: $f_m = -1,5041 x + 50,217$. (●) M6: Tracción. $R^2 = 0,16$; (—) recta de regresión: $f_t = -0,6156 x + 26,06$.

En la Figura 4.28 se presenta la relación entre el espesor del mayor anillo de crecimiento y la resistencia, de la cual se obtiene que el coeficiente de correlación (R) para la M5 resultó igual a -0,52 y para la M6 igual a -0,40. Estos valores evidencian una menor influencia de esta singularidad sobre la resistencia a tracción, lo que es también corroborado

para la madera aserrada de *Pinus taeda/elliottii* del Uruguay, para la cual Cardoso *et al.* (2017) reportaron que no se puede inferir que el ancho del anillo influya sobre la resistencia a tracción. Por su parte y como puede observarse en la Figura 4.29, al relacionar los anillos con la rigidez se presenta una tendencia similar pero con una mejor correlación, obteniéndose valores R de -0,65 y -0,55 para la muestra sometida a flexión y tracción, respectivamente.

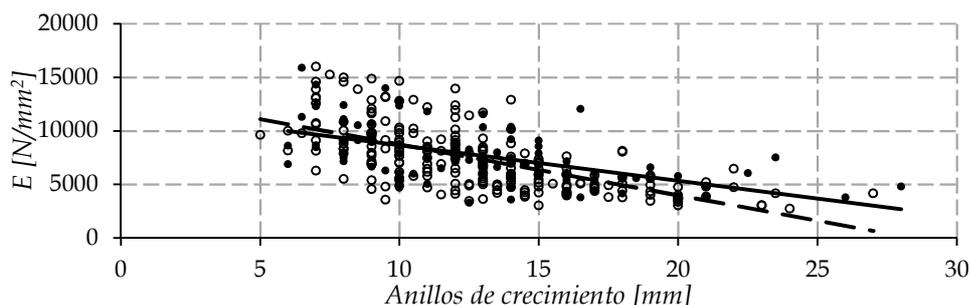


Figura 4.29. Relación entre el ancho de los anillos de crecimiento y el módulo de elasticidad (E).
 (○) M5: Flexión. $R^2 = 0,42$; (---) recta de regresión: $E_m = -473,94 x + 13474$. (●) M6: Tracción.
 $R^2 = 0,31$; (—) recta de regresión: $E_t = -331,62 x + 11968$.

Luego del análisis global de cada muestra, las piezas se agruparon según los lineamientos de la norma IRAM 9662-3 (2015) aplicando los parámetros visuales de clasificación antes analizados. Los principales resultados de las propiedades mecánicas y la densidad obtenidos para cada clase resistente se exhiben en la Tabla 4.27, donde se presentan el valor medio del módulo de elasticidad y los percentiles 5% de la resistencia y la densidad, los que resultan de singular importancia para el cálculo estructural. Para facilitar la apreciación de las relaciones existentes entre las propiedades mecánicas en tracción y flexión, éstas también se incluyen en la mencionada tabla.

En la Tabla 4.27 se aprecia que la relación existente entre la resistencia a tracción y flexión (f_t/f_m) decrece levemente con la disminución de la calidad de la madera, registrándose valores desde 0,65 en el grado superior a 0,62 en el intermedio y alcanzando finalmente 0,52 en el grupo de menor calidad. Una tendencia similar fue obtenida a través de un estudio de piezas de madera estructural de abeto procedente del centro de Europa (Steiger y Arnold 2009; Burger y Glos 1997). Asumiendo la relación constante de 0,60 adoptada por la normativa argentina -en línea con la experiencia europea- se obtienen diferencias de 5% y 2% con las encontradas empíricamente para los dos grados superiores,

los que son aptos para uso estructural, mientras que esa diferencia alcanza un 8% en el material Descarte.

Tabla 4.27. Propiedades mecánicas y densidad de las tablas discriminadas por clase resistente de acuerdo al método de clasificación visual propuesto por la norma IRAM 9662-3 (2015)

Propiedad		M5 Flexión	M6 Tracción	Relación Trac./Flex.
Clase 1	Resistencia percentil 5% ⁽¹⁾ [N/mm ²]	27,2 (n = 41)	17,6 (n = 17)	0,65
	Mód. de elasticidad medio ⁽²⁾ [N/mm ²]	10860 (n = 41)	10746 (n = 17)	0,99
	Densidad percentil 5% ⁽²⁾ [kg/m ³]	456 (n = 41)	424 (n = 17)	-
Clase 2	Resistencia percentil 5% ⁽¹⁾ [N/mm ²]	17,1 (n = 115)	10,6 (n = 52)	0,62
	Mód. de elasticidad medio ⁽²⁾ [N/mm ²]	7657 (n = 115)	8044 (n = 51)	1,05
	Densidad percentil 5% ⁽²⁾ [kg/m ³]	391 (n = 115)	370 (n = 52)	-
Descarte	Resistencia percentil 5% ⁽¹⁾ [N/mm ²]	13,8 (n = 77)	7,2 (n = 32)	0,52
	Mód. de elasticidad medio ⁽²⁾ [N/mm ²]	5036 (n = 77)	6012 (n = 32)	1,19
	Densidad percentil 5% ⁽²⁾ [kg/m ³]	380 (n = 77)	374 (n = 32)	-

Nota. (1) Valor ajustado a la altura de referencia de 150 mm de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); (2) Valores corregidos al contenido de humedad de referencia (12%) de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); n: cantidad de cuerpos de prueba.

En cuanto a la relación entre los módulos de elasticidad en tracción paralela a la fibra y en flexión, contrariamente a lo encontrado para la resistencia, se observa una relación creciente con la disminución de la calidad del material. E_t/E_m asciende a 0,99 en el grupo de mayor calidad, toma un valor de 1,05 en el de calidad intermedia y alcanza finalmente una cifra igual a 1,19 en el material Descarte. Esta tendencia está en línea con la encontrada por Burger y Glos (1995a) para coníferas de diferentes especies y por Steiger y Arnold (2009) para el abeto rojo cultivado en Suiza. Asumiendo la igualdad de los módulos, conforme a la normativa de Argentina, se obtienen diferencias de 1% y 5% con los resultados experimentales para los dos grados superiores, mientras que la diferencia alcanza el 19% en el material de descarte.

Las diferencias encontradas entre los resultados experimentales y el criterio de las normas no son significativas y consecuentemente pueden ser ignoradas para propósitos prácticos vinculados al diseño estructural. En síntesis los resultados obtenidos validan para la madera de pino resinoso cultivado en el nordeste de Argentina las relaciones entre las propiedades mecánicas en flexión y en tracción paralela a las fibras adoptadas por la norma

IRAM 9662-3 (2015) y la IRAM 9664 (2013), lo que implica la posibilidad de reducirse el trabajo experimental desde la perspectiva de la caracterización de estas especies de rápido crecimiento sobre piezas de tamaño estructural usual.

4.5. Comparación entre el módulo de elasticidad global y el módulo de elasticidad local en flexión

La norma IRAM 9663 (2013), basada en la normativa europea EN 408 (2012), provee dos métodos para la determinación del módulo de elasticidad en flexión, uno para el denominado módulo de elasticidad local ($E_{m,l}$) y otro para el módulo de elasticidad global ($E_{m,g}$). Como ya se expuso en el Apartado 3.2.3, la prueba de flexión de piezas de madera en tamaño estructural contempla la aplicación simétrica de las cargas en los tercios de la distancia entre apoyos, así se dispone del tramo medio libre de la influencia del esfuerzo de corte (flexión pura), sector empleado para la determinación de $E_{m,l}$. En cambio, si se contempla toda la longitud del vano también existe la acción del esfuerzo de corte en los tramos laterales, por lo que ésta es utilizada para la obtención de $E_{m,g}$.

Para el diseño de los perfiles de calidad en vistas de una clasificación visual (Apartado 4.1) y de los modelos mecánicos de clasificación por resistencia (Apartado 4.2) se utilizó el valor del módulo de elasticidad global, el cual fue calculado para todos los cuerpos de prueba sometidos a ensayos de flexión estática. Con el fin de analizar la relación existente entre los valores de ambos módulos de elasticidad también fue obtenido experimentalmente el módulo de elasticidad local de todas aquellas piezas flexionados de canto pertenecientes a las muestras M1, M2, M3 y M4. Teniendo en cuenta que la presencia de médula y la nudosidad resultaron ser los parámetros visuales con mayor influencia sobre el comportamiento mecánico para las vigas aserradas (Apartado 4.1.3), en el presente análisis también es contemplado el efecto que ambas singularidades ejercen de forma independiente sobre los parámetros de rigidez $E_{m,l}$ y $E_{m,g}$.

La necesidad de simplificar el trabajo experimental y minimizar los errores de medición ante deformaciones muy pequeñas ha originado distintas propuestas para relacionar los valores de ambos módulos de elasticidad. Como lo ya mencionado en el Apartado 2.2.3, en EEUU se destaca el método propuesto por la norma ASTM D198 (2015), mientras que en Europa se pueden señalar el criterio formulado por Denzler *et al.* (2008) y

el adoptado por la norma EN 384 (2016), que plantean derivar el valor del módulo libre de corte ($E_{m,l}$) a partir del valor de $E_{m,g}$ obtenido experimentalmente. La eficiencia de estos tres criterios para interpretar el comportamiento del pino resinoso estudiado también es evaluada en el presente apartado.

4.5.1. Valores determinados experimentalmente para el módulo de elasticidad global y para el módulo de elasticidad local

Los datos de humedad y densidad para las muestras en estudio ya fueron expuestos en el Apartado 4.1.2, pero se considera oportuno reiterarlos. El contenido de humedad en las vigas al momento de ensayo presentó valores medios de 12,3%, 13,3%, 12,1%, 12,9% para M1, M2, M3 y M4 respectivamente, asociados a coeficientes de variación (CV) entre 2% y 5%. La densidad ajustada a un contenido de humedad de referencia del 12% (IRAM 9664 2013) alcanzó valores medios de 538 kg/m³ (CV = 14%) para M1, 510 kg/m³ (CV = 14%) para M2, 502 kg/m³ (CV = 15%) para M3 y de 497 kg/m³ (CV = 13%) para M4.

Los principales resultados obtenidos para $E_{m,g}$ y $E_{m,l}$ se presentan en la Tabla 4.28 de forma separada para cada una de las muestras y para el conjunto de vigas completo. A la vez, estos son expuestos para el total sin clasificar y también discriminados tanto por presencia de médula como por la nudosidad bajo los criterios K y KAR 150 por ser los que mejor se adaptan a las vigas (ver Apartado 4.1.3. Nudosidad). El primero (K) es de simple aplicación y coincide con el adoptado por la norma IRAM 9662-3 (2015) mientras que el segundo (KAR 150) arroja una mayor precisión que el K pero es de compleja aplicación.

Los resultados mostrados en la Tabla 4.28 revelan que en la mayoría de los casos los valores medios de $E_{m,l}$ superan a los de $E_{m,g}$, lo cual es congruente con la existencia de una influencia del esfuerzo de corte sobre las deformaciones registradas para el cálculo de $E_{m,g}$. La prueba de Kolmogorov-Smirnov (valor-P = 0,19 > 0,05) indicó que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones ($E_{m,l}$ y $E_{m,g}$) con un 95% de confianza. Con el propósito de visualizar claramente las diferencias entre $E_{m,l}$ y $E_{m,g}$, en la Tabla 4.29 se presenta el valor de las mismas para cada muestra asociada a las distintas calidades contempladas.

Tabla 4.28. Resultados experimentales del módulo de elasticidad global ($E_{m,g}$) y local ($E_{m,l}$) de cada una de las muestras para distintas calidades de madera

Calidad		M1 [45x100]*	M2 [45x150]*	M3 [70x150]*	M4 [70x200]*	M _{Vigas}		
Total	$E_{m,g}$ (CV) ⁽¹⁾	9212 (26)	9264 (25)	8713 (21)	9140 (24)	9099 (24)		
	$E_{m,l}$ (CV) ⁽¹⁾	9168 (30)	9478 (31)	9153 (26)	9682 (25)	9363 (28)		
	n	64	61	50	50	225		
Médula	No	$E_{m,g}$ (CV) ⁽¹⁾	9938 (22)	9888 (25)	9081 (22)	9565 (22)	9740 (23)	
		$E_{m,l}$ (CV) ⁽¹⁾	10014 (26)	10216 (32)	9354 (25)	10135 (21)	10017 (27)	
		n	42	41	16	22	121	
	Sí	$E_{m,g}$ (CV) ⁽¹⁾	7827 (29)	7985 (14)	8540 (21)	8806 (25)	8354 (23)	
		$E_{m,l}$ (CV) ⁽¹⁾	7552 (31)	7963 (17)	9059 (26)	9326 (28)	8601 (28)	
		n	22	20	34	28	104	
Nudosidad K	≤ 1/3	$E_{m,g}$ (CV) ⁽¹⁾	10077 (24)	10407 (28)	9178 (19)	10190 (24)	9996 (25)	
		$E_{m,l}$ (CV) ⁽¹⁾	10085 (27)	10976 (29)	10014 (25)	10810 (27)	10468 (27)	
		n	16	16	12	10	54	
	1/3 a 2/3	$E_{m,g}$ (CV) ⁽¹⁾	9129 (26)	9084 (19)	9127 (18)	8982 (23)	9085 (22)	
		$E_{m,l}$ (CV) ⁽¹⁾	9089 (30)	9028 (28)	9566 (21)	9462 (22)	9255 (26)	
		n	41	35	28	29	133	
	> 2/3	$E_{m,g}$ (CV) ⁽¹⁾	7726 (26)	8066 (28)	6994 (24)	8603 (23)	7877 (25)	
		$E_{m,l}$ (CV) ⁽¹⁾	7531 (31)	8655 (39)	6966 (27)	9236 (28)	8172 (33)	
		n	7	10	10	11	38	
	Nudosidad KAR 150	≤ 1/3	$E_{m,g}$ (CV) ⁽¹⁾	9444 (24)	9577 (26)	9484 (18)	9936 (22)	9585 (23)
			$E_{m,l}$ (CV) ⁽¹⁾	9380 (28)	9865 (29)	10054 (23)	10206 (22)	9823 (26)
			n	40	39	28	25	132
1/3 a 2/3		$E_{m,g}$ (CV) ⁽¹⁾	8827 (30)	8958 (18)	7731 (20)	8344 (23)	8458 (24)	
		$E_{m,l}$ (CV) ⁽¹⁾	8815 (34)	9085 (34)	8007 (24)	9159 (28)	8773 (30)	
		n	24	20	22	25	91	
> 2/3		$E_{m,g}$ (CV) ⁽¹⁾	-	6231 (8)	-	-	6231 (8)	
		$E_{m,l}$ (CV) ⁽¹⁾	-	5845 (5)	-	-	5845 (5)	
		n	-	2	-	-	2	

Nota. * Dimensiones de la sección transversal en mm; (1) Valor del módulo de elasticidad medio [N/mm²] y entre paréntesis valor del coeficiente de variación [%]; n: cantidad de cuerpos de prueba.

Tabla 4.29. Diferencias entre el módulo de elasticidad local ($E_{m,l}$) y global ($E_{m,g}$) de cada una de las muestras para distintas calidades de madera

Calidad	Diferencia entre $E_{m,l}$ y $E_{m,g}$ [%]				M_{Vigas}	
	M1 [45x100]*	M2 [45x100]*	M3 [45x100]*	M4 [45x100]*		
Total	-0,5	2,3	5,0	5,9	2,9	
Médula	No	0,8	3,3	3,0	6,0	2,8
	Si	-3,6	-0,3	6,1	5,9	3,0
Nudosidad K	$\leq 1/3$	0,1	5,5	9,1	6,1	4,7
	1/3 a 2/3	-0,4	-0,6	4,8	5,3	1,9
	$> 2/3$	-2,6	7,3	-0,4	7,4	3,7
Nudosidad KAR 150	$\leq 1/3$	-0,7	3,0	6,0	2,7	2,5
	1/3 a 2/3	-0,1	1,4	3,6	9,8	3,7
	$> 2/3$	-	-6,6	-	-	-6,6

Nota. * Dimensiones de la sección transversal en mm.

Del análisis global de los valores presentados anteriormente para las diferentes calidades de cada muestra (M1, M2, M3, M4) surge que, en general, las diferencias encontradas entre el módulo de elasticidad local y global no superan al 7,5%. Estos resultados se corresponden con los publicados por Piter *et al.* (2003) para la madera aserrada de *Eucalyptus grandis* cultivado en Argentina, que mostraron valores medios de $E_{m,l}$ entre 6% y 7% mayores que los correspondientes a $E_{m,g}$. Cabe destacar que de todos los casos analizados en la Tabla 4.29 únicamente en dos puntuales se registraron cifras más elevadas a la antes señalada. Uno se corresponde con la M3 clasificada bajo el criterio $K \leq 1/3$, donde se obtuvo una diferencia del 9,1%, lo cual podría estar asociado al bajo número de cuerpos de prueba involucrados ($n = 12$, ver Tabla 4.28). El segundo caso está asociado con la muestra M4, que en general presentó las mayores diferencias entre $E_{m,l}$ y $E_{m,g}$ para todas las calidades, siendo la máxima del 9,8% asociada a la clase $1/3 < KAR 150 \leq 2/3$.

Por otra parte, como puede observarse en la Tabla 4.29, en algunos casos puntuales la diferencia entre módulos de elasticidad resultó negativa, es decir, se presentó la situación inversa: $E_{m,g} > E_{m,l}$. Para las muestras sin clasificar, en un caso (M1) se obtuvo una diferencia negativa de tan sólo 0,5%. Al dividir las piezas considerando la presencia de médula, también en un solo caso (M1 sin médula) $E_{m,g}$ superó a $E_{m,l}$, registrándose una diferencia del 4%. Al clasificar las piezas de acuerdo a la nudosidad K, $E_{m,g}$ resultó mayor a $E_{m,l}$ en 4

oportunidades, en 3 de las cuales las diferencias fueron menores al 1%. Al considerar el criterio KAR 150, dicha condición se registró en 3 casos, en 2 de los cuales la diferencias no alcanzaron al 1% mientras que en el restante ésta fue del 6,6% ($M2 \text{ KAR } 150 > 2/3$), sin embargo, como dicha categoría involucró a tan solo de 2 cuerpos de prueba (ver Tabla 4.28) no resulta representativo y por lo tanto puede ser desestimado.

No obstante, al centrar la atención en la muestra que involucra el total de vigas (M_{vigas}), lo que es equivalente a un mayor número de cuerpos de prueba asociado a cada calidad, los valores medios $E_{m,l}$ superan a los $E_{m,g}$ en todos los casos excepto en $M2 \text{ KAR } 150 > 2/3$ y, a la vez, la diferencia entre ambos no excede al 5%. Lo cual está en línea con el criterio adoptado por el Reglamento Argentino de Estructuras de Madera (INTI CIRSOC 601 2016, Apartado 3.2.3) que asume un valor 5% mayor para el módulo de elasticidad determinado en flexión pura que para el obtenido con una componente de deformación debida al esfuerzo de corte.

Por otra parte, los valores del coeficiente de variación (CV) desplegados en la Tabla 4.28 muestran, en general, una dispersión superior de valores para $E_{m,l}$ que para $E_{m,g}$. Esta diferencia puede explicarse por el criterio de ensayo adoptado por la norma IRAM 9663 (2013), el cual dispone ubicar la zona con mayores defectos en el tercio central de la viga donde las tensiones de flexión (pura) alcanzan su máximo valor. Considerando que las deformaciones registradas en ese tramo de la viga -exento de esfuerzo de corte- son las empleadas para determinar $E_{m,l}$, la relativamente elevada dispersión de esta propiedad puede atribuirse a la particular variabilidad de la calidad de la madera en esa zona. Este fenómeno resulta claramente apreciable en las piezas con el mayor índice de defectos, es decir, en aquellas sin clasificar y en las calidades inferiores de las piezas clasificadas, ya sea por presencia de médula o por nudosidad.

El criterio de ensayo explica también la razón por la cual en las piezas sin clasificar la diferencia entre los valores de CV correspondientes a $E_{m,l}$ y $E_{m,g}$ es menor en la muestra M4 que en las demás. En efecto, la relación entre la longitud de las piezas de M4 (4,27 m, ver Apartado 3.1) y su altura ($h = 0,2 \text{ m}$) brinda un margen de movilidad muy reducido para ubicar los defectos más importantes en el tercio central, si se tiene en cuenta la separación entre apoyos requerida por la norma ($18 h = 3,6 \text{ m}$).

Para aquellas situaciones críticas de diseño donde se justifica un control más exhaustivo de las deformaciones, el Reglamento Argentino de Estructuras de Madera (INTI

CIRSOC 601 2016, Apartado 3.2.3) aporta una fórmula para el cálculo del percentil 5% del módulo de elasticidad en flexión asumiendo un coeficiente de variación del 20%, valor que fue superado por gran parte de los CV obtenidos experimentalmente en este estudio. Como puede observarse en la Tabla 4.28, para las muestras sin clasificar los CV oscilan entre 25% y 31% para $E_{m,l}$, y entre 21% y 26% para $E_{m,g}$, mientras que para el material clasificado -ya sea por médula o nudosidad- se presentan valores menores en aquellos grupos de mayor calidad, no obstante en la mayoría de los casos el 20% asumido también fue superado.

Los resultados experimentales obtenidos para el módulo de elasticidad local, como lo ya reportado para el módulo de elasticidad global en el Apartado 4.1.3, también confirman la influencia negativa que ejerce la presencia de médula y la nudosidad sobre la rigidez. Contemplando el total de piezas ensayadas (M_{vigas}), de la Tabla 4.28 se deduce que el valor medio $E_{m,l}$ obtenido para las vigas libres de médula supera en 16% al determinado para las vigas con médula, en tanto que dichas diferencias ascienden a 13% y 12% entre clases superiores asociadas a las calidades K y KAR 150, respectivamente. Estos resultados están en línea con el criterio de la norma IRAM 9662-3 (2015) y del National Design Specification (NDS 2012) que consideran que ambos parámetros afectan el desempeño mecánico de las especies investigadas.

Los valores obtenidos en cada viga para ambos tipos de módulo de elasticidad se grafican en la Figura 4.30, Figura 4.31, Figura 4.32 y Figura 4.33 para la muestra M1, M2, M3 y M4 respectivamente.

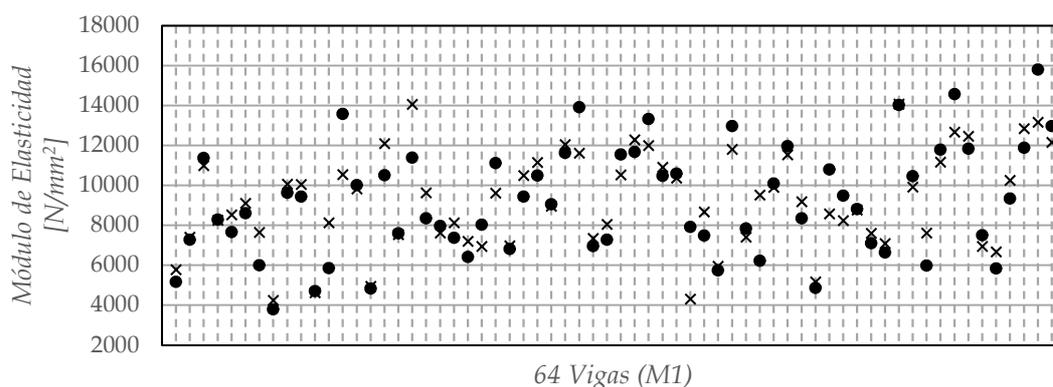


Figura 4.30. Resultados de $E_{m,g}$ (x) y $E_{m,l}$ (•) obtenidos experimentalmente para cada viga de M1

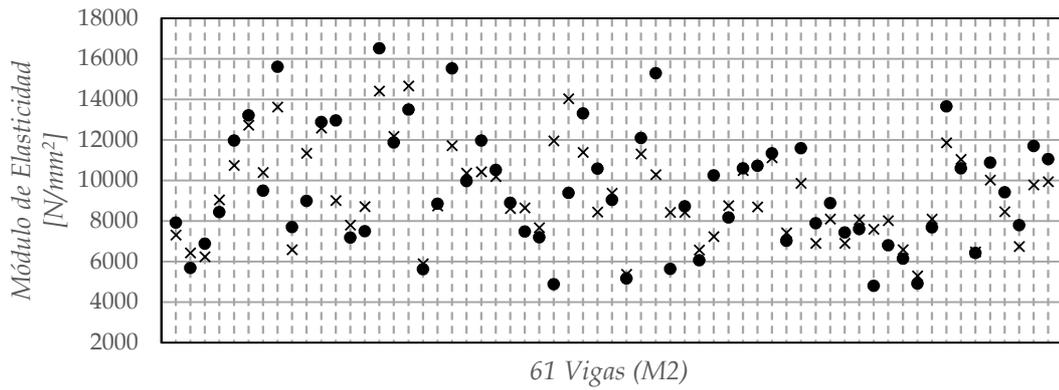


Figura 4.31. Resultados de $E_{m,g}$ (x) y $E_{m,l}$ (•) obtenidos experimentalmente para cada viga de M2

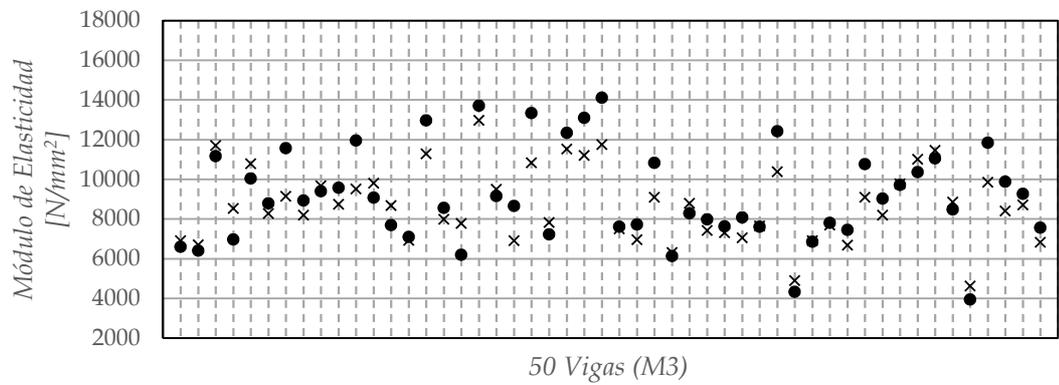


Figura 4.32. Resultados de $E_{m,g}$ (x) y $E_{m,l}$ (•) obtenidos experimentalmente para cada viga de M3

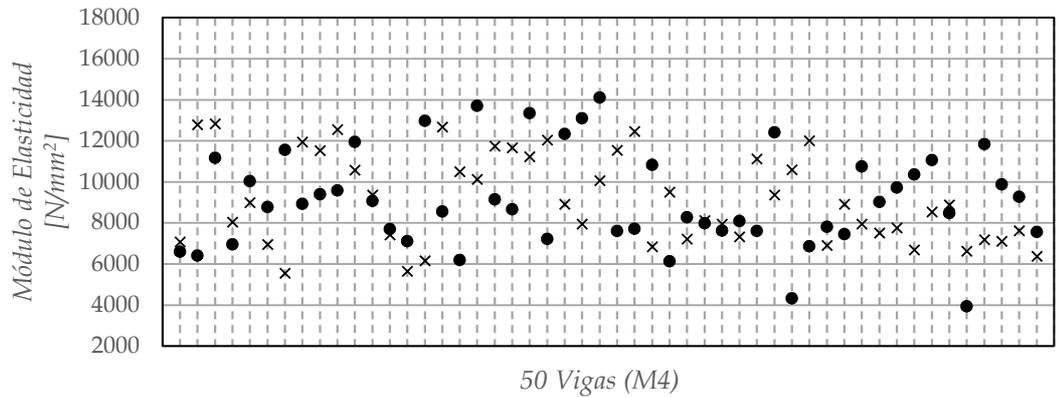


Figura 4.33. Resultados de $E_{m,g}$ (x) y $E_{m,l}$ (•) obtenidos experimentalmente para cada viga de M4

De los gráficos expuestos es posible apreciar que $E_{m,l}$ es mayor que $E_{m,g}$ en 28 vigas (44%) de M1, 33 vigas (54%) de M2, 29 vigas (58%) de M3 y 31 vigas (62%) de M4. Esta información detallada confirma dos aspectos importantes a considerar en el diseño estructural con este material. Uno es que la relación entre los valores medios ($E_{m,l} > E_{m,g}$) refleja el comportamiento de más de la mitad de las vigas y puede considerarse adecuada

para estimar las deformaciones en casos donde éstas no son un condicionamiento crítico del diseño. El otro es que cuando la deformación es un requerimiento importante del proyecto conviene tener en cuenta la elevada variabilidad de la calidad del material, cuya influencia sobre el valor del módulo de elasticidad superó a la del esfuerzo de corte en 56%, 46%, 42% y 38% de las vigas de M1, M2, M3 y M4 respectivamente.

4.5.2. Valores calculados para el módulo de elasticidad local a partir de los valores determinados experimentalmente para el módulo de elasticidad global

Con el propósito de verificar la eficiencia de los criterios propuestos por la norma EN 384 (2016), Denzler *et al.* (2008) y por la ASTM D198 (2015) para interpretar el comportamiento del pino resinoso estudiado, se derivaron conforme a los mismos los valores $E_{m,l}$ a partir de los resultados experimentales de $E_{m,g}$. A la vez, los valores $E_{m,l}$ calculados de esa manera se compararon con los obtenidos experimentalmente. Dicha información es exhibida en la Tabla 4.30 para la muestra completa de vigas (M_{vigas}) discriminada por las distintas calidades consideradas.

Tabla 4.30. Aplicación de distintos criterios para calcular el módulo de elasticidad local a partir del módulo de elasticidad global obtenido experimentalmente para las distintas calidades de la muestra completa de vigas (M_{vigas})

Calidad	n	VC [N/mm ²]			VE [N/mm ²]	VC/VE			
		E	D	A		E	D	A	
Total	225	9139	9519	9142	9363	0,98	1,02	0,98	
Médula	No	121	9972	10288	9786	10017	1,00	1,03	0,98
	Si	104	8170	8625	8394	8601	0,95	1,00	0,98
Nudosidad K	≤ 1/3	54	10304	10595	10043	10468	0,98	1,01	0,96
	1/3 a 2/3	133	9120	9502	9128	9255	0,99	1,03	0,99
	> 2/3	38	7550	8052	7914	8172	0,92	0,99	0,97
Nudosidad KAR 150	≤ 1/3	132	9770	10102	9630	9823	0,99	1,03	0,98
	1/3 a 2/3	91	8305	8750	8498	8773	0,95	1,00	0,97
	> 2/3	2	5410	6077	6260	5845	0,93	1,04	1,07

Nota. VC: Valor medio del módulo de elasticidad local calculado a partir del módulo de elasticidad global, según (E) la norma EN 384 (2016), (A) la norma ASTM D198 (2015), (D) el criterio propuesto por Denzler *et al.* (2008); VE: Valor medio experimental del módulo de elasticidad local (ver Tabla 4.28); n: cantidad de cuerpos de prueba.

El análisis de los resultados obtenidos de la aplicación de los tres criterios al total de vigas investigadas no incluyó los valores correspondientes a la calidad KAR 150 > 2/3 porque, al estar conformada solamente por dos cuerpos de prueba, no se consideraron representativos. Los valores expuestos en la Tabla 4.30 revelan que el criterio propuesto por Denzler *et al.* (2008) es el que mejor interpreta el comportamiento del material ensayado. La relación entre el valor de $E_{m,l}$ calculado (VC) según este criterio y el valor obtenido experimentalmente (VE) oscila entre 0,99 y 1,03, alcanzando una diferencia entre 1-2% en más de la mitad de los casos analizados (5 de 8), mientras que la misma no supera un 3% en ninguna oportunidad. Por su parte, considerando el criterio A (ASTM D198 2015) se registró una relación entre VC y VL que va de 0,96 a 1,07 y la relación VC/VL supera al 3% en tan solo uno (12%) de los casos contemplados, mientras que dicha cantidad asciende a 3 (38%) cuando se analizan los resultados obtenidos a través del criterio E (EN 384 2016).

Las diferencias encontradas al obtener el valor de $E_{m,l}$ a través de la ecuación propuesta por Denzler *et al.* (2008) pueden ignorarse para propósitos prácticos vinculados al diseño estructural y, en consecuencia, este criterio provee un camino razonable para simplificar el trabajo experimental y minimizar los errores ocasionalmente causados por la medición de las pequeñas deformaciones que se registran en el tercio central de las vigas con el fin de determinar el módulo de elasticidad local.

4.6. Influencia del tamaño de la sección transversal sobre la resistencia a flexión

El fenómeno conocido como “efecto de tamaño” (Rouger y Barrett 1995) es el responsable de que una pieza de madera sometida a flexión presente una pérdida de resistencia a medida que aumenta su tamaño y, debido a su relevancia, es considerado por los distintos países a través de diferentes criterios. Las reglamentaciones argentinas (INTI CIRSOC 601 2016; IRAM 9664 2013) han adoptado el mismo criterio que la norma europea (EN 384 2016), éste fija una corrección por el tamaño de la pieza referida a una altura de referencia de 150 mm y establece que para obtener el valor de referencia de la resistencia a flexión se debe dividir el resultado obtenido en el ensayo por el factor de altura: $k_h=(150/h)^{0,2}$, siendo h la altura de la sección sometida a flexión. Como este factor es aplicable a toda pieza aserrada independientemente de la especie y la calidad, el propósito del presente apartado

es verificar la aptitud de su empleo en la madera aserrada de pino resinoso de ambas especies en estudio.

Persiguiendo el fin propuesto se consideraron todas las muestras sometidas a ensayos de flexión estática (M1, M2, M3, M4 y M5), las cuales abarcan un total de 458 cuerpos de prueba con una altura comprendida entre 25 mm y 200 mm (Ver Apartado 3.1.2). La menor dimensión se corresponde con tablas cargadas en la cara ancha (M5), mientras que las piezas que acusan una mayor altura son empleadas como vigas cargadas en la cara angosta. Los principales resultados obtenidos experimentalmente para la tensión de rotura en flexión (F_m) ya fueron expuestos en la Tabla 4.4 (Apartado 4.1.2), sobre los mismos fue descartada una influencia desigual del contenido de humedad, cuyo valor medio fue de 12,3% para el total de piezas en estudio, asociado a un bajo coeficiente de variación (CV=7%). Para facilitar la comprensión del análisis de datos, los principales resultados obtenidos tanto para la resistencia a flexión como para las dimensiones nominales de los cuerpos de prueba que integran cada muestra, son reiterados en la Tabla 4.31.

Tabla 4.31. Valor medio de la resistencia a flexión y dimensiones nominales para las muestras ensayadas a flexión

	M5	M1	M2	M3	M4
F_m [N/mm ²]	44,3	41,3	33,1	30,7	24,6
CV [%]	38	39	47	50	48
Alto [mm]	25	100	150	150	200
Ancho [mm]	105	45	45	70	70
n	233	64	61	50	50

Nota. F_m : resistencia a flexión; CV: coeficiente de variación; n: cantidad de cuerpos de prueba.

En la Tabla 4.31 puede observarse una tendencia decreciente de los valores medios de la resistencia a flexión al aumentar la altura (h) de los cuerpos de prueba. Similar tendencia fue observada en madera de pino silvestre y pino laricio de procedencia española, las que además mostraron un aumento de la resistencia con el espesor de la pieza registrándose un efecto más acusado en la segunda respecto de la primera, lo que también dejó en evidencia la influencia de la especie sobre el fenómeno del tamaño (Fernández-Golfín *et al.* 2002; Hermoso Prieto *et al.* 2002). Considerando que los cuerpos de prueba de las muestras M2 y M3 presentan similar altura nominal (150 mm) pero difieren en el ancho

(45 mm y 70 mm), de forma previa al análisis del efecto de la altura resulta oportuno confirmar para el pino en estudio si existe una relación entre ancho y tensión de rotura.

La evaluación del efecto del ancho sobre la resistencia se llevó a cabo sobre los resultados obtenidos de las muestras M2 y M3 considerando a la altura ($h = 150$ mm) como un factor fijo. El test de Student confirmó que no puede rechazarse la hipótesis de igualdad entre los valores medios de F_m en las muestras M2 (33,1 N/mm²) y M3 (30,7 N/mm²) a un nivel de significación del 5%. La elevada probabilidad obtenida ($p = 0,43$) es congruente con la pequeña diferencia registrada entre los valores medios (7%) y con la existencia de una desviación estándar similar en ambas muestras ($\sigma \approx 15$ N/mm²), las cuales están asociadas a elevados coeficientes de variación ($CV \approx 47$ -50%) que evidencian, a la vez, la gran variabilidad natural del material. La coincidencia de ambas distribuciones resulta clara al observarse el histograma de frecuencia y el gráfico de densidad suavizada representados en la Figura 4.34.

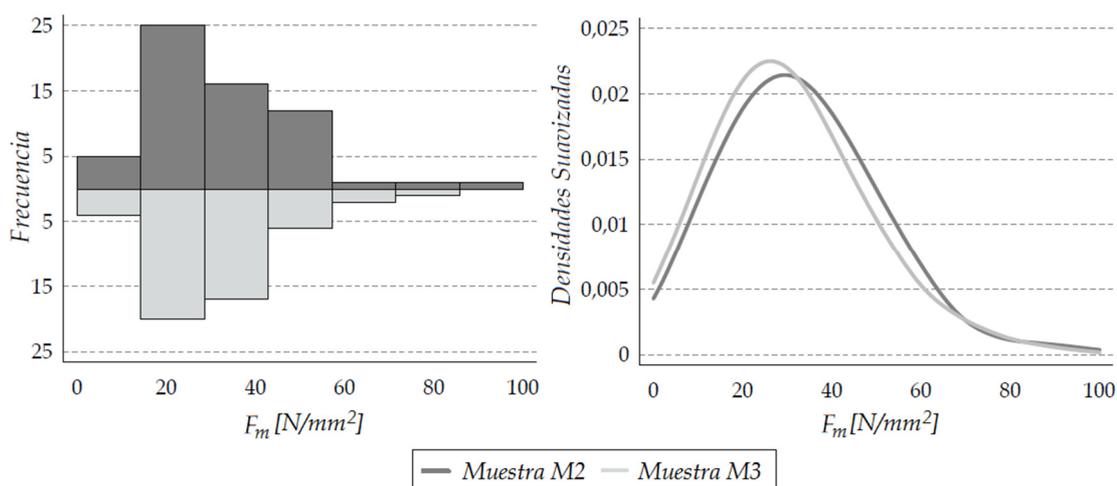


Figura 4.34. Distribución de la resistencia a flexión (F_m) asociada a la muestra M2 y M3. Izq.: Histograma de frecuencia. Der.: Gráfico de densidad suavizada.

Un análisis de regresión simple entre el ancho de la sección y F_m para los 111 cuerpos de prueba incluidos en las dos muestras mencionadas también confirmó que, con un nivel de confianza del 95%, no existe una relación estadísticamente significativa ($p = 0,4$). La correlación entre ambas variables resultó extremadamente débil ($R = -0,08$) y el ancho de la sección explicó tan sólo un 0,6% de la variabilidad de la resistencia.

Los resultados obtenidos para el pino resinoso en estudio confirman la inexistencia de una relación entre la resistencia y el ancho de la sección, lo cual está en línea con lo

reportado por Hermoso Prieto (2001) para la madera de calidad superior de *Pinus sylvestris* cultivado en España y por Guillaumet *et al.* (2016) para el *Populus deltoides* de procedencia argentina. En consecuencia puede ser ignorada la influencia del ancho de la sección sobre la resistencia en el material investigado, por lo que la altura (h) pasa a ser la única variable relacionada con el tamaño de la sección. En vista que M2 y M3 reúnen piezas de similar altura, ambas se integran formando una nueva muestra denominada M2+3 ($n = 111$).

En la Figura 4.35 son exhibidos los resultados de la relación encontrada entre la resistencia a flexión sin ajustar (F_m) y la altura (h) para los 458 cuerpos de prueba. Al igual que lo observado a través de los valores señalados en la Tabla 4.31, en ésta puede apreciarse como tendencia general que un aumento de la altura de la sección se corresponde con una disminución de la resistencia a flexión. Esto se condice con el criterio adoptado por el Reglamento Argentino de Estructuras de Madera (INTI CIRSOC 601 2016) y por la norma IRAM 9664 (2013) y, a su vez, es congruente con la experiencia europea (EN 1995-1-1 2006; EN 384 2016).

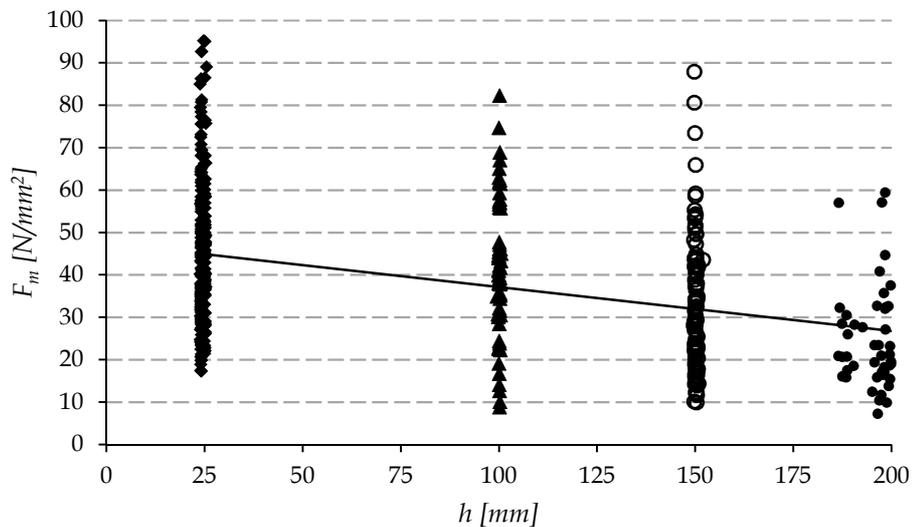


Figura 4.35. Relación entre la altura (h) y la resistencia a flexión (F_m) para los 458 cuerpos de prueba. ▲: M1; ○: M2+3; ●: M4; ◆: M5. $R^2 = 0,15$ (—) recta de regresión: $F_m = -0,1037 h + 47,459$.

Del coeficiente de determinación obtenido ($R^2 = 0,15$) a partir de los datos presentados en la gráfica (Figura 4.35) se deduce un valor de correlación $R = -0,39$. Correlaciones negativas también fueron obtenidas para otras especies cultivadas en Argentina, un valor ligeramente superior fue informado por Piter (2012) para la madera aserrada de *Eucalyptus*

grandis ($R = -0,44$) mientras que un valor aún mayor fue reportado por Guillaumet *et al.* (2016) para el *Populus deltooides* ($R = -0,53$).

Resultados de investigaciones previas, por otra parte, han mostrado que existe una relación entre la calidad de la madera y el efecto de la altura sobre la resistencia a flexión (Rouger 1995). Se supone que una pieza de menor calidad presenta más defectos y, por lo tanto, una mayor probabilidad de que al aumentar el volumen total aparezca un defecto crítico que afecte a la resistencia de forma decisiva. Una vinculación de la relación altura-resistencia con la calidad fue constatada para el pino silvestre y pino laricio de procedencia española (Fernández-Golfín *et al.* 2002; Hermoso Prieto 2001; Hermoso Prieto *et al.* 2002, 2013) mientras que la misma no se puso de manifiesto en la madera de *Eucalyptus grandis* y de *Populus deltooides* cultivados en Argentina (Guillaumet *et al.* 2016; Piter 2012).

Por lo antes expuesto, los resultados obtenidos son analizados separando las piezas en función de los principales parámetros visuales con influencia sobre las propiedades mecánicas, que según lo determinado en el Apartado 4.1.3 se corresponden con la nudosidad, la presencia de médula y el espesor de los anillos de crecimiento. Entonces, los perfiles de calidad se establecieron teniendo en cuenta tales singularidades, es así que el (A) considera el total de la muestra, el (B) contempla el efecto de la médula por lo que las piezas fueron divididas en dos grupos (con y sin médula) y por último, como la madera debe clasificarse por resistencia para su uso estructural, el perfil (C) tiene en cuenta los criterios de las normas de clasificación por resistencia vigentes en Argentina tanto para tablas (IRAM 9662-3 2015) como para vigas (IRAM 9670 2002), por lo que las piezas se distribuyeron en tres grupos (Clase 1, Clase 2 y Descarte).

En la Tabla 4.32 se resumen los principales resultados obtenidos para la resistencia a flexión y la densidad de las todas las muestras estudiadas asociadas a los 3 perfiles analizados (A, B y C). Debido al relativamente bajo número de cuerpos de prueba asignados a algunos grupos, el análisis de los resultados fue llevado a cabo basado en los valores medios en lugar de los percentiles 5% inferiores (Guillaumet *et al.* 2016; Piter 2012). En la Tabla 4.32 se presentan los valores de resistencia a flexión media obtenida de los ensayos (F_m) y aquellos ajustados a la altura de referencia de 150 mm (f_m) conforme al criterio adoptado por la norma IRAM 9664 (2013). También aparece la densidad media corregida al contenido de humedad de referencia (12%) según IRAM 9664 (2013) y la cantidad de cuerpos asociados a las distintas calidades.

Tabla 4.32. Valor medio de la resistencia a flexión y de la densidad de cada una de las muestras para distintas calidades de madera

Perfil de calidad	Parámetro	Muestra [Altura nominal]				
		M5 [25 mm]	M1 [100 mm]	M2+3 [150 mm]	M4 [200 mm]	
A	Total	F_m [N/mm ²]	44,3	41,3	32,0	24,6
		f_m [N/mm ²]	30,8	38,1	32,0 (*)	25,9
		CV [%]	38	39	48	48
		ρ [kg/m ³]	473	538	506	497
		CV [%]	15	14	14	13
		n	233	64	111	50
B	Sin médula	F_m [N/mm ²]	46,9	44,5	33,5	26,7
		f_m [N/mm ²]	32,6	41,0	33,5 (*)	28,1
		CV [%]	36	35	51	55
		ρ [kg/m ³]	478	548	515	518
		CV [%]	15	15	15	11
	n	187	42	57	22	
	Con médula	F_m [N/mm ²]	33,7	35,1	30,5	22,9
		f_m [N/mm ²]	23,4	32,4	30,5 (*)	24,2
		CV [%]	32	43	45	37
		ρ [kg/m ³]	454	518	498	481
CV [%]		13	11	14	13	
n	46	22	54	28		
C (1)	Clase 1	F_m [N/mm ²]	63,6	58,5	47,2	41,1
		f_m [N/mm ²]	44,3	54,0	47,3 (*)	43,5
		CV [%]	26	20	34	28
		ρ [kg/m ³]	543	597	562	543
		CV [%]	14	14	14	9
	n	41	9	28	5	
	Clase 2	F_m [N/mm ²]	44,7	43,7	30,1	26,9
		f_m [N/mm ²]	31,1	40,3	30,1 (*)	28,3
		CV [%]	31	29	37	48
		ρ [kg/m ³]	466	531	486	502
CV [%]		12	13	13	12	
n	114	34	30	17		
Descarte	F_m [N/mm ²]	33,4	30,0	25,1	20,2	
	f_m [N/mm ²]	23,2	27,7	25,1 (*)	21,3	
	CV [%]	29	46	45	36	
	ρ [kg/m ³]	446	525	489	486	
	CV [%]	13	14	12	14	
n	78	21	53	28		

Nota. (1) M1, M2+3 y M4 fueron clasificadas según la norma IRAM 9670 (2002), y M5 fue clasificada de acuerdo a la norma IRAM 9662-3 (2015). F_m : resistencia a flexión; f_m : resistencia a flexión ajustada a la altura de referencia de 150 mm de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); ρ : densidad corregida al contenido de humedad de referencia (12%) de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013); CV: coeficiente de variación; n: cantidad de cuerpos de prueba. (*) f_{m-ref} : resistencia a flexión de referencia.

Como la muestra M2+3 está compuesta por vigas de altura nominal 150 mm, coincidente con la altura de referencia adoptada por la normativa argentina (INTI CIRSOC 601 2016; IRAM 9664 2013), el valor medio f_m de dicha muestra será considerado valor de referencia (f_{m-ref}) para comparar los resultados ajustados de todas las muestras. La resistencia a flexión F_m , como puede observarse en los datos expuestos en la Tabla 4.32, disminuye dentro de cada muestra desde la Clase 1 hasta el Descarte, y también desde el grupo que no admite médula al que si la admite, confirmándose una vez más el efecto negativo de los parámetros visuales considerados.

En la mencionada tabla también se puede apreciar que F_m decrece con el aumento de la altura de la sección (h) dentro de cada clase, lo que corrobora el efecto negativo de la altura en la resistencia. Dentro del perfil B, el grupo integrado por piezas que admiten médula (menor calidad) son las que acusan una mayor diferencia en la resistencia al variar la altura. No obstante, dentro del perfil C todos los grupos (Clase 1, Clase 2, Descarte) presentaron prácticamente un similar efecto de h sobre F_m . A diferencia de lo encontrado para el pino de procedencia española (Fernández-Golfín *et al.* 2002; Hermoso Prieto *et al.* 2002, 2013), estos resultados no ponen en evidencia una relación clara entre la calidad de la madera y el efecto de la altura sobre la resistencia a flexión, lo cual está en línea con lo reportado para el *Eucalyptus grandis* y el *Populus deltoides* cultivados en Argentina (Guillaumet *et al.* 2016; Piter 2012).

Una manera de visualizar la concordancia entre el empleo del factor de altura k_h y el comportamiento empírico puede lograrse a través de comparar los valores cercanos a la unidad que se adquieren de las relaciones entre la resistencia a flexión ajustada (f_m) y la de referencia (f_{m-ref}). En la Figura 4.36 se expone una gráfica con la relación f_m/f_{m-ref} asociada a cada altura para las distintas calidades. En el perfil A tal relación oscila entre 0,81 y 1,19, en el perfil B lo hace en un rango de 0,84 a 1,22 para el grupo que no admite médula y de 0,77 a 1,06 para el otro grupo, mientras que en el perfil C la relación f_m/f_{m-ref} toma cifras entre 0,92-1,14, 0,94-1,34 y 0,85-1,10 para la clase 1, clase 2 y el descarte respectivamente. Estos valores manifiestan una menor correspondencia entre el modelo de ajuste y el comportamiento experimental que el reportado por Guillaumet *et al.* (2016) para la madera de álamo, lo cual puede estar relacionado con la reducida presencia de defectos que distingue a dicha especie del pino resinoso.

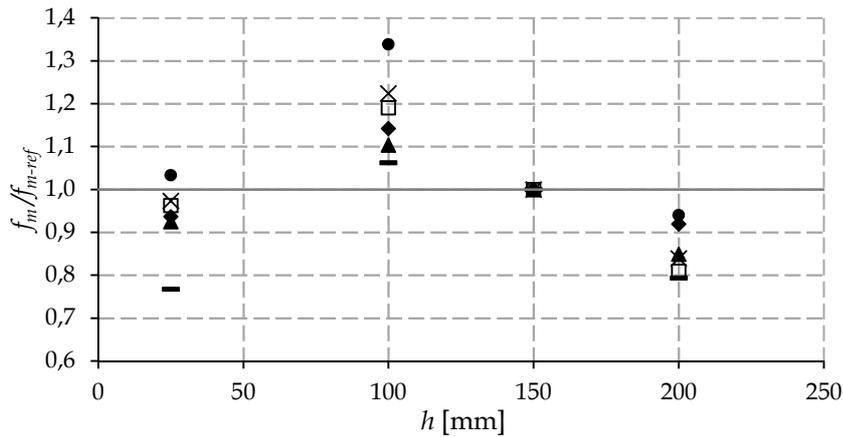


Figura 4.36. Relación entre la resistencia a flexión ajustada (f_m) y la resistencia a flexión de referencia (f_{m-ref}) para las distintas calidades. ■: Total; ×: Sin médula; -·-: Con médula; ◆: Clase 1; ●: Clase 2; ▲: Descarte.

Con el propósito de evaluar claramente las diferencias antes analizadas (Figura 4.36), y de verificar si las mismas exceden el límite adoptado por la norma IRAM 9664 (2013) para evitar una excesiva variabilidad entre las distintas muestras cuando se obtiene el valor característico de la población, se presentan en la Tabla 4.33 los valores de la resistencia a flexión ajustada a la altura de referencia de 150 mm (f_m) calculados para cada muestra junto a la diferencia existente entre éste y el valor f_m promedio de todas las muestras que conforman cada calidad, el cual también puede apreciarse en la misma tabla.

Tabla 4.33. Valor medio de la resistencia a flexión ajustada a la altura de referencia de 150 mm (f_m) para distintas calidades de madera

Perfil de calidad	f_m [N/mm ²]					
	Muestra promedio ⁽¹⁾	Muestra 5 [25 mm]*	Muestra 1 [100 mm]*	Muestra 2+3 [150 mm]*	Muestra 4 [200 mm]*	
A Total	31,6	30,8 (2%)	38,1 (21%)	32,0 (1%)	25,9 (18%)	
B	Sin médula	33,6	32,6 (3%)	41,0 (22%)	33,5 (0%)	28,1 (16%)
	Con médula	27,4	23,4 (15%)	32,4 (18%)	30,5 (11%)	24,2 (12%)
C	Clase 1	46,3	44,3 (4%)	54,0 (17%)	47,3 (2%)	43,5 (6%)
	Clase 2	32,3	31,1 (4%)	40,3 (25%)	30,1 (7%)	28,3 (12%)
	Descarte	24,0	23,2 (3%)	27,7 (15%)	25,1 (5%)	21,3 (11%)

Nota. * Altura nominal de la pieza. Entre paréntesis y junto al valor f_m medio calculado para cada muestra se indica la diferencia existente entre éste y el valor f_m de la muestra promedio. (1) Valor f_m promedio de los valores de las 4 muestras que integran cada grupo.

Los resultados expuestos en la Tabla 4.33 muestran que en 3 calidades (A-Total, B-Sin médula y C-Clase 2) correspondientes a una sola una muestra (M1) se excedió el límite de 20% establecido por la norma IRAM 9664 (2013) para evitar una excesiva variabilidad de la resistencia entre muestras obtenidas de una misma población. Como en general los valores ajustados se encuentran dentro del límite (IRAM 9664 2013), puede considerarse que los resultados encontrados no invalidan -para propósitos prácticos vinculados al diseño estructural- el criterio adoptado por el reglamento argentino (INTI CIRSOC 601 2016) para considerar la influencia de la altura de la pieza sobre la resistencia a flexión.

4.7. Evaluación de las deformaciones diferidas en piezas sometidas a cargas de larga duración

Al abordar el diseño de una viga de madera se deben satisfacer dos requerimientos esenciales, uno referido a las condiciones de seguridad y otro a las de servicio. El primero se encuentra relacionado con la capacidad portante del elemento estructural y, el segundo, con el adecuado funcionamiento de éste durante la vida útil de la estructura, vinculándose directamente con la deformación que dicho elemento exhibe al ser sometido a cargas con diferente tiempo de duración (Coronel 1996; Thelandersson 1995a).

Un elemento estructural de madera al cabo de un cierto período de tiempo experimenta una deformación final compuesta de dos partes, una elástica instantánea y otra diferida conocida como creep, la cual varía en función del tiempo y es originada por fenómenos mecano-sortivos y viscoelásticos (Nordström y Sandberg 1994). En particular las deformaciones diferidas suelen determinar las dimensiones finales en vigas sometidas a flexión, y la falta de consideración de este aspecto, o una interpretación equivocada de los factores que inciden sobre él, es causa frecuente de comportamientos insatisfactorios.

En el presente apartado se presentan y discuten los resultados de las deformaciones diferidas obtenidas experimentalmente a través del ensayo de 14 vigas (7 de *P. taeda* y 7 de *P. elliotii*) en estado seco pertenecientes a la muestra M7. Las mismas fueron solicitadas a flexión bajo cargas de larga duración en condiciones de uso interior. Se analiza la influencia que ejerce la presencia de médula, singularidad que al estar asociada a la madera juvenil afecta especialmente a la rigidez de las piezas (Ballarin y Lara P. 2003; Haselein *et al.* 2000; Hermoso Prieto *et al.* 2013; Pérez del Castillo 2001; Piter 2003). También se compara el

comportamiento reológico entre ambas especies y, finalmente, se contrastan los resultados experimentales con los calculados a través del criterio adoptado por las reglas de diseño de Argentina (INTI CIRSOC 601 2016) para la consideración del creep.

4.7.1. Las deformaciones instantáneas

La Tabla 4.34 exhibe los principales resultados obtenidos para las deformaciones registradas en el centro de los elementos flexionados inmediatamente después de colocadas las cargas (Δ_{inst}). Teniendo en cuenta que se implementó un esquema estático común para toda la muestra y que, tanto la carga como las dimensiones de la sección transversal de las vigas fueron adoptadas con los mismos valores nominales (ver Apartado 3.2.5), estos resultados proveen información acerca de la rigidez de la muestra total y también de aquellas sub-muestras discriminadas ya sea por especie o por calidad de madera.

El valor medio de Δ_{inst} en el centro de las vigas para la muestra completa (6,99 mm) representa 1/358 de la luz de cálculo (2500 mm), valor congruente con las recomendados por las reglas de diseño vigentes en el país (INTI CIRSOC 2016). Este resultado junto al nivel tensional máximo aplicado, que representa aproximadamente el 35% del 5-percentil de la resistencia a flexión del material (ver Apartado 3.2.4), confirman que el ensayo llevado a cabo es representativo del comportamiento de una estructura real.

Al analizar los coeficientes de variación (CV) asociados a las diferentes calidades presentadas en la Tabla 4.34, se obtiene que la sub-muestra que reúne las vigas de mejor calidad -sin médula- presenta una dispersión de los resultados (CV = 14%) significativamente menor a las restantes, para las cuales el CV se encuentra entre 30 y 46%.

Tabla 4.34. Principales resultados de la deformación inicial (Δ_{inst}) en el centro de las vigas

	Todas (n = 14)	<i>Pinus taeda</i> (n = 7)	<i>Pinus elliottii</i> (n = 7)	Sin médula (n = 9) ⁽¹⁾	Con médula (n = 5) ⁽²⁾
Mínimo [mm]	4,64	5,26	4,64	4,64	6,15
Medio [mm]	6,99	7,30	6,68	5,75	9,23
Máximo [mm]	14,74	14,74	10,37	7,12	14,74
CV [%]	38	46	30	14	37

Nota. (1): 5 piezas de *P. elliottii* y 4 de *P. taeda*; (2): 2 piezas de *P. elliottii* y 3 de *P. taeda*; CV: coeficiente de variación; n: cantidad de cuerpos de prueba.

La tabla anterior muestra un valor Δ_{inst} medio 9% mayor en las vigas de *Pinus taeda* respecto a las de *Pinus elliottii*, lo cual se traduce en un módulo de elasticidad medio un 9% menor de las primeras respecto de las segundas. El análisis comparativo de ambas especies expuesto en el Apartado 4.3 dejó en evidencia una diferencia del 11% a favor del *P. taeda* para la rigidez de piezas provenientes de árboles de similar edad de corte. Como en el presente análisis (M7) los cuerpos de prueba de *P. elliotti* (29 años) doblan en edad a los de *P. taeda* (15 años), el menor módulo de elasticidad asociado a esta última especie puede ser atribuido principalmente a la presencia de una gran proporción de madera juvenil -donde es frecuente la ocurrencia de mayores ángulos microfibriles en la pared celular S2- lo que incide de forma negativa en el módulo de elasticidad (Cave y Walker 1994; Hoffmeyer 1995; Donaldson 2008; Yin *et al.* 2011). El efecto de la edad de corte sobre las propiedades mecánicas también fue reportado por Moya *et al.* (2015) al estudiar piezas de madera aserrada estructural de pino resinoso uruguayo procedente de plantaciones de 15 y 25 años.

Otra razón que puede explicar la mayor rigidez alcanzada por la sub-muestra *Pinus elliottii* es la mejor calidad de las piezas que integran dicho grupo considerando que el 71% de las mismas no presenta médula, mientras que en la sub-muestra *P. taeda* tan sólo el 40% de los cuerpos de prueba reúnen tal condición. El efecto negativo de la presencia de médula sobre la rigidez del material en estudio, en línea con el criterio de clasificación por resistencia adoptado en nuestro país por la norma IRAM 9662-3 (2015), queda en evidencia a través de los resultados expuestos en la Tabla 4.34 puesto que los mismos exhiben un valor Δ_{inst} medio 61% mayor en las vigas con presencia de médula que en las libres de ella. Este efecto resultó aún mayor al registrado en el Apartado 4.1.3 donde, al contemplar el módulo de elasticidad medio, se constató una diferencia de 17% (vigas) y 58% (tablas) entre cuerpos de prueba sin y con médula. No obstante, la mayor disparidad registrada entre módulos de elasticidad para el caso en estudio en este apartado (ver Tabla 4.34) puede ser explicada a través del hecho que la sub-muestra sin médula está conformada por 9 piezas de las cuales el mayor número (56%) procede de árboles de 29 años (*P. elliottii*), mientras que la otra sub-muestra incluye solo piezas con médula donde, además de tratarse de un grupo más reducido (n = 5), prevalecen (60%) las piezas de 15 años (*P. taeda*).

Por las razones expuestas el análisis de los resultados de este apartado continuará desarrollándose en forma separada para las dos especies. Esta decisión persigue alcanzar mayor precisión en la discusión y no pretende contradecir las conclusiones obtenidas en el

Apartado 4.3 y el criterio de la normativa de Argentina que considera al *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* como un grupo para uso estructural (INTI CIRSOC 2016; IRAM 9662-3 2015; IRAM 9670 2002).

4.7.2. Las deformaciones diferidas

La evolución del valor medio de las deformaciones en el centro de las vigas puede apreciarse en la Figura 4.37, donde se advierte una tendencia general que es común a la muestra total y a las 4 sub-muestras. Luego de producida la deformación instantánea (Δ_{inst}), las curvas exhiben una pendiente ascendente que se manifiesta en forma muy pronunciada durante los 10 primeros días. Posteriormente el incremento es relativamente moderado y estable en un período que se extiende aproximadamente hasta los 200 días. Entre los 200 y los 220 días se observa otro aumento muy pronunciado, que luego da lugar a una suave pendiente ascendente hasta los 300 días y continúa prácticamente sin exhibir incrementos hasta el final.

La evolución de las deformaciones permite observar claramente la influencia de los dos componentes que caracterizan a la parte diferida de la deformación (creep): i) el componente viscoelástico, que se manifiesta a través de un incremento progresivo pero cada vez menos acentuado de la deformación y, ii) el componente mecano-sortivo, que expresa una variación adicional de la deformación debido a los cambios cíclicos del contenido de humedad de la madera bajo carga (Honfi 2014; Ranta-Maunus 1995).

Si bien la Figura 4.37 permite apreciar que la tendencia general de las curvas fue común para la muestra total y para las 4 sub-muestras, también permite visualizar que durante todo el ensayo las deformaciones fueron sensiblemente mayores en las vigas de menor calidad (con médula) que en las de mayor calidad (libres de médula), y que esa diferencia fue significativamente menor en la comparación entre las dos especies.

Luego de 1 año de aplicada la carga, el valor medio de la deformación alcanzó 17,69mm para las vigas con médula y 10,17 mm para las libres de esa característica. Los correspondientes valores para el *Pinus taeda* y el *Pinus elliottii* fueron 13,67 mm y 12,03 mm respectivamente. Estos resultados muestran que las diferencias porcentuales encontradas en las deformaciones instantáneas de las distintas sub-muestras (Tabla 4.34) se mantuvieron relativamente estables a través del tiempo. Esto es congruente con el criterio generalmente

adoptado por las reglas de diseño, las que determinan el valor de la deformación diferida como el producto de la deformación instantánea por un factor que es independiente de la especie y de la calidad de la madera (INTI CIRSOC 601 2016; EN 1995-1-1 2006; NCh 1198 2014; NDS 2012).

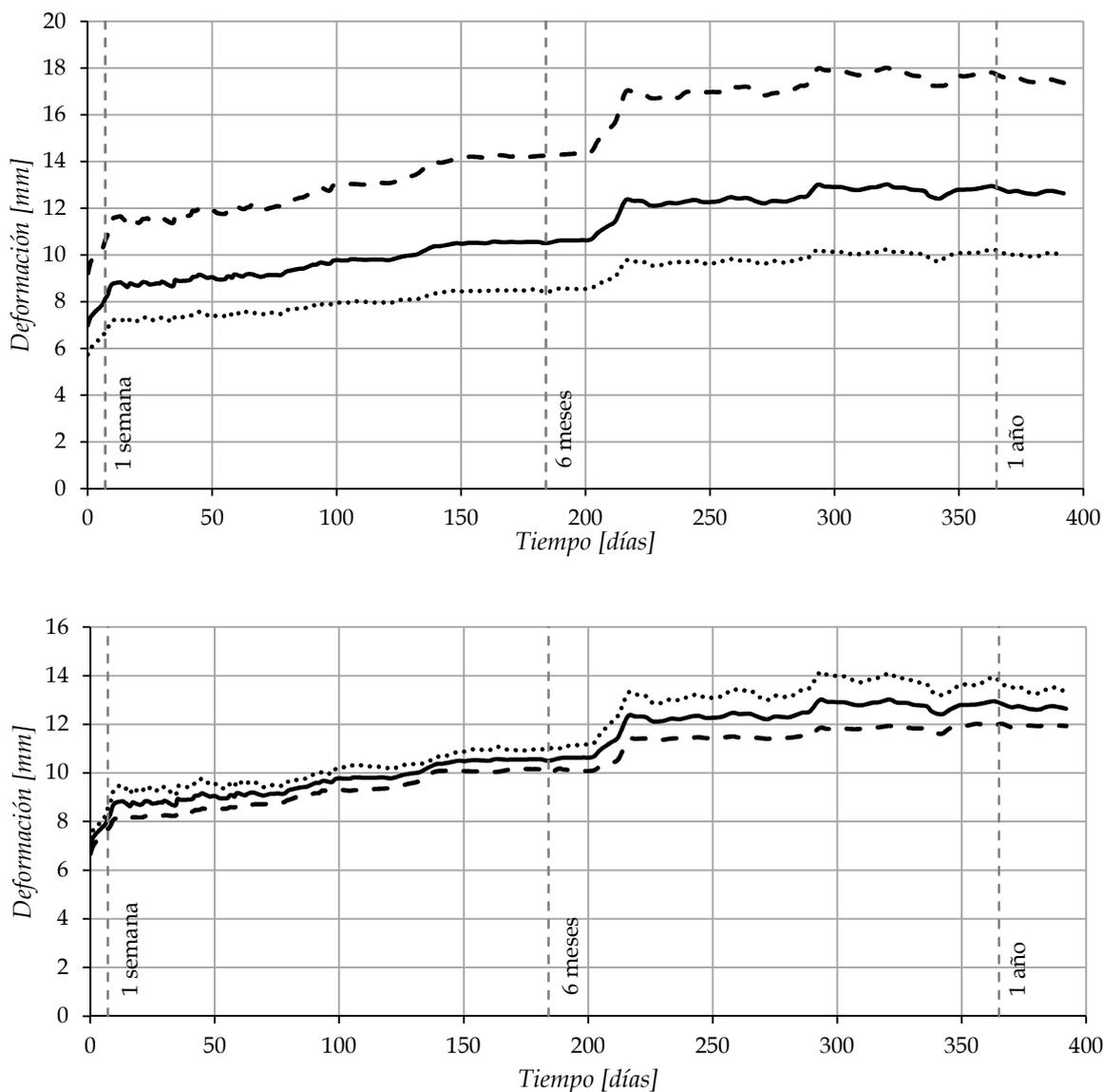


Figura 4.37. Evolución del valor medio de las deformaciones durante el ensayo para la muestra clasificada por médula. Arriba: sin médula (.....); con médula (- - -); total (—). Abajo: *Pinus taeda* (.....); *Pinus elliottii* (- - -); total (—)

La Figura 4.38 exhibe la evolución de los valores medios de las deformaciones relativas (Δ/Δ_{inst}) y confirma, para las especies de rápido crecimiento investigadas, que el valor de las deformaciones diferidas puede expresarse en función de las deformaciones iniciales (Δ_{inst}) con independencia de la especie y de la calidad de la madera. Al cabo de 6

meses y 1 año la relación Δ/Δ_{inst} correspondiente a la muestra completa alcanzó 1,49 y 1,79, respectivamente. Por su parte, luego de 1 año de ensayo las deformaciones relativas pertenecientes a las 4 sub-muestras alcanzaron valores medios de 1,80, 1,78, 1,85 y 1,75 para el *Pinus taeda*, el *Pinus elliottii*, las vigas con y sin presencia de médula, respectivamente. Tanto las diferencias exhibidas entre sub-muestras como en comparación con la muestra total (1,79) pueden despreciarse para propósitos prácticos vinculados al diseño estructural. Por otro lado, los valores medios indicados fueron acompañados por coeficientes de variación que oscilaron entre 12% y 13%, lo cual indica una reducida dispersión de los resultados obtenidos para las deformaciones relativas en comparación con la gran variabilidad encontrada para aquellos correspondientes a la deformación instantánea (ver Tabla 4.34).

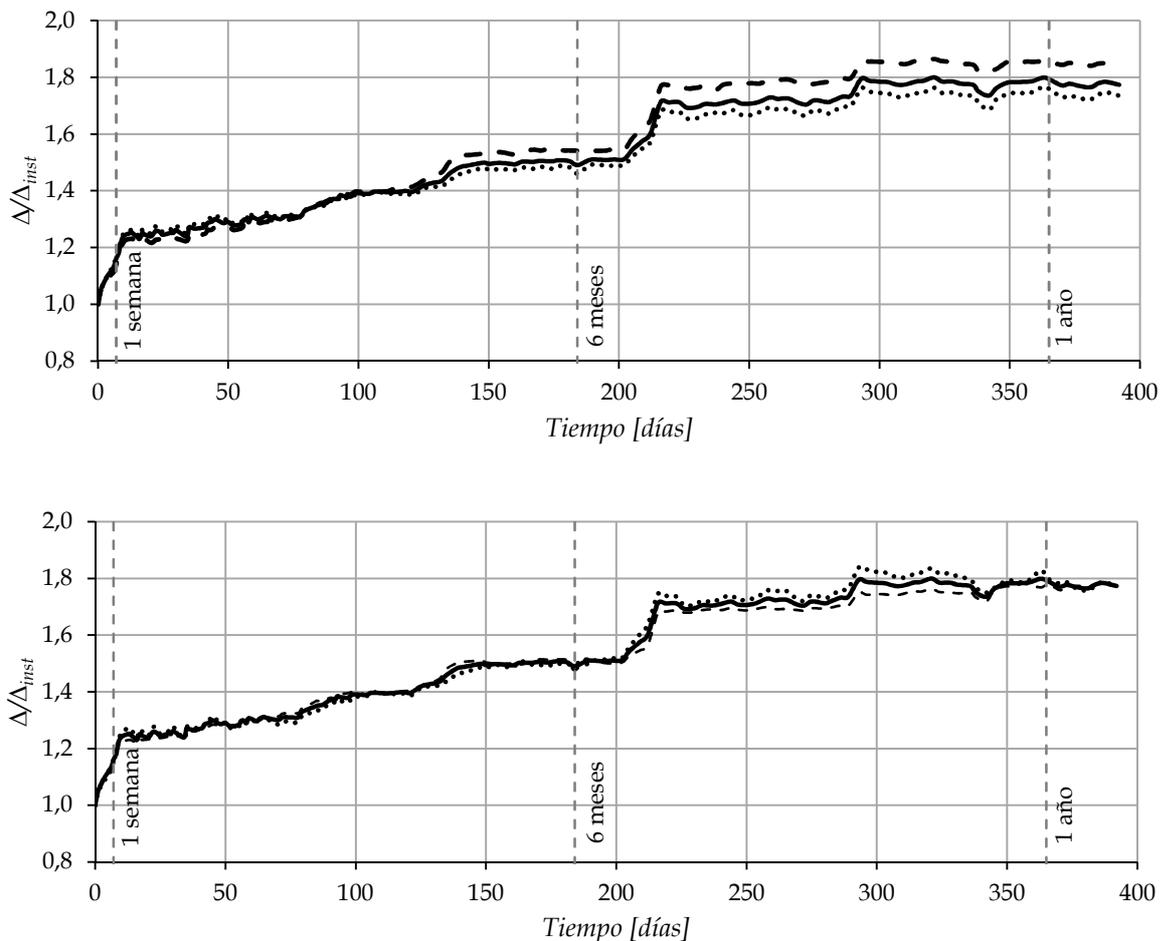


Figura 4.38. Valor medio de la deformación relativa (Δ/Δ_{inst}) en función del tiempo. Arriba: sin médula (.....); con médula (- - -); total (—). Abajo: *P. taeda* (.....); *P. elliottii* (- - -); total (—)

4.7.3. El criterio del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera

Las expresiones provistas por las reglas de diseño para estimar la deformación luego de un determinado período de tiempo consideran, si bien con particularidades, como variables más importantes a la duración de la carga y a las variaciones en el contenido de humedad de la madera, es decir, contemplan su estado de servicio incluyendo el contenido de humedad inicial de la pieza.

El Reglamento Argentino de Estructuras de Madera INTI CIRSOC 601 (2016), en línea con el NDS (2012) de EEUU, considera que la deformación final (Δ) producida por una carga permanente o de larga duración (10 años) en un miembro estructural aserrado ubicado en un local adecuadamente ventilado, donde su contenido de humedad no supere en ningún caso el 19%, puede estimarse multiplicando la deformación instantánea (Δ_{inst}) por el factor $K_{cr} = 1,5$. Si la condición de servicio corresponde a un ambiente no ventilado (húmedo), donde el contenido de humedad del miembro puede exceder el valor citado anteriormente, debe considerarse $K_{cr} = 2,0$.

Con el propósito de explicar la razón por la cual en esta investigación el valor medio de la deformación encontrada al cabo de 1 año para la muestra completa ($\Delta = 1,79 \Delta_{inst}$; Figura 4.38) superó al previsto por las reglas para cargas de larga duración actuando en un ambiente adecuadamente ventilado ($\Delta = 1,5 \Delta_{inst}$), se efectuó un estudio detallado de los registros de temperatura y humedad en el local donde se llevó a cabo el ensayo durante el período en que transcurrió el mismo.

Los resultados obtenidos son representados en el gráfico expuesto en la Figura 4.39, donde se puede observar que la temperatura varió entre 11,7 °C y 30,2 °C mientras que la humedad relativa lo hizo entre 41% y 95%. A la vez, el mismo reveló que durante los meses de diciembre, enero y febrero las temperaturas se mantuvieron elevadas en coincidencia con una reducida humedad ambiente y que, en cambio, en el período abril/julio se produjo la situación inversa. Particularmente en el mes de abril se produjo el descenso de la temperatura junto a un incremento importante de la humedad (ver Figura 4.39) lo cual se ve reflejado en el salto que presentan en el día 200 las curvas deformación - tiempo (Figura 4.37 y Figura 4.38). Conociendo los datos de la temperatura y de la humedad relativa del ambiente donde se llevaron a cabo las pruebas experimentales, a través del ábaco de Kollmann (ver Apartado 2.2.2) fue obtenida la humedad de equilibrio en la madera, cuyo

análisis detallado reveló que la misma osciló entre el 8% y el 22%, este último porcentaje indicó una condición ambiental del local correspondiente a un clima húmedo según las reglas nacionales.

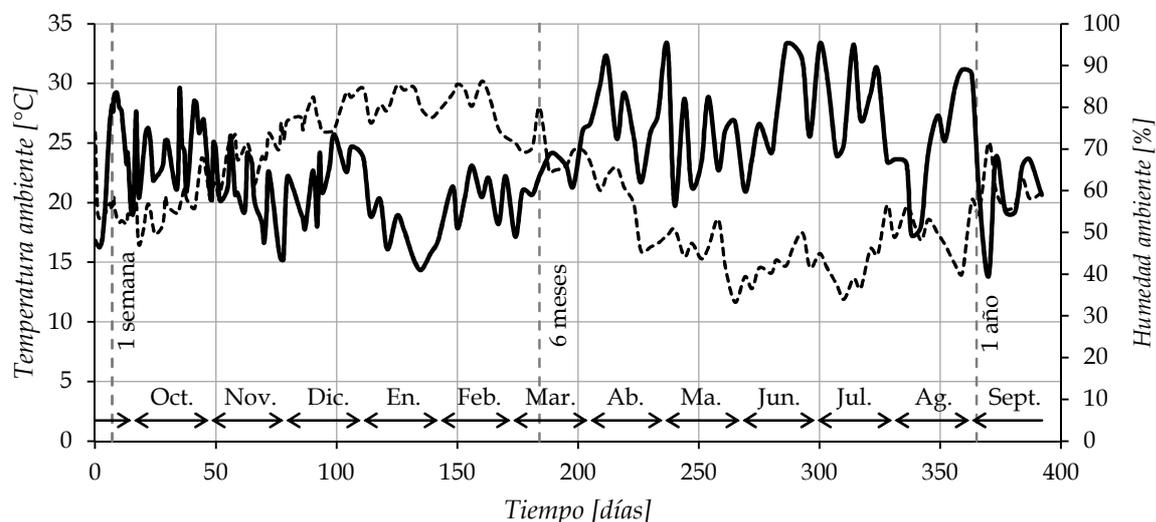


Figura 4.39. Valor medio de la temperatura ambiente (- - -) y la humedad relativa (—) del local de ensayo en función del tiempo

Respecto a la evolución de las deformaciones después del primer año, reportes previos (Gowda *et al.* 1996) probaron que el componente de creep obtenido luego de 6 meses recién es duplicado al cabo de 10 años. Tomando como base el valor medio experimental obtenido en este trabajo a los 6 meses ($\Delta/\Delta_{inst} = 1,49$; Figura 4.38) se deduce que el componente de creep correspondiente a ese lapso de tiempo fue igual a $0,49 \Delta_{inst}$. Duplicando este valor se llega a: K_{cr} experimental = $1 + 2 \times 0,49 = 1,98$, factor prácticamente coincidente con el adoptado por las reglas de diseño del país para una viga sometida a cargas de larga duración (10 años) ubicadas en un ambiente húmedo ($K_{cr} = 2,0$).

La comparación de los resultados experimentales con los obtenidos aplicando el criterio del INTI CIRSOC 601 (2016) confirmó que este último interpreta adecuadamente el comportamiento mecánico de la muestra investigada aún considerando las siguientes particularidades: i) las vigas fueron obtenidas de dos especies de rápido crecimiento, ii) en la madera juvenil presente en estas especies la capa S2 de la pared secundaria exhibe una mayor inclinación de las microfibrillas que en la madera normal (Cave y Walker 1994; Donaldson 2008; Yin *et al.* 2011) y, iii) la deformación relativa se incrementa cuando crece el ángulo entre el esfuerzo y la dirección de las fibras (Ranta-Maunus 1995).

El análisis también puso en evidencia la necesidad de que el proyectista estructural considere con un adecuado nivel de detalle tanto la duración de las cargas actuantes como la condición de servicio en el lugar donde se ubicará la estructura. No obstante, existen variables no consideradas explícitamente pero que pueden ejercer una importante influencia sobre la deformación final. Dentro de éstas se destacan: i) el nivel de las tensiones que actúan sobre el miembro estructural y, ii) el tamaño de la sección transversal de este último. En la muestra investigada las tensiones se ubicaron en un 35% de la resistencia estimada (ver Apartado 3.2.4), nivel que es habitual para una estructura en servicio y que garantiza un desarrollo estable del creep como lo contemplan las reglas de diseño. En cambio, un nivel de tensiones cercano al de la resistencia característica del material hubiese producido una acentuada aceleración del creep conducente a una falla prematura (Andriamitantsoa 1995). Las dimensiones nominales adoptadas para las vigas de la muestra ensayada (45 mm x 100 mm) pueden considerarse de tamaño intermedio y habituales en estructuras de viviendas. No obstante, hay que considerar que el tamaño del miembro estructural influye sobre las variaciones en su contenido de humedad (en locales sin climatización) y consecuentemente sobre el valor de su deformación final. Este parámetro debe ser evaluado criteriosamente por el proyectista para evitar la aparición de deformaciones finales excesivas en piezas de dimensiones reducidas o el desarrollo de un diseño demasiado conservador en piezas de grandes dimensiones (Calvo *et al.* 2002; Ranta-Maunus 1995).

En síntesis, la proyección a 10 años del componente del creep determinado experimentalmente a los 6 meses -utilizando resultados de investigaciones previas- y su comparación con los resultados obtenidos aplicando las reglas de diseño del país, confirmó que éstas interpretan adecuadamente el comportamiento del material investigado cuando es sometido a cargas de larga duración. Estos resultados adquieren una significativa importancia teniendo en cuenta el creciente uso de madera estructural proveniente de especies de rápido crecimiento que contienen una proporción significativa de madera juvenil.

CAPITULO V

CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones de los resultados expuestos en el Capítulo IV y que dan respuesta a los objetivos de este trabajo de Tesis Doctoral.

5.1. Conclusiones relacionadas con la clasificación visual por resistencia

5.1.1. Respecto a la influencia de los parámetros visuales sobre las propiedades físico-mecánicas

Los defectos más relevantes registrados en la madera investigada fueron la nudosidad, la presencia de médula y el tamaño de los anillos de crecimiento. Del estudio de la influencia de los mismos sobre las propiedades mecánicas de piezas aserradas sometidas a flexión se extrajeron las siguientes conclusiones particulares:

- La medición de la nudosidad a través del criterio K (coincidente con el adoptado por la norma IRAM 9662-3 2015) presentó el mejor ajuste para la estimación de la resistencia en tablas, alcanzando un coeficiente de determinación (R^2) igual a 0,46. Para las vigas, en cambio, bajo este criterio se obtuvo un valor R^2 de 0,24. Para este caso fueron más precisos aquellos criterios basados en la proyección de los nudos sobre la sección transversal, alcanzando el mejor ajuste a través del KAR 150 ($R^2 = 0,40$).
- Un estudio específico permitió comprobar que los criterios que expresan la nudosidad en las zonas de margen de las vigas (KARM y KARM 150), si bien

están altamente correlacionados con el módulo resistente de la sección remanente, no son más eficientes para predecir la resistencia que los que expresan la nudosidad en toda la sección (KAR y KAR 150).

- La predicción de la resistencia en vigas aserradas a través del criterio KAR 150 exhibió la mejor correlación ($R = -0,64$) pero, a su vez, dejó en evidencia una gran complejidad para su determinación. En cambio, el empleo del criterio K, a pesar de presentar una menor correlación ($R = -0,49$), puso de manifiesto una ventaja competitiva respecto al anterior en cuanto a la practicidad de su aplicación, lo cual debe contemplarse dada la falta de experiencia a nivel nacional en la materia.
- La presencia de médula genera un efecto negativo sobre las propiedades mecánicas, siendo significativa su influencia en aquellas piezas de menor sección transversal, por lo que en las tablas resulta de fundamental importancia su consideración.
- La médula, al estar vinculada a la madera juvenil, muestra una mayor influencia sobre la rigidez de la madera mientras que la nudosidad se presenta como la singularidad con mayor incidencia sobre la resistencia.
- La predicción de las propiedades mecánicas a través de los anillos de crecimiento no resulta eficaz en vigas, la correlación del ancho del anillo con la resistencia arrojó un valor R^2 de 0,11 mientras que reemplazando dicho parámetro visual por la densidad se obtuvo un R^2 de 0,33. Por el contrario, para las tablas quedó en evidencia la importancia de incorporar al ancho de los anillos de crecimiento como parámetro visual en las propuestas de clasificación, puesto que al predecir la rigidez se alcanzó un valor R^2 de 0,43.

5.1.2. Respecto a los perfiles de calidad para las muestras ensayadas a flexión

Como el estudio fue realizado contemplando tablas y vigas de modo independiente, las conclusiones también son presentadas de esa forma.

Tablas

El criterio adoptado por la norma argentina para la clasificación visual por resistencia de tablas IRAM 9662-3 (2015) fue el que mejor se ajustó a los resultados experimentales obtenidos sobre 233 tablas ensayadas a flexión, y del análisis del mismo surgieron las siguientes conclusiones particulares:

- La médula altera negativamente tanto las propiedades de resistencia como de rigidez, por lo que resulta apropiado que no sea admitida en la clase superior.
- La nudosidad (K) presenta límites adecuados entre las dos clases resistentes.
- El espesor del máximo anillo de crecimiento constituye un parámetro visual de significativo efecto sobre las propiedades de rigidez resultando oportuna su consideración. No obstante, el límite impuesto para la clase 1 (10 mm) resulta conservador. Se estima adecuado elevar dicha cifra a 12 mm, lo que trae aparejado un crecimiento de la cantidad de piezas asignadas en la clase superior (rendimiento económico) sin efectos notorios sobre las propiedades resistentes.
- La resistencia característica adoptada por la norma vigente (IRAM 9662-3 2015) para ambos grados de calidad (18 N/mm², 11 N/mm²) es claramente inferior a la realmente alcanzada por las piezas en estudio (21,1 N/mm², 15,2 N/mm²). Estos resultados conducen a un diseño conservador desde el punto de vista de la resistencia.
- El valor medio del módulo de elasticidad adoptado por la norma mencionada para la Clase 1 (12000 N/mm²) resulta muy elevado en relación al valor real registrado (10860 N/mm²), en cambio el valor de la Clase 2 (7000 N/mm²) es apropiado. Estos resultados indican que las deformaciones experimentadas por miembros estructurales de la Clase 1 pueden superar los calculados empleando el valor del módulo adoptado por la norma.
- La densidad característica de referencia se ajusta adecuadamente.
- Una revisión de la norma IRAM 9662-3 (2015) teniendo en cuenta lo expresado en los párrafos anteriores conduciría a una optimización de la misma en cuanto al rendimiento y al ajuste de los valores característicos de las propiedades mecánicas que realmente se alcanzan con el material clasificado.

Vigas

La aplicabilidad del método de clasificación vigente (IRAM 9670 2002) y el análisis de nuevos perfiles de resistencia rigidez y densidad basados en la nudosidad (KAR 150 y K) y la presencia de médula, fueron desarrollados sobre una base de resultados obtenida a partir de 225 cuerpos de prueba en tamaño estructural sometidos a ensayos de flexión estática. Las principales conclusiones sobre este tópico son las siguientes:

- La clasificación de los cuerpos de prueba según el método adoptado por la norma IRAM 9670 (2002) permitió alcanzar los valores característicos de las propiedades establecidos en la norma para cada clase resistente.
- No obstante, las dificultades inherentes a la evaluación de determinados parámetros y el perjuicio económico que implica el volumen de material descartado (45%) ameritan una revisión del método. En relación a este último aspecto se destaca la particular necesidad de analizar ciertas restricciones impuestas a la presencia de nudos en racimo, entre otras características típicas de las especies en estudio.
- El análisis de nuevos perfiles basados en la nudosidad (KAR 150 y K) y en la presencia de médula, con iguales límites entre clases, no mostraron diferencias significativas entre sus propiedades mecánicas. En consecuencia, la mayor complejidad que implica la determinación del criterio KAR 150 no justifica su aplicación en un país con poca tradición en la temática como el nuestro.
- Un perfil basado en la nudosidad K y la presencia de médula actuando como parámetros permitió alcanzar el módulo de elasticidad pero no la resistencia que requiere la norma IRAM 9670 (2002) y a su vez exhibió un razonable rendimiento con un 17% de piezas rechazadas.
- Los resultados obtenidos conforman una base sólida para la revisión del método vigente, la cual debe ser llevada a cabo junto al sector productivo y las autoridades de aplicación. Esta base provee alternativas para lograr: i) valores característicos de las propiedades alcanzables en cada clase junto a límites de los parámetros que produzcan un razonable rendimiento económico, ii) sencillez y consecuente velocidad en la determinación de los parámetros seleccionados, iii) una consideración integral de la clasificación por resistencia de la madera

aserrada de las especies estudiadas, lo cual requiere tener en cuenta (en paralelo) el método vigente para clasificar tablas (IRAM 9662-3 2015).

- Considerando las dificultades prácticas que implica la determinación de la nudosidad y, a su vez, la influencia negativa de este parámetro sobre las propiedades mecánicas, emerge como altamente recomendable la realización de podas programadas orientadas a producir madera con menos presencia de esa singularidad.

5.2. Conclusiones relacionadas con la clasificación mecánica por resistencia

5.2.1. Respecto al diseño de modelos de clasificación mecánica

Los modelos de clasificación mecánica por resistencia fueron diseñados empleando los resultados de 233 tablas sometidas a ensayos de flexión estática y la eficiencia de los mismos fue comprobada sobre 100 tablas sometidas a ensayos de tracción en dirección paralela a las fibras. El parámetro simple mejor correlacionado con la resistencia a flexión es el módulo de elasticidad global, $E_{m,g}$ ($R = 0,83$), mientras que la consideración de éste junto a la densidad (ρ) y la nudosidad (K) permite formular un parámetro combinado ($PC = 0,00203 E_{m,g} + 0,0413 \rho - 17,246 K + 2,305$) que optimiza esa relación ($R = 0,89$).

A través de la selección de límites adecuados para los parámetros $E_{m,g}$ y PC se diseñaron dos modelos de clasificación mecánica que proveen dos grados de calidad estructural y material de descarte.

Los resultados obtenidos clasificando la muestra ensayada a flexión con los modelos mecánicos y con el método visual vigente indicaron una mayor eficiencia de los primeros porque permitieron:

- alcanzar los valores característicos de las propiedades adoptados por la norma IRAM 9662-3 (2015) para las dos clases estructurales, superando las limitaciones que presenta el método visual para obtener el módulo de elasticidad en la clase superior (12000 N/mm^2).
- lograr un rendimiento del material superior al obtenido con el método visual.

- disminuir la variabilidad del módulo de elasticidad global dentro de cada clase resistente hasta el nivel adoptado por las reglas de diseño estructural del país (20%).
- superar las dificultades prácticas existentes para medir parámetros visuales de importancia predictiva pero sumamente complejos de determinar en la madera investigada, como la nudosidad.

Los dos modelos mecánicos desarrollados también probaron una eficacia superior al método visual para clasificar la muestra ensayada en tracción paralela a las fibras. Dada la importancia de estas propiedades en las láminas destinadas a la fabricación madera laminada encolada estructural, estos resultados respaldan la conveniencia de incorporar la clasificación mecánica a la fabricación de este producto con tablas de la especie investigada.

5.2.2. Respecto a la estimación del módulo de elasticidad a través de la frecuencia fundamental de vibración

El estudio del módulo de elasticidad dinámico (E_d) determinado a partir del método de las vibraciones utilizando el equipo PLG involucró el ensayo de 194 tablas de 500 mm de longitud y 99 tablas de 1300 mm. El módulo de elasticidad estimado (E_d) asociado a las dos clases estructurales resultó levemente mayor al real obtenido a través de los ensayos estáticos (E_g), registrándose una diferencia menor al 10%, cifra que fue superada en aquellas piezas de menor calidad (descarte). Como la precisión en la predicción del módulo de elasticidad real fue mayor en aquellas piezas de mejor calidad, este estudio también corroboró la influencia que ejercen los principales parámetros visuales (nudosidad, médula y anillos de crecimiento) en la transmisión de las ondas acústicas.

La técnica dinámica basada en la frecuencia fundamental de vibración para la determinación del módulo de elasticidad demostró que, si bien sobreestima levemente al valor del E_g , el empleo de la misma presenta una ventaja operativa a los fines prácticos de la determinación de las propiedades elásticas en tablas de *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* de diferentes longitudes.

5.3. Conclusiones respecto al análisis comparativo de la madera de *Pinus elliottii* y *Pinus taeda*

Del estudio comparativo entre las propiedades físico-mecánicas de 116 tablas de *Pinus elliottii* y 117 tablas de *Pinus taeda* sometidas a esfuerzos de flexión se concluye que:

- ambas especies presentan un comportamiento mecánico similar por lo que pueden ser empleadas de manera indistinta y, en consecuencia, confirman el criterio de las normas de Argentina (INTI CIRSOC 601 2016; IRAM 9662-3 2015; IRAM 9670 2002) que las consideran en forma conjunta para uso estructural.
- la madera de *P. elliottii* resulta un 7% más densa que la del *P. taeda*, lo que probablemente se corresponde con la abundante producción de resinas que caracteriza a la primera.

5.4. Conclusiones respecto de la relación entre propiedades mecánicas de flexión y tracción

Se compararon las propiedades mecánicas obtenidas a partir de 233 tablas sometidas a flexión y 101 tablas ensayadas a tracción paralela a las fibras, alcanzándose las siguientes conclusiones:

- Como tendencia general la relación existente entre la resistencia a tracción y flexión (f_t/f_m) crece moderadamente con el aumento de la calidad de la madera. Se obtuvieron valores f_t/f_m de 0,65 en la clase superior, 0,62 en la intermedia y 0,52 en la inferior (descarte).
- La relación entre los módulos de elasticidad en tracción paralela a la fibra y en flexión (E_t/E_m) decrece al aumentar la calidad del material. Los valores encontrados para E_t/E_m alcanzaron 0,99, 1,05 y 1,19 para la clase 1, 2 y el descarte, respectivamente.

Estos resultados indican que para propósitos prácticos atinentes al diseño estructural la relación constante de 0,6 entre la resistencia a tracción y flexión, y un valor único del módulo de elasticidad, expresan adecuadamente el comportamiento de las dos clases superiores (estructurales) de la madera estudiada. La validación de este criterio, que surgió de la experiencia europea y fue adoptado por la normativa argentina (IRAM

9662-3 2015; IRAM 9664 2013), permite abreviar las tareas que demanda la caracterización de este material estructural satisfaciendo adecuadamente la seguridad requerida.

5.5. Conclusiones respecto de la relación entre el módulo de elasticidad global y el módulo de elasticidad local en flexión

El módulo de elasticidad global ($E_{m,g}$) y el módulo de elasticidad local ($E_{m,l}$) fueron determinados a través de ensayos estáticos de flexión sobre 225 vigas aserradas en tamaño estructural de pino resinoso (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*). El análisis de los resultados que involucran a la muestra que integra al total de vigas reveló que los valores medios de $E_{m,l}$ superan a los de $E_{m,g}$ en todas las calidades contempladas.

Las diferencias encontradas entre rigideces fueron congruentes con la influencia que el esfuerzo de corte ejerce sobre las deformaciones y, a su vez, están en línea con el criterio adoptado por el Reglamento Argentino de Estructuras de madera INTI CIRSOC 601 (2016) que asume un valor 5% mayor para el módulo de elasticidad determinado en flexión pura que para el obtenido con una componente de deformación debida al esfuerzo de corte.

Los valores del coeficiente de variación (CV), que para las piezas sin clasificar oscilaron entre 25% y 31% para $E_{m,l}$ y entre 21% y 26% para $E_{m,g}$, son superiores al asumido por el Reglamento Argentino de Estructuras de madera (20%) e indican una relativamente elevada variabilidad de esta propiedad. Para el material clasificado -ya sea por médula o nudosidad- se presentaron valores menores para el CV en aquellos grupos de mayor calidad, no obstante en la mayoría de los casos el 20% asumido también fue superado. Este aspecto debería ser considerado particularmente cuando la deformación sea un requerimiento importante del proyecto estructural.

Los resultados experimentales obtenidos para $E_{m,l}$, como lo ya confirmado para $E_{m,g}$, también dejaron en evidencia la influencia negativa que ejerce la presencia de médula y la nudosidad sobre la rigidez, registrándose una mayor influencia por parte de la primera donde la diferencia entre piezas libre de médula respecto de las que la contenían alcanzó al 16%.

Por otra parte, la ecuación propuesta por Denzler *et al.* (2008) interpreta adecuadamente la relación entre $E_{m,l}$ y $E_{m,g}$. Este criterio arroja una diferencia que no

supera al 3% respecto de los resultados experimentales, la que puede ignorarse para propósitos prácticos vinculados al diseño estructural. En consecuencia provee un camino razonable para simplificar el trabajo experimental y minimizar los errores ocasionalmente causados por la medición de las pequeñas deformaciones que se registran en el tercio central de las vigas con el fin de determinar el módulo de elasticidad local.

5.6. Conclusiones respecto de la influencia del tamaño de la sección transversal sobre la resistencia a flexión

La influencia del ancho de la sección sobre la resistencia fue evaluada sobre un total de 111 cuerpos de prueba con la misma altura nominal (150 mm) sometidos a ensayos de flexión estática, confirmándose la inexistencia de una relación entre ambas variables.

La influencia de la altura sobre la resistencia a flexión fue estudiada a través de los resultados obtenidos de 458 cuerpos de prueba con una altura nominal comprendida entre 25 mm y 200 mm. Éstos mostraron como tendencia general que la resistencia a flexión crece con la disminución de la altura de la pieza, lo cual está en línea con el criterio adoptado por el Reglamento Argentino de Estructuras de madera INTI CIRSOC 601 (2016) y por la norma IRAM 9664 (2013), siendo congruente además con la experiencia europea.

La relación encontrada entre la altura de la sección y la resistencia a flexión, mencionada en el párrafo anterior, si bien en general es congruente con el criterio de la normativa de nuestro país, no es interpretada con exactitud por la expresión adoptada en la misma aunque no la invalida para propósitos prácticos vinculados al diseño estructural. A su vez, a través del análisis de los resultados experimentales no fue posible encontrar una nueva relación que explique el comportamiento del material con mayor precisión que la expresión incorporada por la normativa nacional.

5.7. Conclusiones respecto de las deformaciones diferidas en piezas sometidas a cargas de larga duración

Los resultados experimentales de las 14 vigas (7 de *Pinus taeda* y 7 de *Pinus elliotii*) sometidas a flexión con cargas de larga duración mostraron que luego de un año la

deformación relativa (Δ/Δ_{inst}) alcanzó un valor medio de 1,79 para la muestra completa, de 1,80 y 1,78 para las correspondientes sub-muestras de *P. taeda* y *P. elliotii*, y de 1,85 y 1,75 para las sub-muestras conteniendo vigas con médula y libres de ella, respectivamente. Las pequeñas diferencias encontradas en el comportamiento de las distintas sub-muestras pueden despreciarse para propósitos prácticos vinculados al diseño estructural y ratifican la validez, para el caso analizado, del criterio del Reglamento argentino (INTI CIRSOC 601 2016) que estima el valor de la deformación diferida independientemente de la especie y de la calidad de la madera.

La proyección a 10 años del componente del creep determinado experimentalmente a los 6 meses -utilizando resultados de investigaciones previas- y su comparación con los resultados obtenidos aplicando las reglas de diseño del país, confirmaron que éstas interpretan adecuadamente el comportamiento del material investigado cuando es sometido a cargas de larga duración. Estos resultados adquieren una significativa importancia teniendo en cuenta el creciente uso de madera estructural proveniente de especies de rápido crecimiento que contienen una proporción significativa de madera juvenil.

Los resultados pusieron en evidencia la necesidad de que el proyectista estructural examine detalladamente las características de los parámetros considerados explícitamente en el diseño, tales como la duración de las cargas actuantes y la condición de servicio en el lugar de emplazamiento de la estructura.

5.8. Futuras investigaciones

Los resultados de esta investigación han puesto en evidencia la conveniencia de realizar nuevos estudios que elevarían su potencial como material estructural. Entre ellos se destacan:

En cuanto a la clasificación mecánica:

- Ampliar la base experimental utilizada en este trabajo y analizar alternativas para la calibración y aplicación práctica de los modelos analizados. El análisis debería considerar la precisión y la complejidad en la implementación de cada modelo con el fin de optimizar el balance técnico-económico.

- Diseñar un método complementario de inspección visual para evaluar los defectos que no sean relevados por el proceso mecánico adoptado y que es necesario limitar en la madera estructural, tales como deformaciones excesivas, entre otros.

En relación al conocimiento integral del material:

- Determinación experimental de otras propiedades mecánicas complementarias, tales como la resistencia a compresión paralela y perpendicular a las fibras y el módulo de corte entre otras, e indagar las relaciones que las vinculan con las propiedades fundamentales (resistencia y módulo de elasticidad en flexión y densidad) para comprobar la precisión del criterio adoptado por la norma IRAM 9664 (2013).
- Investigar el valor de los coeficientes de Poisson y las restantes variables requeridas para simular numéricamente el comportamiento del material y posibilitar de esa manera un abordaje integral de su cálculo estructural.
- Extender el estudio a otras regiones del país con el propósito de conocer el comportamiento mecánico del pino resinoso de diversas procedencias que, si bien de menor importancia que el noreste, puede ampliar su utilización como material estructural con la confiabilidad requerida en las reglas de diseño.

BIBLIOGRAFÍA

- ABNT. 2010.** Projeto de revisão NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeira. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Río de Janeiro, Brasil.
- Adell Almazán, F. 2005.** Comparación de las normas de clasificación de madera estructural española (UNE 56544) y alemana (DIN 4074) para madera de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) de procedencia alemana. Proyecto fin de carrera, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, 189 pp. Madrid, España.
- Alvarez Lazo, D.; Dorado, M.; Camusso, C.; Lubrano, P. 2011.** Tecnología de la madera. Edit. UNIVERSITAS, 153 pp. Córdoba, Argentina.
- Andriamitantoa, L. 1995.** Creep. Timber Engineering STEP 1: pp. A19/1-A19/5. Centrum Hout, The Netherlands.
- Argüelles Álvarez, R.; Arriaga Martitegui, F. 2000.** Estructuras de madera: Diseño y cálculo. Edit. AITIM - Asociación de Investigación de las Industrias de la Madera y Corcho, 650 pp. Madrid, España.
- Arriaga Martitegui, F.; Esteban Herrero, M.; Argüelles Álvarez, R.; Bobadilla Maldonado, I.; Íñiguez González, G. 2007.** Efecto de las gemas en la resistencia a flexión de piezas enterizas de madera. *Materiales de Construcción* 57(288): 61-76.
- ASTM D198. 2015.** Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, USA.
- ASTM D245. 2011.** Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber. West Conshohocken, USA.
- ASTM D1990. 2016.** Standard practice for establishing allowable properties for visually-graded dimension lumber from in-grade tests of full-size specimens. West Conshohocken, USA.
- Ballarin, A.; Lara Palma, H. 2003.** Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. *Revista Árvore* 27(3): 371-380.
- Ballarin, A.; Ballarin, A.; Calil Júnior, C. 2017.** Classificação visual e mecânica simplificada da madeira de pinus spp. II Congreso Latinoamericano de Estructuras de Madera y II Congreso Ibero-Latinoamericano de la Madera en la Construcción, 11pp, Buenos Aires, Argentina.
- Baño, V. 2009.** Análisis mediante simulación numérica de la pérdida de resistencia de la madera por la presencia de nudos. Tesis Doctoral, Universidad de Santiago de Compostela, Depto. de Ingeniería Agroforestal, 213 pp.

- Baño, V.; Argüelles-Bustillo, R.; Regueira, R.; Guaita, M. 2012.** Determinación de la curva tensión-deformación en madera de '*Pinus sylvestris*' L. para la simulación numérica de vigas de madera libre de defectos. *Materiales de Construcción* 62(306): 269-284.
- Biani, J.; Ingrassia, L.; Lanese, L.; Nussold, M. 2009.** Estudio comparativo del sector forestal. Argentina, Chile, Uruguay y Brasil. CEMUPRO, 32 pp.
- Blaß, H. 1995.** Columns. In *Timber Engineering STEP 1*. Pp. B6/1-A6/8. Centrum Hout, The Netherlands.
- Blaß, H.; Görlacher, R. 1996.** Visuelle und maschinelle Festigkeitssortierung von Vollholz. *Mikado* 5:64-71.
- Bogensperger T., Schickhofer G., Unterwieser H. 2006.** The mechanical inconsistency in the evaluation of the modulus of elasticity according to EN384. CIB W18 Meeting 39, Florence, Italy. Paper 29-10-3.
- Boström L., Ormarsson S., Dahlblom O. 1996.** On determination of modulus of elasticity in bending. CIB W18 Meeting 29, Bordeaux, France. Paper 29-10-3.
- Bunse, G. 2012.** Mejoramiento genético de pinos subtropicales en el CIEF y su beneficio económico, Resúmenes Jornadas de Actualización Técnica Mejoramiento genético de pinos y eucaliptos subtropicales: 21-24. Entre Ríos, Argentina.
- Burdon, R.; Kibblewhite, P.; Walker, J.; Megraw, R.; Evans, R.; Cown, D. 2004.** Juvenile versus mature wood: a new concept, orthogonal to corewood versus outerwood, with special reference to *Pinus radiata* and *P. taeda*. *Forest Science* 50(4): 399-415.
- Burger, N.; Glos, P. 1995a.** Relationship of moduli of elasticity in tension and in bending of solid timber. In: *Proceedings of CIB-W18, Meeting 28*, Paper 28-5-2, 8 pp. Copenhagen, Denmark.
- Burger, N.; Glos, P. 1995b.** Verhältnis zwischen Zug- und Biege-Elastizitätsmoduln von Vollholz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 53: 73-74.
- Burger, N.; Glos, P. 1997.** Strength relationships in structural timber subjected to bending and tension. In: *Proceedings of CIB-W18, Meeting 30*, Paper 30-6-1, 11 pp. Vancouver, Canada.
- Cagno, M.; Cardoso, A.; O'Neill, H.; Moya, L. 2014.** Relación entre módulos de elasticidad dinámico y estático, y entre resistencia a flexión para piezas de madera de pinos de tamaño estructural. XIV Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 9 pp. Natal, Brasil.
- Calvo, C.; Cotrina, A.; Cuffré, A.; Piter, J.; Stefani, P.; Torrán, E. 2002.** Deformaciones diferidas en probetas pequeñas y libres de defectos de *Eucalyptus grandis* de Argentina. *Maderas: Ciencia y Tecnología* 4(2): 124-132.
- Carballo, J.; Hermoso, E.; Fernández-Golfín, J. 2009.** Mechanical properties of structural maritime pine sawn timber from Galicia (*Pinus pinaster* Ait. ssp. *atlantica*). *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 18(2): 152-158.
- Cardoso, A.; Moya, L.; O'Neill, H. 2017.** Influencia de algunos parámetros visuales en las propiedades de tracción y compresión paralela de piezas de madera de pino de plantaciones uruguayas. II Congreso Latinoamericano de Estructuras de Madera, II Congreso Ibero-Latinoamericano de la Madera en la Construcción, 8 pp., Bs As, Argentina.
- Carreira, M.; Alves Dias, A. 2006.** Critérios para classificação visual de peças estruturais de *Pinus* SP. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, 8(34): 17-43.
- Casado, M.; Acuña, L.; Vecilla, D.; Basterra, A.; Pando, V.; Relea, E. 2007.** Determinación de la capacidad resistente de madera estructural de *Pinus sylvestris* mediante PLG. 11º Congreso Español de END, 10 pp. Gijón, España.

- Cave, I.; Walker, J. 1994.** Stiffness of wood in fast-grown plantation softwoods: the influence of microfibril angle. *Forest Products Journal* 44(5): 43-48.
- Chavesta, C. 2006.** Separata de capacitación sobre identificación de madera. Universidad Nacional Agraria La Molina, USAID, Lima, Perú.
- Chan Martín, M.; Araujo Molina, A.; Azueta García, M. 2002.** Los defectos naturales en la madera aserrada. *Ingeniería Revista Académica*, 6(001): 29-38.
- Chifarelli, D. 2008.** El Modelo de Monocultivos de Coníferas a Gran Escala. Análisis de Sustentabilidad en el Alto Paraná Misionero. IX Congreso Argentino de Antropología Social, 21 pp. Misiones, Argentina.
- Colling, F. 1995.** Glued laminated timber - Production and strength classes. *Timber Engineering STEP 1*, pp. A8/1-A8/8. Centrum Hout, The Netherlands.
- Coronel, E. 1994.** Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas. 1º parte: Fundamentos de las propiedades físicas de las maderas. Instituto de Tecnología de la Madera, 187 pp. Santiago del Estero, Argentina.
- Coronel, E. 1996.** Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas. 2º parte: Fundamentos de las propiedades mecánicas de las maderas. Instituto de Tecnología de la Madera, 335 pp. Santiago del Estero, Argentina.
- Dávalos-Sotelo, R.; Limón Godina, R. 2009.** Efecto de los nudos sobre la resistencia y rigidez en flexión de la madera de pino. *Revista Ciencia Forestal en México* 34(106): 205-212.
- Dávalos-Sotelo, R.; Ordóñez Candelaria, V. R. 2011.** Influencia de los nudos sobre la resistencia en flexión estática en madera de tamaño estructural. *R. Ciencia Forestal México*, 2(7): 43-46.
- Denzler, J.; Glos, P. 2008.** Size effects in bending. 41th Meeting, International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W18 - Timber Structures, CIB-W18, Paper 41-6-4, St. Andrews, Canada.
- Denzler, J.; Stapel, P.; Glos, P. 2008.** Relationship between global und local MOE. CIB W18 Meeting 41, Paper 41-10-3, 9 pp. St. Andrews, Canada.
- Denzler, J.; Weidenhiller, A. 2014.** New perspectives in machine strength grading: or how to identify a top rupture. *Materials and Joints in Timber Structures* 9: 761-771.
- Di Marco, E. 2014.** *Pinus taeda L. (Pino taeda, Pinotea, Pino Resinoso, Loblolly Pine)* Familia Pinaceae. *Revista Producción Forestal* 4(10): 28-30.
- Diebold, R.; Glos, P. 1994.** Verbesserte Holznutzung durch neuartige maschinelle Festigkeitssortierung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 52: 222.
- Diebold, R. 1997.** Möglichkeiten der maschinellen Holzsortierung mit dem Euro-GreComat. In *Grazer Holzbau-Fachtagung, Sortierung und Festigkeit. B/1*: 1-19.
- Diéz Barra, M.; Fernández-Golfín, J. 1998.** Influencia de diversos factores en la calidad de la madera de uso estructural de *P. Sylvestris* L. *Investigación Agraria, Sistemas y Recursos Forestales* 7(1 y 2): 41-51.
- DIN 4074-1. 2012.** Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 1: Nadelschnittholz. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
- Dirección de Producción Forestal. 2016.** Argentina: Plantaciones forestales y gestión sostenible. 15 pp. Disponible en <https://goo.gl/064alb>, acceso el 23/12/2016.
- Donaldson, L. 2008.** Microfibril angle: measurement, variation and relationships - a review. *IAWA Journal* 29(4): 345-386.

- Dowse, G. 2010.** Selected mechanical properties and the structural grading of young *Pinus patula* sawn timber. Tesis de Maestría, University of Stellenbosch, Faculty of AgriSciences, 90 pp. Stellenbosch, South Africa.
- Dowse, G.; Wessels, C. 2013.** The structural grading of young South African grown *Pinus patula* sawn timber. *Southern Forests: a Journal of Forest Science* 75(1): 7-17.
- Ehrhart, T.; Fink, G.; Steiger, R.; Frangi, A. 2016.** Strength grading of European beech lamellas for the production of GLT & CLT. International Network on Timber Engineering Research. Meeting 49, 14 pp. Graz, Austria.
- EN 338. 2016.** Structural timber. Strength classes. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 384. 2016.** Structural timber. Determination of characteristic values of mechanical properties and density. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 408. 2012.** Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 1310. 1997.** Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de las singularidades. Asociación Española de Normalización y Certificación. Génova, España.
- EN 1995-1-1. 2006.** Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General. Common rules and rules for buildings. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 14080. 2013.** Timber structures. Glued laminated timber and glued solid timber. Requirements. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 14081-1. 2016.** Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section. Part 1: General requirements. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 14081-2. 2010.** Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section. Part 1: Machine grading; additional requirements for initial type testing. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 14081-3. 2012.** Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section. Part 1: Machine grading; additional requirements for factory production control. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 14358. 2016.** Timber structures. Calculation and verification of characteristic values. European Committee for Standardization, Brussels.
- Esteban, M.; Arriaga, F.; Íñiguez, G.; Bobadilla, I.; Mateo, R. 2010.** Influencia de las fendas en la resistencia de la madera estructural. *Materiales de Construcción* 60(299): 115-132.
- Fank, P.; Stefani, P.; Piter, J. 2014.** Efecto de la altura en la resistencia a flexión en piezas de pino resinoso del noreste de Argentina. XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, 13 pp. Montevideo, Uruguay.
- Fank, P.; Stefani, P.; Piter, J. 2017.** Clasificación mecánica de tablas de pinos resinosos cultivados en el nordeste de Argentina. *Maderas. Ciencia y tecnología.* 19(2): 247-264.
- FAO 2000.** Situación forestal en los Estados Unidos de América. Disponible en <<http://www.fao.org/docrep/meeting/X4995s.htm>>, acceso el 11/12/2017.
- FAO 2004.** Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina al año 2020, Informe Nacional Argentina. Disponible en <<http://goo.gl/v0SCxZ>>, acceso el 12/07/2016.
- Fassola, H. 2004.** El cultivo de pino taeda en Misiones y NE de Corrientes, Argentina. *Basoko teknika, Técnica Forestal:* 30-33.

- Fernández-Golfín Seco, J.; Díez Barra, M. 1994.** Influencia de la anchura del anillo de crecimiento en la densidad y otras propiedades físico-mecánicas de la madera estructural de diversas especies. *Investigación Agraria, Sistemas y Recursos Forestales* 3(2): 211-219.
- Fernández-Golfín Seco, J.; Díez Barra, M. 1996.** Growth rate as a predictor of density and mechanical quality of sawn timber from fast growing species. *Holz als Roh- und Werkstoff* 54:171-174.
- Fernández-Golfín Seco, J.; Díez Barra, M.; Hermoso Prieto, E. 2001.** Análisis y estado del arte de la técnica de clasificación mecánica por máquina de la madera aserrada estructural. *Investigación Agraria, Sistemas y Recursos Forestales* 10(1): 5-19.
- Fernández-Golfín, J.; Hermoso Prieto, E.; Díez, M. 2002.** Análisis del efecto del volumen sobre la resistencia característica a flexión de la madera de los pinos silvestre y laricio de procedencia española. *Materiales de Construcción* 52(256): 43-55.
- Fernández-Golfín, J.; Díez, M.; Hermoso, E. 2003.** Relaciones entre las variables clasificadoras de la madera estructural de los pinos silvestre y laricio de procedencia española. *Materiales de Construcción* 53(270): 45-55.
- Fiorelli, J.; Alves Dias, A.; Coiado, B. 2009.** Propriedades mecânicas de peças com dimensões estruturais de *Pinus* spp: correlação entre resistência à tração e classificação visual. *Revista Árvore, Viçosa-MG*, 33(4): 741-750.
- Forest Products Laboratory. 1999.** Wood handbook, Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 463 pp. Madison, Wisconsin.
- Gehri, E. 1997.** Timber as a natural composite: Explanation of some peculiarities in the mechanical behaviour. Proceedings of CIB-W18, Meeting 30, Paper 30-6-3, 1997, 4 pp. Vancouver, Canada.
- Gilman, E.; Watson, D. 1994.** *Pinus taeda* (Loblolly Pine). Fact Sheet ST-478, 3 pp. Disponible en: <https://goo.gl/rtVEzl>, acceso el 09/03/2017.
- Glos, P.; Diebold, R. 1987.** Einfluß verschiedener Sortierbedingungen auf die Biegefestigkeit von Bauholz (Kantholz). Abschlußbericht 84510, Institut für Holzforschung der Universität München.
- Glos, P.; Diebold, R. 1994.** Verfahrensentwicklung und Erprobung zur maschinellen Schnittholz-sortierung. Abschlußbericht 89505, Institut für Holzforschung der Universität München.
- Glos, P. 1995a.** Solid timber - Strength classes. Timber Engineering STEP 1: Basis of design, material properties, structural components and joints, pp. A7/1-A7/8. Centrum Hout, The Netherlands.
- Glos, P. 1995b.** Strength grading. Timber Engineering STEP 1: Basis of design, material properties, structural components and joints, pp. A6/1-A6/8. Centrum Hout, The Netherlands.
- Glos, P.; Lederer, B. 2000.** Sortierung von Buchen- und Eichenschnittholz nach der Tragfähigkeit und Bestimmung der zugehörigen Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte. Bericht Nr. 98508, Institut für Holzforschung, München.
- Görlacher, R. 1984.** Ein neues Messverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Holz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 42: 219-222.
- Görlacher, R. 1990.** Sortierung von Brettschichtholzlamellen nach DIN 4074 durch Messung von Longitudinalschwingungen. *Bauingenieur* 65: 517-522.
- Görlacher, R. 1997.** Möglichkeiten der maschinellen Holzsortierung mit dem GradeMaster 403. In *Grazer Holzbau-Fachtagung, Sortierung und Festigkeit*, B/2: 1-10.
- Gowda, C.; Kortjesma, M.; Ranta-Maunus, A. 1996.** Long term creep tests on timber beams in heated and non-heated environments. VTT Publications 278, 35 pp.

- Green, D.; Kretschmann, D. 1997.** Properties and grading of southern pine timbers. *Forest Products Journal* 47(9): 78-85.
- Guillaumet, A.; Manavella, R.; Filippetti, M.; Diab, J.; Armas, A. 2007.** Clasificación visual resistente de la *Araucaria Angustifolia* procedente de Eldorado, Misiones, Argentina. III Congreso Iberoamericano de Productos Forestales IBEROMADERA 2007, Buenos Aires.
- Guillaumet, A.; Manavella, R.; Filippetti, M.; Diab, J.; Armas, A. 2008.** Relación entre la nudosidad y las características resistentes de la *Araucaria angustifolia* (Pino paraná). XX Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, 22 pp. Buenos Aires.
- Guillaumet, A.; Filippetti, M.; Acuña Rello, L.; Piter, J.C. 2014.** Utilización de la madera de álamo en elementos estructurales. XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural (XXXVI JSAIE), 14 pp. Montevideo, Uruguay.
- Guillaumet, A.; Manavella, R.; Acuña Rello, L.; Piter, J. 2016.** Influencia de las dimensiones de la sección transversal sobre la resistencia a flexión en madera aserrada de *Populus deltoides* cultivado en Argentina. *Maderas. Ciencia y tecnología* 18(4): 587-598.
- Guindos, P. 2011.** Modelos de elementos finitos tridimensionales para simular el comportamiento de madera con presencia de nudos, empleando la analogía fluido-fibra y validación con fotogrametría de objeto cercano. Tesis Doctoral, Universidad de Santiago de Compostela, Depto. de Ingeniería Agroforestal, 549 pp.
- Hanhijärvi, A.; Ranta-Maunus, A. 2008.** Development of strength grading of timber using combined measurement techniques. Report of the Combigrade - project - phase 2. VTT Publications 686, 60 pp.
- Haselein, C.; Cechin, E.; Santini, E.; Gatto, D. 2000.** Características estruturais da madeira de *Pinus elliottii* engelm aos 30 anos de idade. *Revista Ciência Florestal* 10(002): 135-144.
- Hermoso Prieto, E. 2001.** Caracterización mecánica de la madera estructural de *Pinus sylvestris* L. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, 253 pp. Madrid, España.
- Hermoso Prieto, E.; Fernández-Golfín, J.; Diez Barra, M. 2002.** Análisis del factor de altura k_n en la madera aserrada estructural de pino silvestre. *Revista Investigación agraria: Sistemas y recursos forestales* 11(2): 441-448.
- Hermoso Prieto, E.; Diez Barra, M.; Fernández-Golfín, J.; Íñiguez-González, G. 2013.** Efecto del tamaño de la sección y la médula sobre la resistencia y rigidez de la madera aserrada estructural de pino radiata (*Pinus radiata* D. Don.). 6to Congreso Forestal Español, 10 pp.
- Hermoso, E.; Mateo, R.; Íñiguez-González, G.; Montón, J.; Arriaga, F. 2016.** Visual grading and structural properties assessment of large cross-section *Pinus radiata* D. Don Timber. *BioResources* 11(2): 5312-5321.
- Herrero, E. 2003.** Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estructuras existentes de madera de conífera. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, 365 pp. Madrid, España.
- Hoffmeyer, P. 1995.** Wood as a building material. Timber Engineering. Basis of design, material properties, structural components and joints. STEP 1: pp. A4/1-A4/21. Centrum Hout, The Netherlands.
- Honfi, D. 2014.** Design for serviceability - A probabilistic approach. Tesis doctoral, LUND University, Division of Structural Engineering, 124 pp. Lund, Sweden.
- Hunt, D. 1999.** A unified approach to creep of wood. *The Royal Society* 455: 4077-4095.

- IFONA 2004.** Fichas técnicas de las especies nativas e implantadas de Argentina, Instituto Forestal Nacional, 136 pp. Buenos Aires, Argentina.
- Ilic, J. 2001.** Relationship among the dynamic and static elastic properties of air-dry *Eucalyptus delegatensis* R. Baker. *Holz als Roh- und Werkstoff* 59:169-175.
- INTI CIRSOC 601. 2016.** Reglamento argentino de estructuras de madera. Disposiciones generales y requisitos para el diseño y la construcción de estructuras de madera en edificaciones. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Buenos Aires, Argentina. Disponible en <https://goo.gl/hwYYIA>, acceso el 23/12/2016.
- INTI. Maderas y Muebles. 2010.** Maderas Argentinas. Caracterización de maderas nativas argentinas. Disponible en <https://www.inti.gov.ar/maderaymuebles>, acceso el 08/03/2017.
- Íñiguez González, G. 2007.** Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 236 pp.
- Íñiguez González, G.; Arriaga Martitegui, F.; Herrero, M.; Argüelles Álvarez, R. 2007.** Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural. *Informes de la Construcción*, 59(506): 97-105.
- IRAM 9660-1. 2015.** Vigas laminadas de madera. Parte 1: Clases de resistencia y requisitos de fabricación y de control. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.
- IRAM 9660-2. 2015.** Vigas laminadas de madera. Parte 2: Métodos de ensayo. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.
- IRAM 9661. 2015.** Madera laminada encolada estructural. Requisitos de los empalmes por unión dentada. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.
- IRAM 9662-1. 2015.** Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 1: Tablas de pino Paraná (*Araucaria angustifolia*). Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.
- IRAM 9662-2. 2015.** Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 2: Tablas de eucalipto (*Eucalyptus grandis*). Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.
- IRAM 9662-3. 2015.** Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 3: Tablas de pino taeda y ellioti (*Pinus taeda* y *elliottii*). Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.
- IRAM 9662-4. 2015.** Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 4 - Tablas de álamo (*Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67'). Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.
- IRAM 9663. 2013.** Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.
- IRAM 9664. 2013.** Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.
- IRAM 9670. 2002.** Madera estructural. Clasificación y requisitos. Clasificación en grados de resistencia para la madera aserrada de pinos resinosos del noreste argentino mediante una evaluación visual. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.
- ISO 3130. 1975.** Wood. Determination of moisture content for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization.

- ISO 3131. 1975. Wood. Determination of density for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization.
- Johansson, C.; Brundin, J.; Gruber, R. 1992. Stress Grading of Swedish and German Timber, a comparison of machine stress grading and three visual grading systems. SP Report 1992: 23, Swedish National Testing and Research Institute, Sweden.
- Larson, P.; Kretschmann, D.; Clark III, A.; Isebrands, J. 2001. Formation and properties of juvenile wood in Southern Pines. General Technical Report 129, United States Department of Agriculture (USDA), Forest Service, Forest Products Laboratory, 46 pp.
- Melchiorretto, D.; Eleotério, J. 2003. Caracterização, classificação e comparação da madeira de *pinus patula*, *p. elliottii* e *p. taeda* através de suas propriedades físicas e mecânicas. XVIII Congresso Regional De Iniciação Científica e Tecnológica Engenharia Civil (CRICTE), 5 pp. Itajaí, SC, Brasil.
- Moglia J.; Giménez A.; Bravo S. 2005. Serie Didáctica N ° 20 - Tomo II. Macroscopía de madera orientada a los estudiantes de Carpintería. Editorial Asociación Cooperadora de la Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Nacional de Santiago del Estero. 57 pp. Santiago del Estero, Argentina.
- Montón, J.; Arriaga, F.; Avellaneda, J.; Íñiguez-González, G.; Farrás, J.; Plensa, R. 2011. Clasificación visual estructural de la madera de pino radiata procedente de Cataluña. 1º Congreso Ibero-LatinoAmericano da Madeira na Construção CIMAD, 8 pp. Coimbra, Portugal.
- Montón, J.; Arriaga, F.; Íñiguez-Gonzalez, G.; Segué, E. 2014. Warp requirements and yield efficiency in the visual grading of sawn Radiata pine timber. *BioResources*, 10(1): 1115-1126.
- Moya, L.; Cardoso, A.; Cagno, M.; Laguarda, F.; Gatto, F.; O'Neill, H. 2015a. Proyecto para la caracterización estructural de madera aserrada de pinos cultivados en Uruguay. Documento de Investigación Nro. 3, Universidad ORT Uruguay, Facultad de Arquitectura, 20 pp.
- Moya, L.; Cardoso, A.; Cagno, M.; O'Neill, H. 2015b. Caracterización estructural de madera aserrada de pinos cultivados en Uruguay. *Maderas. Ciencia y tecnología* 17(3): 597- 612.
- Moya, L.; Domenech, L.; Cardoso, A.; O'Neill, H.; Baño, V. 2017. Proposal of visual strength grading rules for Uruguayan pine timber. *European Journal of Wood and Wood Products* 75(3): 1017-1019.
- Muñiz, G. 1993. Caracterização e desenvolvimento de modelos para estimar as propriedades e o comportamento na secagem da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. e *Pinus taeda* L. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, 252 pp. Curitiba, Brasil.
- Nahuelpán López, C. 2007. Determinación del límite entre la madera juvenil y madura en *Pinus taeda* L. Tesis de grado. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, 42 pp. Valdivia, Chile.
- NBR 7190. 1997. Projeto de Estruturas de Madeira. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Comitê Brasileiro de Construção Civil, Comissão de Estudo de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro, Brasil.
- NCh 1198. 2014. Madera, Construcciones en madera, Cálculo. Instituto Nacional de Normalización INN. Santiago de Chile.
- NCh 1207. 2017. Pino radiata, Pino oregón, Pino ponderosa. Clasificación visual para uso estructural. Especificaciones de los grados de calidad. Instituto Nacional de Normalización INN. Santiago, Chile.
- NCh 1970/2. 1988. Maderas. Parte 2. Especies coníferas. Clasificación visual para uso estructural. Especificaciones de los grados de calidad. Instituto Nacional de Normalización INN. Santiago, Chile.

- NDS. 2012.** National Design Specification for Wood Construction. American Forest & Paper Association, Washington.
- Newlin, J.; Trayer, G. 1924.** Form factors of beams subjected to transverse loading only. The influence of the form of a wooden beam on its stiffness and strength. Report No.181, Forest Products Laboratory, Department of Agriculture, United States, p. 375-393.
- Niemz, P.; Aguilera, A.; Rolleri, A. 1994.** Velocidad de propagación del sonido en algunas especies creciendo en Chile y su relación con propiedades físicas. *Revista Bosque* 15(2):49-54.
- Nordström, J.; Sandberg, D. 1994.** The rheology of wood. Considerations of the mechano-sorptive creep, Royal Institute of Technology, 11 pp. Stockholm, Sweden.
- O'Neill, H. 2004.** Estimación de la calidad de la madera producida en el Uruguay para uso estructural y su evaluación en servicio por métodos no destructivos. Departamento de Proyectos Forestales - Laboratorio Tecnológico del Uruguay. Nota técnica, 9 pp.
- O'Neill, H.; Tarigo, F.; Iraola, P. 2004.** Propiedades mecánicas de *Eucalyptus grandis* H. del norte de Uruguay. Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto "GT2". Informe N° 4. 49 pp.
- O'Neill, H.; Tarigo, F. 2008.** Propiedades mecánicas de *Pinus elliottii* Eng. del norte del Uruguay. Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto "GT3". Informe N° 7. 47 pp.
- Parker, H.; Ambrose, J. 2000.** Diseño simplificado de estructuras de madera. Edit. Limusa Wiley, 333 pp. México.
- Peña-Hernández, Y.; Gonzáles-Cruz, C.; Álvarez-Lazo, C. 2011.** Influencia de factores sobre el alabeo en madera aserrada de *Pinus caribaea* Morelet var. *Caribaea*. 5to. Congreso Forestal de Cuba, 5 pp.
- Pereira Mendes, G. 2017.** Caracterização de proveniências de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* para instalação de ensaios de proveniências. Tesis de Maestría, Escola Superior Agrária de Coimbra (ESAC), Mestrado em Recursos Florestais, 104 pp. Coimbra, Brasil.
- Pereyra, A. 1997.** Transformaciones espaciales e impacto derivado del circuito económico forestal de pinos en la Provincia de Misiones (Rca. Argentina). 2do Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano, 10 pp. Misiones, Argentina.
- Pérez del Castillo, A.; de Castro, R.; Ohta, S. 2000.** Ensayos de propiedades mecánicas de *Pinus taeda* por seis métodos no destructivos. Proyecto LATU-JICA, Informe de Investigación Nro 1, 28 pp. Montevideo, Uruguay.
- Pérez del Castillo, A. 2001.** Módulo de elasticidad y módulo de rotura en tablas de tamaño real de *Pinus elliottii* del sur de Uruguay. Proyecto LATU-JICA, Informe de Investigación Nro 7, 29 pp. Montevideo, Uruguay.
- Piter, J. 2003.** Clasificación por resistencia de la madera aserrada como material estructural. Desarrollo de un método para el *Eucalyptus grandis* de Argentina. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de la Plata, Facultad de Ingeniería, Departamento de Construcciones, 206 pp. Buenos Aires, Argentina.
- Piter, J.; Zerbino, R.; Blaß, H. 2003.** Relationship between global and local Modulus of Elasticity in beams of Argentinean *Eucalyptus grandis*. *Maderas: Ciencia y Tecnología* 5(2): 107-116.
- Piter, J.; Zerbino, R.; Blaß, H. 2004a.** Visual strength grading of Argentinean *Eucalyptus grandis*. Strength, stiffness and density profiles and corresponding limits for the main grading parameters. *Holz als Roh- und Werkstoff* 62(1): 1-8.
- Piter, J.; Zerbino, R.; Blaß, H. 2004b.** Machine strength grading of Argentinean *Eucalyptus grandis*. Main grading parameters and analysis of strength profiles according to European standards. *Holz als Roh- und Werkstoff* 62(1): 9-15.

- Piter, J.; Zerbino, R.; Blaß, H. 2006.** Deflections in beams of Argentinean *Eucalyptus grandis* under long-term loading. *Holz als Roh- und Werkstoff* 64: 351-355.
- Piter, J.; Cotrina, A.; Sosa Zitto, A.; Stefani, P.; Torrán, E. 2007a.** Determination of characteristic strength and stiffness values in glued laminated beams of Argentinean *Eucalyptus grandis* according to European standards. *Holz als Roh- und Werkstoff* 65(4): 261-266.
- Piter, J.; Calvo, C.; Cuffré, A.; Rougier, V.; Sosa Zitto, M.; Torrán, E. 2007b.** Creep in structural-sized beams of Argentinean *Eucalyptus grandis*. *Maderas: Ciencia Tecnología* 9(2): 117-126.
- Piter, J. 2012.** Size effect on bending strength in sawn timber of fast-growing Argentinean *Eucalyptus grandis*. Analysis according to the criterion of European standards. *Eur. J. Wood Prod.* 70:17-24.
- Piter, J.; Ramos, R.; Marcó, M.; Marcó, J.; Torrán, E.; Sosa Zitto, M.; Fank, P. 2018.** Guía para el proyecto de estructuras de madera con bajo compromiso estructural en base al Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601. Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), 130 pp. Buenos Aires, Argentina.
- Quil Villa, C. 2009.** Estimación del módulo de elasticidad por medio de la velocidad de propagación del sonido en madera de Aromo australiano. Trabajo de Titulación. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. 73 pp.
- Ramos, R.; Villalba, D.; Gómez, R.; Sosa Zitto, A.; Torrán, E.; Piter, J. 2015.** Comportamiento mecánico y densidad de la madera de pino resinoso cultivado en Entre Ríos. Análisis comparativo de los resultados obtenidos para 2 plantaciones de distinta edad. XXIX Jornadas Forestales de Entre Ríos, 5 pp. Concordia, Entre Ríos.
- Ranta-Maunus, A. 1995.** Creep and effects of moisture in timber. *Informationsdienst Holz, STEP 3*: pp. 4/1-4/21. Düsseldorf, Germany.
- Ranta-Maunus, A.; Korttesmaa, M. 2000.** Creep of timber during eight years in natural environments. *World Conference on Timber Engineering*, 6 pp., Canadá.
- Ribas de Andrade, J.; Alves Dias, A. 2017.** Classificação estrutural de peças de madeira de *Pinus elliottii* por meio do módulo de elasticidade obtido por ondas de tensão longitudinais. II Congreso Latinoamericano de Estructuras de Madera, II Congreso Ibero-Latinoamericano de la Madera en la Construcción, 10 pp., Buenos Aires, Argentina.
- Roblot, G.; Bléron, L.; Mériaudeau, F.; Marchal, R. 2010.** Automatic computation of the knot area ratio for machine strength grading of Douglas-fir and Spruce timber. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 14(10): 1317-1332.
- Roszyk, E.; Moliński, W.; Jasińska, M. 2010.** The effect of microfibril angle on hygromechanic creep of wood under tensile stress along the grains. *Wood Research* 55(3): 13-24.
- Roszyk, E.; Mania, P.; Moliński, W. 2012.** The influence of microfibril angle on creep Scotch Pine wood under tensile stress along the grains. *Wood Research* 57(3): 347-358.
- Rouger, F. 1995.** Volume and stress distribution effects. *Timber Engineering STEP 1: Basis of design, material properties, structural components and joints*. Centrum Hout, The Netherlands, p. B1/1-B1/8.
- Rouger, F.; Barrett, J. 1995.** Size effects in timber. In: *Informationsdienst Holz, STEP 3*. Sachverlag Holz, Düsseldorf, pp. 3/1-3/24.
- Sagot, G. 1995.** Detailing for durability. *Timber Engineering. Basis of design, material properties, structural components and joints*. STEP1: pp. A14/1-A14/9. Centrum Hout, The Netherlands.
- SANS 10163-1. 2003.** The structural use of timber. Part 1: Limit-states design South African National Standard.

- Santini, E.; Haselein, C.; Gatto, D. 2000.** Análise comparativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira de três coníferas de florestas plantadas. *Ciência Florestal* 10(1): 85-93.
- Sauter, U.; Diebold, R. 1997.** Steigerung der Ausbeute von Kiefern-Brettlamellen hoher Tragfähigkeit durch maschinelle Festigkeitsortierung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 55: 237-244.
- Shen, Y.; Gupta, R. 1997.** Evaluation of creep behavior of structural lumber in natural environment. *Wood Engineering* 47(1): 89-96.
- SIFIP. 2009.** Sistema de Información Foresto-Industrial Provincial. Ministerio del Agro y la Producción, Inventario Forestal. Disponible en <<http://extension.facfor.unam.edu.ar/sifip/inventario.htm>>, acceso 30/01/2014.
- Sosa Zitto, A.; Köhler, J.; Piter, J. 2012.** Embedding strength in joints of fast-growing Argentinean *Eucalyptus grandis* with dowel-type fasteners. Analysis according to the criterion adopted by European standards. *European Journal of Wood and Wood Products* 70(4): 433-440.
- Sotomayor Castellanos, J.; Villaseñor Aguilar, J. 2006.** Comportamiento viscoelástico de la madera de *Prosopis* sp. *Madera y Bosques* 12(2): 3- 15.
- Sotomayor Castellanos, J. 2014.** Comportamiento en vibraciones longitudinales y transversales de vigas de madera antigua de *Picea abies*. *Tecnociencia Chihuahua: Ingeniería y Tecnología* 8(1): 46-56.
- SPIB. 2014.** Standard Grading Rules for Southern Pine Lumber. Southern Pine Inspection Bureau. Florida, EEUU.
- Steer, P. 1995.** Timber in construction. Timber Engineering STEP 1: Basis of design, material properties, structural components and joints. Pp. A5/1-A5/6. Centrum Hout, The Netherlands.
- Steiger, R.; Arnold, M.; Fontana, M. 2006.** Revisiting EN 338 and EN 384 basics and procedures. In: Proceedings of CIB-W18, Meeting 39, Paper 39-6-2, 16 pp. Florence, Italy.
- Steiger, R.; Arnold, M. 2009.** Strength grading of Norway spruce structural timber: Revisiting property relationships used in EN 338 classification system. *Wood Science and Technology* 43: 259-278.
- Steiger, R.; Arnold, M.; Jockwer, R. 2010.** Property relationships used in EN 338 strength grades of Norway spruce structural timber. In: World Conference on Timber Engineering, , I, Paper 163, 6 pp. Riva del Garda, Italy.
- Stöd, R.; Verkasalo, E.; Heinonen, J. 2016.** Quality and bending properties of sawn timber from commercial thinnings of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *Baltic Forestry* 22(1): 148-162.
- Thelandersson, S. 1995a.** Deformations in timber structures. Informationsdienst Holz. STEP 3: pp. 11/1-11/16. Düsseldorf, Germany.
- Thelandersson S. 1995b.** Serviceability limit states - Deformations. In Timber Engineering STEP 1. Pp. A17/1-A17/8. Centrum Hout, The Netherlands.
- Tinto, J. 1997.** Tecnología de las maderas argentinas y del mundo. Edit. AGRO VET, 565 pp. Buenos Aires, Argentina.
- Torrán, E.; Sosa Zitto, A.; Gonzalez, A.; Piter, J. 2008.** Creep in beams of Argentinean *Eucalyptus grandis* loaded in unseasoned state. *Holz Roh Werkst* 66: 201-205.
- UNE 56544. 2011.** Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de Coníferas. Asociación Española de Normalización y Certificación. España.
- UNIT 1261. 2018.** Madera aserrada de uso estructural. Clasificación visual. Madera de pino taeda y pino ellioti (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*). Instituto Uruguayo de Normas técnicas, Montevideo.

- Vignote Peña, S.; Martínez Rojas, I. 2006.** Tecnología de la madera. Edit. Mundi-Prensa, 685 pp. Madrid, España.
- Vihavainen, T. 1995.** Environmental aspects of timber. In Timber Engineering STEP 1, pp. A16/1-A16/8. Centrum Hout, The Netherlands.
- Wagner, M. 2008.** Antecedentes que fundamentan la actualización de las propiedades mecánicas admisibles asignadas a la madera aserrada de Pino radiata en Nch 1198 en su redacción of.2006. Diseño y construcción en madera, Universidad de Chile, 58 pp.
- Walker, A. 2007.** Enciclopedia de la madera. 150 tipos de madera del mundo. Edit. BLUME, 192 pp. Barcelona, España.
- Weber, E. 2005.** Caracterización física y mecánica de *Pinus taeda* origen Marion en plantaciones de diferentes edades y determinación de usos potenciales. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Misiones, Facultad de Ingeniería Forestal, 143 pp.
- Winck, R.; Fassola, H.; Videla, D.; Suirezs, T.; Area, M.; Pezzutti, R. 2015.** Calidad de madera de *Pinus taeda* de 20 años de edad proveniente de rodales con diferente manejo silvícola. III Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles - VIII Congreso Internacional de Sistemas Agroforestales, pp. 372-376. Misiones, Argentina.
- Yin, Y; Bian, M.; Song, K., Xiao, F.; Xiaomei, J. 2011.** Influence of microfibril angle on within-tree variations in the mechanical properties of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*). IAWA Journal 32(4): 431-442.
- Zaderenko, C. 2000.** Determinación de tiempos de secado por difusión en cámaras convencionales para *Pinus taeda* implantado de Misiones. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Misiones, Maestría en Tecnología de la Madera, Celulosa y Papel, 186 pp. Misiones, Argentina.

ANEXO

DATOS

En el presente anexo se expone, en primer lugar, la planilla base para el registro de los datos correspondientes a las características visuales de una pieza en general, en los apartados subsiguientes se muestran los datos particulares de cada cuerpo de prueba, primero los relacionados con las características visuales y luego aquellos que se corresponden con las propiedades físico-mecánicas. Estos valores son los que se emplearon en el desarrollo del trabajo de tesis y permiten, por lo tanto, verificar los resultados presentados y discutidos.

A.1. Registro de las características visuales

La planilla de registro para el estudio de las dimensiones y características visuales es expuesta en la Figura A.1. Ésta fue similar para todos los cuerpos de prueba, en primer lugar recoge la información de carácter general, la que incluye la identificación de la probeta, la especie, la escuadría y la fecha del registro. Seguidamente reúne los datos correspondientes a la geometría de la pieza (ancho, alto y largo), el tipo de corte y todas las características visuales a ser relevadas, las cuales fueron definidas en el Apartado 3.2.1. Cabe destacar que las medidas de cada singularidad (nudos, fisuras, aristas faltantes, etc.) fueron tomadas conforme a un sistema de referencia que permite localizar su ubicación exacta en la pieza. El eje “x” fue establecido en sentido longitudinal y paralelo al eje de la pieza, mientras que el eje “y”, en sentido transversal. El origen de cada cara fue posicionado en el canto izquierdo y éstas fueron numeradas empezando por la primer cara -coincidente con la ancha- y en sentido antihorario hasta la cuarta, lo cual puede apreciarse en la Figura A.2.

Anexo - Datos

1. IDENTIFICACIÓN

Escudría: Probeta Nº Terminación: cepillada
 Especie: Fecha:

1.1. Medidas Reales

Ancho (b) Extremo Izquierdo: Medio: E. Derecho: Promedio: [mm]
Alto (h) Extremo Izquierdo: Medio: E. Derecho: Promedio: [mm]
Largo total promedio: [mm]

1.2. Tipo de Corte

Esquemas de corte:

Extremo Izquierdo [EI]:

Extremo Derecho [ED]:

2. DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS VISUALES

2.1. Nudos (dimensiones en mm)

Lado	Nº	X_i	X_f	y abajo	$d//$	y arriba	d mín	d máx	d_{mcv}	Observaciones

2.1.1. Agrupamiento de nudos

Lado	Nº	L agrup.	X_i	X_f	Identif. nudos involucrados	Σd ind	Σd sup	Observaciones

Nudos en la misma sección de corte

Nudos en racimo

2.2. Dirección de las fibras (dimensiones en mm)

Lado	X_i	X_f	x (horiz)	Y_i	Y_f	y (vert)	Relación $y/x * 100$	Observaciones

2.3. Anillos de crecimiento

Extremo	Médula	Longitud medida	Cantidad de anillos	Espesor anillo mayor	Espesor anillo menor	Ver/Prim	Observaciones
Izquierdo							
Derecho							

2.4. Fisuras (dimensiones en mm) GL - Grieta lateral. GS - Grieta superficial. R - Rajadura (fisura pasante)

Lado	Nº	X_i	X_f	Y_i	Y_f	Longitud	Long //	Ancho	Profund.	Prof //	Observaciones

2.5. Alabeos (dimensiones en mm)

Tipo	Deformación	Longitud	Cálculo	Observaciones
Abarquillado				
Combado				
Encorvado				
Revirado (Alabeo)				

2.6. Médula (dimensiones en mm)

Lado	Nº	X_i	X_f	y abajo	$y //$	y arriba	Longitud	Ancho	Observaciones

2.7. Arista Faltante (dimensiones en mm)

Lado	X_i	X_f	Longitud	h_{11}	h_{12}	b_{11}	b_{12}	h_{21}	h_{22}	b_{21}	b_{22}	Observaciones

2.8. Depósitos de Resina//Corteza (dimensiones en mm)

Lado	Nº	X_i	X_f	y abajo	$y //$	y arriba	Longitud	Ancho	Profund.	Observaciones

2.9. Ataques biológicos (dimensiones en mm)

Parámetro	Descripción (Ubicación, dimensiones, profundidad, tipo, etc.)
Coloración	Amarillo claro
Orificios	General
Pudriciones	General
Hongos u otros	General

Figura A.1. Planilla modelo para el registro de las dimensiones y parámetros visuales de un cuerpo de prueba en general

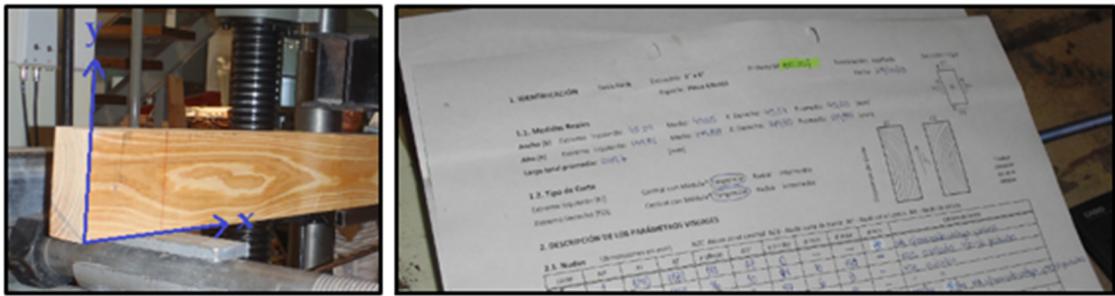


Figura A.2.Izq. Sistema de referencia x-y cara 1. Der. Ejemplo registro de dimensiones

La nudosidad resultó ser el parámetro visual con mayor incidencia sobre las propiedades resistentes para la madera aserrada del pino resinoso en estudio (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*). Para un análisis más profundo de esta singularidad, de cada pieza estudiada fue realizada una representación gráfica a escala de la sección crítica en la que quedaron reflejados cada uno de los nudos intervinientes, ya sea en la sección transversal como en una de ancho igual a 150 mm. La finalidad de esta representación fue determinar los valores para los distintos criterios de nudosidad contemplados (K, KAR, KAR 150, KARM, KARM 150) y, a su vez, determinar el módulo resistente asociado a cada uno (ver Apéndice 3.2.1.Nudos). En la Figura A.3 se exhibe, en formato manual, la representación gráfica de ambas secciones transversales con los nudos intervinientes, las mismas luego fueron volcadas a un programa de diseño por computadora.

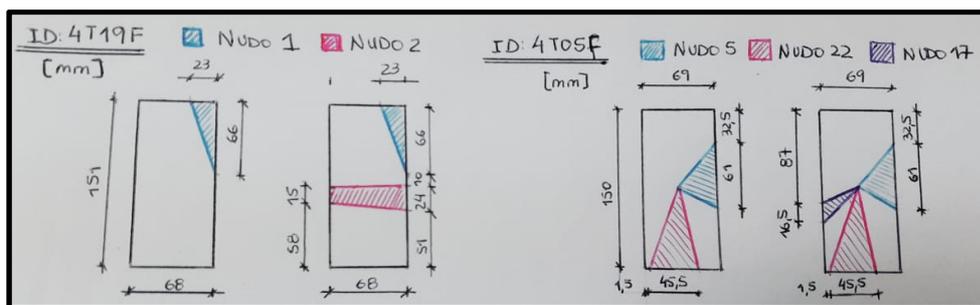


Figura A.3. Registro de la nudosidad en la sección crítica. Izq.: Pieza sin médula. Der.: Pieza con médula

A.2. Datos particulares de cada cuerpo de prueba

Los datos exhibidos en las tablas subsiguientes se corresponden con los valores que fueron empleados en el desarrollo del presente trabajo de tesis y permiten, por lo tanto, verificar los resultados presentados y discutidos. En primer lugar (Tabla A.2, Tabla A.3)

aparecen los datos relacionados con las características visuales más relevantes junto a los valores del módulo resistente de cada sección asociada a los diferentes criterios de nudosidad contemplados (KAR, KAR 150, KARM, KARM 150). Posteriormente, la Tabla A.4, Tabla A.5 y Tabla A.6 exhiben los valores correspondientes a las dimensiones y propiedades físico-mecánicas de cada cuerpo de prueba sometido a flexión estática de canto, de plano y tracción paralela a las fibras, respectivamente. Por su parte, en la Tabla A.7 aparecen los valores relacionados con las piezas sometidas a ensayos con cargas de larga duración. Para facilitar la comprensión de las distintas tablas de datos, a continuación se presenta una lista (Tabla A.1) con el detalle de las abreviaturas que aparecen en las leyendas de las mismas.

Tabla A.1. Abreviaturas correspondientes a las leyendas de las tablas de valores

Símbolo	Definición	Unidad
An.crec. A	Cantidad de anillos de crecimiento por pulgada	-
An.crec. B	Ancho del mayor anillo de crecimiento	mm
b	Ancho de la sección transversal en un ensayo de flexión o la menor dimensión de la sección en un ensayo de tracción	mm
E_d	Módulo de elasticidad dinámico	N/mm ²
$E_{m,g}$	Módulo de elasticidad global en flexión	N/mm ²
$E_{m,l}$	Módulo de elasticidad local en flexión	N/mm ²
Es	Especie	-
E_t	Módulo de elasticidad en tracción	N/mm ²
f_m	Resistencia a la flexión ajustada a la altura de referencia	N/mm ²
F_m	Resistencia a la flexión	N/mm ²
f_t	Resistencia a la tracción ajustada a la altura de referencia	N/mm ²
F_t	Resistencia a la tracción	N/mm ²
h	Altura de la probeta en un ensayo a flexión o ancho en un ensayo a tracción	mm
H*	Contenido de humedad	%
ID	Identificación del cuerpo de prueba por muestra	-
L	Longitud total del cuerpo de prueba	mm
M	Muestra	-
Med.	Presencia de médula	-
P.e.	<i>Pinus elliottii</i>	-
P.t.	<i>Pinus taeda</i>	-
Δ_{inst}	Deformación vertical instantánea	mm
Δ_i^*	Deformación vertical a los "i" días	mm
ρ_o	Densidad aparente inicial	kg/m ³
ρ_f	Densidad aparente final	kg/m ³

Nota. (*) i toma los valores 7, 184, 365, 392 según Tabla A.7.

Tabla A.2. Características visuales y módulo resistente asociados a los cuerpos de prueba sometidos a flexión de canto (M1, M2, M3, M4)

ID	M	Es	Med	An. crec.		Nudosidad [-]				Módulo resistente remanente [mm ³]				
				A	B	KAR	KARM	KAR 150	KARM 150	K	KAR	KARM	KAR 150	KARM 150
1	M1	P.e.	No	2,5	17	0,29	0,00	0,39	0,17	0,50	68041	65470	55814	48535
2	M1	P.e.	No	2,9	15	0,13	0,24	0,38	0,24	0,68	53901	43067	51165	42966
3	M1	P.e.	No	2,9	12	0,16	0,05	0,31	0,29	0,37	67416	62880	52676	46033
4	M1	P.e.	No	1,9	19	0,19	0,10	0,19	0,10	0,33	63508	53688	63508	53688
5	M1	P.e.	Si	2,6	11	0,22	0,22	0,24	0,22	0,31	58732	51416	58807	51416
6	M1	P.e.	Si	3,3	10	0,18	0,15	0,22	0,15	0,17	60333	52701	60121	52701
7	M1	P.e.	Si	3,0	12	0,34	0,38	0,57	0,54	0,41	47869	40330	31987	27054
8	M1	P.e.	Si	1,3	22	0,26	0,19	0,36	0,36	0,44	57164	51772	45821	41926
9	M1	P.e.	No	2,0	16	0,31	0,33	0,31	0,33	0,50	48393	39897	48393	39897
10	M1	P.e.	Si	3,6	11	0,21	0,25	0,21	0,25	0,34	53743	44839	53743	44839
11	M1	P.e.	Si	2,4	13	0,19	0,14	0,33	0,28	0,75	61735	51874	49391	41622
12	M1	P.e.	Si	1,9	16	0,29	0,30	0,29	0,30	0,32	49180	41483	49180	41483
13	M1	P.e.	Si	2,5	14	0,21	0,21	0,23	0,21	0,34	54304	45012	54157	45012
14	M1	P.e.	No	3,9	9	0,24	0,42	0,31	0,42	0,61	42447	32958	42276	32958
15	M1	P.e.	No	2,2	19	0,09	0,06	0,19	0,09	0,20	68835	58586	63704	56955
16	M1	P.e.	No	2,7	13	0,32	0,16	0,32	0,16	0,47	57174	55855	57174	55855
17	M1	P.e.	No	2,3	15	0,22	0,36	0,26	0,44	0,42	47743	38819	40948	31882
18	M1	P.e.	Si	3,4	14	0,23	0,06	0,34	0,26	0,40	66769	61592	52302	42910
19	M1	P.e.	No	2,9	11	0,12	0,16	0,12	0,16	0,33	60589	50399	60589	50399
20	M1	P.e.	No	4,4	10	0,17	0,31	0,27	0,34	0,37	52456	41963	48533	39301
21	M1	P.e.	Si	2,9	14	0,20	0,13	0,44	0,29	0,75	60159	51588	50877	46383
22	M1	P.e.	Si	2,4	13	0,10	0,14	0,29	0,24	0,35	61901	51530	57663	49063
23	M1	P.e.	No	2,7	11	0,21	0,32	0,31	0,33	0,32	53668	44057	51539	43717
24	M1	P.e.	No	3,2	13	0,37	0,35	0,37	0,35	0,45	47139	39865	47139	39865
25	M1	P.e.	Si	3,3	11	0,17	0,25	0,29	0,36	0,64	53081	43113	46977	38554
26	M1	P.t.	No	3,3	12	0,09	0,18	0,14	0,18	0,38	55977	44925	55695	44926
27	M1	P.t.	No	4,1	10	0,37	0,01	0,41	0,09	0,45	65276	64229	61808	54042
28	M1	P.t.	Si	2,3	13	0,37	0,23	0,37	0,23	0,81	52629	46195	52629	46195
29	M1	P.t.	No	4,8	7	0,34	0,45	0,40	0,58	0,56	44927	38167	35090	28184
30	M1	P.t.	No	6,1	6	0,31	0,02	0,31	0,02	0,32	66529	65098	66529	65098
31	M1	P.t.	Si	2,2	14	0,30	0,28	0,41	0,43	0,48	52813	43988	40873	34017
32	M1	P.t.	No	2,4	17	0,40	0,48	0,40	0,48	0,48	43318	36989	43318	36989
33	M1	P.t.	No	2,4	13	0,36	0,00	0,36	0,00	0,37	66291	65487	66291	65487
34	M1	P.t.	No	3,7	12	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	75003	65627	75003	65627
35	M1	P.t.	No	6,6	5	0,23	0,12	0,23	0,12	0,46	61377	51257	61377	51257
36	M1	P.t.	No	1,7	17	0,19	0,11	0,19	0,11	0,38	65173	56541	65173	56541
37	M1	P.t.	No	6,1	6	0,09	0,16	0,09	0,16	0,40	60147	49416	60147	49416
38	M1	P.t.	Si	2,4	13	0,42	0,49	0,57	0,62	0,48	42940	36740	32689	27725
39	M1	P.t.	No	2,5	14	0,32	0,44	0,42	0,45	0,42	44486	37681	43539	36236
40	M1	P.t.	Si	1,8	14	0,12	0,20	0,21	0,23	0,55	59898	51786	55416	49645
41	M1	P.t.	No	2,8	13	0,24	0,23	0,24	0,23	0,26	55586	48388	55586	48388
42	M1	P.t.	No	1,6	19	0,22	0,14	0,22	0,14	0,47	59412	50005	59412	50005
43	M1	P.t.	No	4,8	14	0,28	0,47	0,28	0,47	0,38	41275	35656	41275	35656
44	M1	P.t.	No	3,3	12	0,31	0,41	0,31	0,41	0,29	45904	38460	45904	38460
45	M1	P.t.	No	4,6	12	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	75050	65669	75050	65669
46	M1	P.t.	No	4,9	9	0,09	0,15	0,09	0,15	0,33	60086	49153	60086	49153
47	M1	P.t.	Si	5,4	8	0,33	0,16	0,33	0,16	0,35	57155	51447	57155	51447
48	M1	P.t.	Si	1,6	18	0,30	0,22	0,30	0,22	0,33	55837	46727	55837	46727
49	M1	P.t.	No	1,7	21	0,40	0,36	0,40	0,36	0,58	45572	37508	45572	37508
50	M1	P.t.	No	3,1	14	0,22	0,00	0,26	0,05	0,29	67105	65620	64032	62440

Continuación Tabla A.2

ID	M	Es	Med	An. crec.		KAR	Nudosidad [-]				Módulo resistente remanente [mm³]			
				A	B		KARM	KAR 150	KARM 150	K	KAR	KARM	KAR 150	KARM 150
47	M1	P.t.	Si	5,4	8	0,33	0,16	0,33	0,16	0,35	57155	51447	57155	51447
48	M1	P.t.	Si	1,6	18	0,30	0,22	0,30	0,22	0,33	55837	46727	55837	46727
49	M1	P.t.	No	1,7	21	0,40	0,36	0,40	0,36	0,58	45572	37508	45572	37508
50	M1	P.t.	No	3,1	14	0,22	0,00	0,26	0,05	0,29	67105	65620	64032	62440
51	M1	P.t.	Si	2,5	12	0,32	0,26	0,32	0,26	0,48	49934	42335	49934	42335
52	M1	P.t.	Si	2,2	15	0,28	0,22	0,38	0,38	0,69	53820	45808	44625	38369
53	M1	P.t.	No	2,4	13	0,13	0,16	0,13	0,16	0,15	63383	54950	63383	54950
54	M1	P.t.	No	2,1	16	0,18	0,31	0,18	0,31	0,38	49282	39515	49282	39515
55	M1	P.t.	Si	3,6	9	0,29	0,37	0,37	0,42	0,34	45861	38000	44462	37271
56	M1	P.t.	No	4,2	11	0,59	0,86	0,66	0,90	0,74	13759	8072	9615	4360
57	M1	P.t.	No	4,0	9	0,58	0,56	0,58	0,56	0,55	36284	30330	36284	30330
58	M1	P.t.	No	3,9	9	0,16	0,15	0,16	0,15	0,09	61238	52915	61238	52915
59	M1	P.t.	No	2,0	15	0,38	0,24	0,38	0,24	0,53	54215	45767	54215	45767
60	M1	P.t.	No	1,8	16	0,42	0,16	0,66	0,60	0,90	56118	52039	32342	26674
61	M1	P.t.	Si	2,1	14	0,33	0,42	0,33	0,42	0,34	45070	37947	45070	37947
62	M1	P.t.	No	5,6	11	0,30	0,19	0,30	0,19	0,30	57764	52872	57764	52872
63	M1	P.t.	No	4,9	13	0,34	0,07	0,34	0,07	0,37	62774	61243	62774	61243
64	M1	P.t.	No	2,9	14	0,33	0,17	0,33	0,17	0,35	58983	54385	58983	54385
1	M2	P.e	Si	1,88	17,0	0,1	0,02	0,10	0,02	0,30	156603	140955	156603	140955
2	M2	P.e	No	2,18	14,0	0,3	0,01	0,27	0,01	0,36	162186	147385	162186	147385
3	M2	P.e	No	1,13	23,0	0,4	0,43	0,44	0,43	0,48	100716	83905	100716	83905
4	M2	P.e	Si	2,54	15,0	0,2	0,32	0,24	0,32	0,50	118651	100073	117678	100073
5	M2	P.e	No	1,64	19,0	0,3	0,26	0,28	0,26	0,34	123605	107465	123605	107465
6	M2	P.e	No	4,13	10,0	0,1	0,06	0,15	0,06	0,31	148247	125554	148247	125554
7	M2	P.e	Si	2,16	13,0	0,3	0,35	0,32	0,35	0,80	102301	84693	102301	84693
8	M2	P.e	No	4,97	8,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	164653	144071	164653	144071
9	M2	P.e	Si	2,67	11,0	0,2	0,18	0,29	0,28	0,33	128055	106223	111468	92603
10	M2	P.e	No	2,01	15,0	0,4	0,29	0,36	0,29	0,39	115893	101017	115893	101017
11	M2	P.e	No	2,34	13,0	0,1	0,05	0,12	0,05	0,19	147764	137301	147764	137301
12	M2	P.e	No	2,38	14,0	0,4	0,47	0,35	0,47	0,37	95278	81703	95278	81703
13	M2	P.e	Si	2,31	15,0	0,2	0,32	0,42	0,44	0,69	106909	86996	86897	71273
14	M2	P.e	Si	2,31	13,5	0,4	0,33	0,42	0,35	0,57	106652	88853	103170	86393
15	M2	P.e	No	3,63	13,0	0,0	0,08	0,04	0,08	0,17	148427	123185	148427	123185
16	M2	P.e	No	3,26	12,0	0,2	0,04	0,26	0,07	0,34	142248	138793	139638	135392
17	M2	P.e	No	4,23	9,0	0,1	0,27	0,14	0,27	0,22	117151	93019	117151	93019
18	M2	P.e	Si	1,24	21,0	0,4	0,37	0,79	0,83	0,87	100815	87639	26737	17566
19	M2	P.e	Si	2,23	16,0	0,1	0,06	0,15	0,08	0,43	156933	138860	149936	135283
20	M2	P.e	No	4,68	10,0	0,5	0,62	0,50	0,67	0,70	77210	70355	70300	63045
21	M2	P.e	No	3,11	15,0	0,3	0,19	0,26	0,19	0,41	121366	99412	121366	99412
22	M2	P.e	No	1,24	21,0	0,3	0,48	0,37	0,49	0,67	78328	64557	71584	63996
23	M2	P.e	No	2,21	15,0	0,1	0,10	0,11	0,10	0,34	146337	121555	146196	121555
24	M2	P.e	Si	1,95	17,0	0,2	0,13	0,32	0,15	0,51	137911	121323	131568	119486
25	M2	P.e	Si	1,54	22,0	0,1	0,01	0,15	0,01	0,31	161979	143267	161657	143267
26	M2	P.e	No	2,99	13,0	0,1	0,00	0,05	0,00	0,11	171948	150834	171948	150834
27	M2	P.e	No	5,60	12,0	0,4	0,54	0,40	0,54	0,47	78580	62684	78580	62684
28	M2	P.e	No	4,62	8,5	0,1	0,00	0,09	0,00	0,17	163053	147752	163053	147752
29	M2	P.e	No	4,79	11,0	0,2	0,28	0,28	0,28	0,49	121172	97204	115581	96005
30	M2	P.t.	Si	2,08	16,0	0,4	0,27	0,39	0,27	0,50	111714	96508	111714	96508
31	M2	P.t.	No	2,03	15,0	0,3	0,28	0,46	0,47	0,40	117107	100546	95117	86774
32	M2	P.t.	No	2,05	16,0	0,2	0,13	0,18	0,13	0,68	134547	111505	134547	111505
33	M2	P.t.	No	2,36	12,0	0,3	0,06	0,30	0,06	0,48	148441	136431	148441	136431
34	M2	P.t.	No	2,36	13,0	0,3	0,46	0,47	0,46	0,27	98025	80860	97701	80860

Continuación Tabla A.2

ID	M	Es	Med	An. crec.			Nudosidad [-]				Módulo resistente remanente [mm ³]			
				A	B	KAR	KARM	KAR 150	KARM 150	K	KAR	KARM	KAR 150	KARM 150
35	M2	P.t.	No	2,06	14,0	0,6	0,51	0,56	0,51	0,53	81054	80348	81054	80348
36	M2	P.t.	Si	2,03	16,0	0,4	0,47	0,43	0,47	0,94	84131	68718	84131	68718
37	M2	P.t.	Si	2,31	13,0	0,6	0,73	0,70	0,82	0,60	50004	42801	30579	27200
38	M2	P.t.	No	3,02	12,0	0,6	0,88	0,59	0,88	0,70	26056	15852	26056	15852
39	M2	P.t.	Si	2,46	12,0	0,3	0,28	0,32	0,28	0,44	112480	93105	112480	93105
40	M2	P.t.	No	2,09	15,0	0,3	0,29	0,28	0,29	0,29	118239	101183	118239	101183
41	M2	P.t.	Si	2,54	12,0	0,1	0,02	0,09	0,05	0,40	162115	145221	160253	144132
42	M2	P.t.	No	3,18	10,0	0,3	0,01	0,31	0,01	0,35	160420	147666	160420	147666
43	M2	P.t.	Si	2,40	12,0	0,1	0,08	0,14	0,08	0,44	151119	128886	151149	128886
44	M2	P.t.	No	2,12	13,0	0,3	0,20	0,26	0,20	0,40	128457	116312	128457	116312
45	M2	P.t.	No	1,69	18,0	0,3	0,33	0,30	0,33	0,29	106102	89176	106102	89176
46	M2	P.t.	No	1,62	21,5	0,5	0,43	0,53	0,43	0,54	90448	83492	90448	83492
47	M2	P.t.	Si	2,19	15,5	0,5	0,64	0,59	0,64	0,42	62674	51369	62267	51369
48	M2	P.t.	Si	1,88	14,0	0,3	0,14	0,31	0,14	0,54	133374	118060	133374	118060
49	M2	P.t.	No	1,98	16,0	0,4	0,68	0,37	0,68	0,63	56883	37768	56883	37768
50	M2	P.t.	No	2,67	14,0	0,4	0,40	0,40	0,40	0,55	96402	85144	96035	85144
51	M2	P.t.	Si	2,77	13,0	0,3	0,25	0,31	0,25	0,45	119348	99648	118384	99648
52	M2	P.t.	No	2,82	9,0	0,3	0,23	0,31	0,23	0,78	128986	107574	129307	107574
53	M2	P.t.	Si	2,99	12,0	0,2	0,16	0,39	0,32	0,71	135153	114028	107847	91387
54	M2	P.t.	No	3,81	10,0	0,1	0,04	0,25	0,06	0,48	154270	141892	153091	141874
55	M2	P.t.	No	1,87	20,0	0,4	0,18	0,43	0,18	0,45	126440	118869	126440	118869
56	M2	P.t.	No	1,59	22,0	0,3	0,32	0,27	0,32	0,53	117614	110249	117614	110249
57	M2	P.t.	No	1,88	19,0	0,2	0,38	0,22	0,38	0,28	103148	84662	103148	84662
58	M2	P.t.	No	1,48	24,0	0,3	0,00	0,31	0,00	0,36	158458	147712	158458	147712
59	M2	P.t.	No	1,67	18,0	0,2	0,26	0,16	0,26	0,29	125795	102432	125795	102432
60	M2	P.t.	No	1,76	16,5	0,1	0,00	0,11	0,04	0,23	166710	148967	159188	134647
61	M2	P.t.	No	1,9	24,0	0,24	0,04	0,24	0,04	0,39	154173	145422	154173	145422
1	M3	P.e.	Si	2,7	19,0	0,38	0,43	0,58	0,54	0,73	143081	118034	114040	100667
2	M3	P.e.	Si	2,8	15,0	0,15	0,27	0,15	0,27	0,74	179077	143314	179077	143314
3	M3	P.e.	Si	3,8	15,5	0,09	0,01	0,17	0,13	0,36	252592	225217	211689	181092
4	M3	P.e.	Si	4,2	14,0	0,27	0,16	0,27	0,16	0,36	201321	180008	201321	180008
5	M3	P.e.	Si	3,0	14,0	0,24	0,31	0,34	0,31	0,68	168620	137909	163908	137909
6	M3	P.e.	Si	2,5	16,0	0,14	0,02	0,14	0,02	0,27	247255	218799	247255	218799
7	M3	P.e.	Si	2,6	18,0	0,26	0,19	0,26	0,19	0,47	207624	182062	207624	182062
8	M3	P.e.	Si	2,8	11,0	0,14	0,14	0,14	0,14	0,40	216847	181050	216847	181050
9	M3	P.e.	No	4,2	14,0	0,26	0,25	0,26	0,25	0,54	182229	152679	182229	152679
10	M3	P.e.	Si	4,0	10,0	0,39	0,40	0,39	0,40	0,56	155394	130621	155394	130621
11	M3	P.e.	Si	2,9	15,0	0,36	0,44	0,39	0,44	0,54	143176	121571	142522	121571
12	M3	P.e.	No	2,3	13,0	0,45	0,35	0,47	0,35	0,46	156423	137877	156057	137877
13	M3	P.e.	No	2,2	19,0	0,51	0,65	0,51	0,65	0,54	105714	84199	105714	84199
14	M3	P.e.	No	4,4	13,0	0,38	0,57	0,38	0,57	0,72	109624	84917	109624	84917
15	M3	P.e.	Si	2,7	17,0	0,18	0,27	0,26	0,27	0,43	185307	153734	184024	153734
16	M3	P.e.	No	3,0	15,0	0,09	0,16	0,09	0,16	0,43	209611	171703	209611	171703
17	M3	P.e.	Si	4,4	11,0	0,17	0,16	0,32	0,39	0,62	208123	179304	158385	129734
18	M3	P.e.	No	3,5	16,0	0,21	0,00	0,21	0,00	0,42	251983	226799	251983	226799
19	M3	P.e.	Si	2,9	16,0	0,25	0,19	0,25	0,19	0,33	203825	178012	203825	178012
20	M3	P.e.	Si	2,8	12,0	0,34	0,50	0,34	0,50	0,55	126653	93216	126653	93216
21	M3	P.e.	Si	2,0	15,0	0,14	0,01	0,22	0,14	0,26	245747	225329	214142	189916
22	M3	P.e.	Si	2,2	16,0	0,16	0,12	0,16	0,12	0,17	219536	189568	219536	189568
23	M3	P.e.	Si	2,2	15,0	0,13	0,08	0,14	0,08	0,26	233426	202665	233092	202665
24	M3	P.e.	Si	3,5	15,0	0,15	0,07	0,15	0,07	0,29	237308	208399	237308	208399
25	M3	P.e.	Si	2,9	15,0	0,07	0,05	0,09	0,05	0,16	242964	208066	243172	208066

Continuación Tabla A.2

ID	M	Es	Med	An. crec.		Nudosidad [-]				Módulo resistente remanente [mm ³]				
				A	B	KAR	KARM	KAR	KARM	K	KAR	KARM	KAR	KARM
								150	150				150	150
28	M4	P.t.	No	2,7	12,0	0,47	0,57	0,47	0,57	0,65	194578	150729	194578	150729
29	M4	P.t.	No	3,5	13,0	0,15	0,25	0,19	0,25	0,46	320569	261504	320333	261504
30	M4	P.t.	Si	2,0	19,0	0,35	0,28	0,48	0,37	0,90	307739	265843	264418	229587
31	M4	P.t.	Si	1,8	19,0	0,27	0,32	0,34	0,33	0,45	288455	237168	281159	234786
32	M4	P.t.	Si	2,5	13,0	0,32	0,22	0,41	0,35	0,30	331629	288422	287034	259055
33	M4	P.t.	Si	2,0	16,0	0,53	0,51	0,53	0,51	0,75	208871	171434	208871	171434
34	M4	P.t.	Si	2,3	18,0	0,25	0,36	0,38	0,40	0,57	279402	226820	252782	210442
35	M4	P.t.	No	2,9	12,5	0,30	0,08	0,30	0,08	0,38	326489	297024	326489	297024
36	M4	P.t.	No	3,0	15,0	0,40	0,34	0,40	0,34	0,78	265021	228749	265021	228749
37	M4	P.t.	No	2,7	13,5	0,28	0,29	0,28	0,29	0,55	319809	262901	319809	262901
38	M4	P.t.	Si	1,6	18,0	0,24	0,20	0,24	0,20	0,67	349481	292814	349481	292814
39	M4	P.t.	No	3,2	18,0	0,23	0,31	0,23	0,31	0,26	315091	262858	315091	262858
40	M4	P.t.	No	3,4	15,0	0,63	0,63	0,63	0,63	0,39	159399	139798	159399	139798
41	M4	P.t.	No	2,8	14,0	0,23	0,32	0,30	0,32	0,44	292653	238777	291269	238777
42	M4	P.t.	Si	2,2	15,0	0,34	0,26	0,42	0,30	0,45	328397	286792	312229	276185
43	M4	P.t.	Si	2,2	16,5	0,26	0,20	0,26	0,20	0,45	341770	290111	341770	290111
44	M4	P.t.	No	2,6	14,5	0,17	0,09	0,28	0,14	0,37	391010	330956	354081	314851
45	M4	P.t.	No	3,0	15,5	0,24	0,17	0,24	0,17	0,32	343553	311143	343553	311143
46	M4	P.t.	No	3,0	13,0	0,25	0,43	0,25	0,43	0,25	265758	222118	265758	222118
47	M4	P.t.	Si	1,5	19,0	0,35	0,30	0,35	0,30	0,76	291671	249423	291671	249423
48	M4	P.t.	Si	1,9	19,0	0,32	0,29	0,34	0,29	0,62	264952	224115	262547	224107
49	M4	P.t.	No	3,2	13,0	0,38	0,44	0,38	0,44	0,92	229514	176232	229514	176232
50	M4	P.t.	Si	1,8	17,0	0,40	0,44	0,44	0,44	0,59	242643	213916	241916	213916

Tabla A.3. Características visuales y módulo resistente asociados a los cuerpos de prueba sometidos a flexión de plano (M5) y a tracción paralela a las fibras (M6)

ID	M	Es	Med	An. crec.		Nudosidad [-]						
				A	B	KAR	KARM	KAR 150	KARM 150	K		
1	M5	P.e.	No	2,3	13,0	0,31	-	0,31	-	-	-	0,33
2	M5	P.e.	No	3,8	7,0	0,26	-	0,26	-	-	-	0,28
3	M5	P.e.	Si	1,9	16,0	0,19	-	0,19	-	-	-	0,52
4	M5	P.e.	No	1,6	17,0	0,01	-	0,01	-	-	-	0,07
5	M5	P.e.	No	1,9	14,0	0,29	-	0,30	-	-	-	0,41
6	M5	P.e.	No	2,8	10,0	0,29	-	0,29	-	-	-	0,31
7	M5	P.e.	Si	2,5	12,0	0,00	-	0,00	-	-	-	0,00
8	M5	P.e.	No	5,4	7,0	0,22	-	0,22	-	-	-	0,24
9	M5	P.e.	No	2,0	13,0	0,20	-	0,20	-	-	-	0,28
10	M5	P.e.	Si	2,1	13,0	0,14	-	0,14	-	-	-	0,27
11	M5	P.e.	No	4,0	9,0	0,24	-	0,55	-	-	-	0,40
12	M5	P.e.	No	3,0	11,0	0,42	-	0,42	-	-	-	0,48
13	M5	P.e.	Si	2,6	13,5	0,15	-	0,15	-	-	-	0,17
14	M5	P.e.	No	2,0	14,5	0,26	-	0,26	-	-	-	0,26
15	M5	P.e.	Si	3,1	10,0	0,08	-	0,08	-	-	-	0,16
16	M5	P.e.	No	3,2	9,5	0,21	-	0,21	-	-	-	0,26
17	M5	P.e.	No	2,1	14,5	0,17	-	0,28	-	-	-	0,31
18	M5	P.e.	Si	2,8	10,0	0,51	-	0,60	-	-	-	0,82
19	M5	P.e.	No	2,2	12,5	0,20	-	0,20	-	-	-	0,21
20	M5	P.e.	No	2,4	16,0	0,21	-	0,21	-	-	-	0,32

Continuación Tabla A.3

ID	M	Es	Med	An. crec.		KAR	Nudosidad [-]			K
				A	B		KARM	KAR 150	KARM 150	
21	M5	P.e.	Si	2,0	13,5	0,37	-	0,37	-	0,88
22	M5	P.e.	No	3,6	7,0	0,28	-	0,28	-	0,29
23	M5	P.e.	No	2,4	13,0	0,14	-	0,14	-	0,15
24	M5	P.e.	No	5,3	7,5	0,06	-	0,09	-	0,17
25	M5	P.e.	Si	2,1	12,5	0,39	-	0,40	-	0,67
26	M5	P.e.	No	3,8	9,0	0,25	-	0,25	-	0,25
27	M5	P.e.	No	4,0	8,0	0,29	-	0,29	-	0,29
28	M5	P.e.	Si	2,1	12,0	0,14	-	0,14	-	0,33
29	M5	P.e.	No	3,3	11,0	0,57	-	0,57	-	0,67
30	M5	P.e.	No	3,7	9,0	0,21	-	0,21	-	0,22
31	M5	P.e.	No	1,6	16,0	0,14	-	0,14	-	0,17
32	M5	P.e.	Si	1,5	20,0	0,10	-	0,13	-	0,39
33	M5	P.e.	No	1,8	14,5	0,36	-	0,36	-	0,40
34	M5	P.e.	Si	2,2	16,0	0,15	-	0,15	-	0,47
35	M5	P.e.	No	2,0	13,0	0,15	-	0,15	-	0,33
36	M5	P.e.	No	2,6	14,5	0,35	-	0,50	-	0,66
37	M5	P.e.	No	3,2	10,0	0,15	-	0,15	-	0,20
38	M5	P.e.	Si	1,6	23,5	0,26	-	0,26	-	0,33
39	M5	P.e.	No	5,3	8,5	0,18	-	0,26	-	0,30
40	M5	P.e.	Si	2,5	13,5	0,20	-	0,39	-	0,64
41	M5	P.e.	Si	1,8	20,0	0,46	-	0,46	-	0,68
42	M5	P.e.	No	3,7	8,0	0,46	-	0,46	-	0,47
43	M5	P.e.	Si	2,0	13,0	0,13	-	0,20	-	0,53
44	M5	P.e.	No	1,6	16,0	0,47	-	0,47	-	0,44
45	M5	P.e.	No	2,0	15,0	0,34	-	0,34	-	0,34
46	M5	P.e.	Si	3,1	10,5	0,15	-	0,15	-	0,22
47	M5	P.e.	No	2,5	15,5	0,21	-	0,21	-	0,23
48	M5	P.e.	No	4,6	10,0	0,29	-	0,29	-	0,30
49	M5	P.e.	No	3,5	9,0	0,26	-	0,26	-	0,37
50	M5	P.e.	Si	1,9	14,5	0,26	-	0,26	-	0,76
51	M5	P.e.	No	2,2	13,0	0,18	-	0,18	-	0,21
52	M5	P.e.	No	3,8	9,0	0,41	-	0,41	-	0,72
53	M5	P.e.	Si	1,6	27,0	0,40	-	0,47	-	0,64
54	M5	P.e.	No	2,1	13,5	0,38	-	0,38	-	0,43
55	M5	P.e.	No	1,9	13,5	0,12	-	0,12	-	0,18
56	M5	P.e.	No	2,3	11,5	0,27	-	0,27	-	0,27
57	M5	P.e.	No	2,2	15,0	0,14	-	0,25	-	0,39
58	M5	P.e.	No	4,3	13,0	0,36	-	0,36	-	0,46
59	M5	P.e.	Si	1,6	16,0	0,16	-	0,29	-	0,24
60	M5	P.e.	Si	2,0	13,0	0,39	-	0,39	-	0,40
61	M5	P.e.	No	2,2	11,5	0,10	-	0,18	-	0,32
62	M5	P.e.	No	3,0	9,5	0,22	-	0,22	-	0,28
63	M5	P.e.	No	4,0	10,5	0,24	-	0,39	-	0,37
64	M5	P.e.	No	2,4	17,5	0,33	-	0,33	-	0,38
65	M5	P.e.	No	2,6	12,0	0,36	-	0,36	-	0,52
66	M5	P.e.	No	3,4	9,0	0,16	-	0,16	-	0,18
67	M5	P.e.	No	2,1	13,5	0,25	-	0,42	-	0,41
68	M5	P.e.	No	3,1	10,0	0,50	-	0,50	-	0,43
69	M5	P.e.	No	2,8	12,5	0,17	-	0,17	-	0,25
70	M5	P.e.	No	2,4	11,5	0,19	-	0,19	-	0,20
71	M5	P.e.	No	1,9	15,0	0,34	-	0,34	-	0,28
72	M5	P.e.	No	3,1	9,0	0,34	-	0,34	-	0,34

Continuación Tabla A.3

ID	M	Es	Med	An. crec.		KAR	Nudosidad [-]			K
				A	B		KARM	KAR 150	KARM 150	
73	M5	P.e.	Si	1,9	15,0	0,25	-	0,25	-	0,21
74	M5	P.e.	No	1,6	19,0	0,19	-	0,24	-	0,25
75	M5	P.e.	Si	2,2	18,0	0,64	-	0,64	-	0,92
76	M5	P.e.	No	1,8	16,0	0,35	-	0,35	-	0,37
77	M5	P.e.	No	2,4	12,0	0,42	-	0,77	-	0,61
78	M5	P.e.	Si	1,8	16,5	0,44	-	0,44	-	0,79
79	M5	P.e.	No	3,6	9,0	0,26	-	0,26	-	0,27
80	M5	P.e.	No	4,8	6,0	0,11	-	0,11	-	0,31
81	M5	P.e.	No	1,3	19,0	0,32	-	0,48	-	0,40
82	M5	P.e.	Si	1,7	15,0	0,28	-	0,42	-	0,60
83	M5	P.e.	No	1,5	20,0	0,34	-	0,34	-	0,75
84	M5	P.e.	Si	1,9	17,5	0,31	-	0,36	-	0,59
85	M5	P.e.	No	2,1	14,0	0,51	-	0,51	-	0,68
86	M5	P.e.	No	2,1	19,0	0,12	-	0,12	-	0,24
87	M5	P.e.	Si	1,8	14,5	0,11	-	0,15	-	0,30
88	M5	P.e.	Si	2,0	20,0	0,72	-	0,84	-	0,69
89	M5	P.e.	No	5,1	9,0	0,30	-	0,30	-	0,31
90	M5	P.e.	No	2,9	12,0	0,33	-	0,33	-	0,55
91	M5	P.e.	Si	1,3	20,0	0,36	-	0,36	-	0,46
92	M5	P.e.	No	3,8	8,0	0,09	-	0,11	-	0,34
93	M5	P.e.	No	2,2	12,5	0,01	-	0,01	-	0,06
94	M5	P.e.	No	1,8	15,0	0,02	-	0,02	-	0,10
95	M5	P.e.	No	2,1	15,0	0,25	-	0,25	-	0,62
96	M5	P.e.	Si	3,2	12,0	0,36	-	0,36	-	0,34
97	M5	P.e.	No	2,7	15,0	0,42	-	0,42	-	0,75
98	M5	P.e.	No	2,9	9,0	0,33	-	0,33	-	0,35
99	M5	P.e.	No	5,5	7,0	0,23	-	0,23	-	0,25
100	M5	P.e.	Si	1,3	21,0	0,21	-	0,21	-	0,17
101	M5	P.e.	No	4,4	9,0	0,00	-	0,00	-	0,00
102	M5	P.e.	No	4,0	7,0	0,01	-	0,01	-	0,11
103	M5	P.e.	No	5,4	6,5	0,18	-	0,18	-	0,26
104	M5	P.e.	No	3,4	9,5	0,26	-	0,26	-	0,29
105	M5	P.e.	No	3,2	11,0	0,00	-	0,00	-	0,00
106	M5	P.e.	No	2,9	9,5	0,00	-	0,00	-	0,00
107	M5	P.e.	No	3,5	9,5	0,00	-	0,00	-	0,00
108	M5	P.e.	No	4,0	8,0	0,00	-	0,00	-	0,00
109	M5	P.e.	No	5,1	6,0	0,08	-	0,08	-	0,17
110	M5	P.e.	No	5,5	8,0	0,00	-	0,00	-	0,00
111	M5	P.e.	No	5,7	7,0	0,00	-	0,00	-	0,00
112	M5	P.e.	No	4,5	10,0	0,14	-	0,14	-	0,15
113	M5	P.e.	No	4,1	8,0	0,09	-	0,09	-	0,09
114	M5	P.e.	No	1,6	16,5	0,29	-	0,29	-	0,29
115	M5	P.e.	Si	3,2	11,5	0,00	-	0,00	-	0,00
116	M5	P.e.	No	4,7	12,0	0,00	-	0,00	-	0,00
117	M5	P.t.	Si	1,3	20,0	0,29	-	0,29	-	0,45
118	M5	P.t.	No	2,7	11,0	0,14	-	0,14	-	0,36
119	M5	P.t.	No	2,8	12,0	0,28	-	0,28	-	0,30
120	M5	P.t.	No	3,2	10,0	0,24	-	0,24	-	0,24
121	M5	P.t.	Si	1,9	17,0	0,25	-	0,25	-	0,13
122	M5	P.t.	No	3,3	14,0	0,41	-	0,41	-	0,41
123	M5	P.t.	No	2,5	12,0	0,41	-	0,41	-	0,41
124	M5	P.t.	No	1,9	17,0	0,47	-	0,76	-	0,40

Continuación Tabla A.3

ID	M	Es	Med	An. crec.		KAR	Nudosidad [-]			
				A	B		KARM	KAR 150	KARM 150	K
125	M5	P.t.	No	4,1	7,0	0,03	-	0,06	-	0,22
126	M5	P.t.	No	3,4	8,0	0,41	-	0,41	-	0,42
127	M5	P.t.	No	3,1	9,0	0,14	-	0,14	-	0,19
128	M5	P.t.	No	1,8	14,0	0,26	-	0,26	-	0,34
129	M5	P.t.	No	3,3	10,0	0,36	-	0,36	-	0,37
130	M5	P.t.	No	2,7	12,0	0,21	-	0,21	-	0,22
131	M5	P.t.	No	2,1	12,0	0,28	-	0,28	-	0,31
132	M5	P.t.	No	2,8	11,0	0,24	-	0,24	-	0,25
133	M5	P.t.	No	1,5	19,0	0,39	-	0,39	-	0,50
134	M5	P.t.	No	1,4	18,0	0,21	-	0,26	-	0,36
135	M5	P.t.	No	2,5	12,0	0,34	-	0,42	-	0,47
136	M5	P.t.	No	2,2	12,0	0,00	-	0,00	-	0,00
137	M5	P.t.	No	3,6	8,0	0,22	-	0,22	-	0,23
138	M5	P.t.	Si	2,5	15,0	0,22	-	0,22	-	0,60
139	M5	P.t.	No	2,6	14,0	0,49	-	0,49	-	0,69
140	M5	P.t.	No	1,8	14,0	0,46	-	0,54	-	0,70
141	M5	P.t.	No	1,1	24,0	0,12	-	0,12	-	0,50
142	M5	P.t.	No	5,4	7,0	0,29	-	0,29	-	0,40
143	M5	P.t.	No	1,2	22,0	0,26	-	0,26	-	0,26
144	M5	P.t.	No	3,8	9,0	0,25	-	0,25	-	0,39
145	M5	P.t.	No	3,2	9,0	0,31	-	0,31	-	0,43
146	M5	P.t.	No	2,0	14,0	0,52	-	0,52	-	0,96
147	M5	P.t.	No	3,5	11,0	0,12	-	0,22	-	0,35
148	M5	P.t.	No	2,0	13,0	0,29	-	0,29	-	0,31
149	M5	P.t.	No	2,9	11,0	0,48	-	0,48	-	0,59
150	M5	P.t.	No	2,0	16,0	0,40	-	0,40	-	0,40
151	M5	P.t.	No	1,2	22,0	0,26	-	0,26	-	0,30
152	M5	P.t.	No	1,3	20,0	0,38	-	0,38	-	0,79
153	M5	P.t.	No	2,0	18,0	0,21	-	0,21	-	0,22
154	M5	P.t.	Si	1,6	16,0	0,26	-	0,29	-	0,91
155	M5	P.t.	No	2,5	13,0	0,26	-	0,32	-	0,36
156	M5	P.t.	No	2,1	13,0	0,36	-	0,36	-	0,51
157	M5	P.t.	No	2,0	13,0	0,27	-	0,27	-	0,28
158	M5	P.t.	No	2,8	13,0	0,36	-	0,36	-	0,39
159	M5	P.t.	No	2,2	12,0	0,24	-	0,24	-	0,24
160	M5	P.t.	Si	1,5	21,0	0,28	-	0,49	-	0,39
161	M5	P.t.	No	7,6	7,0	0,16	-	0,16	-	0,29
162	M5	P.t.	No	1,9	13,0	0,32	-	0,32	-	0,37
163	M5	P.t.	Si	2,2	13,0	0,16	-	0,16	-	0,31
164	M5	P.t.	Si	1,8	15,0	0,00	-	0,00	-	0,00
165	M5	P.t.	No	2,4	13,0	0,35	-	0,35	-	0,41
166	M5	P.t.	No	1,4	18,0	0,12	-	0,12	-	0,13
167	M5	P.t.	No	1,1	23,0	0,28	-	0,35	-	0,60
168	M5	P.t.	No	2,1	17,0	0,28	-	0,28	-	0,36
169	M5	P.t.	No	3,4	11,0	0,40	-	0,40	-	0,41
170	M5	P.t.	No	2,7	12,0	0,31	-	0,31	-	0,45
171	M5	P.t.	Si	1,7	17,0	0,54	-	0,54	-	0,56
172	M5	P.t.	No	3,3	14,0	0,03	-	0,03	-	0,12
173	M5	P.t.	No	3,0	10,0	0,34	-	0,34	-	0,36
174	M5	P.t.	No	2,1	13,0	0,23	-	0,23	-	0,28
175	M5	P.t.	No	3,0	9,0	0,00	-	0,00	-	0,00
176	M5	P.t.	No	2,9	12,0	0,28	-	0,28	-	0,29

Continuación Tabla A.3

ID	M	Es	Med	An. crec.		KAR	Nudosidad [-]			
				A	K		KARM	KAR 150	KARM 150	K
177	M5	P.t.	No	3,2	10,0	0,47	-	0,47	-	0,51
178	M5	P.t.	No	2,1	14,0	0,16	-	0,16	-	0,34
179	M5	P.t.	No	3,8	10,0	0,62	-	0,62	-	0,81
180	M5	P.t.	No	2,8	11,0	0,36	-	0,36	-	0,47
181	M5	P.t.	Si	1,8	14,0	0,32	-	0,32	-	0,64
182	M5	P.t.	No	2,2	12,0	0,24	-	0,24	-	0,43
183	M5	P.t.	No	2,8	11,0	0,35	-	0,35	-	0,36
184	M5	P.t.	Si	1,4	19,0	0,38	-	0,41	-	0,45
185	M5	P.t.	No	3,2	8,0	0,19	-	0,19	-	0,20
186	M5	P.t.	No	2,7	12,0	0,39	-	0,39	-	0,39
187	M5	P.t.	No	3,6	9,0	0,45	-	0,45	-	0,48
188	M5	P.t.	No	2,3	14,0	0,23	-	0,23	-	0,31
189	M5	P.t.	No	1,8	20,0	0,61	-	0,61	-	0,49
190	M5	P.t.	No	2,0	14,0	0,14	-	0,23	-	0,38
191	M5	P.t.	Si	1,1	23,0	0,24	-	0,26	-	0,41
192	M5	P.t.	No	4,4	8,0	0,62	-	0,62	-	0,65
193	M5	P.t.	No	2,0	13,0	0,36	-	0,36	-	0,36
194	M5	P.t.	No	1,8	16,0	0,28	-	0,28	-	0,40
195	M5	P.t.	No	3,6	10,0	0,31	-	0,31	-	0,38
196	M5	P.t.	No	1,8	15,0	0,55	-	0,55	-	0,59
197	M5	P.t.	No	2,7	10,0	0,27	-	0,27	-	0,27
198	M5	P.t.	No	2,1	12,0	0,21	-	0,21	-	0,26
199	M5	P.t.	No	3,5	10,0	0,12	-	0,16	-	0,32
200	M5	P.t.	No	4,2	10,0	0,35	-	0,35	-	0,39
201	M5	P.t.	Si	1,3	19,0	0,44	-	0,44	-	0,75
202	M5	P.t.	No	1,3	20,0	0,62	-	0,62	-	0,53
203	M5	P.t.	No	2,3	11,0	0,62	-	0,62	-	0,72
204	M5	P.t.	No	1,9	16,0	0,41	-	0,41	-	0,49
205	M5	P.t.	No	4,0	9,0	0,23	-	0,23	-	0,30
206	M5	P.t.	No	1,6	19,0	0,40	-	0,53	-	0,62
207	M5	P.t.	No	2,4	12,0	0,40	-	0,40	-	0,41
208	M5	P.t.	No	2,5	13,0	0,22	-	0,22	-	0,23
209	M5	P.t.	No	2,3	11,0	0,33	-	0,33	-	0,34
210	M5	P.t.	Si	1,3	21,0	0,21	-	0,21	-	0,26
211	M5	P.t.	No	1,3	20,0	0,14	-	0,16	-	0,29
212	M5	P.t.	No	1,8	18,0	0,18	-	0,18	-	0,24
213	M5	P.t.	Si	2,2	15,0	0,30	-	0,30	-	0,27
214	M5	P.t.	Si	1,4	18,0	0,41	-	0,41	-	0,64
215	M5	P.t.	No	2,4	14,0	0,16	-	0,16	-	0,17
216	M5	P.t.	No	2,5	11,0	0,22	-	0,22	-	0,27
217	M5	P.t.	No	3,2	12,0	0,03	-	0,03	-	0,13
218	M5	P.t.	No	3,9	12,0	0,19	-	0,19	-	0,20
219	M5	P.t.	No	3,7	9,5	0,26	-	0,26	-	0,28
220	M5	P.t.	No	3,0	9,5	0,05	-	0,05	-	0,16
221	M5	P.t.	No	3,0	12,5	0,00	-	0,00	-	0,00
222	M5	P.t.	No	3,6	10,0	0,00	-	0,00	-	0,00
223	M5	P.t.	No	3,7	9,0	0,00	-	0,00	-	0,00
224	M5	P.t.	No	2,7	12,0	0,00	-	0,00	-	0,00
225	M5	P.t.	No	3,0	9,0	0,00	-	0,00	-	0,00
226	M5	P.t.	No	4,3	10,5	0,12	-	0,12	-	0,19
227	M5	P.t.	No	6,4	7,0	0,00	-	0,00	-	0,00
228	M5	P.t.	No	4,5	7,0	0,06	-	0,06	-	0,07

Continuación Tabla A.3

ID	M	Es	Med	An. crec.		KAR	Nudosidad [-]			
				A	K		KARM	KAR 150	KARM 150	K
229	M5	P.t.	No	4,1	13,0	0,04	-	0,04	-	0,04
230	M5	P.t.	No	4,0	9,0	0,00	-	0,00	-	0,00
231	M5	P.t.	No	4,4	10,5	0,00	-	0,00	-	0,00
232	M5	P.t.	No	7,3	5,0	0,19	-	0,19	-	0,32
233	M5	P.t.	No	4,1	10,0	0,00	-	0,00	-	0,00
1	M6	P.e.	No	-	12,50	-	-	-	-	0,35
2	M6	P.e.	No	-	9,50	-	-	-	-	0,24
3	M6	P.e.	No	-	18,00	-	-	-	-	0,63
4	M6	P.e.	No	-	16,00	-	-	-	-	0,00
5	M6	P.e.	No	-	13,50	-	-	-	-	0,39
6	M6	P.e.	Si	-	15,00	-	-	-	-	0,40
7	M6	P.e.	Si	-	14,00	-	-	-	-	0,23
8	M6	P.e.	No	-	6,00	-	-	-	-	0,31
9	M6	P.e.	Si	-	14,00	-	-	-	-	0,62
10	M6	P.e.	Si	-	14,00	-	-	-	-	0,33
11	M6	P.e.	No	-	9,00	-	-	-	-	0,31
12	M6	P.e.	No	-	9,00	-	-	-	-	0,31
13	M6	P.e.	Si	-	10,00	-	-	-	-	0,56
14	M6	P.e.	No	-	13,00	-	-	-	-	0,41
15	M6	P.e.	Si	-	10,00	-	-	-	-	0,36
16	M6	P.e.	No	-	16,50	-	-	-	-	0,28
17	M6	P.e.	No	-	14,50	-	-	-	-	0,27
18	M6	P.e.	Si	-	11,00	-	-	-	-	0,38
19	M6	P.e.	No	-	9,50	-	-	-	-	0,28
20	M6	P.e.	No	-	11,00	-	-	-	-	0,74
21	M6	P.e.	Si	-	17,00	-	-	-	-	0,71
22	M6	P.e.	No	-	14,00	-	-	-	-	0,30
23	M6	P.e.	Si	-	11,00	-	-	-	-	0,54
24	M6	P.e.	No	-	13,00	-	-	-	-	0,32
25	M6	P.e.	Si	-	12,50	-	-	-	-	0,49
26	M6	P.e.	No	-	12,00	-	-	-	-	0,29
27	M6	P.e.	No	-	7,00	-	-	-	-	0,04
28	M6	P.e.	Si	-	15,00	-	-	-	-	0,28
29	M6	P.e.	No	-	8,50	-	-	-	-	0,22
30	M6	P.e.	No	-	8,00	-	-	-	-	0,22
31	M6	P.e.	No	-	16,00	-	-	-	-	0,35
32	M6	P.e.	Si	-	14,00	-	-	-	-	0,69
33	M6	P.e.	Si	-	16,50	-	-	-	-	0,40
34	M6	P.e.	Si	-	17,00	-	-	-	-	0,29
35	M6	P.e.	Si	-	14,00	-	-	-	-	0,80
36	M6	P.e.	Si	-	10,00	-	-	-	-	0,86
37	M6	P.e.	No	-	13,00	-	-	-	-	0,27
38	M6	P.e.	Si	-	21,00	-	-	-	-	0,51
39	M6	P.e.	No	-	8,50	-	-	-	-	0,23
40	M6	P.e.	Si	-	12,00	-	-	-	-	0,26
41	M6	P.e.	Si	-	18,00	-	-	-	-	0,82
42	M6	P.e.	No	-	8,00	-	-	-	-	0,36
43	M6	P.e.	Si	-	13,00	-	-	-	-	0,41
44	M6	P.e.	No	-	16,00	-	-	-	-	0,43
45	M6	P.e.	No	-	16,00	-	-	-	-	0,47
46	M6	P.e.	Si	-	9,00	-	-	-	-	0,35
47	M6	P.e.	No	-	13,00	-	-	-	-	0,27
48	M6	P.e.	No	-	7,00	-	-	-	-	0,33

Continuación Tabla A.3

ID	M	Es	Med	An. crec.		Nudosidad [-]				
				A	K	KAR	KARM	KAR 150	KARM 150	K
49	M6	P.e.	No	-	8,00	-	-	-	-	0,30
50	M6	P.e.	Si	-	20,00	-	-	-	-	1,00
51	M6	P.t.	Si	-	28,00	-	-	-	-	0,57
52	M6	P.t.	No	-	9,00	-	-	-	-	0,41
53	M6	P.t.	No	-	8,00	-	-	-	-	0,64
54	M6	P.t.	No	-	12,00	-	-	-	-	0,41
55	M6	P.t.	No	-	13,00	-	-	-	-	0,36
56	M6	P.t.	No	-	7,00	-	-	-	-	0,52
57	M6	P.t.	No	-	12,00	-	-	-	-	0,29
58	M6	P.t.	No	-	6,50	-	-	-	-	0,32
59	M6	P.t.	No	-	14,00	-	-	-	-	0,32
60	M6	P.t.	No	-	7,00	-	-	-	-	0,77
61	M6	P.t.	No	-	12,50	-	-	-	-	0,27
62	M6	P.t.	No	-	8,00	-	-	-	-	0,33
63	M6	P.t.	No	-	13,00	-	-	-	-	0,30
64	M6	P.t.	No	-	14,00	-	-	-	-	0,54
65	M6	P.t.	No	-	15,00	-	-	-	-	0,45
66	M6	P.t.	No	-	10,00	-	-	-	-	0,60
67	M6	P.t.	No	-	14,00	-	-	-	-	0,40
68	M6	P.t.	No	-	10,00	-	-	-	-	0,27
69	M6	P.t.	No	-	13,00	-	-	-	-	0,32
70	M6	P.t.	No	-	9,00	-	-	-	-	0,42
71	M6	P.t.	No	-	14,00	-	-	-	-	0,58
72	M6	P.t.	Si	-	18,00	-	-	-	-	0,67
73	M6	P.t.	Si	-	23,50	-	-	-	-	0,61
74	M6	P.t.	Si	-	26,00	-	-	-	-	0,69
75	M6	P.t.	No	-	8,00	-	-	-	-	0,41
76	M6	P.t.	Si	-	14,00	-	-	-	-	0,38
77	M6	P.t.	No	-	10,50	-	-	-	-	0,39
78	M6	P.t.	No	-	8,00	-	-	-	-	0,67
79	M6	P.t.	Si	-	13,00	-	-	-	-	0,71
80	M6	P.t.	No	-	6,00	-	-	-	-	0,57
81	M6	P.t.	No	-	12,00	-	-	-	-	0,21
82	M6	P.t.	No	-	7,00	-	-	-	-	0,45
83	M6	P.t.	No	-	10,00	-	-	-	-	0,19
84	M6	P.t.	Si	-	21,00	-	-	-	-	0,51
85	M6	P.t.	No	-	18,50	-	-	-	-	0,53
86	M6	P.t.	No	-	15,00	-	-	-	-	0,49
87	M6	P.t.	Si	-	17,00	-	-	-	-	0,71
88	M6	P.t.	No	-	9,00	-	-	-	-	0,26
89	M6	P.t.	No	-	12,00	-	-	-	-	0,25
90	M6	P.t.	No	-	15,00	-	-	-	-	0,15
91	M6	P.t.	No	-	13,50	-	-	-	-	0,39
92	M6	P.t.	No	-	8,00	-	-	-	-	0,23
93	M6	P.t.	Si	-	22,50	-	-	-	-	0,59
94	M6	P.t.	No	-	10,00	-	-	-	-	0,23
95	M6	P.t.	No	-	11,50	-	-	-	-	0,24
96	M6	P.t.	Si	-	13,00	-	-	-	-	0,55
97	M6	P.t.	Si	-	19,00	-	-	-	-	0,41
98	M6	P.t.	Si	-	13,00	-	-	-	-	0,38
99	M6	P.t.	No	-	6,50	-	-	-	-	0,28
100	M6	P.t.	No	-	10,00	-	-	-	-	0,00
101	M6	P.t.	No	-	9,00	-	-	-	-	0,00

Tabla A.4. Dimensiones geométricas y propiedades físico-mecánicas de los cuerpos de prueba ensayados a flexión de canto (M1, M2, M3, M4)

ID	M	Es	b [mm]	h [mm]	L [mm]	H [%]	ρ [kg/m ³]	F_m [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]	$E_{m,g}$ [N/mm ²]	$E_{m,l}$ [N/mm ²]
1	M1	P.e.	45,02	100,24	2004	12,6	453	34,4	31,7	5783	5172
2	M1	P.e.	45,26	100,32	2003	13,2	476	38,0	35,1	7419	7281
3	M1	P.e.	45,62	100,20	2002	12,8	514	62,3	57,5	10996	11381
4	M1	P.e.	44,88	100,00	2000	11,7	494	42,1	38,9	8260	8297
5	M1	P.e.	45,61	100,31	1998	13,0	476	35,2	32,4	8539	7672
6	M1	P.e.	45,46	100,18	2001	11,9	460	57,8	53,3	9114	8613
7	M1	P.e.	45,43	100,09	2004	12,6	490	39,1	36,1	7650	6009
8	M1	P.e.	45,51	100,20	2000	12,7	417	30,7	28,3	4241	3795
9	M1	P.e.	45,23	100,05	2001	12,8	537	47,7	44,0	10065	9633
10	M1	P.e.	45,66	100,44	2000	12,8	534	43,3	39,9	10057	9434
11	M1	P.e.	45,63	100,21	1999	12,5	437	37,8	34,8	4634	4704
12	M1	P.e.	45,48	100,11	2001	12,6	560	12,6	11,6	8138	5868
13	M1	P.e.	44,70	100,39	1999	12,6	525	46,1	42,5	10543	13578
14	M1	P.e.	45,32	100,10	2000	12,5	523	38,0	35,0	9824	10017
15	M1	P.e.	44,99	100,09	2000	12,1	534	45,5	42,0	4956	4832
16	M1	P.e.	44,78	99,87	2001	13,7	501	41,0	37,8	12099	10519
17	M1	P.e.	45,49	99,86	1999	12,8	425	39,9	36,8	7548	7609
18	M1	P.e.	45,28	100,15	1998	12,1	557	47,1	43,5	14059	11389
19	M1	P.e.	45,69	100,25	1998	13,0	620	61,5	56,8	9631	8350
20	M1	P.e.	45,38	100,33	1997	13,3	584	55,7	51,4	7614	7967
21	M1	P.e.	44,76	100,05	2002	12,8	535	32,1	29,6	8129	7387
22	M1	P.e.	45,46	99,90	2000	12,7	514	43,9	40,5	7202	6420
23	M1	P.e.	45,39	100,02	2001	11,5	469	35,4	32,6	6951	8036
24	M1	P.e.	45,55	100,06	2000	12,6	517	39,8	36,7	9624	11126
25	M1	P.e.	45,42	100,17	2000	12,5	560	39,2	36,2	6978	6818
26	M1	P.t.	44,51	99,49	1997	12,5	560	34,9	32,2	10504	9435
27	M1	P.t.	44,44	99,90	1999	12,2	505	44,6	41,1	11147	10502
28	M1	P.t.	45,52	99,68	1995	11,0	544	30,7	28,3	8961	9059
29	M1	P.t.	45,65	100,00	1998	11,7	655	57,2	52,8	12048	11624
30	M1	P.t.	45,60	100,17	1998	11,6	645	67,0	61,8	11617	13923
31	M1	P.t.	45,67	100,33	1997	13,0	457	30,5	28,1	7352	6967
32	M1	P.t.	45,02	100,02	1998	11,7	462	16,7	15,4	8047	7281
33	M1	P.t.	44,90	99,94	1998	12,5	472	38,1	35,2	10528	11555
34	M1	P.t.	45,49	100,00	1998	13,1	600	55,9	51,5	12292	11676
35	M1	P.t.	44,97	100,19	2000	11,7	582	68,9	63,5	11992	13331
36	M1	P.t.	45,00	100,10	1999	12,4	693	82,3	75,9	10906	10483
37	M1	P.t.	45,16	100,22	2001	12,3	592	57,0	52,6	10374	10598
38	M1	P.t.	45,07	100,14	1998	12,7	609	8,8	8,1	4319	7921
39	M1	P.t.	44,63	99,99	1996	11,1	619	44,3	40,9	8675	7496
40	M1	P.t.	45,09	99,93	1999	11,0	480	62,9	58,0	5961	5748
41	M1	P.t.	44,65	99,85	1998	12,3	510	41,0	37,8	11812	12974
42	M1	P.t.	44,57	99,80	1995	14,1	415	30,1	27,7	7410	7838
43	M1	P.t.	44,36	99,92	1998	11,6	483	22,9	21,1	9519	6230
44	M1	P.t.	45,21	100,16	2000	12,3	612	35,6	32,8	9908	10097
45	M1	P.t.	45,42	99,93	1999	11,6	616	74,7	68,9	11532	11961
46	M1	P.t.	45,76	100,03	2003	12,8	663	61,9	57,0	9181	8354
47	M1	P.t.	45,57	100,07	1996	13,4	583	14,1	13,0	5176	4871
48	M1	P.t.	44,69	100,17	2000	11,6	434	31,6	29,1	8578	10795
49	M1	P.t.	45,18	100,01	1999	12,4	415	28,4	26,2	8250	9491
50	M1	P.t.	45,09	99,94	1997	12,6	473	45,4	41,9	8772	8822
51	M1	P.t.	44,81	100,13	1998	11,5	608	59,3	54,7	7608	7115

Continuación Tabla A.4

ID	M	Es	b [mm]	h [mm]	L [mm]	H [%]	ρ [kg/m ³]	F_m [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]	$E_{m,g}$ [N/mm ²]	$E_{m,l}$ [N/mm ²]
52	M1	P.t.	45,13	100,12	1997	11,8	566	35,8	33,1	7087	6645
53	M1	P.t.	45,43	100,06	1998	11,9	605	65,0	60,0	14079	14022
54	M1	P.t.	45,34	100,29	1998	12,5	570	22,3	20,5	9914	10466
55	M1	P.t.	45,32	100,19	1995	12,3	555	10,1	9,3	7615	5989
56	M1	P.t.	45,27	99,92	1997	12,2	575	19,1	17,6	11174	11785
57	M1	P.t.	45,04	99,98	1996	12,9	647	38,0	35,0	12671	14567
58	M1	P.t.	45,65	100,04	1998	11,9	568	56,6	52,2	12463	11838
59	M1	P.t.	44,54	100,06	1999	12,0	429	24,4	22,5	6945	7512
60	M1	P.t.	44,49	99,87	2000	12,4	469	22,6	20,8	6682	5853
61	M1	P.t.	44,68	100,11	1997	12,4	503	23,8	22,0	10263	9352
62	M1	P.t.	45,29	100,07	1996	12,4	730	46,1	42,5	12843	11884
63	M1	P.t.	45,30	100,27	2000	11,8	688	41,7	38,5	13172	15797
64	M1	P.t.	45,29	100,52	1997	11,7	531	45,0	41,5	12166	12980
1	M2	P.e.	43,99	150,19	3004	13,1	539	49,6	49,6	7309	7917
2	M2	P.e.	45,46	149,98	2998	13,3	581	28,5	28,5	6420	5689
3	M2	P.e.	44,32	150,08	2999	13,1	514	18,3	18,3	6239	6890
4	M2	P.e.	45,63	149,93	2999	12,0	506	38,9	38,9	9050	8436
5	M2	P.e.	45,30	149,98	2999	13,2	441	51,6	51,6	10742	11978
6	M2	P.e.	44,36	149,92	2998	13,1	639	53,7	53,7	12729	13219
7	M2	P.e.	44,13	149,92	2995	13,1	505	23,9	23,9	10394	9494
8	M2	P.e.	44,09	149,68	3001	12,3	724	87,9	87,9	13621	15614
9	M2	P.e.	44,14	149,94	2998	13,2	499	20,5	20,5	6591	7697
10	M2	P.e.	44,44	149,87	2997	12,7	489	31,5	31,5	11346	8988
11	M2	P.e.	44,28	150,06	2998	13,0	638	59,2	59,2	12592	12882
12	M2	P.e.	43,73	149,88	3001	12,6	533	14,3	14,3	9010	12970
13	M2	P.e.	44,32	149,94	2997	12,6	463	32,3	32,3	7803	7177
14	M2	P.e.	44,32	150,07	2998	13,1	588	28,5	28,5	8718	7498
15	M2	P.e.	45,55	150,03	3005	12,8	631	54,4	54,4	14414	16532
16	M2	P.e.	44,24	149,82	3004	13,4	582	42,0	42,0	12181	11879
17	M2	P.e.	44,50	150,00	3002	12,5	693	51,6	51,6	14665	13499
18	M2	P.e.	45,60	150,18	3002	12,2	448	23,2	23,2	5894	5628
19	M2	P.e.	44,53	150,26	3000	12,7	624	41,6	41,6	8741	8859
20	M2	P.e.	45,20	149,85	2997	12,8	588	31,8	31,7	11715	15529
21	M2	P.e.	43,93	149,94	2994	12,4	532	27,9	27,9	10362	9972
22	M2	P.e.	40,71	149,70	3003	13,7	589	10,1	10,1	10429	11974
23	M2	P.e.	45,24	150,05	3002	12,9	528	40,8	40,8	10191	10520
24	M2	P.e.	44,22	149,71	2996	13,4	507	28,9	28,9	8616	8901
25	M2	P.e.	44,22	149,93	2999	13,3	541	34,2	34,2	8649	7476
26	M2	P.e.	45,83	150,10	3001	12,5	430	47,3	47,3	7674	7204
27	M2	P.e.	44,49	149,83	3001	12,3	521	27,1	27,1	11960	4879
28	M2	P.e.	45,25	149,90	3002	11,9	601	73,5	73,5	14034	9390
29	M2	P.e.	45,49	149,65	3000	11,9	574	48,2	48,2	11397	13319
30	M2	P.t.	45,52	150,13	2998	13,8	474	22,3	22,3	8439	10593
31	M2	P.t.	45,48	150,33	2999	14,6	449	25,9	25,9	9379	9046
32	M2	P.t.	45,62	150,29	2998	14,3	514	37,4	37,4	5363	5166
33	M2	P.t.	44,89	150,21	2999	14,0	567	42,0	42,0	11304	12106
34	M2	P.t.	45,40	149,99	2999	14,0	473	15,5	15,5	10290	15302
35	M2	P.t.	45,73	150,13	2998	14,1	472	12,3	12,3	8426	5633
36	M2	P.t.	45,53	149,89	2999	13,2	445	16,3	16,3	8427	8727
37	M2	P.t.	45,35	150,03	2999	13,3	486	16,2	16,2	6567	6061
38	M2	P.t.	45,16	150,22	3001	14,4	516	11,9	11,9	7236	10260
39	M2	P.t.	45,44	150,18	3002	13,7	456	22,7	22,7	8762	8173

Continuación Tabla A.4

ID	M	Es	b [mm]	h [mm]	L [mm]	H [%]	ρ [kg/m ³]	F_m [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]	$E_{m,g}$ [N/mm ²]	$E_{m,l}$ [N/mm ²]
40	M2	P.t.	45,10	150,17	3001	14,0	482	29,2	29,2	10499	10607
41	M2	P.t.	44,76	150,69	3003	14,5	447	42,2	42,3	8688	10733
42	M2	P.t.	45,49	149,99	2999	13,9	467	37,4	37,4	11114	11342
43	M2	P.t.	45,36	149,89	3001	13,5	533	53,3	53,3	7414	7022
44	M2	P.t.	45,38	150,03	3001	13,9	525	17,1	17,1	9858	11595
45	M2	P.t.	45,40	150,33	3000	13,9	436	21,9	21,9	6896	7885
46	M2	P.t.	45,21	150,10	3000	13,4	396	12,3	12,3	8094	8884
47	M2	P.t.	45,76	149,93	3001	13,8	386	14,2	14,2	6892	7441
48	M2	P.t.	44,71	149,99	3001	13,6	430	26,8	26,8	8062	7606
49	M2	P.t.	45,01	150,08	3002	13,7	468	18,3	18,3	7590	4810
50	M2	P.t.	45,40	150,51	3000	13,6	426	23,1	23,1	8013	6812
51	M2	P.t.	45,15	149,55	3003	13,4	469	28,1	28,1	6586	6145
52	M2	P.t.	45,27	150,20	3001	13,6	522	40,0	40,0	5291	4914
53	M2	P.t.	45,38	150,06	3001	13,5	458	24,8	24,8	8100	7680
54	M2	P.t.	45,27	150,22	2999	14,0	594	44,8	44,8	11858	13662
55	M2	P.t.	44,45	150,00	3002	12,9	482	22,2	22,2	11050	10606
56	M2	P.t.	45,93	149,82	3000	13,0	421	22,3	22,3	6480	6429
57	M2	P.t.	44,65	149,85	3002	13,2	448	23,4	23,4	10022	10887
58	M2	P.t.	45,08	149,94	3004	13,3	425	42,2	42,2	8466	9421
59	M2	P.t.	45,73	150,10	3003	13,4	456	44,1	44,1	6735	7794
60	M2	P.t.	45,51	149,82	3001	13,0	467	44,0	43,9	9790	11710
61	M2	P.t.	45,89	149,85	3002	13,5	488	43,3	43,3	9935	11066
1	M3	P.e.	69,31	150,07	3001	12,7	469	19,3	19,3	6930	6608
2	M3	P.e.	69,22	149,97	3001	12,2	448	14,4	14,4	6722	6418
3	M3	P.e.	69,32	150,07	3002	12,1	653	54,1	54,1	11717	11177
4	M3	P.e.	70,64	151,90	3003	10,1	691	43,6	43,7	8559	6968
5	M3	P.e.	68,91	150,10	3007	12,7	662	36,5	36,5	10800	10046
6	M3	P.e.	70,53	150,20	3000	12,4	508	40,2	40,2	8290	8791
7	M3	P.e.	70,61	150,06	3003	12,3	507	30,3	30,3	9160	11572
8	M3	P.e.	70,65	150,56	3001	12,1	462	34,9	34,9	8219	8933
9	M3	P.e.	70,33	150,08	3001	12,9	542	30,2	30,2	9702	9406
10	M3	P.e.	70,42	150,45	3001	12,1	560	13,9	13,9	8759	9588
11	M3	P.e.	70,40	149,89	3006	12,4	510	23,7	23,7	9540	11959
12	M3	P.e.	70,53	150,16	3000	11,9	555	33,6	33,7	9820	9080
13	M3	P.e.	70,46	150,06	3000	12,8	541	20,9	20,9	8702	7705
14	M3	P.e.	69,31	149,89	3004	12,4	493	19,1	19,1	6949	7112
15	M3	P.e.	69,41	150,19	3004	13,2	580	43,5	43,5	11302	12982
16	M3	P.e.	69,46	150,07	3007	13,1	566	33,5	33,5	8013	8571
17	M3	P.e.	70,51	150,02	3002	12,9	488	21,8	21,8	7797	6197
18	M3	P.e.	69,45	149,74	3002	12,8	680	80,6	80,6	12995	13719
19	M3	P.e.	70,37	149,88	3000	13,0	531	50,9	50,9	9512	9161
20	M3	P.e.	70,53	149,85	3009	12,7	543	21,9	21,9	6927	8674
21	M3	P.e.	69,22	150,13	3005	12,3	498	49,7	49,8	10853	13355
22	M3	P.e.	70,53	150,15	3007	11,9	471	34,5	34,5	7849	7226
23	M3	P.e.	69,56	150,06	3006	12,5	540	66,0	66,0	11545	12347
24	M3	P.e.	70,54	149,84	3005	12,5	662	55,4	55,3	11221	13104
25	M3	P.e.	69,66	150,00	3004	11,8	608	58,6	58,6	11766	14125
26	M3	P.t.	69,69	150,26	3002	12,1	462	12,2	12,2	7520	7623
27	M3	P.t.	69,32	150,75	3000	12,1	487	14,3	14,4	6976	7730
28	M3	P.t.	69,36	150,61	3003	12,1	452	17,8	17,9	9110	10839
29	M3	P.t.	69,73	150,07	3005	11,0	460	34,1	34,1	6337	6144
30	M3	P.t.	69,21	150,33	3002	12,4	433	41,8	41,8	8803	8290

Continuación Tabla A.4

ID	M	Es	b [mm]	h [mm]	L [mm]	H [%]	ρ [kg/m ³]	F_m [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]	$E_{m,g}$ [N/mm ²]	$E_{m,l}$ [N/mm ²]
31	M3	P.t.	69,57	150,32	3003	11,8	430	29,5	29,5	7451	7994
32	M3	P.t.	69,55	150,00	3000	11,7	427	23,0	23,0	7324	7630
33	M3	P.t.	69,31	150,51	3005	11,9	477	25,5	25,5	7065	8092
34	M3	P.t.	69,49	150,59	3005	11,9	414	20,4	20,4	7666	7619
35	M3	P.t.	69,50	150,22	3001	12,3	454	33,9	33,9	10411	12427
36	M3	P.t.	69,49	150,12	3002	11,7	411	15,1	15,1	4913	4336
37	M3	P.t.	70,43	150,35	3005	11,6	437	11,6	11,7	6930	6864
38	M3	P.t.	70,62	150,39	3004	11,9	492	22,8	22,8	7717	7814
39	M3	P.t.	69,95	150,39	3005	11,3	424	16,2	16,2	6701	7458
40	M3	P.t.	70,79	150,46	3002	11,3	448	16,9	16,9	9117	10766
41	M3	P.t.	70,58	150,57	3003	12,4	470	22,7	22,7	8222	9032
42	M3	P.t.	70,12	150,07	3003	12,6	485	23,9	23,9	9793	9730
43	M3	P.t.	70,32	150,35	3004	12,2	494	38,0	38,0	11039	10376
44	M3	P.t.	68,23	150,59	3005	11,8	499	41,8	41,8	11489	11068
45	M3	P.t.	68,68	150,45	3003	12,0	412	34,2	34,3	8873	8485
46	M3	P.t.	70,54	150,28	3003	11,5	387	9,9	9,9	4646	3952
47	M3	P.t.	69,57	150,40	3007	11,9	520	34,3	34,4	9869	11846
48	M3	P.t.	70,50	150,33	3007	11,5	449	16,0	16,0	8424	9889
49	M3	P.t.	68,69	150,30	2999	11,9	439	32,6	32,6	8734	9275
50	M3	P.t.	70,92	150,39	3007	11,4	457	17,7	17,7	6855	7567
1	M4	P.e.	68,80	195,68	3920	13,4	381	19,3	20,4	7083	9708
2	M4	P.e.	68,61	186,52	3722	12,9	636	57,0	59,5	12802	12403
3	M4	P.e.	67,70	197,56	3909	12,7	538	57,0	60,3	12849	13895
4	M4	P.e.	68,09	199,55	4006	12,5	517	23,2	24,6	8051	9447
5	M4	P.e.	67,39	187,42	3747	12,5	518	16,0	16,8	8994	11434
6	M4	P.e.	68,85	188,84	3823	12,5	432	26,0	27,2	6963	6141
7	M4	P.e.	69,13	199,28	3976	12,7	384	13,8	14,6	5568	6354
8	M4	P.e.	67,48	186,76	3746	13,1	638	32,2	33,7	11949	10801
9	M4	P.e.	68,25	198,44	3978	12,8	510	27,1	28,7	11538	11402
10	M4	P.e.	68,03	190,31	3865	13,1	531	18,5	19,4	12559	13713
11	M4	P.e.	68,04	190,57	3825	12,9	531	28,2	29,6	10591	8349
12	M4	P.e.	68,38	188,41	3785	13,1	514	15,8	16,6	9381	8658
13	M4	P.e.	68,12	188,58	3781	12,9	462	20,7	21,7	7423	6446
14	M4	P.e.	69,71	197,40	3961	12,6	409	11,7	12,3	5664	7316
15	M4	P.e.	69,61	198,73	3998	13,1	386	9,9	10,4	6170	10078
16	M4	P.e.	69,65	198,37	4006	12,9	619	59,4	62,8	12690	12991
17	M4	P.e.	69,50	198,42	4013	12,6	556	32,3	34,1	10513	10134
18	M4	P.e.	69,32	199,74	4018	12,5	517	37,5	39,7	10129	11223
19	M4	P.e.	69,44	188,64	3797	13,1	519	17,5	18,3	11758	10399
20	M4	P.e.	68,98	187,32	3768	13,0	556	28,4	29,7	11683	8209
21	M4	P.e.	69,27	198,33	4027	12,7	507	44,6	47,2	11247	14612
22	M4	P.e.	69,06	192,64	3898	12,5	521	27,6	29,0	12053	13161
23	M4	P.e.	68,69	187,43	3766	12,8	450	20,6	21,6	8924	9056
24	M4	P.e.	69,16	195,05	3992	12,8	460	12,4	13,1	7960	7301
25	M4	P.e.	68,92	196,68	3969	13,1	606	23,4	24,7	10075	11151
26	M4	P.t.	68,14	199,49	3966	13,0	484	21,2	22,5	11551	11171
27	M4	P.t.	67,87	196,95	3955	13,3	652	40,8	43,1	12474	13513
28	M4	P.t.	68,92	199,55	3956	13,0	445	15,4	16,3	6859	6851
29	M4	P.t.	68,22	198,31	3972	13,2	515	32,0	33,8	9509	9544
30	M4	P.t.	68,26	201,45	4045	13,0	442	21,7	23,0	7233	6887
31	M4	P.t.	68,70	198,06	3944	12,8	444	17,0	18,0	8133	8664
32	M4	P.t.	69,04	197,34	4017	13,0	448	20,9	22,1	7959	7599

Continuación Tabla A.4

ID	M	Es	<i>b</i> [mm]	<i>h</i> [mm]	<i>L</i> [mm]	H [%]	ρ [kg/m ³]	F_m [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]	$E_{m,g}$ [N/mm ²]	$E_{m,l}$ [N/mm ²]
33	M4	P.t.	67,77	199,41	4003	13,2	469	18,6	19,7	7343	6725
34	M4	P.t.	68,35	199,12	4015	12,9	533	32,6	34,5	11138	13851
35	M4	P.t.	67,95	188,52	3801	13,3	491	30,5	31,9	9369	10705
36	M4	P.t.	68,23	198,06	3965	12,6	549	18,2	19,2	10597	12396
37	M4	P.t.	68,28	198,02	3975	13,1	517	35,7	37,7	12024	13813
38	M4	P.t.	68,22	200,25	4012	13,3	448	21,4	22,6	6912	8170
39	M4	P.t.	67,83	199,83	4006	13,4	485	19,0	20,1	8925	8640
40	M4	P.t.	67,70	196,49	3947	13,4	576	7,2	7,6	7963	11739
41	M4	P.t.	69,63	200,07	4016	13,2	477	17,9	19,0	7517	7684
42	M4	P.t.	69,08	201,92	4054	12,2	452	22,9	24,3	7765	8926
43	M4	P.t.	69,33	199,84	4047	12,7	474	19,6	20,7	6701	7427
44	M4	P.t.	68,86	196,28	3934	12,6	464	32,7	34,5	8556	8263
45	M4	P.t.	68,99	195,63	3972	12,3	512	23,4	24,7	8894	9291
46	M4	P.t.	69,20	197,85	3991	12,3	489	16,4	17,4	6636	8716
47	M4	P.t.	68,74	197,54	3997	12,7	441	17,0	18,0	7190	6485
48	M4	P.t.	68,94	186,46	3789	12,7	474	20,8	21,8	7120	7865
49	M4	P.t.	69,27	196,27	3974	12,6	457	15,8	16,7	7638	8351
50	M4	P.t.	69,11	196,85	4018	12,7	423	10,3	10,9	6382	6458

Tabla A.5. Dimensiones geométricas y propiedades físico-mecánicas de los cuerpos de prueba ensayados a flexión de plano (M5)

ID	M	Es	<i>b</i> [mm]	<i>h</i> [mm]	<i>L</i> [mm]	H [%]	ρ [kg/m ³]	F_m [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]	$E_{m,g}$ [N/mm ²]	E_d [N/mm ²]
1	M5	P.e.	105,50	24,98	500	11,3	446	51,3	35,8	7233	7994
2	M5	P.e.	104,20	24,70	499	10,8	654	95,2	66,4	16003	4053
3	M5	P.e.	106,99	24,85	500	11,0	447	24,3	17,0	4073	5105
4	M5	P.e.	106,07	25,02	499	10,6	356	28,0	19,6	5001	4956
5	M5	P.e.	105,30	24,93	500	10,5	416	38,8	27,1	5805	5912
6	M5	P.e.	105,80	24,97	499	10,6	468	47,3	33,1	7665	8106
7	M5	P.e.	106,76	24,99	500	11,9	445	59,1	41,3	7860	7811
8	M5	P.e.	104,95	24,96	500	11,2	459	49,7	34,7	9134	814
9	M5	P.e.	105,44	25,06	500	10,4	485	44,3	31,0	4997	5615
10	M5	P.e.	106,51	24,87	500	10,6	409	40,7	28,4	5535	5855
11	M5	P.e.	105,65	25,01	500	10,3	458	28,2	19,7	5393	6088
12	M5	P.e.	105,23	25,11	500	10,9	436	28,5	19,9	6178	6855
13	M5	P.e.	106,55	24,99	500	11,9	476	47,9	33,4	4872	5099
14	M5	P.e.	106,23	25,11	499	10,4	514	47,5	33,2	7913	8271
15	M5	P.e.	106,87	24,99	499	11,6	443	35,4	24,8	4881	5205
16	M5	P.e.	105,51	25,10	500	10,6	466	38,9	27,2	9146	9861
17	M5	P.e.	105,79	25,08	500	12,4	440	46,9	32,8	6955	7513
18	M5	P.e.	106,74	25,14	500	10,4	662	40,2	28,1	7081	8777
19	M5	P.e.	105,94	25,01	501	11,1	442	41,4	28,9	5037	5324
20	M5	P.e.	105,26	24,08	498	10,7	468	39,7	27,5	7643	8597
21	M5	P.e.	106,48	23,99	500	11,4	411	20,7	14,4	4485	5706
22	M5	P.e.	106,16	24,08	500	11,9	488	33,4	23,2	6303	6610
23	M5	P.e.	105,78	24,04	500	11,5	484	36,1	25,1	8510	9491
24	M5	P.e.	104,03	24,18	500	11,1	711	81,3	56,4	15253	17982
25	M5	P.e.	106,73	24,05	499	11,9	415	20,6	14,3	3476	4401
26	M5	P.e.	105,13	23,99	499	11,7	456	47,5	32,9	7711	8693

Continuación Tabla A.5

ID	M	Es	<i>b</i> [mm]	<i>h</i> [mm]	<i>L</i> [mm]	H [%]	ρ [kg/m ³]	F_m [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]	$E_{m,g}$ [N/mm ²]	E_d [N/mm ²]
27	M5	P.e.	105,04	23,85	500	11,1	582	56,7	39,3	10052	10982
28	M5	P.e.	106,17	24,07	499	11,1	512	40,4	28,0	4437	5479
29	M5	P.e.	105,44	24,02	500	11,7	496	29,9	20,7	5773	7254
30	M5	P.e.	106,11	24,11	500	11,3	506	59,9	41,5	7975	8117
31	M5	P.e.	105,03	24,12	500	12,5	432	46,6	32,3	6005	6493
32	M5	P.e.	106,39	24,04	499	12,2	421	29,1	20,1	3031	3481
33	M5	P.e.	106,28	23,94	498	11,0	403	24,9	17,2	4468	4635
34	M5	P.e.	107,14	24,08	500	11,7	435	35,6	24,7	4334	5188
35	M5	P.e.	106,00	24,10	498	12,2	436	37,4	25,9	6083	4209
36	M5	P.e.	106,54	24,10	499	11,2	416	24,4	16,9	4001	3377
37	M5	P.e.	105,29	24,03	500	10,8	576	50,8	35,2	7005	7843
38	M5	P.e.	106,46	23,95	500	10,6	418	24,3	16,8	4175	4948
39	M5	P.e.	104,88	24,22	500	11,3	593	65,4	45,4	13887	14544
40	M5	P.e.	106,28	24,05	499	11,1	449	34,0	23,6	4841	6102
41	M5	P.e.	107,05	24,11	500	12,3	382	23,3	16,2	3991	4605
42	M5	P.e.	105,55	23,75	500	11,3	639	40,2	27,8	8328	9371
43	M5	P.e.	106,90	24,06	499	11,9	506	33,7	23,4	5180	5934
44	M5	P.e.	106,19	24,02	500	11,1	454	31,6	21,9	4766	5558
45	M5	P.e.	105,66	24,10	500	11,3	472	46,8	32,5	5865	6833
46	M5	P.e.	106,44	23,97	500	10,5	571	64,3	44,6	9782	10850
47	M5	P.e.	106,35	24,06	500	12,3	507	44,7	31,0	5073	5804
48	M5	P.e.	106,25	24,10	500	11,3	438	34,3	23,8	6180	6360
49	M5	P.e.	106,71	24,00	499	11,0	512	36,0	24,9	7155	7286
50	M5	P.e.	107,26	23,83	501	11,3	478	30,3	21,0	4253	4706
51	M5	P.e.	105,61	24,93	499	11,1	493	62,4	43,6	9297	740
52	M5	P.e.	106,29	24,91	500	10,6	692	45,4	31,7	9522	11465
53	M5	P.e.	106,40	24,88	499	10,9	435	28,2	19,7	4165	5196
54	M5	P.e.	106,81	24,91	501	11,2	409	23,3	16,3	4206	5327
55	M5	P.e.	105,48	24,92	501	10,8	446	53,9	37,7	5022	5512
56	M5	P.e.	105,93	25,02	500	10,4	444	49,9	34,9	6912	6515
57	M5	P.e.	106,45	25,05	499	11,4	463	53,8	37,6	7070	7567
58	M5	P.e.	105,02	24,95	500	11,0	453	39,6	27,6	8135	822
59	M5	P.e.	106,35	25,08	499	11,3	519	31,1	21,8	3967	4432
60	M5	P.e.	106,56	24,92	501	11,0	440	21,4	15,0	3642	1440
61	M5	P.e.	105,78	25,00	499	11,5	496	45,8	32,0	4072	4721
62	M5	P.e.	105,11	25,10	500	11,0	457	44,8	31,3	8340	9428
63	M5	P.e.	106,25	25,05	500	12,1	446	36,4	25,5	5788	6613
64	M5	P.e.	106,52	24,84	500	10,3	383	36,9	25,8	4922	5182
65	M5	P.e.	106,31	24,98	500	11,1	439	38,5	26,9	5058	5535
66	M5	P.e.	105,59	25,08	500	10,7	489	58,4	40,8	9689	602
67	M5	P.e.	106,23	25,04	500	11,8	455	51,1	35,7	7347	7775
68	M5	P.e.	106,61	25,23	500	10,4	561	37,2	26,0	8352	10148
69	M5	P.e.	106,06	25,03	500	11,4	456	51,7	36,2	4898	5338
70	M5	P.e.	105,35	24,14	500	10,8	472	48,8	33,9	8137	8685
71	M5	P.e.	105,73	23,99	499	11,0	450	48,8	33,8	7140	7413
72	M5	P.e.	105,42	24,11	500	10,5	452	33,1	23,0	6970	7756
73	M5	P.e.	106,76	24,16	499	10,4	410	32,2	22,3	5472	5588
74	M5	P.e.	104,89	24,17	499	11,0	534	56,3	39,1	5832	6298
75	M5	P.e.	106,37	24,04	499	10,8	397	24,1	16,7	3779	4599
76	M5	P.e.	105,48	23,89	499	10,9	408	24,6	17,1	4953	5394
77	M5	P.e.	105,76	24,04	499	10,9	574	24,3	16,8	6094	8240
78	M5	P.e.	106,39	24,13	500	10,3	452	35,7	24,8	5083	6143

Continuación Tabla A.5

ID	M	Es	b [mm]	h [mm]	L [mm]	H [%]	ρ [kg/m ³]	F_m [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]	$E_{m,g}$ [N/mm ²]	E_d [N/mm ²]
79	M5	P.e.	104,84	24,14	500	11,1	632	77,3	53,6	12863	13764
80	M5	P.e.	105,59	24,12	497	10,6	492	57,2	39,7	10008	9948
81	M5	P.e.	105,26	24,13	500	11,3	416	21,3	14,8	4957	5843
82	M5	P.e.	107,01	24,11	499	11,0	410	20,0	13,8	3039	4127
83	M5	P.e.	106,44	23,93	499	10,2	374	18,9	13,1	3660	4138
84	M5	P.e.	106,88	24,06	498	10,3	458	22,5	15,6	3807	4347
85	M5	P.e.	106,31	24,07	500	11,0	439	27,5	19,1	5183	5776
86	M5	P.e.	106,38	24,10	499	11,4	494	46,6	32,3	4369	4581
87	M5	P.e.	106,66	24,04	501	11,1	503	45,2	31,3	3839	4244
88	M5	P.e.	105,98	24,04	500	10,2	475	19,8	13,7	3794	5587
89	M5	P.e.	104,72	24,13	500	10,8	673	47,2	32,7	11626	13773
90	M5	P.e.	105,65	24,21	501	11,2	514	41,1	28,5	7843	7845
91	M5	P.e.	106,20	24,34	499	10,8	420	27,0	18,7	3736	4496
92	M5	P.e.	105,21	23,77	499	10,6	630	85,0	58,8	9123	10330
93	M5	P.e.	106,61	24,05	498	11,3	496	58,4	40,5	7894	7546
94	M5	P.e.	105,99	24,03	500	10,8	478	41,5	28,8	5955	6439
95	M5	P.e.	106,36	24,02	502	10,9	495	46,4	32,1	4237	5007
96	M5	P.e.	106,17	23,96	500	9,9	567	37,7	26,2	7734	9012
97	M5	P.e.	106,39	24,13	500	11,0	431	23,5	16,3	4812	6115
98	M5	P.e.	106,21	24,08	501	10,8	450	36,9	25,6	6886	7789
99	M5	P.e.	106,32	24,03	500	10,4	694	78,4	54,4	13134	13786
100	M5	P.e.	107,23	23,93	500	10,6	427	27,1	18,8	3881	4556
101	M5	P.e.	105,51	25,02	501	14,1	497	66,4	46,4	9796	-
102	M5	P.e.	104,49	25,11	493	13,1	604	76,4	53,5	13042	-
103	M5	P.e.	105,08	25,23	500	13,9	462	49,3	34,5	9789	-
104	M5	P.e.	106,50	25,10	500	13,4	464	35,1	24,6	4816	-
105	M5	P.e.	105,16	25,24	501	13,5	463	66,4	46,5	12220	-
106	M5	P.e.	106,31	25,18	500	14,0	551	47,2	33,0	3592	-
107	M5	P.e.	105,73	25,22	500	13,7	495	75,7	53,0	13141	-
108	M5	P.e.	104,92	25,42	500	12,9	606	89,1	62,4	14981	-
109	M5	P.e.	106,35	24,20	495	13,5	629	69,4	48,2	8164	-
110	M5	P.e.	105,21	24,08	501	12,7	601	92,7	64,3	14584	-
111	M5	P.e.	104,52	24,16	500	13,3	623	92,6	64,3	14603	-
112	M5	P.e.	106,05	24,25	500	12,9	484	62,1	43,1	9181	-
113	M5	P.e.	105,85	23,90	500	12,9	656	79,5	55,0	8351	-
114	M5	P.e.	106,52	24,12	500	13,0	491	47,9	33,2	5154	-
115	M5	P.e.	106,86	24,11	501	11,9	584	55,5	38,5	9206	-
116	M5	P.e.	106,70	24,22	500	12,7	596	64,1	44,5	10138	-
117	M5	P.t.	105,80	25,04	502	11,1	508	22,8	16,0	3382	3880
118	M5	P.t.	104,15	24,96	500	12,5	484	33,1	23,1	8261	5430
119	M5	P.t.	105,19	25,09	500	12,3	471	58,6	41,0	8602	7826
120	M5	P.t.	105,21	25,20	501	11,1	449	47,7	33,4	8667	8658
121	M5	P.t.	105,47	25,06	500	11,9	436	36,7	25,6	5879	6622
122	M5	P.t.	103,53	25,08	500	11,8	443	29,1	20,3	5940	6888
123	M5	P.t.	102,95	25,00	499	11,4	494	36,7	25,7	7397	8447
124	M5	P.t.	105,61	25,05	499	11,0	406	30,9	21,6	4655	5451
125	M5	P.t.	104,15	24,97	500	11,7	553	51,0	35,6	12580	12565
126	M5	P.t.	104,89	24,97	500	12,0	447	37,6	26,3	8831	8346
127	M5	P.t.	103,26	25,00	501	11,9	434	48,9	34,2	9830	10297
128	M5	P.t.	104,97	24,98	501	12,6	425	40,4	28,2	7601	7277
129	M5	P.t.	104,37	24,97	500	11,9	505	52,8	36,9	10097	9143
130	M5	P.t.	104,68	24,97	501	11,9	405	44,5	31,1	8887	7767

Continuación Tabla A.5

ID	M	Es	<i>b</i> [mm]	<i>h</i> [mm]	<i>L</i> [mm]	H [%]	ρ [kg/m ³]	F_m [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]	$E_{m,g}$ [N/mm ²]	E_d [N/mm ²]
131	M5	P.t.	104,90	24,96	500	12,2	412	45,8	32,0	8771	8348
132	M5	P.t.	104,86	24,91	501	12,3	443	38,3	26,7	8472	9359
133	M5	P.t.	105,01	24,93	499	11,7	411	40,6	28,3	3472	3837
134	M5	P.t.	104,17	24,00	501	12,4	563	51,5	35,7	8129	6993
135	M5	P.t.	104,53	24,02	501	11,7	442	35,6	24,7	4111	4304
136	M5	P.t.	104,65	24,02	501	13,2	534	86,2	59,8	12401	12562
137	M5	P.t.	103,37	23,97	500	11,9	514	63,7	44,1	10864	11393
138	M5	P.t.	105,93	24,04	500	11,8	380	43,0	29,8	6455	6913
139	M5	P.t.	105,67	23,98	501	11,8	431	17,4	12,1	4728	5427
140	M5	P.t.	104,26	24,00	500	12,2	443	33,3	23,1	5573	7049
141	M5	P.t.	105,24	24,04	499	13,1	445	24,1	16,7	2747	3058
142	M5	P.t.	104,22	23,93	499	12,1	425	31,9	22,1	8137	7032
143	M5	P.t.	104,93	24,03	500	11,2	400	31,5	21,8	6481	1622
144	M5	P.t.	104,51	24,03	499	12,8	538	38,1	26,4	8546	3680
145	M5	P.t.	104,81	24,08	500	12,7	333	25,9	18,0	4564	4927
146	M5	P.t.	105,31	24,10	499	12,4	436	35,6	24,7	5678	6328
147	M5	P.t.	104,31	24,15	501	13,1	514	44,8	31,1	8480	8744
148	M5	P.t.	104,75	24,10	501	12,9	420	39,8	27,6	6701	8292
149	M5	P.t.	103,95	24,03	500	12,6	481	34,3	23,8	7488	7256
150	M5	P.t.	104,72	24,04	500	11,6	439	38,0	26,4	6515	7496
151	M5	P.t.	105,37	24,11	500	12,9	410	31,1	21,6	4735	5251
152	M5	P.t.	105,11	24,05	500	13,3	409	22,4	15,5	3695	3708
153	M5	P.t.	104,42	24,05	501	13,2	408	35,6	24,7	8042	8028
154	M5	P.t.	105,87	24,10	500	12,3	409	33,0	22,9	5879	6744
155	M5	P.t.	104,19	24,09	499	12,7	471	31,0	21,5	7147	6237
156	M5	P.t.	104,23	23,98	500	11,8	411	35,4	24,5	5928	6460
157	M5	P.t.	104,36	24,04	499	12,4	411	44,2	30,6	7004	7345
158	M5	P.t.	103,36	24,07	501	12,7	461	43,5	30,1	7490	6306
159	M5	P.t.	104,04	24,06	500	12,9	433	45,2	31,4	8291	9148
160	M5	P.t.	106,01	24,02	501	12,4	401	37,1	25,7	4814	5111
161	M5	P.t.	105,09	24,12	501	12,7	529	62,4	43,3	10614	11752
162	M5	P.t.	104,83	24,05	502	11,5	350	32,5	22,5	5298	5879
163	M5	P.t.	105,87	23,95	501	11,6	425	43,4	30,0	6591	3045
164	M5	P.t.	106,01	24,02	500	10,8	453	50,0	34,7	7358	7551
165	M5	P.t.	105,12	24,09	501	13,1	361	33,7	23,4	6779	6822
166	M5	P.t.	104,93	24,04	502	12,8	475	52,9	36,7	4403	4577
167	M5	P.t.	104,69	25,04	501	11,3	450	38,0	26,5	3070	3644
168	M5	P.t.	104,72	24,99	501	11,9	492	42,9	30,0	4389	5231
169	M5	P.t.	105,31	25,11	499	12,2	424	26,1	18,3	6469	7357
170	M5	P.t.	105,16	25,04	501	11,6	418	28,2	19,7	6486	6355
171	M5	P.t.	106,12	25,07	500	10,9	520	26,5	18,5	4812	6477
172	M5	P.t.	102,76	25,11	500	12,1	525	68,1	47,7	12916	11977
173	M5	P.t.	102,93	25,02	501	12,1	485	51,9	36,2	8952	9324
174	M5	P.t.	105,35	25,05	500	11,2	440	55,8	39,0	6867	6930
175	M5	P.t.	104,04	25,00	500	11,6	584	95,0	66,4	14876	16112
176	M5	P.t.	104,95	24,99	501	12,2	474	52,4	36,6	9543	10005
177	M5	P.t.	103,42	24,97	500	12,5	443	22,0	15,4	5606	6765
178	M5	P.t.	104,86	24,99	501	11,9	422	26,5	18,5	7006	7667
179	M5	P.t.	105,03	25,00	501	11,8	441	22,1	15,4	5409	6340
180	M5	P.t.	104,97	25,00	501	12,2	400	44,2	30,9	8076	7484
181	M5	P.t.	106,26	25,02	501	11,7	374	45,0	31,5	6001	6554
182	M5	P.t.	104,87	24,95	501	12,4	433	45,9	32,1	8077	8333

Continuación Tabla A.5

ID	M	Es	b [mm]	h [mm]	L [mm]	H [%]	ρ [kg/m ³]	F_m [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]	$E_{m,g}$ [N/mm ²]	E_d [N/mm ²]
183	M5	P.t.	103,97	24,96	500	11,2	494	44,8	31,3	9039	8923
184	M5	P.t.	105,79	24,04	501	11,3	488	36,7	25,4	5723	5752
185	M5	P.t.	103,74	24,11	501	11,1	441	57,2	39,7	7890	7128
186	M5	P.t.	105,01	23,99	501	12,8	548	37,1	25,7	9143	9297
187	M5	P.t.	104,38	23,97	500	12,6	511	33,8	23,4	6899	7438
188	M5	P.t.	105,44	24,07	500	12,5	346	35,7	24,7	6541	5432
189	M5	P.t.	105,86	24,04	501	12,7	425	28,7	19,9	4764	4338
190	M5	P.t.	103,46	24,02	501	12,1	477	64,9	45,0	10175	10649
191	M5	P.t.	106,23	24,06	500	12,1	446	27,1	18,8	3031	3358
192	M5	P.t.	104,90	23,95	499	12,3	401	27,2	18,8	5528	5272
193	M5	P.t.	104,54	24,00	500	11,7	427	50,3	34,9	8306	7783
194	M5	P.t.	104,98	24,01	500	12,1	378	29,5	20,5	4251	4503
195	M5	P.t.	104,56	24,07	500	11,5	454	29,5	20,4	7711	7647
196	M5	P.t.	105,34	24,20	500	12,8	468	39,8	27,6	6936	8199
197	M5	P.t.	104,46	24,23	500	12,5	445	37,0	25,7	8077	8293
198	M5	P.t.	104,12	24,04	500	12,6	391	31,7	22,0	7752	6651
199	M5	P.t.	104,63	24,04	501	13,7	550	68,1	47,2	10309	10213
200	M5	P.t.	103,79	24,06	499	11,9	542	51,9	36,0	9811	8090
201	M5	P.t.	105,46	24,09	501	13,1	410	17,3	12,0	4037	5349
202	M5	P.t.	105,26	24,03	500	11,2	482	23,9	16,6	3552	3979
203	M5	P.t.	104,66	24,13	500	12,2	407	28,3	19,6	4720	5734
204	M5	P.t.	105,84	24,11	500	12,4	424	35,4	24,6	5938	6066
205	M5	P.t.	104,18	23,99	500	12,8	490	57,6	39,9	9791	8969
206	M5	P.t.	104,65	24,02	500	12,5	393	37,6	26,1	5563	6016
207	M5	P.t.	104,15	24,19	500	12,8	405	41,7	29,0	7678	7530
208	M5	P.t.	103,26	24,18	500	13,4	432	34,6	24,0	8181	7685
209	M5	P.t.	103,95	24,08	501	13,3	485	44,2	30,6	8518	8331
210	M5	P.t.	105,88	24,01	501	12,1	399	31,7	22,0	5229	5977
211	M5	P.t.	104,06	24,07	501	13,3	509	49,7	34,5	3822	4037
212	M5	P.t.	105,66	23,97	500	11,9	336	32,4	22,5	5664	6189
213	M5	P.t.	105,48	23,98	501	12,5	452	34,9	24,2	5150	6048
214	M5	P.t.	106,50	24,06	501	11,7	430	32,9	22,8	5097	5601
215	M5	P.t.	104,69	24,07	501	13,3	389	44,7	31,0	8812	8660
216	M5	P.t.	104,66	24,07	501	12,8	496	54,9	38,1	6903	7362
217	M5	P.t.	104,82	25,03	501	15,2	477	57,0	39,8	11280	-
218	M5	P.t.	103,05	25,10	501	14,2	527	62,6	43,8	13950	-
219	M5	P.t.	102,91	24,97	501	14,7	519	60,1	42,0	13202	-
220	M5	P.t.	104,88	25,11	501	14,3	456	53,9	37,7	10905	-
221	M5	P.t.	103,42	25,01	500	15,1	421	61,5	43,0	11450	-
222	M5	P.t.	104,22	25,04	500	15,0	512	86,5	60,5	14678	-
223	M5	P.t.	103,97	24,97	500	13,0	501	66,3	46,3	11781	-
224	M5	P.t.	104,44	23,98	500	13,8	513	72,5	50,2	11957	-
225	M5	P.t.	103,85	24,02	500	13,5	525	73,1	50,7	12077	-
226	M5	P.t.	103,98	24,08	501	13,3	450	60,9	42,3	10220	-
227	M5	P.t.	103,97	24,13	499	14,2	524	69,6	48,3	13896	-
228	M5	P.t.	104,34	24,09	500	14,9	609	80,8	56,0	10724	-
229	M5	P.t.	103,88	24,01	500	14,6	512	61,8	42,9	11716	-
230	M5	P.t.	104,52	24,11	500	14,4	496	56,0	38,9	10600	-
231	M5	P.t.	103,54	24,05	500	15,2	503	75,5	52,4	12895	-
232	M5	P.t.	104,62	24,19	499	13,6	538	48,0	33,3	9631	-
233	M5	P.t.	104,24	24,06	500	13,8	496	70,7	49,1	12775	-

Tabla A.6. Dimensiones geométricas y propiedades físico-mecánicas de los cuerpos de prueba ensayados a tracción paralela a las fibras (M6)

ID	M	Es	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>L</i>	H	ρ	<i>F_t</i>	<i>f_t</i>	<i>E_t</i>	<i>E_d</i>
			[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[kg/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
1	M6	P.e.	105,74	24,96	1301	12,2	497	23,1	21,6	7273	9650
2	M6	P.e.	105,38	24,90	1300	12,8	626	35,5	33,1	13965	15231
3	M6	P.e.	106,24	24,80	1299	12,6	451	15,1	14,1	5590	6868
4	M6	P.e.	105,90	24,91	1301	12,0	362	13,1	12,2	7158	6134
5	M6	P.e.	105,37	25,04	1299	12,5	398	21,6	20,2	6609	7444
6	M6	P.e.	106,08	25,26	1300	12,1	424	10,4	9,7	5826	5499
7	M6	P.e.	106,40	25,39	1299	12,6	481	22,8	21,3	6995	7231
8	M6	P.e.	106,74	25,17	1301	12,8	453	16,0	14,9	8601	9416
9	M6	P.e.	106,37	25,13	1300	12,1	507	17,8	16,7	4681	5546
10	M6	P.e.	106,86	25,22	1299	12,4	428	13,2	12,3	5565	6877
11	M6	P.e.	105,66	25,09	1299	11,5	513	24,9	23,2	6649	7225
12	M6	P.e.	104,80	25,43	1301	12,7	458	19,6	18,3	9380	11582
13	M6	P.e.	106,42	25,01	1299	12,0	460	19,2	17,9	5598	7420
14	M6	P.e.	105,94	25,07	1299	12,2	469	15,0	14,0	6249	8366
15	M6	P.e.	106,67	24,93	1299	12,7	442	16,0	15,0	4669	5160
16	M6	P.e.	105,46	25,02	1301	12,2	517	22,7	21,2	12044	12372
17	M6	P.e.	105,67	24,91	1299	12,9	488	24,4	22,8	6912	7871
18	M6	P.e.	105,83	25,15	1300	11,9	631	32,6	30,4	11816	14745
19	M6	P.e.	105,88	25,10	1300	12,6	428	19,8	18,5	6299	7317
20	M6	P.e.	105,17	24,25	1301	13,1	482	11,5	10,7	7363	7247
21	M6	P.e.	106,12	24,08	1299	12,6	472	6,2	5,8	4375	7405
22	M6	P.e.	105,03	24,12	1300	12,3	477	17,0	15,8	6053	7035
23	M6	P.e.	105,87	24,27	1300	12,2	449	17,8	16,6	5029	6260
24	M6	P.e.	105,81	24,25	1300	12,3	462	20,2	18,8	6169	7104
25	M6	P.e.	106,95	24,35	1301	12,1	454	17,8	16,7	3282	4355
26	M6	P.e.	105,39	23,96	1298	12,0	526	32,6	30,3	7212	8463
27	M6	P.e.	104,81	23,85	1300	12,4	615	44,3	41,2	14318	15723
28	M6	P.e.	106,53	24,10	1300	12,1	524	18,1	16,9	5754	6907
29	M6	P.e.	105,59	24,16	1299	13,0	541	23,5	21,9	9124	11702
30	M6	P.e.	106,59	24,23	1300	12,4	508	26,7	24,9	7144	8287
31	M6	P.e.	105,72	24,16	1299	12,4	450	26,5	24,7	4115	4965
32	M6	P.e.	106,48	24,21	1300	12,3	388	9,5	8,9	3577	4256
33	M6	P.e.	106,17	23,94	1300	13,1	429	17,1	16,0	3786	4560
34	M6	P.e.	106,55	24,03	1300	11,4	455	25,1	23,4	5443	5296
35	M6	P.e.	106,85	24,24	1299	12,7	422	14,7	13,7	5514	6287
36	M6	P.e.	106,58	24,31	1299	12,3	410	16,4	15,3	4916	6554
37	M6	P.e.	105,41	24,33	1299	12,2	501	26,2	24,5	7592	9206
38	M6	P.e.	105,94	24,08	1301	12,3	429	14,5	13,6	3873	4270
39	M6	P.e.	104,70	24,39	1302	12,6	497	31,8	29,6	10520	11245
40	M6	P.e.	105,20	24,06	1300	12,3	485	27,0	25,2	8985	10422
41	M6	P.e.	106,45	22,56	1303	12,4	422	8,5	7,9	4157	4755
42	M6	P.e.	106,08	23,98	1298	12,7	573	18,5	17,3	7494	10199
43	M6	P.e.	106,36	24,18	1299	12,6	440	20,6	19,2	7399	8034
44	M6	P.e.	106,13	24,22	1298	11,6	464	19,3	18,1	5412	6831
45	M6	P.e.	105,95	24,19	1300	12,3	464	24,1	22,5	6011	6857
46	M6	P.e.	106,33	24,00	1299	11,5	586	25,3	23,7	8952	11700
47	M6	P.e.	106,39	24,12	1301	12,9	458	23,1	21,6	7576	8197
48	M6	P.e.	106,41	24,09	1299	12,2	499	22,5	21,0	12297	11518
49	M6	P.e.	106,70	24,05	1298	12,8	600	34,0	31,8	9125	11688
50	M6	P.e.	107,11	23,88	1300	12,2	373	14,0	13,1	5787	6086
51	M6	P.t.	106,03	25,01	1300	11,5	459	9,4	8,8	4798	4522

Continuación Tabla A.6

ID	M	Es	b [mm]	h [mm]	L [mm]	H [%]	ρ [kg/m ³]	F_t [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	E_t [N/mm ²]	E_d [N/mm ²]
52	M6	P.t.	103,91	24,97	1300	13,7	426	17,8	16,6	10715	10142
53	M6	P.t.	104,61	25,13	1300	13,3	441	14,4	13,4	10880	9018
54	M6	P.t.	105,03	25,03	1301	12,5	444	17,3	16,1	8494	8816
55	M6	P.t.	105,01	25,08	1302	13,2	449	17,8	16,5	6983	7515
56	M6	P.t.	102,85	25,16	1299	14,0	475	20,3	18,8	12297	12015
57	M6	P.t.	105,88	25,02	1300	13,4	429	17,2	16,1	7080	7763
58	M6	P.t.	104,37	24,99	1299	13,5	578	23,3	21,7	15886	13649
59	M6	P.t.	104,87	24,99	1300	14,0	422	20,0	18,6	10387	10427
60	M6	P.t.	102,87	24,96	1300	14,0	489	12,4	11,5	8660	10647
61	M6	P.t.	104,57	25,00	1301	13,7	428	18,2	16,9	8246	8748
62	M6	P.t.	104,01	24,97	1299	13,0	513	24,3	22,5	12407	13009
63	M6	P.t.	104,78	24,98	1299	13,9	410	19,1	17,8	11521	9804
64	M6	P.t.	105,11	24,95	1301	13,7	414	14,9	13,9	9211	9355
65	M6	P.t.	105,08	24,89	1299	13,1	441	16,6	15,4	8550	10302
66	M6	P.t.	103,98	24,92	1301	13,3	392	18,3	17,0	6055	6550
67	M6	P.t.	103,79	24,03	1300	14,0	452	24,0	22,3	10132	8843
68	M6	P.t.	104,05	24,03	1300	12,6	438	19,5	18,1	7866	8647
69	M6	P.t.	104,69	23,98	1301	12,6	479	17,4	16,2	10334	10353
70	M6	P.t.	104,03	23,97	1301	12,3	481	21,3	19,8	9113	9672
71	M6	P.t.	105,47	24,03	1301	12,9	408	19,9	18,5	7443	7528
72	M6	P.t.	105,67	24,01	1299	12,3	426	11,8	11,0	5512	6088
73	M6	P.t.	104,12	24,03	1300	11,4	453	12,2	11,3	7525	7527
74	M6	P.t.	105,93	24,02	1300	12,3	413	13,9	12,9	3785	4407
75	M6	P.t.	104,25	24,00	1301	13,5	464	16,1	15,0	11075	11241
76	M6	P.t.	105,28	24,00	1298	12,6	414	17,2	16,0	-	7562
77	M6	P.t.	104,62	24,03	1301	12,9	369	11,3	10,5	5997	8935
78	M6	P.t.	104,10	24,05	1300	12,6	350	11,6	10,7	7991	6558
79	M6	P.t.	105,18	24,13	1299	13,3	449	13,6	12,7	6814	8327
80	M6	P.t.	104,11	24,11	1302	13,6	416	10,9	10,1	6887	7327
81	M6	P.t.	104,12	24,00	1300	13,8	434	15,0	14,0	8564	10055
82	M6	P.t.	104,46	23,97	1300	13,3	465	22,9	21,3	8472	10579
83	M6	P.t.	103,98	24,06	1301	15,0	497	30,9	28,7	12344	12469
84	M6	P.t.	105,65	24,19	1300	12,5	419	6,7	6,3	4754	5365
85	M6	P.t.	105,14	24,03	1300	14,2	376	12,4	11,6	5574	6006
86	M6	P.t.	104,06	24,07	1301	13,9	398	18,3	17,0	7892	8064
87	M6	P.t.	105,82	23,98	1299	11,8	393	11,4	10,6	6089	5425
88	M6	P.t.	103,85	24,01	1300	12,7	407	22,9	21,2	9518	9573
89	M6	P.t.	103,86	23,99	1300	14,4	469	25,0	23,2	8828	9076
90	M6	P.t.	104,31	23,99	1301	13,6	433	24,3	22,6	9094	9444
91	M6	P.t.	103,59	24,12	1300	12,7	462	18,2	16,9	8004	9543
92	M6	P.t.	103,88	24,12	1301	13,6	458	25,6	23,8	9143	10910
93	M6	P.t.	105,80	24,08	1301	12,6	383	16,5	15,4	6065	5579
94	M6	P.t.	104,11	24,12	1301	13,7	560	31,3	29,1	12874	14260
95	M6	P.t.	104,97	24,05	1301	12,9	342	17,3	16,1	6500	5941
96	M6	P.t.	105,85	23,98	1300	12,0	395	9,8	9,1	6459	6930
97	M6	P.t.	106,15	24,07	1301	12,3	433	19,8	18,5	6581	7659
98	M6	P.t.	105,31	24,07	1301	13,2	371	19,8	18,4	7486	7545
99	M6	P.t.	104,32	24,31	1300	13,5	544	22,4	20,8	11309	13213
100	M6	P.t.	104,60	25,09	1280	12,4	545	47,1	43,8	8744	-
101	M6	P.t.	103,89	24,19	1299	11,9	557	20,9	19,4	17003	-

Tabla A.7. Datos de los cuerpos de prueba sometidos a ensayos con carga de larga duración

ID	M	Es	Med	b [mm]	h [mm]	L [mm]	H_o [%]	H_f [%]	ρ_o [kg/m ³]	ρ_f [kg/m ³]	Δ_{inst}	Δ_7	Δ_{184}	Δ_{365}	Δ_{392}
1	M7	P.e.	No	100,51	44,94	2599	10,0	12,3	549	550	4,6	5,5	6,2	8,1	8,1
2	M7	P.e.	No	100,53	46,15	2599	10,7	12,7	568	565	4,8	5,9	7,2	7,8	8,2
3	M7	P.e.	Si	100,24	45,81	2599	9,2	11,3	580	584	10,4	11,6	16,8	19,9	19,5
4	M7	P.e.	No	100,28	45,63	2600	9,6	12,0	594	593	6,1	7,2	8,9	10,4	10,4
5	M7	P.e.	Si	100,22	45,97	2599	9,0	11,2	541	543	7,8	8,5	11,4	12,5	13,2
6	M7	P.e.	No	100,51	45,54	2600	10,4	12,7	540	540	7,1	8,4	10,7	15,9	13,6
7	M7	P.e.	No	100,54	45,62	2600	10,3	12,6	576	575	6,0	6,8	8,8	9,6	10,6
8	M7	P.t.	No	100,45	45,94	2602	9,5	11,5	566	568	6,5	8,0	9,9	12,3	11,8
9	M7	P.t.	No	100,36	45,18	2600	10,1	12,2	480	480	5,7	6,2	7,9	8,6	8,8
10	M7	P.t.	Si	100,32	46,17	2602	10,4	12,2	467	466	7,0	8,1	10,5	12,4	12,4
11	M7	P.t.	Si	100,36	46,03	2601	10,9	12,3	441	444	14,7	18,1	22,8	32,8	30,7
12	M7	P.t.	No	100,45	45,57	2599	10,6	11,7	489	488	5,7	6,4	8,2	9,2	9,5
13	M7	P.t.	No	100,10	45,53	2601	10,4	11,9	609	609	5,3	6,1	8,1	9,6	9,1
14	M7	P.t.	Si	100,26	45,55	2598	10,1	12,0	530	532	6,2	7,0	9,8	10,9	11,1

