



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL**

**FACULTAD REGIONAL CONCEPCIÓN DEL URUGUAY**

**CARRERA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA, MENCIÓN MATERIALES**

**TESIS DE DOCTORADO**

**Comportamiento estructural de la madera de Álamo (*Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67') cultivado en el delta del río Paraná**

**Tesista:**

**Guillaumet, Alfredo Aníbal**

**Director:**

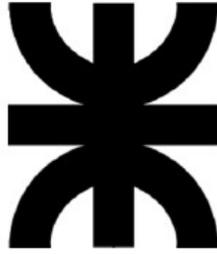
**Dr. Ing. Piter, Juan Carlos J.**

**Co-Director:**

**Dr. Ing. Acuña Rello, Luis**

**2019**





**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL**

**FACULTAD REGIONAL CONCEPCIÓN DEL URUGUAY**

**CARRERA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA, MENCIÓN MATERIALES**

**TESIS DE DOCTORADO**

**Comportamiento estructural de la madera de Álamo (*Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67') cultivado en el delta del río Paraná**

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 el Ingeniero en Construcciones Alfredo Aníbal Guillaumet

Director:

Dr. Ing. Piter Juan Carlos J.

Co-Director:

Dr. Ing. Acuña Rello, Luis

**Concepción del Uruguay, Entre Ríos  
Argentina  
2019**



---

---

## 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 familia, en especial a mi esposa Mercedes, que sin su comprensión y apoyo no hubiera sido posible dedicarle el tiempo que demandó esta tarea.

A mi Director de tesis, Juan Carlos, por su generosidad para compartir sus conocimientos, sus enseñanzas y constante apoyo que hicieron posible concluir este trabajo.

A mi Co-director de tesis, Luis, que siempre estuvo a disposición para compartir sus conocimientos y guiarme en el desarrollo de este trabajo.

A mis amigos y compañeros de trabajo en el Grupo GIDEC, Roberto y Cecilia, por su constante apoyo y colaboración en el desarrollo del programa experimental.

A los becarios del grupo GIDEC, graduados y alumnos, que a lo largo de estos años trabajaron con dedicación y responsabilidad acompañando el desarrollo experimental.

A los integrantes del Grupo de Estudios en Madera de la UNNOBA por su colaboración en el desarrollo experimental.

A mis amigos del Grupo GEMA, Alexandra, Eduardo, Pamela, Rocío y Ricardo por su apoyo y colaboración.

A la Mg. Ingeniera Agrónoma Silvia Cortizo, por su asesoramiento en la selección de los clones.

A todos GRACIAS ...

---

---



## RESUMEN - ABSTRACT

---

### RESUMEN

En objetivo principal de esta tesis es conocer las principales propiedades mecánicas y físicas de la madera aserrada de los clones de *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' cultivados en el delta del río Paraná

Se diseñó un amplio programa experimental que incluyó: diez muestras para ensayos de flexión, dos muestras para ensayos de compresión paralela a las fibras, dos muestras para ensayos de compresión perpendicular a las fibras y dos muestras para ensayos de tracción paralela a las fibras, integradas por 889, 100, 143 y 130 probetas respectivamente. Para el desarrollo de este programa se respetaron los lineamientos de la normativa europea: UNE EN 408 (2011), UNE EN 384 (2010) y UNE EN 338 (2010) como base.

Se evaluó la incidencia de las singularidades de apreciación visual en las propiedades mecánicas. En primer lugar, se analizó la influencia del ataque del insecto *Megaplatypus Mutatus*,

se definieron 4 grados de ataque. Se confirmó el alto impacto negativo que posee en la resistencia pero se alcanzaron resultados que alientan a profundizar este estudio con el objetivo de confirmar la posibilidad de utilizar, para uso estructural, las piezas que presenten un grado de ataque leve. Por otro lado, se ratificó la importancia como parámetros para una clasificación visual de la nudosidad y de la presencia de médula, y en menor medida de la inclinación de las fibras. Se debe destacar la baja nudosidad que presentaron las piezas. Se analizaron diferentes perfiles de resistencia, rigidez y densidad, con los correspondientes límites para los principales parámetros visuales en línea con el sistema internacional de clases resistentes establecido en la norma europea EN 338 (2010). Se confirmó la razonabilidad de tratar a los dos clones en conjunto y utilizar un método de clasificación único para tablas y vigas, se concluyó que el método propuesto por la norma IRAM 9662-4 (2015) es el que ofrece las mayores ventajas técnicas y económicas.

Se realizaron estudios complementarios que permiten profundizar el comportamiento de la especie como material estructural: i) resistencia y rigidez en compresión paralela y perpendicular a las fibras y su relación con el comportamiento a flexión y la densidad, ii) resistencia en tracción paralela a las fibras y su relación con la resistencia a flexión, iii) influencia de la altura de la sección en la resistencia a flexión y aplicabilidad de la fórmula de ajuste propuesta en la norma UNE EN 384 (2010), iv) relación entre el módulo de elasticidad local y global, v) relación entre el módulo de elasticidad dinámico (métodos de ultrasonido y vibraciones inducidas) con los módulos local y global.

Los resultados obtenidos demuestran que la madera de esta especie de rápido crecimiento ofrece un muy buen comportamiento en los aspectos estructurales estudiados y que constituye una alternativa interesante para el proyectista de estructuras de madera, tanto como madera aserrada como en vidas laminadas encoladas (IRAM 9660-1 2015). Al mismo tiempo, se pone en evidencia la necesidad de profundizar algunos de los aspectos estudiados y otros nuevos, por ejemplo, estudios para obtener aquellas propiedades mecánicas indispensables para la aplicación de modelos numéricos.

**Palabras clave:** *Populus deltoides; propiedades mecánicas, clasificación visual; parámetros de clasificación; perfiles de resistencia, rigidez y densidad; madera aserrada.*

## ABSTRACT

The main objective of this thesis is to learn the main physical and mechanical properties of sawn wood from *Populus deltoides* 'Australian 129/60' and 'Stoneville 67' clones cultivated in the Parana River delta.

A large experimental program was designed which included: ten samples for bending tests, two samples for compression tests parallel to the grain, two samples for compression tests perpendicular to the grain and two samples for tension tests parallel to the grain. In total, it is composed of 889, 100, 143 and 130 specimens respectively. For the development of this program, the European regulation guidelines were followed: UNE EN 408 (2011), UNE EN 384 (2010) and UNE EN 338 (2010) as a base.

The incidence of the singularities of visual appreciation in the mechanical properties was evaluated. First, the influence of the attack of the insect *Megaplatypus Mutatus* was assessed and four levels of attack were defined. It was confirmed that it has a high negative impact on resistance, but results were obtained that encourage further study with the aim of confirming the possibility of using, for structural use, the pieces that present a degree of mild attack. On the other hand, it was confirmed the importance of knot ratio and the presence of pith, and to lesser extent the inclination of the grain, as parameters for visual classification. It should be underscored the low knot ratio in the samples. Different profiles of strength, stiffness and density were assessed, with the corresponding limits for the main visual parameters, aligned with the international strength class system established in the European standard EN 338 (2010). It was agreed to treat both clones together and use a single classification method for boards and beams, and it was concluded that the method suggested in standard IRAM 9662-4 (2015) offers the best technical and economic advantages.

Complementary studies were conducted that allow to deepen on the specie behavior as structural material: i) the strength and stiffness in compression parallel and perpendicular to the grain and their relation to the flexural behavior and density, ii) the tensile strength parallel to the grain and its relation to flexural strength, iii) the influence of the section's height on the flexural strength and applicability of the adjustment formula proposed in standard UNE EN 384 (2010), iv)

the relationship between the local and global modulus of elasticity, v) the relationship between the dynamic modulus of elasticity (ultrasound methods and induced vibration ) with the local and global modules.

The results achieved show that the timber from this fast-growing species behaves very well in the structural aspects analyzed and that it serves as an interesting alternative for structural use, both as sawn wood and as glued laminated beams (IRAM 9660-1 2015). At the same time, the need to make further progress on some studied aspects or new ones becomes evident, for example, studies to obtain the mechanical properties essential for the implementation of numerical modelling.

*Keywords: Populus deltoides; mechanical properties, visual classification; classification parameters; profiles of resistance, rigidity and density; sawn timber.*

## ÍNDICE

---

---

### CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

<b>1.1. Presentación del problema</b> .....	1
1.1.1. La riqueza forestal de Argentina y la utilización de la madera en la construcción .....	1
1.1.2. El álamo .....	2
1.1.3. La madera de álamo como material estructural .....	4
<b>1.2. Antecedentes y fundamentación</b> .....	5
<b>1.3. Objetivos</b> .....	7
1.3.1. Objetivo general .....	7
1.3.2. Objetivos específicos .....	8
<b>1.4. Metodología de desarrollo</b> .....	8
<b>1.5. Resultados</b> .....	9

**CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO**

<b>2.1. La clasificación por resistencia .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2. La madera como material estructural .....</b>	<b>16</b>
<b>2.3. Métodos de clasificación por resistencia .....</b>	<b>20</b>
2.3.1 La clasificación visual .....	21
Singularidades apreciables a simple vista con influencia en las propiedades físicas y mecánicas .....	23
Afectaciones biológicas .....	23
Médula .....	24
Nudosidad .....	25
Inclinación de las fibras .....	26
Anillos de crecimiento .....	27
2.3.2. La clasificación mecánica.....	27
<b>2.4. Otros factores con influencia en las propiedades físicas y mecánicas .....</b>	<b>28</b>
2.4.1. Contenido de humedad .....	28
2.4.2. Dimensiones de la pieza... .....	30
2.4.3. Temperatura .....	31
2.4.4. Duración de la carga .....	32
<b>2.5. Comportamiento de la madera en compresión .....</b>	<b>32</b>
2.5.1. Compresión paralela a las fibras .....	32
2.5.2. Compresión perpendicular a las fibras .....	34
<b>2.6. Comportamiento de la madera en tracción paralela a las fibras .....</b>	<b>37</b>
<b>2.7. Módulo de elasticidad. Determinación a través de ensayos estáticos y métodos dinámicos alternativos .....</b>	<b>37</b>
<b>2.8. La situación normativa .....</b>	<b>40</b>
2.8.1. La situación normativa en Europa .....	40
2.8.2. La situación normativa en Argentina .....	42
<b>2.9. Datos de la especie .....</b>	<b>44</b>
<b>2.10. Aspectos ambientales .....</b>	<b>55</b>

**CAPITULO 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

<b>3.1. Materiales</b> .....	59
<b>3.2. Metodología</b> .....	62
3.2.1. Dimensiones y relevamiento de las características visuales de las probetas para los ensayos a flexión .....	62
Determinación de las dimensiones de las probetas .....	63
Evaluación de la afectación por ataque de insectos .....	63
Determinación de la presencia de médula .....	64
Relevamiento y criterios de evaluación de la nudosidad .....	65
Determinación de la desviación de la fibra .....	70
Determinación de la dimensión de los anillos de crecimiento .....	70
Relevamiento de otras singularidades .....	71
3.2.2. Procedimiento para el ensayo a flexión .....	71
Medición de cargas y deformaciones .....	74
Determinación del módulo de elasticidad local .....	77
Determinación del módulo de elasticidad global .....	78
Determinación de la resistencia a flexión .....	78
Registro del tipo de rotura .....	79
Determinación de la humedad y la densidad aparente de las probetas	79
Ajuste a condiciones de referencia .....	80
3.2.3. Procedimiento para el ensayo de compresión paralela a las fibras .....	80
Determinación del módulo de elasticidad en compresión paralela a las fibras .....	81
Determinación de la resistencia en compresión paralela a las fibras	83
Determinación del contenido de humedad y la densidad aparente de las probetas de compresión paralela a las fibras .....	83
3.2.4. Procedimiento para el ensayo de compresión perpendicular a las fibras ...	84
Determinación del módulo de elasticidad en compresión perpendicular a las fibras .....	86

Determinación de la resistencia en compresión perpendicular a las fibras .....	87
Determinación del contenido de humedad y la densidad aparente de las probetas de compresión perpendicular a las fibras .....	88
3.2.5. Procedimiento para el ensayo en tracción paralela a las fibras .....	88
Determinación de la resistencia en tracción paralela a las fibras .....	89
Determinación del contenido de humedad y la densidad aparente de las probetas de tracción paralela a las fibras .....	89
3.2.6. Procedimiento para la determinación del módulo de elasticidad dinámico mediante ensayos no destructivos .....	90
Módulo de elasticidad dinámico longitudinal por ultrasonidos .....	90
Módulo de elasticidad dinámico longitudinal por vibraciones inducidas .....	91
<b>3.3. Análisis estadístico .....</b>	<b>92</b>
<b>CAPITULO 4. RESULTADOS</b>	
<b>4.1. Clasificación visual por resistencia.....</b>	<b>95</b>
4.1.1. Análisis de las singularidades de apreciación visual .....	96
Ataque biológico .....	96
Presencia de médula .....	98
Nudosidad .....	100
Inclinación de las fibras .....	103
Anillos de crecimiento .....	104
Otras singularidades .....	105
4.1.2. Propiedades fisico-mecánicas y su relación con las singularidades .....	105
Impacto del ataque biológico sobre la resistencia y la rigidez en flexión .....	106
Propiedades mecánicas en flexión y densidad de los cuerpos de prueba que no rompieron por causa del ataque biológico .....	114
Influencia de la presencia de médula sobre las propiedades mecánicas en flexión y la densidad .....	123
Influencia de la nudosidad sobre la resistencia y la rigidez en flexión ..	130

Influencia de la inclinación de las fibras sobre la resistencia y la rigidez en flexión .....	136
Influencia del espesor de los anillos de crecimiento sobre las propiedades mecánicas en flexión y la densidad .....	138
4.1.3. Desarrollo de modelos de clasificación visual .....	141
Análisis de perfiles de resistencia, rigidez y densidad .....	142
Propuesta de un modelo para la clasificación visual por resistencia del material investigado .....	148
<b>4.2. Condiciones de referencia e interrelación de las propiedades físico-mecánicas</b> .....	<b>150</b>
4.2.1. La resistencia en flexión y su relación con las dimensiones de la sección transversal de la viga .....	151
Análisis de la efectividad del criterio europeo .....	154
Evaluación de alternativas al criterio europeo .....	159
4.2.2. Resistencia y rigidez en compresión paralela y perpendicular a las fibras su relación con las propiedades mecánicas en flexión y la densidad .....	161
Resistencia en compresión paralela a las fibras .....	161
Módulo de elasticidad en compresión paralela a las fibras .....	167
Resistencia en compresión perpendicular a las fibras .....	169
Módulo de elasticidad en compresión perpendicular a las fibras .....	173
4.2.3. Resistencia en tracción paralela a las fibras y su relación con la resistencia en flexión .....	176
4.2.4. Módulo de elasticidad. Determinación a través de ensayos estáticos y métodos dinámicos alternativos .....	183
Resultados experimentales .....	184
Relación entre los resultados experimentales obtenidos por métodos estáticos y dinámicos alternativos .....	186
Influencia del esfuerzo de corte sobre el módulo de elasticidad. Comparación de los resultados experimentales con criterios de relevancia nacional e internacional .....	187

## CAPITULO 5. CONCLUSIONES

<b>5.1. Conclusiones vinculadas a la influencia de las singularidades de apreciación visual sobre las propiedades físico-mecánicas más importantes</b> .....	<b>191</b>
--	------------

<b>5.2. Conclusiones referidas a la comparación del comportamiento físico-mecánico de ambos clones entre si y con resultados publicados para otras especies relevantes del país .....</b>	<b>194</b>
<b>5.3. Conclusiones relacionadas a la propuesta de un método visual de clasificación por resistencia aplicable a todas las secciones estructurales del material estudiado .....</b>	<b>195</b>
<b>5.4. Conclusiones vinculadas con la verificación de la precisión del criterio europeo, adoptado por las normas de nuestro país, para interpretar el comportamiento de la madera investigada .....</b>	<b>196</b>
5.4.1 Relación entre la resistencia en flexión y las dimensiones de la sección transversal de la viga .....	196
5.4.2. Dependencia de las propiedades mecánicas en compresión respecto de las propiedades mecánicas en flexión y la densidad .....	197
5.4.3 Vinculación entre la resistencia en tracción paralela a las fibras y la de flexión .....	199
5.4.4. Correspondencia entre valores del módulo de elasticidad determinado a través de métodos estáticos y dinámicos .....	199
<b>5.5. Futuras investigaciones .....</b>	<b>201</b>
5.5.1. Análisis de modelos para una clasificación mecánica por resistencia .....	201
5.5.2. Investigación experimental de las propiedades mecánicas que no se abordaron en esta Tesis .....	202
5.5.3. Investigación experimental sobre el impacto del grado de ataque del insecto <i>Megaplatypus mutatus</i> en las propiedades mecánicas .....	202

## **CAPITULO 6. BIBLIOGRAFIA**

<b>6.1. Publicaciones y tesis .....</b>	<b>203</b>
<b>6.2. Normas y reglamentos .....</b>	<b>214</b>

## **ANEXOS.**

Anexo I. Análisis estadístico de los datos experimentales .....	219
Anexo II. Base de datos del trabajo experimental .....	259

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

### 1.1.1. La riqueza forestal de Argentina y la utilización de la madera en la construcción

La utilización de la madera en la construcción data de muy antiguo en el mundo. Argentina, con poca tradición en esta temática, le asignó a este material un papel secundario dentro de la ejecución de obras. En consecuencia, durante muchos años se utilizaron especies nativas de madera dura o semidura con excelentes propiedades mecánicas y de durabilidad natural, pero sin el respaldo de estudios enfocados tanto sobre el material como sobre las reglas de diseño. En las últimas décadas, la protección del bosque nativo y la implementación de planes de forestación con especies de rápido crecimiento orientaron el consumo de madera para la construcción hacia estas últimas y colocaron a los profesionales de la construcción ante el desafío de utilizar un material cuyo comportamiento mecánico no es conocido con el rigor que demandan los modernos conceptos de seguridad estructural.

Argentina es un país con una importante riqueza forestal. Se destaca en primer lugar la prevalencia de la superficie forestada con coníferas que alcanza 727.260 ha., de las cuales 569.860 ha. están distribuidas en las provincias de Misiones y Corrientes, siguiéndoles en importancia las provincias de Neuquén, Córdoba, Chubut y Entre Ríos con un total de 145.646 ha. En segundo lugar emergen las plantaciones de Eucaliptos con 255.003 ha., de las cuales 215.366 ha. se ubican en las provincias de Entre Ríos y Corrientes, en tanto que 21.557 ha. se encuentran en las provincias de Jujuy y Misiones. El tercer lugar de importancia en el país es ocupado por las plantaciones de salicáceas con 97.893 ha., de las cuales 84.560 ha. se encuentran en el delta del Río Paraná (en las provincias de Buenos Aires y Entre Ríos), y están constituidas fundamentalmente por sauces y álamos (Dirección de Producción Forestal, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Nación, 2015).

Se puede afirmar que en Argentina aún existen importantes vacíos en la caracterización de la madera obtenida de especies de rápido crecimiento y destinadas al uso estructural. En los congresos y jornadas forestales llevados a cabo en los últimos años se presentaron resultados de numerosos trabajos de investigación sobre silvicultura, mejoramiento genético, industrialización, crecimiento y producción de las plantaciones, sistemas silvopastoriles, protección del bosque, impacto social y ambiental de la explotación forestal, etc.; pero muy pocos sobre la caracterización tecnológica de la madera de especies provenientes de bosques implantados. A su vez, en la mayoría de los casos la determinación de las propiedades mecánicas fue ejecutada sobre probetas pequeñas libres de defectos, no integrando frecuentemente muestras adecuadas en cantidad y tamaño para garantizar valores confiables.

### 1.1.2. El álamo

El álamo (Chopo), género *Populus*, es originario del hemisferio norte. Solo el *Populus euphratica* y el *Populus ilicifolia* se desarrollaron en una zona reducida del hemisferio sur, comprendiendo unas 40 especies a las que deben agregarse numerosos híbridos naturales o logrados por el hombre. En Argentina, y en la gran mayoría de las plantaciones a nivel mundial, se cultivan el *Populus nigra* L., el *Populus deltoides* Marsh. y sus híbridos (*Populus deltoides nigra* x *Populus deltoides* (*Populus x canadensis* anteriormente *Populus euramericana*)). Los *Populus deltoides*, originarios del sudeste de los Estados Unidos, son los más aptos para una

zona con inviernos suaves, veranos húmedos y elevadas precipitaciones anuales como la del delta del río Paraná. El listado de clones de *Populus deltoides* posibles de implantar en el delta mencionado es extenso (se encuentran en cultivo más de 20 clones distintos), pero de acuerdo a los resultados obtenidos al momento, los más recomendados son: ‘Australiano 129/60’, ‘Australiano 106/60’ y ‘Mississippi Slim’ conocido como “Stoneville 67” (Cortizo 2005; Borodowski, 2006).

El cultivo del álamo se caracteriza por la homogeneidad de las plantaciones. No obstante, se utiliza un número variable de clones según las regiones de cultivo a fin de cubrir las necesidades de adaptación a distintos ambientes ecológicos y lograr altos niveles de crecimiento, y tolerancia a plagas y enfermedades locales. Esta situación favorece la sustentabilidad de las plantaciones (Borodowski 2006; Cortizo 2005). El éxito del cultivo intensivo del álamo se debe, en parte, a la alta versatilidad de empleos de su madera y a sus principales propiedades, tales como la liviandad, el color claro, la alta homogeneidad y la facilidad para el trabajado, descortezado, encolado y terminado (Castro 2006).

En el delta del río Paraná resulta muy común la explotación silvopastoril. La Figura 1.1 muestra una plantación típica.



**Figura 1.1:** Sistema silvopastoril del delta del río Paraná. Extraída de Di Marco (2015)

En Argentina la madera de álamo está bien considerada para diferentes usos, entre los más destacados se pueden mencionar: i) industrial: como madera aserrada, básicamente en cajonería, aberturas, embalajes; como madera debobinada en contrachapados y como madera triturada en paneles; ii) medio ambiental: tratamiento de aguas residuales, estabilización de terrenos, retención de carbono; iii) usos energéticos. La utilización en estructuras es relativamente nueva y no es tenida en cuenta por la mayoría de los profesionales de la construcción, que asocian la madera de álamo a otros usos y no conocen con precisión sus propiedades resistentes y elásticas.

Un beneficio importante del cultivo de álamos es la gran capacidad que poseen para la absorción de CO<sub>2</sub> y para la fijación de Carbono debido a su rápido crecimiento. Una hectárea plantada con álamo puede absorber más de 25 toneladas de CO<sub>2</sub> (Castro 2006).

### **1.1.3. La madera de álamo como material estructural**

La madera de álamo se identifica, en general, como proveniente de una especie de rápido crecimiento, que posee baja densidad y rigidez pero que exhibe resultados que podrían satisfacer las condiciones para fabricación de vigas laminadas o ser utilizadas como vigas aserradas de pequeñas luces. En este sentido, y por su importancia en relación al tema planteado, se transcribe a continuación lo expresado por Castro (2006) *“En Italia, varios ejemplos históricos de aplicación de la madera de álamo en el ámbito de la construcción prueban que no hay razones técnicas para no utilizar madera de álamo para propósitos estructurales: por ejemplo la estructura del techo de la “Sala delle feste” - Valentino Castle - Torino, siglo XVIII (Bertolini C.); partes de la estructura central del techo del Teatro “Verdi” - Pisa, siglo XIX, (Carmassi M., 1994); estructuras del puente del viaducto Paderno d’Adda - Como, siglo XIX (Bertolini C., 1989). En estos casos, la madera de álamo fue elegida en virtud de su liviandad y muy buena estabilidad dimensional; algunos problemas relativos a su modesta durabilidad y al comportamiento mecánico recibieron oportuna consideración y fueron resueltos en la etapa de diseño: estas estructuras prueban aún su resistencia”*.

En particular, la madera de *Populus deltoides* del delta del río Paraná presenta aceptables valores de la resistencia y rigidez, propiedades que a su vez se destacan positivamente en relación a su densidad, lo cual puede señalarse como una ventaja desde el

punto de vista de la utilización estructural (Castro 2006; Cortizo *et al.* 2017; INTI CIRSOC 2016a). Por su parte, y como referencia acerca de la consideración de este material en el plano internacional, puede citarse que la norma europea UNE EN 1912 (2010) le asigna a la madera de chopo (álamo) distintas calidades estructurales que van desde una calidad C18 hasta una C27 (según las clases definidas en la norma UNE EN 338 2010), variando con el país de origen y la norma de clasificación.

## 1.2. ANTECEDENTES Y FUNDAMENTACIÓN

Se puede constatar que en el país hasta la fecha se han investigado, conforme a los modernos conceptos del diseño estructural, las propiedades más importantes, y a su vez se han desarrollado métodos de clasificación por resistencia, para las siguientes combinaciones especie / procedencia de madera aserrada: i) tablas y vigas de *Pinus taeda/elliottii* cultivado en el noreste de Corrientes y Misiones (IRAM 9662-3 2015 e IRAM 9670 2002), *Araucaria Angustifolia* procedente de Misiones (IRAM 9662-1 2015 e INTI CIRSOC 2016a), *Eucalyptus grandis* forestado en Entre Ríos, Corrientes y Misiones (IRAM 9662-2 2015 e INTI CIRSOC 2016a) y, ii) tablas de *Populus deltoides* clones 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' cultivados en el delta del río Paraná (IRAM 9662-4 2015).

Esta información pone de manifiesto la necesidad de llevar a cabo nuevos estudios orientados, por un lado, a caracterizar nuevas combinaciones especie / procedencia con el fin de incorporarlas a las normas y reglas de diseño estructural vigentes en el país y, por el otro, a ampliar el conocimiento existente sobre el comportamiento estructural de las especies mencionadas anteriormente, las cuales han sido investigadas solo parcialmente. Dentro de este segundo propósito se inscribe la realización del presente Trabajo de Tesis, el cual persigue proveer resultados que amplíen la información actualmente disponible sobre el comportamiento estructural de las tablas de *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67', cultivados en el delta del río Paraná (IRAM 9662-4 2015), que posibiliten extender la utilización del material a piezas con secciones transversales de mayores dimensiones, y que permitan conocer la precisión con la que las reglas de diseño adoptadas por el país (INTI CIRSOC 2016a) interpretan el comportamiento de este importante recurso.

La extensión de la utilización del material a piezas con secciones transversales de mayores dimensiones, tales como vigas, requiere de un minucioso estudio acerca de la influencia de los principales parámetros que afectan las propiedades mecánicas y concluir en el diseño de un método de clasificación por resistencia.

El análisis de la evolución en el mundo de la clasificación por resistencia de la madera estructural indica que, hasta comienzos del siglo veinte, la clasificación visual se realizaba 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 1995a). 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 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 con 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 aumentar la confiabilidad. Razones técnicas y económicas son, entonces, las que justifican la clasificación por resistencia de la madera estructural (Blaß y Görlacher 1996; Glos y Lederer 2000).

En el caso particular de la madera de *Populus deltoides* del delta del río Paraná, además del análisis de la correlación de las singularidades particulares de esta madera con sus propiedades mecánicas, cobra una especial relevancia el estudio del ataque producido por el insecto *Megaplatypus mutatus*. El desconocimiento actual de la influencia del daño originado por este insecto, sobre el comportamiento mecánico de las tablas, ha originado que su presencia se considere un parámetro de clasificación causante de rechazo para la pieza que lo contiene (IRAM 9662-4 2015), lo cual determina importantes pérdidas económicas.

La reciente puesta en vigencia legal del primer Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601 (INTI CIRSOC 2016a,b) sitúa al país en condiciones de consolidar la

utilización en estructuras de la madera y sus productos derivados, de la manera en que ya lo han hecho países vecinos como Chile (NCh 1198 2014) y Brasil (ABNT 2010). De esta circunstancia surgen ventajas evidentes para consolidar el uso integral del material investigado en esta Tesis. Se destaca entonces la importancia de verificar si las reglas de diseño adoptadas por el reglamento antes citado interpretan, con la requerida precisión, el comportamiento mecánico del *Populus deltoides* cultivado en el delta del río Paraná en aspectos tales como la influencia del tamaño de la sección sobre la resistencia a la flexión, la relación entre las distintas propiedades que caracterizan su marcada anisotropía, entre otros tópicos relevantes para el diseño estructural.

### **1.3. OBJETIVOS**

En este Trabajo de Tesis se ha planteado un objetivo general y objetivos específicos. Estos están vinculados al conocimiento de tópicos relacionados a la clasificación visual por resistencia del material investigado, a la relación entre las propiedades que definen su comportamiento estructural y a las condiciones de referencia que permiten obtener resultados comparables.

#### **1.3.1. Objetivo general**

- Conocer las principales propiedades mecánicas y físicas de la madera aserrada de los clones de *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' cultivados en el delta del río Paraná, a través de determinaciones efectuadas conforme a las modernas tendencias internacionales del diseño estructural.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Evaluar la influencia de las singularidades de apreciación visual sobre las propiedades físico-mecánicas más importantes para el uso estructural del material.

- Comparar el comportamiento físico-mecánico de ambos clones entre sí y con resultados publicados para otras especies relevantes del país.
- Proponer un método visual de clasificación por resistencia aplicable a todas las secciones estructurales del material estudiado.
- Verificar si el criterio europeo, adoptado por las normas y reglas de diseño del país (INTI CIRSOC 2016a; IRAM 9664 2013), interpreta adecuadamente el comportamiento de la madera investigada en los siguientes tópicos:
  - La relación entre la resistencia en flexión y las dimensiones de la sección transversal del elemento estructural.
  - La vinculación de las propiedades mecánicas en compresión respecto de las propiedades mecánicas en flexión y la densidad.
  - La vinculación entre la resistencia en tracción paralela a las fibras y la de flexión.
  - La correspondencia entre valores del módulo de elasticidad determinado a través de métodos estáticos y dinámicos.

#### **1.4. METODOLOGÍA DE DESARROLLO**

La escasa información existente sobre el comportamiento de probetas de dimensiones estructurales del material investigado motivó el diseño de un amplio programa experimental, el cual se describe detalladamente más adelante en el Capítulo 3 de este documento.

La provisión y aserrado del material destinado a los ensayos de laboratorio estuvo a cargo de una empresa productora, comprometida con la realización de este estudio. Esta empresa contaba con información precisa sobre el origen, edad, localización y tratamiento silvicultural de las plantaciones. Las dimensiones de la sección transversal de los cuerpos de prueba, que conformaron cada una de las muestras, fueron seleccionadas de manera que estén representadas aquellas de mayor uso presente o potencial del material.

El diseño de la composición, tamaño y cantidad de muestras fue llevado a cabo siguiendo el criterio europeo, adoptado recientemente por la normativa de nuestro país (IRAM 9664 2013). El tratamiento estadístico de los resultados y la obtención de los valores

característicos de las propiedades empleadas en el diseño estructural fueron desarrollados conforme al criterio mencionado anteriormente.

La preparación final del material y los ensayos físico-mecánicos se realizaron en los laboratorios del Grupo GIDEC, de la Facultad Regional Venado Tuerto de la Universidad Tecnológica Nacional. Para ese fin, se contó con áreas para el secado de las probetas en espacio protegido de la intemperie y su estabilización final en cámara climatizada a  $20\pm 2$  °C de temperatura y  $65\pm 5$  % de humedad relativa ambiente. Este laboratorio cuenta con marco de cargas que permite ensayos a flexión de hasta 6 metros de luz entre apoyos, un equipo hidráulico para la aplicación de las cargas y un sistema de medición de cargas y deformaciones de acuerdo a los requisitos de la normativa de aplicación. Los ensayos de tablas a tracción se llevaron a cabo en los laboratorios del Grupo GEMA, de la Facultad Regional Concepción del Uruguay de la Universidad Tecnológica Nacional, que posee el equipamiento adecuado para estos ensayos.

## 1.5. RESULTADOS

El desarrollo de este Trabajo de Tesis permitió conocer importantes particularidades para el uso estructural de la madera aserrada de los clones de *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' cultivada en el delta del río Paraná, y formular para la misma un método de clasificación visual por resistencia que permite extender la utilización del material a piezas con secciones transversales de mayores dimensiones que las tablas. En el Capítulo 4 se presentan y discuten en detalle los resultados obtenidos, a través de los cuales fue posible alcanzar tanto el objetivo general como los específicos expresados en el Apartado 1.3 anterior. Adicionalmente, el análisis de los resultados del extenso programa experimental permitió lograr otros aportes que contribuyen al uso eficiente de este material en estructuras portantes y al enriquecimiento de las reglas de diseño y de los suplementos del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601 (INTI CIRSOC 2016a). Tanto las conclusiones alcanzadas, como las futuras investigaciones que derivan de esta tesis doctoral aparecen en el Capítulo 5. Como anexos se presentan los análisis estadísticos empleados en el desarrollo del trabajo y la información de base con los datos experimentales que permiten, por lo tanto, verificar los resultados expresados y discutidos.

En forma paralela al desarrollo de este trabajo, los resultados obtenidos y su análisis fueron sometidos a la consideración del sector académico-científico y del profesional-productivo a través de su publicación en revistas y congresos referidos a la temática. Se citan a continuación una publicación en revista indexada del sistema internacional y cuatro presentaciones a congresos y jornadas, también de alcance internacional.

Guillaumet A., Manavella R., Acuña Rello L., Piter J.C. (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.

Guillaumet A.A., Filippetti M.C., Manavella R.D., Acuña L., Piter J.C. (2017). Propiedades resistentes en compresión paralela de la madera *Populus deltoides* cultivado en el delta del río Paraná. II Congreso Latinoamericano de Estructuras de Madera y II Congreso Ibero-Latinoamericano de la Madera en la Construcción (CLEM+CIMAD 2017). Junín, Buenos Aires, 17 al 19 de mayo de 2017. Publicado completo en 11 pág. pdf con el código T3-13, disponible en <http://clem-cimad2017.unnoba.edu.ar/trabajos-aceptados/>.

Guillaumet A.A., Manavella R.D., Acuña L., Piter J.C. (2016). Propiedades mecánicas en flexión de la madera aserrada de *Populus deltoides* 'Stoneville 67'. XXXVII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural (XXXVII JSIE). Asunción, Paraguay, 02/04 de noviembre de 2016. Publicado completo en páginas 882-896 (pdf) de la memoria de artículos disponible en <http://www.mediafire.com/file/rtmw4nafcz4qu35/MEMORIA+ARTICULOS+XXXVII+JORNADAS.pdf>. Resumen en orden 66 de la memoria impresa de resúmenes.

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 JSIE). Montevideo, Uruguay, 19 al 21 de noviembre de 2014. Publicado completo en formato electrónico (USB) en 14 pág. pdf. Resumen en memorias, pág. 128, disponible en <https://www.fing.edu.uy/eventos/jsie2014/documentos/Memorias%20XXXVI%20Jornadas.pdf> (ISBN 978-9974-0-1168-7).

Guillaumet A.; Acuña Rello L.; Piter J. (2014). Evaluación del rendimiento de las tablas de *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' para la fabricación de vigas laminadas encoladas. IV Congreso Internacional de las Salicáceas en Argentina - Jornadas de Salicáceas 2014. La Plata, 19 al 21 de marzo de 2014. Publicado completo en CD ROM en 8 pág. pdf.



## 2. MARCO TEÓRICO

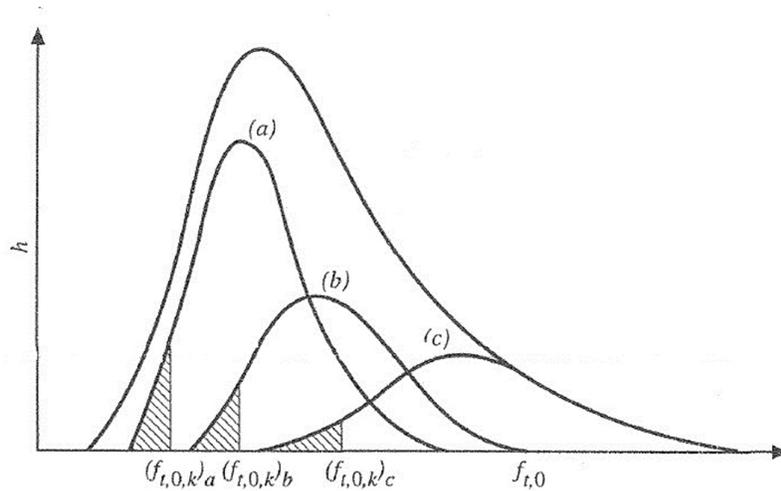
---

---

### 2.1. LA CLASIFICACIÓN POR RESISTENCIA

La madera es un material natural que presenta grandes variaciones de su calidad en función de la especie, tratamiento silvicultural y condiciones ambientales. Las propiedades no solo varían de un árbol a otro, sino también dentro del árbol en función de la altura y la distancia a la médula (Glos 1995a). Los desarrollos para obtener mejores propiedades en la madera condujeron a hibridaciones y clonaciones, por lo que debe definirse claramente no solo la especie de la que proviene la madera en estudio, sino su hibridación o clonación, si fuera el caso. A los parámetros mencionados precedentemente, por influencia en las propiedades de la madera, se le deben adicionar las singularidades que presente (presencia de médula, dimensiones de los nudos, inclinación de las fibras, afectación por hongos o insectos, rectitud del tronco, dimensión de los anillos de crecimiento, entre otras) y el trabajo de aserrado que provoca cortes en las fibras. Todo ello conduce a grandes variaciones en las propiedades resistentes y al definir la resistencia característica como el percentil 5% inferior, toda la muestra se encuentra condicionada por los elementos más débiles, desaprovechando las mejores propiedades del 95% de la población restante. La posibilidad de dividir la muestra en muestras

más pequeñas, con menor dispersión y propiedades más homogéneas de acuerdo a sus defectos, permite alcanzar en cada una de ellas valores característicos más altos, esta es la base de la clasificación por resistencia (Glos 1995a). La Figura 2.2 extraída de la publicación realizada por Glos (1995a) ilustra claramente el concepto. La curva exterior representa la muestra completa y las tres curvas interiores (a, b, c) la muestra dividida en grupos más homogéneos con valores característicos del percentil 5% superiores.



**Figura 2.2:** Distribución de una muestra de resistencia. La curva exterior corresponde a la muestra completa y las curvas a, b, c, a tres grados. Glos (1995a)

Una eficaz clasificación debe definir parámetros fácilmente identificables que brinden la posibilidad de dividir en clases resistentes cada combinación especie / procedencia, obteniendo para las clases de mejor calidad valores característicos más altos. Una exigencia muy alta para clasificar en una determinada clase conduce a mejores valores, pero aumenta el número de piezas rechazadas. Un buen método debe observar un equilibrio entre estos conceptos.

Tradicionalmente la clasificación se realizó con una evaluación visual de un reducido número de parámetros como los nudos y los anillos de crecimiento. Los antecedentes refieren que la clasificación por singularidades apreciables a simple vista comenzó su desarrollo en forma regional sobre la base de tradiciones y experiencias locales. Las primeras reglas se

comenzaron a escribir en la década de 1920 en los Estados Unidos de Norteamérica y una década después en los países europeos (Glos 1995a). La clasificación mecánica es posterior y permite una mayor velocidad y precisión en la evaluación de parámetros no apreciables a simple vista, Glos & Diebold (1994).

La clasificación visual depende de la calidad del operario calificador y puede tender a calificar las piezas en un grado inferior al real. La clasificación mecánica es más precisa y su evaluación mejora en la medida que se determinan más parámetros (módulo de elasticidad, nudos, densidad, humedad). La ventaja de la clasificación visual es que resulta menos costosa su aplicación y la calidad de una pieza puede modificarse en una inspección de revisión, aún en su posición definitiva de uso, mientras que con la clasificación mecánica esto no es posible (Glos 1995a).

Se puede afirmar que la clasificación por resistencia de la madera está fundamentada en razones técnicas y económicas (Glos 1995b; Blaß & Görlacher 1996; Glos. & Lederer 2000).

La caracterización de la madera tiene por objetivo determinar sus propiedades de acuerdo al uso proyectado. El objetivo de la clasificación es dividir la población en segmentos con propiedades similares. Las singularidades afectan de una u otra manera las propiedades de la madera en cuanto a trabajabilidad, aspectos estéticos, durabilidad y las propiedades químicas, físicas, mecánicas y elásticas.

En la madera destinada a uso estructural se destaca la necesidad de conocer las propiedades mecánicas (resistencia y módulo de elasticidad) y físicas (densidad). Hay un conjunto de propiedades que también pueden interesar al proyectista como la anisotropía, durabilidad natural o conferida, aptitud al clavado o trabajabilidad entre otras. La clasificación por resistencia tiene en cuenta las tres primeras propiedades mencionadas.

Los distintos países sobre la base de estudios y experiencias propias han redactado normativas que establecen distintos parámetros para evaluar su calidad y distinta forma de medirlos (DIN 4074, NCh 1970, NF B 52-001, UNE 56544, IRAM 9662/1/2/3/4, IRAM 9670 entre otras).

El desarrollo de códigos para la seguridad de las estructuras de madera como el Eurocodigo 5 (EN 1995-1-1 2006) o las NDS (National Design Specification for Wood

Construction 2015), basados en el diseño en estados límites de cargas y servicio, exigen valores confiables de las propiedades estructurales de la madera.

Un sistema de clases resistentes presenta las siguientes ventajas: i) se pueden incorporar nuevas combinaciones de especie / procedencia sin afectar las especificaciones ya existentes, ii) el calculista no necesita conocer, al momento de calcular la estructura, la disponibilidad de las diferentes especies y calidades posibles, solo necesita los valores de resistencia, rigidez y densidad de la calidad seleccionada, se debe hacer una mención especial a la clase de uso y la durabilidad, y iii) permite a los proveedores de madera mejorar su oferta con menos stock.

En Europa, el Comité Europeo de Normalización (CEN) es el organismo que a través de Comités Técnicos se ocupa de establecer las normas de calidad. En cada país existen los organismos nacionales que se ocupan del trabajo y seguimiento a nivel local: en España la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), en Alemania el Deutsches Institut Für Normung (DIN), en Francia la Association Française de Normalisation (AFNOR), en Inglaterra la British Standards Institution (BSI), entre otras. El trabajo conjunto permitió la conformación de la norma UNE EN 338 que presenta los valores característicos para las distintas clases resistentes, tanto para madera proveniente de especies frondosas como coníferas y chopo. La norma UNE EN 338 permite reducir en número de opciones las combinaciones especie / procedencia / grado y simplifica las especificaciones de la madera estructural (Glos 1995b).

El esquema de estandarización europeo tiene como base la determinación de las propiedades estructurales en flexión, luego la norma UNE EN 384 permite establecer las propiedades para el resto de los esfuerzos en base a una serie de ecuaciones. Estas ecuaciones son de aplicación a todas las combinaciones de especie / procedencia y solo cuando no existan estudios específicos para esas propiedades.

En Argentina, los métodos de clasificación en grados resistentes son mucho más recientes. La primera norma de clasificación data del año 2002 y en la actualidad solo cuatro combinaciones de especie / procedencia poseen una norma. El organismo que está a cargo es el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). El país no contó con una norma propia para el diseño de estructuras de madera hasta el año 2016, año en que la Secretaría de Obras Públicas del Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda aprobó el Reglamento

Argentino de Estructuras de Madera (INTI-CIRSOC 601 2016a). Esta versión del reglamento realiza el diseño en tensiones admisibles y está prevista una nueva versión que contemple los estados límite de carga y servicios. El reglamento se complementa con el Manual de Aplicación de los criterios de diseño adoptados (INTI-CIRSOC 601 2016b).

Siguiendo el modelo europeo en Argentina se estudia el comportamiento en flexión (IRAM 9663 2013) y luego se determinan las propiedades para el resto de los esfuerzos (IRAM 9664 2013), solo en algunos casos se ensayan probetas para estos esfuerzos y generalmente en un número muy inferior al utilizado en flexión.

Un buen diseño estructural debe contemplar, además del conocimiento del material utilizado y sus propiedades, un completo análisis de los esfuerzos que se generan. Por ejemplo en el diseño de elementos simplemente apoyados con cargas sobre el eje longitudinal, en la dirección del eje de mayor inercia de la sección transversal, la sollicitación principal es momento flector y las tensiones longitudinales que provoca, pero deben verificarse las tensiones de corte y las deformaciones por flexión, sin olvidar la verificación por la inestabilidad lateral del sector comprimido y, en el caso que corresponda, proveer las restricciones laterales correspondientes (Choo 1995).

## 2.2. LA MADERA COMO MATERIAL ESTRUCTURAL

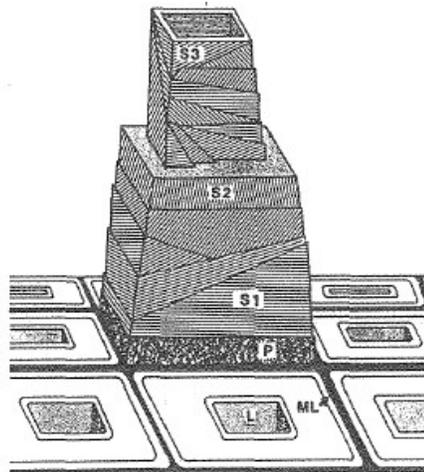
El correcto uso de cualquier material exige conocer sus propiedades mecánicas, elásticas y físicas. Como el material de construcción más antiguo la madera no es una excepción. Durante muchos siglos se utilizó madera proveniente de bosque nativos en general de alta densidad y en escuadrías importantes. Las distintas normas de protección de esos bosques condujeron a la necesidad de utilizar madera proveniente de bosques implantados.

La madera es un material natural de naturaleza orgánica, compuesto fundamentalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. La composición varía de acuerdo a la especie y es posible encontrar otros compuestos como taninos, terpenos, resinas o minerales. Las células son de forma alargada y estructura orientada, tienen diferentes funciones que dependen de la época del año y la forma de crecimiento, esto genera una conformación heterogénea y anisótropa. Esta particularidad obliga a estudiar las propiedades para las distintas direcciones, resultando la forma más sencilla considerarla un material ortotrópico,

distinguiendo tres direcciones principales: la longitudinal, la radial y la tangencial (Coronel 1994, Hoffmeyer 1995).

Se pueden dividir los árboles en angiospermas y gimnospermas. Al primer grupo, entre el que se encuentran las frondosas, pertenecen los árboles con flores verdaderas o completas y, desde el punto de vista de la anatomía de su madera, presentan una estructura más compleja y evolucionada debido al mayor número de tipos de células. El segundo grupo, entre el que se encuentran las coníferas, posee una estructura más simple, componiéndose su madera casi exclusivamente de traqueidas.

La pared celular está formada, en general, por tres capas, la exterior, de espesor muy delgado, llamada pared primaria que posee las laminillas que la conforman orientadas al azar, la intermedia denominada secundaria y la interior llamada terciaria. La pared secundaria está conformada por tres capas, una externa (S1) muy delgada con las fibrillas de celulosa dispuestas en un ángulo de entre 50° y 70°, una media (S2) de mayor espesor con las fibrillas ordenadas mayoritariamente con el eje axial del tronco y una interior (S3) cuyas fibrillas no tienen un orden particular. La capa media de la pared secundaria es la que tiene la capacidad de absorber los esfuerzos de tracción y los de compresión, éstos últimos favorecidos por el arriostramiento al pandeo que le suministran las capas laterales por la inclinación de sus fibras (Hoffmeyer 1995). La Figura 2.1, adoptada de Hoffmeyer (1995), permite visualizar las partes de la célula.



**Figura 2.1:** Esquema general de la arquitectura de pared de una fibra de madera. Hoffmeyer (1995)

L: lumen celular. ML: laminilla media. P: pared primaria. S1, S2 y S3 capas de la pared secundaria.

El árbol crece en forma continua, tanto en el sentido vertical como en el horizontal. La madera nueva se genera por un tejido ubicado en la parte externa del tronco y da lugar a la formación de los anillos de crecimiento. Cada anillo está conformado por dos tipos de tejido, el leño tardío, o de otoño, conformado por células de paredes más gruesas y el leño temprano, o de primavera, conformado por células más delgadas. En algunas especies es muy simple distinguir cada anillo, en otras, como en el álamo, resulta muy difícil de apreciar a simple vista. Existe una diferencia muy marcada de densidad entre cada tipo leño por ello resulta importante la dimensión de cada uno. El crecimiento se realiza a partir de la médula y en muchas especies resulta posible distinguir dos partes, la albura que es la parte externa y por la que circula la savia cuando el árbol está en pie, y el duramen que es una zona con incrustaciones de extractivos orgánicos. Las propiedades (resistencia, durabilidad, capacidad de ser impregnada) varían en cada zona. En algunas especies resulta muy difícil distinguir una zona de otra. Los primeros anillos en torno a la médula se los denomina madera juvenil y presentan características distintas al resto, en general son de inferior calidad. El límite entre madera juvenil y madera adulta depende esencialmente de la especie.

La existencia de ramas que se desprenden del tronco principal y comienzan en la médula originan los nudos. En la medida que el árbol crece aumentan su diámetro el tronco principal y las ramas, provocando ese aumento de diámetro de las ramas la desviación de las fibras longitudinales de la madera y este proceso afecta la capacidad resistente. La poda sistematizada de las ramas permite que con el tiempo los sucesivos anillos envuelvan la rama cortada y se genere en la parte exterior del tronco madera con menos nudos.

Se define a la madera como un material higroscópico. Esta característica de modificar el contenido de humedad afecta sus propiedades en la medida que el contenido de agua varía. El problema resulta más complejo al sumar el comportamiento anisotrópico. Al modificar el contenido de humedad varía el volumen de la pieza, pero esta variación es distinta para las direcciones radial, tangencial y longitudinal. El punto de saturación de las fibras está normalmente entre el 25% y el 35% de humedad (expresada sobre materia seca) y la acumulación de agua por encima de ese valor no modifica las propiedades ya que la pared celular se encontrará, en estas condiciones, saturada de agua y el agua agregada se deposita en los lúmenes de las células. El contenido de humedad de equilibrio con el ambiente varía en cada región, pero está en torno al 12%. La modificación del contenido de humedad y los diferentes coeficientes de contracción e hinchamiento para cada dirección producen deformaciones que

pueden ocasionar rajaduras y torceduras. En este aspecto el proceso de secado cobra vital importancia (Hoffmeyer 1995, Steer 1995). La recomendación de utilizar en la ejecución de estructuras madera con contenido de humedad cercano al de equilibrio permite minimizar los efectos mencionados durante el servicio, del mismo modo prevenir la modificación del contenido de humedad a través del diseño o tratamiento resulta importante.

La madera es susceptible de sufrir el ataque de insectos y hongos. La durabilidad de la madera es la propiedad que posee para resistir los distintos tipos de ataque y está relacionada no solo con la especie sino con la condición de uso. Un contenido de humedad de entre el 20% y el 30% favorece el ataque de hongos. Los insectos pueden afectar tanto al árbol en pie como en rollos o aserrada. La durabilidad natural de la madera puede ser mejorada con la utilización de distintos procesos y productos preservantes y se la denomina durabilidad conferida (UNE EN 350-1 1995; UNE EN 350-2 1995, UNE EN 335-1 1992; UNE EN 335-2 1992).

Se puede apreciar en la breve descripción realizada que la madera como material presenta un sin número de interrogantes a la hora de la descripción de sus propiedades. No alcanza el simple hecho de conocer la especie, con sus clonaciones o hibridaciones si las hubiere, el lugar y las condiciones de cultivo cobran vital importancia. Las características del suelo y el clima afectan los patrones de crecimiento y esto se traduce en las dimensiones de los anillos de crecimiento y la densidad. La separación entre árboles al implantar el monte y el raleo practicado dejarán su huella en los patrones de crecimiento. El tratamiento silvicultural aplicado, como la poda, tendrá su consecuencia en la cantidad de nudos que se presenten en la madera aserrada. A estas características del monte, su tratamiento silvicultural y las particularidades de cada individuo se le debe adicionar que las propiedades varían con la altura del árbol y desde la médula hacia el exterior del tronco.

Para el uso estructural las propiedades físicas de la madera más destacadas son el contenido de humedad y la densidad. Estas propiedades en general guardan una relación con las propiedades elásticas y resistentes.

Las propiedades resistentes necesarias para definir el comportamiento estructural son la resistencia a la flexión, a la compresión paralela y perpendicular a las fibras, la tracción paralela y perpendicular a las fibras y el corte. Las propiedades elásticas que se necesitan conocer son el módulo de elasticidad en la dirección paralela y perpendicular a las fibras y el módulo de elasticidad transversal.

La determinación de cada una de las propiedades descriptas se realiza a través ensayos según condiciones preestablecidas a través de normas. En la actualidad se privilegian los ensayos realizados sobre piezas de dimensiones estructurales con sus singularidades sobre los realizados en piezas pequeñas libres de ellas (UNE EN 408; IRAM 9663; ASTM D198).

Las normas europeas consideran como base el ensayo a la flexión estática (UNE EN 408) y luego, a partir de estos resultados permite determinar los valores para el resto de las propiedades (UNE EN 384). Las expresiones son genéricas y solo se diferencian para su aplicación en coníferas o frondosas. Argentina sigue un camino similar (IRAM 9663 y 9664). Se recomienda su utilización en el caso que no haya resultados experimentales específicos que son considerados más precisos. La norma brasileña ABNT (2010) considera como base el ensayo a la compresión paralela a las fibras y a partir de allí determina el resto de las propiedades.

La duración de la carga afecta las propiedades, en virtud de ello las normas establecen la velocidad de aplicación de las mismas y duración del ensayo. De igual manera el contenido de humedad y las dimensiones de las probetas tienen incidencia en los resultados, por esta razón se definen las condiciones de ensayo y se establecen expresiones que permiten ajustar las propiedades a las condiciones de referencia en el caso que éstas no se hubieran cumplido exactamente. Por ejemplo, para el ensayo de flexión se establece un contenido de humedad del 12 % y una altura de la pieza en el plano de flexión de 150 mm para piezas aserradas (UNE EN 384).

### **2.3. MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN POR RESISTENCIA**

Se entiende por método de ensayos no destructivos (NDT) a cualquier tipo de prueba que se le aplique a un material y no provoque alteraciones permanentes en sus propiedades mecánicas, físicas o químicas. Estos métodos aplicados a la madera de uso estructural, permiten una evaluación del material y estimar sus propiedades mecánicas (resistencia y módulo de elasticidad) o físicas (densidad). Pueden clasificarse en métodos visuales, mecánicos, electromagnéticos y acústicos.

### 2.3.1. La clasificación visual

La clasificación visual es la más antigua y tuvo su inicio en la experiencia de carpinteros que predecían las propiedades en función de las singularidades que apreciaban a simple vista. La necesidad establecer parámetros comunes, favoreciendo el comercio y aumentando la seguridad en su uso, condujo a la redacción de distintas normas con métodos de clasificación para dividir las distintas combinaciones especie / procedencia en grados resistentes.

Los esfuerzos por armonizar las normas de clasificación visual por resistencia en Europa no pudieron concretarse por la complejidad que presentaban las diferentes especies, dimensiones y usos de la madera (Glos 1995a). La norma EN 518 (1995) se limitó a definir los requerimientos mínimos para la clasificación visual resistente permitiendo el uso de las normas de cada país que cumpla con los mismos. Los requerimientos definen limitaciones en relación a características geométricas o biológicas que reducen resistencia. La norma mencionada fue reemplazada por la norma UNE EN 14081-1 (2006) que fue actualizada por última vez en el año 2016.

Se consideran características reductoras de la resistencia a: los nudos, la desviación de la fibra, la densidad, el coeficiente de crecimiento, las fisuras, las gemas, las deformaciones (curvatura de cara, de canto y el alabeo); y la afectación por hongos e insectos (Glos 1995a; UNE EN 408 2012). Numerosas publicaciones para diferentes especies y lugares de procedencia referencian correlaciones entre las singularidades descritas y las propiedades de resistencia y rigidez, se referencian además otras características como la presencia de médula, madera de reacción, bolsas de resina, etc. (Guillaumet *et al* 2007; Piter 2003; Hermoso Prieto 2001; Spavento 2015; Esteban Herrero 2003; Iñiguez González *et al.* 2007). Las normas de clasificación de los distintos países las consideran a la hora de definir los límites de un método de clasificación visual (DIN 4074; NCh 1970; NF B 52-001; UNE 56544; IRAM 9662-1/2/3/4; IRAM 9670).

La determinación de las características visuales sobre las cuatro caras de la pieza demanda en el aserradero entre dos y cuatro segundos, por el costo no se puede hacer un análisis más detallado y por razones de seguridad muchas piezas se clasifican en un grado inferior al que les corresponde. Para disminuir errores las normas de clasificación deben ser lo más simple

posible (Glos 1995a). La capacitación del operario que clasifica la madera es imprescindible, como lo debe ser su criterio a la hora de asignar un grado a la pieza.

Como ejemplo de simplificación de los métodos de clasificación visual se puede citar a Ballarin *et al.* (2017) que analizaron los efectos de reducir los cuatro niveles de calidad que contempla el proyecto de clasificación visual de coníferas en Brasil a tres calidades, los resultados fueron muy satisfactorios.

En síntesis, la clasificación visual por resistencia es un método simple, fácil de entender y no requiere gran capacidad técnica ni equipo costoso. Es una tarea de mucha mano de obra que puede resultar ineficiente a la hora de evaluar algunas características que influyen en la resistencia, como la estructura de madera y la densidad, y puede carecer de objetividad. Correctamente aplicado es un método efectivo (Glos 1995a).

### **Singularidades apreciables a simple vista con influencia en las propiedades físicas y mecánicas**

#### *Afectaciones biológicas*

La madera se encuentra expuesta a la degradación que puede poner en riesgo su vida útil y sus propiedades mecánicas. La durabilidad natural es la resistencia de la madera a la degradación por distintos organismos vivos: hongos, termitas, coleópteros y perforadores marinos.

Los hongos para su desarrollo necesitan de humedad (entre el 30% y el 50%), temperatura (entre 20°C y 40°C), oxígeno y un pH de 5 a 6. Algunas variedades pueden afectar el árbol en pie, aunque la mayoría comienza su desarrollo cuando el árbol es derribado y comienza la pérdida de su alto contenido de humedad. Por su acción los podemos identificar en tres opciones: i) Hongos responsables de la pudrición blanca y de la pudrición parda: afectan principalmente la lignina en el primer caso y la celulosa en el segundo, en ambos casos se afectan las propiedades mecánicas, ii) Hongos cromógenos: producen marcas en la superficie desvalorizando la madera para ciertos usos, no afectan las propiedades físicas y mecánicas, y iii) Mohos: desarrollan su micelio en la superficie de la madera o en poca profundidad,

ocasionan coloración, manchas o una pelusa, pero no modifican las propiedades mecánicas (Robles 2006; Cruz de León 2010). En general las normas de clasificación de madera para uso estructural no admiten hongos de pudrición, aunque si admiten hongos cromógenos (IRAM 9662-4 2015, UNE EN 56544 2011, DIN 4074-5 2012).

Los insectos constituyen otro conjunto de organismos vivos que causan el deterioro de la madera. Se pueden dividir en coleópteros, donde los más importantes son los escarabajos y los isópteros (termitas). En el orden de los coleópteros se pueden identificar 173 familias. Se pueden distinguir especies que afectan la madera muy seca ( $CH < 15\%$ . CH: contenido de humedad), los que atacan madera seca ( $15\% < CH < 20\%$ ), como los que se alojan en madera con alto contenido de humedad ( $CH > 20\%$ ). El mayor daño lo producen las larvas de los insectos que construyen galerías en la madera y, según la especie, se alimentan de la celulosa, del almidón almacenado, de las reservas de la albura o de un hongo simbiote conocido como de ambrosía que cultivan dentro de las galerías. La construcción de las galerías varía con el insecto, existen en la dirección de las fibras o de los anillos de crecimiento (Robles 2006; Cruz de León 2010). Resulta de particular interés un insecto nativo de América del Sur, el *Megaplatypus mutatus*, incluido dentro del grupo de los escarabajos de ambrosía, dado que constituye una plaga clave para los álamos del delta del río Paraná (Giménez 2009; SINAVIMO 2017; Thomas 2011). En el apartado 2.9 se trata con mayor detalle la acción de este insecto. Las normas de clasificación de madera de uso estructural rechazan o imponen fuertes limitaciones a madera con signos de afectación por insectos. (UNE 56544 2011; NCh1970 1988; IRAM 9662-4 2013, DIN 4074-5 2012).

### *Médula*

La presencia de médula en una pieza va asociada con la existencia de madera juvenil que posee características distintas al resto de la madera, con una mayor inclinación de las microfibrillas de la capa S2 de la pared secundaria (Hoffmeyer 1995). Las distintas normas de clasificación en general excluyen de las calidades superiores de una especie las piezas con presencia de médula. Moya *et al.* (2015) observaron importantes diferencias en los valores de resistencia a la flexión y módulo de elasticidad entre plantaciones de *Pinus taeda* y *P. elliottii* de Uruguay de 25 años y de 15 años de edad, atribuyendo los menores valores en la plantación más joven a la mayor proporción de madera juvenil.

La influencia negativa de la médula en las propiedades resistentes ha sido reportada por diversos autores. Para el *Eucalyptus grandis* de la Mesopotamia Argentina, Piter (2003) reportó diferencias de los valores medios de las propiedades entre las piezas que presentaron médula y las que no, variaciones del 26% en la resistencia y del 17% en el módulo de elasticidad. Para la *Araucaria angustifolia* de Misiones Guillaumet *et al.* (2007) reportaron para la resistencia a la flexión diferencias del 30% a favor de las piezas que no poseían médula y del 12% para el módulo de elasticidad. Genovese *et al.* (2014) para el álamo cultivado en el sur de la Provincia de Mendoza en Argentina reportó valores mayores para la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad en las probetas sin médula.

### *Nudosidad*

Los nudos varían su forma con los patrones de aserrado y las dimensiones de las piezas. La afectación de la resistencia se debe principalmente a desviación de las fibras alrededor del mismo más que a la presencia del nudo por sí. Se debe tener en cuenta que a veces aparecen varios nudos cercanos entre ellos, en ese caso se debe considerar la suma de las dimensiones de cada uno. El efecto de la nudosidad es mayor en la zona traccionada que en el centro de la sección o en la zona comprimida (Glos 1995a).

La influencia negativa de la nudosidad en las propiedades resistentes ha sido reportada por diversos autores, en todos los casos con valores de la correlación entre débiles y moderados tanto con la resistencia a la flexión o con el módulo de elasticidad (Hermoso Prieto 2001; Piter 2003; Guillaumet *et al.* 2007; Spavento 2015; Dávalos Sotelo *et al.* 2009).

La presencia de nudos disminuye de forma notable la resistencia de la madera sobre todo a los esfuerzos de tracción y flexión, haciendo el efecto de un agujero en la madera (Vignote Peña *et al.* 2001). En resultados publicados sobre vigas de *Araucaria angustifolia* de la provincia de Misiones en Argentina se consideraron los nudos como agujeros y la modificación de la inercia de cada sección con nudos con la modificación de la posición de los ejes principales de inercia y la transformación de una flexión recta en flexión oblicua. Los resultados teóricos representaron el comportamiento experimental (Guillaumet *et al.* 2008).

Las distintas normas de clasificación presentan a la nudosidad como un parámetro decisivo a la hora de definir una clase. Los límites varían en cada norma o especie. Se los evalúa

de distinta manera: en proporción a la cara externa donde se manifiesta o de la porción de sección transversal que ocupan. El primer criterio se aplica de dos maneras, una de ellas es determinar la dimensión del nudo entre paralelas a las aristas (IRAM 9662-1/2/3/4 2015; UNE-EN 56544; NCh 1970-1) y la otra es determinar los diámetros mayor y menor del nudo (DIN 4074). En el segundo criterio también se evalúan dos metodologías: la proporción que ocupa el nudo en toda la sección transversal y la proporción ocupada en los cuartos extremos de esa sección (NCh 1207).

Para el *Eucalyptus grandis* de la Mesopotamia Argentina, Piter (2002) reportó un coeficiente de correlación de -0,39 entre la proporción del nudo en la cara externa en que se manifestaba y la resistencia a la flexión. Para el *Populus x euramericana*, Spavento (2015) reportó entre los mismos parámetros una correlación de -0,18; y entre nudosidad y módulo de elasticidad -0,14. Para la *Araucaria angustifolia* de la provincia de Misiones en Argentina, Guillaumet *et al.* (2007) reportaron un coeficiente de correlación de -0,60 entre la resistencia a la flexión y la nudosidad medida en proporción a la cara donde se manifiesta.

### *Inclinación de las fibras*

La inclinación de las fibras respecto del eje axil de la pieza se puede evaluar en algunos casos a simple vista aunque en otros es necesaria la utilización de un trazador (UNE EN 1310 1997) para su evaluación. Se distinguen tres formas diferentes de desviación de las fibras: i) fibra ondulada: sigue una trayectoria sinuosa, ii) fibra revirada: toma un patrón helicoidal y iii) fibra entrelazada: poseen una ligera inclinación respecto del eje del árbol. Se distingue también en inclinación general o local, la primera se produce por la conicidad del árbol y la segunda a singularidades puntuales como la presencia de nudos. A los efectos de su evaluación se determina la inclinación general, es decir en las zonas no afectadas por singularidades como los nudos. La correlación negativa con la resistencia es generalmente menor que la que se presenta con la nudosidad. Las normas de clasificación establecen limitaciones que en general no descartan un gran número de piezas.

La influencia de la inclinación de las fibras en la resistencia a la flexión se ve reflejada en la limitación que proponen las distintas normas de clasificación visual, IRAM 9662-1/2/3/4, UNE 56544, DIN 4074/1/5, NCh 1970, NF B52-001. La norma IRAM 9662-4 (2015) establece

las pautas de clasificación visual para tablas de *Populus deltoides* cultivado en el delta del río Paraná con una limitación del 1/9 para ambos grados resistentes, la norma UNE 56544 (que en su versión del año 1997 incluía al chopo) establecía un límite del 1/10, mientras que la norma francesa NF-B52-001 (2007) establece para el *Populus* un límite del 1/6. Uno de los valores más restrictivos para la clase superior es el que plantea la norma DIN 4074-1 (2012) para las coníferas con un límite de 1/14.

Para el *Populus x euramericana*, Spavento (2015) reportó una correlación de -0,10 entre la inclinación de las fibras y la resistencia a la flexión, con una correlación de -0,04 con el módulo de elasticidad.

### *Anillos de crecimiento*

Los anillos de crecimiento del árbol se miden en la dirección radial (UNE EN 1310 1997) sobre una sección transversal. Habitualmente se determina la dimensión promedio (coeficiente de crecimiento UNE EN 1310 1995). Las distintas normas utilizan como parámetro el anillo de mayor dimensión o la dimensión promedio de los anillos. La incidencia en la resistencia varía para cada especie y procedencia. Suele presentar una buena correlación con la densidad y la resistencia. La densidad presenta una correlación positiva con la resistencia, que resulta superior si se la evalúa directamente desde la densidad aparente en lugar que desde los anillos de crecimiento. (Hoffmeyer, 1995; Glos 1995a).

Para el *Populus x euramericana*, Spavento (2015) reportó una correlación de -0,20 entre la anchura de los anillos y la resistencia a la flexión, con una correlación de -0,22 con el módulo de elasticidad.

### **2.3.2. La clasificación mecánica**

La clasificación visual presenta varios inconvenientes respecto a su confiabilidad, ellos son: la capacidad y precisión del operario para evaluar las singularidades apreciables a simple vista y decidir el grado resistente, la posibilidad de evaluar parámetros ocultos y finalmente la capacidad de predecir con justeza las propiedades estructurales del elemento.

La clasificación mecánica por resistencia se presenta como una alternativa superadora a esta problemática. Distintos autores refieren que la clasificación sobre la base de parámetros mecánicos permite alcanzar mayores rendimientos y grados de calidad que los visuales con una mayor confiabilidad (Glos 1995a; Diebold y Glos 1994; Sauter y Diebold 1997). La última revisión de la norma brasileña NBR 7190 (ABNT 2010) destaca la conveniencia de utilizar la clasificación mecánica en madera de coníferas marcando que conduce a una significativa mejora en los valores de cálculo de las propiedades para uso estructural.

Este método se basa en determinar parámetros de alta correlación con las propiedades resistentes mediante ensayos no destructivos. La alta correlación observada entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la flexión lo presenta como el parámetro imprescindible a determinar.

Se han desarrollado distintos modelos de máquinas para clasificar madera de uso estructural (Görlacher 1997; Diebold 1997). Determinar el módulo de elasticidad no presenta mayores dificultades (Glos 1995a; Piter 2003; Fernández Golfín Seco *et al.* 2001). La denominada “máquina de flexión” tiene dos formas de trabajar, durante el pasaje de la pieza de madera provoca una deformación constante y mide la fuerza necesaria para alcanzarla o aplica una fuerza constante y registra la deformación, todo ello a intervalos regulares y sobre longitudes en general entre 0,50 m. y 1,20 m. (Glos 1995a). La flexión se realiza sobre el eje de menor inercia.

La combinación de parámetros ha permitido mejorar la capacidad para predecir la resistencia. La combinación de módulo de elasticidad con la medición de los nudos y la incorporación de la densidad ha permitido esta mejora (Glos 1995a; Dávalos Sotelo *et al.* 2009; Hanhijärvi *et al.* 2008; Conde García *et al.* 2007; Casado *et al.* 2010; Fank *et al.* 2016). La presencia de los nudos puede determinarse por escaneo óptico de las cuatro caras de la pieza (Roblot *et al.* 2010) y la densidad por medición del peso o la radiación. También es posible determinar el contenido de humedad (Glos 1995a). En la medida que aumenta la precisión de la máquina y la determinación de más parámetros aumenta el costo.

## 2.4. OTROS FACTORES CON INFLUENCIA EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

### 2.4.1. Contenido de humedad

Al ser la madera un material natural, higroscópico y anisotrópico, sus propiedades de resistencia y deformación cambian con las condiciones ambientales y de duración de la carga. La higroscopicidad de la madera provoca que modifique su contenido de humedad de acuerdo a las condiciones ambientales. La modificación del contenido de humedad genera cambios en la resistencia y el módulo de elasticidad. Cuando decrece la humedad, estas propiedades aumentan. Las variaciones por encima del punto de saturación de las fibras no tienen incidencia en las propiedades mecánicas y elásticas (Steer 1995; Hoffmeyer 1995).

La necesidad de obtener en los ensayos valores comparables condujo a las normas a definir condiciones de referencia, en el caso de la humedad se fija en el 12%, que es la humedad de equilibrio de una pieza de madera almacenada a una temperatura de 20°C y 65% de humedad relativa. La norma UNE EN 384 2010 establece que para la resistencia a la flexión y a la tracción no resulta necesario realizar ninguna corrección si la probeta al momento de ser ensayada poseía un contenido de humedad entre el 8% y el 18%, para la resistencia a la compresión paralela a las fibras establece una corrección del 3% por cada 1% de variación en el contenido de humedad. La misma norma para el módulo de elasticidad establece una corrección del 1% por cada 1% de variación en el contenido de humedad. En ambos casos si las correcciones se realizan desde un contenido de humedad mayor al 12% las propiedades deben aumentarse y viceversa.

La variación del contenido de humedad genera cambios en el volumen de las piezas de madera y desde luego en el peso de la probeta. Esto obliga a definir la densidad de una madera con la mención del contenido de humedad. La norma UNE EN 384 2010 establece como condición de referencia una humedad del 12%. Para probetas con contenidos de humedad mayores establece una reducción del 0,5% de la densidad por cada 1% de variación del contenido de humedad, para contenidos menores el proceso inverso.

En Argentina se estableció un procedimiento similar para ajustar al contenido de humedad de referencia al 12% a través de la norma IRAM 9663 (2013). El Reglamento

Argentino de Estructuras de Madera (INTI CIRSOC 601 2016a) provee de un factor de ajuste ( $C_M$ ) para adecuar los valores de diseño de referencia. Resulta  $C_M < 1$  en miembros estructurales en los que se prevea que alcancen contenidos de humedad promedio superiores al 16% o con valores máximos superiores al 19%.

#### 2.4.2. Dimensiones de la pieza

La influencia del tamaño de la sección transversal sobre la resistencia a flexión es considerada por las distintas normas de diseño (EN 1995-1-1 2006 Eurocode 5; UNE EN 384; NDS 2012). Las reglas de diseño argentinas (INTI CIRSOC 601 2016a) siguiendo esas experiencias según la cual la tensión de rotura decrece al aumentar la altura de la viga adoptan un factor de tamaño ( $C_F$ ) similar al factor  $k_h = (150 / h)^{0,2}$  ( $h$ , expresada en mm) de la norma UNE EN 384 (2010), y es independiente de su ancho. La adopción de este criterio implica tomar como “altura de referencia” el valor de 150 mm para piezas aserradas (IRAM 9664 2015) que resulta adecuado considerando el tamaño de las piezas estructurales habitualmente producidas en Argentina.

A nivel internacional se conocen numerosos estudios referidos a la influencia del tamaño de la sección transversal sobre la tensión de rotura en flexión, motivados inicialmente por la evidencia empírica, que ha mostrado en maderas de similar calidad un incremento de la resistencia para una disminución de la sección. Según la proposición de Newlin y Trayer (1924) las fibras sometidas a compresión son propensas a fallar por la inestabilidad de su equilibrio y las menos solicitadas, por su cercanía al eje neutro, contribuyen significativamente con la estabilidad de las restantes en las vigas de menor altura lo que explica el incremento de la resistencia a flexión en esos casos.

La teoría clásica del eslabón más débil (Weibull 1939) fue extendida para analizar este material estructural incorporando conceptos relacionados al particular comportamiento mecánico de la madera y a las modalidades de producción (Rouger 1995; Rouger y Barrett 1995). Barret *et al.* (1992) publican que el efecto del tamaño de la sección transversal sobre la resistencia a la flexión presenta variaciones en función de la calidad en madera de coníferas clasificada visualmente. Hermoso *et al.* (2002) y Hermoso Prieto *et al.* (2013) reportan que el efecto del tamaño de la sección sobre la resistencia es mayor en la madera de menor calidad a

partir de estudios realizados en España sobre el pino silvestre y el pino radiata respectivamente. En cambio, Piter (2012) no encontró una clara relación entre la calidad de la madera y el efecto de la altura sobre la resistencia a la flexión según resultados publicados a partir de una investigación realizada con madera de *E. grandis* de Argentina. Denzler y Glos (2008) sobre la base de un estudio de la influencia directa e indirecta del tamaño de la sección sobre la resistencia a flexión afirman que esa influencia está relacionada también a los métodos de ensayo y de clasificación empleados.

En el plano normativo internacional, y si bien con disímiles criterios influenciados por la diversidad de tradiciones y por la multiplicidad de combinaciones especie / zona de cultivo, las normas y reglas de diseño de diferentes países consideran el efecto del tamaño de la sección sobre la resistencia a flexión. La determinación de ese efecto tiene en cuenta en algunos casos la especie o grupo de especies como el criterio adoptado en Chile (NCh 1198 2007), y en otros casos considera el grado estructural como el adoptado en Estados Unidos de Norteamérica (NDS 2012).

Se conocen también reportes referidos a la temática que informan sobre especies cultivadas en Argentina. Piter (2012) a partir de un estudio llevado a cabo sobre 5 muestras con distintas dimensiones de uso estructural, incluyendo 349 cuerpos de prueba de *E. grandis* cultivado en las provincias mesopotámicas, confirma la efectividad del criterio europeo. Resultados de un proyecto llevado a cabo con madera de pino resinoso del noreste del país fueron publicados por Fank *et al.* (2014a), en este caso, donde se ensayaron tres muestras con distintas dimensiones estructurales, se reporta solo una relativa efectividad del criterio europeo para estimar la relación entre la altura de la sección y la tensión de rotura.

No obstante la amplia experiencia europea en la cual se apoya la relación adoptada por las reglas de diseño nacionales (INTI CIRSOC 2016a), los resultados más arriba mencionados y la diversidad de combinaciones especie / zona de cultivo existentes en el país sustentan la necesidad de verificar para cada caso la efectividad del criterio adoptado.

### **2.4.3. Temperatura**

La temperatura tiene un efecto muy reducido en la resistencia de la madera. Para temperaturas inferiores a 0°C la resistencia a la flexión aumenta ligeramente, exposiciones

prolongadas a temperaturas de 37 °C, llegando incluso los 50 °C, no la afectan. Para temperaturas muy elevadas (superiores a los 100°C) puede existir una pérdida de resistencia (Argüelles Álvarez y Arriaga Martitegui 2000).

El Reglamento Argentino de Estructuras de Madera (INTI CIRSOC 601 2016a) tiene en cuenta esta particularidad e incorpora un factor de ajuste por temperatura ( $C_t$ ) para adecuar los valores de diseño de referencia, resulta  $C_t < 1$  en miembros estructurales en los que se prevea que la estructura este expuesta por tiempos prolongados a temperaturas entre 40 °C y 65 °C.

#### 2.4.4. Duración de la carga

El comportamiento estructural de la madera depende de la duración de la carga. Es por ello que esto debe ser contemplado, tanto en la determinación de la resistencia y rigidez como en el cálculo de las estructuras de madera (Coronel 1996). Numerosos estudios mostraron que cuanto mayor sea el tiempo de exposición a la carga menor la sollicitación que provoca la rotura. La necesidad de eliminar esta incerteza en los resultados experimentales condujo a que las normas de ensayo (UNE EN 408 2011; IRAM 9663 2013) establecieran la duración del ensayo a flexión en  $300 \pm 120$  segundos. 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 Álvarez y Arriaga Martitegui 2000).

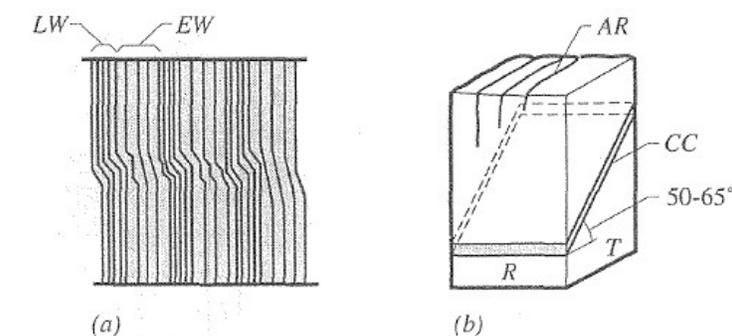
La deformación final de un elemento estructural puede evaluarse en dos partes: una deformación elástica instantánea y una deformación diferida. La primera está vinculada con la rigidez de la madera y la segunda varía en función del tiempo así como de otros factores: la duración e intensidad de las cargas, las condiciones de servicio, el contenido de humedad de la pieza y su variación. La deformación diferida también es conocida como creep. La deformación diferida puede duplicar y aún más la deformación inicial.

El Reglamento Argentino de Estructuras de Madera (INTI CIRSOC 601 2016a) tiene en cuenta este comportamiento y establece un factor de ajuste por duración de la carga ( $C_D$ ). Establece como duración normal de la carga los 10 años y le asigna un factor  $C_D=1$ ; el factor para una duración de 10 minutos, del orden del tiempo de duración de los ensayos según las normas mencionadas en el párrafo anterior, es  $C_D=1,6$ .

## 2.5. COMPORTAMIENTO DE LA MADERA EN COMPRESIÓN

### 2.5.1. Compresión paralela a las fibras

Edlund (1995) describe el proceso de rotura a la compresión paralela como la falla en pandeo de una hilera de fibras, un modo de inestabilidad local con una cizalladura a lo largo de un plano inclinado. La Figura 2.3 ilustra el modo de falla (extraída de Edlund 1995).



*Compression failure at  $f_{c,0}$ . Buckling of fibres. (Hoffmeyer, 1990). LW latewood, EW earlywood, AR annual rings, CC compression creases.*

**Figura 2.3:** Modo de falla en compresión paralela a las fibras. Edlund (1995)

Las probetas de ensayo deben ser lo suficientemente cortas para evitar el pandeo general de toda la pieza. La norma UNE EN 408 (2011) fija una relación de 6 entre el largo de la pieza y la menor dimensión de la misma. La rotura se produce en forma más dúctil que en el esfuerzo de tracción.

En madera de uso estructural la resistencia a la compresión y tracción se ve afectada por las distintas singularidades (defectos), en particular por los nudos y la inclinación de las fibras, muy en particular por la desviación que se produce alrededor de los nudos. Se debe tener en cuenta que en la madera libre de defectos la resistencia a la tracción es mayor que la de compresión, pero que en la madera de uso estructural con defectos se puede dar el caso inverso y ser mayor la resistencia a la compresión (Edlund 1995). La Figura 2.4 ilustra la relación entre tensión y deformación en compresión y tracción paralelas a la fibra en madera libre de defectos (extraído de Argüelles Álvarez y Arriaga Martitegui 2000).

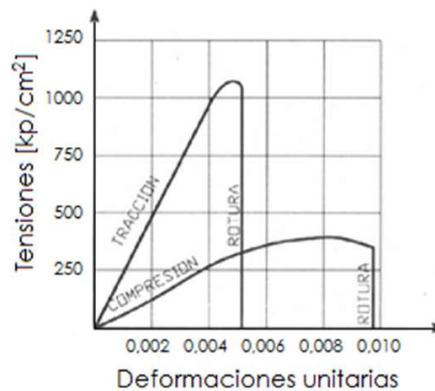
La norma UNE EN 384 (2010), para el caso en que no se cuente con ensayos específicos, permite determinar la resistencia a la compresión paralela con la expresión:

$$f_{c,0,k} = 5 (f_{m,k})^{0,45}$$

Donde:

$f_{c,0,k}$ : resistencia característica a la compresión paralela a las fibras en newton por milímetro cuadrado.

$f_{m,k}$ : resistencia característica a la flexión en newton por milímetro cuadrado.

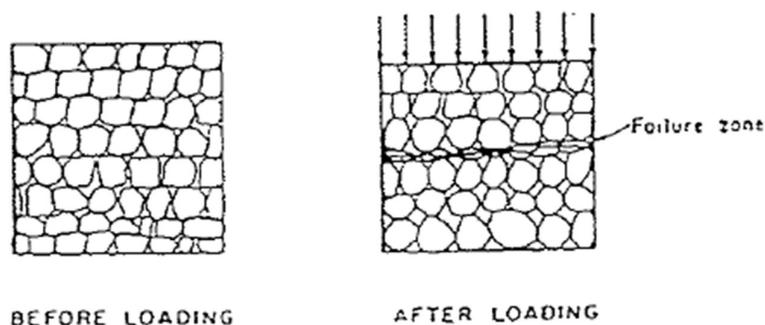


**Figura 2.4:** Relación entre tensión y deformación en compresión y tracción paralelas a la fibra. Argüelles Álvarez y Arriaga Martitegui (2000)

A diferencia del criterio europeo que a partir de las propiedades en flexión (resistencia y módulo de elasticidad) y la densidad permite determinar las otras propiedades mecánicas, la norma brasilera ABNT (2010) considera el ensayo a compresión paralela a las fibras como el ensayo base para luego y a partir de las propiedades bajo esta sollicitación determinar el resto de las propiedades mecánicas.

### 2.5.2. Compresión perpendicular a las fibras

El mecanismo de rotura en compresión perpendicular consiste en la compresión de las células tubulares de acuerdo a lo que se ilustra en la Figura 2.5. El comportamiento a la compresión perpendicular comienza con las deformaciones elásticas de las paredes celulares y luego con el colapso de las mismas, se lo puede definir como un modelo de colapso por capas de células tubulares (Korin 1990).



**Figura 2.5:** Modo de falla en compresión perpendicular. Korin (1990)

Existe una dependencia entre la capacidad de carga en compresión perpendicular y el porcentaje de área cargada de la probeta, influye también si esa carga está centrada o aplicada en uno de los extremos. En cargas centradas aplicadas en una longitud del 12,5% de la probeta la resistencia a la compresión perpendicular fue 2,8 veces mayor que para toda la longitud cargada, para cargas en el extremo y esa misma proporción de área cargada la relación reportada fue de 2,1 (Korin 1990).

En la compresión perpendicular al grano la resistencia resulta afectada por la superficie de contacto entre la carga y la probeta. Cuando toda la superficie de la probeta es cargada, las fibras se comportan como un conjunto de tubos hasta la rotura. Cuando se carga solo una parte de la cara superior de la probeta se obtienen valores más altos de módulo de elasticidad y tensión de rotura que cuando se carga completa la cara superior por la colaboración de las fibras cercanas no cargadas directamente (Edlund 1995). Se debe considerar además que los valores pueden ser afectados por la orientación de los anillos de crecimiento.

El modelo de falla en compresión perpendicular a las fibras dificulta una medición clara de la carga de rotura por ello el procedimiento para determinar esa carga debe estar previamente definido. La norma UNE EN 408 (2010) establece un procedimiento simple que comienza con la determinación del módulo de elasticidad en compresión perpendicular, el mismo se describe en detalle en el Capítulo 3 “Programa experimental”. Cobra también mucha importancia la proporción de la probeta que se carga. La norma mencionada indica la aplicación de la carga sobre la totalidad de la longitud de la probeta.

En ensayos a compresión en la dirección perpendicular a las fibras de *Picea abies*, se reportó un mayor módulo de elasticidad para las piezas ensayadas en la dirección radial, mientras que en la resistencia no se detectaron mayores diferencias. En estudios de regresión entre la resistencia y la densidad se determinó la siguiente relación  $f_{c,90,k} = 0,006\rho$ , donde  $f_{c,90,k}$ : es la resistencia característica a la compresión perpendicular a las fibras en megapascales y  $\rho$ : la densidad en kilogramos por metro cúbico. Se reportó un módulo de elasticidad medio de 300 megapascales (Damkilde *et al.* 1998).

La norma UNE EN 384 (2010) permite, en el caso de que no disponga de resultados de ensayos específicos, determinar las propiedades mecánicas en compresión perpendicular al grano en función de la densidad y el módulo de elasticidad longitudinal medio con las siguientes expresiones:

$$f_{c,90,k} = 0,007 \rho_k \quad \text{para coníferas}$$

$$f_{c,90,k} = 0,015 \rho_k \quad \text{para frondosas}$$

$$E_{90,medio} = E_{0,medio}/30 \quad \text{para coníferas}$$

$$E_{90,medio} = E_{0,medio}/15 \quad \text{para frondosas}$$

Donde:

- $f_{c,90,m}$ : resistencia característica a la compresión perpendicular a las fibras en newton por milímetro cuadrado.
- $\rho_k$ : densidad característica en kilogramo por metro cúbico.
- $E_{90,medio}$ : módulo de elasticidad medio perpendicular a las fibras en newton por milímetro cuadrado.

$E_{0,medio}$ : módulo de elasticidad medio en flexión en newton por milímetro cuadrado.

Para la determinación del módulo de elasticidad en compresión perpendicular se utiliza el módulo de elasticidad en flexión libre de la influencia del corte.

## 2.6. COMPORTAMIENTO DE LA MADERA EN TRACCIÓN PARALELA A LAS FIBRAS

Una pieza de madera libre de defectos sometida a un esfuerzo de tracción paralela a las fibras presenta un comportamiento elástico hasta la rotura con una relación prácticamente lineal entre tensiones y deformaciones hasta ese punto, a diferencia del comportamiento en compresión paralela que ofrece una parte elástica lineal, luego un tramo elastoplástico para finalizar con tramo prácticamente recto a tensión casi constante. En estas condiciones el módulo de elasticidad en tracción es mayor que en compresión y lo mismo ocurre con las tensiones de rotura (Argüelles Álvarez y Arriaga Martitegui 2000; Baño *et al.* 2012). En el Apartado 2.5.1. “Compresión paralela a las fibras” se presentó la Figura 2.4 que grafica la relación entre tensión y deformación en compresión y tracción paralelas a la fibra en madera libre de defectos. En la madera de dimensiones estructurales la presencia de nudos modifica el comportamiento, la relación no es tan lineal y la resistencia a la compresión paralela puede superar a la de tracción (Edlund 1995).

La norma UNE EN 384 (2010), para el caso en que no se cuente con ensayos específicos permite determinar la resistencia a la compresión paralela con la expresión:

$$f_{t,0,k} = 0,6 f_{m,k}$$

Donde:

$f_{t,0,k}$ : resistencia característica a la tracción paralela a las fibras en newton por milímetro cuadrado.

$f_{m,k}$ : resistencia característica a la flexión en newton por milímetro cuadrado.

## 2.7. MÓDULO DE ELASTICIDAD. DETERMINACIÓN A TRAVÉS DE ENSAYOS ESTÁTICOS Y MÉTODOS DINÁMICOS ALTERNATIVOS

La norma UNE EN 408 (2011) y la IRAM 9663 (2013) presentan los procedimientos experimentales para la determinación tanto del módulo de elasticidad local (flexión pura) como del global (flexión y corte). La determinación del módulo de elasticidad global presenta las ventajas de requerir la medición de deformaciones en un solo punto y de mayor magnitud que las del módulo local, pero su valor contiene las deformaciones por flexión y por el corte de los tercios extremos de la pieza. El módulo de elasticidad local incluye solo las deformaciones por flexión pero presenta como desventaja que se miden las deformaciones sobre una longitud menor de la pieza, se debe hacer sobre las dos caras y resultan de muy pequeña magnitud lo que acarrea un mayor riesgo y la necesidad de una mayor precisión. Dado que se trata de ubicar las singularidades de mayor incidencia en las propiedades mecánicas, por ejemplo los nudos de mayor dimensión, en el tercio central de la pieza (zona de mayor momento constante y sin influencia del corte), pueden existir casos en que el módulo de elasticidad local resulte menor que el global.

En el 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. La norma UNE EN 384 (2010) en las relaciones que permiten estimar el módulo para otras sollicitaciones utiliza el módulo de elasticidad local, de igual manera la norma UNE EN 338 (2010) lo utiliza al momento de decidir la inclusión en una clase resistente. Esta utilización conduce a la necesidad de la determinación de este módulo para evaluar el cumplimiento de los requisitos para calificar en un grado estructural según esta última norma.

En Argentina el módulo de elasticidad en flexión presentado en las normas IRAM 9662-1/2/3/4 (2015) y en los suplementos del reglamento INTI CIRSOC 601 (2016a) es el módulo de elasticidad global. El Reglamento Argentino de Estructuras de Madera (INTI CIRSOC 601 2016a) en la determinación de las deformaciones utiliza este módulo en línea con el criterio de las NDS 2012 y asume una influencia del esfuerzo de corte del 5%.

Existen diferentes criterios para la determinación del módulo de elasticidad local a partir del módulo global. La norma UNE EN 384 (2010) presenta una expresión para determinar el valor medio del módulo de elasticidad que incluye una corrección respecto al módulo de elasticidad en flexión pura. Si resulta conocido el valor del módulo de elasticidad transversal

(G), la norma UNE EN 408 (2011) presenta una expresión para determinar el módulo de elasticidad global en flexión que incluye un término para minimizar el efecto del esfuerzo de corte. Si bien la misma norma incluye un procedimiento experimental para la determinación del módulo de elasticidad transversal (G) el mismo presenta la complejidad de medir deformaciones muy pequeñas. Denzler *et al.* (2008) llevaron a cabo un estudio que condujo a una nueva expresión para determinar el módulo de elasticidad local a partir del módulo global. La norma ASTM D198 (2015) también propone una fórmula alternativa para corregir la influencia del esfuerzo de corte sobre el valor del módulo de elasticidad, en este caso, como en la expresión propuesta en la norma UNE EN 408 (2011), se necesita conocer el valor de G. En Argentina, como se mencionó en el párrafo anterior, el reglamento INTI CIRSOC 601 (2016a) asume una diferencia de un 5% entre el módulo de elasticidad global y el local.

La posibilidad de determinar el módulo de elasticidad sin someter las piezas a esfuerzos a través de técnicas como las vibraciones flexionales o longitudinales, medición de la velocidad de propagación del sonido, entre otros, permite evitar posibles daños a los elementos estructurales y no tener limitaciones de escuadría. Las correlaciones obtenidas entre el módulo de elasticidad determinado por ensayo de flexión y por estos métodos son muy importantes (Nakai 1988, Glos 1995a, Ilic 2001; Green *et al.* 1997; Calil Júnior *et al.* 2003; Casado *et al.* 2009a; Casado *et al.* 2010; Casado *et al.* 2001; Casado *et al.* 2012; Keil 2014).

La velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas varía con cada especie por lo que resulta de interés realizar su evaluación y ajuste antes de ponerlo en práctica. El ajuste no solo corresponde a cada especie sino también se debe considerar las variaciones en función de la longitud de la pieza (Diab *et al.* 2013). El método permite obtener una buena predicción del módulo de elasticidad en piezas aserradas. Casado *et al.* (2013) obtuvieron valores de correlación del 50% para tablas aserradas de *Populus x euroamericana* I-214 provenientes de una plantación de la zona de León en España. La utilización de vibraciones inducidas y la velocidad de propagación del sonido pueden conducir a sobrestimas por lo que se deben proponer ecuaciones de correlación para mejorar el ajuste (Casado *et al.* 2012).

Conde García *et al.* (2007) concluyeron que para el pino silvestre y el pino laricio de España la velocidad de trasmisión del sonido, como única variable, no poseía suficiente precisión para predecir la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad, pero que la predicción mejoraba si se incorporaban variables como la dimensión de los nudos, la densidad

y la longitud de la pieza. Hermoso Prieto *et al.* (2007) obtuvieron buenos resultados al aplicar la medición de velocidad de propagación del sonido a rollizos de pequeño diámetro de pino laricio de España tanto puesto en obra como en fábrica.

Casado *et al.* (2010) reportaron coeficientes de correlación entre el 53% y el 77% en la predicción del módulo de elasticidad utilizando modelos con el módulo de elasticidad dinámico y la dimensión de los nudos sobre piezas de dimensiones estructurales de *Populus x euramericana* I-214. Se destaca la influencia de las dimensiones de las piezas en la determinación de las frecuencias.

Chauhan *et al.* (2016) para especies tropicales de madera reportaron altas correlaciones entre el módulo de elasticidad dinámico determinado por tres métodos: frecuencias de vibración longitudinal y transversal, y velocidad de propagación del sonido, con el módulo de elasticidad estático, los valores más altos lo obtuvieron para la determinación a través de la medición de la velocidad del sonido. Reportaron un aumento de la divergencia para los módulos de elasticidad altos en la determinación por vibraciones. Concluyeron que los tres métodos son útiles para predecir el módulo de elasticidad estático con el modelo de regresión adecuado.

La determinación del módulo de elasticidad dinámico sobre piezas estructurales de *Populus x canadensis* I- 214 de la provincia de Río Negro, Argentina, presentó resultados promisorios para la determinación del módulo de elasticidad en flexión. La determinación por vibraciones inducidas presentó resultados inferiores a la realizada por ultrasonidos, en ambos casos los resultados fueron superiores a los obtenidos por ensayos estáticos y con valores más homogéneos (Keil 2014).

## **2.8. LA SITUACIÓN NORMATIVA**

### **2.8.1. La situación normativa en Europa**

La madera presenta una enorme variabilidad de tipos y calidades que pueden generar múltiples inconvenientes al proyectista de estructuras de madera a la hora de seleccionar la más apta para el uso pretendido y al proveedor la necesidad de un amplio stock. Un sistema de clases resistentes agrupa las distintas combinaciones de especie / procedencia en calidades que presenten similares propiedades de resistencia, rigidez y densidad (UNE EN 338).

La madera de uso estructural debe estar clasificada visual o mecánicamente de acuerdo con los lineamientos de la norma UNE EN 14081-1/2/3/4 y sus valores característicos determinados de acuerdo a requerimientos de la norma UNE EN 384.

La norma UNE EN 338 (2010) presenta un sistema de clases resistentes conformado por 12 grupos para las coníferas y el chopo y 8 grupos para las frondosas. Los valores característicos de la resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad local medio paralelo a la fibra y la densidad definen la calificación de una población de madera dentro de la tabla. El resto de los valores (resistencia a la tracción paralela y perpendicular a la fibra, resistencia a la compresión paralela y perpendicular a la fibra, resistencia al cortante, módulo de elasticidad paralelo a la fibra percentil 5%, módulo de elasticidad perpendicular a las fibras y módulo medio cortante) propuestos para cada clase fueron determinadas a partir de los valores característicos mencionados utilizando las ecuaciones que la misma norma muestra en su anexo A.

La norma UNE EN 1912 (2005+A4 2010) establece una relación entre las calidades visuales de resistencia de aplicación para distintas combinaciones especie / procedencia y la clase resistente de acuerdo a la norma UNE EN 338 (2010) a la que se puede asignar.

Stapel (2012) afirma que las asignaciones realizadas en la EN 1912 para maderas de coníferas no son correctas en varios casos y que parece necesaria una revisión. Se requieren nuevos límites para áreas de origen y secciones transversales. Esto se puede realizar sobre la base de informes donde los estándares de clasificación han demostrado su aplicabilidad al origen y sección transversal analizada.

El Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2006) no contiene los datos de resistencia y rigidez de la madera, provee solamente las reglas para su determinación en elementos estructurales de acuerdo a las condiciones de seguridad y las reglas de diseño por lo que resulta imprescindible la consulta de las normas UNE EN 338 y UNE EN 1912.

La norma UNE EN 384 (2010) establece un método para la determinación de los valores característicos. Se define el tamaño mínimo de una muestra en 40 probetas y el número de muestras deseable, establece coeficientes de minoración de los valores característicos para distintas combinaciones de tamaño de la muestra y cantidad de muestras. Presenta además los coeficientes de corrección para ajustar los valores característicos a condiciones normalizadas,

se fijan correcciones por contenido de humedad y dimensión de la probeta. Propone además un sistema de ecuaciones, similar al de la norma UNE EN 338 (2010), para determinar los valores de distintas propiedades de resistencia y rigidez a partir de los valores característicos de la resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad medio y la densidad, para el caso que no se cuente con valores de ensayos. Como estas expresiones son de aplicación para todas las combinaciones de especie / procedencia, solo se diferencia entre coníferas y frondosas, se requieren trabajos de investigación para verificar la precisión de las relaciones planteadas (Glos 1995b). Para ambas normas hay una nueva versión del año 2016.

La norma UNE EN 408 (2011) establece las condiciones para realizar los ensayos a los efectos de determinar las propiedades de resistencia y rigidez.

Todo el conjunto de normas está en permanente revisión en función de nuevos trabajos de investigación, periódicamente surgen nuevas versiones o correcciones.

### **2.8.2. La situación normativa en Argentina**

La madera en la construcción en Argentina ocupa un lugar secundario. En la ejecución de estructuras el hormigón armado es el material más utilizado tanto en elementos verticales como en entresijos y cubiertas, en segundo lugar aparece el acero. En muchos casos en construcciones de baja altura es muy normal complementar las cubiertas de hormigón o acero con mampostería portante. La madera queda, en general, circunscripta para la ejecución de estructuras de techos con terminación en chapa de acero o tejas.

La construcción de edificios totalmente en madera es muy escasa y limitada a algunas regiones. En los últimos años, y gracias a la tarea de grupos de trabajo como el INTA de la localidad de Concordia entre otros, se comenzó a avanzar en la construcción sistematizada de viviendas de madera y comienza a ser un material utilizado en planes de vivienda con financiamiento estatal. Desde el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, Área Madera en la Construcción, se impulsó la incorporación de viviendas de madera en planes de vivienda nacionales como el PROCREAR, logrando su aprobación en el año 2015. La Secretaría de Vivienda y Hábitat, del Ministerio del Interior, aprobó por Disposición SSDUV N° 07/2003 las “Directrices para la Construcción de Viviendas de Madera”. Un paso importante para facilitar la construcción con madera lo constituye la resolución 3-E/2018 de la Secretaría

de Vivienda y Hábitat del Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda, que establece el Sistema de Construcción de Entramado de Madera, para uso de estructuras portantes de edificios, como sistema constructivo “Tradicional”, esto permite la construcción de este tipo de estructuras sin necesidad de tener que solicitar el Certificado de Aptitud Técnica (CAT).

Hay un gran desconocimiento en los profesionales de la construcción, ingenieros y arquitectos, de las propiedades y la tecnología de la construcción con este material. Esto es consecuencia que la gran mayoría de las universidades no lo incluyen en sus currículas. Los congresos y jornadas entre estructuralistas en Argentina o Sudamérica poseen un muy alto porcentaje de trabajos en hormigón, algo en acero y muy pocos trabajos en madera. En los últimos años, en la Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, se ha notado un incremento de trabajos sobre la madera de uso estructural y estructuras de madera.

Las normas de ensayo de probetas de pequeñas dimensiones libres de defectos se mantuvieron como las únicas vigentes en Argentina hasta el año 2013 (IRAM 9542 1977, IRAM 9545 1985, IRAM 9551 1985). Muchos investigadores, ya desde finales de la década de 1990, comenzaron a trabajar sobre la base de la normativa europea, norma EN 408 y normas relacionadas. En el año 2013 se aprobó una norma que contempla ensayos de piezas de dimensiones estructurales con sus singularidades, norma IRAM 9663 (2013). Esta norma se complementó con la IRAM 9664 (2013) que presenta los lineamientos para la determinación de los valores característicos. Ambas normas son muy similares a las normas europeas EN 408 y EN 384 en sus versiones del año 2004.

La provisión de madera para uso estructural se basó históricamente en madera de alta densidad proveniente de bosque nativos, no existían normas de clasificación. Los cambios en la normativa sobre la madera de uso estructural comenzaron en el siglo XXI, la pionera fue la norma IRAM 9670 (2002) que presenta un método de clasificación visual resistente para los *Pinus taeda /elliottii*. A esta norma la siguieron, en el año 2006 las normas IRAM 9660-1; 9660-2 y 9661 para madera laminada encolada estructural, clases de resistencia y requisitos de fabricación y control y uniones finger. En el mismo año aparecieron las normas IRAM 9662-1/2/3 con la propuesta de un método de clasificación visual por resistencia para tablas de *Araucaria angustifolia*, *Eucalyptus grandis* y *Pinus taeda / elliottii* respectivamente. Las normas 9660, 9661 y 9662 fueron actualizadas en el año 2015, coincidiendo con la aparición

de la norma IRAM 9662-4 para tablas aserradas de *Populus deltoides* del delta del río Paraná (clones 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67').

El año 2013 marca un hito muy importante en las estructuras de madera en Argentina, se culmina la redacción del primer Reglamento Argentino de Estructuras de Madera (INTI CIRSOC 601 2016a), y en el año 2016 la Secretaría de Obras Públicas de la Nación lo aprueba como reglamento de cumplimiento para el proyecto y construcción de obras públicas nacionales por Resolución 2016-22-E-APN-SECOP#MI. En este reglamento, además de capítulos destinados al diseño estructural, se presentan suplementos con los valores admisibles (valores de diseño de referencia) de las principales propiedades estructurales para distintas combinaciones de especie y lugar de procedencia. El reglamento mencionado, redactado en base a las normas NDS (2005), presenta una diferencia con el criterio europeo que merece puntualizarse, utiliza en la determinación de las deformaciones el módulo de elasticidad global en lugar del módulo local. Se complementa con un manual de ejemplos resueltos (INTI CIRSOC 601 2016b). Los suplementos proponen valores para solo cuatro combinaciones especie / procedencia: *Araucaria angustifolia* de la provincia de Misiones (tablas y vigas); *Pinus taeda* / *elliotti* de las provincias de Misiones y Corrientes (tablas y vigas), *Eucalyptus grandis* de la Mesopotamia (tablas, vigas y piezas de sección circular) y *Populus deltoides*, clones 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67', del delta del río Paraná (tablas).

## 2.9. DATOS DE LA ESPECIE

El álamo (chopo), género *Populus sp.* se inserta en la familia de las salicáceas. Es originario del hemisferio norte y comprende unas 40 especies a las que se deben agregar numerosos híbridos y clones. En Argentina se cultivan el *Populus nigra* L., el *Populus deltoides* Marsh. y sus híbridos. Las condiciones climáticas del delta del río Paraná posibilitaron implantar más de 20 clones de *Populus deltoides* pero de acuerdo a los resultados obtenidos los más recomendados son: 'Australiano 129/60', 'Australiano 106/60' y 'Mississippi Slim' conocido como "Stoneville 67" (Borodowski 2006).

La introducción del álamo en Argentina comenzó en la Provincia de Mendoza a principios del siglo XIX con el ingreso de estacas de *Populus fustigiata* y *Populus nigra*. En el delta el río Paraná comenzó a fines del siglo XIX con la introducción del *Populus deltoides*

*subsp. angulata cv Carolinensis* y su madera era utilizada principalmente para fines energéticos y en carpintería (Di Marco 2014).

El álamo constituye el tercer cultivo forestal en importancia de Argentina, siendo precedido por el de pinos y eucaliptos (Achinelli *et al.* 2004). En el delta del río Paraná, Argentina, se cultiva en albardones naturales o áreas protegidas de las inundaciones, donde se llevó a cabo un trabajo de reconversión clonal durante los últimos 20 años. A partir de ese trabajo, se destacan en la actualidad por su creciente importancia los clones *Populus deltoides* ‘Australiano 129/60’ y ‘Stoneville 67’ (Borodowski 2006; Cortizo 2005).

El uso estructural de la madera obtenida de estos dos clones fue impulsado por el sector productivo regional vinculado con la elaboración de madera aserrada y laminada encolada, el cual fue acompañado por el sector académico-científico del país. En los últimos años se llevaron a cabo investigaciones orientadas a conocer el comportamiento físico-mecánico de este material y a evaluar su rendimiento técnico y económico (Guillaumet *et al.* 2014a,b; Ramos *et al.* 2014a,b). También se han publicado resultados que comparan el comportamiento estructural de la madera de estos clones con el del pino resinoso (Fank *et al.* 2014b), siendo esta última una especie de referencia por su importancia en el país.

Nuevos clones están siempre en análisis, entre el año 2015 y 2017 el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) remitió para su inscripción cinco nuevos clones de álamo, 'Guayracá INTA', 'Ñacuturú INTA', 'Paycarabí INTA', 'Hovyú INTA' y "Pytá INTA". Los cuatro primeros ya han sido aprobados mientras que el quinto se encuentra aún en proceso de inscripción. Las propiedades físicas y mecánicas en piezas libres de defectos son similares a otros clones de *Populus deltoides* e indican que podrían ser utilizados como madera sólida o triturada (Cortizo *et al.* 2017).

La Tabla 2.1 presenta las principales plantaciones forestales de Argentina detallada por provincia, se aprecia la enorme prevalencia de las coníferas y en segundo lugar los eucaliptus, fundamentalmente en las provincias del litoral. En tercer lugar aparece el cultivo de las salicáceas con fuerte arraigo en el delta de las provincias de Buenos Aires y Entre Ríos. En la Figura 2.6 se puede apreciar la distribución geográfica de las plantaciones forestales en Argentina.

## Capítulo 2. Marco teórico

Provincia / Región	Especie				Totales	
	Coníferas	Eucaliptus	Salicáceas	Otras		
	Superficie en ha.					
Misiones	3.6.592	10.557		35.243	352.392	Fuente: Mapa de Plantaciones Forestales año 2009
Corrientes	263.268	108.985		1.016	373.269	Fuente: Mapa de Plantaciones Forestales año 2009
Entre Ríos	20.175	106.281	26.967	577	154.000	Fuente: Mapa de Plantaciones Forestales año 2014. Continente
Buenos Aires (Delta)	27	29	57.539	78	57.673	Fuente: El Delta. Mapa de Plantaciones Forestales año 2009
Mendoza			7.900		7.900	Fuente: Cartografía IDR-DPF: 2012-2013 en revisión
San Juan			457		457	Fuente: Promoción: (solo actividad plantación aprobada bajo Ley)
San Luis	46		75	29	150	Fuente: Promoción: (solo actividad plantación aprobada bajo Ley)
Neuquén	60.721		1.522	727	62.970	Fuente: Mapa de Plantaciones Forestales año 2014.
Río Negro	5.235		1.145	248	6.628	Fuente: Inventario de Plantaciones Forestales año 1998 (coníferas) y Comunicación personal con Técnico Regional Salicáceas
Chubut	30.585		105	837	31.527	Fuente: Mapa de Plantaciones Forestales año 2013
Santa Cruz			14		14	Fuente: Promoción: (solo actividad plantación aprobada bajo Ley)
Jujuy	2.556	11.000		141	13.697	Fuente: Mapa de Plantaciones Forestales año 2009
Salta	788	2.963	4	883	4.638	Fuente: Mapa de Plantaciones Forestales año 2010
Tucumán	2.804	541	112	213	3.670	Fuente: Mapa de Plantaciones Forestales año 2010
Catamarca	290				290	Fuente: Mapa de Plantaciones Forestales año 2010
Córdoba	34.165	1.013		2.363	37.541	Fuente: Inventario de Plantaciones Forestales año 1998
La Pampa			600	424	1.024	Fuente: Inventario de Plantaciones Forestales año 1998 y comunicación con Técnico regional Salicáceas
Santa Fe	7	13619	1.253	157	15.036	Fuente: Mapa de Plantaciones Forestales año 2011
Formosa				1.353	1.353	Fuente: Promoción: (solo actividad plantación aprobada bajo Ley) (Actividades Plantación y EBNA)
Chaco	2	15	15	894	925	Fuente: Promoción: (solo actividad plantación aprobada bajo Ley) (Actividades Plantación y EBNA)
Santiago del Estero			185	3.072	3.257	Fuente: Promoción: (solo actividad plantación aprobada bajo Ley) (Actividades Plantación y EBNA)
<b>TOTALES</b>	<b>727.260</b>	<b>255.003</b>	<b>97.893</b>	<b>48.255</b>	<b>1.128.411</b>	

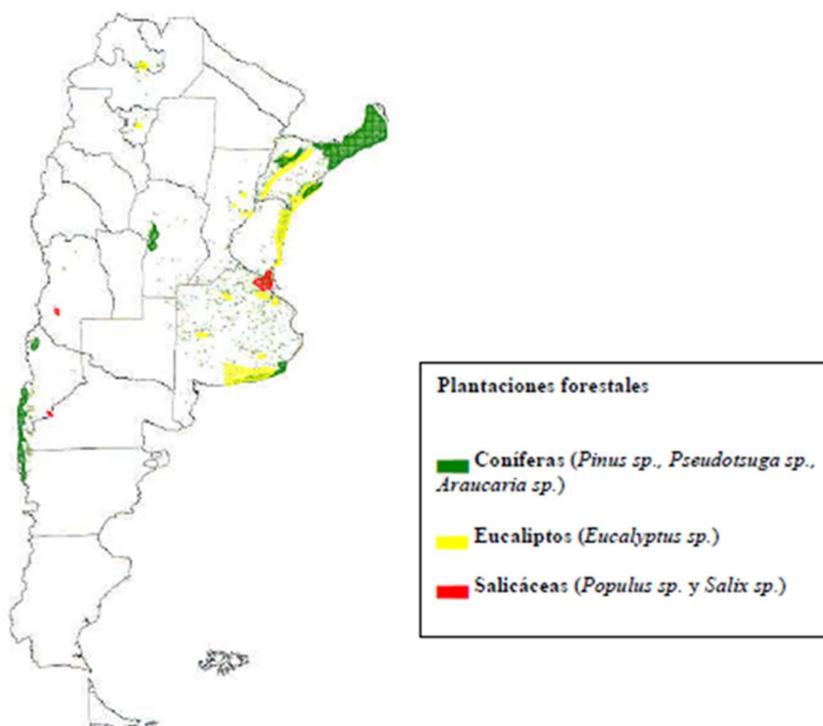
**Tabla 2.1:** Superficie de plantaciones forestales de Argentina (ha.)  
Fuente: Dirección de Producción Forestal – Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Nación, 2015

El delta del río Paraná ocupa una superficie de 1.730.000 ha., de las cuales 1.475.000 pertenecen a la provincia de Entre Ríos y 257.000 ha. a la provincia de Buenos Aires. La superficie forestada con salicáceas en 2006 era de 58.000 ha., 38.500 ha. en Buenos Aires y 19.500 ha. en Entre Ríos, muy por debajo de las 110.000 ha. del año 1979. (Borodowski 2006).

El mapa de plantaciones forestales (MPF 2010) elaborado por el área de SIG e Inventario Forestal de la DPF (Dirección de Producción Forestal, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación Argentina) estimó más de 80.000 las ha. forestadas en la región, pero cabe aclarar que actualmente se estima que de esa superficie el área forestada bajo manejo con Salicáceas es de 60.000 ha. aproximadamente, 70 % en Buenos Aires y un 30 % en Entre Ríos. (Delta Forestal- Información Técnica MAGP).

Un 80 % de la superficie del delta del Paraná está ocupada por planicies inundables en su estado natural que resultan aptas para el cultivo una vez efectuadas obras de sistematización,

que en el caso de los sauces son significativamente de menor complejidad y costo que las requeridas para cultivar otros géneros forestales (CNA 2012).



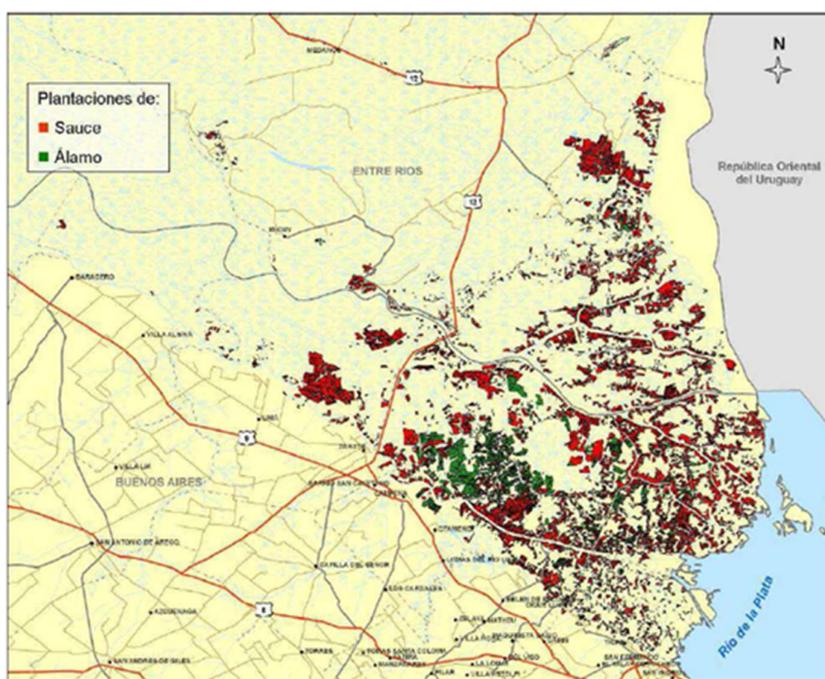
**Figura 2.6:** Ubicación geográfica de las plantaciones forestales en Argentina (CNA 2012)

*“En la región del Delta del Paraná, el material de propagación tradicional es la estaca (50 a 70 cm de largo) o la guía de un año. Desde hace aproximadamente ocho años se empezó a utilizar también como material de plantación guías de dos años. Este cambio se debe principalmente a la complementación de las forestaciones de Salicáceas con sistemas ganaderos en esta región. La necesidad de introducir los animales dentro del lote lo antes posible aceleró la incorporación de este material en la plantación”* (CNA 2014). El álamo permite su plantación en sistemas silvopastoriles y no existen factores que limiten el manejo de rodeo vacuno en el Delta. La integración de la ganadería con la forestación hace a los sistemas de explotación más intensivos y diversificados (Suarez 1999).

*“El Delta inferior del Río Paraná es una excelente región para la producción de Salicáceas donde en la actualidad se cultivan unas 20.000 ha de álamo en albardones naturales o áreas protegidas contra inundaciones. Las primeras plantaciones se realizaron hacia la segunda mitad del siglo XIX con álamo carolino (*Populus deltoides* subesp. *angulata* cv. *carolinensis*), originario del Delta del Mississippi (Estados Unidos). Este clon fue diezclado por roya (*Melampsoraspp*) hacia 1920 y dejó de cultivarse. Posteriormente se difundieron diversos clones de *Populus x euroamericana* provenientes de Europa que rápidamente manifestaron una marcada declinación en su crecimiento y un aumento de la susceptibilidad a plagas y enfermedades, especialmente a cancrrosis (*Septoria musiva*). En los años 60 se introdujeron nuevos clones de *Populus deltoides*, provenientes de regiones ecológicamente similares, que rápidamente ocuparon toda el área de cultivo. Entre éstos, los clones “Catfish 2” y “Catfish 5” fueron los más plantados en la década de 1980 y llegaron a cubrir el 90 % de la superficie dedicada al álamo. A mediados de la década de 1990 se produjeron fuertes ataques de roya, que causaron importantes pérdidas de crecimiento. En 1997, al inicio del proyecto, era necesaria una rápida reconversión clonal. En base a estudios de rendimiento y comportamiento ante enfermedades de los materiales disponibles, se estableció que los clones Australiano 106-60, Australiano 129-60, Stoneville 67 y R-22 eran los más adecuados para las nuevas condiciones.” (Cortizo 2005).*

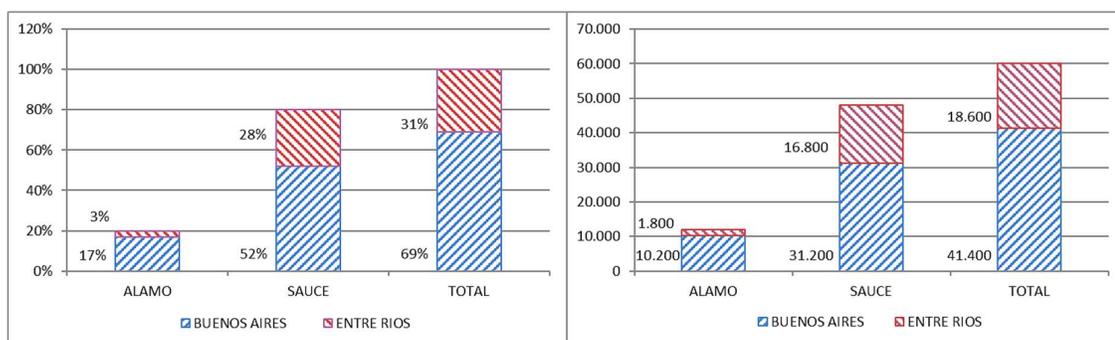
En la actualidad una gran parte de las plantaciones de álamo se realizan en campos protegidos de las inundaciones con su cota perimetral elevada donde es posible evacuar los excesos hídricos y evitar el ingreso de agua fluvial. Durante la estación de crecimiento los establecimientos protegidos pueden presentar un amplio rango de disponibilidad hídrica en el suelo en función del relieve interno de la isla (generalmente irregular con alternancia de sectores bajos y otros más elevados), la sistematización del campo, el manejo de agua que realice el productor y el clima. En este último caso, cabe destacar que las precipitaciones muestran un promedio anual cercano a los 1.000 mm pero su distribución es muy variable y los episodios de sequía durante el verano son frecuentes, especialmente cuando los altos requerimientos hídricos de la especie se combinan con escasas precipitaciones y elevada demanda evaporativa. (CNA 2012)

La Figura 2.7 presenta la distribución de la superficie forestada en el delta del río Paraná.



**Figura 2.7:** Mapa de la superficie forestada en el delta del Río Paraná  
 Fuente: Área de Sistemas de Información Geográfica de la Dirección de Producción Forestal del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, 2011.

La distribución estimada del cultivo de salicáceas en el delta del río Paraná por provincia y especie se la puede visualizar en los gráficos de la Figura 2.8



**Figura 2.8:** Distribución de la superficie con salicáceas en el delta del Río Paraná por provincia y especie. En porcentaje a la izquierda y en ha. a la derecha.

Habitualmente el turno de corta, para el álamo, es entre 12 y 16 años, mientras que para el sauce se sitúa entre 10 y 14 años, dependiendo del objetivo de producción y el mercado. Los rendimientos esperados al turno de corta son para el álamo de 200 a 400 m<sup>3</sup>/ha y para el sauce de 120 a 250 m<sup>3</sup>/ha (Borodowsky, 2006).

*“En cuanto a la oferta de madera, sobre 50.000 hectáreas de forestales disponibles, dijimos que principalmente son Salicáceas: 22% álamo, 78% sauce. Si tenemos en cuenta que el turno de corte para el sauce es de 10 años y del álamo es 12 años, con rendimiento de sauce 120 toneladas y de álamo 200 toneladas por hectárea, tenemos una oferta de 651.000 toneladas por año de madera. Ahora bien, si vamos al rendimiento de turnos de corte superiores. El sauce de 140 toneladas por hectárea y álamo de 220, ya vamos a casi 750.000 toneladas por año. ¿Qué necesita la industria? Esta es la oferta. Tenemos una demanda total en madera de más de 800.000 toneladas por año. Dividida en celulosa, 370.000. Esto es en condiciones ideales, en máxima producción de las industrias. Tableros 200.000, aserrados 120.000 y laminados 20.000.”*(Signorelli, 2010).

Los álamos son exigentes en luz y agua. Para un buen desarrollo necesita un suelo de al menos dos metros de profundidad con condiciones de arenoso o franco arenoso. Su albura es de color blanco y su duramen blanco amarillento, no posee un olor característico y es de textura suave y homogénea, no es sencillo distinguir a simple vista entre la albura y duramen. En una madera muy trabajable y no ofrece dificultades para el aserrado o el debobinado. Los anillos de crecimiento interanuales no son fáciles de apreciar y a los efectos de su medición resulta conveniente impregnar la superficie con algún líquido para resaltarlos, el alcohol etílico es una buena opción.

La densidad del *Populus* aumenta desde la médula hacia la corteza, estabilizándose entre los 10 y 11 años. Se verifica también un aumento de la densidad con la altura del fuste, los valores determinados varían entre 336 kg/m<sup>3</sup> y 441 kg/m<sup>3</sup> (densidad básica). La longitud de las fibras aumenta desde la médula hacia la corteza, estabilizándose a partir de los 14 años (Monteoliva *et al.* 2011).

La transición entre la madera juvenil y la madera madura de *Populus deltoides* ‘Australia 129/60’ cultivado en el delta del río Paraná se produce a distintas edades para cada propiedad, pero está en un promedio de 8 años. Las propiedades de la madera juvenil a la altura de 1,30 son significativamente inferiores a las de la madera madura, menor densidad, menor

morfometría de fibras, menor diámetro de vasos y mayor frecuencia de estos. Esta situación se mantiene en todas alturas por lo que se puede afirmar que la madera juvenil es inferior en calidad a lo largo de todo su cilindro central (Cobas *et al.* 2013).

Se califica a la madera de *Populus* europeo como no durable ante la acción de hongos xilófagos y como sensible frente al ataque de insectos y termitas. Por otro lado es una especie cuya albura es muy fácil de impregnar con un duramen que ofrece dificultades para ser impregnado aunque la especie presenta una gran variedad de comportamientos (UNE EN 350-2 2006). Esta posibilidad de impregnación de la albura permite dotar a las piezas construidas con este material de una durabilidad conferida muy superior.

Con respecto al ataque de insectos, los daños ocasionados por el “taladrillo grande de los forestales” (*Megaplatypus mutatus*) constituyen la mayor problemática en lo referente a plagas vinculadas al álamo. Es un insecto del orden Coleóptera, el adulto es un escarabajo de unos 8 mm de largo por 3 mm de ancho. Los ataques se producen en árboles en pie, sanos, preferentemente en troncos con diámetro mayor a los 20 cm y un contenido de humedad mayor al 50%, aunque en condiciones de ataques severos árboles de menor diámetro son igualmente susceptibles (Cichón *et al.* 2004). La Figura 2.9 ilustra el ciclo de vida del *Megaplatypus* (extraído de Giménez R. 2009). Los adultos comienzan la construcción de galerías, prefieren árboles en pleno crecimiento, y luego el cavado es continuado por las larvas. A lo largo del año en cada túnel podrá encontrarse la descendencia de la pareja inicial: huevos, larvas pupas y finalmente en la primavera siguiente emergen por mismo orificio de entrada los nuevos adultos que pueden llegar a ser más de 200. Las paredes de las galerías quedan cubiertas por el hongo de ambrosía que alimenta las larvas y que finalmente se torna de color oscuro (Giménez 2009; SINAVIMO 2017; Thomas 2011). Las galerías generadas producen una disminución en la resistencia estructural del árbol a tal punto que luego la acción del viento puede provocar la quebradura del mismo. Los árboles caídos o secos no se ven afectados por la plaga por lo que no aportarían un riesgo extra para la dispersión del insecto (Cichón *et al.* 2004). Esta plaga no afecta la vida del árbol salvo que se quiebre. La disminución de la resistencia se traslada a la madera aserrada que ve afectada su calidad.

En diferentes instituciones del país se llevan adelante trabajos de investigación para avanzar en el estudio de esta plaga de insectos y determinar los tratamientos más efectivos, la

mayor parte de los disponibles hasta el presente son de tipo químico. Si bien hay importantes adelantos al respecto aún no se ha arribado a una solución a este serio problema.

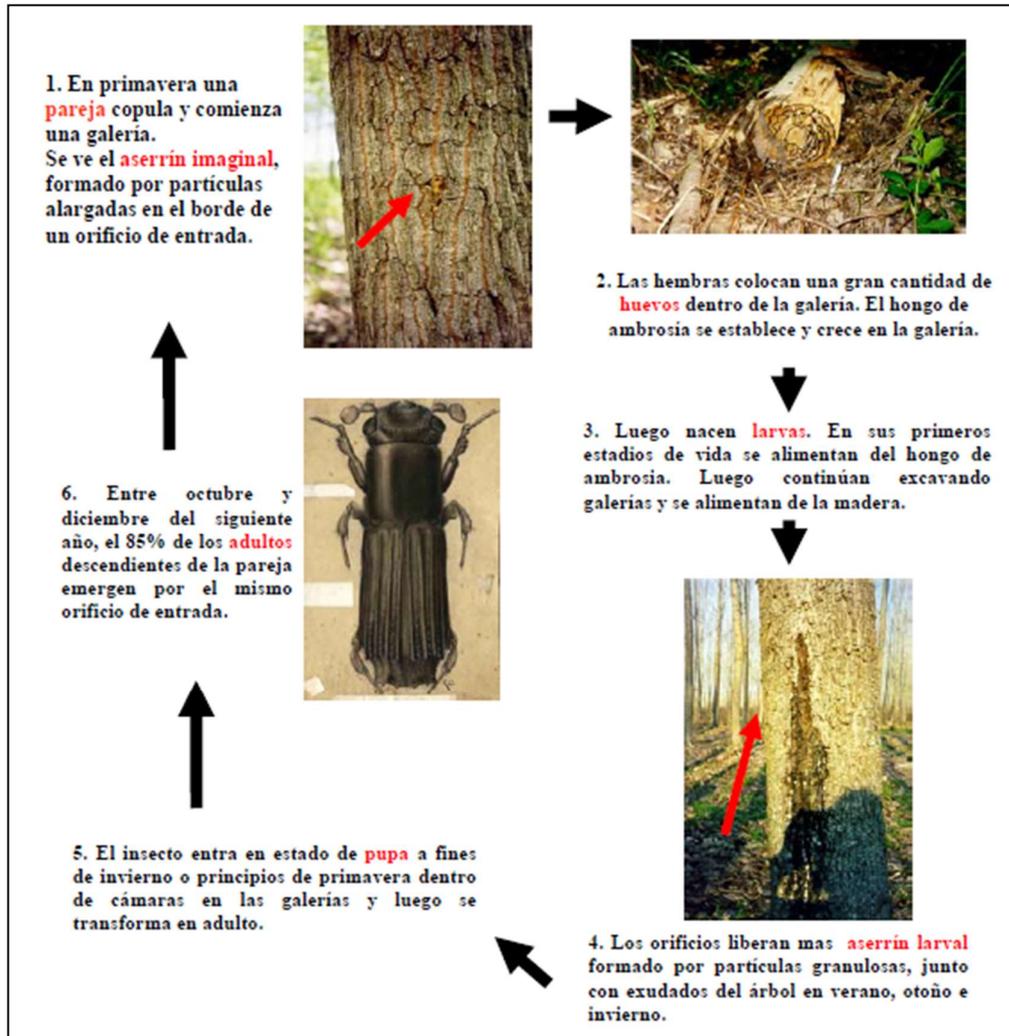


Figura 2.9: Ciclo de vida de la madera (extraído de Giménez R. 2009)

Los daños ocasionados por *Megaplatypus mutatus* sobre las piezas aserradas de *Populus x canadensis* I-214 procedente de plantaciones comerciales del valle medio de Río Negro, Argentina, generaron una influencia negativa en el comportamiento elasto-plástico de las mismas, afectando la homogeneidad de los datos y disminuyendo los valores resistentes (Spavento 2014), siendo objeto de rechazo las piezas con esta afectación según las normas de clasificación visual (UNE 56544 2011; NCh 1970 1988; IRAM 9662-4 2015).

Las enfermedades con mayor incidencia en las plantaciones de álamos son la roya (*Melampsora spp.*) y la cancrrosis (*Septoria musiva*). La roya causa importantes daños en estaqueros y plantaciones comerciales de álamos entre los cuales podemos mencionar: defoliaciones severas durante el verano, aumento de la susceptibilidad a daños producidos por bajas temperaturas durante el invierno, retraso en la brotación del año siguiente, mayor susceptibilidad a condiciones de estrés ambiental y al ataque de otros parásitos. En el delta del río Paraná se han reportado tres importantes ataques de roya. El primero, atribuido a *Melampsora medusae* (Thuem.), lo cual obligó al reemplazo del álamo “Carolino” (*Populus deltoides subesp. angulata cv. carolinensis*) por el álamo “criollo” (*Populus nigra cv. italica*), en la década de 1920. Éste, a su vez fue diezmado por *Melampsora larici populina* (Kleb.) en la década de 1940. Posteriormente a mediados de la década de 1990 un nuevo ataque de *Melampsora medusae* condujo al reemplazo de *Populus deltoides* ‘Catfish 2’ que ocupaba el 90 % de la superficie plantada. En base a estudios de rendimiento y comportamiento ante enfermedades de los materiales disponibles, se estableció que los clones: ‘Australiano 106-60’, ‘Australiano 129-60’, ‘Stoneville 67’ y ‘R-22’ eran los más adecuados para las nuevas condiciones. El uso de clones resistentes es la alternativa más económica y práctica para evitar los efectos perjudiciales de esta enfermedad, a lo que se le puede sumar para disminuir estos efectos la eliminación de las hojas caídas durante el otoño, la instalación de plantaciones a mayor distanciamiento, la aplicación de técnicas de poda y raleo en plantaciones densas, (CNA 2012, Cortizo 2005; Cortizo *et al.* 2006). La cancrrosis del álamo es producida por *Septoria musiva* y se presenta en todas las zonas productoras del país, la mayor incidencia se presenta en aquellas con precipitaciones más abundantes. Este hongo causa manchas foliares y canchros en el tronco y ramas. Estos canchros reducen el crecimiento del tronco y producen pérdida de valor económico de la madera. Para el control de las enfermedades, la obtención de plantas resistentes es el mejor método a largo plazo. En el manejo integrado de estas enfermedades se incluyen medios mecánicos, químicos y biológicos (Lucero *et al.* 2011).

*“Es imperioso que todos los productores tomen conciencia de la importancia de mejorar la calidad de la madera que se produce en la región. La materia prima que producen las Salicáceas tiene las condiciones para ser un producto de excelente calidad para su exportación. Actualmente, más del 80 % de la madera de Salicáceas de la región tiene como objetivo el triturado y por lo tanto no se le realizan los manejos necesarios para darle mayor calidad. Es necesario obtener cantidades importantes de madera de mayor diámetro, recta,*

*podada, para abastecer distintas industrias que la procesen para su exportación. La presencia de esta madera de mayor calidad impulsará la instalación de pequeñas y medianas industrias que procesarán y remanufacturarán la misma. Además se requiere de manera inmediata una tipificación de la madera, por diámetros, o calidades y largos para abastecer las distintas industrias. Lo expuesto permitirá revalorizar la madera en término de precios, y de destino final. El industrial pagará precios diferenciales y esto ayudará y afianzará al productor forestal a seguir plantando” (Borodowsky, 2006).*

En lo que respecta al uso estructural numerosos reportes han sido publicados referenciando las propiedades para distintos clones, lugares de procedencia y escuadrías: Hernández *et al.* (1998); Gutiérrez *et al.* (2001); Casado (2009); Calderón *et al.* (2011); Fank *et al.* (2014), Casado *et al.* (2015); Spavento (2015); Filippetti *et al.* (2017).

Calderón *et al.* (2011) reportaron los valores medios de ensayos a flexión sobre pequeñas probetas (20 x 20 x 300 en mm) para los clones: *Populus x canadensis* ‘I-78’; *Populus deltoides* ‘Caroliniana Grigio’ y *Populus deltoides* ‘Australia 106/60’, cultivados en la provincia de Mendoza, Argentina, valores para la resistencia a flexión de: 668 kg/cm<sup>2</sup>, 548 kg/cm<sup>2</sup> y 558 kg/cm<sup>2</sup>; para el módulo de elasticidad; 48.600 kg/cm<sup>2</sup>, 33.346 kg/cm<sup>2</sup> y 33.364 kg/cm<sup>2</sup> y para densidades medias: 542 kg/cm<sup>3</sup>, 415 kg/m<sup>3</sup>, 494 kg/cm<sup>3</sup>, para cada clon respectivamente.

Casado *et al.* (2015) reportaron, para el *Populus x euroamericana* I-214 proveniente de Palencia, España, un valor característico de resistencia a flexión de 25,9 N/mm<sup>2</sup>, con un módulo de elasticidad medio de 7.046 N/mm<sup>2</sup>. Los valores de resistencia son similares a otros reportes (Gutiérrez *et al.* 2001; Hernández *et al.* 1998; Casado 2009).

Para la madera de álamo cultivado en el sur de la provincia de Mendoza, Argentina, se reportaron para el grado superior valores de resistencia a la flexión superiores a 27 N/mm<sup>2</sup>, con un módulo de elasticidad del orden de los 9.000 N/mm<sup>2</sup>.

Para tablas de los clones ‘Australiano 129/60’ y ‘Stoneville 67’ cultivados en el noroeste de la provincia de Buenos Aires Filippetti *et al.* (2017) reportaron para el grado superior valores de 29,8 N/mm<sup>2</sup>, y 11.327 N/mm<sup>2</sup> para la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad respectivamente; para el grado inferior los valores informados fueron: 23,7 N/mm<sup>2</sup> y 10.394 N/mm<sup>2</sup>.

Para tablas de los clones 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' cultivados en el delta del río Paraná Fank *et al.* (2014) reportaron para el grado superior valores de 25,9 N/mm<sup>2</sup> y 10.326 N/mm<sup>2</sup> para la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad respectivamente, para el grado inferior los valores informados fueron 16,9 N/mm<sup>2</sup> y 9.976 N/mm<sup>2</sup>.

Para el *Populus x euramericana* I-214 procedente se valle de Río Negro en Argentina y de la cuenca de Duero en España se reportó un análisis de clasificación visual de acuerdo a las prescripciones de varias normas (UNE 56544 1997; UNE 56544 2011; NF B52-001 2007; DIN 4074-5 2008; NCh 1970 1 2010) con resultado de un alto número de rechazos en todos los casos, superior al 76%. Las causas más frecuentes de rechazo fueron los nudos y las gemas (Spavento 2015).

La norma IRAM 9662-4 2015 propone, para los clones 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' de *Populus deltoides* provenientes del delta del río Paraná valores de resistencia, rigidez y densidad que se ajustan a las clases C42 y C18 de la norma UNE EN 338 (2010).

La norma UNE EN 1912 (2005+A4 2010) le asigna a algunos clones de chopo calidades C27 y C22, de la norma UNE EN 338 (2010), si cumple los requisitos LS13, LS10 de la norma DIN 4074-5 2003 y calidades C24 y C18 si cumple con los requisitos ST-II y ST-III de la norma NF B52-001 2007.

El análisis precedente sobre los clones que presentan mejores posibilidades en el delta del río Paraná y las conversaciones mantenidas con productores de la región son coincidentes en que los clones 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' son los de mayor potencial por la superficie cultivada y estado sanitario, por ello son los seleccionados para este trabajo desde el punto de vista de la producción.

## 2.10. ASPECTOS AMBIENTALES

El cuidado del medio ambiente exige el análisis de los aspectos ambientales de las construcciones y los materiales que se utilizan. En el caso de los materiales este proceso comprende desde la obtención de la materia prima hasta su procesamiento, utilización y deposición final.

La madera es considerada con un impacto ambiental positivo y las principales razones son (Vihavainen 1995):

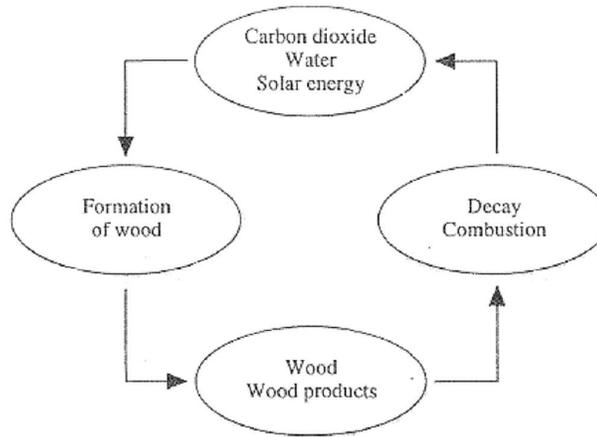
- La madera es un material renovable.
- La explotación racional de los bosques y los bosques implantados constituyen una fuente sustentable de materia prima.
- La madera al crecer reduce el CO<sub>2</sub> con un impacto favorable en el efecto invernadero.
- Su manufactura requiere mucha menos energía que otros materiales de construcción.
- La reutilización de los residuos en reciclado o generación de energía.

La madera es un material que cumple un ciclo de vida amigable con el medio ambiente. Durante su crecimiento la madera acumula importantes cantidades de CO<sub>2</sub> y lo mantiene almacenado hasta su destrucción. La madera aserrada se constituye en un reservorio de carbono y su procesamiento requiere mucha menos energía que el resto de los materiales construcción, aunque no es simple cuantificar estos valores con precisión porque dependen de los distintos procesos industriales, para dar un orden de magnitud se puede decir que la energía primaria contenida, en kWh/m<sup>3</sup>, por material, es la siguiente: madera aserrada 350, madera encolada 1200, cemento 1750, hormigón 700, acero 46000 y aluminio 141500 (Vihavainen 1995).

La deposición final de la madera cumple satisfactoriamente el ciclo de vida liberando al suelo, el aire o el agua el carbono que acumuló. El mayor impacto desfavorable se produce en los productos madereros por la inclusión de terminaciones, colas, compuestos orgánicos, etc. La preservación de la madera con distintos productos para aumentar su durabilidad genera un impacto negativo y numerosas investigaciones se orientan en la búsqueda de procesos y productos preservantes para generar impactos ambientales bajos o no significativos.

La utilización de la madera en la construcción de edificios y muebles impulsará el aumento de la superficie forestada y eso generará una mejora ambiental y en la calidad de vida del hombre.

El esquema de figura 2.10 ilustra sobre el ciclo de vida de la madera (extraído de Vihavainen 1995):



**Figura 2.10:** Ciclo de vida de la madera (extraído de Vihavainen 1995)



### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

---

#### 3.1. MATERIALES

Se seleccionaron tres plantaciones de *Populus deltoides* (álamo) de la zona del delta del río Paraná en la provincia de Buenos Aires, Argentina. Las plantaciones uno y dos corresponden al clon 'Australiano 129/60', mientras que la tercera al clon 'Stoneville 67'.

En las tres plantaciones el terreno se mantuvo limpio mediante labores de apisonado y/o roleado dos veces al año. Este tratamiento se continuó hasta el noveno año, oportunidad en la que se incorporó ganadería hasta la tala del monte.

Las plantaciones de 'Australiano 129/60' se realizaron en una malla inicial de 6 x 4 metros, 415 plantas por hectárea. Se les practicó un raleo selectivo al 30% a los nueve años de edad dejando aproximadamente 290 plantas por hectárea. En ambas se practicó poda de formación al año y poda de altura a los siete años de edad cuando las plantas poseían una altura aproximada de 5 metros. En la plantación 2 se realizó además una poda a los cuatro años. El

terreno sufrió anegamiento superficial por períodos cortos, no más de quince o veinte días, también existieron períodos de sequía un poco más prolongados. La plantación 1 se implantó en el año 1996 y se taló en el año 2009. La plantación 2 se implantó en el año 1998 y se taló en el año 2011. Ambas plantaciones tenían trece años de edad al momento de la tala.

La plantación 3 de 'Stoneville 67' se realizó en una malla inicial de 5 x 3 metros y se le practicó un raleo selectivo del 30% a los siete de edad. Se le realizó poda de formación al año y poda de altura a los cinco y nueve años. El terreno era plano, pero bien drenado, la plantación no sufrió anegamientos ni insuficiencias hídricas. Se implantó en el año 1997 y se taló en el año 2013 con dieciséis años.

La madera se aserró en estado verde y se remitió al laboratorio del Grupo GIDEC (Grupo de Investigación y Desarrollo de Estructuras Civiles) de la Facultad Regional Venado Tuerto de la Universidad Tecnológica Nacional para su secado en forma natural en galpón cerrado. La madera se acopió entablillada y se la mantuvo así hasta que su contenido de humedad fue inferior al 20%. Cuando alcanzó esa condición se procedió al cepillado de las cuatro caras y se comenzaron las tareas de incorporación de la nomenclatura, marcado, medición de defectos y confección de las probetas para los ensayos de compresión y tracción. Finalmente se almacenó en una cámara a 20°C de temperatura y 65% de humedad.

En la Tabla 3.1 se presenta el detalle de las piezas de madera utilizadas. La costumbre en el delta del río Paraná es dividir el árbol recién apeado en trozas de 2,20 metros de largo. De las mismas se pudieron extraer las probetas para ocho de las diez muestras de los ensayos a flexión (muestras 1 a 4 y 6 a 9), las de tracción y las de compresión. Para los ensayos de las dos muestras restantes de flexión (muestras 5 y 10) se necesitaron trozas de 3,30 metros de largo, de acuerdo a los requerimientos de la norma UNE EN 408 (2011), por lo que se solicitó al productor esta modificación en las dimensiones del trozado de los árboles. Las piezas de 25 mm x 100 mm se utilizaron para la confección de las probetas para ensayo a flexión de tablas (piezas ensayadas de plano), para probetas ensayadas a flexión como vigas (piezas ensayadas de canto) y las probetas de tracción. De los despuntes y piezas sin ensayar de las muestras 4, 5, 9 y 10 se confeccionaron las probetas para compresión paralela y perpendicular a las fibras. El detalle de las muestras se presenta en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.1:** Detalle de las piezas utilizadas para la confección de las probetas

Clon	Dimensiones nominales			Cantidad n	Plantación N°	Edad años	Observaciones
	Base mm	Altura mm	Largo mm				
A				172			(1)
	25	100	2200	66	1	13	(2)
				62			(3)
	50	75	2200	56	1	13	(4)
	50	100	2200	60	1	13	(5)
	50	150	3300	60	2	13	(6)
S				124			(7)
	25	100	2200	52	3	16	(8)
				68			(9)
	50	75	2200	52	3	16	(10)
	50	100	2200	60	3	16	(11)
	50	150	3300	57	3	16	(12)

A: *Populus deltoides* clon 'Australiano 129/60'; S: *Populus deltoides* clon 'Stoneville 67'. (1) Tablas de las que se relevaron los defectos en toda su extensión, se utilizaron 103 para confeccionar las probetas de la muestra 1; (2) Tablas utilizadas para confeccionar la muestra 3; (3) Tablas utilizadas para los ensayos de tracción; (4) Piezas utilizadas para confeccionar la muestra 2; (5) Se utilizaron 56 piezas para confeccionar la muestra 4, con los despuntes y las 4 piezas restantes se confeccionaron parte de las probetas para compresión paralela y perpendicular; (6) Se utilizaron 54 piezas para confeccionar la muestra 5, con los despuntes y las 6 piezas restantes se confeccionaron parte de las probetas para compresión paralela y perpendicular; (7) Tablas de las que se relevaron los defectos en toda su extensión, y se utilizaron 91 para confeccionar las probetas de la muestra 6; (8) Tablas utilizadas para confeccionar la muestra 8; (9) Tablas utilizadas para los ensayos de tracción; (10) Piezas utilizadas para confeccionar la muestra 7; (11) Se utilizaron 55 piezas para confeccionar la muestra 9, con los despuntes y las 5 piezas restantes se confeccionaron parte de las probetas para compresión paralela y perpendicular; (12) Se utilizaron 52 piezas para confeccionar la muestra 10, con los despuntes y las 5 piezas restantes se confeccionaron parte de las probetas para compresión paralela y perpendicular.

En la Tabla 3.2 se presenta el detalle de los cuerpos de prueba utilizados. Se indican las dimensiones nominales de cada muestra y a qué plantación correspondía cada una. Las probetas de las muestras 1 y 6, de dimensiones de 100 mm x 25 mm x 500 mm, se extrajeron de tablas de 25 mm x 100 mm x 2200 mm. Para la confección de estas probetas se disponía de 172 tablas de 'Australiano 129/60' y 124 de 'Stoneville 67'. De estas tablas se utilizaron 103 para realizar las probetas de la muestra 1 y 91 para las de la muestra 6. Las probetas para la compresión paralela y perpendicular se extrajeron de los despuntes o elementos sin ensayar de las muestras 4 y 5 para el clon 'Australiano 129/60' y de las series 9 y 10 para el clon 'Stoneville 67'.

**Tabla 3.2:** Detalle de los cuerpos de prueba utilizados

Muestra	Clon	Ensayo	Cantidad n	Dimensiones nominales			Plantación Nº	Edad años
				Base mm	Altura mm	Largo mm		
1	A	Flexión	296 <sup>(1)</sup>	100	25	500	1	13
2	A		56	50	75	1500	1	13
3	A		66	25	100	2000	1	13
4	A		56	50	100	2000	1	13
5	A		54	50	150	3000	2	13
6	S		150 <sup>(2)</sup>	100	25	500	3	16
7	S		52	50	75	1500	3	16
8	S		52	25	100	2000	3	16
9	S		55	50	100	2000	3	16
10	S		52	50	150	3000	3	16
	A	Compresión	51	45	45	270	1 y 2	13
	S	paralela	49	45	45	270	3	16
	A	Compresión	73	45	90	70	1 y 2	13
	S	perpendicular	70	45	90	70	3	16
	A	Tracción	62	25	100	1400	1	13
	S	paralela	68	25	100	1400	3	16

A: *Populus deltoides* clon 'Australiano 129/60'; S: *Populus deltoides* clon 'Stoneville 67'. <sup>(1)</sup> extraídas de 103 tablas de 25x100x2200. <sup>(2)</sup> extraídas de 91 tablas de 25x100x2200.

## 3.2. METODOLOGÍA

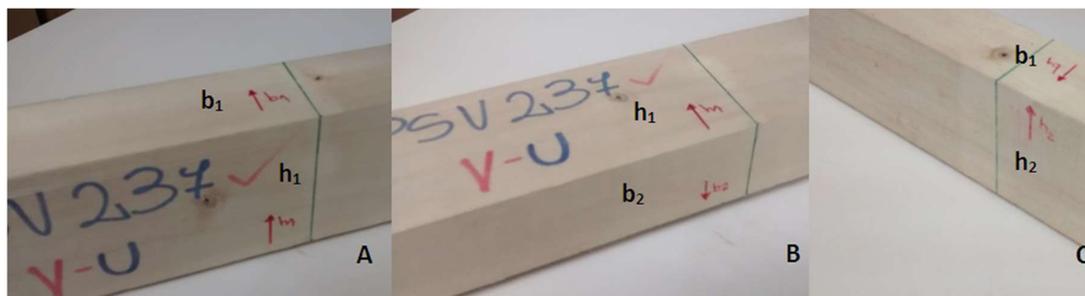
### 3.2.1. Dimensiones y relevamiento de las características visuales de las probetas para los ensayos a flexión

El relevamiento de las dimensiones y características visuales de cada pieza se realizó de acuerdo a los lineamientos de las normas UNE EN 408 (2011), UNE EN 14081-1 (2006) y UNE EN 1310 (1997). Estos lineamientos son también descriptos en la norma UNE EN 56544 (2011). Esta versión de la norma es de aplicación para cuatro especies de pinos de procedencia española, pero en su versión del año 1997 incluía al chopo (*Populus*). La norma IRAM 9662-4

(2015), para tablas de *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67', presenta un sistema de medición de singularidades similar.

### Determinación de las dimensiones de las probetas

Las dimensiones transversales de cada pieza se midieron en el centro y en ambos extremos a una distancia de 150 mm de las testas. Se utilizó un calibre digital con precisión de centésima de milímetro cumpliendo con la exigencia del 1% de precisión que establece la norma UNE EN 408 (2011). El replanteo de la distancia entre apoyos, los puntos de aplicación de las cargas y la ubicación de los comparadores se realizó a través de una cinta metálica con precisión de milímetro. Para el centrado de la probeta se utilizó un nivel láser. Para el relevamiento de las singularidades se identificaron las caras de cada probeta con la siguiente nomenclatura: como  $h_1$  se denominó la cara lateral de frente al operador del ensayo, como  $h_2$  la cara lateral opuesta, como  $b_1$  la cara superior y como  $b_2$  la cara inferior. La Figura 3.1 muestra el detalle.



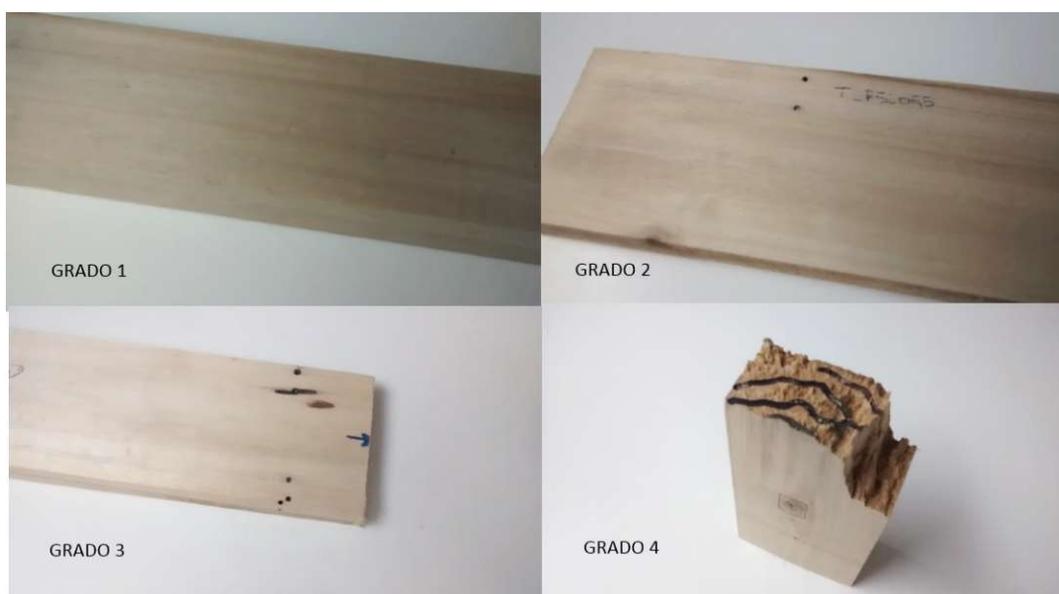
**Figura 3.1:** Identificación de las caras

A: vista de frente al operador del ensayo; B: vista inferior; C: vista desde el punto opuesto al operador del ensayo

### Evaluación de la afectación por ataque de insectos

Una de las características de la madera de álamo de esta procedencia es que una gran proporción se encuentra afectada por ataque de insectos cuyo signo visible son orificios oscuros en las caras. Para registrar el nivel de afectación apreciable a simple vista se definen cuatro

grados de ataque: Grado 1 (sin afectación): la pieza se encuentra libre de signos externos que indiquen afectación; Grado 2 (ataque leve): la pieza presenta no más de dos orificios en la misma sección (se considera que los orificios están en una misma sección si están separados menos de 5 cm en la dirección del eje de la pieza) ; Grado 3 (ataque severo): la pieza presenta más de dos orificios en la misma sección y Grado 4 (zona de colapso): la pieza rompió en la zona afectada por el ataque biológico al ser ensayada. La Figura 3.2 grafica los tipos de ataque.



**Figura 3.2:** Distintos grados de ataque

### **Determinación de la presencia de médula**

En cada una de las piezas se relevó la presencia de médula indicando en cada caso su existencia o no. Se registró su posición en las secciones extremas si correspondía o en la cara donde se manifestaba. La Figura 3.3A ilustra la aparición de médula en una sección transversal extrema y la Figura 3.3B en una cara lateral.



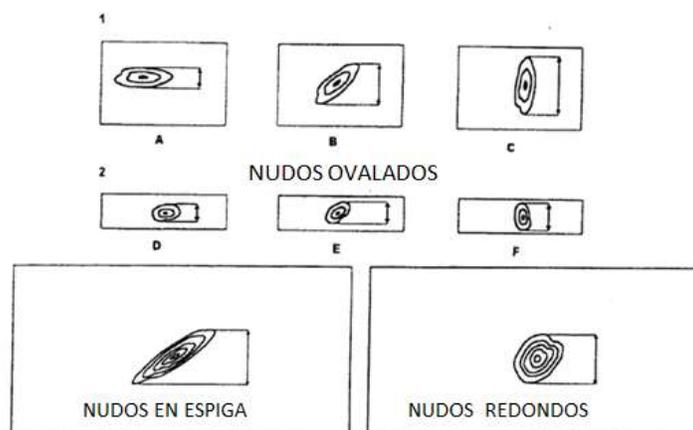
**Figura 3.3:** Identificación de la médula en una sección extrema y en una cara lateral

A: Médula en una sección extrema- B: Médula en una cara lateral

### Relevamiento y criterios de evaluación de la nudosidad

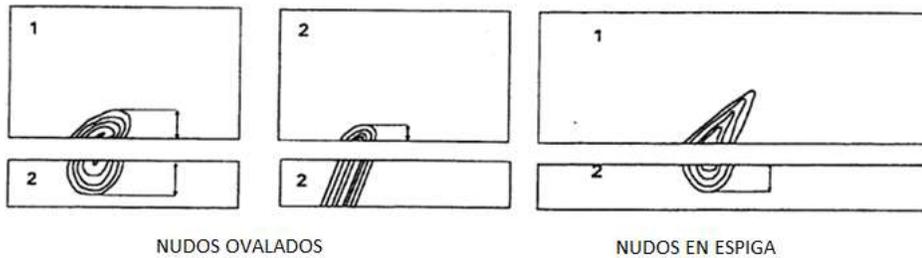
#### *Procedimiento para el relevamiento de nudos*

La norma UNE EN 1310 (1997) presenta el procedimiento utilizado, denominado “Método alternativo”, para medir la nudosidad. La Figura 3.4, extraída de la norma mencionada, grafica las prescripciones para medir la dimensión de los nudos de cara (ya sean ovalados, en espiga o redondos) entre paralelas a las aristas.



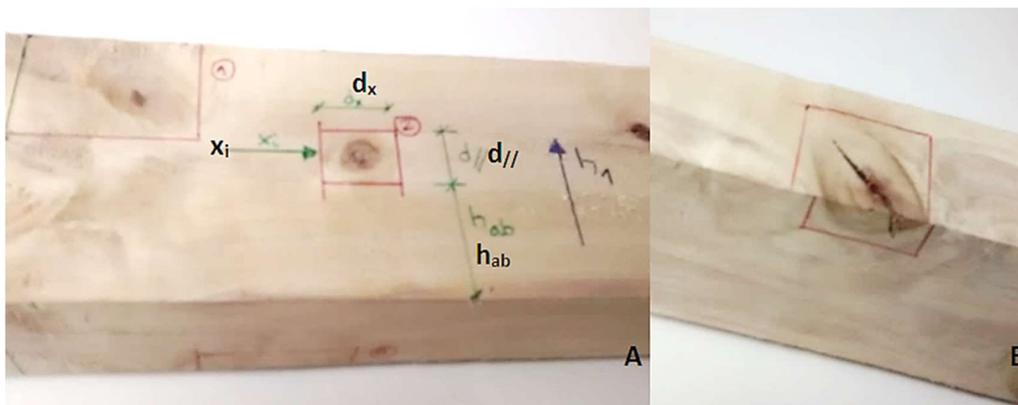
**Figura 3.4:** Medición de los nudos en las caras (UNE EN 1310 1997)

La Figura 3.5 grafica las prescripciones para medir la dimensión entre paralelas a las aristas de los nudos de arista.



**Figura 3.5:** Medición de los nudos de arista (UNE EN 1310 1997)

En cada una de las piezas se registró la dimensión y la ubicación de cada nudo. No se consideraron los nudos menores a 10 mm. Se los numeró correlativamente, se registró la cara en la que se presentaba, se determinó la distancia al apoyo izquierdo de la viga ( $X_i$ ), la dimensión en el sentido del eje de la pieza ( $d_x$ ), la distancia a la cara inferior ( $b_2$ ) para los nudos de las caras laterales ( $h_{ab}$ ) o a la cara lateral ( $h_1$ ) para los nudos existentes en las caras superior e inferior ( $b_{ab}$ ) y la dimensión del nudo en la dirección perpendicular al eje de la pieza ( $d_{//}$ ). Para los nudos de arista se utilizó el mismo número identificador en ambas caras y se dejó expresa referencia de su posición. La Figura 3.6 muestra las dimensiones relevadas en cada uno.



**Figura 3.6:** Nomenclatura para el relevamiento de nudos

A: nudo de cara; B: nudo de arista

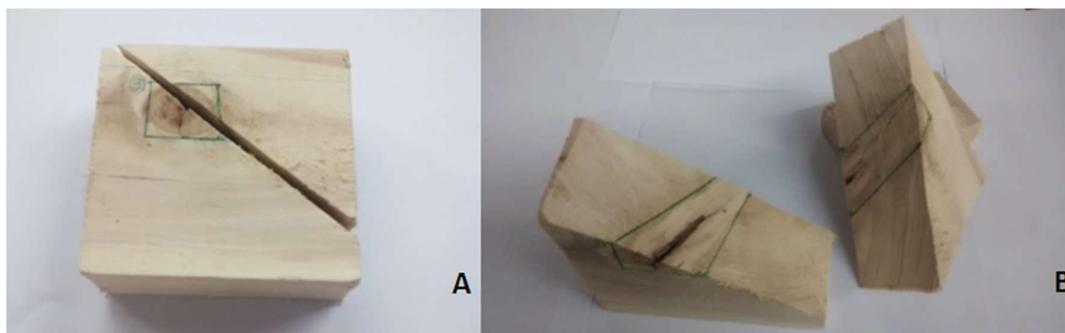
La Figura 3.7 presenta el formato de la planilla utilizada para relevar los nudos. Se registra: la cara (LADO) donde se presenta el nudo, su número identificador (N°), la distancia al apoyo izquierdo ( $X_i$ ) (se define el apoyo izquierdo observando de frente la cara  $h_1$ ), la dimensión en la dirección del eje de la pieza ( $d_x$ ), la distancia a la cara  $b_2$  para nudos en las caras laterales ( $h_{ab}$ ) o la distancia a la cara  $h_1$  para los nudos de las caras superior e inferior ( $b_{ab}$ ), la dimensión del nudo entre paralelas a las aristas ( $d_{//}$ ) y en observaciones se registra si es nudo de arista y sus características.

LADO	N°	$X_i$	$d_x$	$h_{ab}/b_{ab}$	$d_{//}$	Observaciones

**Figura 3.7:** Planilla de relevamiento de los nudos

LADO: cara donde manifiesta el nudo; N°: número de nudo;  $x_i$ : distancia al apoyo izquierdo;  $d_x$ : dimensión de nudo en la dirección del eje de la pieza;  $h_{ab}/b_{ab}$ : distancia del nudo al borde inferior de la pieza o a la cara  $h_1$  según corresponda;  $d_{//}$ : dimensión del nudo en la dirección perpendicular al eje de la pieza.

La particularidad del crecimiento de la especie muestra que las ramas crecen formando un ángulo de unos  $45^\circ$  respecto del eje de la pieza, lo cual conduce a proyecciones de los nudos en la sección transversal como se muestra en la Figura 3.8. A la derecha se muestra la cara lateral  $h_1$ , se aprecia el corte de la sierra a  $45^\circ$  respecto del eje y a la izquierda se muestra la proyección del nudo sobre el plano de corte. Este patrón de crecimiento de las ramas se utilizó para identificar la traza de los nudos sobre la sección trasversal de las probetas.

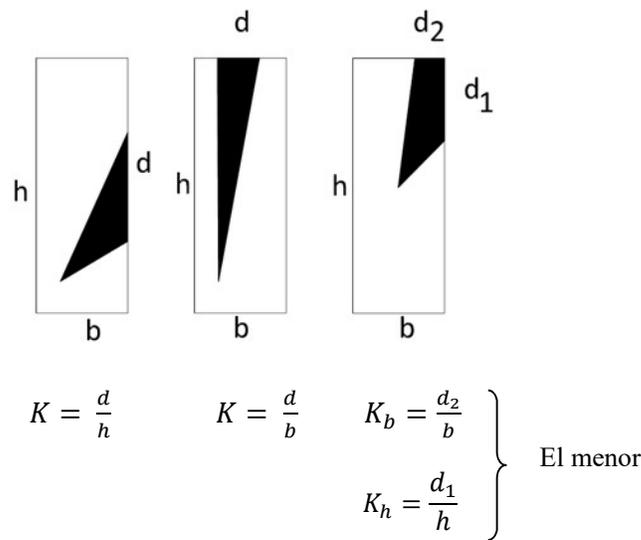


**Figura 3.8:** Detalle de un nudo de cara

A: Vista de un nudo en la cara de la pieza. B: vista de un nudo en la sección transversal

*Criterios para evaluar la nudosidad*

Para evaluar la nudosidad se definen cinco criterios. El primero de ellos consiste en determinar la relación entre la dimensión del nudo mayor o agrupamiento de nudos, medida entre líneas paralelas al eje de la pieza y tangentes al mismo (método alternativo UNE EN 1310 1997) con la dimensión transversal de la cara donde se manifiesta. Para los agrupamientos de nudos se considera la proyección superpuesta una sola vez. Se considera nudos agrupados cuando la distancia entre el centro de ellos es menor de 150 mm o menor que la altura de la pieza en el plano de flexión; en el caso de las tablas, piezas ensayadas de plano, se considera el ancho de la misma (IRAM 9662-4 2015). Para los nudos de arista se considera la menor de las dos relaciones. Este criterio se denominó “K”. La Figura 3.9 ilustra la aplicación del criterio. Se determinó el valor “K” de la nudosidad para todas las probetas.

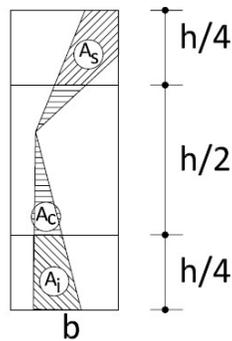


**Figura 3.9:** Determinación del valor de la nudosidad K

El segundo criterio consiste en determinar la proporción de área que ocupa la proyección del nudo o agrupamiento de nudos en la sección transversal del cuerpo de prueba en relación al área de la sección transversal completa del mismo, se lo denominó “KAR”. Se determinó la proyección de los nudos en la sección transversal en base a la traza que los mismos presentan en la cara y la posición de la médula. La superficie ocupada se calculó con la ayuda de un programa de CAD. Para verificar la posición de la médula y los nudos en la sección

transversal se cortaron las piezas en la sección en estudio perpendicularmente al eje de la misma. La Figura 3.10 ilustra la aplicación del criterio.

El tercer criterio consiste en determinar la proporción que ocupa la proyección del nudo o agrupamiento de nudos en el cuarto superior de la sección transversal del cuerpo de prueba en relación al cuarto del área de la sección transversal del mismo. Se lo denominó “KARMS”, ver la Figura 3.10.



$$KAR = \frac{A_s + A_c + A_i}{A_T} \quad KARMS = \frac{A_s}{A_T/4} \quad KARMi = \frac{A_i}{A_T/4} \quad KARM = \frac{A_s + A_i}{A_T/2}$$

**Figura 3.10:** Determinación de los valores “KAR”; “KARMS”; “KARMi” y “KARM” de nudosidad

*As*: área que ocupan los nudos en el cuarto superior de la sección transversal. *Ac*: área que ocupan los nudos en la sección central de la sección transversal. *Ai*: área que ocupan los nudos en el cuarto inferior de la sección transversal. *AT*: área de la sección transversal.

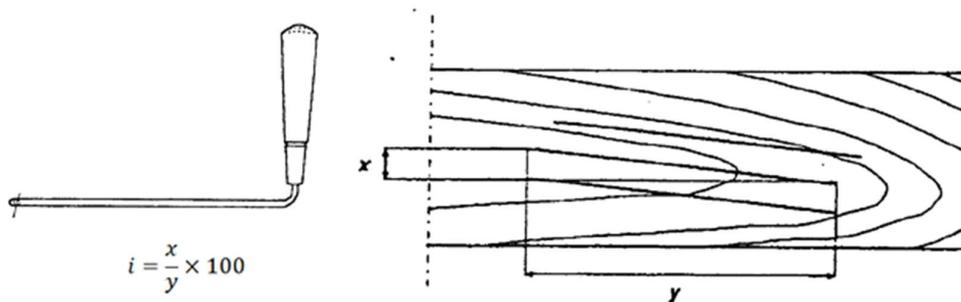
El cuarto criterio consiste en determinar la proporción que ocupa la proyección del nudo o agrupamiento de nudos en el cuarto inferior de la sección transversal del cuerpo de prueba en relación al cuarto del área de la sección transversal del mismo. Se lo denominó “KARMi”, ver la Figura 3.10.

El quinto criterio consiste en determinar la proporción que ocupa la proyección del nudo o agrupamiento de nudos en los cuartos extremos de la sección transversal del cuerpo de prueba en relación al área de los cuartos extremos de la sección transversal del mismo. Se lo denominó “KARM”, ver la Figura 3.10.

Los valores de “KAR”, “KARMS”, “KARMi” y “KARM” se determinaron para las probetas de las muestras 4 y 5 del clon ‘Australiano 129/60’ y las 9 y 10 del clon ‘Stoneville 67’.

### Determinación de la desviación de la fibra

En la mayor parte de las piezas la inclinación de las fibras con respecto al eje de la pieza no se aprecia a simple vista con claridad, por lo que resulta dificultosa su aplicación práctica para una clasificación visual. Con el fin de evaluar su incidencia en las propiedades mecánicas se procedió a su relevamiento de acuerdo a las prescripciones de la norma UNE EN 1310 (1997). Con un trazador se resaltó la dirección de la fibra y luego se registró la dimensión del apartamiento de la fibra de la dirección del eje de la pieza (x) en una determinada longitud en la dirección de ese eje (y), con estos valores se determinó la desviación de la fibra respecto del eje longitudinal de la pieza. La Figura 3.11 ilustra el procedimiento de medición.

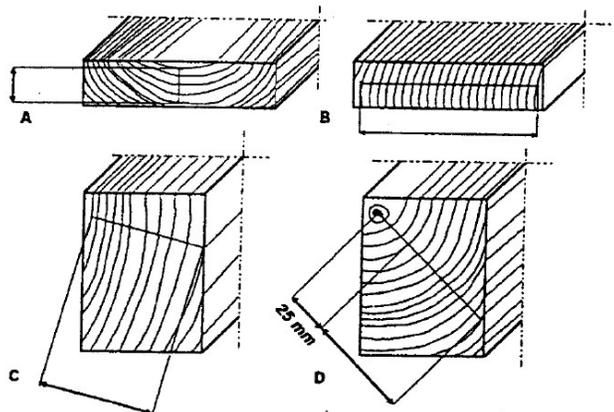


**Figura 3.11.** Medición de la desviación de la fibra (UNE EN 1310 1997)

### Determinación de la dimensión de los anillos de crecimiento

Las características de la especie no permiten observar a simple vista los anillos de crecimiento por esa razón este parámetro no es de aplicación práctica a los efectos de su utilización en un método de clasificación visual. Para evaluar su incidencia en las propiedades resistentes en flexión se procedió a su relevamiento en las muestras 1, 3 y 5 del clon ‘Australiano 129/60’ y en las muestras 6, 8 y 10 del clon ‘Stoneville 67’. Para visualizar los anillos se humedecieron las testas de las piezas con alcohol etílico. La determinación se realizó

de acuerdo a las prescripciones de la norma UNE EN 1310 (1997). La Figura 3.12 ilustra las indicaciones de la norma para realizar la medición del ancho de los anillos de crecimiento.



**Figura 3.12:** Medición del coeficiente de crecimiento (UNE EN 1310 1997)

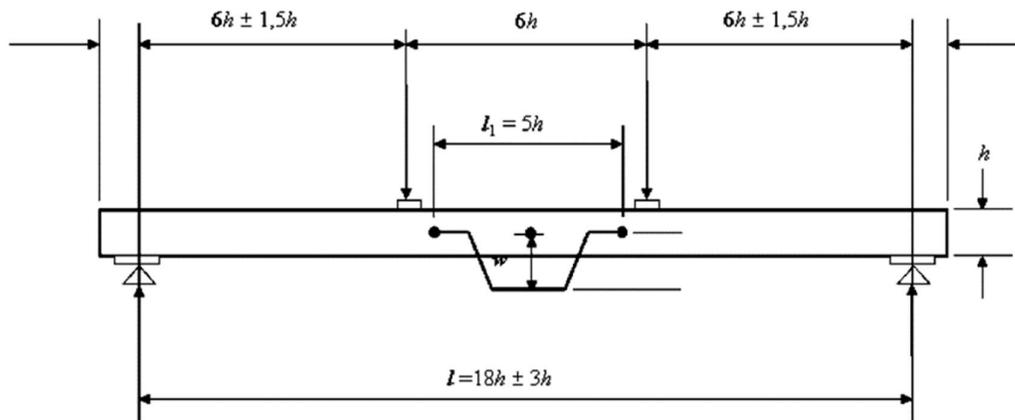
Para determinar el coeficiente de crecimiento se trazó un radio y sobre él se contó el número de anillos que se apreciaban y se midió la longitud total. Luego se realizó el cociente entre esa longitud y la cantidad de anillos determinando la anchura media. Se identificaron los anillos de menor y mayor anchura registrando sus dimensiones. No se consideró la zona que se situaba a menos de 25 mm de la médula.

### Relevamiento de otras singularidades

Se relevaron en cada pieza: presencia de arista faltante, fisuras, afectación de hongos y deformaciones previas al ensayo (flecha de cara, flecha de canto, abarquillado o alabeo) dejando registro de las mismas.

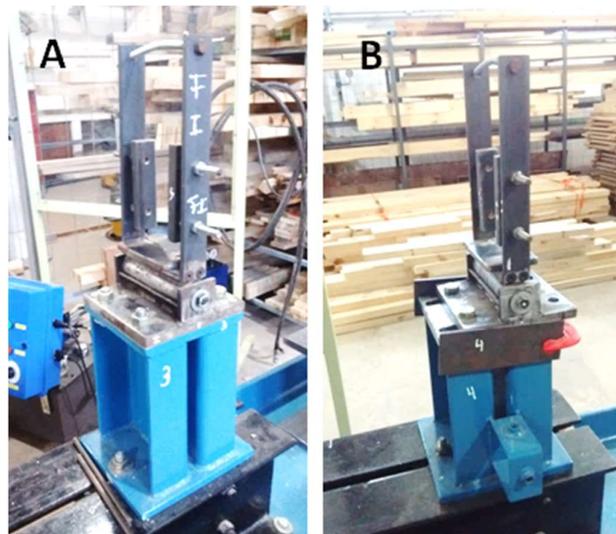
### 3.2.2. Procedimiento para el ensayo a flexión

El ensayo a flexión se realizó según las prescripciones de la norma UNE EN 408 (2011). La Figura 3.13 muestra la disposición de las cargas y las condiciones para la medición de las deformaciones necesarias para la determinación del módulo de elasticidad local.



**Figura 3.13:** Esquema de cargas y medición de deformaciones para el módulo de elasticidad local (UNE EN 408 2011)

Los apoyos se ubicaron a una distancia de 18 veces la altura media de la serie a ensayar. Observando la probeta de frente a la cara  $h_1$ , a la izquierda se ubicó un apoyo fijo articulado y a la derecha un apoyo móvil. La Figura 3.14 muestra el detalle de situación de los apoyos. Los soportes de los apoyos se fijaron a una bancada que permite ajustar la separación de los mismos desde 0,35 m hasta 3,00 m.



**Figura 3.14:** Detalle de los apoyos

A: apoyo fijo. B: Apoyo móvil

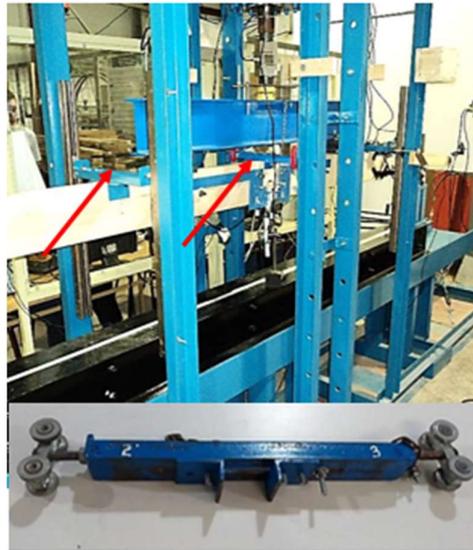
Las cargas se aplicaron en la parte superior de las piezas, cara  $b_2$ , centradas y separadas entre sí a una distancia de 6 veces la altura promedio de la serie en el plano de flexión. La aplicación se realizó a través de un cilindro hidráulico accionado desde una central con la capacidad de ajustar la velocidad del ensayo a los requerimientos de la norma. En ningún caso la velocidad superó los “ $0,003 \times h$  mm/s” (h: altura de la pieza en el plano de flexión). La distribución de la fuerza provista por el cilindro hidráulico en dos fuerzas, para su aplicación en los tercios de la luz de las piezas, se realizó mediante un perfil doble Te. Entre el mencionado perfil y la celda de cargas utilizada para la medición de la fuerza aplicada se interpuso una rótula. Los dispositivos de contacto entre el perfil y la cara superior del elemento a ensayar funcionaron articulados para acompañar la deformación de la pieza en ensayo. La Figura 3.15 muestra la celda de cargas y la rótula. La velocidad de carga aplicada en cada muestra generó la rotura de los elementos en un lapso de entre 180 y 420 segundos.



**Figura 3.15:** Detalle de la rótula y celda de cargas

Todo el ensayo se realizó dentro de un marco de cargas de hormigón armado que contenía tanto al cilindro de aplicación de cargas como a los apoyos de la bancada. Para evitar el pandeo lateral de las probetas se incorporó un dispositivo, con rodamientos y guía, para funcionar como tope lateral en el centro de la luz. En las series 3, 5, 8 y 10 se incorporaron

dispositivos similares en los cuartos de la luz, dado que las piezas presentaban pandeo lateral en forma de “S”. La Figura 3.16 muestra los detalles.



**Figura 3.16:** Dispositivo para evitar el pandeo lateral.

Arriba: vista de conjunto, abajo: detalle del carro guía

Para reducir el aplastamiento en las zonas de los apoyos y de introducción de las cargas se colocaron placas metálicas de ancho no mayor de la mitad de la altura de cada probeta. Las mismas se sujetaron a los dispositivos por medio de tornillos.

En el mismo procedimiento de ensayo se realizaron las mediciones para determinar los módulos de elasticidad global y local, y la carga de rotura, capítulos 9, 10 y 19 de la norma UNE EN 408 (2011). En las series 1 y 6 solo se determinó solamente el módulo de elasticidad global.

### **Medición de cargas y deformaciones**

La medición de las cargas se realizó a través de celdas de carga. Se utilizó una celda de 20 kN para las muestras 1 a 4 y 6 a 9 y una de 50 kN para las muestras 5 y 10. Para el módulo de elasticidad global las deformaciones se midieron en la parte inferior del centro de la luz entre

apoyos con un comparador de precisión 0,01 mm y desplazamiento máximo 50 mm. Para el módulo de elasticidad local las deformaciones se midieron con dos comparadores de precisión 0,01 mm y desplazamiento máximo 12,5 mm ubicados sobre el eje neutro a ambos lados del cuerpo de prueba, respecto de puntos dispuestos simétricamente y separados entre sí una distancia de 5 veces la altura nominal promedio de la serie en ensayo.

Para determinar en un solo ensayo el módulo de elasticidad local y el módulo de elasticidad global se requiere la lectura simultánea de carga y tres comparadores. A los efectos de garantizar esa simultaneidad se ubicaron cuatro cámaras web, una frente a cada comparador y la cuarta frente al lector de cargas. Las cámaras se conectaron vía puerto USB a una PC y con el software Cerberus para webcam se obtuvo la visualización en pantalla de la imagen de las cuatro cámaras. Mediante un software captador de pantalla se generó un archivo con la imagen de las cuatro cámaras para cada escalón de carga. Estas capturas se archivaron en una carpeta identificada con el número de la probeta. Con este procedimiento se generaron entre 6 y 8 imágenes por probeta con los valores de cada escalón de carga. Posteriormente desde las imágenes se volcaron los datos a una planilla de cálculo para su procesamiento. Se incorporó en la pantalla un cronómetro a los efectos de registrar los tiempos del ensayo. La Figura 3.17 muestra la ubicación de dos de las cámaras, una enfocada en el comparador que mide las deformaciones locales y la otra sobre el comparador de las deformaciones globales.



**Figura 3.17:** Ubicación de cámaras web para medir deformaciones

### Capítulo 3 – Programa experimental

La Figura 3.18 presenta la vista de conjunto. Se aprecia una viga en posición de ensayo, se observan dos de las cámaras, una para el lector de cargas y otra para uno de los comparadores, y la PC que operaba el sistema de registro de datos.



**Figura 3.18:** Vista general de un ensayo

La Figura 3.19 muestra una de las pantallas característica de visualización de las cámaras. Se puede apreciar en la parte superior, de izquierda a derecha, la imagen de la cámara



**Figura 3.19:** Pantalla de captura de datos

sobre el lector de cargas y luego la correspondiente al comparador que mide la deformación global. En la parte inferior la imagen de los comparadores para la deformación local, a la izquierda la correspondiente a la cara  $h_1$  y a la derecha la de cara  $h_2$ . Se aprecia también el cronómetro utilizado para la medición del tiempo de duración del ensayo.

### Determinación del módulo de elasticidad local

La Figura 3.20 muestra el dispositivo que sostiene el comparador que mide las deformaciones para la determinación del módulo de elasticidad local. En la parte superior derecha se aprecia el sistema de ingreso de la carga.



**Figura 3.20:** Vista lateral del dispositivo para medir las deformaciones correspondientes al módulo de elasticidad local y detalle del ingreso de las cargas

Se registraron las cargas y deformaciones hasta un 40 % de la carga de rotura estimada. Para la determinación del módulo de elasticidad se eligió la parte de la curva carga-deformación con correlación superior a 0,99. Se trató de incluir un tramo que estuviera comprendido entre el 20% y el 30% de la carga estimada de rotura. Se utilizó la siguiente expresión de la norma UNE EN 408 (2011):

$$E_{m,l} = \frac{a l_1^2 (F_2 - F_1)}{16 I (w_2 - w_1)}$$

$E_{m,l}$	Módulo de elasticidad local en newton por milímetro cuadrado.
$a$	Distancia entre el punto de carga y apoyo más próximo, en milímetros.
$l_1$	Longitud base para la medición de deformaciones, en milímetros.
$I$	Momento de inercia de la sección en milímetros a la cuarta.
$F_2 - F_1$	Incremento de carga en la recta de regresión con un coeficiente de correlación superior a 0,99 con las deformaciones, en newton.
$w_2 - w_1$	Incremento de deformación correspondiente a $F_2 - F_1$ , en milímetros.

### Determinación del módulo de elasticidad global

Las mediciones para la determinación del módulo de elasticidad global se realizaron simultáneamente con las correspondientes a las del módulo de elasticidad local. Para la determinación del módulo de elasticidad se eligió la parte de la curva carga-deformación con correlación superior a 0,99. Se trató de incluir un tramo que estuviera comprendido entre el 20% y el 30% de la carga estimada de rotura. Se utilizó la siguiente expresión de la norma UNE EN 408 (2011):

$$E_{m,g} = \frac{3 a l^2 - 4 a^3}{2 b h^3 \left( 2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6 a}{5 G b h} \right)}$$

$E_{m,g}$	Módulo de elasticidad global en newton por milímetro cuadrado
$a$	Distancia entre el punto de carga y apoyo más próximo, en milímetros.
$l$	Longitud de flexión entre apoyos, en milímetros.
$b$	Anchura de la sección, en milímetros.
$h$	Altura de la sección, en milímetros.
$G$	Módulo de elasticidad transversal en newton por milímetro al cuadrado.
$F_2 - F_1$	Incremento de carga en la recta de regresión con un coeficiente de correlación superior a 0,99 con las deformaciones, en newton.
$w_2 - w_1$	Incremento de deformación correspondiente a $F_2 - F_1$ , en milímetros.

Se utilizó para el módulo de elasticidad transversal el valor  $G = \infty$ .

### Determinación de la resistencia a flexión

En el mismo procedimiento operatorio realizado para determinar el módulo de elasticidad, sin suspender la aplicación de cargas a velocidad constante, al alcanzar el 40% de la carga de rotura estimada se retiraron los dispositivos para la medición de deformaciones y se continuó el ensayo hasta la rotura. Se registró la carga máxima. Para determinar la resistencia a la flexión se utilizó la siguiente expresión de la norma UNE EN 408 (2011):

$$f_m = \frac{3 F a}{b h^2}$$

$f_m$	Resistencia a la flexión, en newton por milímetro cuadrado.
$a$	Distancia entre el punto de carga y apoyo más próximo, en milímetros.
$b$	Anchura de la sección, en milímetros.
$h$	Altura de la sección, en milímetros.
$F$	Carga máxima, en newton.

### Registro del tipo de rotura

Al finalizar el ensayo se registró en la planilla de la probeta el tipo de rotura y toda otra información que pudiera ser relevante al analizar el resultado del ensayo. Se tomaron fotografías de las cuatro caras en la zona de la rotura y de toda singularidad significativa.

### Determinación del contenido de humedad y densidad aparente de las probetas de flexión

La determinación del contenido de humedad y densidad aparente de las probetas se realizó inmediatamente después de finalizado el ensayo correspondiente. Se efectuó sobre un trozo de sección completa y libre de nudos extraído de una zona cercana a la rotura. Se respetaron los procedimientos descritos en las normas UNE EN 408 (2011), ISO 3131 (1975) e ISO 3130 (1975)

Para la determinación de la masa se utilizó una balanza electrónica OHAUS SERIE SCOUT PRO con capacidad 400 g x 0.01 g. Las dimensiones de las probetas se determinaron con un calibre electrónico Mitutoyo de precisión 0,01 mm. El secado del trozo se realizó en una estufa eléctrica a 103±2 °C.

Los valores de densidad aparente se determinaron a través de la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{m_t}{V_t}$$

$\rho$ :	Densidad en kilogramos por metro cúbico
$m_t$ :	Masa total del trozo en kilogramos.
$V_t$ :	Volumen total del trozo en metros cúbicos.

Los contenidos de humedad se determinaron a través de la siguiente expresión:

$$CH = \frac{m_t - m_a}{m_a} 100$$

CH: Contenido de humedad en porcentaje.  
 $m_t$ : Masa total del trozo en kilogramos.  
 $m_a$ : Masa anhidra del trozo en kilogramos.

### Ajuste a condiciones de referencia

Los valores de resistencia a la flexión, módulo de elasticidad y densidad se ajustaron a las condiciones de referencia de acuerdo a los lineamientos de la norma UNE EN 384 (2010).

El contenido de humedad de referencia definido por la norma es del 12%. Se corrigió el valor del módulo de elasticidad a razón del 1% por cada 1% de diferencia en el contenido de humedad respecto a la de referencia. Los valores se aumentaron si se corregía desde valores superiores al contenido de humedad de referencia y viceversa para el caso contrario. Si la pieza presentaba más de un 18% de humedad los valores se corregían a partir de ese contenido de humedad. La densidad se corrigió a razón de disminuir su valor un 0,5% por cada 1% del valor de contenido de humedad superior al de referencia y viceversa para contenidos de humedad menores.

La resistencia a la flexión se ajustó a la altura de referencia de 150 mm, la norma establece dividir el valor experimental por un coeficiente  $k_h$  que surge de la siguiente ecuación.

$$k_h = \left(\frac{150}{h}\right)^{0,2}$$

$k_h$  Resistencia a la flexión, en newton por milímetro cuadrado.  
 $h$  Altura de la sección en el plano de flexión, en milímetros.

### 3.2.3. Procedimiento para el ensayo de compresión paralela a las fibras

La preparación de las probetas y los ensayos se realizaron de acuerdo a las prescripciones de la norma UNE EN 408 (2011).

Las probetas se mecanizaron asegurando que las caras superior e inferior fueran planas, paralelas entre sí y perpendiculares al eje de la pieza. Se confeccionaron de sección cuadrada de 45 mm de lado y con una longitud de 270 mm, respetando la relación de 6 entre la longitud y el lado de menor dimensión. Tras ello, se relevaron los defectos con los mismos procedimientos descritos para las piezas de los ensayos de flexión y se depositaron en la cámara de estabilizado a 20°C de temperatura y 65% de humedad hasta el momento del ensayo.

### **Determinación del módulo de elasticidad en compresión paralela las fibras**

La carga se aplicó con un equipo hidráulico a una velocidad constante de 0,01 mm/s, inferior a  $0,00005 \times l$  mm/s ( $l$ : longitud de la probeta), que es la máxima que prescribe la norma. Se aseguró que la probeta estuviera perfectamente centrada y alineada con el cilindro de carga. Para posicionar cada probeta se utilizaron dos niveles láser ubicados a 90° entre sí. Entre la celda de carga y el dispositivo de contacto con la probeta se interpuso una rótula. Las cargas se midieron con una celda de cargas de precisión 10 N y carga máxima 100 kN. Las deformaciones se midieron sobre el tramo central de la probeta en una longitud de 180 mm a través de dos comparadores Mitutoyo de precisión 0,001 mm y carrera máxima de 12,5 mm dispuestos simétricamente como se muestra en la Figura 3.21. En la misma Figura se aprecia la rótula y la celda de cargas.



**Figura 3.21:** Vista general del ensayo a compresión paralela a las fibras

Se registraron la carga y la deformación cada 5 kN para 7 escalones de carga. Las lecturas de carga y deformación se realizaron a través de 3 cámaras web, una para cada comparador y una para el lector de la celda de cargas. Se utilizó el software Cerberus para la visualización simultánea en pantalla de las tres cámaras. Con un capturador de pantalla se almacenó la imagen de cada escalón de carga. En la pantalla se mostraba también el tiempo de ensayo. La Figura 3.22 muestra la vista de la pantalla en el momento de la captura de datos.



**Figura 3.22:** Pantalla de la captura de datos para un escalón de cargas

Cuando la carga aplicada alcanzó el 40% de la carga de rotura estimada se retiraron los elementos de medición de deformaciones, sin suspender la aplicación continua de la carga, y se continuó el ensayo hasta la rotura.

A partir de las imágenes almacenadas se cargaron los datos de los ensayos en una planilla de cálculo para su procesamiento.

Para la determinación del módulo de elasticidad ( $E_{c-0}$ ) se seleccionan los datos que presentaron, entre la carga y la deformación, una correlación superior a 0,99.

Para la determinación del módulo de elasticidad en compresión paralela se utilizó la siguiente expresión:

$$E_{c,0} = \frac{l_1(F_2 - F_1)}{A(w_2 - w_1)}$$

$E_{c,0}$	Módulo de elasticidad en compresión paralela, en newton por milímetro cuadrado
$l_1$	Longitud de la base de medida de las deformaciones, en milímetros.
$A$	Área de la sección transversal en milímetros cuadrados.
$F_2 - F_1$	Incremento de carga en la recta de regresión con un coeficiente de correlación superior a 0,99, en newton.
$w_2 - w_1$	Incremento de deformación correspondiente a $F_2 - F_1$ , en milímetros.

### Determinación de la resistencia en compresión paralela las fibras

La preparación de las probetas y el procedimiento de ensayo es el descrito en el punto anterior y se ajusta en todo a las prescripciones de la norma UNE EN 408 (2011). La fuerza máxima se alcanzó en un tiempo entre 180 y 420 segundos.

Para la determinación de la resistencia a la compresión paralela a las fibras  $f_{c-0}$  se utilizó la siguiente expresión:

$$f_{c-0} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A}$$

$f_{c,0}$ :	Resistencia a la compresión paralela, en newton por milímetro cuadrado
$F_{max}$ :	Carga máxima, en newton
$A$ :	Área de la sección transversal en milímetros cuadrados.

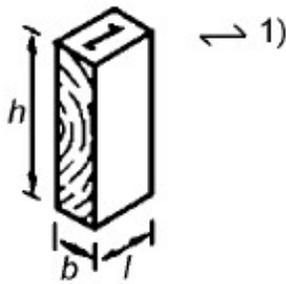
### Determinación del contenido de humedad y densidad aparente de las probetas de compresión paralela a las fibras

Para la determinación del contenido de humedad y densidad aparente de las probetas de compresión paralela a las fibras se utilizó el mismo procedimiento y equipamiento que para las probetas de flexión. Se realizó inmediatamente después de finalizado el ensayo correspondiente sobre un trozo de sección completa y libre de nudos extraído de una zona

cercana a la rotura. Se respetaron los procedimientos descritos en las normas UNE EN 408 (2011), ISO 3131 (1975) e ISO 3130 (1975).

### 3.2.4. Procedimiento para el ensayo de compresión perpendicular a las fibras

La preparación de las probetas y los ensayos se realizaron de acuerdo a las prescripciones de la norma UNE EN 408 (2011). Las probetas se estabilizaron en una cámara a 20°C y 65% de humedad luego se mecanizaron de forma tal de asegurar que sus caras queden planas, paralelas entre sí y perpendiculares al eje de la probeta. Las dimensiones nominales finales fueron:  $b=45$  mm (base),  $l= 70$  mm (largo) y  $h= 90$  mm (altura), tal como lo describe la Figura 3.23.



**Figura 3.23:** Esquema de las dimensiones de la probeta

La carga se aplicó con un equipo hidráulico a una velocidad constante. La fuerza máxima se alcanzó en un lapso entre 180 y 420 segundos. Se aseguró que la probeta estuviera perfectamente centrada con el cilindro de carga y alineada con el mismo. Para posicionar cada probeta se utilizaron dos niveles láser ubicados a 90° entre sí. Entre la celda de carga y el dispositivo de contacto con la probeta se interpuso una rótula. Las cargas se midieron con una celda de cargas de precisión 10 N y carga máxima 20 kN. Las deformaciones se midieron sobre el tramo central de la probeta en una longitud de 60 mm. Se utilizaron dos comparadores Mitutoyo de precisión 0,001 mm y carrera máxima de 12,5 mm dispuestos simétricamente como se muestra en la Figura 3.24



**Figura 3.24:** Ilustración del ensayo en compresión paralela

La lectura simultánea de cargas y deformaciones se realizó a través de un software de adquisición de datos desarrollado entre el Grupo GIDEC (Grupo de Investigación y Desarrollo de Estructuras Civiles) de la Facultad Regional Venado Tuerto y el área de Electrónica y Sistemas del INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial). La medición de deformaciones se realizó con dos comparadores conectados por cable a un multiplexor de 8 entradas, que a su vez se conectó con la PC a través del puerto USB. Para facilitar el lenguaje de comunicación se utilizaron comparadores y multiplexor Mitutoyo. La medición de cargas se realizó con una celda de cargas conectada a un cabezal de lectura con salida RS232, con un cable adaptador se conectó a un puerto USB de la PC. La Figura 3.25 muestra el esquema de conexiones. El software desarrollado permitió la adquisición simultánea de carga y deformaciones para los escalones de carga previamente definidos. Se identificaron todos los equipos utilizados y el reporte se archivó en formato de planilla de datos. El detalle del funcionamiento de este sistema de adquisición de datos fue publicado por Filippetti *et al.* (2016).

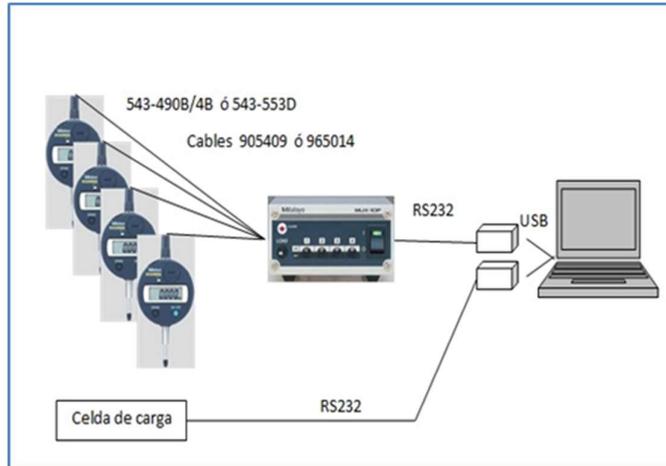


Figura 3.25: Esquema de conexiones del sistema de adquisición de datos.

### Determinación del módulo de elasticidad en compresión perpendicular las fibras

Para la determinación del módulo de elasticidad en compresión perpendicular se trazó para cada probeta el gráfico de carga / deformación ilustrado en la Figura 3.26.

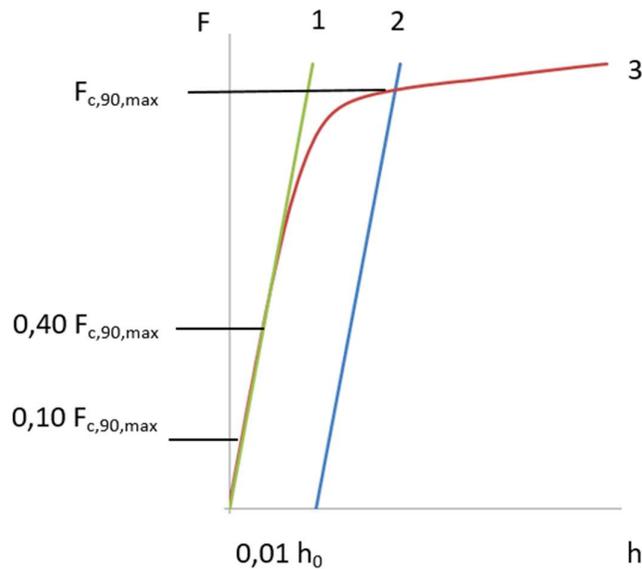


Figura 3.26: Gráfico de carga / deformación en compresión perpendicular

F: carga. h: deformación.  $F_{c,90,max}$ : carga máxima.  $h_0$ : base de medición de las deformaciones. Curva 3: curva carga deformación en el ensayo. Recta 1: recta definida entre los puntos del 10% y el 40% de la carga máxima. Recta 2: recta paralela a la recta 1 a una distancia  $0,01 h_0$

La determinación del valor de la carga máxima ( $F_{c,90,max}$ ) se realizó a través del procedimiento iterativo siguiente: se estimó el valor de la carga máxima, se calculó el 10% y el 40% de ese valor y sus correspondientes deformaciones, se trazó la recta “1” entre los puntos así definidos, a una distancia de  $0,01 h_0$  ( $h_0$ : valor de la base de medición de deformaciones) se trazó la recta “2” paralela a la recta “1”, se obtuvo el punto de intersección con el gráfico de carga / deformación que define el valor de carga determinado como la carga máxima. Si la carga así determinada difería menos de un 5% con el valor de carga máxima estimada se validaba el procedimiento, caso contrario se repetía a partir de una nueva carga estimada.

Una vez determinados los puntos correspondientes al 10% y al 40% de la carga máxima se calculó el módulo de elasticidad en compresión perpendicular a las fibras con la siguiente expresión:

$$E_{c,90} = \frac{(F_{40} - F_{10}) h_0}{(w_{40} - w_{10}) b l}$$

$E_{c,90}$ :	Módulo de elasticidad en compresión perpendicular
$F_{40} - F_{10}$ :	Incremento de carga correspondiente al tramo lineal de la curva carga / deformación correspondiente al 40 % y al 10 % de la carga máxima, en newton
$h_0$ :	Base de medición de las deformaciones en milímetros
$w_{40} - w_{10}$ :	Incremento de la deformación correspondiente al incremento de carga entre $F_{40}$ y $F_{10}$ , en milímetros.
$b$ :	Base de la probeta, en milímetros
$l$ :	Longitud de la probeta, en milímetros

### **Determinación de la resistencia en compresión perpendicular a las fibras**

Con la carga máxima obtenida de acuerdo al procedimiento descrito en el punto anterior se determinó la resistencia a la compresión perpendicular a las fibras con la siguiente expresión:

$$f_{c,90} = \frac{F_{c,90,máx}}{b l}$$

$f_{c,90}$ :	Resistencia a la compresión paralela en newton por milímetro cuadrado.
$F_{c,90,máx}$ :	Fuerza máxima en compresión perpendicular determinado de acuerdo al procedimiento descrito en el punto anterior.
$b$ :	Base de la probeta en milímetros.
$l$ :	Longitud de la probeta en milímetros.

### **Determinación del contenido de humedad y densidad aparente de las probetas de compresión perpendicular a las fibras**

Para la determinación del contenido de humedad y densidad aparente de las probetas de compresión perpendicular a las fibras se utilizó el mismo procedimiento y equipamiento que para las probetas de flexión. Las determinaciones se realizaron sobre la probeta completa. La densidad se determinó inmediatamente antes del ensayo, a partir de mediciones de masa y volumen. El peso seco para la determinación del contenido de humedad se obtuvo después del ensayo. Se respetaron los procedimientos descritos en las normas UNE EN 408 (2011), ISO 3131 (1975) e ISO 3130 (1975).

#### **3.2.5. Procedimiento para el ensayo en tracción paralela a las fibras**

La preparación de las probetas y los ensayos se realizaron de acuerdo a las prescripciones de la norma UNE EN 408 (2011).

Las tablas utilizadas para el ensayo poseían una sección nominal de 25 mm x 100 mm. Se procedió al relevamiento de las singularidades siguiendo el mismo procedimiento que para las piezas en flexión. Se marcaron definiendo una luz libre entre mordazas de 900 mm (9 veces la mayor dimensión de la sección transversal). Las probetas se acondicionaron en el Laboratorio del Grupo GIDEC en Venado Tuerto y se remitieron, envueltas en film estanco, al laboratorio del Grupo GEMA de la Facultad Regional Concepción del Uruguay de la Universidad Tecnológica Nacional donde se depositaron en una cámara a 20°C de temperatura y 65% de humedad hasta el momento del ensayo. Los ensayos se llevaron a cabo con 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. Se ajustó la velocidad de carga para alcanzar la rotura en un tiempo entre 180 y 420 segundos. Para centrar los cuerpos de prueba se utilizó un nivel láser. La Figura 3.27 presenta una probeta en posición de ensayo.



**Figura 3.27:** Ilustración del ensayo en tracción paralela

### **Determinación de la resistencia en tracción paralela a las fibras**

La resistencia a la tracción paralela a las fibras se determinó con la siguiente expresión:

$$f_{t,0} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A}$$

$f_{t,0}$ :	Resistencia a la tracción paralela en newton por milímetro cuadrado.
$F_{m\acute{a}x}$ :	Fuerza máxima en tracción paralela.
$A$ :	Área de la sección transversal probeta en milímetros cuadrados.

### **Determinación del contenido de humedad y densidad aparente de las probetas de tracción paralela a las fibras**

Para la determinación del contenido de humedad y densidad aparente de las probetas de tracción paralela a las fibras se utilizó el mismo procedimiento y equipamiento que para las probetas de flexión, se realizó inmediatamente después de finalizado el ensayo correspondiente sobre un trozo de sección completa y libre de nudos extraído de una zona cercana a la rotura. Se respetaron los procedimientos descritos en las normas UNE EN 408 (2011), ISO 3131 (1975) e ISO 3130 (1975).

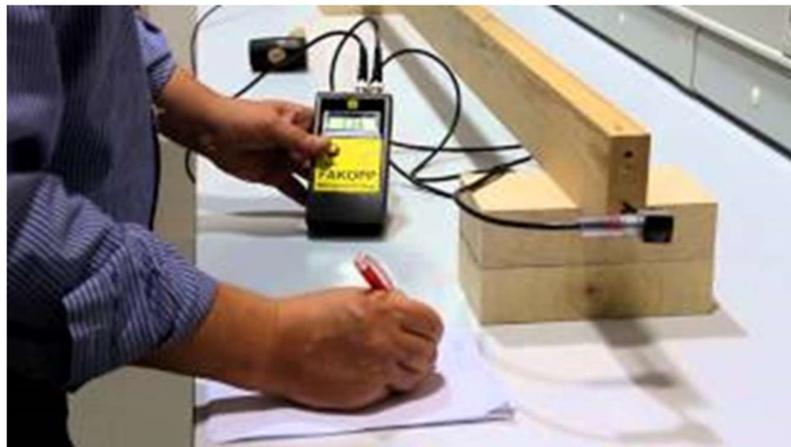
### 3.2.6. Procedimiento para la determinación del módulo de elasticidad dinámico mediante ensayos no destructivos

Previo a los ensayos de flexión se realizaron mediciones para determinar el módulo de elasticidad por medio de ensayos no destructivos sin aplicar solicitaciones a las probetas. Se utilizaron dos métodos: i) Determinación del módulo de elasticidad dinámico longitudinal por ultrasonidos y ii) Determinación del módulo de elasticidad dinámico longitudinal por vibraciones inducidas.

Las mediciones para la determinación del módulo de elasticidad dinámico se realizaron sobre las muestras de flexión 2, 4 y 5 del clon 'Australiano 129/60' y las muestras 7, 9 y 10 del clon 'Stoneville 67'.

#### Módulo de elasticidad dinámico longitudinal por ultrasonidos

La medición de la velocidad de propagación del sonido se realizó con un equipo Fakopp Microsecond Timer. Se efectuaron para cada pieza tres mediciones entre las testas con disposición centrada del sensor. La distancia entre testas se determinó, con una cinta metálica, con precisión de milímetro. La Figura 3.21 muestra el equipo utilizado y uno de los sensores colocado en una de las testas.



**Figura 3.21:** Medición de la velocidad de propagación del sonido con el equipo Fakopp.

El módulo de elasticidad dinámico longitudinal por ultrasonidos se determinó aplicando las siguientes expresiones:

$$E_{din,s} = \rho v^2 \quad \text{donde} \quad v = \frac{l}{t}$$

- $E_{din,s}$  Módulo de elasticidad dinámico determinado por medición de la velocidad de propagación del sonido, en newton por metro cuadrado.
- $\rho$  Densidad en kilogramos por metro cúbico.
- $v$  Velocidad de propagación del sonido en metros por segundo.
- $l$  Distancia entre testas, en metros.
- $t$  Tiempo que tarda la onda, en segundos.

### Módulo de elasticidad dinámico longitudinal por vibraciones inducidas

La determinación se realizó sobre la probeta simplemente apoyada. La excitación se provocó con un golpe de martillo sobre una de las testas y en la otra se ubicó el micrófono. La frecuencia de vibración se determinó con el software FFT Analyzer. La Figura 3.22 muestra una viga en proceso de determinación de la frecuencia de vibración.



Figura 3.22: Medición de la frecuencia de vibración

El módulo de elasticidad dinámico longitudinal por vibraciones inducidas se determinó aplicando las siguientes expresiones:

$$E_{din,v} = \rho v^2 \quad \text{donde} \quad v = 2 l f_r$$

$E_{mdin,s}$	Módulo de elasticidad dinámico determinado por medición de la velocidad de propagación del sonido, en newton por metro cuadrado.
$\rho$	Densidad en kilogramos por metro cúbico.
$v$	Velocidad de propagación del sonido en metros por segundo.
$l$	Distancia entre testas, en metros.
$f_r$	Frecuencia natural de vibración, en Hertz.

### 3.3. ANALISIS ESTADÍSTICO

En este punto se describen los procedimientos estadísticos utilizados en el Capítulo 4 “Presentación y discusión de los resultados” y en el Anexo I “Anexo estadístico de los datos experimentales”.

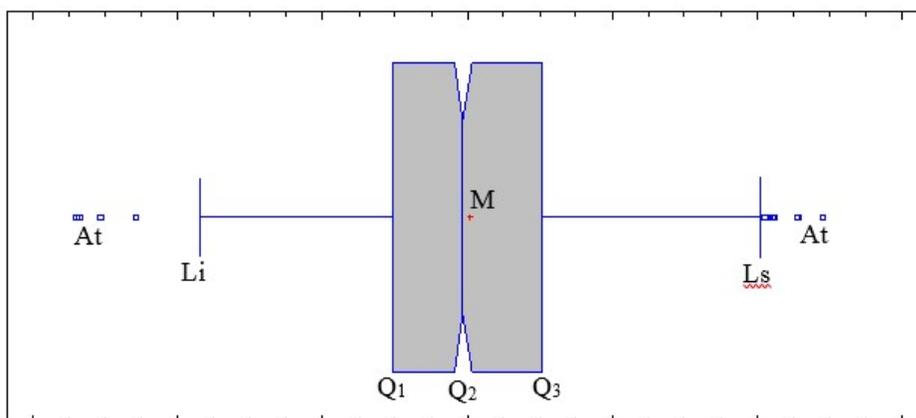
En primer lugar se llevó a cabo el recuento, ordenación y clasificación de los datos. Para ello se determinaron los parámetros estadísticos que permiten caracterizar las distintas variables planteadas y su distribución. Para la presentación se utilizan tablas y gráficos.

No se incorporó toda la información estadística en el Capítulo 4 con el objetivo de no complejizar la lectura de la discusión sobre el tema analizado en cada apartado. Por ello se incorporaron, cuando así correspondía, las referencias para remitirse al Anexo I para ampliar la información estadística.

En las tablas se incorporan de acuerdo a la necesidad los siguientes valores: media, mediana, percentiles 5%, máximos, mínimos, coeficiente de variación, curtosis estandarizada, sesgo estandarizado, coeficientes de regresión y de correlación, entre otros.

Para verificar la hipótesis de normalidad se utilizó, como primeros indicadores, la curtosis estandarizada y el sesgo estandarizado (valores fuera del rango de -2 a +2 indican algo de no normalidad significativa en los datos) y la prueba de chi-cuadrada (valor-P < 0,05 indica que se puede rechazar la idea de que proviene de una distribución normal con 95% de confianza).

La Figura 3.27 presenta la descripción de los parámetros representados en los gráficos de caja y bigotes utilizados para describir las distribuciones.



**Figura 3.27:** Gráfico de caja y bigotes

At: valores atípicos. Li: límite inferior ( $Q_1 - 1,5 \text{ IQR}$ ). Ls: Límite superior ( $Q_3 + 1,5 \text{ IQR}$ ). Q1: Primer cuartil (25%). Q2: Segundo cuartil (Mediana) (50%). Q3: Tercer cuartil (75%). IQR=  $Q_3 - Q_1$  (rango intercuartílico). M: Valor medio (+).

En todos los casos, se trabajó con la Hipótesis Nula de igualdad de medias y/o medianas, con un nivel de confianza del 95% y con un valor de probabilidad (valor-P) de 0,05%, por debajo del cual se rechaza dicha hipótesis nula de igualdad, aceptando la hipótesis alternativa de desigualdad de medias y/o medianas.

Cuando se incumplió la exigencia de normalidad se utilizó el test no paramétrico de Kruskal Wallis que compara las medianas. Un valor-P  $< 0,05$  indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza.

Para la comparación entre los valores medios de varias muestras se utilizaron pruebas de rangos múltiples para determinar cuáles son significativamente diferentes de otros. El método empleado para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente cuando la diferencia real es igual a 0. Se identifican como grupos homogéneos a aquellos que no poseen diferencias estadísticamente significativas. En las tablas presentadas se consideran grupos homogéneos a aquellos que comparten una letra “X” en la misma columna.

Para relacionar variables entre sí se trabajó con modelos de regresión lineal simple y/o múltiple. Se determinó en cada caso el coeficiente de correlación de Pearson (R), el coeficiente

de determinación ( $R^2$ ) y el valor-P en la tabla ANOVA. Los valores del coeficiente de correlación (R) varían entre +1 y -1, valores entre 0 y 0,20 indican una correlación muy débil, entre 0,20 y 0,40 débil, entre 0,40 y 0,70 moderada, entre 0,70 y 0,90 fuerte y entre 0,90 y uno muy fuerte. Un coeficiente de correlación negativo indica que mientras una variable crece la otra decrece. Un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) menor al 4% indica un ajuste muy débil, entre el 4% y el 16% débil, entre el 16% y el 49% moderado, entre el 49% y el 81% fuerte y más del 81% muy fuerte. El coeficiente de correlación (R) está asociado a un valor-P que prueba la significancia estadística de las correlaciones, un valor-P  $< 0,05$  indica correlaciones estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%.

## 4. RESULTADOS

---

---

### 4.1. CLASIFICACIÓN VISUAL POR RESISTENCIA

Ya se ha descrito la madera como un material con propiedades muy variables, afectadas no solo por la especie y el lugar de cultivo, sino también por las singularidades, los procesos de producción e incluso las dimensiones de la pieza. Tal como se expresó en el Capítulo 1, hasta la fecha se han estudiado en nuestro país sólo parcialmente las propiedades mecánicas del *Populus deltoides* del delta del río Paraná y se ha adoptado un método visual de clasificación por resistencia aplicable a las tablas de ese material destinadas a la fabricación de madera laminada encolada estructural o a ser sometidas a flexión “de plano” (IRAM 9662-4 2015).

En este apartado se presenta el desarrollo del proceso orientado a ampliar la información actualmente disponible sobre el comportamiento estructural de las tablas y extender la utilización del material a piezas con secciones transversales de mayores dimensiones, tales como vigas, entre otras.

#### 4.1.1. Análisis de las singularidades de apreciación visual

Con el propósito de conocer la calidad del material en forma general para el análisis de las singularidades se tuvieron en cuenta los antecedentes disponibles en el país que fueron recientemente incorporados a la norma IRAM 9662-4 (2015). Las singularidades de mayor significación para la clasificación por resistencia y el consecuente aprovechamiento del material, tales como el ataque biológico, la nudosidad y la presencia de médula, fueron relevadas y registradas sobre las piezas completas (tablas y vigas) antes de preparar los cuerpos de prueba (Ver el apartado 3.1 del Programa Experimental). Las restantes fueron registradas sobre los cuerpos de prueba en forma previa a los ensayos estáticos.

Considerando que el ataque del insecto *Megaplatypus mutatus* se ha constituido en uno de los parámetros más importantes para clasificar por resistencia este material, pues es causa de rechazo de la pieza que lo contiene según la normativa vigente en Argentina (IRAM 9662-4 2015), se decidió ubicar su análisis en el primer lugar de este apartado.

#### Ataque biológico

La ausencia de lineamientos preexistentes para evaluar la magnitud del ataque del insecto *Megaplatypus mutatus*, la pérdida en la calidad de la madera (Giménez 2009) y la influencia negativa en el comportamiento elasto-plástico del material (Spavento 2014), motivaron la adopción de un criterio que permite identificar la intensidad del ataque mencionado. Este análisis particular, que es congruente con los objetivos del presente estudio, condujo a definir cuatro grados de ataque, los que fueron ya descriptos en el Capítulo 3 y se reiteran a continuación para facilitar la comprensión de los resultados discutidos en este capítulo: Grado 1 (sin ataque): la pieza se encuentra libre de signos externos que indiquen afectación; Grado 2 (ataque leve): la pieza presenta no más de dos orificios en una misma sección; Grado 3 (ataque severo): la pieza presenta más de dos orificios en una misma sección y, Grado 4 (zona de colapso): al ser ensayada la pieza rompe en la zona afectada por el ataque biológico.

En la Tabla 4.1 se presentan los resultados de la aplicación del criterio mencionado a las piezas con las cuales luego se prepararon los cuerpos de prueba destinados a los ensayos estáticos. En consecuencia, el material clasificado fue asignado en esta primera instancia

solamente a los tres grados iniciales (Grados 1, 2 y 3). Los resultados finales del análisis, llevado a cabo después de ejecutar los ensayos mecánicos y físicos, se presentan más adelante en el Apartado 4.1.2 donde se indica la cantidad de roturas en la zona afectada por el insecto, alcanzando el Grado 4 a partir del 2 o el 3. La información de la Tabla 4.1 se presenta separadamente por clon y para las tablas (piezas de 25 mm x 100 mm x 2200 mm de las que se extrajeron las muestras 1 y 6) y las vigas (muestras 2 a 5 y 7 a 10).

**Tabla 4.1:** Clasificación inicial del material según la intensidad del ataque del insecto *Megaplatypus mutatus*

Clon	Elemento	n	Intensidad del ataque					
			Grado 1		Grado 2		Grado 3	
			n	%	n	%	n	%
A	Tablas	172	51	(30)	55	(32)	66	(38)
	Vigas	232	82	(35)	45	(19)	105	(45)
	Ambas	404	133	(33)	100	(25)	171	(42)
S	Tablas	124	53	(43)	55	(44)	16	(13)
	Vigas	211	86	(41)	62	(29)	63	(30)
	Ambas	335	139	(41)	117	(35)	79	(24)
Ambos	Tablas	296	104	(35)	110	(37)	82	(28)
	Vigas	443	168	(38)	107	(24)	168	(38)
	Ambas	739	272	(37)	217	(29)	250	(34)

n: número de piezas. "A": clon "Australiano 129/60". "S": clon "Stoneville 67".

La información provista en la Tabla 4.1 permite apreciar, para el clon 'Stoneville 67', un mayor porcentaje de piezas libres de ataque (41% en el Grado 1) y a su vez un menor porcentaje en el grado con las mayores afectaciones (24% en Grado 3) en comparación con el 'Australiano 129/60', cuyos respectivos porcentajes son 33% y 42%. La información precedente indica una mejor performance del material procedente del clon 'Stoneville 67', no obstante presentar un mayor porcentaje de piezas con afectaciones leves (35% en el Grado 2) que el 'Australiano 129/60' (25%).

La importante presencia de este tipo de daño biológico, producido en el árbol previamente a su apeo y característico del material analizado, emerge claramente del contenido de la tabla mencionada; ya que solamente 272 piezas (37%) de las 739 analizadas fueron encontradas libres de ataque. Considerando que la norma IRAM 9662-4 (2015) no admite la presencia de orificios producidos por insectos cuando este material es destinado al uso estructural, de los datos obtenidos surge claramente el daño económico que implica descartar las piezas asignadas a los grados de ataque 2 y 3; que en este caso alcanzan el 63% del total. A su vez, estos resultados confirman la conveniencia de estudiar detalladamente el impacto de los grados de ataque ya definidos sobre el comportamiento mecánico, el cual es actualmente desconocido y, la razón por la cual la norma mencionada no acepta el uso de piezas con orificios producidos por insectos, cualquiera sea su dimensión.

En contraposición a estos resultados, para tres de los principales recursos forestales del país la existencia de este tipo de daño biológico ha sido descartada a los fines prácticos. Fank (2018) informa que no se encontraron afecciones biológicas en un estudio llevado a cabo sobre 5 muestras, conteniendo un total de 458 cuerpos de prueba con tamaño estructural, de *Pinus taeda* y *elliottii* proveniente de la provincia de Misiones. Piter *et al.* (2004) prácticamente no encontraron signos de ataque de insectos en una investigación desarrollada sobre 349 cuerpos de prueba con tamaño estructural usual de *Eucalyptus grandis* cultivado en las provincias de Entre Ríos y Corrientes. Guillaumet *et al.* (2007) sobre 256 vigas de *Araucaria angustifolia* provenientes de bosques implantados en la provincia de Misiones no reporta afectación de insectos.

### **Presencia de médula**

En la Tabla 4.2 se presentan los resultados del relevamiento de la presencia de médula. Considerando que las dimensiones de la sección transversal están sujetas a un esquema de aserrado que puede tener influencia sobre la presencia de esta singularidad, y que la intención es presentar la información representativa de material y su proceso de producción, la evaluación se realiza sobre las piezas separadas por clon y por muestra.

Se puede apreciar que un 30% de las piezas exhibió médula, con una menor presencia en el clon 'Australiano 129/60', en el cual alcanzó el 21% de las piezas. Se debe notar que en

la muestra 2 solo presentó médula el 7% de las piezas mientras que en la muestra 9 ese porcentaje ascendió al 69%. En el clon 'Australiano 129/60' el porcentaje de piezas con médula muestra una tendencia creciente con el aumento de la sección transversal, mientras que para el clon 'Stoneville 67' no se aprecia una tendencia clara entre las variables.

**Tabla 4.2:** Detalle de piezas con presencia de médula

Clon	Muestra	n	Médula			
			sí		no	
			n	%	n	%
A	Tablas	172	25	(15)	147	(85)
	2	56	4	(7)	52	(93)
	3	66	18	(27)	48	(73)
	4	56	16	(29)	40	(71)
	5	54	20	(37)	34	(63)
	Subtotal	404	83	(21)	321	(79)
S	Tablas	124	45	(36)	79	(64)
	7	52	22	(42)	30	(58)
	8	52	15	(29)	37	(71)
	9	55	38	(69)	17	(31)
	10	52	18	(35)	34	(65)
	Subtotal	335	138	(41)	197	(59)
TOTALES		739	221	(30)	518	(70)

“A”: clon 'Australiano 129/60'. “S”: clon 'Stoneville 67'.

Para el *Eucalyptus grandis* cultivado en las provincias de Entre Ríos y Corrientes se encontró, sobre 349 cuerpos de prueba con tamaño estructural usual, que un 36% presentaba médula y que aumentaba la presencia en las secciones de mayor escuadría (Piter 2003). Para el *Pinus taeda y elliottii*, proveniente de la provincia de Misiones, sobre 458 cuerpos de prueba Fank (2018) reportó un porcentaje de piezas con médula del mismo orden (33%), con una mayor presencia en las piezas de mayores dimensiones. Para la *Araucaria angustifolia* de la provincia de Misiones se reportó un considerable aumento en piezas con presencia de médula, un 62% de

las 256 vigas ensayadas (Guillaumet *et al.* 2007). En todos los casos el porcentaje de piezas con médula es superior al encontrado en las piezas de *Populus* de este trabajo.

### **Nudosidad**

Para efectuar el análisis de la nudosidad presente en cada pieza se identificó el nudo mayor de cada una y se lo ponderó de acuerdo al criterio “K” definido previamente en el capítulo 3 (porcentaje que ocupa el nudo en la cara donde se manifiesta). Se optó por utilizar este criterio para todas las piezas, dado que es el adoptado por las normas IRAM 9662-1/2/3/4 (2015) para tablas y para la clasificación de piezas de mayor escuadría de *Eucalyptus grandis* y *Araucaria angustifolia* (INTI CIRSOC 601 2016a). Para las muestras de mayor escuadría (50 mm x 100 mm y 50 mm x 150 mm) de ambos clones, se analiza más adelante también la nudosidad medida sobre la sección transversal, definida en capítulo 3 como “KAR”, “KARMS”, “KARMi” y “KARM”.

Para evaluar la nudosidad “K” se definieron seis segmentos, cada uno ellos con límite en los múltiplos de 1/6, para asociar la cantidad de piezas cuyo nudo mayor cumple con el rango. En la Tabla 4.3 se detalla la cantidad de piezas que calificaron en cada rango y el porcentaje que representa sobre el total de cada muestra. La información se presenta dividida por clon y por muestra, sobre la base de las mismas consideraciones expresadas en el relevamiento de la presencia de la médula.

Para facilitar el análisis, se presenta en la Figura 4.1 el detalle de las piezas acumuladas en cada segmento de nudosidad, en porcentaje y divididas por clon. Se puede apreciar que el clon ‘Australiano 129/60’ presenta un mayor número de piezas de nudosidad menor al 0,33 que el clon ‘Stoneville 67’ (47% versus el 41%). Se observa también que éste último presenta un menor número de piezas con nudosidad superior al 0,66 (6% versus el 10%). El análisis en conjunto nos muestra que el 45% de las piezas presenta una nudosidad inferior al 0,33 y que solo el 8% supera el 0,66. Estos valores muestran una nudosidad inferior a la publicada para la *Araucaria angustifolia* donde se reportó que un 26% de las vigas presentaban una nudosidad inferior al 0,33 y un 16% superaba una nudosidad del 0,66 (Guillaumet *et al.* 2007).

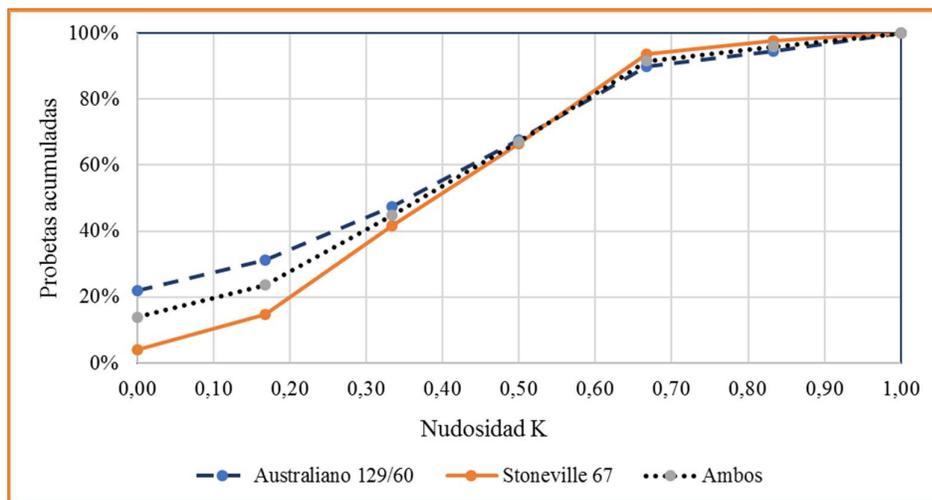
No se observa una relación entre el porcentaje de piezas que califica en cada uno de los segmentos de nudosidad y las dimensiones de la sección transversal. Esto está en línea con lo reportado por Piter (2003) para el *Eucalyptus grandis*, en contraposición, para el *Pinus taeda*

y *elliottii* proveniente de la provincia de Misiones, Fank (2018) reportó un aumento del valor medio de nudosidad “K” con el incremento de escuadría de las piezas.

**Tabla 4.3:** Piezas agrupadas por su nudosidad (K)

Clon	Muestra	n	Nudo mayor de la pieza (desde / hasta)											
			0,167 / 0,167		0,167 / 0,333		0,333 / 0,500		0,500 / 0,667		0,667 / 0,833		0,833 / 1,000	
			n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
A	Tablas	172	42	(24)	15	(9)	37	(22)	72	(42)	3	(2)	3	(2)
	2	56	28	(50)	8	(14)	7	(13)	4	(7)	7	(13)	2	(4)
	3	66	13	(20)	15	(23)	15	(23)	6	(9)	3	(5)	14	(21)
	4	56	21	(38)	8	(14)	15	(27)	5	(9)	4	(7)	3	(5)
	5	54	22	(41)	19	(35)	8	(15)	3	(6)	2	(4)	0	(0)
	Subtotal	404	126	(31)	65	(16)	82	(20)	90	(22)	19	(5)	22	(5)
S	Tablas	124	16	(13)	11	(9)	32	(26)	65	(52)	0	(0)	0	(0)
	7	52	9	(17)	15	(29)	12	(23)	10	(19)	4	(8)	2	(4)
	8	52	16	(31)	18	(35)	10	(19)	5	(10)	1	(2)	2	(4)
	9	55	5	(9)	17	(31)	23	(42)	7	(13)	2	(4)	1	(2)
	10	52	3	(6)	29	(56)	7	(13)	4	(8)	6	(1)	3	(6)
	Subtotal	335	49	(15)	90	(30)	84	(25)	91	(27)	13	(4)	8	(2)
TOTAL		739	175	(24)	155	(23)	166	(22)	18	(24)	32	(4)	30	(4)

En cada columna se indica en número de piezas y el porcentaje sobre el total de cada muestra. “A”: clon ‘Australiano 129/60’. “S”: clon ‘Stoneville 67’.



**Figura 4.1:** Piezas por su nudosidad (K)

Las piezas de clon 'Australiano 129/60' presentaron un valor medio de la nudosidad  $K=0,36$ , mientras que el 'Stoneville 67' alcanzó un valor medio de  $K=0,40$ . Habiendo resultado un valor- $P < 0,05$  en la prueba de Kruskal-Wallis, se puede afirmar que las medianas de las dos poblaciones son significativamente distintas con un nivel de confianza del 95%. (Anexo I, punto I.4.1.1 – Nudosidad). Para el conjunto de todas las muestras se alcanzó un valor medio de nudosidad  $K=0,38$ .

Tal como se expresó precedentemente, sobre las muestras de mayor escuadría de ambos clones (Muestras 4, 5, 9 y 10), se profundizó el estudio de la nudosidad incorporando la evaluación, no solo sobre las caras laterales, sino también sobre la sección transversal. Estos estudios fundamentan su desarrollo en que la sección transversal es la que resiste el esfuerzo de flexión y los nudos pueden considerarse, en muchos casos, como si se trataran de un agujero en la madera (Vignote Peña *et al.* 2002, Guillaumet *et al.* 2008). De acuerdo a lo expresado resulta de interés, especialmente en las piezas de mayor escuadría, conocer la dimensión y posición de los nudos en la sección. Esto está en línea con estudios realizados para el *Eucalyptus grandis* por Piter (2002) y para el *Pinus taeda* y *elliottii*, por Fank (2018). En la Tabla 4.4 se presentan los valores correspondientes a la evaluación de la nudosidad sobre las muestras 4, 5, 9 y 10, se consideraron los criterios "K", "KAR", "KARM", "KARMS" y "KARMI" descritos en el capítulo 3.

Tal como ocurrió con la totalidad de las muestras, en la evaluación de las de mayor escuadría (muestras 4, 5, 9 y 10), el clon 'Stoneville 67' presentó una nudosidad mayor que la del clon 'Australiano 129/60' para todos los criterios de evaluación. Para las muestras 4 y 5 del clon 'Australiano 129/60' se observó una nudosidad  $K$  menor que la obtenida en el análisis de las muestras 1 a 5 ( $K=0,36$  versus  $K=0,27$ ); mientras que en el clon 'Stoneville 67' los valores de nudosidad  $K$  obtenidos en el análisis de las muestras 9 y 10 resultó similar al hallado en las muestras 6 a 10 ( $K=0,40$  versus  $K=0,39$ ).

Piter (2003) reportó para el *Eucalyptus grandis*, valores de nudosidad "K" y "KAR" superiores a los que presentaron ambos clones en conjunto, 0,37 y 0,151, respectivamente. Fank (2018) para el *Pinus taeda* y *elliottii* publicó valores aún mayores, 0,40 y 0,27 para ambos criterios de nudosidad, respectivamente.

**Tabla 4.4:** Nudosidad en las muestras 4, 5, 9 y 10

Clon	Nudosidad	Mínimo	Medio	Máximo	Mediana	n
A	K	0	0,27	1,00	0,24	110
	KAR	0	0,08	0,55	0,03	110
	KARM	0	0,0	0,55	0,01	110
	KARMS	0	0,04	0,86	0,00	110
	KARMI	0	0,14	0,92	0,00	110
S	K	0	0,39	1,00	0,32	107
	KAR	0	0,17	0,67	0,14	107
	KARM	0	0,17	0,65	0,13	107
	KARMS	0	0,07	0,18	0,00	107
	KARMI	0	0,26	0,95	0,19	107
Ambos	K	0	0,33	1,00	0,30	217
	KAR	0	0,13	0,67	0,09	217
	KARM	0	0,23	0,65	0,07	217
	KARMS	0	0,06	0,92	0,000	217
	KARMI	0	0,20	0,95	0,008	217

En el Capítulo 3 se explican en detalle los 5 criterios para evaluar la nudosidad.

### Inclinación de las fibras

La inclinación de las fibras se midió sobre los cuerpos de prueba preparados para ensayar en flexión, que alcanzaron un total de 889 (Tabla 3.2). La Tabla 4.5 muestra los principales resultados encontrados para cada clon y para el conjunto. Se puede apreciar que ambos clones presentan un valor medio de inclinación de las fibras muy similar, con coeficientes de variación que indican una elevada dispersión de valores. Habiendo resultado un valor- $P > 0,05$  en la prueba de Kruskal-Wallis, se puede afirmar que las medianas de las dos poblaciones son significativamente iguales con un nivel de confianza del 95%. (Anexo I, punto I.4.1.1 – Inclinación de las fibras).

**Tabla 4.5:** Principales resultados de la inclinación de las fibras

Clon	Mínimo mm/mm	Medio mm/mm	Máximo mm/mm	Mediana	COV %	n
A	1/1000	1/20	1/9	1/24	63	528
S	1/500	1/22	1/10	1/23	44	361
Ambos	1/1000	1/21	1/9	1/23	57	889

COV: coeficiente de variación, n: número de piezas. “A”: clon ‘Australiano 129/60’. “S”: clon ‘Stoneville 67’

Se debe destacar que ninguna probeta superó el valor máximo establecido en la norma IRAM 9662-4 (2015), que establece 1/9, mientras que el 21% de las mismas presentó una inclinación superior a 1/14; límite considerado para las clases de mayor calidad en normas de relevancia internacional (DIN 4074-1 2012). Para el *Eucalyptus grandis*, Piter (2003) reporta un 7% de los cuerpos con una inclinación superior a 1/14 y un 0,2% superando 1/9. Fank (2018), para el *Pinus taeda* y *elliottii*, informa que solo 2% de las probetas superó una inclinación de 1/14. En la misma línea, Guillaumet *et al.* (2007) reportan inclinaciones no significativas en 256 vigas de *Araucaria angustifolia*.

### Anillos de crecimiento

Ya se explicó previamente la imposibilidad de distinguir a simple vista los anillos de crecimiento y que solo mojando las testas con alcohol se pudieron medir sobre 658 probetas de flexión. La Tabla 4.6 presenta los valores de los espesores medios de los anillos de crecimiento (coeficiente de crecimiento), para cada uno de los clones. Se puede apreciar, que el ‘Australiano 129/60’, presenta un valor medio de anillo de crecimiento inferior al observado en el ‘Stoneville 67’; pero a su vez presenta un coeficiente de variación mucho mayor. Habiendo resultado en la prueba de Kruskal-Wallis un valor-P < 0,05, se puede afirmar que las medianas de las dos poblaciones son significativamente distintas con un nivel de confianza del 95%. (Anexo I, punto I.4.1.1 – Anillos de crecimiento).

**Tabla 4.6:** Espesor medio de los anillos de crecimiento

Clon	Mínimo mm	Medio mm	Máximo mm	Mediana mm	COV %	n
A	4	13	39	12	43	404
S	5	16	28	15	26	254
Ambos	4	14	39	14	37	658

P-5%: percentil del 5%, DE: desvío estándar, COV: coeficiente de variación, n: número de piezas. "A": clon 'Australiano 129/60'. "S": clon 'Stoneville 67'

Las normas DIN 4074-5 (2003), IRAM 9662-4 (2015) y UNE EN 56544 (1997) no contemplan una limitación de los anillos de crecimiento para el *Populus*. La norma NF B50-001 (2007) establece límites de 14 mm y 16 mm para las dos calidades definidas en la misma. Fank (2018) reportó para *Pinus taeda* y *elliottii*, un valor medio de 13,7 mm; similar al encontrado en las muestras analizadas en este trabajo.

### Otras singularidades

No se detectaron fisuras pasantes y no pasantes cuyo largo excediera la longitud admitida por las normas IRAM 9662-4 (2015) y UNE EN 14081 (2016). Tampoco se registraron otros tipos de defectos afectando la sección transversal o la geometría de las piezas fuera de los límites de la normativa referida anteriormente.

#### 4.1.2. Propiedades físico-mecánicas y su relación con las singularidades

En este apartado se presentan los valores representativos de las propiedades mecánicas y físicas del material, y se discute la influencia que las singularidades ejercen sobre los mismos. Teniendo en cuenta que la presencia del ataque biológico producido por el insecto *Megaplatypus mutatus* es causal de rechazo de la pieza que lo contiene en la normativa vigente (IRAM 9662-4 2015), se examina en primer lugar la relación entre esta singularidad y las

propiedades mecánicas en flexión. De este análisis emerge un criterio fundado que permite evaluar la magnitud que no debe superar la afección de una pieza para justificar su aceptación. Posteriormente, el estudio de la influencia de las restantes singularidades sobre las propiedades se lleva a cabo sobre las piezas que no rompieron por causa de afecciones biológicas.

### **Impacto del ataque biológico sobre la resistencia y la rigidez en flexión**

La relación entre la intensidad del ataque del insecto *Megaplatypus mutatus* (evaluado según los cuatro grados ya definidos) y las propiedades mecánicas en flexión fue estudiada sobre las muestras integradas por vigas (muestras 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9 y 10). Con ese propósito se clasificaron nuevamente las 443 vigas (ver también la Tabla 4.1) pero en este caso considerando el grado de afectación existente en el tercio central, es decir, en la zona sometida a un esfuerzo de flexión máximo y con valor constante que permite evaluar adecuadamente la influencia del defecto sobre el comportamiento mecánico.

La Tabla 4.7 incluye un total de 182 vigas que antes de ser ensayadas presentaron ataque (Grado 2 o Grado 3) en el tercio central y una que luego alcanzó la rotura en una zona afectada fuera del mismo. Es de destacar que en esta tabla no se incluyen, por no ser de interés para el análisis, 260 (59%) del total de 443 vigas que no evidenciaron ataque en el tercio central (asignadas al Grado 1) y que no rompieron en una zona afectada por el insecto cualquiera sea la ubicación de éste.

La información exhibida en la Tabla 4.7 y la Figura 4.2 muestra que:

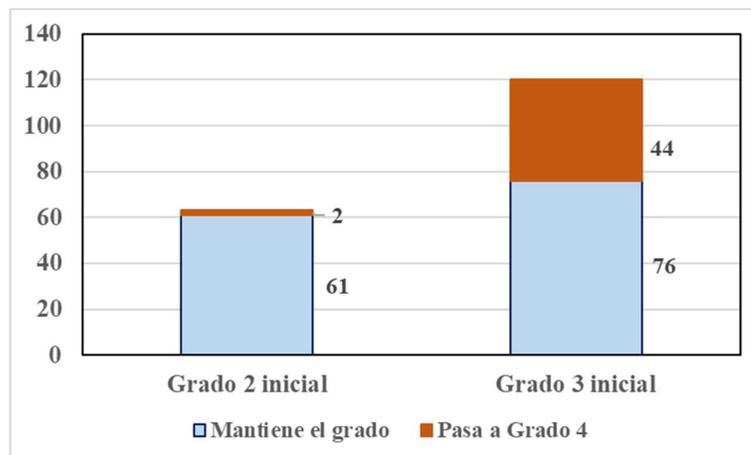
- i. 2 (3%) de las 63 vigas con afección Grado 2 experimentaron la rotura en la zona del ataque y en consecuencia fueron luego asignadas al Grado 4.
- ii. 44 (37%) de las 120 con afección Grado 3 experimentaron la rotura en la zona del ataque (también asignadas al Grado 4 luego del ensayo).
- iii. El porcentaje de roturas causadas por la afección fue similar en ambos clones. En el Grado 3 alcanzó 35% y 39% para el 'Australiano 129/60' y el 'Stoneville 67', respectivamente.

**Tabla 4.7:** Cantidad de vigas con ataque biológico en el tercio central<sup>(2)</sup> con indicación de las que rompieron en la zona afectada durante el ensayo

Grado de Ataque biológico	Clon	Cantidad de Vigas		
		Antes del ensayo	Después del ensayo	Rompieron en la zona afectada <sup>(1)</sup>
2	A	29	29	0
	S	34	32	2
	Ambos	63	61	2
3	A	74	48	26
	S	46 <sup>(2)</sup>	28	18 <sup>(2)</sup>
	Ambos	120 <sup>(2)</sup>	76	44 <sup>(2)</sup>

“A”: clon ‘Australiano 129/60’; “S”: clon ‘Stoneville 67’; <sup>(1)</sup>: asignadas al Grado 4; <sup>(2)</sup> incluye una viga que rompió en la zona afectada ubicada fuera del tercio central

Dado que el estudio se llevó a cabo sobre el sector de las vigas sometidas a los mayores esfuerzos, estos resultados evidencian que, si bien no es posible conocer con precisión la disminución de sección transversal que produce el ataque de este insecto, el impacto de un ataque definido como de Grado 2 fue, en este caso, significativamente menor al que produjo uno de Grado 3. La Figura 4.2 permite apreciar con claridad la proporción de piezas con ataque biológico Grado 2 inicial y Grado 3 inicial (antes del ensayo) que rompieron en la zona afectada, pasando por lo tanto a Grado 4 de ataque.



**Figura 4.2:** Cantidad de vigas con Grado de ataque biológico inicial 2 y 3 que rompieron en la zona afectada por los insectos

La Figura 4.3 (ver también Figura 3.2) exhibe tres secciones de rotura afectadas por el ataque biológico (a la izquierda Grado 2; al centro y la derecha Grado 3). La misma completa y provee información que respalda la adopción del criterio diseñado en este estudio para cuantificar el impacto de la afección sobre el comportamiento mecánico, esencialmente los de Grado 2 y Grado 3, que son advertidos en un proceso de clasificación visual o en la revisión de una estructura en servicio. En efecto, si bien como ya se mencionó no es posible conocer con precisión la disminución del área de la sección transversal que produce el ataque, se advierte que su magnitud está relacionada a la cantidad de orificios producidos en una misma sección, o en secciones muy próximas, que en este estudio implican una separación menor a 50 mm según el eje de la pieza (ver el Capítulo 3). La diferencia adoptada entre un ataque Grado 2 (un máximo de dos orificios en la sección) y uno Grado 3 es congruente con los resultados exhibidos en la Tabla 4.7 que, como se mencionó más arriba, indican que un 3% y un 37% de las vigas asignadas a esos grados, respectivamente, rompieron en una afección.



**Figura 4.3:** Secciones de rotura afectadas por ataque del insecto *Megaplatypus mutatus*, a la izquierda grado 2; al centro y la derecha grado 3

Adicionalmente a la información exhibida en la Tabla 4.7, resulta de interés conocer y analizar los valores de la tensión con la que alcanzaron la rotura las vigas asignadas a los cuatro grados de ataque según su afección en el tercio central. Con ese propósito, se presentan en la Tabla 4.8 los resultados de los ensayos expresados por su valor medio ( $f_m$ ) y su coeficiente de variación (COV).

En la Tabla 4.8, se incluyeron además de todas las vigas asignadas a los grados 2, 3 y 4 después del ensayo (Tabla 4.7) las 260 vigas que no exhibieron ataque en el tercio central y, en consecuencia, fueron asignadas al Grado 1. Con el fin de evaluar otras posibles influencias

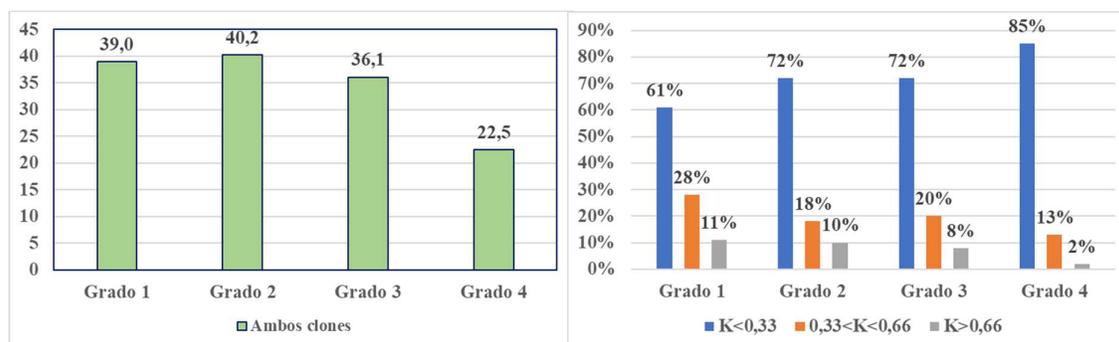
en la variación de la tensión de rotura obtenida para cada grado de ataque de insectos, en esta tabla se presentan los valores hallados para los dos parámetros más significativos, dimensión de la nudos y presencia de médula, que utiliza la norma vigente de clasificación visual de tablas de *Populus* (IRAM 9662-4 2015).

**Tabla 4.8:** Tensión de rotura de las vigas en función del grado de ataque en el tercio central

Grado de ataque biológico	Parámetro	Unidad	Clon		
			A	S	Ambos
1	$f_m$	N/mm <sup>2</sup>	37,4	40,6	39,0
	COV	%	24	28	27
	K<0,33	n (%)	80 (62%)	79 (60%)	159 (61%)
	0,33<K<0,66	n (%)	30 (23%)	43 (33%)	73 (28%)
	K>0,66	n (%)	19 (15%)	9 (7%)	28 (11%)
	Sin médula	n (%)	89 (69%)	69 (53%)	158 (61%)
	Cantidad de vigas	n	129	131	260
2	$f_m$	N/mm <sup>2</sup>	39,2	41,3	40,2
	COV	%	19	26	23
	K<0,33	n (%)	20 (69%)	24 (76%)	44 (72%)
	0,33<K<0,66	n (%)	7 (24%)	4 (12%)	11 (18%)
	K>0,66	n (%)	2 (7%)	4 (12%)	6 (10%)
	Sin médula	n (%)	23 (79%)	22 (69%)	45 (74%)
	Cantidad de vigas	n	29	32	61
3	$f_m$	N/mm <sup>2</sup>	36,7	35,1	36,1
	COV	%	24	29	26
	K<0,33	n (%)	37 (77%)	18 (64%)	55 (72%)
	0,33<K<0,66	n (%)	7 (15%)	8 (29%)	15 (20%)
	K>0,66	n (%)	4 (8%)	2 (7%)	6 (8%)
	Sin médula	n (%)	43 (90%)	16 (57%)	59 (75%)
	Cantidad de vigas	n	48	28	76
4	$f_m$	N/mm <sup>2</sup>	22,2	23,1	22,5
	COV	%	26	27	26
	K<0,33	n (%)	24 (92%)	14 (74%)	38 (85%)
	0,33<K<0,66	n (%)	1 (4%)	5 (26%)	6 (13%)
	K>0,66	n (%)	1 (4%)	0 (0%)	1 (2%)
	Sin médula	n (%)	19 (73%)	11 (58%)	30 (67%)
	Cantidad de vigas	n	26	20*	46*

$f_m$ : valor medio de la tensión de rotura en flexión. **K**: Relación de la dimensión del nudo mayor o grupo de nudos, medido entre líneas tangentes a él y paralelas al eje longitudinal de la probeta, y la dimensión de la cara donde se manifiesta, en los nudos de arista se considera la menor de las dos relaciones. \*Incluye una pieza con ataque biológico fuera del tercio central, pero que rompió en esa sección

La Figura 4.4 permite visualizar los valores de la Tabla 4.8 y facilita el análisis. A la izquierda se indican los valores medios de las tensiones de rotura para cada grado de ataque, se aprecia una leve disminución en el Grado 3 y un muy marcado descenso en el Grado 4. A la derecha se indica la nudosidad “K” que presentaron las vigas en cada grado dividida en tres segmentos, se aprecia que en las piezas con ataque biológico (Grados 2, 3 y 4) el porcentaje de las mismas con nudosidad  $K < 1/3$  resultó superior al hallado en las piezas Grado 1 (sin ataque); se observa también que las piezas con Grado 1 de afectación presentaron la mayor proporción de piezas con nudosidad  $K > 2/3$ .



**Figura 4.4:** Tensión de rotura y porcentaje de vigas por segmento de nudosidad K en el tercio central en función del grado de ataque biológico

A la izquierda tensión de rotura en función del grado de ataque biológico. A la derecha porcentaje de vigas que clasifican en cada uno de los tres segmentos de nudosidad K definidos y por grado de ataque biológico

Tomando como referencia para el análisis a los resultados obtenidos para el Grado 1 (libre de afección), la observación de los resultados exhibidos en la Tabla 4.8 y la Figura 4.4 se pone de manifiesto:

- i. Una elevada similitud entre los valores medios de la tensión de rotura ( $f_m$ ) determinados para el Grado 1 y el Grado 2. La misma se advierte tanto para los clones individualmente como para el conjunto. Esa destacada similitud puede señalarse también para los coeficientes de variación (COV) que, salvo para el Grado 2 del clon ‘Australiano 129/60’ (19%), oscilan entre 23% y 28%.
- ii. Una moderada reducción de  $f_m$  para el Grado 3 en relación al Grado 1, que alcanza 2%, 14% y 7% para el clon ‘Australiano 129/60’, el clon ‘Stoneville

67' y el total, respectivamente. La dispersión de valores se ubicó en un rango similar al del Grado 1, con un COV oscilando entre 24% y 29%. La reducción de  $f_m$ , si bien moderada, no pudo ser explicada en este caso por la presencia de otras singularidades en el tercio central, tales como nudosidad o médula, también descritas en la Tabla 4.8, y tampoco por una interacción de las mismas con la afección biológica.

- iii. Una significativa disminución de  $f_m$  para el Grado 4 en relación al Grado 1. Esa disminución alcanza 41%, 43% y 42% para el clon 'Australiano 129/60', el 'Stoneville 67' y el total, respectivamente. La dispersión de valores se ubicó en un rango similar al del Grado 1, con un COV oscilando entre 26% y 27%.
- iv. Una semejanza en los valores determinados para los dos clones. Las diferencias encontradas en el comportamiento de ambos pueden atribuirse a la variabilidad natural del material y ser descartadas en un proceso de clasificación por resistencia.
- v. Una ausencia de influencia sobre la tensión de rotura de otras singularidades presentes en el tercio central. La cantidad de vigas con nudosidad K en el tercio central discriminada en tres rangos de magnitud, así como la cantidad de vigas libres de médula, singularidades con influencia sobre las propiedades mecánicas ya descritas anteriormente, no exhiben diferencias significativas entre los distintos grados de ataque y por lo tanto puede descartarse una influencia desigual de ellas sobre las vigas asignadas a los cuatro grupos.

A través de análisis estadísticos específicos se comprobó, a un nivel de confianza del 95%, la significación de las diferencias entre grupos encontradas en los resultados. Las pruebas de Múltiples Rangos y Kruskal Wallis para el clon 'Australiano 129/60' indicaron que las medias y las medianas de  $f_m$  no poseen diferencias significativas entre los grupos con ataque biológico de Grado 1, 2 y 3; mientras que para el clon 'Stoneville 67' marcan como diferentes los Grados 1 y 2 del Grado 3 y del Grado 4, de igual manera para el conjunto de ambos clones. No obstante, para propósitos prácticos vinculados al diseño estructural se puede considerar que los valores de la resistencia correspondientes a los grupos con Grado de ataque biológico 1, 2 y 3 son del mismo orden y que ellos difieren significativamente de los determinados para el Grado 4. (Anexo I, Apartado I.4.1.2. "Propiedades físico-mecánicas y su relación con las

singularidades”, ítem “Impacto del ataque biológico sobre la resistencia y la rigidez en flexión”).

Un análisis conjunto de los resultados presentados en la Tabla 4.7 y en la Tabla 4.8, confirma que:

- i. Solamente 2 (3%) de las 63 de las vigas con afección Grado 2 alcanzó la rotura por causa del ataque biológico en el tercio central y que las 61 restantes (97%) fallaron por causas ajenas a la afección, con un valor medio de la tensión de rotura en flexión ( $f_m = 40,2 \text{ N/mm}^2$ ,  $\text{COV} = 23\%$ ) prácticamente igual al alcanzado por las 260 vigas libres de ataque ( $f_m = 39,0 \text{ N/mm}^2$ ,  $\text{COV} = 27\%$ ). A su vez, a través de la prueba de Múltiples rangos se confirmó la inexistencia de una diferencia estadísticamente significativa entre ambos valores medios.
- ii. 44 (37%) de las 120 con afección Grado 3 rompió por causa del ataque del insecto en la zona de máximo esfuerzo, y las 76 restantes (63%) fallaron por causas ajenas a la afección, con un valor medio de la tensión de rotura en flexión ( $f_m = 36,1 \text{ N/mm}^2$ ,  $\text{COV} = 26\%$ ) 7% menor que el alcanzado por las 260 vigas libres de ataque.

Esta evidencia permite analizar, sobre una base sólida, propuestas orientadas a maximizar el aprovechamiento económico del recurso sin afectar la seguridad requerida en el diseño estructural.

En efecto, el descarte de las piezas con ataque Grado 3 resulta incuestionable. La rotura de un 37% de las vigas en la zona afectada implica una incertidumbre inaceptable para un material estructural.

De los resultados obtenidos emerge también la conveniencia de revisar la decisión de descartar las piezas con un grado de ataque tipificado en este trabajo como de Grado 2. La cantidad de piezas que se recuperarían con esa decisión alcanza un 29% del total empleado en esta investigación (Tabla 1), las cuales deberían ser rechazadas según el criterio de la normativa vigente respecto de este tipo de ataque biológico (IRAM 9662-4 2015). Dos comprobaciones soportan la revisión mencionada. Por un lado, el hecho de que solo el 3%, de las piezas con afección Grado 2 en la zona de máximo esfuerzo alcanzó la rotura por esa causa, lo que indica que su incidencia sobre el percentil 5% de  $f_m$  es reducida. Por otro lado, la circunstancia de que

el 97% restante exhibió niveles de resistencia similares a los del material sin ataque biológico (Grado 1), y que la afección provocada por el insecto no progresa luego del aserrado. Sin embargo, es necesario considerar que la decisión final debería basarse sobre el aporte provisto por este trabajo, pero complementado y ampliado con resultados obtenidos de un proyecto diseñado especialmente con ese objetivo.

Con el fin de comprobar si la influencia del ataque del insecto *Megaplatypus mutatus* alcanzó al módulo de elasticidad, se determinaron los valores correspondientes a las 443 vigas ensayadas hasta la rotura (ver la Tabla 4.1) y la información se exhibe discriminada por grado de ataque en la Tabla 4.9.

Si bien la información de la Tabla 4.9 muestra diferencias sensibles entre los valores medios correspondientes a los dos clones, el análisis de las mismas no se aborda en este caso por no tener relación con el impacto del ataque biológico y su discusión se llevará a cabo más adelante en este mismo capítulo.

La prueba de Kruskal Wallis para el clon 'Australiano 129/60' indicó que no existen diferencias significativas entre los 4 grupos (grados de ataque), mientras que no ocurre así para el clon 'Stoneville 67' y el conjunto de ambos clones. Para estos dos últimos, la prueba de rangos múltiples identificó los siguientes grupos homogéneos: 1-2 y 3-4. (Anexo I, Apartado I.4.1.2. "Propiedades físico-mecánicas y su relación con las singularidades", ítem "Impacto del ataque biológico sobre la resistencia y la rigidez en flexión").

No obstante, la observación detallada de la información pone de relieve que la diferencia significativa detectada entre los cuatro grupos por las pruebas estadísticas se origina en el hecho de que una dispersión de valores prácticamente igual en los cuatro grupos (COV oscilando entre 10% y 12%), genera que reducidas diferencias entre los valores medios sean interpretadas como grupos pertenecientes a poblaciones diferentes. Sin embargo, a los fines prácticos de la clasificación por resistencia de un material estructural con una alta variabilidad natural como es la madera, esas diferencias pueden ser descartadas.

Considerando ahora los valores medios correspondientes al clon 'Stoneville 67' y al conjunto de ambos clones, con una diferencia algo mayor del módulo de elasticidad en los Grados 1 y 2 respecto de los 3 y 4 que la señalada para el clon 'Australiano 129/60', puede concluirse que el impacto del ataque biológico sobre la rigidez fue significativamente menor al

experimentado sobre la resistencia. Por otra parte, la similitud de valores medios y del COV encontrada para la rigidez entre el Grado 1 y el Grado 2, respalda la propuesta formulada de aceptar las piezas con afectaciones Grado 2 para uso estructural. Esto está en línea con lo reportado por Spavento (2015) para el *Populus x euroamericano* I-214 proveniente de la provincia de Río Negro, Argentina, que refiere una baja influencia de las galerías de insectos en el módulo de elasticidad y una influencia mayor, similar a la producida por la nudosidad, en la resistencia.

**Tabla 4.9:** Módulo de elasticidad global de las vigas en función del grado de ataque en el tercio central

Grado de ataque biológico	Parámetro	Unidad	Clon		
			A	S	Ambos
1	$E_{m,g}$	N/mm <sup>2</sup>	9.386	11.567	10.483
	COV	%	12	13	16
	n		129	131	260
2	$E_{m,g}$	N/mm <sup>2</sup>	9.236	11.740	10.550
	COV	%	12	10	16
	n	n	29	32	61
3	$E_{m,g}$	N/mm <sup>2</sup>	9.311	10.949	9.914
	COV	%	10	9	13
	n	n	48	28	76
4	$E_{m,g}$	N/mm <sup>2</sup>	8.941	10.849	9.970
	COV	%	12	12	16
	n	n	26	20*	46*

$E_{m,g}$  : valor medio del módulo de elasticidad global. \*Incluye una pieza con ataque biológico fuera del tercio central pero que rompió en esa sección.

### Propiedades mecánicas en flexión y densidad de los cuerpos de prueba que no rompieron por causa del ataque biológico

El estudio del impacto del ataque del insecto *Megaplatypus mutatus* sobre la resistencia permitió conocer que las piezas que rompieron en una zona afectada alcanzaron una tensión de rotura que, en promedio, experimentó una disminución del 42% en relación al valor

exhibido por las piezas sin afección. Por su parte, para aquellas que presentaron ataque biológico en el tercio central, pero no fallaron por causa del mismo, no se encontró evidencia de una influencia del ataque sobre sus propiedades mecánicas. Estas comprobaciones marcan la necesidad de continuar el análisis sobre las muestras conformadas por los cuerpos de prueba que no rompieron en una afección causada por el insecto mencionado.

En las Tablas 4.10, 4.11 y 4.12 se despliegan los principales resultados obtenidos para la resistencia y la rigidez en flexión, así como para la densidad, respectivamente. Todos los valores se presentan ajustados a las condiciones de referencia de acuerdo la norma UNE EN 384 (2010); la resistencia a una altura de 150 mm, la rigidez y la densidad a una humedad del 12%. Estas propiedades son las más importantes para el diseño estructural con madera y en consecuencia permiten inferir el desempeño del material ensayado, comparando los valores físico-mecánicos de ambos clones entre sí, así como con otras especies relevantes del país.

Respecto a la resistencia (Tabla 4.10), considerando que la madera estructural es un material de elevada variabilidad natural, debe destacarse la similitud que presentan los valores medios de las distintas muestras y en particular entre ambos clones. El rango de variación de los valores medios en las 10 muestras oscila entre un mínimo de 35,5 N/mm<sup>2</sup> y un máximo de 41,4 N/mm<sup>2</sup>. La comparación entre clones muestra promedios de 38,0 N/mm<sup>2</sup> y 38,3 N/mm<sup>2</sup>, acompañados de coeficientes de variación de 20% y 23%, para el 'Australiano 129/60' y el 'Stoneville 67', respectivamente.

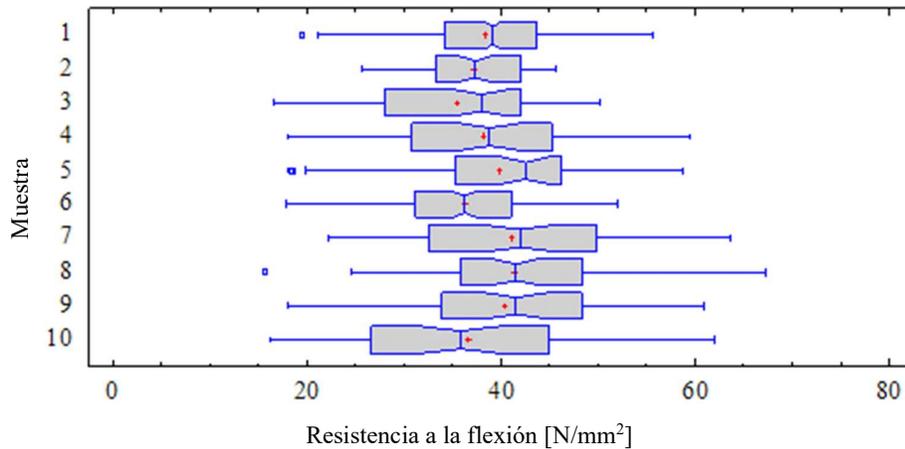
La no existencia de una diferencia estadísticamente significativa entre la resistencia de ambos clones, para el conjunto de todas las piezas, fue comprobada a través de las pruebas de Kruskal Wallis (valor-P > 0,05) con un nivel de confianza del 95%. (Anexo I, Apartado I.4.1.2. "Propiedades físico-mecánicas y su relación con las singularidades", ítem "Resistencia a la flexión"). Para el conjunto de tablas (muestras 1 y 6) y el conjunto de vigas (resto de las muestras) se asume la condición de normalidad de la distribución.

**Tabla 4.10:** Resistencia a la flexión

Clon	Muestra	Mínimo N/mm <sup>2</sup>	Medio N/mm <sup>2</sup>	Máximo N/mm <sup>2</sup>	Mediana N/mm <sup>2</sup>	COV %	n
A	1	19,5	38,4	55,6	39,2	18	287
	2	25,8	37,3	45,7	37,7	14	48
	3	16,5	35,5	50,3	37,8	26	65
	4	18,0	38,1	59,5	38,8	25	49
	5	18,4	39,9	58,6	42,5	24	44
	1 a 5	16,5	38,0	59,5	38,8	20	493
S	6	17,9	36,3	52,0	36,2	20	150
	7	22,2	41,1	63,5	41,9	27	48
	8	15,6	41,4	67,3	41,5	26	49
	9	18,2	40,4	60,9	41,6	27	49
	10	16,2	36,6	62,0	35,8	33	45
	6 a 10	15,6	38,3	67,3	37,8	23	341
Ambos		15,6	38,1	67,3	38,3	16	834

La resistencia a la flexión está ajustada a la altura de referencia de 150 mm según UNE EN 384 (2010). COV: coeficiente de variación, n: número de piezas. "A": clon 'Australiano 129/60'. "S": clon 'Stoneville 67'

El gráfico de caja y bigotes, presentado en la Figura 4.5, complementa la información exhibida en la Tabla 4.10 y permite apreciar visualmente la semejanza encontrada entre la resistencia de ambos clones. Para tablas de los mismos clones, pero cultivados en la localidad de Morse, provincia de Buenos Aires, Argentina, Filippetti *et al.* (2017) reportaron diferencias del 11% en la resistencia a la flexión, con valores de 42,2 N/mm<sup>2</sup> y 37,2 N/mm<sup>2</sup> para el 'Australiano 129/60' y el 'Stoneville 67', respectivamente. Para el pino resinoso del nordeste de Argentina, que constituye el principal recurso forestal de país, se ha encontrado una resistencia similar en las dos especies que lo integran. En un estudio sobre 116 tablas con tamaño estructural de *Pinus elliottii* y 117 de *Pinus taeda*, se determinaron valores medios de 30,0 N/mm<sup>2</sup> y 30,6 N/mm<sup>2</sup> para el primero y el segundo, respectivamente (Fank 2018).



**Figura 4.5:** Gráfico de caja y bigotes para la resistencia a la flexión (N/mm<sup>2</sup>)

Si bien los valores presentados en la Tabla 4.10 se refieren a las muestras completas, y por lo tanto los valores expresan también la influencia de las singularidades, es oportuno comparar los valores medios de la resistencia a flexión, y su dispersión, con resultados publicados para *Populus* de otras procedencias y las dos combinaciones especie / procedencia más importantes del país. Para 303 tablas de los clones 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' cultivados en la localidad de Morse, Buenos Aires, Argentina, Filippetti *et al.* (2017) reportaron un valor medio de resistencia ligeramente superior ( $f_m=39,8$  N/mm<sup>2</sup>) con un coeficiente de variación del 21%. En línea con estos valores, para ensayos sobre 160 tablas de álamo del sur de la provincia de Mendoza, Argentina, Bassotti *et al.* (2014), reportaron un valor medio de 39,5 N/mm<sup>2</sup>, con el mismo coeficiente de variación del 21%. Spavento (2015) para el *Populus x euramericana* I-214 de la provincia de Río Negro, Argentina, para 92 piezas de dimensiones semi-estructurales reportó una resistencia menor, 33,5 N/mm<sup>2</sup>, con un coeficiente de variación del 20%. Para el mismo clon implantado en la Comunidad Autónoma de Castilla y León en España, para 149 piezas de dimensiones semi-estructurales y 943 de dimensiones estructurales, reportó resistencias de 45,6 N/mm<sup>2</sup> y 39,5 N/mm<sup>2</sup>, respectivamente, con coeficientes de variación del 25% y el 29%. Para el pino resinoso del nordeste de Argentina, Fank (2018) publica un valor medio de 31,6 N/mm<sup>2</sup> con un coeficiente de variación de 43%, obtenidos a partir de ensayos llevados a cabo sobre 458 cuerpos de prueba de tamaño estructural. La autora citada destaca en este caso, que la particularmente elevada dispersión de valores expresada por el coeficiente de variación refleja una importante presencia de singularidades, tales como nudos

y madera juvenil, que caracterizan la madera de las coníferas de rápido crecimiento y que afectan severamente sus propiedades mecánicas. Para el *Eucalyptus grandis* cultivado en la Mesopotamia, Piter *et al.* (2004) publican valores medios y coeficientes de variación oscilando entre 40,3 N/mm<sup>2</sup> y 62,1 N/mm<sup>2</sup> y entre 23% y 33%, respectivamente, para 5 muestras conteniendo en total 349 cuerpos de prueba con tamaño estructural.

El módulo de elasticidad global (Tabla 4.11) muestra mayores diferencias de valores medios que la resistencia, tanto entre muestras como entre ambos clones. Exhibe a su vez una menor variabilidad que la resistencia, expresada por coeficientes de variación que no superan el 17%. La comparación entre clones muestra promedios de 9.571 N/mm<sup>2</sup> y 10.754 N/mm<sup>2</sup>, acompañados de coeficientes de variación de 13% y 16%, para el 'Australiano 129/60' y el 'Stoneville 67', respectivamente.

**Tabla 4.11:** Módulo de elasticidad global

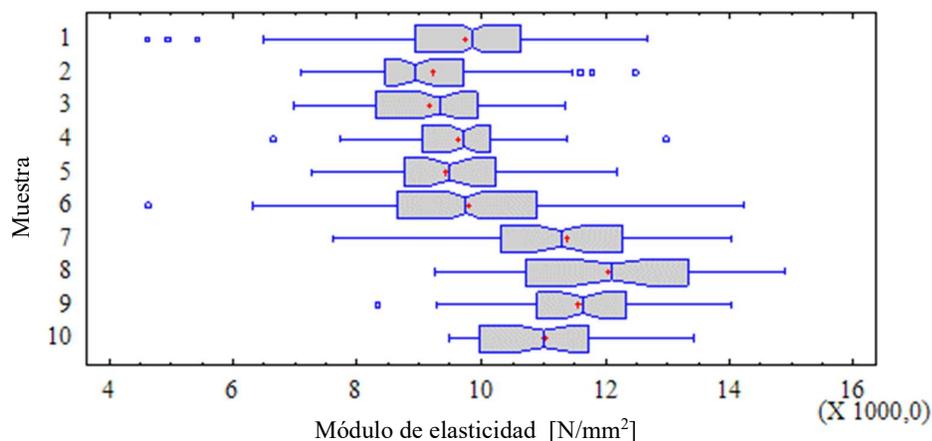
Clon	Muestra	Mínimo N/mm <sup>2</sup>	Medio N/mm <sup>2</sup>	Máximo N/mm <sup>2</sup>	Mediana N/mm <sup>2</sup>	COV %	n
A	1	4.606	9.727	12.680	9.867	14	296
	2	7.094	9.210	12.484	8.936	12	48
	3	6.974	9.176	11.367	9.334	11	65
	4	6.642	9.620	12.982	9.709	11	49
	5	7.270	9.437	12.183	9.498	11	44
	1 a 5	4.699	9.571	12.982	9.699	13	502
S	6	4.633	9.798	14.232	9.748	17	150
	7	7.609	11.368	14.042	11.279	12	48
	8	9.252	12.034	14.913	12.102	13	49
	9	8.337	11.560	14.032	11.632	10	49
	10	9.466	11.018	13.419	11.016	10	45
	6 a 10	4.633	10.754	14.913	10.329	16	341
Ambos		4.606	10.050	14.913	9.943	16	843

El módulo de elasticidad global (UNE EN 408 2011) está ajustado a la humedad de referencia del 12% según la norma UNE EN 384 (2010). COV: coeficiente de variación, n: número de piezas. "A": clon 'Australiano 129/60'. "S": clon 'Stoneville 67'.

La existencia de una diferencia estadísticamente significativa entre el módulo de elasticidad de ambos clones, para el total de la muestra, fue comprobada a través de la prueba

de Kruskal Wallis (valor- $P < 0,05$ ) con un nivel de confianza del 95%. (Anexo I, Apartado I.4.1.2. “Propiedades físico-mecánicas y su relación con las singularidades”, ítem “Módulo de elasticidad”). Para el conjunto de tablas (muestras 1 y 6) y el conjunto de vigas (resto de las muestras) se asume la condición de normalidad de la distribución.

El gráfico de caja y bigotes presentado en la Figura 4.6 exhibe con claridad la diferencia encontrada en la rigidez de la madera de las distintas muestras y entre ambos clones, que alcanzó 12% entre sus valores medios ( $10.754 \text{ N/mm}^2$  y  $9.571 \text{ N/mm}^2$ ) según se expresa en la Tabla 4.11. Para las tablas, muestras 1 y 6, no se aprecia una diferencia significativa entre los valores de rigidez de ambos clones,  $9.727 \text{ N/mm}^2$  y  $9.798 \text{ N/mm}^2$  respectivamente, la prueba de Kruskal-Wallis presentó una valor- $P > 0,05$  confirmando la ausencia de diferencias significativas entre las muestras de tablas. Estos valores son inferiores a los reportados por Filippetti *et al.* (2017) para tablas de los mismos clones cultivados en la localidad de Morse, Buenos Aires, Argentina, que presentaron valores medios de  $10.897 \text{ N/mm}^2$  y  $10.929 \text{ N/mm}^2$  para el ‘Australiano 129/60’ y el ‘Stoneville 67’ respectivamente. Para el pino resinoso del nordeste de Argentina, Fank (2018) publicó una diferencia entre las dos especies que lo integran. En el estudio ya mencionado anteriormente, llevado a cabo sobre 116 tablas con tamaño estructural de *Pinus elliotii* y 117 de *Pinus taeda*, se determinaron valores medios de  $6.964 \text{ N/mm}^2$  y  $7.742 \text{ N/mm}^2$  para el primero y el segundo respectivamente, lo que implica una diferencia de 11% del segundo por sobre el primero.



**Figura 4.6:** Gráfico de caja y bigotes para el módulo de elasticidad global en flexión ( $\text{N/mm}^2$ )

Spavento (2015) para el *Populus x euramericana* I-214 de la provincia de Río Negro de Argentina, a partir de un estudio sobre 92 piezas de dimensiones semi-estructurales, reportó un valor de 7.191 N/mm<sup>2</sup>, con un coeficiente de variación del 17%; mientras que para el mismo clon cultivado en la Comunidad Autónoma de Castilla y León en España, a partir de una muestra de 149 piezas de dimensiones semi-estructurales y 943 de dimensiones estructurales, reportó valores de 7.992 N/mm<sup>2</sup> y 7.653 N/mm<sup>2</sup> respectivamente, con coeficientes de variación del 24% y 21%. Para ensayos sobre 160 tablas de álamo del sur de la provincia de Mendoza, Argentina, Bassotti *et al.* (2014) reportaron un módulo de elasticidad menor, 8.201 N/mm<sup>2</sup>, con un coeficiente de variación del 20%. Para el pino resinoso del nordeste, Fank (2018) publica un valor medio de 8.212 N/mm<sup>2</sup>, con un coeficiente de variación de 33%, obtenidos sobre 458 cuerpos de prueba de tamaño estructural. Para el *Eucalyptus grandis* cultivado en la Mesopotamia, Piter *et al.* (2004) publican valores medios y coeficientes de variación oscilando entre 10.900 N/mm<sup>2</sup> y 12.700 N/mm<sup>2</sup> y entre 13% y 21% respectivamente, para 5 muestras conteniendo en total 349 cuerpos de prueba con tamaño estructural.

La densidad aparente (Tabla 4.12) muestra una diferencia porcentual entre los valores medios de ambos clones (408 kg/m<sup>3</sup> y 461 kg/m<sup>3</sup> para el Australiano 129/60' y el 'Stoneville 67', respectivamente), que es similar a la encontrada para el módulo de elasticidad (13%). Los coeficientes de variación, oscilando entre 6% y 11%, indican una dispersión de valores notoriamente baja.

La existencia de una diferencia estadísticamente significativa entre la densidad de ambos clones fue comprobada a través de las pruebas de Kruskal Wallis (valor-P < 0,05) con un nivel de confianza del 95%. (Anexo I, Apartado I.4.1.2. "Propiedades físico-mecánicas y su relación con las singularidades", ítem Densidad"). Para el conjunto de tablas (muestras 1 y 6) y el conjunto de vigas (resto de las muestras) se asume, con las limitaciones reflejadas en el Anexo I, la condición de normalidad de la distribución.

Tabla 4.12: Densidad aparente

Clon	Muestra	Mínimo kg/m <sup>3</sup>	Medio kg/m <sup>3</sup>	Máximo kg/m <sup>3</sup>	Mediana kg/m <sup>3</sup>	COV %	n
A	1	347	405	517	403	6	296
	2	327	392	438	392	6	48
	3	326	402	550	398	9	65
	4	344	397	446	397	6	49
	5	398	461	519	464	6	44
	1 a 5	326	408	550	403	8	497
S	6	374	465	575	466	10	150
	7	400	478	602	490	11	48
	8	361	460	539	455	9	49
	9	392	465	567	460	6	49
	10	381	426	489	424	6	45
	6 a 10	361	461	602	449	10	341
Ambos		326	429	602	419	11	843

La densidad está ajustada al valor de referencia del 12% según la norma UNE EN 384:2010, COV: coeficiente de variación, n: número de piezas. "A": clon 'Australiano 129/60'. "S": clon 'Stoneville 67'

La diferencia encontrada para la densidad en ambos clones puede apreciarse claramente en el gráfico de caja y bigotes que se presenta en la Figura 4.7.

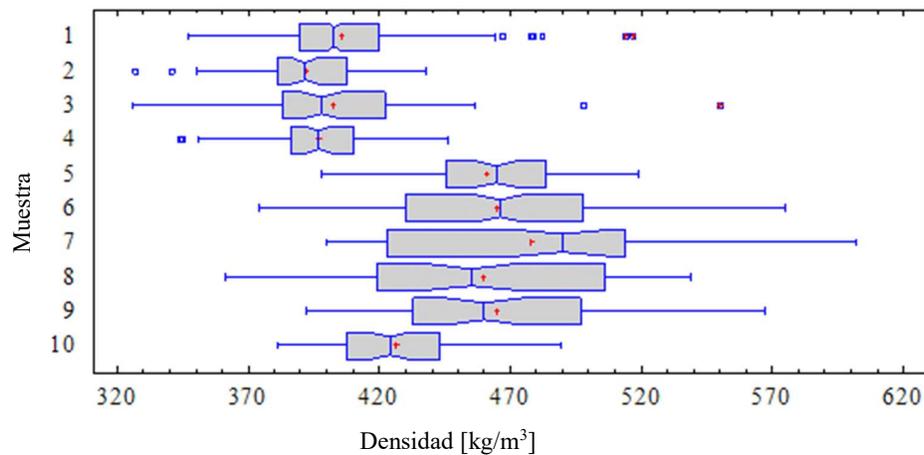


Figura 4.7: Gráfico de caja y bigotes para la densidad (kg/m<sup>3</sup>)

Monteoliva *et al.* (2011) reportaron una densidad básica (IRAM 9544) de  $381 \text{ kg/m}^3$  para un estudio realizado sobre 17 árboles de 'Australiano 129/60' provenientes del delta del río Paraná; mientras que Diaz *et al.* (2010) reportaron una densidad, al 15% de contenido de humedad, de  $458 \text{ kg/m}^3 \pm 13 \text{ kg/m}^3$ , para probetas provenientes de 11 árboles del mismo clon y origen. Filippetti *et al.* (2017) para los mismos clones cultivados en Morse, reportaron densidades de  $479 \text{ kg/m}^3$  y  $441 \text{ kg/m}^3$  para el 'Australiano 129/60' y el 'Stoneville 67', respectivamente, con un coeficiente de variación del 6% y 8%; Spavento (2015) para las tres muestras mencionadas anteriormente de *Populus x euramericana* I-214 reportó densidades más bajas ( $402 \text{ kg/m}^3$ ,  $408 \text{ kg/m}^3$  y  $362 \text{ kg/m}^3$ ), con coeficientes de variación del 8%; 12% y 12%; mientras que Bassotti *et al.* (2014) para el álamo del sur de Mendoza reportó una densidad de  $423 \text{ kg/m}^3$  con un coeficiente de variación del 13%. Estos valores de coeficiente de variación son inferiores a los publicados por Piter *et al.* (2004) para las muestras de *Eucalyptus grandis* ya mencionadas anteriormente, que variaron entre 7% y 19%, y al valor reportado por Fank (2018) para el pino resinoso del nordeste (15%). Las densidades reportadas por Filippetti *et al.* (2017), Spavento (2015) y Bassotti *et al.* (2014) son al 12% de contenido de humedad.

Con el propósito de comprobar que las muestras ensayadas presentaron un contenido de humedad congruente con el previsto por la normativa europea (EN 384 2010), en la Tabla 4.13 se presenta una información detallada de los valores obtenidos al finalizar los ensayos mecánicos.

Los valores medios y los coeficientes de variación indicados en la tabla, así como el elevado nivel de discriminación con que se presenta la información, confirman que el contenido de humedad al momento del ensayo estuvo contenido en el rango comprendido entre 8% y 18%, que es el admitido por la normativa aplicada. En consecuencia, puede descartarse una influencia desigual de esa variable sobre las propiedades físico-mecánicas del material que se presentaron y analizaron anteriormente.

**Tabla 4.13:** Contenido de humedad del material ensayado a flexión

Clon	Muestra	Valor Medio %	COV %	n
A	1	11,0	13	296
	2	14,5	3	48
	3	12,2	6	65
	4	13,9	12	49
	5	12,9	5	44
	1 a 5	11,9	15	497
S	6	12,9	4	150
	7	12,8	5	48
	8	11,1	11	49
	9	13,5	4	49
	10	12,4	5	45
	6 a 10	12,6	8	341
Ambos		12,2	13	483

“A”: clon ‘Australiano 129/60’. “S”: clon ‘Stoneville 67’, COV: coeficiente de variación, n: número de piezas.

### **Influencia de la presencia de médula sobre las propiedades mecánicas en flexión y la densidad**

La influencia de la médula, singularidad ligada a una fuerte presencia de madera juvenil (Hoffmeyer 1995), suele ser mayor sobre piezas de menor escuadría, como las tablas, que en aquellas de mayores dimensiones tales como las vigas (Fank 2018). Dado que en el programa experimental desarrollado se incluyeron, además de tablas ensayadas de plano, vigas con un espesor (ancho) nominal reducido de 25 mm en las muestras 3 y 8, los resultados son presentados de forma independiente para cada muestra. Los valores correspondientes a la resistencia, la rigidez y la densidad se exhiben en las Tablas 4.14, 4.15 y 4.16 respectivamente.

Respecto de la resistencia, los valores medios correspondientes a la totalidad de los cuerpos de prueba sin y con médula (38,8 N/mm<sup>2</sup> y 36,8 N/mm<sup>2</sup>) evidencian una moderada influencia de esta singularidad, con una diferencia entre ambos valores de 5,4%. Cuando la comparación se lleva a cabo para cada clon, la discrepancia alcanza 3,5% para el ‘Australiano 129/60’ y 8,2% para el ‘Stoneville 67’. Las diferencias halladas en la resistencia de los cuerpos

con médula y sin médula, es menor a la reportada por Spavento (2015) para el *Populus x euramericana* I-214 de España, donde obtuvo diferencias de cercanas al 11%.

**Tabla 4.14:** Resistencia a la flexión de los cuerpos de prueba con y sin médula

Clon	Muestra	Médula	Medio N/mm <sup>2</sup>	Mediana N/mm <sup>2</sup>	COV %	n
A	1	No	39,0	39,6	18	188
		Si	37,1	38,1	18	99
	2	No	37,6	37,7	14	45
		Si	32,7	31,5	16	3
	3	No	35,6	37,4	25	48
		Si	35,2	39,7	31	17
	4	No	38,5	38,9	21	33
		Si	37,7	36,9	33	16
	5	No	40,0	41,1	26	29
		Si	39,6	43,5	21	15
1 a 5	No	38,4	39,0	20	343	
	Si	37,1	38,5	22	150	
S	6	No	37,4	37,3	21	106
		Si	33,6	33,5	17	44
	7	No	43,2	43,9	26	28
		Si	38,0	38,5	26	20
	8	No	42,9	43,8	24	35
		Si	37,7	37,6	31	14
	9	No	41,7	43,8	28	14
		Si	39,9	41,1	27	35
	10	No	38,3	36,8	33	30
		Si	33,0	31,9	32	15
6 a 10	No	39,4	39,2	25	213	
	Si	36,4	35,5	26	128	
Ambos	1 a 10	No	38,8	39,0	22	556
		Si	36,8	36,4	24	278

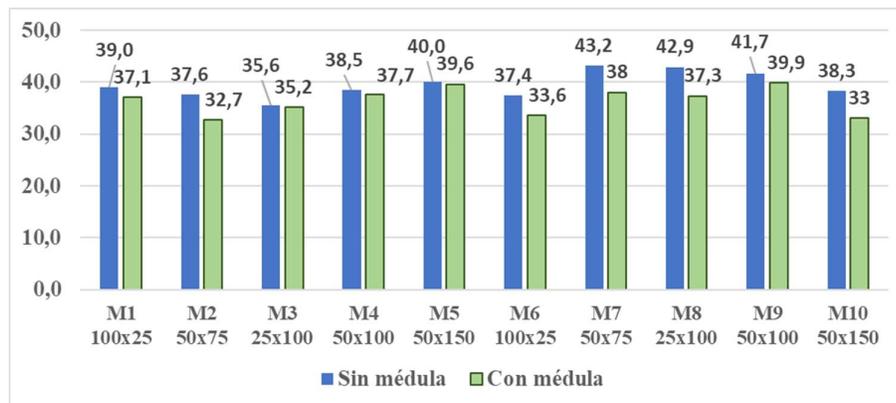
La resistencia a la flexión está ajustada a la altura de referencia de 150 mm según UNE EN 384:2010. COV: coeficiente de variación, n: número de piezas. "A": clon 'Australiano 129/60'. "S": clon 'Stoneville 67'

La verificación de la existencia de una diferencia estadísticamente significativa entre la resistencia a la flexión en los grupos con médula y sin médula fue comprobada a través de la prueba de Kruskal Wallis, donde se observó la existencia de diferencias significativas para el clon 'Stoneville 67' y la muestra completa (valor-P < 0,05); mientras que para el clon 'Australiano 129/60' no se obtuvieron diferencias significativas (valor-P > 0,05). (Anexo I,

Apartado I.4.1.2. “Propiedades físico-mecánicas y su relación con las singularidades”, ítem “Influencia de la médula en las propiedades mecánicas en flexión y la densidad”).

No obstante los resultados del análisis estadístico citado, la magnitud de las diferencias entre los valores medios son de relevancia relativa para propósitos prácticos vinculados al diseño estructural con un material de elevada variabilidad natural como es la madera.

Cabe señalar que no se advierte una mayor influencia de la singularidad sobre las piezas de menores dimensiones. En este último aspecto se destaca que la Muestra 10, cuya sección transversal tenía las mayores dimensiones, acusó la diferencia más alta entre los valores medios de la resistencia de los cuerpos de prueba sin y con médula (16,1%), pero la diferencia más pequeña (1,0%) correspondió a la Muestra 5, con exactamente las mismas dimensiones. Por su parte, para las muestras 1, 3, 6 y 8, preparadas con el menor espesor nominal (25 mm), los correspondientes porcentajes de diferencia tampoco muestran una tendencia definida, alcanzando 5,1%, 1,1%, 11,3% y 13,8%, respectivamente. Los valores encontrados para el COV no evidencian una relación entre la presencia de médula y la dispersión de resultados. La Figura 4.8 ilustra la relativamente pequeña diferencia observada en la resistencia a la flexión entre las piezas que no presentaron médula y las que si la poseían, se aprecia también que no se advierte una mayor influencia en las piezas de menores dimensiones.



**Figura 4.8:** Resistencia a la flexión [N/mm<sup>2</sup>] entre los cuerpos con y sin médula

Respecto del módulo de elasticidad (Tabla 4.15) los valores medios correspondientes a la totalidad de los cuerpos de prueba sin y con médula (10.064 N/mm<sup>2</sup> y 10.020 N/mm<sup>2</sup>)

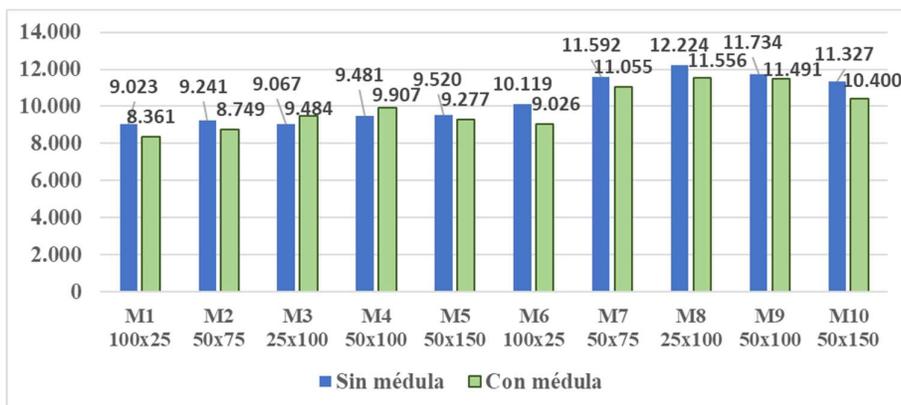
evidencian una casi inexistente influencia de esta singularidad, puesta de manifiesto en una diferencia inferior al 1% entre ambos valores. Cuando la comparación se lleva a cabo para cada clon, la discrepancia es también exigua para el ‘Australiano 129/60’, y en este caso los cuerpos libres de médula presentan un valor medio menor que los que la contienen. Para el ‘Stoneville 67’, por su parte, el valor medio de las piezas sin médula (10.935 N/mm<sup>2</sup>) superó en un 4,6% al correspondiente a las que la contienen (10.455 N/mm<sup>2</sup>).

**Tabla 4.15:** Módulo de elasticidad en flexión de los cuerpos de prueba con y sin médula

Clon	Muestra	Médula	Medio N/mm <sup>2</sup>	Mediana N/mm <sup>2</sup>	COV %	n
A	1	No	9.727	9.831	14	194
		Si	9.729	9.980	14	102
	2	No	9.241	9.023	13	45
		Si	8.749	8.361	10	3
	3	No	9.067	9.194	12	48
		Si	9.484	9.893	10	17
	4	No	9.481	9.563	8	33
		Si	9.907	9.919	15	16
	5	No	9.520	9.577	12	29
		Si	9.277	9.072	9	15
1 a 5	No	9.533	9.588	13	349	
	Si	9.657	9.893	13	153	
S	6	No	10.119	10.061	17	106
		Si	9.026	9.088	12	44
	7	No	11.592	11.775	13	28
		Si	11.055	10.793	10	20
	8	No	12.224	12.149	12	35
		Si	11.556	11.443	15	14
	9	No	11.734	11.682	13	14
		Si	11.491	11.615	9	35
	10	No	11.327	11.475	11	30
		Si	10.400	10.406	6	15
6 a 10	No	10.935	10.950	16	213	
	Si	10.455	9.915	15	128	
Ambos	1 a 10	No	10.064	9.936	16	562
		Si	10.020	9.979	15	281

El módulo de elasticidad (UNE EN 408:2011) está ajustado a la humedad de referencia del 12% según la norma UNE-EN 384:2010. COV: coeficiente de variación, n: número de piezas. “A”: clon ‘Australiano 129/60’. “S”: clon ‘Stoneville 67’

A diferencia de lo descripto para la resistencia, es de destacar que la escasa influencia negativa de la presencia de médula sobre la rigidez encontrada para el conjunto del material no se manifestó de igual manera en cada una de las muestras. En particular, las muestras 3 y 4 mostraron valores superiores del módulo para las piezas con médula que para las libres de ella. Concordando con lo determinado para la resistencia, tampoco para la rigidez se encontró evidencia de una relación entre la influencia analizada y las dimensiones de la sección transversal de los cuerpos de prueba. Los valores del COV, que indican una menor dispersión de resultados que para la resistencia, tampoco evidencian una relación con la presencia de médula. La Figura 4.9 permite apreciar la descripción precedente.



**Figura 4.9:** Módulo de elasticidad [N/mm<sup>2</sup>] entre los cuerpos con y sin médula

La aplicación de la prueba de Kruskal Wallis a las muestras de módulo de elasticidad con y sin médula, arrojó la existencia de diferencias estadísticamente significativas para el clon 'Stoneville 67' (valor-P < 0,05), mientras que para el clon 'Australiano 129/60' y la muestra completa no se obtuvieron diferencias significativas (valor-P > 0,05). (Anexo I, Apartado I.4.1.2. "Propiedades físico-mecánicas y su relación con las singularidades", ítem "Influencia de la médula en las propiedades mecánicas en flexión y la densidad").

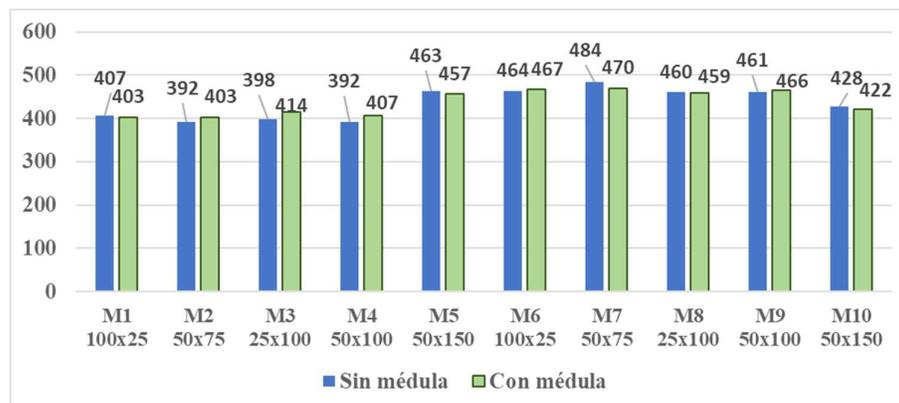
Spavento (2015) para el *Populus x euramericana* I-214 de España reportó que la mediana del LOG(MOE) sin médula resultó significativamente superior a la correspondiente a las piezas con médula

La densidad (Tabla 4.16) no evidencia relación con la presencia de médula ni al considerar el total del material, los clones o las muestras en particular. Los valores del COV, además de confirmar la particularmente baja dispersión de resultados ya mencionada anteriormente, muestran que la reducida variabilidad no está vinculada a la presencia de médula. Para la totalidad de la muestra la diferencia entre los valores medios de las piezas con y sin médula es del 1%. La Figura 4.10 permite apreciar más claramente la descripción precedente.

**Tabla 4.16:** Densidad de los cuerpos de prueba con y sin médula

Clon	Muestra	Médula	Medio N/mm <sup>2</sup>	Mediana N/mm <sup>2</sup>	COV %	n	
A	1	No	407	405	6	194	
		Si	403	401	6	102	
	2	No	392	384	6	45	
		Si	403	395	4	3	
	3	No	398	383	10	48	
		Si	414	411	6	17	
	4	No	392	395	5	33	
		Si	407	402	7	16	
	5	No	463	466	6	29	
		Si	457	458	5	15	
1 a 5	No	407	402	8	349		
	Si	410	407	7	153		
S	6	No	464	464	10	106	
		Si	467	470	10	44	
	7	No	484	497	11	28	
		Si	470	474	11	20	
	8	No	460	458	10	35	
		Si	459	447	12	14	
	9	No	461	462	9	14	
		Si	466	460	9	35	
	10	No	428	431	7	30	
		Si	422	418	4	15	
	6 a 10	No	461	458	10	213	
		Si	461	458	10	128	
	Ambos	1 a 10	No	427	416	11	562
			Si	433	423	11	281

La densidad está ajustada a la humedad de referencia de 150 mm según UNE-EN 384:2010. COV: coeficiente de variación, n: número de piezas. "A": clon 'Australiano 129/60'. "S": clon 'Stoneville 67'



**Figura 4.10:** Densidad [kg/m<sup>3</sup>] entre los cuerpos con y sin médula

La aplicación de la prueba de Kruskal Wallis, a las muestras de densidad con y sin médula, arrojó la existencia de diferencias estadísticamente significativas para la muestra completa (valor-P < 0,05), mientras que para los clones por separado, no se obtuvieron diferencias significativas (valor-P > 0,05). (Anexo I, Apartado I.4.1.2. “Propiedades físico-mecánicas y su relación con las singularidades”, ítem “Influencia de la médula en las propiedades mecánicas en flexión y la densidad”).

Los resultados obtenidos están en línea con los publicados por Spavento (2015) para el *Populus x euramericana*, que reportó la ausencia de diferencias en la densidad de los cuerpos con y sin médula; por otro lado, Monteoliva *et al.* (2011) reportaron, sobre árboles del clon ‘Australiano 129/60’ de 17 años, un aumento de la densidad desde los anillos de los primeros años de vida hacia los anillos exteriores.

El análisis de los resultados obtenidos para las propiedades mecánicas en flexión y la densidad sobre los cuerpos de prueba con y sin médula permitió conocer las siguientes particularidades acerca de la influencia de esta singularidad:

- i. La totalidad de los cuerpos de prueba libres de médula mostraron un valor medio de la resistencia 5,4% mayor que los que la contenían, poniendo en evidencia una moderada influencia (negativa) de esta singularidad sobre el conjunto del material. La diferencia fue más acentuada en el ‘Stoneville 67’ (8,2%) que en el ‘Australiano 129/60’ (3,5%). Esta influencia es del mismo orden que la encontrada por Fank (2018) sobre un total de 225 cuerpos de prueba de tamaño estructural de pino resinoso cultivado en el nordeste del país

(5,1%), mucho menor que las publicadas por Piter *et al.* (2004) para 349 piezas estructurales de *Eucalyptus grandis* de la Mesopotamia (32,6%) y por Guillaumet *et al.* (2007) para 256 probetas de *Araucaria Angustifolia* de la provincia de Misiones (33%).

- ii. La influencia de esta singularidad sobre el módulo de elasticidad fue prácticamente inexistente para el total de los cuerpos de prueba y también para el 'Australiano 129/60', en tanto que puede calificarse de moderada sobre el 'Stoneville 67' ya que el valor medio de las piezas sin médula superó en un 4,6% al correspondiente a los que la contenían. En las publicaciones citadas en el párrafo anterior se informan porcentajes de diferencia en el módulo de elasticidad para los cuerpos sin y con médula, los que alcanzan 16,6% para el pino, 17,5% para el *Eucalyptus grandis* y 12% para la *Araucaria angustifolia*.
- iii. No se puso de manifiesto influencia alguna de esta singularidad sobre la densidad aparente, tanto sobre el total de los cuerpos de prueba como sobre los correspondientes a cada clon investigado. Esta característica difiere de la reportada en las publicaciones citadas anteriormente para el pino resinoso (5,6%), para el *Eucalyptus grandis* (7,8%) y la *Araucaria angustifolia* (7%).
- iv. El tamaño de la sección transversal de las piezas estructurales no evidenció relación alguna con la influencia de la presencia de médula sobre las propiedades mecánicas y la densidad. Tampoco se advirtió un efecto de la presencia de esta singularidad sobre la dispersión de resultados determinados para las propiedades analizadas.

### **Influencia de la nudosidad sobre la resistencia y la rigidez en flexión**

Dado que esta singularidad es considerada una de las más importantes en la madera estructural (Fank 2018, Piter 2003, Guillaumet *et al.* 2007, Hermoso 2001, Spavento 2015), se obtuvieron resultados de la relación entre las propiedades mecánicas en flexión y la nudosidad expresada según 5 criterios diferentes, los cuales están descriptos detalladamente en el Capítulo 3. En todos los casos, el valor de la nudosidad utilizado para los estudios de

correlación fue el mayor determinado en la zona sometida al máximo esfuerzo de flexión, con valor constante, es decir en el tercio central de las piezas sometidas a flexión.

El criterio denominado K se aplicó a la totalidad de las muestras por tres razones: i) es el criterio adoptado para tablas estructurales por la norma IRAM 9662-4 (2015), ii) la sencillez de su determinación emerge como una apreciable ventaja en un país con poca tradición en la temática como Argentina y, iii) su utilización ha sido aceptada para todas las secciones estructurales de *Eucalyptus grandis* cultivado en la Mesopotamia y de *Araucaria angustifolia* de Misiones (INTI CIRSOC 601 2016a).

Los criterios KAR, KARMs, KARMi y KARM se aplicaron a las vigas con las mayores dimensiones de su sección transversal (50 mm x 100 mm y 50 mm x 150 mm), o sea las muestras 4, 5 ('Australiano 129/60'), 9 y 10 ('Stoneville 67'). El propósito del estudio de la influencia de estos criterios sobre las propiedades mecánicas radica en que, si bien son más complejos en su determinación que el criterio K, suelen ser más efectivos para predecir el comportamiento mecánico de la pieza (Fank 2018). La razón de esa mayor eficiencia puede explicarse porque los mismos valoran, de distintas maneras, la pérdida (desplazamiento) de área en la sección transversal producida por los nudos y, en el caso de la flexión, la consecuente disminución del módulo resistente.

Los principales resultados que definen la relación entre la nudosidad y la resistencia a flexión se presentan en la Tabla 4.17. Además de los valores del coeficiente de correlación de Pearson (R), que se indica para las distintas muestras, el nivel de la probabilidad asociada (valor-P) permite identificar los casos en que las correlaciones son significativas con un nivel de confianza del 95%.

La información provista por la Tabla 4.17 permite advertir que el criterio KARMs es el que presenta los menores valores de R y a su vez el único cuya correlación no es significativa con la resistencia (valor-P > 0,05). Esta especialmente baja relación entre KARMs y la resistencia pone en evidencia una muy leve influencia de los nudos ubicados en la zona comprimida de la sección transversal sobre la capacidad portante del material investigado.

El resto de los criterios analizados (exceptuando KARMs) exhiben valores de R que, en general, son indicativos de una relación medianamente estrecha entre las dos variables y que confirman a la nudosidad como un parámetro de importante poder predictivo de la resistencia. Salvo K en la Muestra 6 (tablas de 'Stoneville 67' ensayadas de plano), que muestra un valor

relativamente bajo de R (-0,20), los otros criterios no evidencian diferencias sustanciales de R entre muestras ni entre clones. Las discrepancias existentes no pueden considerarse relevantes para propósitos prácticos vinculados a la clasificación por resistencia del material si se tiene en cuenta su natural elevada variabilidad.

**Tabla 4.17:** Principales resultados del estudio de la relación entre la nudosidad y la resistencia a la flexión

Muestra	Clon	Parámetro	Coefficiente de correlación (R)	Valor-P	n
1	A	K	-0,43	<0,05	287
6	S	K	-0,20	<0,05	150
1 y 6	Ambos	K	-0,36	<0,05	437
2 a 5	A	K	-0,54	<0,05	206
7 a 10	S	K	-0,40	<0,05	191
2 a 5 y 7 a 10	Ambos	K	-0,44	<0,05	397
4 y 5	A	K	-0,49	<0,05	93
		KAR	-0,44	<0,05	93
		KARMs	-0,11	>0,05	93
		KARMi	-0,44	<0,05	93
		KARM	-0,46	<0,05	93
9 Y 10	S	K	-0,46	<0,05	94
		KAR	-0,37	<0,05	94
		KARMs	-0,02	>0,05	94
		KARMi	-0,55	<0,05	94
		KARM	--0,50	<0,05	94
4, 5, 9 y 10	Ambos	K	-0,46	<0,05	187
		KAR	-0,38	<0,05	187
		KARMs	-0,05	>0,05	187
		KARMi	-0,49	<0,05	187
		KARM	-0,47	<0,05	187

En el Capítulo 3 se explican en detalle los 5 criterios para evaluar la nudosidad. La resistencia a la flexión para la determinación de las correlaciones está ajustada a la altura de referencia de 150 mm de acuerdo a la norma UNE EN 384 (2010)

La Figura 4.11 exhibe dos tipos de rotura claramente diferenciados que se encontraron en el material investigado. En la parte inferior se evidencia la influencia que ejerció la presencia

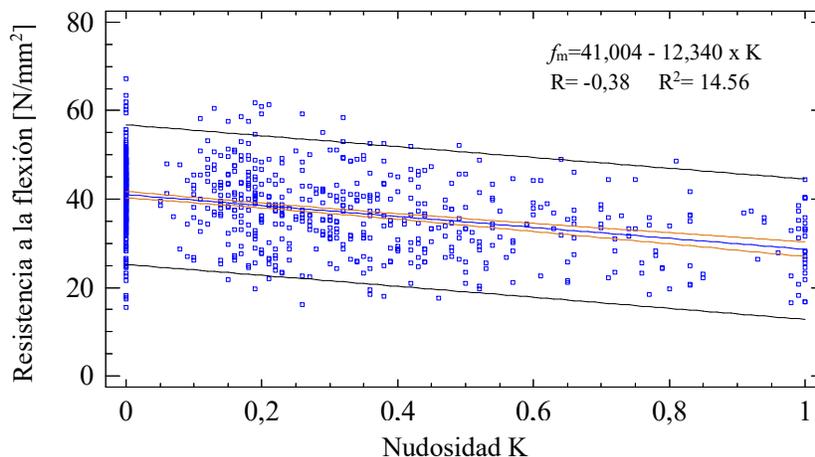
de un nudo ubicado en la zona traccionada de la viga, mientras que en la parte superior se aprecia una falla libre de esa singularidad.



**Figura 4.11:** Modos de falla típicos encontrados en los cuerpos de prueba sometidos a flexión.  
Arriba: Cuerpo de prueba libre de nudos; Abajo: Rotura iniciada en un nudo ubicado en la zona traccionada de la viga.

Los criterios basados en la medición del desplazamiento (disminución) que producen los nudos en la sección transversal no mostraron mayor efectividad que el criterio K aún en las muestras con los cuerpos de prueba de mayores dimensiones. Para las muestras 4, 5, 9 y 10, exceptuado KARMs por las razones expuestas anteriormente, tanto KAR ( $R = -0,38$ ) como KARMi ( $R = -0,49$ ) y KARM ( $R = -0,47$ ) muestran un poder predictivo de la resistencia que no puede considerarse superior al de K ( $R = -0,46$ ). Adicionalmente, y con la excepción de la Muestra 6, K muestra también una estrecha relación con las muestras integradas por tablas y con vigas de menores dimensiones. Considerando estos resultados y la ventaja que presenta desde el punto de vista de la facilidad de su determinación, en la Figura 4.12 se despliega la relación de la nudosidad K con la resistencia para la totalidad de los cuerpos de prueba. Junto al diagrama de dispersión también se exhibe la ecuación de la recta de regresión lineal, el

coeficiente de correlación (R) y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) que indica la proporción de variabilidad de la resistencia que es explicada por la variación de K.



**Figura 4.12:** Relación entre la nudosidad K y la resistencia a flexión para el conjunto de los cuerpos de prueba ensayados a flexión.

$f_m$ : resistencia a la flexión. R: coeficiente de correlación.  $R^2$ : Coeficiente de determinación

La relación entre la nudosidad y la resistencia que se encontró en este trabajo es mayor a la publicada por Piter *et al.* (2004), para 349 piezas estructurales de *Eucalyptus grandis* cultivado en la Mesopotamia. Según estos autores, el valor de R alcanzó -0,32 para K y varió entre -0,30 y -0,33 para criterios basados en el desplazamiento (KAR). A su vez, Fank (2018), reporta una correlación sustantivamente mayor entre esas variables para 458 piezas estructurales de pino resinoso del nordeste del país. Para el criterio K esta autora publica un valor de R mayor en tablas ensayadas de plano (-0,68) que en vigas (-0,49), en tanto que para criterios basados en el desplazamiento (KAR) encontró valores de R variando entre -0,63 y -0,64 para vigas y un valor igual a -0,66 para tablas.

Resulta también de interés conocer si la nudosidad afecta el módulo de elasticidad del material estudiado. Con ese propósito se exhiben en la Tabla 4.18 los principales resultados que definen la relación entre ambas variables. Además de los valores del coeficiente de correlación de Pearson (R), indicados para las distintas muestras, el nivel de la probabilidad asociada (valor-P) permite identificar los casos en que las correlaciones son significativas con un nivel de

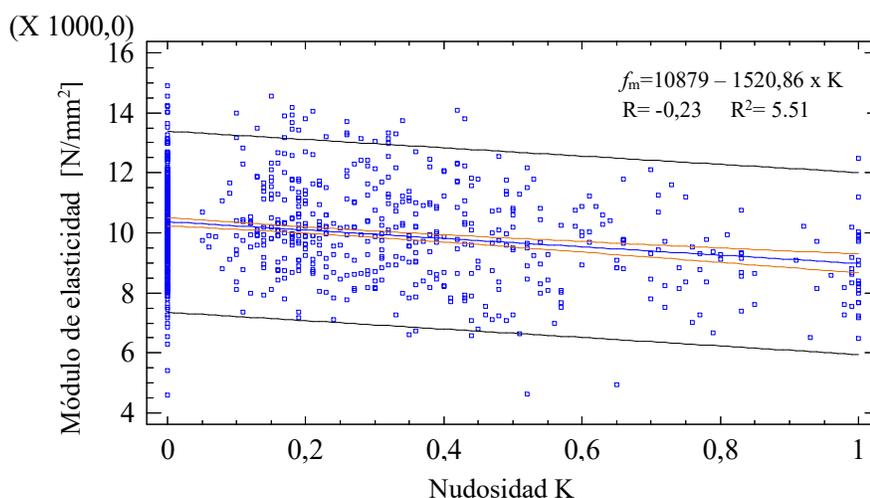
confianza del 95%. Los valores de R presentados en esta tabla indican en general una menor correlación de la nudosidad con la rigidez que con la resistencia. Además de ello, existen 5 casos en que la correlación no es significativa (valor-P > 0,05). El hecho de que el valor del módulo de elasticidad se determine en período elástico (Norma UNE EN 408 2011), con un valor de las tensiones sustancialmente menor al de rotura, puede explicar ese menor impacto de la nudosidad sobre la rigidez que sobre la resistencia.

**Tabla 4.18:** Principales resultados del estudio de la relación entre la nudosidad y el módulo de elasticidad en flexión

Muestra	Clon	Parámetro	Coefficiente de correlación (R)	Valor-P	n
1	A	K	-0,40	<0,05	296
6	S	K	-0,29	<0,05	150
1 y 6	Ambos	K	-0,35	<0,05	446
2 a 5	A	K	-0,36	<0,05	206
7 a 10	S	K	-0,41	<0,05	191
2 a 5 y 7 a 10	Ambos	K	-0,22	<0,05	397
4 y 5	A	K	-0,36	<0,05	93
		KAR	-0,40	<0,05	93
		KARs	-0,22	<0,05	93
		KARi	-0,24	<0,05	93
		KARe	-0,33	<0,05	93
9 Y 10	S	K	-0,52	<0,05	94
		KAR	-0,46	<0,05	94
		KARs	-0,13	>0,05	94
		KARi	-0,40	<0,05	94
		KARe	-0,44	<0,05	94
4, 5, 9 y 10	Ambos	K	-0,15	<0,05	187
		KAR	-0,11	>0,05	187
		KARs	-0,10	>0,05	187
		KARi	-0,09	>0,05	187
		KARe	-0,13	>0,05	187

En el Capítulo 3 se explican en detalle los 5 criterios para evaluar la nudosidad. El módulo de elasticidad para la determinación de las correlaciones está ajustado a la humedad de referencia del 12% de acuerdo a la norma UNE-EN 384 (2010). n: número de piezas

El criterio K emerge también como el más apropiado para predecir la rigidez, confirmando el buen desempeño ya señalado anteriormente para la resistencia. La Figura 4.13 exhibe la relación de la nudosidad K con el módulo de elasticidad para la totalidad de los cuerpos de prueba. Junto al diagrama de dispersión también se exhibe la ecuación de la recta de regresión lineal, el coeficiente de correlación (R) y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) que indica la proporción de variabilidad de la rigidez que es explicada por la variación de K.



**Figura 4.13:** Relación entre el criterio K y el módulo de elasticidad en flexión para el conjunto de los cuerpos de prueba ensayados a flexión.

$f_m$ : resistencia a la flexión. R: coeficiente de correlación.  $R^2$ : Coeficiente de determinación

Los resultados alcanzados demuestran que la dimensión de los nudos es una singularidad que debe ser tenida en cuenta al definir los parámetros de un método de clasificación visual. Del análisis expuesto anteriormente, el criterio K para expresar la nudosidad emerge como el más efectivo para predecir la influencia de los nudos sobre las propiedades mecánicas del material investigado.

### Influencia de la inclinación de las fibras sobre la resistencia y la rigidez en flexión

Con el fin de evaluar el impacto de esta singularidad sobre la resistencia a la flexión, en la Tabla 4.19 se presentan los coeficientes de correlación (R) y el valor-P, obtenidos a través de un análisis de regresión simple entre ambas variables. Los resultados indican una débil

relación entre las mismas, con valores de R que alcanzan -0,30, -0,35 y -0,31 para el clon 'Australiano 129/60', el 'Stoneville 67' y el total de piezas, respectivamente. Este último valor indica una correlación menor que la obtenida entre la nudosidad K y la resistencia para el conjunto del material (R = -0,38, ver la Figura 4.7). En todos los casos el valor-P hallado indica que hay una relación estadísticamente significativa entre las variables.

**Tabla 4.19:** Relación entre la resistencia a flexión y la inclinación de las fibras

Muestras	Clon	Coefficiente de correlación (R)	Valor-P	n
1 a 5	A	-0,30	<0,05	493
6 a 10	S	-0,35	<0,05	341
1 a 10	Ambos	-0,31	<0,05	834

n: número de piezas. "A": clon 'Australiano 129/60'. "S": clon 'Stoneville 67'. La resistencia a la flexión utilizada estaba ajustada a la altura de referencia de 150 mm de acuerdo a la norma UNE-EN 384 2010.

Con el propósito de conocer el efecto que sobre la resistencia ocasiona la superación de una inclinación de 1/14, adoptada como límite para madera de elevada calidad por normas de relevancia internacional (DIN 4074-1 2012), se realizó un análisis particular. Los resultados mostraron que los 678 cuerpos de prueba con una inclinación de las fibras menor a 1/14 exhibieron un valor medio de la resistencia en flexión igual a 39,0 N/mm<sup>2</sup>, mientras que éste alcanzó 33,0 N/mm<sup>2</sup> en los 156 que superaron la inclinación mencionada. La prueba de Kruskal Wallis mostró diferencias significativas entre las piezas que presentaron una inclinación de las fibras menor y mayor que 1/14 (valor P < 0,05). Para el *Populus x euramericana* I-214, Spavento (2015) reporta una correlación menor (-0,10), con diferencias significativas de la resistencia entre las medias de los grupos que presentaban una inclinación de las fibras inferior a 1/14 y las que poseían una inclinación mayor.

En la Tabla 4.20 se presenta la información que permite conocer la relación entre la inclinación de las fibras y el módulo de elasticidad. Se puede apreciar una correlación muy débil, sin significancia estadística para el clon 'Stoneville 67', aunque para ambos clones en conjunto, el valor-P indica que existe una relación estadísticamente significativa. Los resultados del análisis particular mencionado en el párrafo anterior para la resistencia, pero en este caso

referido al módulo de elasticidad, indicaron valores medios de 10.186 N/mm<sup>2</sup> y 9.472 N/mm<sup>2</sup> para las piezas con una inclinación de las fibras menor y mayor a 1/14 respectivamente, lo cual indica una menor influencia de esta singularidad sobre la rigidez que sobre la resistencia. La prueba de Kruskal Wallis probó que existe una diferencia estadísticamente significativa (valor-P < 0,05) entre las poblaciones con un nivel del 95,0% de confianza. Spavento (2015) para el *Populus x euramericana* no encontró diferencias significativas en el LOGMOE determinado para las piezas con inclinación de las fibras mayor y menor a 1/14.

**Tabla 4.20:** Relación entre el módulo de elasticidad global y la inclinación de las fibras

Muestras	Clon	Coefficiente de correlación (R)	Valor-P	n
1 a 5	A	-0,16	<0,05	502
6 a 10	S	-0,09	>0,05	341
1 a 10	Ambos	-0,13	<0,05	843

n: número de piezas. "A": clon 'Australiano 129/60'. "S": clon 'Stoneville 67'. El módulo de elasticidad está ajustado a la humedad de referencia del 12%, norma UN EN 384 2010

### Influencia del espesor de los anillos de crecimiento sobre las propiedades mecánicas en flexión y la densidad

En la Tabla 4.21 se presenta el coeficiente de correlación (R) y el valor-P obtenidos al analizar la relación entre el espesor medio del anillo de crecimiento (tasa de crecimiento) y la resistencia a flexión. La información prueba la muy débil correlación existente entre ambas variables, que puede ignorarse para propósitos prácticos relacionados a la clasificación del material.

**Tabla 4.21:** Relación entre el espesor promedio del anillo de crecimiento y la resistencia a flexión

Muestras	Clon	Coefficiente de correlación (R)	Valor-P	n
1 a 5	A	0,02	>0,05	387
6 a 10	S	-0,12	<0,05	244
1 a 10	Ambos	-0,04	>0,05	631

n: número de piezas. "A": clon 'Australiano 129/60'. "S": clon 'Stoneville 67'

El valor-P indica que no existe una relación estadísticamente significativa entre las variables para el clon 'Australiano 129/60' y para el conjunto, en tanto que para el clon 'Stoneville 67' refiere una correlación significativa estadísticamente, aunque con un valor de R muy reducido (-0,12). La debilidad de la correlación va acompañada también de la existencia de resultados contradictorios, ya que R resulta positivo para el clon 'Australiano 129/60' y negativo para el 'Stoneville 67'. Para el *Populus x euramericana* I-214, Spavento (2015) reporta un coeficiente de correlación superior al encontrado en este estudio (-0,20). Fank (2018) publica valores de R que alcanzan -0,34 y -0,52 para vigas y tablas respectivamente, entre el anillo de mayor espesor y la resistencia del pino resinoso del nordeste del país.

La Tabla 4.22 exhibe los resultados del análisis de regresión lineal simple llevado a cabo entre el espesor medio del anillo de crecimiento y el módulo de elasticidad. Además de probarse una correlación muy débil, se puede apreciar que el valor-P indica en todos los casos que no existe una relación estadísticamente significativa entre las variables. Spavento (2015) reporta para el para el *Populus x euramericana* I-214 un coeficiente de correlación de -0,22 entre el espesor medio de los anillos y el LOGMOE. Para el pino resinoso mencionado anteriormente, Fank (2018) publica valores de R iguales a -0,34 y -0,65 para vigas y tablas respectivamente, obtenidos entre el anillo de mayor espesor y la resistencia.

**Tabla 4.22:** Relación entre el espesor promedio del anillo de crecimiento y el módulo de elasticidad

Muestras	Clon	Coefficiente de correlación (R)	Valor-P	n
1 a 5	A	-0,09	>0,05	391
6 a10	S	-0,11	>0,05	244
1 a 10	Ambos	-0,03	>0,05	635

n: número de piezas. "A": clon 'Australiano 129/60'. "S": clon 'Stoneville 67'

Considerando que la experiencia internacional reporta la existencia de una dependencia entre el espesor de los anillos y la densidad, sobre todo en coníferas (Hoffmeyer 1995), y que a su vez el sistema europeo de clases resistentes agrupa la madera aserrada obtenida de coníferas con la de álamo (UNE EN 338 2010), se estudió la relación mencionada para el material investigado. En la Tabla 4.23 se presentan los valores para R y el valor-P, donde

se puede apreciar la existencia de una correlación no significativa para el clon 'Stoneville 67' y significativa para el 'Australiano 129/60' y el conjunto. Además de la debilidad de la correlación, la misma es contradictoria para ambos clones ya que la correlación es negativa para el 'Stoneville 67' y positiva para el 'Australiano 129/60'. Estos resultados prueban que el espesor medio de los anillos de crecimiento no está estrecha y claramente vinculado a la densidad en la madera estudiada. Para el *Populus x euramericana* I-214, Spavento (2015) reporta un coeficiente de correlación de 0,21 del espesor medio de los anillos con la inversa de la densidad. Por su parte, Fank (2018) publica un valor de  $R = -0,48$  entre la densidad y el anillo de mayor espesor, en madera del pino resinoso ya mencionado. Para esta singularidad, sin embargo, esta autora informa una débil relación con las propiedades mecánicas.

**Tabla 4.23:** Relación entre el espesor promedio del anillo de crecimiento y la densidad

Muestras	Clon	Coefficiente de correlación (R)	Valor-P	n
1 a 5	A	0,20	<0,05	391
6 a 10	S	-0,07	>0,05	244
1 a 10	Ambos	0,19	<0,05	635

n: número de piezas. "A": clon 'Australiano 129/60'. "S": clon 'Stoneville 67'

El análisis realizado mostró que el espesor promedio de los anillos de crecimiento no posee una correlación con las propiedades mecánicas y la densidad que amerite su consideración en el desarrollo de una propuesta para clasificar visualmente por resistencia este material. Teniendo en cuenta, adicionalmente, las dificultades prácticas que implica su determinación visual, en adelante esta singularidad será descartada como parámetro visual en el diseño y análisis de perfiles de resistencia, rigidez y densidad. Estos resultados están en línea con los reportados por Piter *et al.* (2004) para el *Eucalyptus grandis* de la Mesopotamia, los cuales motivaron el descarte de esta singularidad como parámetro de clasificación para esa importante especie cultivada en nuestro país (IRAM 9662-2 2015).

#### 4.1.3. Desarrollo de modelos de clasificación visual

El análisis llevado a cabo en el Apartado 4.1.2 permitió conocer dos aspectos del comportamiento del material que resultan imprescindibles para desarrollar modelos de clasificación visual por resistencia:

- i. La resistencia y la rigidez del material investigado cuando es sometido a esfuerzos de flexión, así como su densidad aparente. Estas propiedades son consideradas fundamentales por la experiencia y el criterio europeo (UNE EN 384 2010) que luego fue adoptado por la normativa de Argentina (IRAM 9664 2013). Este criterio permite derivar los valores característicos de las restantes propiedades empleadas en el diseño estructural a partir de los obtenidos para estas propiedades consideradas fundamentales.
- ii. La relación entre las singularidades (que desempeñan el rol de parámetros visuales) y las propiedades antes mencionadas. Esto permite seleccionar las de mayor valor predictivo, para luego adoptar los límites que definen las distintas clases resistentes.

La discusión de los resultados presentados en el Apartado 4.1.2 proveyó también la información necesaria para decidir, previo a la elaboración de una propuesta basada en los aspectos citados más arriba, respecto de dos tópicos de particular relevancia para este material:

- i. La definición de la población, en términos de especie o grupo de especies y lugar de cultivo, a la cual aplicar el método de clasificación por resistencia. Esto implica considerar en forma conjunta o separada la madera obtenida de los clones 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67'.
- ii. La adopción de un criterio de aceptación o rechazo de las piezas afectadas por el ataque del insecto *Megaplatypus mutatus*.

Respecto del primero de los tópicos mencionados, la consideración en forma conjunta de la madera obtenida de los dos clones en estudio emerge como la solución más conveniente por las siguientes evidencias:

- i) La similitud entre los valores medios y los coeficientes de variación exhibidos por ambos clones para la resistencia a flexión, junto a la presencia de diferencias que no exceden el 13% entre los correspondientes valores medios del módulo de elasticidad

y la densidad, no justifican un tratamiento separado en un material de elevada variabilidad como es la madera estructural.

- ii) La constatación de una similar influencia de los principales parámetros visuales tales como presencia de nudos (nudosidad), médula e inclinación de las fibras sobre las propiedades mecánicas de la madera de ambos clones.
- iii) La facilidad de procesamiento del material y las consecuentes ventajas económicas y técnicas que emergen de un manejo conjunto. Este aspecto adquiere relevancia por las dificultades prácticas de diferenciar a simple vista la madera aserrada de ambos clones.
- iv) El beneficio que implica ampliar a todas las secciones estructurales el criterio adoptado por la norma IRAM 9662-4 (2015) para las tablas destinadas a la fabricación de madera laminada encolada o a ser sometidas a flexión de plano. Esta norma considera en forma conjunta a las tablas obtenidas de ambos clones.

Respecto del segundo tópico mencionado, referido al impacto que produce el ataque del insecto *Megaplatypus mutatus* sobre el comportamiento mecánico del material estudiado, la conveniencia de rechazar las piezas afectadas se sustenta en las siguientes razones:

- i) El análisis particular realizado en este trabajo (ver el Apartado 4.1.2), que puso en evidencia la conveniencia de revisar el criterio de rechazo para las piezas con ataque tipificado con el Grado 2 sin afectar la seguridad estructural, debe considerarse un aporte para resolver ese importante problema. No obstante, los resultados obtenidos deberían ser validados a través de un proyecto diseñado específicamente con ese objetivo, lo cual no está contemplado en los propósitos de esta investigación.
- ii) La ventaja operativa que implica mantener, hasta tanto se someta a revisión, el criterio de rechazo adoptado por la norma IRAM 9662-4 (2015).

### **Análisis de perfiles de resistencia, rigidez y densidad**

Considerando la madera de los clones en forma conjunta y descartando las piezas que rompieron en la zona afectada por el insecto *Megaplatypus mutatus*, fue posible elaborar y evaluar perfiles de resistencia, rigidez y densidad, tomando como base el conocimiento de las propiedades fisico-mecánicas fundamentales y su relación con las singularidades (parámetros

visuales). Como consecuencia de haber adoptado el criterio de rechazo antes señalado, todos los valores del rendimiento que se presenten en adelante para los distintos perfiles y grados de calidad estarán referidos al conjunto de cuerpos de prueba que no rompieron en la sección de la afección biológica mencionada en el Apartado 4.1.2.

Habiendo sido descartada la consideración del espesor de los anillos de crecimiento (ver el Apartado 4.1.2), como parámetros visuales fueron considerados la presencia de médula, la nudosidad K y la inclinación de las fibras.

En las Tablas 4.24a, 4.24b y 4.24c se presentan por separado para las tablas, las vigas y el conjunto del material, respectivamente, 6 perfiles conteniendo clases resistentes con los correspondientes límites para los parámetros seleccionados. La presentación de perfiles separados para tablas y vigas responde al propósito de conocer si tanto los valores de las propiedades como el rendimiento económico presentan diferencias que justifiquen la existencia de métodos distintos de clasificación para ambos tipos de piezas estructurales. Para la resistencia a flexión se exhiben el percentil 5% ( $f_{m,05}$ ) y el valor característico ( $f_{m,k}$ ), para el módulo de elasticidad global se presenta el valor medio ( $E_{m,g}$ ) y para la densidad se detalla tanto el valor medio ( $\rho_m$ ) como el característico ( $\rho_k$ ). En todos los casos los resultados están ajustados a las condiciones de referencia y los valores característicos calculados conforme al criterio de las normas europeas (UNE EN 384 2010). Con el propósito de evaluar el rendimiento, en cada caso se indica el número de piezas asignadas a cada una de las calidades definidas, y el porcentaje correspondiente.

En el Anexo I, Apartado V-4.1.3 “Desarrollo de modelos de clasificación visual”, ítem “Análisis de la normalidad de las distribuciones para cada perfil”, se presentan los análisis de normalidad para los distintos perfiles.

La información presentada en las tres tablas confirma que las diferencias existentes entre los resultados correspondientes al conjunto y a las tablas y vigas por separado son despreciables para propósitos vinculados a la clasificación por resistencia de un material de elevada variabilidad natural como es la madera estructural.

**Tabla 24a:** Perfiles de resistencia, rigidez y densidad para las tablas (muestras 1 y 6)

	Perfiles	$f_{m,05} / f_{m,k}$	$E_{m,g}$	$\rho_m / \rho_k$	Cantidad	
		N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	n	(%)
1	Todos	25,0 / 22,5	9.763	426 / 368	437	(100)
2	SM	26,1 / 23,5	9.877	427 / 369	294	(67)
	AM	24,9 / 21,7	9.529	422 / 368	143	(33)
3	S SM; K<1/3; IF<1/9	27,7 / 24,9	10.155	422 / 367	231	(53)
	I AM; K<2/3; IF<1/9	23,9 / 21,0	9.452	427 / 369	174	(40)
	D Descarte	23,5 / 17,9	8.627	441 / 369	32	(7)
4	S SM; K<1/3; IF<1/14	29,3 / 26,4	10.213	423 / 368	201	(46)
	I AM; K<2/3; IF<1/9	24,8 / 22,3	9.497	425 / 369	204	(47)
	D Descarte	23,5 / 17,9	8.627	441 / 369	32	(7)
5	S SM; K<1/4; IF<1/9	27,7 / 24,9	10.258	422 / 367	207	(47)
	I AM; K<3/4; IF<1/9	24,3 / 21,9	9.408	427 / 370	204	(47)
	D Descarte	24,3 / 18,5	8.610	449 / 380	26	(6)
6	S SM; K<1/5; IF<1/9	27,3 / 24,6	10.288	422 / 367	199	(46)
	I AM; K<1/2; IF<1/9	24,9 / 22,2	9505	426 / 369	187	(42)
	D Descarte	19,7 / 15,6	8.663	439 / 376	51	(12)

Las referencias se encuentran al pie de la Tabla 24c

**Tabla 24b:** Perfiles de resistencia, rigidez y densidad para las vigas (muestras 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9 y 10)

	Perfiles	$f_{m,05} / f_{m,k}$	$E_{m,g}$	$\rho_m / \rho_k$	Cantidad	
		N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	n	(%)
1	Todos	21,2 / 19,1	10.385	434 / 369	397	(100)
2	SM	22,6 / 20,3	10.292	428 / 360	262	(66)
	AM	18,1 / 15,6	11.565	445 / 385	137	(34)
3	S SM; K<1/3; IF<1/9	26,4 / 23,7	10.560	428 / 363	189	(48)
	I AM; K<2/3; IF<1/9	21,0 / 18,5	10.494	440 / 371	168	(42)
	D Descarte	16,7 / 12,7	9.097	431 / 354	40	(10)
4	S SM; K<1/3; IF<1/14	27,7 / 24,3	10.700	432 / 370	159	(40)
	I AM; K<2/3; IF<1/9	21,2 / 19,1	10.392	435 / 366	198	(50)
	D Descarte	16,7 / 12,7	8.805	431 / 354	40	(10)
5	S SM; K<1/4; IF<1/9	26,6 / 23,4	10.517	426 / 366	160	(40)
	I AM; K<3/4; IF<1/9	22,2 / 20,0	10.528	441 / 371	205	(52)
	D Descarte	16,7 / 12,7	8.805	423 / 352	32	(8)
6	S SM; K<1/5; IF<1/9	28,8 / 24,8	10.481	428 / 370	137	(35)
	I AM; K<1/2; IF<1/9	22,4 / 20,0	10.652	438 / 369	188	(47)
	D Descarte	18,2 / 14,7	9.504	433 / 357	72	(18)

Las referencias se encuentran al pie de la Tabla 24c

**Tabla 24c:** Perfiles de resistencia, rigidez y densidad para todas las piezas (muestras 1 a 10)

Perfiles		$f_{m,05} / f_{m,k}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{m,g}$ N/mm <sup>2</sup>	$\rho_m / \rho_k$ Kg/m <sup>3</sup>	Cantidad n (%)	
1	Todos	23,3 / 21,0	10.059	430 / 369	834	(100)
2	SM	24,3 / 21,9	10.072	427 / 366	556	(67)
	AM	21,7 / 19,5	10.032	434 / 371	278	(33)
3	S SM; K<1/3; IF<1/9	27,0 / 24,3	10.337	425 / 367	420	(50)
	I AM; K<2/3; IF<1/9	22,6 / 20,3	9.963	434 / 370	342	(41)
	D Descarte	18,2 / 14,7	8.888	436 / 357	72	(9)
4	S SM; K<1/3; IF<1/14	29,0 / 26,1	10.428	427 / 370	360	(43)
	I AM; K<2/3; IF<1/9	23,3 / 21,0	9.938	430 / 369	402	(48)
	D Descarte	18,2 / 14,7	8.888	436 / 357	72	(9)
5	S SM; K<1/4; IF<1/9	27,3 / 24,6	10.371	424 / 367	367	(44)
	I AM; K<3/4; IF<1/9	22,6 / 20,3	9.970	434 / 370	409	(49)
	D Descarte	16,7 / 13,4	8.717	434 / 357	58	(7)
6	S SM; K<1/5; IF<1/9	28,3 / 25,5	10.367	423 / 358	336	(40)
	I AM; K<1/2; IF<1/9	23,5 / 21,2	10.080	432 / 369	375	(45)
	D Descarte	19,7 / 16,7	9.156	435 / 369	123	(15)

$f_{m,05}$  y  $f_{m,k}$ : percentil 5% y valor característico, respectivamente, de la resistencia a flexión (UNE EN 384 2010);  $E_{m,g}$ : valor medio del módulo de elasticidad global (UNE EN 384 2010);  $\rho_m$  y  $\rho_k$ : valor medio y valor característico, respectivamente, de la densidad (UNE EN 384 2010); SM: Sin médula; AM: admite médula; K: nudosidad de acuerdo la definición del capítulo 3; IF: inclinación de las fibras; S: Grado Superior; I: Grado Inferior; D: Descarte.

Para realizar la comparación entre comportamiento a la flexión de las tablas y las vigas se utilizó la muestra clasificada en los tres grados definidos en el perfil 3 (IRAM 9662-4 2015), la comparación se realizó entre las tablas, las vigas y la muestra completa, los valores se exhiben en las Tablas 24a, 24b y 24c. Para la resistencia a la flexión la prueba de Kruskal Wallis indicó diferencias no significativas en los tres grados de calidad de tablas, vigas y la muestra completa (valor-P >0,5). Para el módulo de elasticidad, la misma prueba, mostró diferencias no significativas en el Grado Superior (valor-P > 0,5) y diferencias significativas en el Grado Inferior (11% entre los valores medios) y el descarte (valor-P < 0,05). En el Anexo I, Apartado V-4.1.3 “Desarrollo de modelos de clasificación visual”, ítem “Comparación de las propiedades en los grupos: tablas, vigas y muestra completa”, se presenta el detalle del análisis. Esta confirmación pone en evidencia la conveniencia de continuar el estudio con el conjunto del material (Tabla 4.24c), con el fin de proponer perfiles que puedan servir de base para la adopción de un método de clasificación por resistencia.

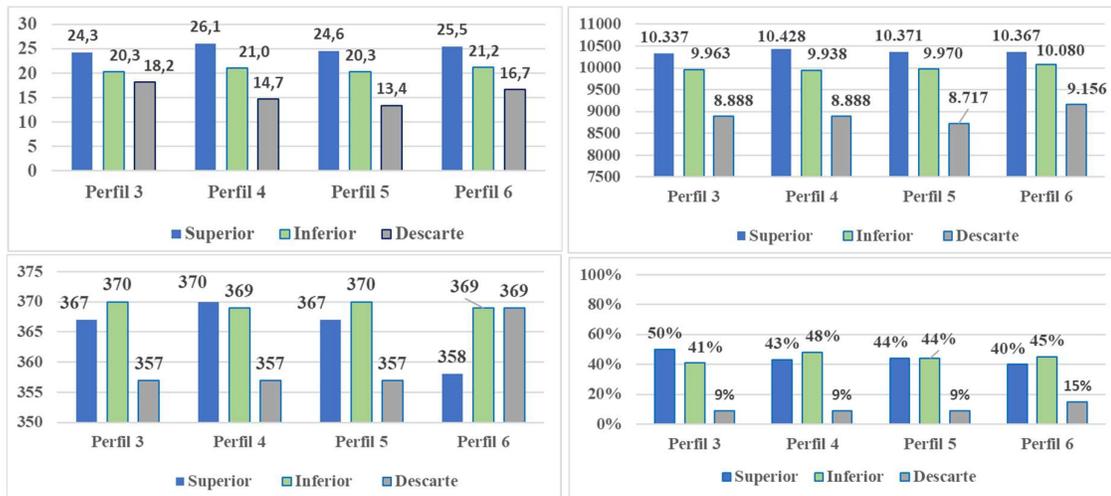
La adopción de perfiles validados para todas las secciones estructurales, además de implicar evidentes ventajas prácticas para el sector productivo vinculado a la temática, está en línea con la propuesta de Piter *et al.* (2004) para el *Eucalyptus grandis* de la Mesopotamia, luego adoptada por el Reglamento CIRSOC 601 (INTI CIRSOC 2016a) que hizo extensiva a todas las secciones estructurales la aplicación del método de clasificación adoptado inicialmente para tablas por la norma IRAM 9662-2 (2015).

El contenido de la Tabla 4.24c muestra un primer perfil que sirve de referencia inicial, pues presenta los resultados obtenidos para el conjunto del material. El segundo perfil, por su parte, permite apreciar la influencia de la presencia de médula sobre las propiedades. En congruencia con los resultados presentados en el Apartado 4.1.2, esa influencia se manifiesta sobre el valor característico de la resistencia (12% de diferencia); siendo despreciable sobre la rigidez y la densidad para finalidades prácticas ligadas al diseño estructural.

Los restantes perfiles (del 3 al 6) incorporan otros dos parámetros de clasificación: la nudosidad (K) y la inclinación de las fibras. Estos 4 perfiles contemplan dos grados estructurales (clases resistentes) denominados Grado Superior (S) y Grado Inferior (I) y material de Descarte (D). Difieren entre sí por los límites adoptados para los parámetros en cada grado, los que son indicados en cada caso. La Figura 4.14 facilita el análisis de estos 4 perfiles, grafica la variación que se obtiene para la resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad, la densidad y el rendimiento.

El Perfil 3 muestra los mismos límites entre clases que los correspondientes al método de clasificar adoptado por la norma IRAM 9662-4 (2015) para tablas y, en consecuencia, en adelante será tomado como referencia para el análisis. Este perfil presenta un muy elevado rendimiento para la muestra completa, con el 50% de las piezas asignadas al Grado Superior y el 41% al Grado Inferior. A través de un estudio detallado se comprobó que el material descartado (9%) estuvo constituido por piezas cuya nudosidad excedió el límite establecido para el Grado Inferior ( $K > 2/3$ ) y que no se registraron piezas con una inclinación de las fibras superior a  $1/9$ , lo cual es concordante con los resultados discutidos en los apartados precedentes (4.1.1 y 4.1.2). A su vez, este perfil permite superar los valores característicos de la resistencia adoptados por la norma mencionada, que alcanzan  $24,0 \text{ N/mm}^2$  y  $18,0 \text{ N/mm}^2$  en la primera y segunda clase, respectivamente, y también los valores medios adoptados por la norma para el

módulo de elasticidad (10.200 N/mm<sup>2</sup> y 9.000 N/mm<sup>2</sup>). No obstante, en ningún caso en este perfil, como así tampoco en los restantes presentados en la Tabla 4.24c, se alcanza el valor característico de la densidad adoptado por la norma IRAM 9662-4 (2015), que es de 400 kg/m<sup>3</sup> para las dos clases resistentes. En este último aspecto debe señalarse que, si bien con valores menores, los resultados obtenidos para esta propiedad son congruentes con los adoptados por la norma en cuanto a la similitud exhibida por los distintos grados de calidad. En el Anexo I, Apartado V-4.1.3 “Desarrollo de modelos de clasificación visual”, ítem “Comparación entre de los valores de las propiedades para cada grado en el perfil 3”, se presentan los análisis estadísticos que muestran las diferencias entre cada grado de ese perfil.



**Figura 4.14:** Variación de la resistencia a la flexión, módulo de elasticidad, densidad, y rendimiento para los perfiles de clasificación 1 a 4.

Arriba: a la izquierda la resistencia a la flexión en N/mm<sup>2</sup> y a la derecha el módulo de elasticidad en N/mm<sup>2</sup>.  
Abajo: a la izquierda la densidad en kg/m<sup>3</sup> y a la derecha el rendimiento en %.

El Perfil 4 difiere del 3 en el límite adoptado para la inclinación de las fibras en el Grado Superior. Este límite más estricto (1/14) provoca un incremento del 7% en el valor característico de la resistencia en el Grado Superior (26,1 N/mm<sup>2</sup>) respecto del obtenido en el perfil 3 (24,3 N/mm<sup>2</sup>) y del 3% en el Grado Inferior. No obstante, la influencia de este cambio de límite se traduce en variaciones del módulo de elasticidad y la densidad que pueden ignorarse conforme al propósito de esta investigación. A su vez, provoca que 60 piezas que en el Perfil 3

son asignadas al Grado Superior, deban insertarse en el Grado Inferior, disminuyendo el porcentaje de rendimiento en la mejor calidad de 50% a 43%.

Los últimos dos perfiles (5 y 6) coinciden con los requerimientos del Perfil 3 salvo en los límites establecidos para la nudosidad K. No obstante ser más restrictivos los límites para K en el Grado Superior del Perfil 5 y en ambos grados del Perfil 6, la observación de los resultados obtenidos evidencia un impacto similar al expuesto anteriormente para el Perfil 4, es decir variaciones que no adquieren valor práctico para las propiedades mecánicas y la densidad; acompañadas de un detrimento del rendimiento en el Grado Superior.

En el Anexo I, Apartado V-4.1.3 “Desarrollo de modelos de clasificación visual”, ítem “Comparación entre los valores de las propiedades resistentes de los Grados Superior e Inferior para cada perfil”, se presentan los resultados de los análisis estadísticos de la comparación de las propiedades resistentes que resultaron de aplicar los límites definidos en cada uno de perfiles para los Grados de calidad Superior e Inferior.

Es de destacar que las relaciones entre las propiedades expresadas por  $f_{m,k} / \rho_k$  y  $E_{m,g} / \rho_k$  (Tabla 4.24c), están en línea con las adoptadas por la normativa europea (UNE EN 338 2010) para madera de coníferas y álamo, y son mucho más elevadas que las publicadas por la normativa mencionada para madera de latifoliadas; lo cual constituye una evidente ventaja para un material estructural. Esta particular ventaja fue encontrada también en la madera de *Eucalyptus grandis* cultivado en la Mesopotamia de nuestro país (Piter *et al.* 2004).

### **Propuesta de un modelo para la clasificación visual por resistencia del material investigado**

El perfil 3 (En el Grado Superior no admite médula y exige una nudosidad  $K < 1/3$  y en el Grado Inferior admite médula y exige una nudosidad  $K < 2/3$ , en ambos casos con una inclinación de las fibras menor a  $1/9$ ) es el que en el análisis del apartado anterior permitió obtener un rendimiento superior al de los restantes perfiles desde un punto de vista técnico-económico y provee la evidencia necesaria para: i) soportar la propuesta de hacer extensivo a todas las secciones estructurales el método visual de clasificación adoptado por la norma IRAM 9662-4 (2015) para tablas destinadas a la fabricación de madera laminada encolada o a ser

flexionadas de plano (INTI CIRSOC 601 2016a) y, ii) confirmar, a través del nivel de las propiedades mecánicas y de su elevado rendimiento, la aptitud de este material para ser utilizado en piezas estructurales con diversas dimensiones en su sección transversal. Se destacan particularmente los siguientes aspectos:

- i. La clasificación del material investigado según los principales parámetros visuales puso de manifiesto que razones técnicas y económicas justifican dar un tratamiento conjunto a todas las secciones estructurales.
- ii. El análisis de perfiles con distintos límites para los principales parámetros visuales confirmó que el criterio adoptado por la norma mencionada, plasmado en el Perfil 3 de la Tabla 4.24c, optimiza el resultado si se consideran simultáneamente el nivel alcanzado para las propiedades mecánicas y el rendimiento económico.
- iii. Las ventajas de carácter práctico y operativo que, para el sector productivo y el profesional, implica continuar utilizando un método de clasificación ya vigente para tablas pero con un campo de aplicación ampliado a la totalidad de las piezas estructurales del material investigado.
- iv. El alcance de una mayor homogeneidad en el tratamiento de la madera estructural producida en el país, considerando que el Reglamento CIRSOC 601 (INTI CIRSOC 2016a) ya hizo extensivo a todas las secciones estructurales de *Eucalyptus grandis* el método de clasificación adoptado para tablas por la norma IRAM 9662-2 (2015).
- v. La necesidad de revisar el valor característico de la densidad adoptado por la norma IRAM 9662-4 (2015) para los dos grados resistentes ( $400 \text{ kg/m}^3$ ), ya que no fue alcanzado en ninguna calidad de los perfiles analizados en este trabajo (Tabla 4.24).
- vi. La existencia de valores prácticamente coincidentes de la densidad en los distintos grados de calidad analizados, lo cual está en línea con el criterio adoptado por la norma IRAM 9662-4 (2015).
- vii. La comprobación de que las relaciones entre las propiedades expresadas por  $f_{m,k} / \rho_k$  y  $E_{m,g} / \rho_k$  están en línea con las adoptadas por la normativa europea (UNE EN 338 2010) para madera de coníferas y álamo; y son más elevadas que las publicadas por la normativa mencionada para madera de latifoliadas.

- viii. Los valores alcanzados para la resistencia a la flexión, módulo de elasticidad y densidad en los Grados Superior e Inferior se corresponden a los exigidos en las clases C24 y C20 respectivamente de la norma UNE EN 338 2010.

Por lo expuesto se propone utilizar como pautas de clasificación visual para todas las secciones transversales de *Populus deltoides*, clones ‘Australiano 129/60’ y ‘Stoneville 67’, cultivados en el delta del río Paraná, a las explicitadas en el Perfil 3 que contemplan tres calidades en base a los siguientes límites: i) Calidad Superior: ausencia de médula, nudosidad K menor a 1/3 e inclinación de las fibras menor a 1/9, ii) Calidad Inferior: admite médula, nudosidad K menor a 2/3 e inclinación de las fibras menor a 1/9 y iii) Descarte: incluye a las piezas que no califican en los grados anteriores. Se debe contemplar además que no se admite ataque de insectos ni signos de pudrición. Para las fendas, gemas y deformaciones previas se deberían contemplar las pautas de la norma UNE EN 14081-1(2016).

#### **4.2. CONDICIONES DE REFERENCIA E INTERRELACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS**

Como fue expresado en el Capítulo 2, las propiedades mecánicas y la densidad de la madera reciben la influencia de variables que le asignan un perfil particular como material estructural. Esta circunstancia hace que deban adoptarse condiciones de referencia a las cuales ajustar los valores característicos de las propiedades y de esa manera alcanzar valores comparables y un desempeño estructural con un nivel de confiabilidad conocido.

Por su parte, y aun considerando su fuerte anisotropía y heterogeneidad, es posible encontrar relaciones entre las distintas propiedades de este material, lo que permite derivar analíticamente a partir del conocimiento empírico de las consideradas fundamentales (resistencia y rigidez en flexión, y densidad), los valores de las restantes propiedades (UNE EN 384 2010). Sin embargo, es importante enfatizar la conveniencia de comprobar experimentalmente la precisión de las relaciones adoptadas por diversos cuerpos normativos cuando se investigan nuevas combinaciones especie / procedencia como la abordada en este trabajo (Glos 1995b).

El desarrollo de este Apartado se focaliza en la verificación experimental de 4 aspectos vinculados a estas particulares características del comportamiento de la madera como material estructural (influencia de las dimensiones de la sección transversal, relación entre las propiedades en flexión y en compresión paralela y perpendicular a las fibras, relación entre las propiedades en flexión y en tracción paralela y determinación del módulo de elasticidad libre de la influencia del corte), con el propósito de verificar la efectividad del criterio europeo para evaluarlas, el cual luego fue adoptado en Argentina (IRAM 9664 2013).

#### **4.2.1. La resistencia en flexión y su relación con las dimensiones de la sección transversal de la viga**

En el Capítulo 2 se expresó que la influencia del tamaño de la sección transversal sobre la resistencia a flexión es considerada por las reglas de diseño nacionales (INTI CIRSOC 601 2016a) siguiendo la experiencia europea (UNE EN 384 2010). Según ésta, la tensión de rotura decrece al aumentar la altura de la viga ( $h$ , expresada en mm) acorde a la relación formulada por el factor  $k_h = (150 / h)^{0,2}$ , y es independiente de su ancho. La adopción de este criterio implica tomar como altura de referencia el valor de 150 mm, que resulta adecuado considerando el tamaño de las piezas estructurales habitualmente producidas en Argentina. En este apartado se presentan y discuten los resultados de un estudio orientado a conocer la influencia que el tamaño de la sección transversal ejerce sobre la tensión de rotura a flexión en piezas aserradas de la madera investigada. En particular se analiza la efectividad del criterio europeo, adoptado por las reglas de diseño de Argentina.

En el Apartado 4.1.3 se presentaron las evidencias que sustentan la conveniencia de considerar en forma conjunta la madera obtenida de los dos clones en estudio. No obstante, y con el propósito de comprobar si el comportamiento de la madera de ambos clones difiere en relación al tema específico abordado en este apartado, en las Tabla 4.25a y 4.25b se presentan los valores de la tensión de rotura ( $f_m^*$ ) de las 834 probetas, discriminadas por clon y muestra. Se puede apreciar para ambos clones que los valores medios muestran una tendencia general decreciente a medida que aumenta la altura de la sección.

La Figura 4.9 exhibe la relación entre la tensión de rotura a flexión y la altura de la sección discriminada para ambos clones. A través de un análisis estadístico se encontró un valor

del coeficiente de correlación (R) entre ambas variables igual a -0,58 para el 'Australiano 129/60' e igual a -0,44 para el 'Stoneville 67'. El mismo análisis mostró una correlación significativa entre las variables (valor-P<0,05).

**Tabla 4.25a:** Tensión de rotura en flexión para las 5 muestras del clon 'Australiano 129/60'

Parámetro	Muestras				
	1	2	3	4	5
	Dimensiones nominales: ancho (mm) x alto (mm)				
	100x25	50x75	25x100	50x100	50x150
$f_m^*$ Mínimo [N/mm <sup>2</sup> ]	28,5	29,5	18,1	19,4	18,5
Medio [N/mm <sup>2</sup> ]	56,0	42,6	39,0	41,2	40,1
Máximo [N/mm <sup>2</sup> ]	81,4	52,3	55,1	64,7	59,0
COV [%]	18	14	26	25	24
n	287	48	65	49	44

$f_m^*$ : tensión de rotura sin corrección por altura.

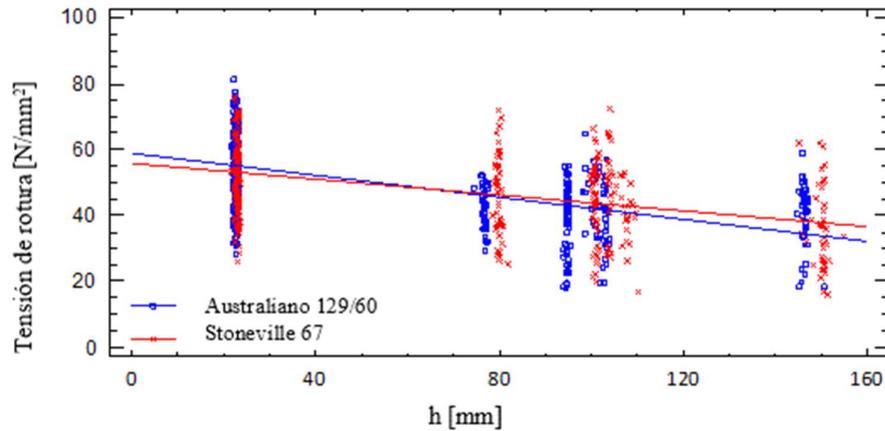
**Tabla 4.25b:** Tensión de rotura en flexión para las 5 muestras del clon 'Stoneville 67'

Parámetro	Muestras				
	6	7	8	9	10
	Dimensiones nominales: ancho (mm) x alto (mm)				
	100x25	50x75	25x100	50x100	50x150
$f_m^*$ Mínimo [N/mm <sup>2</sup> ]	26,1	25,1	16,6	19,7	16,2
Medio [N/mm <sup>2</sup> ]	52,8	46,6	44,4	43,8	36,6
Máximo [N/mm <sup>2</sup> ]	76,0	72,1	72,4	66,0	62,2
COV [%]	20	27	27	27	33
n	150	48	49	49	45

$f_m^*$ : tensión de rotura sin corrección por altura.

Considerando que los resultados exhibidos en las Tablas 4.25a y 4.25b, y en la Figura 4.15 no presentan diferencias que justifiquen continuar un estudio separado de ambos clones, el análisis se continúa en forma conjunta, agrupando las muestras con cuerpos de prueba de iguales dimensiones en su sección transversal.

Los principales resultados de la tensión de rotura ( $f_m^*$ ) son presentados de esta manera en la Tabla 4.26, en la cual también se indica la denominación adoptada para cada muestra agrupada, conformada por las dos muestras de origen ya presentadas en el Apartado 3.1.



**Figura 4.15:** Relación entre la tensión de rotura en flexión y la altura de las piezas ensayadas

Se observa en esta tabla una tendencia decreciente de los valores medios de  $f_m^*$  al aumentar la altura ( $h$ ) de los cuerpos de prueba, tanto en las tres muestras con cuerpos de igual ancho (II<sub>50x75</sub>, IV<sub>50x100</sub> y V<sub>50x150</sub>) como en la que exhibe los de mayor ancho (I<sub>100x25</sub>) y en aquella con el menor (III<sub>25x100</sub>), lo cual revela la existencia de una relación entre  $f_m^*$  y  $h$ . Por otra parte, es de destacar que los valores medios de  $f_m^*$  en las muestras III<sub>25x100</sub> (41,3 N/mm<sup>2</sup>) y IV<sub>50x100</sub> (42,5 N/mm<sup>2</sup>) presentan una diferencia exigua (menor a 3%) si se tiene en cuenta la variabilidad natural del material, y las dos exhiben similar coeficiente de variación (27% y 26%). La aplicación de la prueba de Kruskal Wallis a las muestras III<sub>25x100</sub> y IV<sub>50x100</sub> de  $f_m^*$  presenta un valor-P > 0,05, indicando que no existen diferencias significativas entre ambos grupos, con un nivel de confianza del 95%. (Anexo I, Apartado I.4.2. “condiciones de referencia e interrelación de las propiedades físico-mecánicas”, ítem “La resistencia en flexión y su relación con las dimensiones de la sección transversal de la viga”). Considerando que III<sub>25x100</sub> y IV<sub>50x100</sub> contienen cuerpos de prueba con la misma altura nominal (100 mm), pero que el ancho de los mismos en la última (50 mm) es el doble que en la primera (25 mm), estos resultados sugieren la inexistencia de una relación entre  $f_m^*$  y el ancho de la sección. El análisis de regresión entre

$f_m^*$  y el ancho presenta un coeficiente de correlación (R) de 0,11 y un valor-P > 0,05, avalando la afirmación precedente con un nivel de confianza del 95%.

**Tabla 4.26:** Tensión de rotura para las muestras agrupadas de iguales dimensiones de la sección transversal

Muestras agrupadas	Muestras				
	I <sub>100x25</sub>	II <sub>50x75</sub>	III <sub>25x100</sub>	IV <sub>50x100</sub>	V <sub>50x150</sub>
Muestras de origen	1 y 6	2 y 7	3 y 8	4 y 9	5 y 10
$f_m^*$ Mínimo [N/mm <sup>2</sup> ]	26,1	25,1	16,6	19,4	16,2
Medio [N/mm <sup>2</sup> ]	54,9	44,6	41,3	42,5	38,3
Máximo [N/mm <sup>2</sup> ]	81,4	72,1	72,4	66	62,2
COV [%]	19	22	27	26	29
n	437	96	114	98	89

$f_m^*$ : tensión de rotura sin corrección por altura.

La dispersión de resultados de  $f_m^*$  fue similar en las 5 muestras, con valores del coeficiente de variación entre 19% y 29%. El análisis de regresión lineal simple puso en evidencia una correlación negativa moderada (valor-P<0,05) entre la altura de la sección y la tensión de rotura, con un valor del coeficiente de correlación (R) de -0,53.

### Análisis de la efectividad del criterio europeo

Para el análisis se consideró la muestra en conjunto y dividida en grados resistentes de acuerdo al criterio definido en el Perfil 3 de la Tabla 4.24c, el cual produjo el mayor rendimiento del material desde un punto de vista técnico-económico. Debido a las diferencias existentes en el tamaño de las muestras y a que éstas no exhiben la misma dispersión de resultados, lo cual puede advertirse a través de los correspondientes valores del COV, se decidió realizar el análisis sobre la base de los valores medios y no del percentil 5%. En la Tabla 4.27 se presentan los valores medios de la tensión de rotura ( $f_{m-m}^*$ ) en forma discriminada para las muestras y los grados estructurales. La Tabla mencionada provee también para cada caso el valor del coeficiente de variación (COV) y la cantidad de cuerpos de prueba (n). Considerando que la muestra V<sub>50x150</sub> fue preparada con cuerpos de prueba exhibiendo una altura nominal coincidente con la de referencia (150 mm), y que su valor real promedio luego del cepillado fue 148 mm, se decidió ignorar esa exigua diferencia de 2 mm y considerar los resultados de  $f_{m-m}^*$

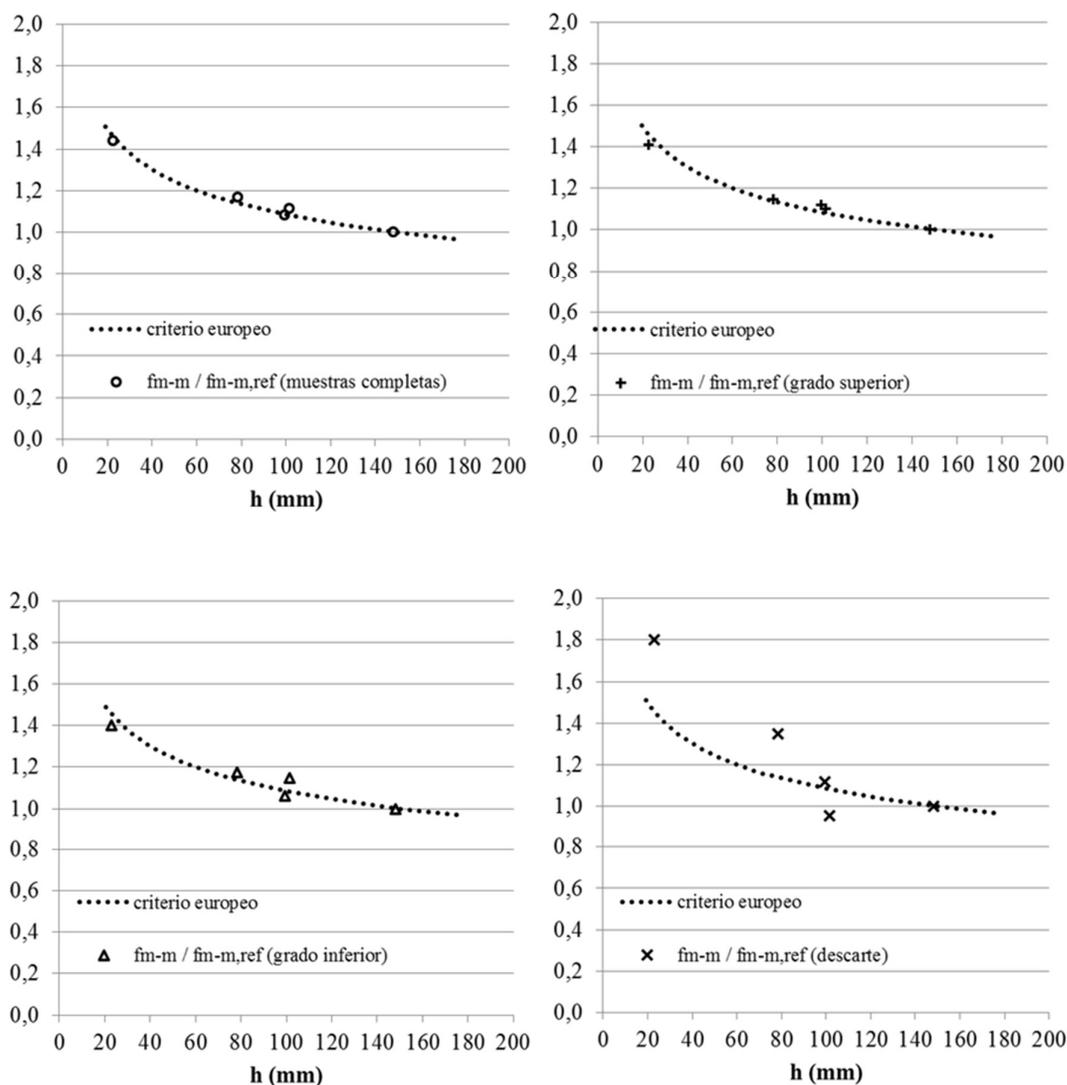
correspondientes a esta muestra como valor de referencia para el análisis dentro de cada grado estructural ( $f_{m-m,ref}^*$ ).

**Tabla 4.27:** Valores medios y coeficientes de variación de la tensión de rotura para las distintas muestras y grados estructurales

Perfil				Muestras				
				I 100 x 25	II 50 x 75	III 25 x 100	IV 50 x 100	V 50 x 150
1	Muestra completa	$f_{m-m}^*$	N/mm <sup>2</sup>	54,9	44,6	41,3	42,5	$f_{m-m,ref}^*=38,2$
		COV	%	19	22	27	26	29
		n		437	96	114	98	89
	Superior	$f_{m-m}^*$	N/mm <sup>2</sup>	58,2	47,3	46,2	45,5	$f_{m-m,ref}^*=41,3$
		COV	%	17	21	19	18	27
		n		231	49	55	38	47
3	Inferior	$f_{m-m}^*$	N/mm <sup>2</sup>	51,6	43,2	39,1	42,3	$f_{m-m,ref}^*=36,8$
		COV	%	19	22	28	28	26
		n		174	37	43	54	34
	Descarte	$f_{m-m}^*$	N/mm <sup>2</sup>	49,0	36,7	30,4	26,0	$f_{m-m,ref}^*=27,2$
		COV	%	17	20	32	27	29
		n		32	10	16	6	8

$f_{m-m}^*$ : valor medio experimental de la tensión de rotura en flexión.  $f_{m-m,ref}^*$ : valor de referencia. COV: coeficiente de variación. n: cantidad de cuerpos de prueba.

La observación de la Tabla 4.27 permite apreciar una disminución de  $f_{m-m}^*$  desde el Grado Superior hasta el descarte dentro de cada muestra. Esa disminución, que es más atenuada entre el Grado Inferior y el Descarte de la muestra I<sub>100x25</sub>, y entre el Grado Superior y el Grado Inferior de la Muestra IV<sub>50x100</sub>, ratifica en general la eficiencia del método de clasificación aplicado. También muestra que el valor de  $f_{m-m}^*$  tiende a disminuir con el aumento de la altura de la sección en las muestras completas y en el Grado Superior, y que esa tendencia decrece levemente en el Grado Inferior. Para apreciar el comportamiento del material ensayado en comparación con el admitido por la experiencia europea (UNE EN 384 2010), en la Figura 4.16 se exhibe la variación del factor  $k_h = (150 / h)^{0,2}$ , que formula el criterio europeo, junto a los resultados experimentales para cada calidad de madera, expresados por las relaciones entre  $f_{m-m}^*$  y  $f_{m-m,ref}^*$ . Con el fin de evitar superposiciones que dificulten la evaluación de los datos desplegados, éstos se presentan separadamente para las muestras completas y para cada grado estructural.



**Figura 4.16** Resultados experimentales comparados con el criterio de la norma europea UNE EN 384 (2010) para relacionar la tensión de rotura con la altura de la sección transversal

Arriba, izquierda: resultados de  $f_{m-m}^* / f_{m-m,ref}^*$  para las muestras completas (o). Arriba, derecha: resultados de  $f_{m-m}^* / f_{m-m,ref}^*$  para el Grado Superior (+). Abajo, izquierda: resultados de  $f_{m-m}^* / f_{m-m,ref}^*$  para el Grado Inferior ( $\Delta$ ). Abajo, derecha: resultados de  $f_{m-m}^* / f_{m-m,ref}^*$  para el Descarte (x).  $f_{m-m}$ : valor medio de la tensión de rotura.  $f_{m-m,ref}^*$ : valor medio de la tensión de rotura tomado como referencia.

La información desplegada en la Figura 4.16 confirma una elevada efectividad del criterio europeo para valorar la relación entre la altura de la sección y la tensión de rotura en el material investigado, con la excepción del Descarte. La máxima diferencia entre los resultados experimentales y los calculados según el criterio europeo es del orden del 3% para las muestras completas y para el Grado Superior. Ese porcentaje se extiende en el Grado Inferior hasta un

6% en la muestra IV<sub>50x100</sub> (altura después de cepillada  $h=101,4$  mm), siendo este caso fácilmente identificable en la parte correspondiente de la Figura 4.10. Los resultados experimentales del Descarte se apartan en mayor medida del criterio europeo que los correspondientes a los grados superiores, especialmente en las muestras I<sub>100x25</sub> (24%) y II<sub>25x75</sub> (18%). Sin embargo, este particular comportamiento no pudo explicarse a través de un detallado estudio de los cuerpos de prueba asignados a este grupo, el cual, curiosamente, exhibe valores de coeficiente de variación que son congruentes con los encontrados para los Grados Superior e Inferior (ver la Tabla 4.27).

La correspondencia entre los resultados experimentales y los obtenidos aplicando el criterio europeo para los Grados Superior e Inferior es de destacar particularmente para la Muestra I<sub>100x25</sub>, integrada por tablas ensayadas de plano con una altura promedio  $h = 22,8$  mm. No obstante que la altura de referencia es 6,6 veces mayor que el valor de  $h$  en esta muestra, y consecuentemente  $k_h = 1,46$ , en un análisis detallado de la información exhibida en la Figura 4.10 y en la Tabla 4.28 se observa que la diferencia entre  $k_h$  y el valor experimental alcanza 2%, 3% y 4%, para la muestra completa, el Grado Superior y el Inferior; respectivamente.

A diferencia de lo encontrado por Barret *et al.* (1992) para madera de coníferas, y por Hermoso *et al.* (2002) y Hermoso Prieto *et al.* (2013) para el pino silvestre y el pino radiata, respectivamente, los resultados exhibidos en la Figura 4.10 están en línea con los publicados por Piter (2012) para el *E. grandis* y no permiten afirmar que la influencia de la altura de la sección sobre la resistencia a flexión está claramente relacionada a la calidad de la madera. Con referencia a los Grados Superior e Inferior, las pequeñas diferencias encontradas pueden considerarse propias de la variabilidad natural del material e ignorarse para propósitos prácticos vinculados al diseño estructural. Con referencia al Descarte, las muestras I<sub>100x25</sub>, II<sub>50x75</sub> y III<sub>25x100</sub> presentan relaciones  $f_{m-m}^* / f_{m-m,ref}^*$  mayores a las previstas según el criterio europeo y a las encontradas en los Grados Superior e Inferior.

Considerando que en el cálculo estructural la resistencia a flexión se expresa ajustada a la altura de referencia (INTI CIRSOC 2016a), resulta de interés comparar los valores medios de ésta ( $f_{m150-m}$ ) con los correspondientes valores experimentales de referencia ( $f_{m-m,ref}^*$ ); los cuales se presentan en la Tabla 4.28 en forma discriminada para las muestras y los distintos Grados.

**Tabla 4.28:** Principales resultados de la tensión de rotura ajustada a la altura de referencia según el criterio europeo y de su relación con el valor experimental de referencia

Calidad	Muestras						
			I <sub>100x25</sub>	II <sub>50x75</sub>	III <sub>25x100</sub>	IV <sub>50x100</sub>	V <sub>50x150</sub>
Muestra completa	$f_{m150-m}^*$	N/mm <sup>2</sup>	37,6	39,2	38,1	39,3	$f_{m-m,ref}^* = 38,2$
	COV	%	19	22	27	26	29
	$f_{m150-m}^* / f_{m-m,ref}^*$		0,98	1,03	1,00	1,03	1,00
	n		437	96	114	98	89
Grado Superior	$f_{m150-m}^*$	N/mm <sup>2</sup>	39,9	41,5	42,6	42,1	$f_{m-m,ref}^* = 41,3$
	COV	%	17	21	19	18	27
	$f_{m150-m}^* / f_{m-m,ref}^*$		0,97	1,00	1,03	1,02	1,00
	n		231	49	55	38	47
Grado Inferior	$f_{m150-m}^*$	N/mm <sup>2</sup>	35,4	38,0	36,0	39,0	$f_{m-m,ref}^* = 36,8$
	COV	%	19	22	28	28	26
	$f_{m150-m}^* / f_{m-m,ref}^*$		0,96	1,03	0,98	1,06	1,00
	n		174	37	43	54	34
Descarte	$f_{m150-m}^*$	N/mm <sup>2</sup>	33,6	32,2	27,8	24,1	$f_{m-m,ref}^* = 27,2$
	COV	%	17	20	33	27	29
	$f_{m150-m}^* / f_{m-m,ref}^*$		1,24	1,18	1,02	0,89	1,00
	n		32	10	16	6	8

$f_{m150-m}^*$ : valor medio de la tensión de rotura ajustada a la altura de referencia de 150 mm según EN 384 (2010).

$f_{m-m,ref}^*$ : valor experimental de referencia. COV: coeficiente de variación. n: cantidad de cuerpos de prueba

Dado que el ajuste se realizó aplicando el criterio europeo, la concordancia entre éste y el comportamiento empírico (Figura 4.10) se pone de manifiesto en los valores cercanos a la unidad que adquieren las relaciones  $f_{m150-m}^* / f_{m-m,ref}^*$ , fundamentalmente en los Grados Superior e Inferior. Estos valores, que también se incluyen en la tabla 4.28, oscilan entre 0,98 y 1,03 en las muestras completas, entre 0,97 y 1,03 en el Grado Superior, entre 0,96 y 1,06 en el Grado Inferior y entre 0,89 y 1,24 en el Descarte.

Estos resultados evidencian que la aplicación del factor  $k_h$  fue efectiva para reducir significativamente la influencia de la altura de la sección sobre la tensión de rotura en el conjunto del material y en los dos grados estructurales, los cuales representan una proporción muy importante del material, habida cuenta de su excelente rendimiento (Tabla 4.27). Por medio de dos análisis estadísticos se confirmó esa efectividad para las muestras completas: i)

La prueba de Kruskal Wallis probó que no existen diferencias significativas entre las medianas de las distintas muestras de  $f^*_{m150-m}$  en la muestra completa, el Grado Superior y el Grado Inferior (Tabla 4.28). (Anexo I, Apartado I.4.2. “condiciones de referencia e interrelación de las propiedades físico-mecánicas”, ítem “La resistencia en flexión y su relación con las dimensiones de la sección transversal de la viga”); ii) un análisis de regresión simple entre  $h$  y la resistencia ajustada a la altura de referencia ( $f^*_{m150-m} = f_m / k_h$ ) para los 834 cuerpos de prueba confirmó una correlación no significativa (valor-P = 0,1730) y muy débil entre ambas variables ( $R = 0,047$ ).

### Evaluación de alternativas al criterio europeo

Sobre la base del programa experimental desarrollado en este estudio fue posible evaluar alternativas orientadas a optimizar el criterio europeo; si bien su efectividad para propósitos prácticos vinculados al diseño estructural fue demostrada en el apartado anterior. Las alternativas se orientaron a: i) confirmar la inexistencia de una relación entre el ancho del cuerpo de prueba y la tensión de rotura y, ii) evaluar la conveniencia de modificar la formulación del factor  $K_h$ .

La evaluación de la primera alternativa se llevó a cabo sobre los resultados obtenidos con las muestras III<sub>25x100</sub> y IV<sub>50x100</sub> (Tabla 4.27), sacando provecho de que el ancho de la segunda (50 mm) es el doble del adoptado para la primera (25 mm), pero ambas exhiben la misma altura nominal (100 mm). En consecuencia, la altura puede considerarse como un factor fijo a pesar de las pequeñas variaciones debidas al cepillado de los cuerpos de prueba. Se realizaron dos pruebas estadísticas: i) El test de Student ( $t$ ) confirmó que no puede rechazarse la hipótesis de igualdad entre los valores medios de  $f^*_m$  en las muestras III<sub>25x100</sub> (41,3 N/mm<sup>2</sup>) y IV<sub>50x100</sub> (42,5 N/mm<sup>2</sup>), ver Tabla 4.26, a un nivel de significación del 5% (valor-P = 0,44). El relativamente elevado valor de la probabilidad asociada ( $p$ ) es congruente con la pequeña diferencia entre los valores medios y con la existencia del similar coeficiente de variación en ambas muestras (27% y 26%); ii) un análisis de regresión simple entre el ancho de la sección y  $f^*_m$  para los 212 cuerpos de prueba incluidos en las dos muestras mencionadas confirmó una correlación no significativa (valor-P = 0,3568) y muy débil entre ambas variables ( $R = 0,063$ ). Estos resultados confirman que puede ignorarse la influencia del ancho de la sección sobre la resistencia en el material investigado. Hermoso *et al.* (2002) y Fernández Golfín *et al.* (2002)

publican resultados no concordantes con los encontrados en esta investigación. Los primeros reportan una disminución de la resistencia al aumentar el ancho de la sección en el pino silvestre, la cual es más significativa en el material de menor calidad. Los segundos, contrariamente, reportan un aumento significativo de la resistencia con el ancho de la sección, tanto para el pino silvestre como para el pino laricio.

La evaluación de la segunda alternativa se llevó a cabo separadamente con todos los cuerpos de prueba (834), con los asignados al Grado Superior (420), al Grado Inferior (342) y al Descarte (72). Para este fin se desechó una influencia del ancho de la sección, considerando los resultados presentados en el párrafo anterior, y se mantuvo invariable la altura de referencia (150 mm) por resultar apropiada a las dimensiones usuales del material investigado. A través de un análisis estadístico se determinó el exponente que en la formulación del factor  $k_h$  mejor expresa la relación entre la altura de la sección y la tensión de rotura encontrada experimentalmente (Figura 4.10). Los resultados mostraron que sustituyendo el exponente 0,2 por los valores 0,1857; 0,1724; 0,1682 y 0,3235 se optimiza la representación del comportamiento empírico en todo el material, en el Grado Superior, el Grado Inferior y el Descarte, respectivamente. No obstante, el ajuste de  $f_m^*$  a la altura de referencia aplicando el factor con los exponentes señalados, arroja valores medios similares a los obtenidos con  $k_h = (150 / h)^{0,2}$ , con diferencias del orden de 3% para el total del material, un 5% para el Grado Superior, un 6% para el Grado Inferior, y un 21% para el Descarte. Las diferencias más importantes se dan para la sección I<sub>100x25</sub>, para el resto de las secciones la diferencia no supera el 1% en la muestra completa y el 2% en los Grados Superior e Inferior. Estas diferencias relativamente exiguas reafirman la conveniencia de mantener la expresión actual de  $k_h$ , la que a su vez presenta la ventaja de ser aplicable a todas las especies y calidades de madera, minimizando en consecuencia la probabilidad de cometer errores en su utilización. En la misma línea, Hermoso *et al.* (2002) informan que la influencia de la altura sobre la resistencia a flexión en madera de pino silvestre está adecuadamente expresada por el factor  $k_h = (150 / h)^{0,2}$ .

La discusión de los resultados encontrados al estudiar la influencia de las dimensiones de la sección transversal sobre la resistencia a la flexión permitió efectuar las siguientes comprobaciones:

- i. El aumento de la altura de la sección transversal del material investigado fue acompañado de una tendencia decreciente en la resistencia a flexión, pero no puso de

manifiesto una vinculación de esa relación con la calidad de la madera. Un estudio estadístico confirmó que puede ignorarse la influencia del ancho de la sección sobre la resistencia.

- ii. Es posible utilizar con eficacia, para propósitos prácticos vinculados al diseño estructural, el criterio europeo para valorar la relación entre la altura de la sección y la tensión de rotura en el material investigado. La máxima diferencia entre los resultados experimentales y los ajustados a la condición de referencia, según este criterio, alcanzó 3% para las muestras completas y para el Grado Superior, y el 6% para el Grado Inferior. Para el material asignado al Descarte el criterio mostró una efectividad menor.
- iii. No se encontraron alternativas que superen la precisión del criterio europeo formulado a través del factor  $k_h = (150 / h)^{0,2}$ , el cual fue adoptado recientemente por la normativa de Argentina (INTI CIRSOC 2016a; IRAM 9664 2013).

#### **4.2.2. Resistencia y rigidez en compresión paralela y perpendicular a las fibras. Su relación con las propiedades mecánicas en flexión y la densidad**

Como se expresó en el Marco Teórico (Capítulo 2), de acuerdo con la normativa de Argentina, que está en línea con el criterio europeo, ante la ausencia de determinaciones específicas realizadas en forma completa, las propiedades de resistencia y rigidez pueden derivarse a partir de la resistencia y el módulo de elasticidad en flexión y la densidad. El criterio adoptado en Brasil, en cambio, permite realizar una caracterización simplificada a partir de los resultados del ensayo en compresión paralela a las fibras. En este Apartado se presentan y discuten los resultados de un estudio enfocado en la relación entre las propiedades mecánicas en flexión y en compresión de la madera investigada.

#### **Resistencia en compresión paralela a las fibras**

Según la experiencia europea, la resistencia a la compresión paralela a las fibras (en adelante  $f_{c,0}$ ), se vincula con la resistencia en flexión ( $f_m$ ) mediante la relación  $f_{c,0} = 5 (f_m)^{0,45}$  (UNE EN 384 2010). Esta expresión puede aplicarse a todas las calidades de madera, y a las provenientes tanto de coníferas como de latifoliadas. Para las reglas de diseño de Brasil (ABNT

2010), en una caracterización simplificada realizada a partir del ensayo en compresión paralela a las fibras sobre un cuerpo de prueba libre de defectos, la relación entre la resistencia en compresión paralela y en flexión es constante ( $f_{c,0} / f_m = 0,77$ ).

La Tabla 4.29 resume los principales resultados obtenidos para la resistencia de las muestras ensayadas a flexión y compresión paralela a las fibras (ver el Apartado 3.1). Con el propósito de evaluar la interrelación de las propiedades en madera de distinta calidad, la información se provee por separado para el conjunto del material y para las calidades definidas en el Perfil 3 (Apartado 4.1.3, Tabla 4.24c). Considerando las diferencias existentes en el tamaño y en la dispersión de resultados de las muestras (ver los valores del COV), se decidió realizar el análisis sobre la base de los valores medios y no del percentil 5%. (Anexo I, Apartado I.4.2.2. “Resistencia y rigidez en compresión paralela y perpendicular a las fibras” ítem “Compresión paralela a las fibras”).

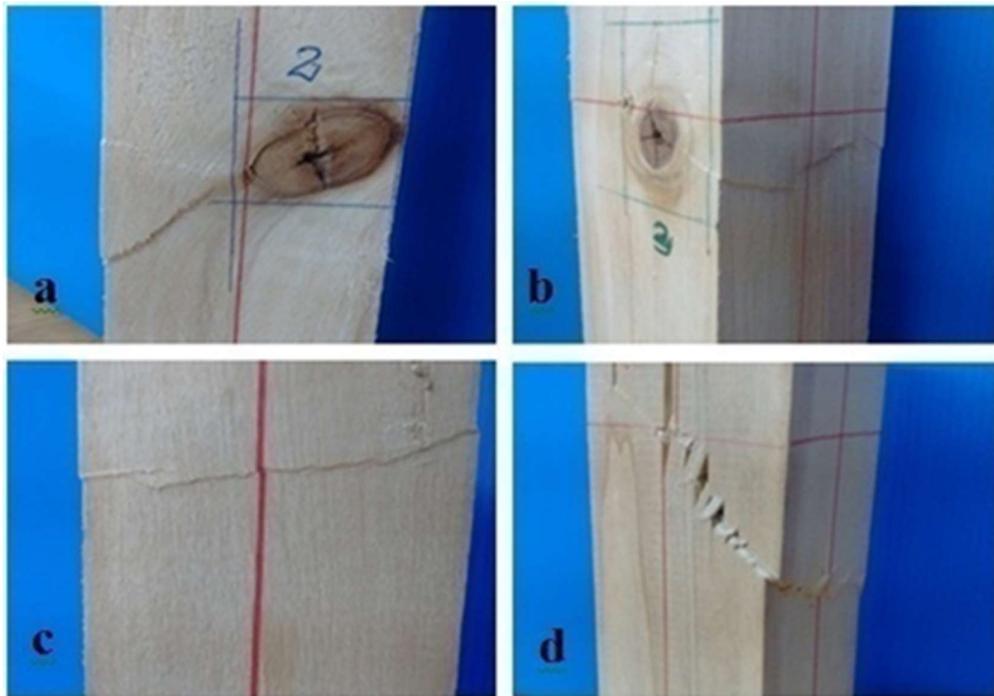
**Tabla 4.29** Principales resultados de la resistencia en flexión y en compresión paralela a las fibras

Perfil	Calidad	Resistencia			
				Flexión <sup>(1)</sup>	Compresión <sup>(2)</sup>
1	Completa	Valor medio	N/mm <sup>2</sup>	38,1	32,5
		COV	%	23	16
		Cantidad	n	834	100
	Superior	Valor medio	N/mm <sup>2</sup>	40,8	33,3
		COV	%	19	14
		Cantidad	n	420	62
3	Inferior	Valor medio	N/mm <sup>2</sup>	36,4	31,1
		COV	%	23	17
		Cantidad	n	342	34
	Descarte	Valor medio	N/mm <sup>2</sup>	30,6	31,3
		COV	%	25	25
		Cantidad	n	72	4

<sup>(1)</sup>: valores ajustados a una altura de referencia de 150 mm según UNE EN 384 (2010); <sup>(2)</sup>: valores ajustados a un contenido de humedad de referencia de 12% según UNE EN 384 (2010)

Los valores medios de la resistencia a compresión paralela (en adelante  $f_{c,0-m}$ ) muestran diferencias menores entre grados de calidad (Superior, Inferior, Descarte) que las diferencias

que exhiben los valores medios de la resistencia a flexión ( $f_{m-m}$ ). Estos resultados son congruentes con la muy baja correlación encontrada, en este trabajo, entre la resistencia en flexión y la nudosidad expresada en función de los nudos ubicados en la zona comprimida de las vigas (criterio KARMs); es decir la escasa influencia sobre la resistencia de los nudos ubicados en la zona comprimida (ver también la Tabla 4.17). Los resultados del COV indican una mayor variabilidad de la resistencia a flexión que a compresión, lo cual concuerda con la menor influencia de los defectos sobre esta última. La Figura 4.17 permite apreciar el desarrollo de las líneas de rotura en cuatro cuerpos de prueba sometidos a compresión paralela. En dos de ellos la falla se alcanza en madera sin defectos aparentes, mientras que en los dos restantes la rotura involucra un nudo, el cual, como prueban los resultados, ejerce una influencia despreciable sobre la capacidad mecánica de la pieza sometida a compresión.

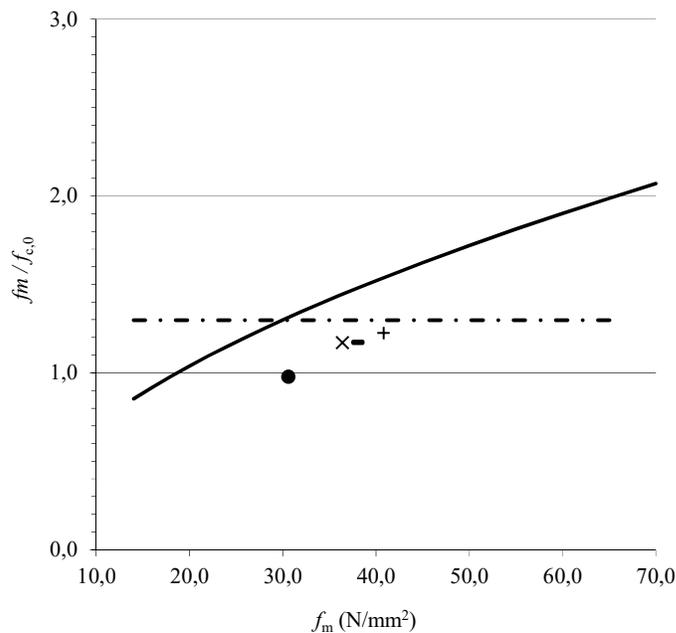


**Figura 4.17:** Modo de falla en cuerpos de prueba sometidos a compresión paralela a la fibra

a) y b): rotura involucrando un nudo; b) y c): rotura en madera libre de nudos

La información exhibida en la Tabla 4.29 también señala que, salvo para el Descarte, los valores de  $f_{m-m}$  son mayores que los correspondientes de  $f_{c,0-m}$  y se advierte una tendencia

creciente de la relación  $f_{m-m} / f_{c,0-m}$  en la medida en que la calidad del material aumenta. Teniendo en cuenta la divergencia de criterios adoptados para considerar esa relación, en la Figura 4.18 se despliega  $f_m / f_{c,0}$  en función de  $f_m$  según el criterio europeo y el de Brasil. En la misma figura se exhiben los valores de  $f_{m-m} / f_{c,0-m}$  obtenidos experimentalmente para la muestra completa y los tres grados correspondientes al Perfil 3 (Tabla 4.29).



**Figura 4.18** Relación entre la resistencia en flexión y compresión paralela en función de la resistencia en flexión.

—: Criterio adoptado en Europa (UNE EN 384 2010); - · - ·: Criterio adoptado en Brasil (ABNT 2010). Valores experimentales: +: Grado Superior; x: Grado Inferior; •: Descarte; -: Muestra completa

En la Figura 4.18 se visualiza claramente que, conforme a la experiencia europea, la relación  $f_m / f_{c,0}$  aumenta al crecer  $f_m$ , o sea al aumentar la calidad de la madera. Este criterio también es compartido, si bien no exactamente con la misma relación que el europeo, por el National Design Specification (NDS 2015) de EEUU para madera estructural clasificada mecánicamente. Este enfoque se basa en aceptar que los defectos (nudosidad) afectan más la resistencia a tracción que a la compresión y en que la madera con pocos defectos tiene una elevada resistencia a tracción (Glos 1995a, Glos y Lederer 2000). En consecuencia, al mejorar

la calidad con la consecuente disminución de defectos, la resistencia a flexión crece más que la resistencia a compresión. Contrariamente, los lineamientos adoptados en Brasil consideran una relación constante entre ambas resistencias, que en la Figura 4.18 se despliega con el valor  $f_m / f_{c,0} = 1,3$ .

Resulta de interés destacar que, conforme al criterio europeo, para  $f_m = 18,7 \text{ N/mm}^2$  se igualan los valores de  $f_m$  y  $f_{c,0}$  ( $f_m / f_{c,0} = 1$ , Figura 4.18). Este valor relativamente bajo, si se lo compara con los valores característicos de la resistencia en flexión de la madera estructural (UNE EN 338 2010; IRAM 9662-4 2015), representa un límite para la calidad de la madera por debajo del cual la presencia de defectos origina que  $f_{c,0}$  supere a  $f_m$ . La utilización de madera estructural con calidad menor a ese límite no es usual a nivel nacional e internacional. En el sistema internacional de clases resistentes del sistema europeo (UNE EN 338 2010), solamente en las dos clases inferiores (C14 y C16) se presenta esa condición. Por su parte, en el Reglamento Argentino de Estructuras de Madera (INTI CIRSOC 601 2016a), puede verificarse que únicamente en los grados inferiores la resistencia en compresión paralela a la fibra iguala o supera a la de flexión.

La Figura 4.18 permite apreciar también que los valores experimentales obtenidos en este trabajo para la relación  $f_{m-m} / f_{c,0-m}$  manifiestan, si bien con valores menores, una tendencia similar a la del criterio europeo, en el sentido de que la relación mencionada crece al aumentar la calidad de la madera. En este aspecto, claramente se advierte que  $f_{m-m} / f_{c,0-m}$  crece desde el valor correspondiente al Descarte hasta el determinado para el Grado Superior y que solamente la madera de menor calidad, o sea el Descarte, presenta una relación  $f_{m-m} / f_{c,0-m} = 30,6 \text{ N/mm}^2 / 31,3 \text{ N/mm}^2 = 0,98 < 1$ . La misma figura permite advertir que el criterio adoptado por Brasil, que implica aceptar un valor constante para la relación  $f_m / f_{c,0}$ , no expresa adecuadamente el comportamiento verificado experimentalmente en el material investigado.

Como se expresó anteriormente, el comportamiento determinado experimentalmente en este trabajo coincidió con el criterio europeo en la manifestación de una relación creciente de  $f_m / f_{c,0}$  para un incremento de la calidad de la madera. No obstante, el uso estructural del material investigado requiere un análisis referido a las consecuencias que sobre la seguridad implica haber obtenido valores empíricos, de la relación mencionada, que resultaron menores a los que se obtendrían derivando la resistencia en compresión a partir de la de flexión según los lineamientos de las normas europeas. La información presentada en la Tabla 4.30 permite

comparar los resultados de la resistencia en compresión paralela obtenidos a través de los dos procedimientos antes mencionados.

**Tabla 4.30** Valores de la resistencia en compresión paralela obtenidos experimentalmente y derivados de la resistencia a flexión

Perfil	Calidad	Experimental		Criterio Europeo	$f_{c,0-m-exp} / f_{c,0-m-ce}$
		$f_{m-m}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,0-m-exp}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,0-m-ce}$ N/mm <sup>2</sup>	
1	Completa	38,1	32,5	25,7	1,26
	Superior	40,8	33,3	26,5	1,26
3	Inferior	36,4	31,1	25,2	1,23
	Descarte	30,6	31,3	23,3	1,34

$f_{m-m}$ : valor medio de la resistencia a flexión obtenido experimentalmente (Tabla 4.24c);  $f_{c,0-m-exp}$ : valor medio de la resistencia en compresión paralela obtenido experimentalmente (Tabla 4.29);  $f_{c,0-m-ce}$ : valor medio de la resistencia en compresión paralela derivado a partir del valor experimental de  $f_{m-m}$  siguiendo el criterio europeo ( $f_{c,0-m-ce} = 5 f_{m-m}^{0.45}$ )

Los valores exhibidos en la Tabla 4.30 permiten visualizar con claridad que el valor experimental de la resistencia a compresión paralela ( $f_{c,0-m-exp}$ ) supera en todos los casos al de  $f_{c,0-m-ce}$ , derivado a partir de la resistencia en flexión ( $f_{m-m}$ ) con la expresión  $f_{c,0-m-ce} = 5 f_{m-m}^{0.45}$ , y en la Figura 4.12 se aprecia la ubicación de las relaciones empíricas por debajo de la curva que representa el criterio europeo. Se puede observar que las diferencias alcanzan 26%, 26%, 23% y 34% para el total de cuerpos de prueba y los Grados Superior, Inferior y Descarte, respectivamente; aunque en el último caso con mínima representatividad debido a la inclusión de un reducido número de cuerpos de prueba sometidos a compresión ( $n = 4$ , ver la Tabla 4.29). Estos resultados muestran que la adopción del criterio europeo, luego adoptado por la norma IRAM 9664 (2013), para derivar la resistencia en compresión paralela a partir de la resistencia en flexión, puede conducir a un diseño excesivamente conservador de los miembros comprimidos construidos con el material investigado.

Es importante destacar que estos resultados están en línea con otros previos obtenidos para una de las especies de mayor importancia en el país. Para madera aserrada de *Eucalyptus grandis* cultivado en la Mesopotamia, Piter *et al.* (2004) encontraron valores mayores de la resistencia en compresión paralela que en flexión, principalmente en madera de baja calidad.

### **Módulo de elasticidad en compresión paralela a las fibras**

Como se expresó en el Capítulo 2, de acuerdo con las reglas de diseño de Europa (UNE EN 1995-1-1 2006), de EEUU (NDS 2015) y de Argentina (INTI CIRSOC 601 2016a), el módulo de elasticidad determinado en el ensayo de flexión estática también es aplicable al diseño estructural de los miembros cargados axialmente. Por el contrario, y en una caracterización simplificada, las reglas de diseño de Brasil (ABNT 2010) adoptan el ensayo de compresión paralela sobre cuerpos de prueba libres de defectos para determinar la rigidez de la madera aserrada, siendo estos resultados también aplicables a los miembros sometidos a tracción paralela y a flexión.

La Tabla 4.31 muestra los principales resultados del módulo de elasticidad correspondientes a las muestras ensayadas a flexión y compresión paralela a las fibras (ver el Apartado 3.1). Al igual que en el caso de la resistencia, y con el propósito de evaluar la interrelación de las propiedades en madera de distinta calidad, la información se provee por separado para el conjunto del material y para las calidades definidas en el Perfil 3 (Apartado 4.1.3, Tabla 4.24c. (Anexo I, Apartado I.4.2.2. “Resistencia y rigidez en compresión paralela y perpendicular a las fibras, ítem “Compresión paralela a las fibras”).

La información desplegada en la Tabla 4.31 permite apreciar, salvo para el Descarte, una destacada similitud de los valores medios del módulo de elasticidad en flexión (en adelante  $E_{m,g-m}$ ) y en compresión paralela a las fibras ( $E_{c,0-m}$ ). Las pequeñas diferencias encontradas entre los valores de  $E_{m,g-m}$  y  $E_{c,0-m}$  para la muestra completa, el Grado Superior y el Inferior, pueden ignorarse para propósitos prácticos vinculados al diseño estructural, dada la importante variabilidad natural que caracteriza a este material. En particular, debe considerarse la poca representatividad de los resultados obtenidos en compresión para el Descarte, ya que solamente 4 cuerpos de prueba fueron asignados al mismo. La prueba de Kruskal Wallis probó que no existen diferencias significativas entre las medianas de las distintas muestras de módulo de elasticidad (compresión paralela y flexión) en la muestra completa, el Grado Superior y el Grado Inferior. (Anexo I, Apartado I.4.2.2. “Resistencia y rigidez en compresión paralela y perpendicular a las fibras, ítem “Compresión paralela a las fibras”).

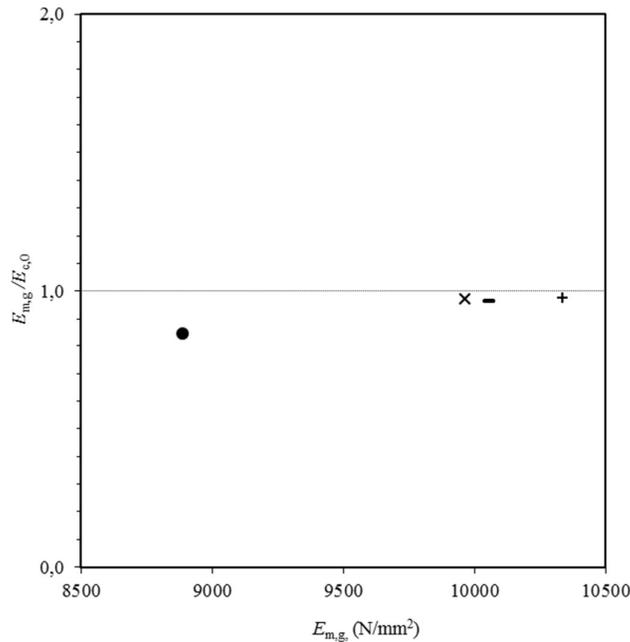
**Tabla 4.31:** Principales resultados del módulo de elasticidad en flexión y en compresión paralela a las fibras

Perfil	Calidad			Módulo de elasticidad <sup>(1)</sup>		Valor-P
				Flexión <sup>(2)</sup>	Compresión	
1	Completa	Valor medio	N/mm <sup>2</sup>	10.059	10.452	>0,05
		COV	%	16	23	
		Cantidad	n	834	100	
	Superior	Valor medio	N/mm <sup>2</sup>	10.337	10.567	>0,05
		COV	%	15	22	
		Cantidad	n	420	62	
3	Inferior	Valor medio	N/mm <sup>2</sup>	9.963	10.235	>0,05
		COV	%	16	26	
		Cantidad	n	342	34	
	Descarte	Valor medio	N/mm <sup>2</sup>	8.888	10.526	<0,05
		COV	%	15	16	
		Cantidad	n	72	4	

(1): valores ajustados a un contenido de humedad de referencia de 12% según UNE EN 384 (2010); (2): Módulo de elasticidad global (ver el Capítulo 2)

Los valores del COV, a diferencia de lo encontrado para la resistencia, indican una mayor variabilidad de resultados para el módulo de elasticidad en compresión paralela que en flexión. Esa mayor variabilidad se explica por el tamaño de los cuerpos de prueba y por el procedimiento de ensayo (ver el Apartado 3.2.4), que llevan implícita la medición de deformaciones muy pequeñas, que a su vez son altamente sensibles a distorsiones producidas por las singularidades presentes en la madera estructural, tales la presencia de nudos y desviación de las fibras.

La Figura 4.19 exhibe, en función de  $E_{m,g}$ , las cuatro relaciones  $E_{m,g} / E_{c,0}$  obtenidas con los valores medios presentados en la Tabla 4.31. Salvo la correspondiente al Descarte, que puede ignorarse por su falta de representatividad como ya se mencionó anteriormente, se puede visualizar que la relación es aproximadamente constante e igual a la unidad. Estos resultados validan, para el material investigado, el criterio adoptado por las reglas de diseño de nuestro país (INTI CIRSOC 601 2016a), que adoptan un valor único para el módulo de elasticidad en flexión y en compresión paralela.



**Figura 4.19:** Relación entre el módulo de elasticidad en flexión y en compresión paralela en función del módulo de elasticidad en flexión

+: Grado Superior; x: Grado Inferior; •: Descarte; - : Muestra completa

Para madera aserrada de *E. grandis*, cultivado en la Mesopotamia, Piter *et al.* (2004) determinaron mayores valores medios del módulo de elasticidad en compresión paralela que en flexión. Las diferencias oscilaron entre 16% y 51%, porcentajes que se correspondieron con la madera de menor y mayor calidad respectivamente.

### Resistencia en compresión perpendicular a las fibras

Según la experiencia europea, la resistencia en compresión perpendicular a las fibras (en adelante  $f_{c,90}$ ) se vincula con la densidad aparente ( $\rho$ ) a través de la relación  $f_{c,90} = 0,007 \rho$ , para las especies de coníferas, y  $f_{c,90} = 0,015 \rho$ , para las especies de frondosas. Este criterio fue adoptado en Argentina a través de la norma IRAM 9664 (2013). Por su parte, para las reglas de diseño de Brasil (ABNT 2010), en una caracterización simplificada, la resistencia en compresión perpendicular a las fibras puede relacionarse a la resistencia en compresión paralela ( $f_{c,0}$ ) a través de la expresión  $f_{c,90} = 0,25 f_{c,0}$ .

La Tabla 4.32 resume los principales resultados obtenidos experimentalmente para  $f_{c,90}$  (ver el Apartado 3.1) y  $\rho$ , propiedades que se relacionan entre sí conforme al criterio adoptado en el país, como se mencionó en el párrafo anterior. No obstante, el análisis de la relación entre  $f_{c,90}$  y  $\rho$  requiere, en este caso, tener en cuenta las siguientes particularidades: i) en el ensayo con carga perpendicular a las fibras  $\rho$  se determina sobre el cuerpo de prueba completo, a diferencia de los otros ensayos donde esta propiedad se determina sobre un trozo libre de defectos (UNE EN 408 2010) y, ii) con el fin de generar información que incluya todo el rango de variación de  $\rho$ , los cuerpos de prueba asignados al Grado Superior fueron seleccionados con nudosidad (K) nula, mientras que el valor de K en los asignados al Grado Inferior cumplió con el límite establecido en el Perfil 3 (Apartado 4.1.3, Tabla 4.24c). (Anexo I, Apartado I.4.2.2. “Resistencia y rigidez en compresión paralela y perpendicular a las fibras, ítem “Compresión perpendicular a las fibras”).

Como consecuencia de las particularidades señaladas en el párrafo anterior es posible advertir que  $f_{c,90}$  y  $\rho$  crecen al disminuir la calidad de la madera, lo cual puede comprobarse tanto comparando los valores medios como los percentiles 5% del total del material y de los distintos grados de calidad. La decisión de incluir los percentiles 5% en este análisis se fundamenta en la existencia de igual cantidad de determinaciones en ambas variables ( $f_{c,90}$  y  $\rho$ ) dentro de cada grado (muestras de igual tamaño), en la presencia de valores del COV que son congruentes con los determinados en las restantes muestras (ver también la Tabla 4.12) y en la conveniencia de aportar mayor información para la discusión de los resultados.

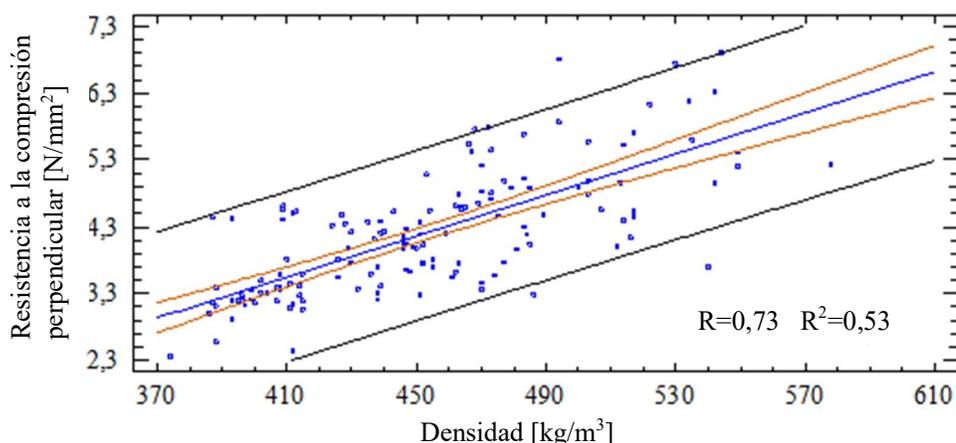
La comprobación de que tanto  $f_{c,90}$  como  $\rho$  crecen al disminuir la calidad de la madera emerge como una contradicción respecto del concepto de clasificación por resistencia, pero lo es solo en apariencia. En efecto, la aplicación de un criterio de clasificación que admite mayores defectos en la madera de menor calidad conlleva un incremento de la densidad media del cuerpo de prueba por la presencia de nudos. Por su parte, la presencia de nudos firmes y su natural elevada densidad, con relación al resto del material, es congruente con la determinación de una mayor resistencia a la compresión perpendicular a las fibras.

**Tabla 4.32:** Principales resultados de la resistencia en compresión perpendicular a las fibras y la densidad

Perfil	Calidad		$f_{c,90}$	$\rho$
1	Todas	Valor medio	4,2 (N/mm <sup>2</sup> )	453 (kg/m <sup>3</sup> )
		COV	24 (%)	10 (%)
		Percentil 5%	3,1 (N/mm <sup>2</sup> )	393 (kg/m <sup>3</sup> )
		Cantidad	143	143
	Superior	Valor medio	4,0 (N/mm <sup>2</sup> )	437 (kg/m <sup>3</sup> )
		COV	21 (%)	7
		Percentil 5%	3,1 (N/mm <sup>2</sup> )	388 (kg/m <sup>3</sup> )
		Cantidad	105	105
3	Inferior	Valor medio	4,6 (N/mm <sup>2</sup> )	490 (kg/m <sup>3</sup> )
		COV	26 (%)	8 (%)
		Percentil 5%	3,3 (N/mm <sup>2</sup> )	426 (kg/m <sup>3</sup> )
		Cantidad	33	33
	Descarte	Valor medio	5,7 (N/mm <sup>2</sup> )	549 (kg/m <sup>3</sup> )
		COV	14 (%)	3 (%)
		Percentil 5%	4,9 (N/mm <sup>2</sup> )	534 (kg/m <sup>3</sup> )
		Cantidad	5	5

$f_{c,90}$ : resistencia a la compresión perpendicular.  $\rho$ : densidad aparente ajustada al contenido de humedad de referencia de 12% según UNE EN 384 (2010).

Los resultados obtenidos son congruentes y quedan explicados por las razones expresadas en el párrafo anterior. No obstante, es necesario destacar que el comportamiento encontrado constituye una peculiaridad vinculada al tipo de esfuerzo en estudio, ya que los métodos de clasificación limitan los defectos (tales como la nudosidad) por su influencia negativa sobre las propiedades que normalmente definen el diseño estructural, tales como las de flexión y las obtenidas bajo esfuerzos axiales actuando paralelamente a las fibras. A su vez, esos métodos adoptan la densidad obtenida sobre madera libre de defectos, que usualmente es menor que la que contiene nudos firmes, y que en la Tabla 4.32 está representada por el Grado Superior. En consecuencia, los resultados exhibidos en la mencionada tabla prueban que la relación de  $f_{c,90}$  con  $\rho$  sitúa del lado de la seguridad el diseño en la eventualidad de que la compresión perpendicular se localice en una zona con presencia de nudos firmes. La Figura 4.20 permite apreciar la relación entre las propiedades mencionadas y los principales resultados obtenidos en un análisis de regresión simple.



**Figura 4.20:** Relación entre la densidad ( $\rho$ ) y la resistencia en compresión perpendicular a las fibras ( $f_{c,90}$ ) en los 143 cuerpos de prueba analizados

Como se expresó anteriormente, en Argentina y en línea con el criterio europeo, la norma IRAM 9664 (2013) adopta una relación entre  $f_{c,90}$  y  $\rho$  expresada como  $f_{c,90} / \rho = 0,007$  para las coníferas y  $f_{c,90} / \rho = 0,015$  para las frondosas, siendo  $\rho$  determinado sobre un trozo de madera libre de defectos. Con el propósito de conocer si este criterio expresa adecuadamente el comportamiento determinado empíricamente, se calculó la relación mencionada aplicando los valores medios y los percentiles 5% presentados en la Tabla 4.32. Con los valores medios,  $f_{c,90} / \rho$  alcanza 0,009; 0,009; 0,009 y 0,010 para el conjunto del material, el Grado Superior, Inferior y Descarte respectivamente, en tanto que con el percentil 5% los resultados correspondientes son 0,008; 0,008; 0,008; 0,009. Es de destacar la escasa representatividad del Descarte en razón de que está integrado solamente por 5 cuerpos de prueba (con una nudosidad  $K > 2/3$ ). La obtención de una relación menor entre los percentiles 5% se debe a la reducida dispersión de resultados de  $\rho$  en comparación con los de  $f_{c,90}$ , como puede apreciarse a través de los valores del COV presentados en la Tabla 4.32. Los resultados obtenidos experimentalmente están en línea con la relación adoptada por la norma IRAM 9664 (2013) para madera de coníferas ( $f_{c,90} / \rho = 0,007$ ), confirmando también para este caso la afinidad que, para el uso estructural, caracteriza el comportamiento de la madera de álamo (chopo) con las coníferas, lo cual motivó su inclusión conjunta en el sistema internacional de clases resistentes de la norma UNE EN 338 (2010).

Con el fin de conocer la eficacia del criterio adoptado en Brasil (ABNT 2010) para el caso de una caracterización simplificada, ya expresado anteriormente ( $f_{c,90} / f_{c,0} = 0,25$ ), se

aplicaron a esta relación los valores medios de  $f_{c,90}$  y de  $f_{c,0}$ , este último obtenido de la Tabla 4.29. Los resultados obtenidos fueron  $4,2 \text{ N/mm}^2 / 38,1 \text{ N/mm}^2 = 0,11$ ;  $4,0 \text{ N/mm}^2 / 40,8 \text{ N/mm}^2 = 0,10$ ;  $4,6 \text{ N/mm}^2 / 36,4 \text{ N/mm}^2 = 0,13$  y  $5,7 \text{ N/mm}^2 / 30,6 \text{ N/mm}^2 = 0,19$  para el conjunto del material, el Grado Superior, Inferior y Descarte respectivamente. Estos valores, salvo para el Descarte (de escasa representatividad), alcanzan aproximadamente la mitad del adoptado por el criterio de Brasil (0,25), lo que marca una menor precisión que la obtenida con el criterio adoptado por la norma IRAM 9664 (2013) a partir de la densidad.

### **Módulo de elasticidad en compresión perpendicular a las fibras**

Como se expresó en el Capítulo 2, según el criterio europeo, el módulo de elasticidad en compresión perpendicular a las fibras ( $E_{c,90}$ ) se vincula con el módulo de elasticidad obtenido en dirección paralela a las fibras ( $E_m$ ) a través de la relación  $E_{c,90} = E_m / 30$  para las maderas de coníferas y  $E_{c,90} = E_m / 15$  para las frondosas. Este criterio fue adoptado en Argentina a través de la norma IRAM 9664 (2013). Por su parte, para las reglas de diseño de Brasil (ABNT 2010), en una caracterización simplificada, el módulo de elasticidad en dirección perpendicular a las fibras puede relacionarse al módulo de elasticidad en compresión paralela ( $E_{c,0}$ ) a través de la expresión  $E_{c,90} = E_{c,0} / 20$ .

La Tabla 4.33 muestra los principales resultados de  $E_{c,90}$  y, con el propósito de facilitar el análisis del criterio adoptado en nuestro país, se decidió incluir también en la misma tabla los principales resultados de  $E_m$ . Al igual que en el caso de la resistencia, y para evaluar la interrelación de las propiedades en madera de distinta calidad, la información se provee por separado para el conjunto del material y para las calidades definidas en el Perfil 3 (Apartado 4.1.3, Tabla 4.24c). (Anexo I, Apartado I.4.2.2. “Resistencia y rigidez en compresión paralela y perpendicular a las fibras, ítem “Compresión perpendicular a las fibras”).

Como consecuencia de las particularidades ya señaladas, al analizar los resultados de la resistencia en dirección perpendicular a las fibras ( $f_{c,90}$ ) es posible advertir que también los valores medios de  $E_{c,90}$  crecen al disminuir la calidad de la madera. Los valores del COV, que también se incrementan al disminuir la calidad de la madera, acusan la mayor variabilidad que en  $E_{c,90}$  ocasiona la admisión creciente de defectos.

**Tabla 4.33:** Principales resultados del módulo de elasticidad en compresión perpendicular a las fibras ( $E_{c,90}$ )

Perfil	Calidad		$E_{c,90}$	$E_m$	
1	Todas	Valor medio	N/mm <sup>2</sup>	436	10.059
		COV	%	53	16
		Cantidad	n	143	834
	Superior	Valor medio	N/mm <sup>2</sup>	379	10.337
		COV	%	30	15
		Cantidad	n	105	420
3	Inferior	Valor medio	N/mm <sup>2</sup>	554	9.963
		COV	%	56	16
		Cantidad	n	33	342
	Descarte	Valor medio	N/mm <sup>2</sup>	828	8.888
		COV	%	73	17
		Cantidad	n	5	72

$E_{c,90}$ : módulo de elasticidad en compresión perpendicular a las fibras.  $E_m$ : módulo de elasticidad en flexión. Los valores de módulo de elasticidad están corregidos a la humedad de referencia del 12% UNE EN 384 (2010)

Con el propósito de conocer si el criterio adoptado en nuestro país expresa adecuadamente el comportamiento determinado empíricamente, se calculó la relación  $E_m / E_{c,90}$  aplicando los valores medios presentados en la Tabla 4.33. Los resultados alcanzaron  $10.059 \text{ N/mm}^2 / 436 \text{ N/mm}^2 = 23$ ;  $10.337 \text{ N/mm}^2 / 379 \text{ N/mm}^2 = 27$ ;  $9.963 \text{ N/mm}^2 / 554 \text{ N/mm}^2 = 18$  y  $8.888 \text{ N/mm}^2 / 828 \text{ N/mm}^2 = 11$  para el conjunto del material, el Grado Superior, Inferior y Descarte respectivamente. Como ya se expresó anteriormente, es de destacar la escasa representatividad del Descarte, en razón de que para los ensayos de compresión perpendicular está integrado solamente por 5 cuerpos de prueba. Estos resultados muestran que la relación adoptada en nuestro país para madera de coníferas ( $E_m / E_{c,90} = 30$ ) interpreta adecuadamente el comportamiento del material estudiado en el Grado Superior ( $E_m / E_{c,90} = 27$ ), mientras que la relación adoptada para las frondosas ( $E_m / E_{c,90} = 15$ ) está más en línea con los resultados obtenidos para el Grado Inferior ( $E_m / E_{c,90} = 18$ ). Este último resultado se explica por el marcado incremento que en el valor de  $E_{c,90}$  provoca la presencia de nudos (y el consecuente aumento de densidad), en la madera de inferior calidad.

Con el fin de conocer la eficacia de la relación adoptada en Brasil, para el caso de una caracterización simplificada ( $E_{c,0} / E_{c,90} = 20$ ), se aplicaron a ésta los valores medios de  $E_{c,90}$  y de  $E_{c,0}$ , estos últimos obtenidos de la Tabla 4.31. Los resultados obtenidos fueron  $10452 \text{ N/mm}^2 / 436 \text{ N/mm}^2 = 24$ ;  $10567 \text{ N/mm}^2 / 379 \text{ N/mm}^2 = 28$ ;  $10235 \text{ N/mm}^2 / 554 \text{ N/mm}^2 = 18$  y  $10526 \text{ N/mm}^2 / 828 \text{ N/mm}^2 = 13$  para el conjunto del material, el Grado Superior, Inferior y Descarte respectivamente. Se puede considerar como valor más representativo el de la relación correspondiente al Grado Superior ( $10567 \text{ N/mm}^2 / 379 \text{ N/mm}^2 = 28$ ), por haber sido determinado sobre cuerpos de prueba libres de defectos como se estipula en Brasil. Por esto se concluye que este criterio sobreestima en un 40% el valor de  $E_{c,90}$  respecto de  $E_{c,0}$  para el material analizado. La relación adoptada por este país está en línea con el comportamiento encontrado en el Grado Inferior ( $10235 \text{ N/mm}^2 / 554 \text{ N/mm}^2 = 18$ ), cuyo valor se explica por las razones expuestas al final del párrafo anterior.

La discusión de los resultados encontrados al estudiar la resistencia y rigidez en compresión paralela y perpendicular a las fibras, así como su relación con las propiedades mecánicas en flexión y la densidad, permitió acceder a las siguientes comprobaciones:

- i. La resistencia en compresión paralela exhibe diferencias menores entre grados de calidad y una menor dispersión de valores dentro de cada grado que la resistencia a flexión, lo cual es congruente con una mayor influencia de los defectos sobre esta última. En línea con el criterio europeo, luego adoptado en Argentina, la relación entre las resistencias en flexión y compresión paralela crece al aumentar la calidad de la madera.
- ii. La resistencia en compresión paralela ( $f_{c,0}$ ) determinada experimentalmente supera al valor derivado de la resistencia en flexión ( $f_m$ ) con la expresión  $f_{c,0} = 5 f_m^{0.45}$  (IRAM 9664 2013). Esta confirmación implica que el dimensionamiento puede resultar conservador si los valores de  $f_{c,0}$  se obtienen con la expresión mencionada.
- iii. Las pequeñas diferencias encontradas entre los valores medios del módulo de elasticidad en flexión y en compresión paralela pueden despreciarse en un proceso de diseño estructural y validan para el material investigado el criterio adoptado por las reglas de cálculo del país (INTI CIRSOC 2016a).

- iv. El módulo de elasticidad en compresión paralela ( $E_{c,0}$ ) exhibió una mayor dispersión de resultados que en flexión ( $E_{m,g}$ ), lo cual puede explicarse por el procedimiento de ensayo.
- v. La resistencia ( $f_{c,90}$ ) y la rigidez ( $E_{c,90}$ ) en dirección perpendicular a las fibras aumentan al disminuir la calidad de la madera, lo cual es congruente con el incremento de la densidad ( $\rho$ ) debido a la tolerancia de una mayor nudosidad. Esta comprobación sitúa del lado de la seguridad aquellos casos en que el esfuerzo se localice en una zona con presencia de nudos firmes.
- vi. Los resultados son congruentes con la relación  $f_{c,90} / \rho$  adoptada por la norma IRAM 9664 (2013) para madera de coníferas ( $f_{c,90} / \rho = 0,007$ ). La relación  $E_m / E_{c,90}$  adoptada por esta norma, para madera de coníferas ( $E_m / E_{c,90} = 30$ ), está en línea con el comportamiento encontrado para el material estudiado en el Grado Superior ( $E_m / E_{c,90} = 27$ ); pero la relación adoptada para las frondosas ( $E_m / E_{c,90} = 15$ ) interpreta mejor el comportamiento del Grado Inferior ( $E_m / E_{c,90} = 18$ ), lo cual es congruente con el incremento que en el valor de  $E_{c,90}$  provoca la presencia de nudos en la madera de inferior calidad.

#### 4.2.3. Resistencia en tracción paralela a las fibras y su relación con la resistencia en flexión

Según la experiencia europea, la resistencia a la tracción paralela a las fibras (en adelante  $f_{t,0}$ ), se vincula con la resistencia en flexión ( $f_m$ ) mediante la relación  $f_{t,0} = 0,6 f_m$  (UNE EN 384 2010). La relación puede aplicarse a todas las calidades de madera, provenientes tanto de coníferas como de latifoliadas. Este criterio fue adoptado en Argentina a través de la norma IRAM 9664 (2013). Para las reglas de diseño de Brasil (ABNT 2010), en una clasificación simplificada, las resistencias en flexión y en tracción paralela pueden considerarse iguales ( $f_m / f_{t,0} = 1,0$ ).

La Tabla 4.34 resume los principales resultados obtenidos experimentalmente para la resistencia de las muestras ensayadas a flexión y tracción paralela a las fibras. Con el propósito de evaluar la interrelación de las propiedades en madera de distinta calidad, la información se provee por separado para el conjunto del material y para las calidades definidas en el Perfil 3

(Apartado 4.1.3, Tabla 4.24c). Considerando las diferencias existentes en el tamaño y en la dispersión de resultados de las muestras (ver los valores del COV), se decidió realizar el análisis sobre la base de los valores medios y no de los percentiles 5%. (Anexo I, Apartado I.4.2.3. “Resistencia en tracción paralela a las fibras y su relación con la resistencia en flexión”).

**Tabla 4.34.** Principales resultados de la resistencia en flexión y en tracción paralela a las fibras

Perfil	Calidad	Resistencia			
				Flexión <sup>(1)</sup>	Tracción <sup>(1)</sup>
1	Todas	Valor medio	N/mm <sup>2</sup>	38,1	16,9
		COV	%	23	37
		Cantidad	n	834	130
	Superior	Valor medio	N/mm <sup>2</sup>	40,8	19,2
		COV	%	19	31
		Cantidad	n	420	74
3	Inferior	Valor medio	N/mm <sup>2</sup>	36,4	14,2
		COV	%	23	34
		Cantidad	n	342	53
	Descarte <sup>(2)</sup>	Valor medio	N/mm <sup>2</sup>	30,6	6,9
		COV	%	25	27
		Cantidad	n	72	3

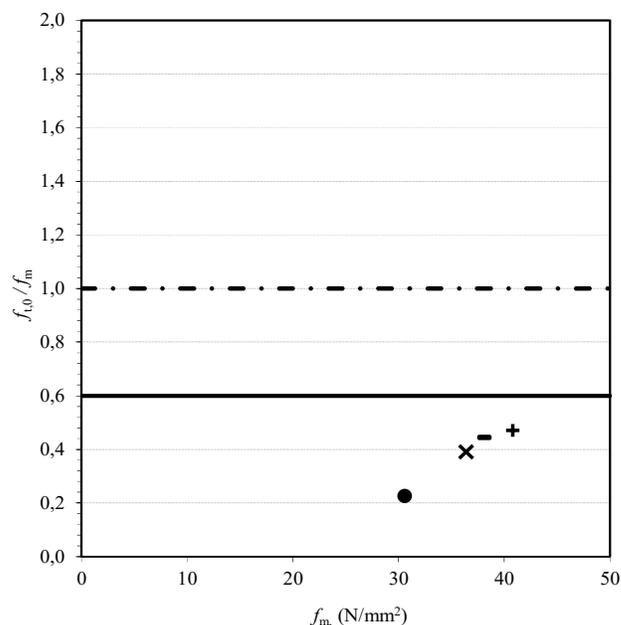
<sup>(1)</sup>: valores ajustados a una altura/ancho de referencia de 150 mm según UNE EN 384 (2010); <sup>(2)</sup> incluido solo a título informativo debido a su falta de representatividad originada por la reducida cantidad de cuerpos de prueba

Los valores medios de la resistencia en tracción paralela (en adelante  $f_{t,0-m}$ ) muestran una diferencia (35%) mayor entre los Grados Superior e Inferior que la que exhiben los valores medios de la resistencia en flexión ( $f_{m-m}$ ), que alcanza 12%. Estos resultados, en oposición al comportamiento encontrado al analizar la relación entre la resistencia en compresión paralela y la de flexión (Apartado 4.2.2), pueden explicarse por una mayor influencia de los defectos sobre  $f_{t,0}$ . A su vez, los resultados del COV prueban una mayor variabilidad de  $f_{t,0}$  que  $f_m$ , lo cual también es congruente con la menor influencia de los defectos sobre esta última.

Es de destacar que el elevado rendimiento del material se pone en evidencia también al clasificar la muestra ensayada en tracción paralela según el Perfil 3, donde solamente 3 cuerpos de prueba fueron descartados. Este exiguo tamaño del Descarte, y la falta de

representatividad asociada a esta circunstancia, justifica que los resultados obtenidos para el mismo se ignoren en lo sucesivo para el análisis. No obstante, se llevó a cabo un estudio detallado con el propósito de explicar el llamativamente reducido valor encontrado para  $f_{t,0-m}$  ( $6,9 \text{ N/mm}^2$ ). El estudio mostró que 2 cuerpos de prueba no contenían médula, pero presentaban una nudosidad (K) igual a 0,87 y 0,92, en tanto que el restante exhibía médula y  $K = 0,67$ . La presencia de estos importantes defectos explica el bajo valor encontrado para  $f_{t,0-m}$ .

La información exhibida en la Tabla 4.34 también muestra que todos los valores de  $f_{t,0-m}$  son menores que los correspondientes de  $f_{m-m}$ . Teniendo en cuenta la divergencia de criterios adoptados internacionalmente para considerar esa relación, en la Figura 4.21 se despliega  $f_{t,0} / f_m$  en función de  $f_m$  según el criterio europeo y el de Brasil, con valores que alcanzan 0,6 y 1,0 respectivamente. En la misma figura se exhiben los valores de  $f_{t,0-m} / f_{m-m}$  obtenidos experimentalmente para la muestra completa (0,44) y los Grados Superior (0,47) e Inferior (0,39) correspondientes al Perfil 3 (Tabla 4.34). El grupo Descarte fue incluido solo con carácter informativo (0,23) debido a su falta de representatividad, como ya se expresó anteriormente.

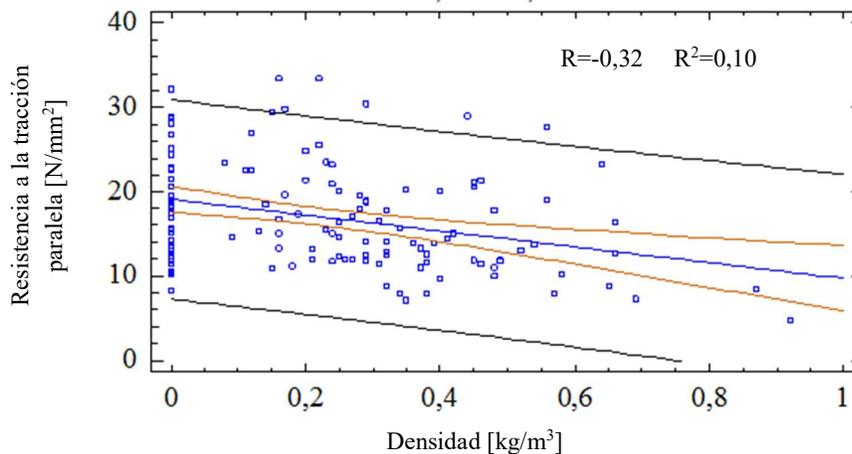


**Figura 4.21:** Relación entre la resistencia en flexión y tracción paralela en función de la resistencia en flexión.

—: Criterio adoptado en Europa (UNE EN 384 2010); - · - ·: Criterio adoptado en Brasil (ABNT 2010). Valores experimentales de  $f_{t,0-m} / f_{m-m}$ : +: Grado Superior; x: Grado Inferior; •: Descarte; -: Muestra completa

La Figura 4.21 también permite apreciar que los valores constantes, que responden a los criterios antes mencionados, se diferencian en dos aspectos de los resultados obtenidos experimentalmente: i) estos últimos son menores que los primeros en todos los casos y, ii) a diferencia de los primeros, estos últimos muestran que la relación  $f_{t,0} / f_m$  crece desde el Grado Inferior al Superior, es decir cuando se incrementa la calidad de la madera. Con el propósito de explicar las diferencias señaladas se llevó a cabo un análisis de la relación entre la nudosidad y la resistencia en los cuerpos de prueba sometidos a tracción.

La Figura 4.22 exhibe la relación entre la nudosidad K y la resistencia a tracción en los 130 cuerpos de prueba ensayados. Si bien el análisis estadístico confirmó una correlación significativa a un nivel del 5%, el valor de R (-0,32) es menor que el obtenido entre la nudosidad K y la resistencia a flexión (R = -0,38, ver la Figura 4.7). Estos resultados no explican la razón por la cual los valores medios de  $f_{t,0-m}$  muestran una diferencia mayor entre los grados Superior e Inferior que la que exhiben los valores medios de  $f_{m-m}$  (Tabla 4.34). Tampoco explican la mayor variabilidad encontrada en  $f_{t,0}$  que en  $f_m$ , la cual queda expresada por los respectivos valores del COV (Tabla 4.34).



**Figura 4.22:** Relación entre el criterio K y la resistencia en tracción paralela a las fibras

$f_m$ : resistencia a la flexión. R: coeficiente de correlación.  $R^2$ : Coeficiente de determinación

Es necesario señalar que la obtención de una relación de la nudosidad menos estrecha con la resistencia en tracción que en flexión, no está en línea con valores publicados tanto para madera de coníferas como de latifoliadas (Johansson *et al.*, 1992; Glos, 1995a; Glos & Lederer,

2000). En particular en nuestro país, para el *E. grandis* cultivado en la Mesopotamia, Piter *et al.* (2004) publican valores de R que alcanza -0,38, al relacionar la nudosidad (K) con la resistencia en tracción; y -0,32 al hacerlo con la resistencia en flexión.

Con el propósito de explicar el particular comportamiento encontrado se estudió detalladamente el modo de rotura en todos los cuerpos de prueba ensayados en tracción. El estudio permitió conocer que la presencia de nudos en las cercanías del borde (canto) fue causa de un tipo de falla particular, claramente diferenciado de los restantes. La Figura 4.23 permite apreciar el desarrollo de las líneas de rotura en 3 cuerpos de prueba. En uno de ellos la falla se alcanza en madera sin defectos aparentes (derecha), mientras que en los dos restantes la rotura involucra la presencia de nudos (centro e izquierda). En esta última se advierte la presencia de esta singularidad en las cercanías del borde de la tabla, la cual, al iniciar la fisuración en ese lugar ocasiona la reducción del ancho activo de la pieza y a su vez origina una excentricidad entre la línea de aplicación de la carga y el baricentro de la sección remanente. La fisuración se propaga luego hacia el borde no afectado inicialmente produciendo la falla total de la pieza.



**Figura 4.23** Modo de falla en cuerpos de prueba sometidos a tracción paralela a las fibras

Izquierda y centro: rotura involucrando nudos; derecha: rotura en madera libre de defectos aparentes

Resulta evidente que la reducción del ancho activo de la sección combinado con esfuerzos de flexión debidos a la excentricidad produce un estado tensional más demandante que la sola presencia de tensiones de tracción. Consecuentemente, este tipo de rotura va acompañado de una disminución de la carga que la provoca. El estudio detallado permitió conocer que de los 74 cuerpos de prueba asignados al Grado Superior, 8 (11%) alcanzaron este modo de falla con un valor medio de la tensión de rotura ( $f_{t,0-m}$ ) igual a 13,3 N/mm<sup>2</sup>, en tanto que para los 66 restantes (89%) se determinó  $f_{t,0-m} = 19,8$  N/mm<sup>2</sup>, lo cual implica un descenso de 33% en la resistencia media de los primeros respecto de los segundos. A su vez, de los 53 cuerpos asignados al Grado Inferior, 20 (38%) iniciaron la falla en el borde con  $f_{t,0-m} = 11,3$  N/mm<sup>2</sup> y los 33 restantes (62%) alcanzaron  $f_{t,0-m} = 16,0$  N/mm<sup>2</sup>, registrándose en este caso un descenso de 29% en la resistencia media de los primeros respecto de los segundos.

Los resultados presentados en el párrafo anterior permitieron conocer que: i) la obtención de menores valores experimentales para la relación  $f_{t,0} / f_m$  que los adoptados por los criterios normativos es congruente con la disminución de la capacidad de carga originada por la importante cantidad de fallas iniciadas en nudos ubicados en los bordes de los cuerpos de prueba, ii) el hecho de que el 11% de los cuerpos de prueba del Grado Superior, contra el 38% de los asignados al Grado Inferior, haya alcanzado este tipo de falla con la disminución de capacidad ya mencionada, es congruente con la obtención de valores crecientes de la relación  $f_{t,0} / f_m$  desde el Grado Inferior al Superior (ver la Figura 4.21) y, iii) la constatación de que en este tipo de ensayos la influencia negativa de los nudos sobre  $f_{t,0}$  se haya manifestado no solamente por el valor de su tamaño (nudosidad K), sino que en gran medida por su posición en el cuerpo de prueba, está en línea con la obtención de una menor correlación de K con  $f_{t,0}$  que la que se había determinado previamente entre K y  $f_m$ .

Si bien los resultados del estudio detallado permitieron explicar el particular comportamiento del material ensayado a tracción, su uso estructural requiere un análisis referido a las consecuencias que sobre la seguridad implica haber obtenido valores empíricos de la relación  $f_{t,0} / f_m$  que resultaron menores a los que se obtendrían derivando  $f_{t,0}$  a partir de  $f_m$  según los lineamientos de las normas europeas:  $f_{t,0} = 0,6 f_m$  (UNE EN 384 2010). La información presentada en la Tabla 4.35 permite comparar los resultados de la resistencia en tracción paralela obtenidos a través de los dos procedimientos antes mencionados.

Los valores exhibidos en la Tabla 4.35 revelan que el valor medio experimental de la resistencia a tracción ( $f_{t,0-m-exp}$ ), es menor en todos los casos al de  $f_{t,0-m-ce}$ , derivado a partir de la resistencia en flexión ( $f_{m-m}$ ) con la expresión  $f_{t,0-m-ce} = 0,6 f_{m-m}$  (UNE EN 384 2010). Se puede observar que el primero alcanza 0,74, 0,78 y 0,65 del segundo para el total de cuerpos de prueba y los grados Superior e Inferior respectivamente. Estos resultados muestran que la adopción del criterio europeo, luego adoptado por la norma IRAM 9664 (2013), para derivar la resistencia en tracción paralela a partir de la resistencia en flexión, puede situar del lado de la inseguridad el diseño de los miembros traccionados construidos con el material investigado.

**Tabla 4.35.** Valores de la resistencia en tracción paralela obtenidos experimentalmente y derivados de la resistencia a flexión

Perfil	Calidad	$f_{m-m}$ (experimental) N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,0-m-exp}$ (experimental) N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,0-m-ce}$ (criterio europeo) N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,0-m-exp} / f_{t,0-m-ce}$
1	Completa	38,1	16,9	22,9	0,74
	Superior	40,8	19,2	24,5	0,78
3	Inferior	36,4	14,2	21,8	0,65
	Descarte <sup>(1)</sup>	-	-	-	-

$f_{m-m}$ : valor medio de la resistencia a flexión obtenido experimentalmente (Tabla 4.24c);  $f_{t,0-m-exp}$ : valor medio de la resistencia en tracción paralela obtenido experimentalmente (Tabla 4.34);  $f_{t,0-m-ce}$ : valor medio de la resistencia en tracción paralela derivado a partir del valor experimental de  $f_{m-m}$  siguiendo el criterio europeo ( $f_{t,0-m-ce} = 0,6 f_{m-m}$ ); (1): Valores excluidos debido a la falta de representatividad de los resultados obtenidos en tracción (n = 3).

La discusión de los resultados encontrados al estudiar resistencia en tracción paralela a las fibras y su relación con la resistencia en flexión permitió efectuar las siguientes comprobaciones:

- i. El comportamiento de la muestra sometida a esfuerzos de tracción paralela a la fibra no es congruente con reportes de investigaciones previas ni con el criterio europeo, luego adoptado por la norma Argentina IRAM 9664 (2013), en los siguientes aspectos: i) La correlación de la nudosidad (K) con la resistencia en tracción ( $f_{t,0}$ ), que se manifestó con  $R = -0,32$ , es menor que la encontrada entre K y la resistencia a flexión ( $f_m$ ), expresada por  $R = -0,38$ , ii) la relación  $f_{t,0} / f_m$  determinada experimentalmente es menor a la

- adoptada por las normas antes mencionadas y, iii) la relación empírica  $f_{t,0}/f_m$  crece con la calidad del material, lo cual no está en línea con la adopción de un valor constante.
- ii. Un estudio detallado del modo de rotura mostró que la presencia de nudos en los bordes de las piezas condujo a un tipo de falla producida con una sustancial disminución de la capacidad de carga. El análisis de estos resultados permitió explicar los tres aspectos del particular comportamiento encontrado, ya mencionados en el párrafo anterior.
  - iii. Los resultados experimentales muestran que la adopción del criterio europeo, posteriormente adoptado por la norma IRAM 9664 (2013) para derivar la resistencia en tracción paralela a partir de la resistencia en flexión, puede situar del lado de la inseguridad el diseño de miembros traccionados construidos con el material investigado.

#### **4.2.4 Módulo de elasticidad. Determinación a través de ensayos estáticos y métodos dinámicos alternativos**

En este Apartado se analizan los resultados obtenidos sobre 256 vigas pertenecientes a las muestras 2 ( $n = 40$ ), 4 ( $n = 36$ ), 5 ( $n = 43$ ), 7 ( $n = 48$ ), 9 ( $n = 48$ ) y 10 ( $n = 41$ ), cuyas dimensiones pueden consultarse en la Tabla 3.2, y a las cuales se les determinó el valor del módulo de elasticidad empleando cuatro procedimientos diferentes: dos a través de las pruebas estáticas estandarizadas para obtener el módulo de elasticidad global ( $E_{m,g}$ ) y local ( $E_{m,l}$ ), y dos por medio de las técnicas alternativas, basadas en la velocidad de propagación del sonido (módulo de elasticidad dinámico longitudinal por ultrasonidos,  $E_{m,us}$ ) y en la frecuencia de vibración longitudinal (módulo de elasticidad dinámico longitudinal por vibraciones inducidas,  $E_{m,v}$ ).

Como se expresó en el Capítulo 2, la normativa europea (UNE EN 408 2010) provee dos métodos para la determinación del módulo de elasticidad en flexión. La prueba contempla la aplicación simétrica de las cargas en los tercios de la distancia entre apoyos (ver el Apartado 3.2.2), y de esta manera se dispone del tramo medio libre de la influencia del esfuerzo de corte para la determinación de  $E_{m,l}$ . En cambio, las deformaciones de toda la longitud incluyen la influencia del esfuerzo de corte actuante en los tramos laterales y se utilizan para la obtención de  $E_{m,g}$ . Es necesario destacar que la determinación de  $E_{m,l}$ , en piezas con dimensiones reducidas (como las tablas flexionadas de plano), lleva implícito el registro de deformaciones muy

pequeñas, lo cual hace que los resultados acusen una elevada sensibilidad a los errores cometidos en el proceso de medición. A su vez, el requisito de ubicar los mayores defectos en el tramo central de la pieza suele ejercer una influencia negativa directa en el valor de  $E_{m,l}$ , lo cual convierte a la relación entre ambos módulos en un tema controversial (Denzler *et al.* 2008).

Por su parte, variadas razones técnico-económicas, entre las que se cuentan la posibilidad de efectuar determinaciones sobre piezas estructurales en servicio, el desarrollo de modernas máquinas de clasificación y aspectos de índole práctica, han impulsado en las últimas décadas el desarrollo de técnicas alternativas al ensayo estático para determinar el módulo de elasticidad. Dentro de éstas se encuentran las fundadas en vibraciones, ultrasonidos y microondas, entre otras (Glos 1995a; Görlacher 1997; Diebold 1997; Dávalos Sotelo *et al.* 2009; Hanhijärvi *et al.* 2008; Casado *et al.* 2010; Roblot *et al.* 2010; Fank 2018).

La normativa de Argentina ha incorporado los procedimientos de ensayo estático mencionados anteriormente para determinar  $E_{m,g}$  y  $E_{m,l}$  (IRAM 9663 2013). No obstante, y a diferencia de lo sucedido en Europa con el Eurocódigo 5 (2006), las reglas de diseño del país adoptan el valor de  $E_{m,g}$  para calcular las deformaciones en flexión, considerando que su valor incluye una influencia del esfuerzo de corte equivalente al 5% del total (INTI CIRSOC 601 2016a); influencia que este criterio estima como representativa de los estados tensionales inducidos en obra. Por esa razón, en este trabajo se ha decidido considerar a  $E_{m,g}$  como variable de referencia para el análisis.

## Resultados experimentales

La Tabla 4.36 presenta los principales resultados obtenidos experimentalmente, según los cuatro procedimientos indicados en el primer párrafo de este Apartado, en forma separada para el conjunto del material y para las calidades definidas en el Perfil 3 (Apartado 4.1.3, Tabla 4.24c).

En el Anexo I, Apartado I.4.2.4. “Módulo de elasticidad. Determinación a través de ensayos estáticos y métodos dinámicos alternativos”, se presentan los resultados de los análisis de normalidad de la distribución de los módulos de elasticidad local, global, dinámico por

ultrasonido y dinámico por vibraciones inducidas para cada calidad resistente; la comparación de las muestras y el gráfico de caja y bigotes.

Los datos del COV exhibidos en la Tabla 4.36 ponen en evidencia una mayor variabilidad de resultados en  $E_{m,l}$  que en  $E_{m,g}$ , lo cual se explica por el criterio adoptado para realizar los ensayos (UNE EN 408 2011). En efecto, el hecho de ubicar en el tercio central la zona con mayores defectos de cada pieza introduce una mayor dispersión en la calidad de la madera donde se registran las deformaciones para calcular  $E_{m,l}$  y, consecuentemente, de la rigidez de la misma. Paralelamente, como ya se expresó más arriba, el registro de deformaciones pequeñas hace que los resultados sean sensibles a los errores cometidos en el proceso de medición.

**Tabla 4.36:** Principales resultados del módulo de elasticidad determinado por ensayos estáticos y métodos dinámicos alternativos

Calidad	$E_{m,g}$		$E_{m,l}$		$E_{m,us}$		$E_{m,v}$		n
	Valor medio	COV							
	N/mm <sup>2</sup>	%							
1 Muestra completa	10.422	15	11.350	17	11.499	23	10.869	22	256
Superior	10.501	15	11.412	17	11.082	25	10.597	24	115
3 Inferior	10.562	13	11.578	16	11.872	22	11.228	21	117
Descarte	9.369	14	9.939	21	11.679	19	10.429	18	24

$E_{m,g}$  y  $E_{m,l}$ : Módulo de elasticidad global y local, respectivamente determinados según UNE EN 408 (2011).  $E_{m,us}$ : Módulo de elasticidad dinámico longitudinal por ultrasonidos.  $E_{m,v}$ : Módulo de elasticidad dinámico longitudinal por vibraciones inducidas.

A su vez es de destacar que los mayores valores del COV se corresponden con los resultados obtenidos a través de los métodos dinámicos alternativos ( $E_{m,us}$  y  $E_{m,v}$ ). La mayor dispersión de valores obtenidos en estos dos casos no pudo ser explicada a través de un estudio pormenorizado de los cuerpos de prueba y, en consecuencia, podría estar relacionada a las características propias de los métodos de medición de las variables intervinientes; lo cual debería ser corroborado a través de un análisis específico que escapa a los objetivos de esta Tesis.

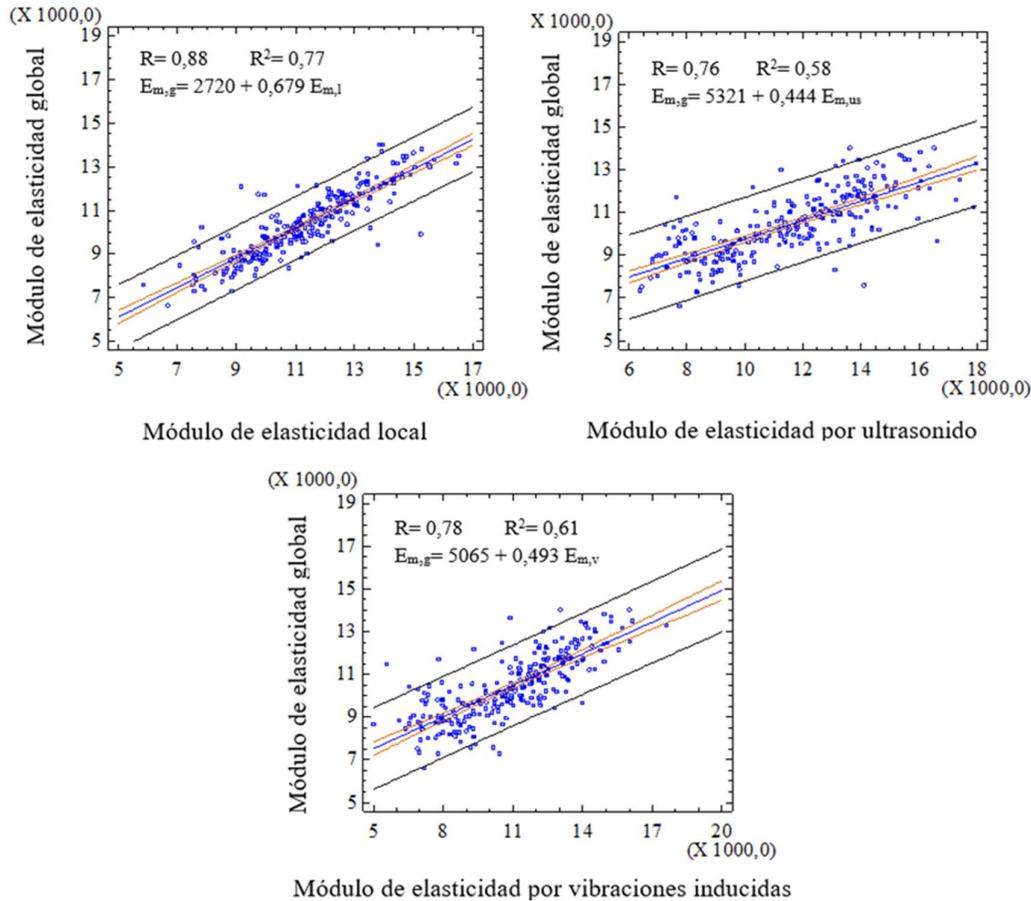
La información presentada en la Tabla 4.36 muestra que los valores medios de  $E_{m,g}$  son los menores de todos los determinados para cada calidad de madera. Estos resultados son congruentes con la influencia que sobre las deformaciones ejerce el esfuerzo de corte actuante en los tercios extremos de las vigas, influencia que no está presente al aplicar los otros tres métodos analizados. Las discrepancias con respecto a  $E_{m,g}$  en los Grados estructurales Superior e Inferior, respectivamente, alcanzan 9% y 10% para  $E_{m,l}$ , 5% y 12% para  $E_{m,us}$  y 1% y 6% para  $E_{m,v}$ . Estas discrepancias, debido a las particularidades de los métodos aplicados, deben diferenciarse entre las correspondientes a los procedimientos dinámicos alternativos donde es necesario realizar un proceso de calibración que escapa a este trabajo, y la obtenida al comparar los dos métodos estáticos estandarizados ( $E_{m,g}$  y  $E_{m,l}$ ).

### **Relación entre los resultados experimentales obtenidos por métodos estáticos y dinámicos alternativos**

La Figura 4.24 despliega, para las 256 vigas, la relación de  $E_{m,g}$  con  $E_{m,l}$ ,  $E_{m,us}$  y  $E_{m,v}$ . Los valores medios y el COV de las determinaciones experimentales se presentaron más arriba en la Tabla 4.36 en forma discriminada para cada calidad de madera. A través de la técnica del análisis de regresión lineal simple se determinó la ecuación de la recta de regresión y el coeficiente de correlación (R), así como el de determinación ( $R^2$ ); información que puede apreciarse en la figura mencionada. Los resultados indican una relación más estrecha ( $R = 0,88$ ) de  $E_{m,g}$  con el otro módulo determinado a través de ensayos estáticos ( $E_{m,l}$ ), que con los determinados a través de métodos dinámicos alternativos, con los cuales queda expresada a través de  $R = 0,76$  con  $E_{m,us}$  y  $R = 0,78$  con  $E_{m,v}$ . En todos los casos el estudio estadístico probó que las correlaciones son significativas a un nivel del 5%.

La información desplegada en la Figura 4.24 permite apreciar la existencia de casos (vigas) que presentaron un menor valor de  $E_{m,l}$ ,  $E_{m,us}$  o  $E_{m,v}$  que el de  $E_{m,g}$ , es decir que mostraron un comportamiento contrario al manifestado por la relación entre los valores medios que se exhibieron en la Tabla 4.36. Un estudio detallado mostró que en el Grado Superior se registraron valores  $E_{m,l} < E_{m,g}$ ,  $E_{m,us} < E_{m,g}$ , o  $E_{m,v} < E_{m,g}$  en 17 (15%), 37 (32%) y 49 (43%) de las vigas respectivamente, en tanto que los correspondientes resultados en el Grado Inferior fueron 8 (7%), 23 (20%) y 32 (27%).

Estos resultados, que complementan la información presentada en la Tabla 4.36, y están vinculados a la variabilidad de resultados obtenidos a través de cada método, muestran que la relación entre valores medios es indicativa del comportamiento general de las muestras, pero el comportamiento individual de las vigas se desvía del comportamiento general en las cantidades detalladas en el párrafo anterior para cada grado estructural.



**Figura 4.24:** Relación de  $E_{m,g}$  con:  $E_{m,l}$  (arriba, izquierda),  $E_{m,us}$  (arriba, derecha) y  $E_{m,v}$  (abajo)

$E_{m,g}$ : módulo de elasticidad global.  $E_{m,l}$ : módulo de elasticidad local.  $E_{m,us}$ : módulo de elasticidad por ultrasonido.

$E_{m,v}$ : módulo de elasticidad por vibraciones inducidas. Todos los valores están expresados en  $N/mm^2$

### Influencia del esfuerzo de corte sobre el módulo de elasticidad. Comparación de los resultados experimentales con criterios de relevancia nacional e internacional

La relación entre  $E_{m,g}$  y  $E_{m,l}$  ha merecido la atención de normas e investigadores debido a la importancia que adquiere el conocimiento del módulo libre de la influencia del corte en

casos tales como el estudio de la deformación axial y la carga crítica en barras esbeltas comprimidas. Con el propósito de comparar los resultados experimentales con los adoptados por las reglas de diseño de Argentina y otros criterios de relieve internacional, se derivó a partir del valor de  $E_{m,g}$  el módulo de elasticidad libre de la influencia del esfuerzo de corte siguiendo los cuatro lineamientos que se describen a continuación, y los resultados se exhiben en la Tabla 4.37:

- i) Reglamento Argentino de Estructuras de Madera (INTI CIRSOC 2016a):

$$E_{m,C601} = 1,05 \times E_{m,g}$$

- ii) Normativa europea (UNE EN 384 2010):

$$E_{m,EN384} = \sum \left[ \frac{E_{m,g}}{n} \right] \times 1,3 - 2690$$

- iii) Propuesto por Denzler *et al.* (2008):

$$E_{m,D} = 1.2 \times E_{m,g} - 1400$$

- iv) Normativa de EEUU (ASTM D 198 2015):

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

Siendo  $G = E_{m,g}/16$

Los resultados presentados en la Tabla 4.37 indican que los cuatro criterios utilizados para derivar, a partir  $E_{m,g}$ , el valor del módulo de elasticidad libre de la influencia del esfuerzo de corte, arrojan resultados menores al obtenido experimentalmente en esta condición ( $E_{m,l}$ ). La

relación entre los valores calculados según los cuatro criterios y  $E_{m,l}$ , que se indican entre paréntesis, oscilan entre 0,95 y 0,98 si se consideran los Grados estructurales Superior e Inferior.

**Tabla 4.37:** Valor medio de  $E_{m,l}$  obtenido experimentalmente en comparación con los derivados a partir de  $E_{m,g}$  según cuatro criterios de relevancia

Perfil	Calidad	$E_{m,g}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{m,l}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{m,C601}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{m,EN384}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{m,D}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{m,ASTM}$ N/mm <sup>2</sup>	n
1	Todas	10.422	11.350	10.943 (0,96)	10.859 (0,96)	11.106 (0,98)	10.873 (0,96)	256
	Superior	10.501	11.412	11.026 (0,97)	10.961 (0,96)	11.201 (0,98)	10.998 (0,96)	115
3	Inferior	10.562	11.578	11.090 (0,96)	11.041 (0,95)	11.274 (0,97)	10.966 (0,95)	117
	Descarte	9.369	9.938	9.837 (0,99)	9.490 (0,95)	9.843 (0,99)	9.822 (0,99)	24

$E_{m,g}$  y  $E_{m,l}$ : valores medios del módulo de elasticidad global y local, respectivamente, obtenidos experimentalmente según UNE-EN 408 (2011);  $E_{m,C601}$ ,  $E_{m,EN384}$ ,  $E_{m,D}$  y  $E_{m,ASTM}$ : módulo de elasticidad libre del esfuerzo de corte derivado de  $E_{m,g}$ , respectivamente, según el Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601 (INTI CIRSOC 2016a), la norma europea UNE EN 384 (2010); el criterio propuesto por Denzler *et al* (2008) y la norma ASTM ; ( ): cociente entre el módulo de elasticidad de la celda y el valor correspondiente de  $E_{m,l}$ .

El rango de oscilación de la relación (0,95-0,99) convalida la aptitud de los cuatro criterios para interpretar el comportamiento del material analizado; los cuales emergen como una solución razonable para evitar el trabajo experimental necesario para determinar  $E_{m,l}$ , el cual lleva implícitas las complejidades descriptas anteriormente. No obstante, se destaca por su mayor precisión el propuesto por Denzler *et al.* (2008) que arroja valores aún más cercanos a la unidad que los restantes, ya que oscila entre 0,97 y 0,99. Resultados publicados por Fank (2018) indican que este criterio fue también el más preciso para derivar el valor del módulo local a partir del global obtenido experimentalmente en madera de pino resinoso del nordeste de Argentina.

La discusión de los resultados encontrados al estudiar los módulos de elasticidad estáticos (global y local), y los módulos de elasticidad dinámicos longitudinales (por ultrasonidos y por vibraciones inducidas) permitió efectuar las siguientes comprobaciones:

- i. Los valores medios de  $E_{m,g}$  fueron los menores de todos los determinados para cada calidad de madera, lo cual es congruente con la influencia que sobre las deformaciones ejerce el esfuerzo de corte actuante en los tercios extremos de las vigas, influencia que no está presente al aplicar los otros 3 métodos analizados.
- ii. Pese a lo indicado en el párrafo anterior, un estudio particular permitió conocer que en el Grado Superior se registraron valores  $E_{m,l} < E_{m,g}$ ,  $E_{m,us} < E_{m,g}$ , o  $E_{m,v} < E_{m,g}$  en 17 (15%), 37 (32%) y 49 (43%) de las vigas respectivamente, mientras que los correspondientes resultados en el Grado Inferior fueron 8 (7%), 23 (20%) y 32 (27%). Estos casos individuales contradicen el comportamiento general que se refleja comparando los valores medios.
- iii. Los datos del COV evidenciaron una mayor variabilidad de resultados en  $E_{m,l}$  que en  $E_{m,g}$ , lo cual se explica por el criterio adoptado para realizar los ensayos. No obstante, los mayores valores del COV corresponden a los resultados de  $E_{m,us}$  y  $E_{m,v}$ , lo cual no pudo ser explicado a través de un estudio pormenorizado de los cuerpos de prueba.
- iv. A través de la técnica del análisis de regresión lineal simple se probó una relación más estrecha de  $E_{m,g}$  con el otro módulo determinado a través de ensayos estáticos ( $E_{m,l}$ ) que con los determinados a través de métodos dinámicos alternativos ( $E_{m,us}$  y  $E_{m,v}$ ).

La discusión de los distintos criterios para determinar la influencia del corte en el módulo de elasticidad permitió arribar a la siguiente conclusión:

- i. El rango de oscilación de la relación entre los valores del módulo de elasticidad libre de la influencia del esfuerzo de corte, derivados de  $E_{m,g}$  según cuatro criterios de relieve internacional, y los resultados experimentales de  $E_{m,l}$  convalida la competencia de los criterios para el material analizado. La mayor precisión fue alcanzada con el propuesto por Denzler *et al.* (2008).

## CAPITULO 5. CONCLUSIONES

---

A continuación se presentan las conclusiones obtenidas a partir de los resultados presentados y discutidos en el Capítulo 4. Dada la amplitud del trabajo experimental abordado, y con el propósito de facilitar al lector la interpretación del contenido, este capítulo se ha organizado vinculando las conclusiones con los objetivos planteados en el Capítulo 1. En la parte final se señalan las futuras investigaciones cuya importancia emerge del análisis de los resultados encontrados en la presente Tesis.

### 5.1. INFLUENCIA DE LAS SINGULARIDADES DE APRECIACIÓN VISUAL SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS MÁS IMPORTANTES

El impacto del ataque del insecto *Megaplatypus mutatus* sobre la resistencia y el módulo de elasticidad en flexión fue estudiado sobre 443 vigas de tamaño estructural con el

propósito de formular una alternativa al criterio de rechazo adoptado por la norma IRAM 9662-4 (2015). El análisis permitió alcanzar la siguiente conclusión:

- Revisar el criterio de rechazo para las piezas con ataque tipificado en esta Tesis con el Grado 2 (hasta dos orificios de insectos por sección). La alternativa propuesta implica recuperar un 29% del material, con el consiguiente impacto positivo que desde el punto de vista económico significa su traslado al sector productivo. La revisión propuesta lleva implícita la conveniencia de diseñar una nueva investigación focalizada específicamente en ese tema y a su vez orientada a ampliar la base estadística utilizada en esta Tesis.

La influencia de la presencia de médula fue estudiada sobre 834 cuerpos de prueba pertenecientes a las 10 muestras sometidas al ensayo de flexión, arribándose a las siguientes conclusiones:

- En el conjunto del material analizado, la ausencia de esta singularidad fue acompañada de un moderado incremento de la resistencia, con un valor medio que superó en un 5,4% al correspondiente a las piezas con médula. La influencia negativa de la médula sobre la resistencia se registró en las 10 muestras estudiadas, pero no se puso en evidencia la existencia de una relación entre esa influencia y las dimensiones de la sección transversal de los cuerpos ensayados.
- No se encontró una relación que vincule claramente la presencia de médula con el módulo de elasticidad y con la densidad aparente del material.

La nudosidad se investigó empleando cinco criterios diferentes, de los cuales uno fue aplicado a las 10 muestras ensayadas a flexión y los otros cuatro solamente a las 4 muestras de mayor escuadría con el propósito de comparar la relación de cada uno de ellos con las propiedades mecánicas. El estudio arrojó las siguientes conclusiones:

- La nudosidad expresada a través del criterio K (relación entre la dimensión del nudo mayor o agrupamiento de nudos, con la dimensión transversal de la cara donde se

manifiesta) exhibió la mayor relación con las propiedades mecánicas considerando el conjunto del material analizado, alcanzando una correlación más estrecha con la resistencia ( $R = -0,38$ ) que con el módulo de elasticidad ( $R = -0,23$ ). La capacidad predictiva de K en relación a las propiedades mecánicas no fue superada por los criterios basados en el desplazamiento (KAR: Knot Area Ratio) aún en las muestras conteniendo los cuerpos de prueba de mayores dimensiones.

- En adición al nivel de su relación con las propiedades mecánicas, la adopción del criterio K exhibe las siguientes ventajas cuando se lo compara con los otros 4 criterios estudiados: i) la sencillez de su determinación es una estimable ventaja en un país con poca tradición en la temática como Argentina, ii) es el criterio adoptado por las normas IRAM 9662-1/2/3/4 (2015) para clasificar tablas estructurales y, iii) su utilización ha sido extendida por las reglas de diseño del país (INTI CIRSOC 601 2016a) a todas las secciones estructurales de *Eucalyptus grandis* cultivado en la Mesopotamia y de *Araucaria angustifolia* de la provincia de Misiones.

La influencia de la inclinación de las fibras, sobre las propiedades mecánicas de las piezas ensayadas a flexión, se evaluó a través de un análisis de regresión lineal. Adicionalmente se determinó un valor de referencia para la inclinación (1/14) y se compararon los valores medios de la resistencia y el módulo de elasticidad de las piezas con una inclinación inferior y superior a la de referencia. Se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- La inclinación de las fibras mostró una correlación menor con la resistencia ( $R = -0,31$ ) que la encontrada entre esta propiedad y la nudosidad ( $R = -0,38$ ). La resistencia de las piezas con inclinación inferior a 1/14 exhibió un valor medio 18% mayor al correspondiente a las piezas con una inclinación mayor a la indicada.
- La relación de esta singularidad con la rigidez ( $R = -0,13$ ) fue menos estrecha que con la resistencia. El módulo de elasticidad obtenido en las piezas con inclinación inferior a 1/14 exhibió un valor medio 9% mayor al correspondiente a las piezas con una inclinación mayor a la indicada.

A través del análisis de regresión lineal se estudió la relación del espesor de los anillos de crecimiento con las propiedades mecánicas y la densidad. Los resultados permitieron llegar a las siguientes conclusiones:

- Esta singularidad no mostró una correlación con la resistencia y la rigidez en flexión, así como con la densidad, que amerite su consideración en el desarrollo de una propuesta para clasificar visualmente por resistencia este material.
- Las dificultades encontradas para su determinación visual constituyen una razón de índole práctica, pero importante pues podría impedir el logro de un proceso exitoso, lo que justifica la exclusión de esta singularidad en el desarrollo de una propuesta para clasificar por resistencia el material.

## **5.2. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO-MECÁNICO DE AMBOS CLONES ENTRE SI Y CON OTRAS ESPECIES RELEVANTES DEL PAÍS**

Los resultados obtenidos para las propiedades físico-mecánicas y su relación con las singularidades se encuentran presentados y discutidos para los clones 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' en el Apartado 4.1. Este apartado contiene también referencias a otras especies relevantes del país. Las conclusiones más salientes del análisis comparativo son:

- La resistencia de ambos clones exhibió una destacada similitud, con valores medios de 38,0 N/mm<sup>2</sup> y 38,3 N/mm<sup>2</sup> para el 'Australiano 129/60' y el 'Stoneville 67', respectivamente. Los correspondientes coeficientes de variación fueron 20% y 23%. La inexistencia de diferencias (a un nivel de significación del 5%) fue comprobada a través de una prueba estadística específica.
- Las diferencias entre los valores medios del módulo de elasticidad y de la densidad determinados para ambos no excedieron el 13%.

- Para propósitos vinculados a la clasificación por resistencia, la influencia de las principales singularidades sobre las propiedades mecánicas en flexión y la densidad no exhibió diferencias claras entre los dos clones.
- La madera de los dos clones puede ser procesada y utilizada en forma conjunta para uso estructural sin afectar la seguridad del diseño. Esto valida el criterio de las reglas y normas de Argentina (CIRSOC 601 2016a; IRAM 9662-4 2015).
- El nivel de los valores característicos de las propiedades y el destacado rendimiento alcanzado, después de descartar las piezas que fallaron en la zona afectada por el insecto *Megaplatypus mutatus*, ratifican la aptitud de la madera investigada para uso estructural. Este material constituye una alternativa a las especies de mayor importancia en el país: el pino resinoso del nordeste y el *E. grandis* de la Mesopotamia.

### **5.3. PROPUESTA DE UN MÉTODO VISUAL DE CLASIFICACIÓN POR RESISTENCIA**

El análisis de los resultados obtenidos sobre 834 cuerpos de prueba con tamaño estructural, que incluyó la conformación de 6 perfiles de resistencia, rigidez y densidad con distintos límites para los parámetros visuales, posibilitó obtener las siguientes conclusiones:

- Razones técnicas y económicas fundamentan la conveniencia de adoptar un método visual de clasificación aplicable a todas las piezas del material investigado, sin discriminar las tablas de las vigas ni los dos clones entre sí.
- El perfil (Perfil 3) con iguales límites para los parámetros que los adoptados para clasificar tablas por la norma IRAM 9662-4 (2015), optimiza el resultado del proceso de clasificación visual si se considera simultáneamente el desempeño físico-mecánico con el rendimiento económico.
- Ventajas de carácter práctico y operativo para el sector productivo y el profesional constituyen un soporte adicional para la adopción de un método de clasificación ya vigente para tablas, pero extendido a la totalidad de las piezas estructurales del material

investigado.

- Resulta necesario revisar el valor característico de la densidad ( $400 \text{ kg/m}^3$ ) adoptado por la norma IRAM 9662-4 (2015), para las 2 clases resistentes de tablas destinadas a madera laminada encolada estructural o a ser cargadas de plano. El valor adoptado por la norma no fue alcanzado en ningún grado de los 6 perfiles analizados en este trabajo.
- No obstante la necesidad de revisar el valor característico de la densidad mencionado en el párrafo anterior, esta investigación confirma el criterio de la norma mencionada en lo referente a la adopción de valores iguales de esta propiedad para los distintos grados de calidad.
- Los valores de las relaciones resistencia / densidad y rigidez / densidad están en línea con los adoptados por las normas europeas para madera de coníferas y álamo y son mucho más elevados que los publicados por esa normativa para madera de latifoliadas. Este comportamiento, particularmente ventajoso para un material estructural, está en línea también con el determinado previamente para la madera de *Eucalyptus grandis* cultivado en la Mesopotamia de nuestro país.
- Los valores alcanzados para la resistencia a la flexión, módulo de elasticidad local y densidad en los Grados Superior e Inferior se corresponden con los exigidos en las clases C24 y C20, respectivamente, de la norma UNE EN 338 (2010).

#### **5.4. PRECISIÓN DEL CRITERIO EUROPEO, ADOPTADO POR LAS NORMAS DE NUESTRO PAÍS, PARA INTERPRETAR EL COMPORTAMIENTO DE LA MADERA INVESTIGADA**

##### **5.4.1. Relación entre la resistencia en flexión y las dimensiones de la viga**

El estudio de la influencia de las dimensiones de la sección transversal sobre la resistencia a la flexión, llevado a cabo sobre 834 cuerpos de prueba en tamaño estructural, permitió arribar a las siguientes conclusiones:

- El aumento de la altura de la sección transversal fue acompañado de una tendencia decreciente en la resistencia a flexión.
- No se encontró evidencia de la existencia de una relación que vincule la resistencia a flexión con el ancho de la sección y la calidad de la madera.
- El criterio europeo para valorar la relación entre la altura de la sección y la tensión de rotura expresa adecuadamente el comportamiento del material vinculado al diseño estructural. No se encontraron alternativas que superen la precisión de este criterio formulado a través del factor  $k_h = (150 / h)^{0,2}$ , el cual fue adoptado por la normativa de Argentina.

#### **5.4.2. Dependencia de las propiedades mecánicas en compresión respecto de las propiedades mecánicas en flexión y la densidad**

El análisis de los resultados obtenidos sobre 834 cuerpos de prueba sometidos a flexión y 100 sometidos a compresión paralela a la fibra, permitió alcanzar las siguientes conclusiones:

- La resistencia en compresión paralela exhibe diferencias menores entre grados de calidad y una menor dispersión de valores dentro de cada grado que la resistencia a flexión, lo cual es congruente con una mayor influencia de los defectos sobre esta última.
- La relación entre las resistencias en flexión y compresión paralela crece al aumentar la calidad de la madera. Este comportamiento está en línea con el criterio europeo adoptado en Argentina a través de la norma IRAM 9664 (2013).
- La resistencia en compresión paralela ( $f_{c,0}$ ) determinada experimentalmente supera al valor derivado de la resistencia en flexión ( $f_m$ ) con la expresión  $f_{c,0} = 5 f_m^{0,45}$  (IRAM 9664 2013), con diferencias que alcanzan 26% y 23% para el Grado Superior e Inferior, respectivamente. El dimensionamiento puede resultar excesivamente conservador si los valores de  $f_{c,0}$  se obtienen con la expresión mencionada.
- Las exiguas diferencias encontradas para los dos grados estructurales entre los valores medios del módulo de elasticidad en flexión y en compresión paralela pueden ignorarse para propósitos prácticos vinculados al diseño estructural. Estos validan el criterio

adoptado por las reglas de diseño del país (INTI CIRSOC 2016a), que adoptan un valor único para ambos módulos de elasticidad.

- A diferencia de lo encontrado para la resistencia, el módulo de elasticidad exhibió una menor dispersión de resultados en flexión ( $E_{m,g}$ ) que en compresión paralela ( $E_{c,0}$ ). El procedimiento de ensayo explica la mayor variabilidad encontrada para  $E_{c,0}$ , ya que su determinación requiere la medición de deformaciones muy pequeñas y altamente sensibles a distorsiones producidas por las singularidades.

La discusión de los resultados obtenidos sobre 834 cuerpos de prueba sometidos a flexión y 143 sometidos a compresión perpendicular a la fibra, permitió arribar a las siguientes conclusiones:

- Los resultados experimentales confirmaron que la resistencia ( $f_{c,90}$ ) y la rigidez ( $E_{c,90}$ ) en dirección perpendicular a las fibras aumentan al disminuir la calidad de la madera. Este aumento va acompañado, y es explicado, por un incremento de la densidad ( $\rho$ ) media del cuerpo de prueba debido a la tolerancia de una mayor nudosidad.
- Dado que los métodos de clasificación por resistencia determinan  $\rho$  en la madera libre de defectos, la relación (creciente) encontrada entre  $f_{c,90}$  y  $\rho$ , y entre  $E_{c,90}$  y  $\rho$ , sitúa del lado de la seguridad el diseño estructural en la eventualidad de que la compresión perpendicular se localice en una zona del miembro estructural que contenga nudos firmes.
- Los resultados del programa experimental están en línea con la relación  $f_{c,90}/\rho$  adoptada por la norma IRAM 9664 (2013) para madera de coníferas ( $f_{c,90}/\rho = 0,007$ ), confirmando la afinidad que para el uso estructural considera la experiencia europea (EN 338 2010) entre el comportamiento de la madera de álamo (chopo) y las coníferas.
- La relación entre el módulo de elasticidad en flexión y en compresión perpendicular ( $E_m/E_{c,90}$ ) adoptada en nuestro país para madera de coníferas ( $E_m/E_{c,90} = 30$ ) interpreta adecuadamente el comportamiento del material estudiado en el Grado Superior ( $E_m/E_{c,90} = 27$ ), mientras que la relación adoptada para las frondosas ( $E_m/E_{c,90} = 15$ ) está más en línea con los resultados obtenidos para el Grado Inferior ( $E_m/E_{c,90} = 18$ ). Este último resultado se explica por el marcado incremento que en el valor de  $E_{c,90}$  provoca la presencia de nudos (y el consecuente aumento de densidad) en la madera de inferior calidad.

#### 5.4.3. Vinculación entre la resistencia en tracción paralela a las fibras y la de flexión

El estudio llevado a cabo sobre 834 cuerpos de prueba sometidos al ensayo de flexión y 130 al de tracción, permitió obtener las siguientes conclusiones:

- El comportamiento de la muestra ensayada en tracción paralela se apartó de la experiencia internacional y del criterio adoptado por la norma Argentina IRAM 9664 (2013) porque exhibió: i) una menor correlación entre la nudosidad (K) y la resistencia en tracción ( $f_{t,0}$ ) que la determinada entre K y la resistencia de las muestras ensayadas en flexión ( $f_m$ ), ii) una relación empírica  $f_{t,0}/f_m$  significativamente menor a la adoptada por la norma antes mencionada y, iii) una relación empírica  $f_{t,0}/f_m$  creciente con la calidad del material, en contraposición a un valor constante e independiente de la calidad de la madera.
- Los tres aspectos del particular comportamiento señalado en el párrafo anterior se pueden explicar a través de los resultados de un análisis detallado del modo de rotura en tracción paralela. Estos resultados mostraron que el 11% de las piezas del Grado Superior y el 38% del Grado Inferior inició la falla en nudos localizados en sus bordes. Este modo de rotura se produjo bajo un estado tensional de flexo-tracción y se alcanzó con una carga promedio 33% y 29% menor, en el Grado Superior y el Inferior respectivamente, al correspondiente a las piezas que no lo experimentaron.
- El valor medio de la resistencia en tracción obtenido experimentalmente alcanzó el 78% y el 65%, en el Grado Superior y el Inferior respectivamente, del determinado aplicando el criterio europeo ( $f_{t,0} = 0,6 f_m$ ) luego adoptado por la norma IRAM 9664 (2013). Estos resultados pusieron en evidencia que la adopción del criterio mencionado puede situar del lado de la inseguridad el diseño de miembros traccionados construidos con el material investigado.

#### 5.4.4. Correspondencia entre valores del módulo de elasticidad determinado a través de métodos estáticos y dinámicos

El análisis de los resultados obtenidos sobre 256 vigas sometidas a flexión permitió arribar a las siguientes conclusiones:

- Los valores medios del módulo de elasticidad global ( $E_{m,g}$ ) fueron menores, en cada calidad de madera, que los del local ( $E_{m,l}$ ) y que los determinados por las técnicas alternativas basadas en la velocidad de propagación del sonido ( $E_{m,us}$ ) y en la frecuencia de vibración longitudinal ( $E_{m,v}$ ). Estos resultados están en línea con la influencia que, sobre las deformaciones medidas para determinar  $E_{m,g}$ , ejerce el esfuerzo de corte actuante en los tercios extremos de las vigas. Las diferencias con respecto a  $E_{m,g}$  en los grados estructurales Superior e Inferior, respectivamente, alcanzaron 9% y 10% para  $E_{m,l}$ , 5% y 12% para  $E_{m,us}$  y 1% y 6% para  $E_{m,v}$ .
- No obstante lo expresado en el párrafo anterior, un estudio detallado probó la existencia de vigas en las cuales se registró  $E_{m,l} < E_{m,g}$ ,  $E_{m,us} < E_{m,g}$ , o  $E_{m,v} < E_{m,g}$ , las cuales constituyen casos individuales que se apartaron del comportamiento general exhibido a través de los valores medios. En el Grado Superior, este comportamiento se encontró en 17 (15%), 37 (32%) y 49 (43%) de las vigas respectivamente, en tanto que los correspondientes en el Grado Inferior fueron 8 (7%), 23 (20%) y 32 (27%).
- Se determinó una mayor dispersión de valores para  $E_{m,l}$  que para  $E_{m,g}$ , lo cual se explica por el criterio adoptado para realizar los ensayos estáticos. Sin embargo, la mayor dispersión correspondió a los resultados de  $E_{m,us}$  y  $E_{m,v}$ , lo cual no pudo ser explicado a través de un estudio pormenorizado de las vigas ensayadas.
- Los criterios del INTI CIRSOC 2016a, UNE EN 384 2010, Denzler *et al.* 2008 y ASTM D 198 2015 pueden ser aplicados al material investigado. La relación entre los valores del módulo de elasticidad libre de la influencia del esfuerzo de corte, derivados de  $E_{m,g}$  según los 4 criterios, y los resultados experimentales de  $E_{m,l}$  oscilaron entre 0,95 y 0,98 para los dos grados estructurales. El criterio propuesto por Denzler *et al.* (2008) mostró la mejor performance con valores de la relación comprendidos entre 0,97 y 0,98.
- A través de un análisis estadístico se confirmó una relación más estrecha ( $R = 0,88$ ) de  $E_{m,g}$  con  $E_{m,l}$  que con los valores del módulo de elasticidad determinados a través de métodos dinámicos alternativos ( $R = 0,76$  para  $E_{m,g} - E_{m,us}$  y  $R = 0,78$  para  $E_{m,g} - E_{m,v}$ ).

## 5.5. FUTURAS INVESTIGACIONES

Del aporte del presente estudio emerge la conveniencia de diseñar nuevos proyectos de investigación orientados a complementar los resultados obtenidos, enfocando en los tres temas que se presentan y fundamentan a continuación:

### 5.5.1. Análisis de modelos para una clasificación mecánica por resistencia

El desarrollo de un método visual para clasificar por resistencia todas las secciones estructurales del material investigado permitió arribar a una propuesta que optimiza el rendimiento técnico-económico del material aplicando los parámetros visuales más influyentes. A su vez, la determinación visual de los parámetros se realizó sin mayores complejidades prácticas, en contraposición a las dificultades encontradas en otros casos, tal como el del pino resinoso cultivado en el nordeste del país.

Sin embargo, el moderado valor predictivo de los parámetros visuales más influyentes (nudosidad K, presencia de médula e inclinación de las fibras) quedó reflejado en una débil diferenciación de las propiedades mecánicas entre grados estructurales, sobre todo del módulo de elasticidad.

Numerosos antecedentes confirman que los procesos de clasificación mecánica optimizan el rendimiento técnico-económico en comparación con el alcanzado por métodos visuales, permitiendo alcanzar grados de calidad con niveles superiores en sus propiedades mecánicas.

El diseño de un nuevo proyecto orientado a identificar los parámetros mecánicos más eficientes y a elaborar modelos de clasificación mecánica por resistencia emerge como una potencial solución para los problemas derivados de la moderada eficiencia exhibida por los parámetros visuales.

### **5.5.2. Investigación experimental de las propiedades mecánicas**

Este trabajo aportó resultados sobre cuerpos de prueba con tamaño estructural usual, y fundados sobre una importante base estadística enmarcada en los requerimientos del criterio europeo. Los resultados permitieron conocer los valores característicos de las propiedades más importantes del material investigado para el cálculo estructural, proveyendo un nivel de confianza que está en línea con los modernos conceptos del diseño.

No obstante, dado que la amplitud del trabajo experimental requerido excede la posibilidad de ser abarcado en un único proyecto, queda pendiente el diseño de un nuevo programa orientado a determinar experimentalmente otras propiedades mecánicas. Dentro de éstas se incluyen la resistencia al esfuerzo cortante y el módulo de elasticidad transversal. Si bien éstas pueden ser derivadas de las propiedades fundamentales empleando relaciones estandarizadas, las particularidades que caracterizan a cada combinación especie / procedencia de la madera determinan la conveniencia de confirmar empíricamente sus valores característicos.

### **5.5.3. Investigación experimental sobre el impacto del grado de ataque del insecto *Megaplatypus mutatus* en las propiedades mecánicas**

En el apartado 5.1 se explicitan las conclusiones obtenidas tanto en relación a la influencia que ejerce sobre las propiedades mecánicas de las piezas el ataque del insecto *Megaplatypus mutatus*, como a la posibilidad de incorporar para uso estructural los elementos con ataque tipificado en esta Tesis como Grado 2. Sin embargo, y dada la trascendencia económica y sobre la seguridad estructural que posee el tema, queda pendiente un estudio específico sobre el mismo para evaluar una posible modificación de la norma IRAM 9660-4 (2015).

## CAPITULO 6. BIBLIOGRAFÍA

---

---

### 6.1. PUBLICACIONES Y TESIS

**Achinelli, F.G.; Denegri, G.; Marlats, R. (2004).** Evolución y perspectivas del cultivo de Salicáceas en la pampa húmeda argentina. SAGPyA Forestal 32: 14-23.

**Arguelles 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.

**Baño, V.; Arguelles-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.

**Barrett, J.D.; Lam, F.; Lau, W. (1992).** Size effects in visually graded softwood structural lumber. International Council for Building Research Studies and Documentation, Working Commission W18 – Timber Structures, CIB-W18, paper 25-6-5, Ahus, Sweden.

**Ballarin, A. S.; Ballarin A. W.; Calil Junior, C. (2017).** Classificação visual e mecânica simplificada da madeira de Pinus spp. CLEM+ CIMAD 2017. Junín. Argentina.

**Borodowski, E.D. (2006).** Álamos y sauces en el delta del Paraná: situación del sector y silvicultura. Disertación. Actas de las Jornadas de Salicáceas.

**Bassotti R.D.; Bay C.O.; Reviglio H.A.; Genovese F.V. (2014).** Caracterización físico- mecánica de la madera de álamo del sur de la provincia de Mendoza, para la fabricación de elementos estructurales multilaminados encolados. XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Montevideo. Uruguay.

**Blaß H.J. & Görlacher R. (1996).** Visuelle und maschinelle Festigkeitssortierung von Vollholz. Mikado 5:64-71.

**Calderón, A.D.; Roig, F.A.; Zanetti, R.P.; Aguado, E.G.; Furlani A.M.; Martínez F.G. (2011).** Características físico-mecánicas de maderas de clones de álamo ensayadas en la provincia de Mendoza – República Argentina. III Congreso Internacional de Salicáceas en Argentina. Neuquén. Argentina.

**Calil Júnior C.; Alexandre J. S. Miná A.J.S. (2003).** Vibração transversal: Um método eficiente para classificação de peças estruturais de madeira. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.7, n.2, p.335-338.

**CNA (2012).** Comisión Nacional del Álamo de Argentina. Informe Nacional. Período 2008-2011.

**Casado, M.; Acuña, L.; Vecilla, D.; A. Basterra, A; Relea E; López, G.; Ramón, G. (2009a).** Técnicas vibratorias aplicadas a madera estructural de Populus x euramericana”. V Congreso Forestal Español. Ávila. 14 Pp.

**Casado, M., Escudero, I., Acuña, L., Vecilla, D., Basterra, A., Relea, E., Lopez G., Ramón, G. (2009b).** El chopo como productor de madera estructural y sumidero de CO2. XII Congreso Forestal Mundial. Buenos Aires, Argentina.

**Casado, M.; Acuña, L.; Vecilla, D.; A. Basterra, A; Relea E; López, G.; Ramón, G. (2010).** The influence of size in predicting the elastic modulus of Populus x euramericana

timber using vibration techniques. Structures and Architecture – Cruz (Ed.) Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-49249-2. 8 Pp.

**Casado, M.; L. Acuña; D. Vecilla; L.A. Basterra; E. Relea; G. López. (2011).** Ultrasonidos y parámetros de clasificación visual para la caracterización de madera estructural de *Populus x Euramericana* I-214. 1º Congresso Ibero-LatinoAmericano da Madeira na Construção. Coimbra, Portugal. 9 Pp.

**Casado, M., Acuña, L., Basterra, L. (2012).** Clasificación de la madera estructural del clon *Populus x euramericana* I-214, 66 (5), páginas 633 - 638. Obtenido de doi: 10.1515/hf-2011-0153.

**Casado, M.; Acuña Rello, L.; Basterra Otero, L.; A.2, Heredero Muñoz, S; San Martín, R. (2013).** Estimación de la calidad de la madera en rollo de *Populus x euramericana* mediante ultrasonidos. 6º Congreso Forestal Español. Victoria-Gasteiz. España.

**Chauhan, A.; Sethy, A. (2016).** Differences in dynamic modulus of elasticity determined by three vibration methods and their relationship with static modulus of Elasticity. Maderas. Ciencia y tecnología 18(2): 373 - 382, 2016. DOI: 10.4067/S0718-221X2016005000034.

**Cichón, L.; Giayetto, A.; Fernández, D.; Garrido, S.; Gómez, R.; Muñoz, M.; Ibarra D. (2004).** Taladrillo de los Forestales. Algunos aspectos de su biología, detección y manejo de las poblaciones. Boletín INTA. Centro Regional Patagonia Norte. Estación Experimental Agropecuaria Alto valle.

**Choo, S. (1995).** Bending. Timber engineering STEP 1, Lecture B2. First edition. Centrum Hout. TheNetherlands. P 205-211.

**Cobas, A.C. (2012).** Modelos de variación de propiedades del leño juvenil a maduro en Salicáceas y su influencia sobre pulpas quimimecánicas. Tesis doctoral. Universidad nacional de la Plata. 213 p.

**Cobas, A.C.; Area, M.C.; Monteoliva, S. (2013).** Transición de madera juvenil a madura en un clon de *Populus deltoides* implantado en Buenos Aires, Argentina. DOI 10.4067/S0718-221X2013005000018. Maderas. Ciencia y tecnología 15(2): 223-234.

**Conde García, M.; Fernández-Golfín Seco, J.; Hermoso Prieto, E. (2007).** Mejora de la predicción de la resistencia y rigidez de la madera estructural con el método de ultrasonidos combinado con parámetros de clasificación visual. *Materiales de Construcción*, Vol. 57, 288, 49-59, octubre-diciembre 2007. ISSN: 0465-2746.

**Coronel E. O. (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, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero.

**Coronel E. O. (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, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero.

**Cortizo, S. (2005).** Mejores árboles para más forestadores. Subprograma álamos en el delta del Paraná de la SAGPyA, Capítulo III, pág. 137 a 160. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos de la Nación SAGPyA.

**Cortizo, S. (2005).** Roya del Álamo en el Delta del Paraná. Idia XXI. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. INTA. Buenos Aires. AR Vol.5, no.8.

**Cortizo, S; Mema, V; Graciano, C; Abbiati, N; Guiamet, J. (2006).** Efecto de la roya del álamo sobre el follaje y el crecimiento. Actas Jornadas de Salicáceas 2006. Buenos Aires. Argentina.

**Cortizo, S.; Monteverde, M.S.; Abbiati (2017).** Caracterización de la madera de cinco clones de *Populus deltoides* seleccionados dentro del programa de mejoramiento de INTA. CLEM+CIMAD 2017. Junín, Argentina.

**Damkilde, L.; Hoffmeyer, P.; Pendersen T.N. (2012).** Compression strength perpendicular to grain of structural timber and glulam. International council for building research, studies and documentation. Working commission w18 - timber structures. CIB-W18/31-6-4 pag 170-182. Dinamarca.

**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.

**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, Canadá.

**Delta Forestal. (2015)** Información técnica. MAGP. Dirección de Producción Forestal. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Argentina. <http://deltaforestal.blogspot.com.ar/p/informacion-tecnica.html>

**Denzler, J.K. & Glos, P. (2008).** Size effects in bending. International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W18 – Timber Structures, CIB-W18, paper 41-6-4, St. Andrews, Canada.

**Diab, J.; Manavella, R.; Guillaumet, A.; Filippetti, M. (2013).** Influencia de la longitud y posición de terminales en la determinación de la velocidad de propagación del sonido en vigas de madera de Álamo y pino Paraná. 4<sup>to</sup> Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Iguazú. Argentina.

**Diaz, G.; Monteoliva, S.; Álvarez, J.; Fernández Tschieder, E. (2011).** *Populus deltoides* 'Australiano 129/60': variación axial de la densidad y desarrollo de un modelo predictivo de la densidad del árbol completo. *Revista Bosque*, vol 31, num.1, 2010, pp 65-72.

**Directrices para la construcción de viviendas de madera. (2003).** Aprobadas por Disposición SSDUV N° 07/2003. Secretaría de Vivienda y Hábitat, Ministerio del Interior, Argentina. [http://www.vivienda.gob.ar/legislacion\\_directrices.php](http://www.vivienda.gob.ar/legislacion_directrices.php)

**Di Marco, E. (2014).** Ficha técnica. Dirección de Producción Forestal. Ministerio de Agricultura.

**Diebold, R. (1997).** Möglichkeiten der maschinellen Holzsortierung mit dem Euro-GreComat. In Grazer Holzbau-Fachtagung, Sortierung und Festigkeit. B/1:1-19.

**Edlund B. (1995).** Tension and compression. Timber engineering STEP 1, Lecture B2. First edition. Centrum Hout. The Netherlands. P 197-204.

**Fank, P.; Stefani, P.; Piter, J.C. (2014a).** Efecto de la altura en la resistencia a flexión

en piezas de pino resinoso del noreste de Argentina. XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, trabajo 263, Montevideo, Uruguay.

**Fank, P.; Stefani, P.; Piter, J.C.(2014b).** 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'). IV Congreso Internacional de las Salicáceas en Argentina. La Plata, Argentina.

**Fank, P.; Stefani, P.; Piter J.C. (2017).** Clasificación mecánica de tablas de pinos resinosos cultivados en el nordeste de Argentina. Maderas. Ciencia y tecnología 19(3): 247 - 264, 2017. DOI: 10.4067/S0718-221X2017005000021.

**Fernández-Golfín Seco, J.I.; Diéz Barra, M.R. (1995).** La anchura del anillo de crecimiento predictor de la calidad de la madera aserrada, para uso estructural. Revista INIA 173. 59-62.

**Fernández-Golfín Seco, J.I.; Diéz Barra, M.R.; 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.I.; Hermoso, E.; Diez, M.R. (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(268): 43-55.

**Filippetti, M.C.; Guillaumet, A.A.; Manavella, R.D.; Guillaumet, M.P. (2015).** Uso estructural de la madera de álamo. II Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira. Belo Horizonte, Brasil.

**Filippetti, M.C.; Guillaumet, A.A.; Tortoriello, M.A.; Alí C. (2017).** Potencial uso estructural de la madera *Populus deltoides* cultivado en el noroeste de la provincia de Buenos Aires. CLEM + CIMAD 2017. Junín. Buenos Aires. Argentina.

**Genovese, F.; Revigli, H.; Bay, C.; Bassotti, R. (2014).** Caracterización físico mecánica de la madera de álamo del sur de la provincia de Mendoza, para la fabricación de elementos estructurales multilaminados encolados. IV Congreso Internacional de las Salicáceas en Argentina. La Plata, Argentina.

**Giménez R. (2009).** Cuadernillo n° 5: Megaplatus mutatus: Bases para su manejo integrado. Serie Técnica: Manejo Integrado de Plagas Forestales. ISSN 1851-4103. Laboratorio de Ecología de Insectos. EEA INTA Bariloche. Argentina

**Glos, P. (1995a).** Strength grading. Basis of design, material properties, structural components and joints. Timber Engineering STEP 1, pp: A6/1-A6/8. Centrum Hout, The Netherlands.

**Glos P. (1995b).** Solid timber - Strength classes. In Timber Engineering STEP 1, pp. A7/1-A7/8. Centrum Hout, The Netherlands.

**Glos, P.; & Diebold, R. (1994).** Verfahrensentwicklung und Erprobung zur maschinellen Schnittholzsortierung. Abschlußbericht 89505, Institut für Holzforschung der Universität München.

**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. (1997).** Möglichkeiten der maschinellen Holzsortierung mit dem GradeMaster 403. In Grazer Holzbau-Fachtagung, Sortierung und Festigkeit B/2:1-10.

**Green, D.; Kretschmann, D. (1997).** Properties and grading of southern pine timbers. Forest Products Journal 47(9): 78-85.

**Guillaumet, A.A.; Manavella, R.D.; Filippetti, M.C.; 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.A.; Manavella, R.D.; Filippetti, M.C.; 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. Buenos Aires.

**Guillaumet, A.; Acuña Rello, L.; Piter, J.C. (2014<sup>a</sup>).** Evaluación del rendimiento de las tablas de *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67' para la fabricación de

vigas laminadas encoladas. IV Congreso Internacional de las Salicáceas en Argentina. La Plata, Argentina.

**Guillaumet, A.A.; Filippetti, M.C.; Acuña Rello, L.; Piter, J.C. (2014b).** Utilización de la madera de álamo en elementos estructurales. XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Montevideo, Uruguay.

**Gutiérrez, A.; Grau, J.M.; Baonza, M. V. (2001).** Propiedades físicas de la madera de diferentes clones de chopo. I Simposio del chopo. Editorial Junta de Castilla y León. 461-468.

**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.

**Hermoso, E. (2001).** Caracterización mecánica de la madera estructural de *Pinus sylvestris* L. Tesis doctoral. Madrid, ES, Universidad Politécnica. 253 p.

**Hermoso, E.; Fernández Golfín, J.I.; Diez, M.R. (2002).** Análisis del factor de altura  $k_h$  en la madera aserrada estructural de pino silvestre. Invest. Agr. Sist. Recur. For. Vol. 11 (2).

**Hermoso Prieto, E.; Fernández Golfín Seco, J.I; Díaz Barra, M.R.; Mier Perez, R. (2007).** Aplicación de los ultrasonidos a la evaluación de las propiedades mecánicas de la madera en rollo de pequeño diámetro. Informes de la Construcción, Vol. 59, 506, 87-95, abril-junio 2007. ISSN: 0020-0883.

**Hermoso Prieto, E.; Díaz Barra, M.R.; Fernández Golfín, J.I.; Iñiguez 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. 6º Congreso Forestal Español. Vitoria Gasteiz. España.

**Hernández, R. E.; Koubaa, A.; Beaudoin, M.; Fortin, Y. (1998).** Selected mechanical properties of Fast-growing poplar hybrid clones. Wood and Fiber Science 30(2). 138-147.

**Hoffmeyer, P. (1995).** Wood as a building material. Timber engineering STEP 1, Lecture B2. First edition. Centrum Hout. The Netherlands. P 43-63.

**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.

**Iñiguez González, I. (2007).** Tesis Doctoral. Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural. Universidad Politécnica de Madrid. España.

**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.

**Keil, G.; Acuña, L; Spavento, E; Casado, M.; Refort, M. (2014).** Metodología de ensayo no destructivo y destructivo aplicada a madera de *Populus x canadensis* 'I-214' de procedencia argentina. IV Congreso Internacional de Salicáceas en Argentina. La Plata. Argentina.

**Korin, U. (1990).** Timber in compression perpendicular to grain. International council for building research, studies and documentation. Working commission W18 - timber structures. CIB-W18A/23-6-1 pag 95-110. Portugal.

**Lucero, G; Pizzuolo, P; Lucero, H. (2011).** Enfermedades de las salicáceas: agentes de daño, impacto y estrategias de manejo. Cuadernillo n° 14. Serie técnica: "Manejo Integrado de Plagas Forestales". INTA EEA Bariloche. ISSN 1851-4103.

**Monteoliva, S. & Cobas, A.C. (2011).** Patrones de variación axial y radial de densidad y longitud de fibras en *Populus* asociados a la formación de madera juvenil y madura. III Congreso Internacional de salicáceas en Argentina. Neuquén. Argentina.

**Monteoliva, S. & Senisterra, G. (2008).** Efecto del sitio, el origen y el clon sobre el crecimiento y propiedades de la madera de *Populus*. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 2008 17(3), 261-270. ISSN: 1131-7965. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentación (INIA). Disponible on line en [www.inia.es/srf](http://www.inia.es/srf). 10p.

**Moya, L.; Cardoso, A.; Cagno, M. O'Neill, H. (2015).** Caracterización estructural de madera aserrada de pinos cultivados en Uruguay. *Maderas. Ciencia y tecnología* 17(3): 597 - 612, 2015. DOI: 10.4067/S0718-221X2015005000053.

**Nakai, T.; Tanaka T (1988).** Non-destructive test by frequency of full size timber for grading. International council for building research, studies and documentation. Working commission W18 - timber structures. CIB-W18A/21-5-1 pag 82-131. Canadá.

**Newlin, J.A. &Trayer, G.W. (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, U.S. Department of Agriculture, p. 375-393. Reprinted as Report 1310, october 1941.

**Piter, J.C. (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. 206 p.

**Piter J.C., Zerbino R.L., Blass H. J. (2004).** 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 (ISSN 0018-3768, revista científica editada por Technische Universtaet Muenchen, Holzforschung Muenchen – Springer Verlag, Alemania). 62(1): 1.-8

**Piter, J.C. (2012).** Size effect on bending strength in sawn timber of fast-growing Argentinean *Eucalyptus grandis*. Analysis according to the criterion of European standards. European Journal of Wood and Wood Products 70(1-3):17–24.

**Ramos, R.; Gómez, R.; Torrán, E.; Piter, J.C. (2014a).** Propiedades físico-mecánicas de la madera laminada encolada estructural de álamo (*Populus deltoides* ‘Australiano 129/60’ y ‘Stoneville 67’). Análisis conforme al criterio adoptado por la normativa europea. IV Congreso Internacional de las Salicáceas en Argentina. La Plata, Argentina.

**Ramos, R.; Sosa Zitto, M.A.; Gómez, R., Torrán, E., Piter, J.C. (2014b).** Madera laminada encolada estructural de álamo. Determinación empírica de su comportamiento mecánico. XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Montevideo, Uruguay.

**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.

**Rouger F. (1995).** Volume and stress distribution effects. Timber engineering STEP 1, Lecture B1. First edition. CentrumHout. The Netherlands. P 189-196.

**Rouger, F. & Barrett, J.D. (1995).** Size effects in timber. In: Informationsdienst Holz, STEP 3: 3/1-3/24. Fachverlang Holz. Düsseldorf, Deutschland.

**Signorelli, A. (2010).** Situación forestal en el Delta del Paraná. Actualidad y perspectivas. Simposio Científico Académico Delta del Paraná. San Fernando, Argentina, 4 y 5 de octubre, 2010.

**SINAVIMO. Sistema Nacional Argentino de Vigilancia y Monitoreo de Plagas. (2017).** Megaplatypus mutatus. <https://www.sinavimo.gov.ar/plaga/megaplatypus-mutatus>.

**Spavento, E.; Acuña, L.; Basterra, A.; Keil, G.; Taraborelli, C. (2014).** Influencia de Megaplatypus mutatus C. en el comportamiento elasto-resistente de piezas macizas y encoladas de Populus x canadensis I-214 (Argentina). Jornadas de salicáceas 2014. La Plata. Argentina.

**Spavento E (2015).** Caracterización y mejora tecnológica de la madera de Populus x euramericana i-214 (dode) guinier, austral y boreal, con fines Estructurales. Tesis doctoral. Universidad de Valladolid.

**Stapel, P.; van de Kuilen; J.W.G.; Strehl, O. (2012).** Visual strength grading in europe. International council for research and innovation in building and construction. Working commission w18 - timber structures. CIB-W18/45-5-2 pag 113-131. Sweden.

**Suarez, R. y Borodowski, E.D. (1999).** Sistema Silvopastoriles para la Región Pampeana y Delta del Paraná. SAGPyA N° 13.

**Thomas, E. (2011).** Biología y manejo integrado de Megaplatypus mutatus en los valles del norte de la Patagonia. Disertación . III Congreso Internacional de salicáceas en Argentina. Neuquén. Argentina.

**Vignote Peña, S.; Jiménez Peris, F.J.; Morales Méndez, E.; Gómez Pérez, C. (2001).** Tecnología de la madera en la construcción arquitectónica. Editorial Mundi prensa – mapa. 227 pag

**Weibull, W. (1939).** The phenomenon of rupture in solids. In: Royal Swedish Institute for Engineering Research, Proceeding N°153. Stockholm, Sweden.

## 6.2. NORMAS Y REGLAMENTOS

**ABNT (2010)** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Projeto de revisão NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira. Brasil.

**ASTM D198 - 15** Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA.

**DIN 4074-1 (2008).** Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 1: Nadelschnittholz Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag. Berlín.

**DIN 4074-5 (2008).** Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 5: Laubschnittholz Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag. Berlín.

**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.

**INTI CIRSOC (2016a).** Reglamento Argentino de Estructuras de Madera. Disposiciones generales y requisitos para el diseño y la construcción de estructuras de madera en edificaciones. Buenos Aires, Argentina, disponible en <https://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/601/CIRSOC601-completo.pdf>.

**INTI CIRSOC (2016b).** Manual de aplicación de los criterios de diseño adoptados por el reglamento CIRSOC 601. Buenos Aires, Argentina, disponible en <https://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/manual601-completo.pdf>

**IRAM 9542 (1977).** Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Maderas. Método de ensayo de flexión estática de maderas con densidad aparente mayor de 0,5 g/cm<sup>3</sup>. Buenos Aires.

**IRAM 9545 (1985).** Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Maderas. Método de ensayo de flexión estática. Buenos Aires.

**IRAM 9551 (1985).** Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Maderas. Método de determinación de la compresión axial o paralela al grano. Buenos Aires.

**IRAM 9660-1 (2015).** Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera laminada encolada estructural. Parte 1: Clases de resistencia y requisitos de fabricación y de control. Buenos Aires.

**IRAM 9660-1 (2015).** Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera laminada encolada estructural. Parte 2: Métodos de ensayo. Buenos Aires.

**IRAM 9661 (2015).** Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera laminada encolada estructural. Requisitos de los empalmes por unión dentada. Buenos Aires.

**IRAM 9662-1 (2015).** Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por Resistencia. Parte 1: Tablas de pino Paraná (*Araucaria angustifolia*). Buenos Aires.

**IRAM 9662-2 (2015).** Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2005). Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por Resistencia. Parte 2: Tablas de *Eucalyptus grandis*. Buenos Aires.

**IRAM 9662-3 (2015).** Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por Resistencia. Parte 3: Tablas de Pino taeda - *elliotti*. Buenos Aires.

**IRAM 9662-4 (2015).** Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por Resistencia. Parte 4 – Tablas de álamo ‘australiano 129/60’ y ‘Stoneville 67’ (*Populus deltoides*). Buenos Aires.

**IRAM 9670 (2002).** Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera estructural. Clasificación en grados de resistencia para la madera aserrada de pinos resinosos (Pino *elliotti* y Pino taeda) del noroeste argentino mediante una evaluación visual. Buenos Aires.

**IRAM 9663(2013).** Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de las 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.

**ISO 3130 (1975).** International Organization for Standardization. Wood – Determination of moisture content for physical and mechanical tests.

**ISO 3131 (1975).** International Organization for Standardization. Wood – Determination of density for physical and mechanical tests.

**NCh 1198:2007 (2014). Norma Chilena Oficial.** Madera – Construcciones en madera – Cálculo. Instituto Nacional de Normalización INN-Chile, Santiago.

**NCh 1207 Of (2005).** Norma Chilena Oficial. Pino radiata. Clasificación visual para uso estructural. Especificaciones de los grados de calidad. Instituto nacional de Normalización. Chile.

**NCh 1970-2. Of 88 (1988).** Norma Chilena Oficial. Maderas. Parte 2; Especies coníferas. Clasificación visual para uso estructural. Especificaciones de los grados de calidad. Instituto nacional de Normalización. Chile.

**ND B 52-001 (2007).** Règles d'utilisation du bois dans la construction. Classement visuel pour l'emploi en structures des bois sciés français résineux et feuillus. Association Française de Normalisation.

**NDS (2015).** National Design Specification for Wood Construction. American Forest & Paper Association, Washington.

**Disposición SSDUV N° 07 (2003).** Directrices para la Construcción de Viviendas de Madera. Secretaría de Vivienda y Hábitat del Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda. Argentina. Disponible en [http://www.vivienda.gob.ar/legislacion\\_directrices.php](http://www.vivienda.gob.ar/legislacion_directrices.php).

**UNE EN 350-2 (1995).** Agencia Española de Normalización y Certificación. Durabilidad de la madera y de los materiales derivados de la madera, Durabilidad natural de La madera maciza. Parte 2. España.

**UNE EN 338 (2010).** Madera estructural. Clases resistentes. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid.

**UNE EN 338 (2010). Erratum (2011).** Madera estructural. Clases resistentes. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid.

**UNE EN 335-1 (1992).** Durabilidad de la madera y de sus productos derivados. Definición de clases de riesgo de ataque biológico. Parte 1: Generalidades. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid.

**UNE EN 335-2 (1992).** Durabilidad de la madera y de sus productos derivados. Definición de clases de riesgo de ataque biológico. Parte 1: aplicación a la madera maciza. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid.

**UNE EN 350-1 (1995).** Durabilidad de la madera y de sus materiales derivados de la madera. Durabilidad natural de la madera maciza. Parte 1: Guía de la durabilidad natural y de la impregnabilidad de especies de madera seleccionadas por su importancia en Europa. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid.

**UNE EN 350-2 (1995).** Durabilidad de la madera y de los materiales derivados de la madera. Durabilidad natural de la madera maciza. Parte 1: Guía para los principios de ensayo y clasificación de la durabilidad natural de la madera. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid.

**UNE EN 384 (2010).** Determinación de los valores característicos de las propiedades y la densidad. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid.

**UNE EN 384 (2016).** Determinación de los valores característicos de las propiedades y la densidad. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid.

**UNE EN 408 (2011).** Madera aserrada y madera une-laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid.

**UNE EN 1310 (1997).** Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de singularidades. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid.

**UNE EN 1912 (2005+A4).** Madera estructural. Asignación de calidades visuales y especies. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid.

**UNE 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.

**UNE EN 14081-1 (2006).** Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 1: Requisitos generales. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid.

**UNE EN 14081-1 (2016).** Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 1: Requisitos generales. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid.

**UNE EN 14081-2 (2010).** Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 2: Clasificación mecánica. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid.

**UNE EN 14081-3 (2012).** Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 3: Clasificación mecánica. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid.

**UNE EN 14358 (2016).** Estructuras de madera. Determinación y verificación de valores característicos. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid.

**UNE EN 56544 (2007).** Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid.

**UNE EN 56544 (2011).** Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid.

## **ANEXO I**

### **ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES**

---

---

En este Anexo se presentan análisis estadísticos complementarios que permiten evaluar con mayor detalle el comportamiento de las distintas muestras. Se incorporan estudios de normalidad de las distribuciones a través del sesgo estandarizado, la curtosis estandarizada y la prueba Chi-Cuadrado y gráficos de distribución normal, histogramas y de caja y bigotes.

Para facilitar la búsqueda y comprensión de la información se identifica cada una de las secciones con un número “I” y a continuación la numeración y el nombre del ítem correspondiente en el capítulo 4 “Presentación y discusión de resultados”.

En las tablas de análisis de normalidad de las distribuciones se indican con letra negrita los valores del sesgo estandarizado y la curtosis estandarizado que indican algo de no normalidad significativa en los datos, y con el mismo formato los valores de la prueba Chi-Cuadrado menores a 0,05; que indican que se puede rechazar la idea de una distribución normal con un 95% de confianza.

En el capítulo 3 “Programa experimental” se describen las distintas pruebas estadísticas y gráficos utilizados en este Anexo.

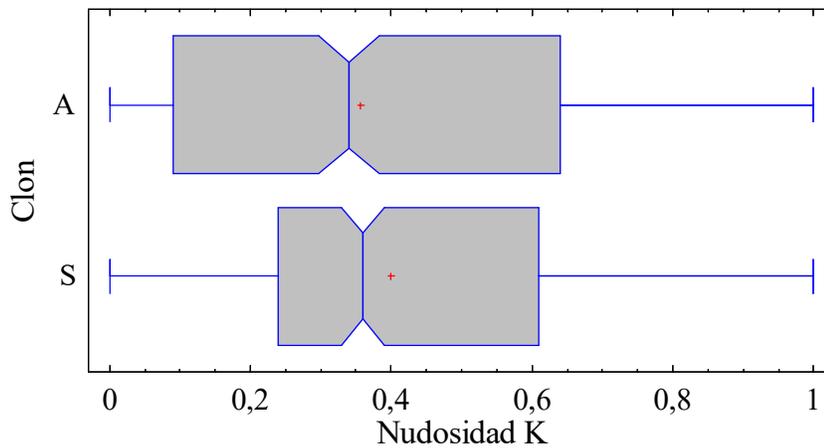
### I.4.1.1. Análisis de las singularidades de apreciación visual

#### Nudosidad

**Tabla A-I.1:** Análisis de normalidad de la distribución de la nudosidad “K”

Parámetro	Clon	
	A	S
Sesgo Estandarizado	<b>2,98</b>	<b>-3.48</b>
Curtosis Estandarizada	2,00	-1.30
Chi-Cuadrado	<b>&lt; 0,05</b>	<b>&lt; 0,05</b>

A: Australiano 129/60. S: Stoneville 67



**Figura A-I.1:** Gráfico de caja y bigotes de la nudosidad “K”

“A”: clon ‘Australiano 129/60’. “S”: clon ‘Stoneville 67’

**Tabla A-I.2:** Prueba de Kruskal Wallis para la nudosidad “K”

Clon	n	Rango promedio
Australiano 129/60	404	351
Stoneville 67	335	392
Estadístico: 6.88	Valor-P = 0,008	

### Inclinación de las fibras

**Tabla A-I.3:** Análisis de normalidad de la distribución de la inclinación de las fibras

Parámetro	Clon	
	A	S
Sesgo Estandarizado	<b>4,54</b>	0,92
Curtosis Estandarizada	<b>-4,74</b>	-1,67
Chi-Cuadrado	<b>&lt;0,05</b>	<b>&lt;0,05</b>

A: Australiano 129760. S: Stoneville 67

**Tabla A-I.4:** Prueba de Kruskal Wallis para la inclinación de las fibras

Clon	n	Rango promedio
Australiano 129/60	528	443
Stoneville 67	361	448
Estadístico: 0,108	Valor-P = 0,742	

### Anillos de crecimiento

**Tabla A-I.5:** Análisis de normalidad de la distribución de la inclinación de las fibras

Parámetro	Clon	
	A	S
Sesgo Estandarizado	<b>11,17</b>	<b>3,35</b>
Curtosis Estandarizada	<b>8,49</b>	0,30
Chi-Cuadrado	<b>&lt;0,05</b>	<b>&lt;0,05</b>

A: Australiano 129760. S: Stoneville 67

**Tabla A-I.6:** Prueba de Kruskal Wallis para los anillos de crecimiento

Clon	n	Rango promedio
Australiano 129/60	404	283
Stoneville 67	254	402
Estadístico: 61,275		Valor-P = 0,0

#### I.4.1.2. Propiedades físico-mecánicas y su relación con las singularidades

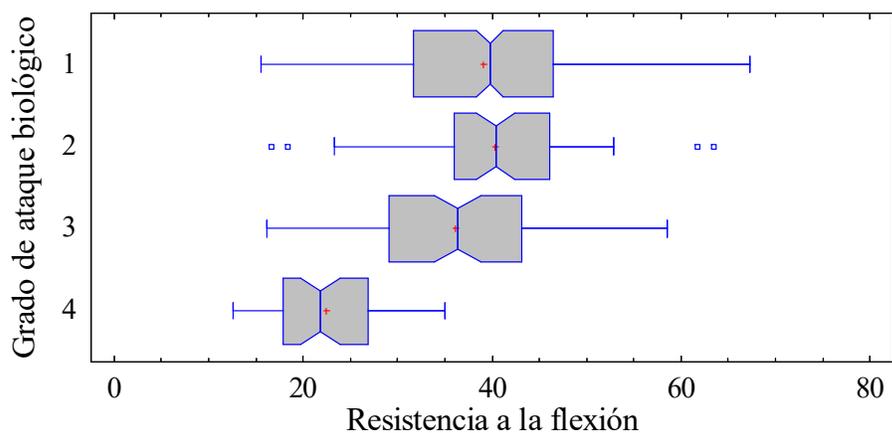
En este apartado se presenta el análisis de las distribuciones de las muestras de la resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad y la densidad. En primer lugar, se evalúan las propiedades mecánicas de las piezas de acuerdo al grado de ataque biológico que presentaron y luego se analizan las tres propiedades para cada una de las 10 muestras.

#### Impacto del ataque biológico sobre la resistencia y la rigidez en flexión

**Tabla A-I.7:** Análisis de normalidad de la resistencia a la flexión por grado de ataque biológico en el tercio central

Clon	Parámetro	Grado de Ataque biológico			
		1	2	3	4
A	Sesgo Estandarizado	<b>-3,973</b>	-1,621	0,021	-0,524
	Curtosis Estandarizada	0,785	-0,511	-0,466	-1,233
	Chi-Cuadrado	<b>0,014</b>	0,205	0,434	0,476
S	Sesgo Estandarizado	1,898	0,019	0,826	1,425
	Curtosis Estandarizada	-0,766	-0,731	-0,705	-0,541
	Chi-Cuadrado	<b>0,001</b>	<b>0,026</b>	0,969	0,089
Ambos	Sesgo Estandarizado	-0,443	-0,294	0,422	0,580
	Curtosis Estandarizada	0,423	-0,488	-0,918	-1,130
	Chi-Cuadrado	0,053	<b>0,0224</b>	0,986	0,743

Anexo I  
Análisis estadístico de los datos experimentales



**Figura A-I.2:** Gráfico de caja y bigotes de la resistencia a la flexión por grado de ataque biológico en el tercio central para el conjunto de ambos clones

**Tabla A-I.8:** Prueba de Kruskal Wallis para la resistencia a la flexión por grado de ataque biológico en el tercio central

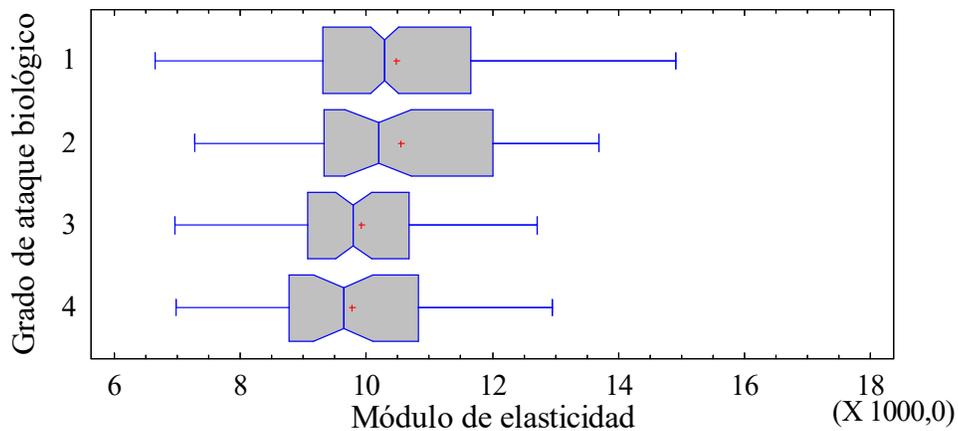
Grado de ataque biológico	Australiano 129/60		Stoneville 67		Ambos		
	n	Rango promedio	n	Rango promedio	n	Rango promedio	
1	129	128	131	117	260	245	
2	29	139	32	122	61	262	
3	48	119	28	89	76	209	
4	26	30	20	29	46	59	
		Estadístico: 49,89 Valor-P = $8,4 \cdot 10^{-11}$		Estadístico: 40,96 Valor-P = $6,6 \cdot 10^{-9}$		Estadístico: 89,54 Valor-P = 0,0	

**Tabla A-I.9:** Prueba de Múltiples Rangos para la resistencia a la flexión por grado de ataque biológico en el tercio central

Grado de ataque biológico	Australiano 129/60		Stoneville 67		Ambos	
	n	Grupos Homogéneos	n	Grupos Homogéneos	n	Grupos Homogéneos
4	26	X	20	X	46	X
3	48	X	28	X	76	X
1	129	X	131	X	260	X
2	29	X	32	X	61	X

**Tabla A.I.10:** Análisis de normalidad del módulo de elasticidad por grado de ataque biológico

Clon	Parámetro	Grado de Ataque biológico			
		1	2	3	4
A	Sesgo Estandarizado	<b>-2,745</b>	-1,806	-0,650	-0,643
	Curtosis Estandarizada	0,788	<b>2,403</b>	0,767	-0,455
	Chi-Cuadrado	<b>0,249</b>	0,123	0,226	0,141
S	Sesgo Estandarizado	0,626	-0,367	0,196	-0,647
	Curtosis Estandarizada	-0,722	-1,394	-0,513	-0,484
	Chi-Cuadrado	0,140	0,252	0,238	0,889
Ambos	Sesgo Estandarizado	<b>2,342</b>	-0,645	2,001	0,487
	Curtosis Estandarizada	<b>2,422</b>	-0,044	0,356	-0,651
	Chi-Cuadrado	<b>0,022</b>	0,147	<b>0,034</b>	0,182



**Figura A-I.3:** Gráfico de caja y bigotes del módulo de elasticidad por grado de ataque biológico para el conjunto de ambos clones

**Tabla A-I.11:** Prueba de Kruskal Wallis para módulo de elasticidad por grado de ataque biológico en el tercio central

Grado de ataque biológico	Australiano 129/60		Stoneville 67		Ambos	
	n	Rango promedio	n	Rango promedio	n	Rango promedio
1	129	121	131	110	260	234
2	29	108	32	121	61	238
3	48	117	28	83	76	192
4	26	99	20	84	46	183
		Estadístico: 2,91 Valor-P = 0,405	Estadístico: 8,89 Valor-P = 0,030		Estadístico: 11,56 Valor-P = 0,009	

**Tabla A-I.12:** Prueba de Múltiples Rangos para el módulo de elasticidad por grado de ataque biológico en el tercio central

Grado de ataque biológico	Australiano 129/60		Stoneville 67		Ambos	
	n	Grupos Homogéneos	n	Grupos Homogéneos	n	Grupos Homogéneos
4	26	X	20	X	46	X
3	48	X	28	X	76	X
1	129	X	131	X	260	X
2	29	X	32	X	61	X

### Propiedades mecánicas en flexión y densidad de los cuerpos de prueba que no rompieron por causa del ataque biológico

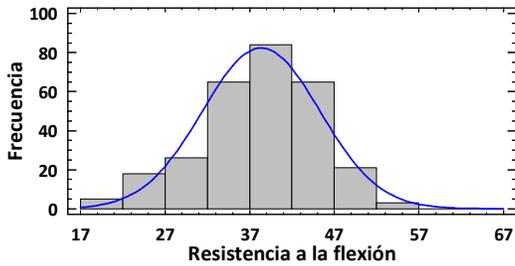
#### *Análisis de los datos experimentales de la resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad y la densidad*

En este apartado se presenta la evaluación de los datos experimentales correspondientes a la resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad y la densidad. El análisis se realiza para cada una de las 10 muestras por separado, luego para cada clon se agruparon las piezas ensayadas como vigas (muestras 2 a 5 para el 'Australiano 129/60' y muestras 7 a 10 para el 'Stoneville 67'), y finalmente sin discriminación de clon agrupadas en tablas (muestras 1 y 6) y vigas (muestras 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9 y 10).

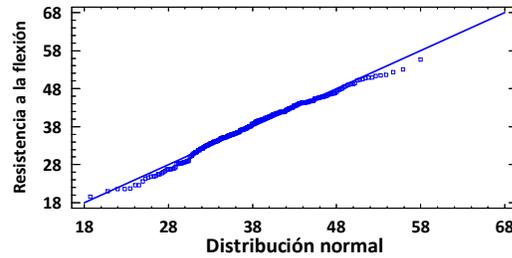
*Resistencia a la flexión*

**Tabla A-I.13:** Análisis de normalidad en las muestras de resistencia a la flexión del 'Australiano 129/60'

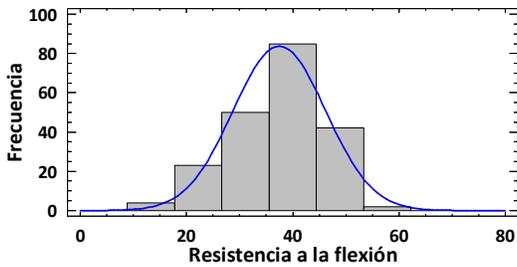
Parámetro	Muestras					
	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 2 a M 5
Sesgo Estandarizado	<b>-2,307</b>	-0,628	-1,706	-0,355	<b>-2,125</b>	<b>-2,472</b>
Curtosis Estandarizada	-0,706	-1,150	-1,251	-0,705	0,198	-0,559
Chi-Cuadrado	0,344	0,507	0,122	0,381	<b>0,037</b>	0,281



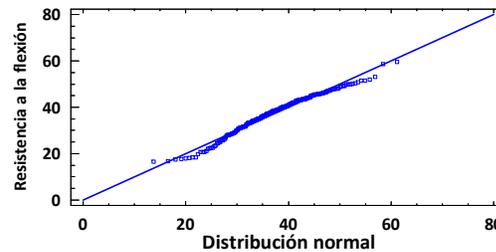
**Figura A-I.4:** Histograma de la resistencia a la flexión de la Muestra 1



**Figura A-I.5:** Gráfica de distribución normal de la resistencia a la flexión de la Muestra 1



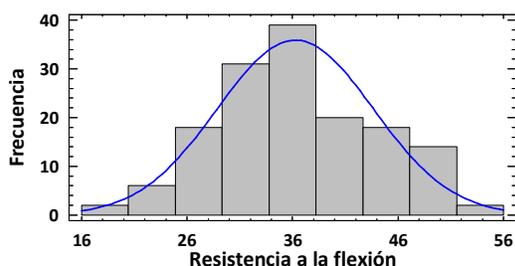
**Figura A-I.6:** Histograma de la resistencia a la flexión de las Muestras 2 a 5



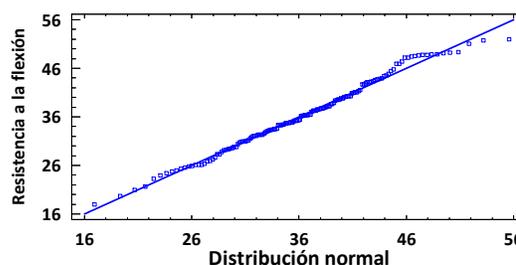
**Figura A-I.7:** Gráfica de distribución normal de la resistencia a la flexión de las Muestras 2 a 5

**Tabla A-I.14:** Análisis de normalidad en las muestras de resistencia a la flexión de 'Stoneville 67'

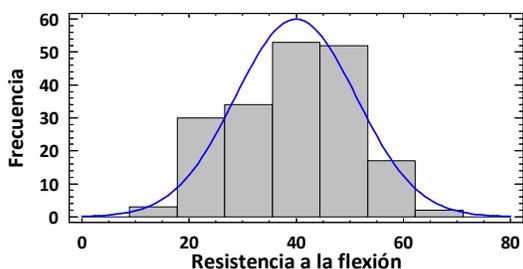
Parámetro	Muestras					
	M 6	M 7	M 8	M 9	M 10	M 7 a M 10
Sesgo Estandarizado	0,240	0,130	0,015	-1,010	1,306	0,094
Curtosis Estandarizada	-1,172	-1,270	-0,271	-0,980	-0,747	<b>-2,037</b>
Chi-Cuadrado	0,092	0,679	0,063	0,334	0,196	<b>0,033</b>



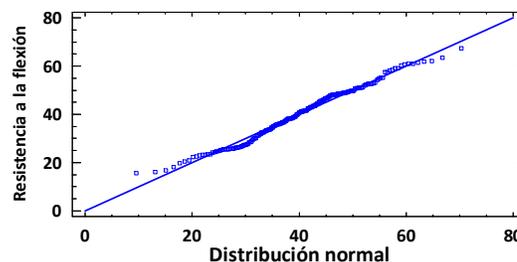
**Figura A-I.8:** Histograma de la resistencia a la flexión de la Muestra 6



**Figura A-I.9:** Gráfica de distribución normal de la resistencia a la flexión de la Muestra 6



**Figura A-I.10:** Histograma de la resistencia a la flexión de las Muestras 7 a 10



**Figura A-I.11:** Gráfica de distribución normal de la resistencia a la flexión de las Muestras 7 a 10

**Tabla A-I.15:** Análisis de normalidad en las muestras de resistencia a la flexión agrupadas en tablas y vigas

	Tablas	Vigas	Todas
Sesgo Estandarizado	-1,769	-0,301	-0,343
Curtosis Estandarizada	-1,659	-1,378	-0,291
Chi-Cuadrado	0,075	<b>0,046</b>	<b>0,002</b>
Muestras	1-6	2-3-4-5-7-8-9-10	1 a 10

Anexo I  
Análisis estadístico de los datos experimentales

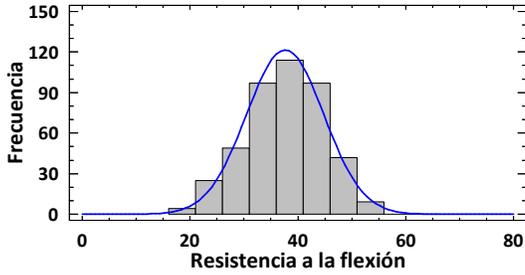


Figura A-I.12: Histograma de la resistencia a la flexión de las tablas

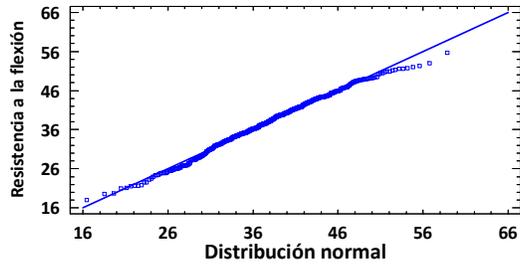


Figura A-I.13: Gráfica de distribución normal de la resistencia a la flexión de las tablas

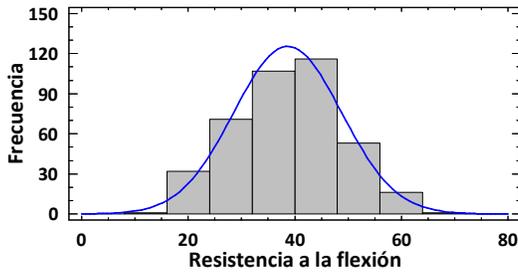


Figura A-I.14: Histograma de la resistencia a la flexión de las vigas

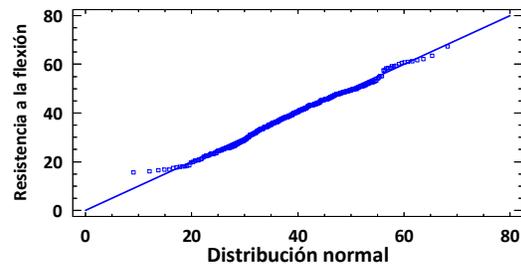


Figura A-I.15: Gráfica de distribución normal de la resistencia a la flexión de las vigas

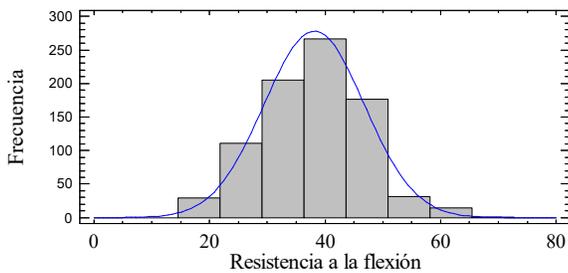


Figura A-I.16: Histograma de la resistencia a la flexión de todas las piezas

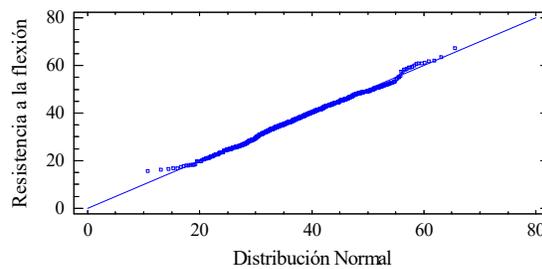


Figura A-I.17: Gráfica de distribución normal de la resistencia a la flexión de todas las piezas

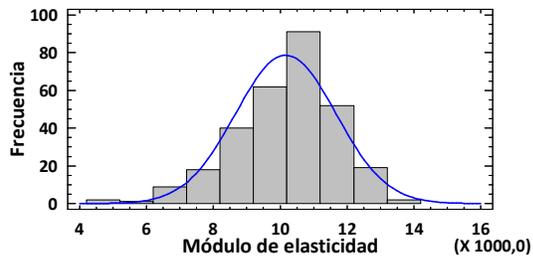
**Tabla A-I.16:** Prueba de Kruskal Wallis para la resistencia a la flexión

Clon	Tablas		Vigas		Todas	
	n	Rango promedio	n	Rango promedio	n	Rango promedio
Australiano 129/60	287	233	206	187	493	419
Stoneville 67	150	193	191	212	341	415
	Estadístico: 9,817 Valor-P = 0,001		Estadístico: 4,783 Valor-P = 0,028		Estadístico: 0,048 Valor-P = 0,825	

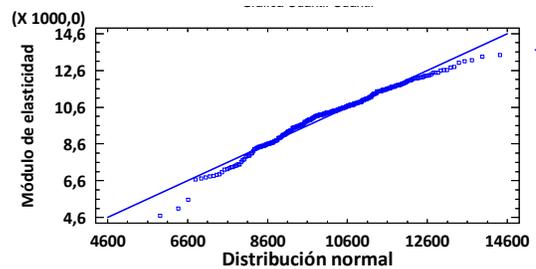
*Módulo de elasticidad global*

**Tabla A-I.17:** Análisis de normalidad en las muestras de módulo de elasticidad del 'Australiano 129/60'

Parámetro	Muestras					
	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 2 a M 5
Sesgo Estandarizado	<b>-4,212</b>	<b>2,548</b>	-0,331	0,288	0,436	1,574
Curtosis Estandarizada	1,921	1,316	-1,245	<b>2,237</b>	0,362	0,882
Chi-Cuadrado	0,150	0,079	0,159	0,811	<b>0,011</b>	0,321



**Figura A-I.18:** Histograma del módulo de elasticidad de la Muestra 1



**Figura A-I.19:** Gráfica de distribución normal del módulo de elasticidad de la Muestra 1

Anexo I  
Análisis estadístico de los datos experimentales

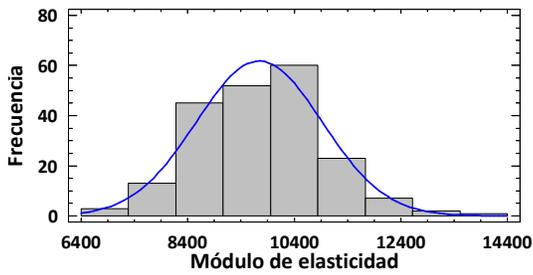


Figura A-I.20: Histograma del módulo de elasticidad de las Muestras 2 a 5

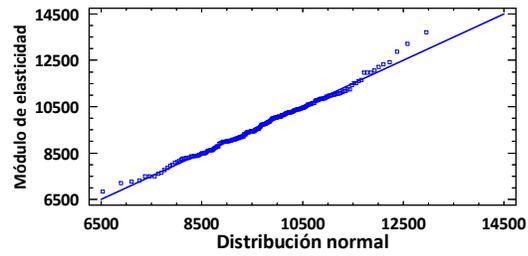


Figura A-I.21: Gráfica de distribución normal del módulo de elasticidad de las Muestras 2 a 5

Tabla A-I.18: Análisis de normalidad en las muestras de módulo de elasticidad de 'Stoneville 67'

Parámetro	Muestras					
	M 6	M 7	M 8	M 9	M 10	M 7 a M 10
Sesgo Estandarizado	1,452	-0,230	0,098	-0,564	1,310	1,352
Curtosis Estandarizada	0,725	0,180	-1,740	0,148	-1,049	-1,168
Chi-Cuadrado	0,241	0,349	0,077	0,380	0,113	0,058

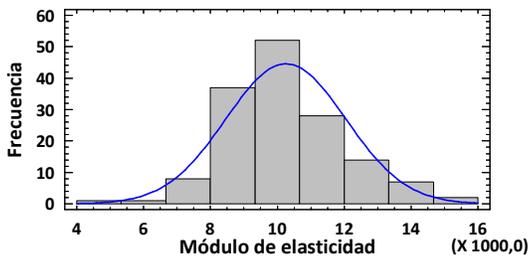


Figura A-I.22: Histograma del módulo de elasticidad de la Muestra 6

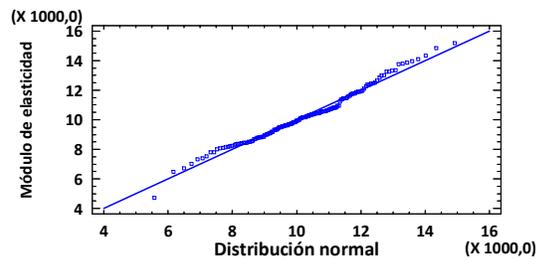


Figura A-I.23: Gráfica de distribución normal del módulo de elasticidad de la Muestra 6

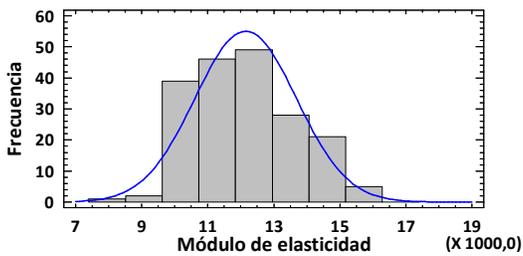


Figura A-I.24: Histograma del módulo de elasticidad de las Muestras 7 a 10

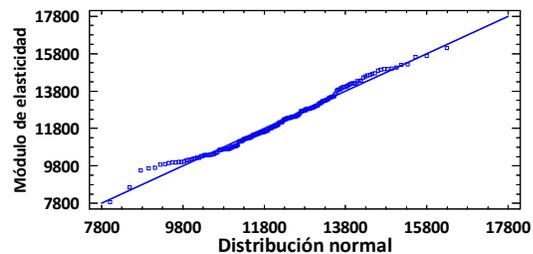
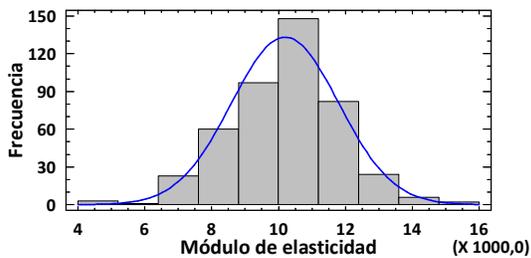


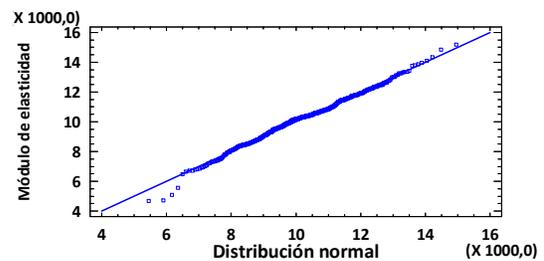
Figura A-I.25: Gráfica de distribución normal del módulo de elasticidad de las Muestras 7 a 10

**Tabla A-I.19:** Análisis de normalidad en las muestras de módulo de elasticidad

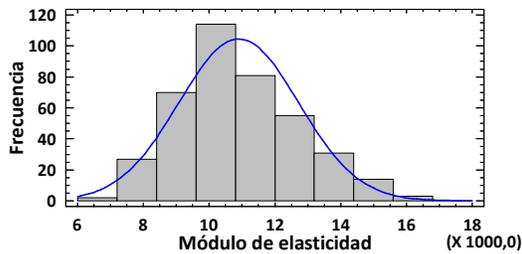
	Tablas	Vigas	Todas
Sesgo Estandarizado	-1,533	<b>3,415</b>	<b>2,668</b>
Curtosis Estandarizada	<b>-2,336</b>	-1,084	<b>2,027</b>
Chi-Cuadrado	<b>0,017</b>	<b>0,003</b>	<b>0,012</b>
Muestras	1-6	2-3-4-5-7-8-9-10	1 a 10



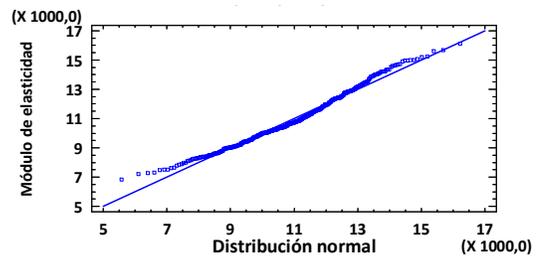
**Figura A-I.26:** Histograma del módulo de elasticidad de las tablas



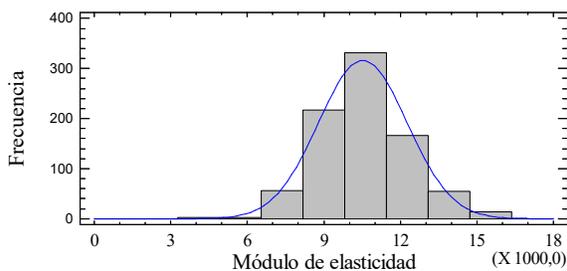
**Figura A-I.27:** Gráfica de distribución normal del módulo de elasticidad de las tablas



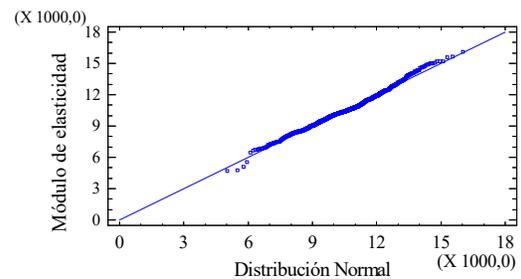
**Figura A-I.28:** Histograma del módulo de elasticidad de las vigas



**Figura A-I.29:** Gráfica de distribución normal del módulo de elasticidad de las vigas



**Figura A-I.30:** Histograma del módulo de elasticidad de todas las piezas



**Figura A-I.31:** Gráfica de distribución normal del módulo de elasticidad de todas las piezas

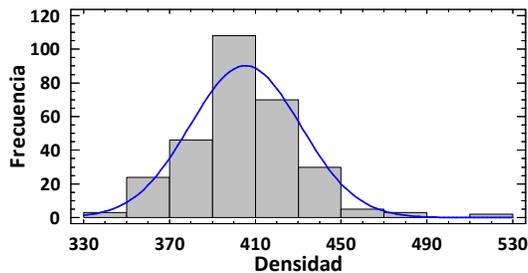
**Tabla A-I.20:** Prueba de Kruskal Wallis para en módulo de elasticidad

Clon	Tablas		Vigas		Todas	
	n	Rango promedio	n	Rango promedio	n	Rango promedio
Australiano 129/60	296	225	206	124	502	352
Stoneville 67	150	219	191	280	341	525
	Estadístico: 0,19 Valor-P = 0,659		Estadístico: 183,58 Valor-P = 0,0		Estadístico: 103,18 Valor-P = 0,0	

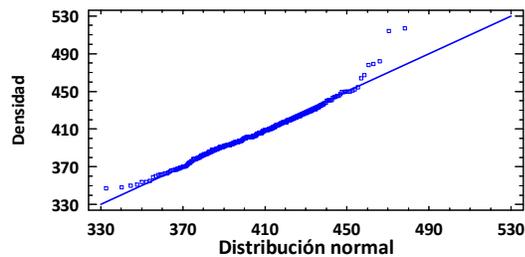
*Densidad*

**Tabla A-I.21:** Análisis de normalidad en las muestras de densidad de 'Australiano 129/60'

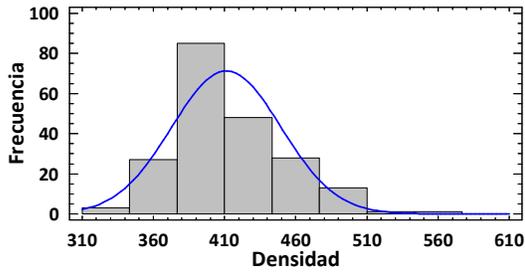
	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 2 a M 5
Sesgo Estandarizado	<b>4,532</b>	-1,360	<b>3,886</b>	-0,225	-0,826	<b>3,659</b>
Curtosis Estandarizada	<b>6,595</b>	1,074	<b>6,618</b>	0,063	-0,206	1,156
Chi-Cuadrado	0,247	0,913	0,233	0,215	0,297	<i>0,001</i>



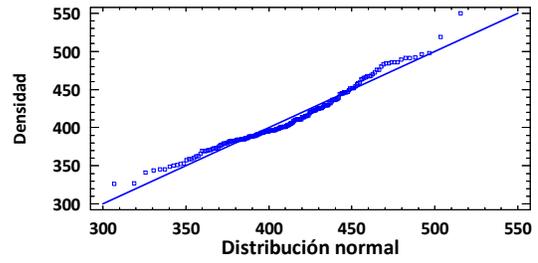
**Figura A-I.32:** Histograma de la densidad de la Muestra 1



**Figura A-I.33:** Gráfica de distribución normal de la densidad de la Muestra 1



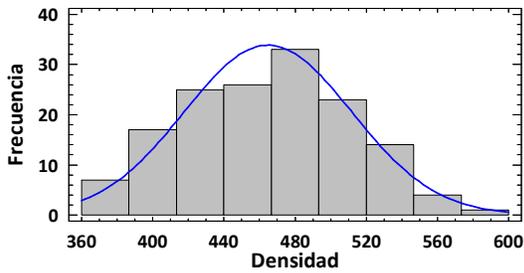
**Figura A-I.34:** Histograma de la densidad de las Muestras 2 a 5



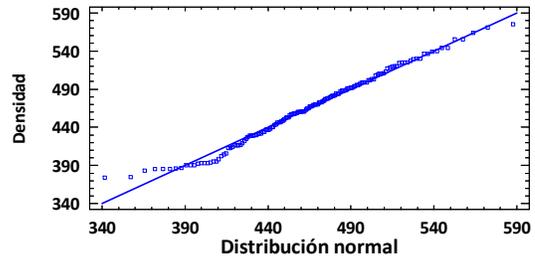
**Figura A-I.35:** Gráfica de distribución normal de la densidad de las Muestras 2 a 5

**Tabla A-I.22:** Análisis de normalidad en las muestras densidad de 'Stoneville 67'

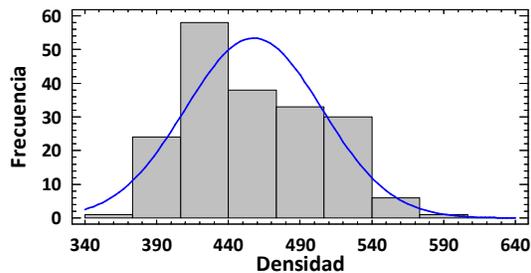
	M 6	M 7	M 8	M 9	M 10	M 7 a M 10
Sesgo Estandarizado	0,179	0,290	-0,219	0,820	1,162	<b>2,316</b>
Curtosis Estandarizada	-1,663	-1,207	-1,678	-0,965	-0,377	-1,857
Chi-Cuadrado	<b>0,037</b>	<b>0,018</b>	0,110	0,652	0,664	<b>0,011</b>



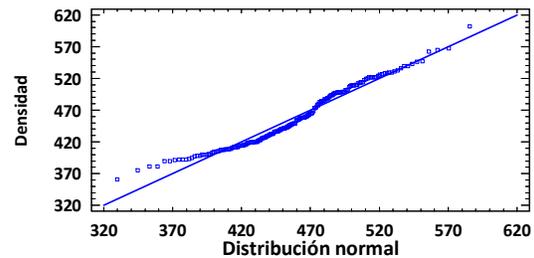
**Figura A-I.36:** Histograma de la densidad de la Muestra 6



**Figura A-I.37:** Gráfica de distribución normal de la densidad de la Muestra 6



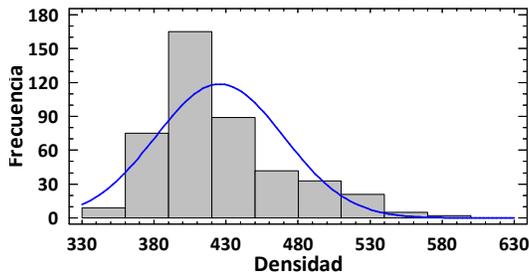
**Figura A-I.38:** Histograma de la densidad de las Muestras 7 a 10



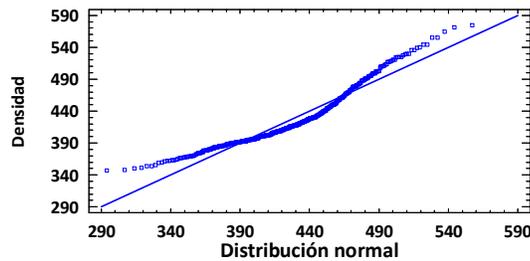
**Figura A-I.39:** Gráfica de distribución normal de la densidad de las Muestras 7 a 10

**Tabla A.I.23:** Análisis de normalidad en las muestras de densidad de las tablas y vigas

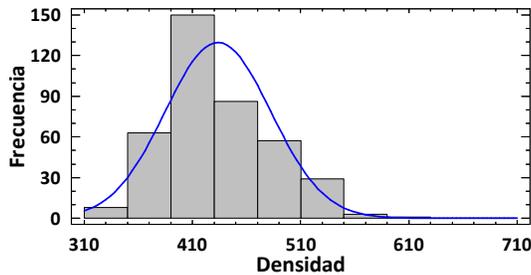
	Tablas	Vigas	Todas
Sesgo Estandarizado	<b>8,341</b>	<b>4,712</b>	<b>9,166</b>
Curtosis Estandarizada	2,267	-0,567	0,808
Chi-Cuadrado	<b>0,000</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>
Muestras	1-6	2-3-4-5-7-8-9-10	1 a 10



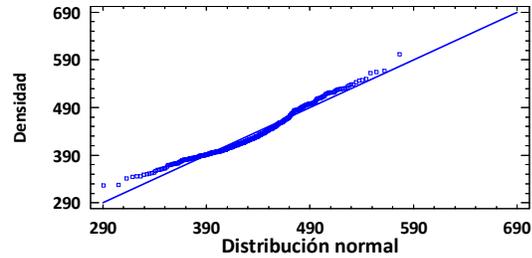
**Figura A-I.40:** Histograma de la densidad de las tablas



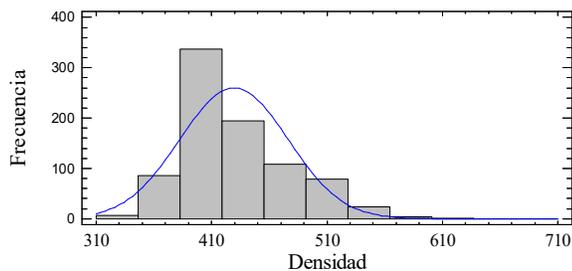
**Figura A-I.41:** Gráfica de distribución normal de la densidad de las tablas



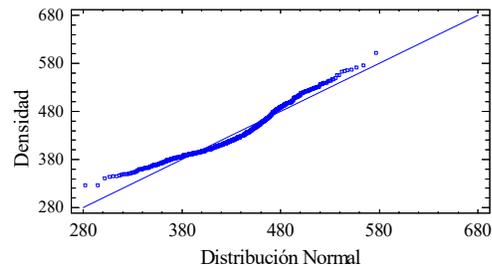
**Figura A-I.42:** Histograma de la densidad de las vigas



**Figura A-I.43:** Gráfica de distribución normal de la densidad de las vigas



**Figura A-I.44:** Histograma de la densidad de todas las piezas



**Figura A-I.45:** Gráfica de distribución normal de la densidad de todas las piezas

**Tabla A-I.24:** Prueba de Kruskal Wallis para la densidad

Clon	Tablas		Vigas		Todas	
	n	Rango promedio	n	Rango promedio	n	Rango promedio
Australiano 129/60	296	170	206	146	502	313
Stoneville 67	150	327	191	256	341	583
	Estadístico: 147,80 Valor-P = 0,0		Estadístico: 92,30 Valor-P = 0,0		Estadístico: 249,32 Valor-P = 0,0	

### Influencia de la presencia de médula sobre las propiedades mecánicas en flexión y la densidad

#### *Influencia de la médula en la resistencia a la flexión*

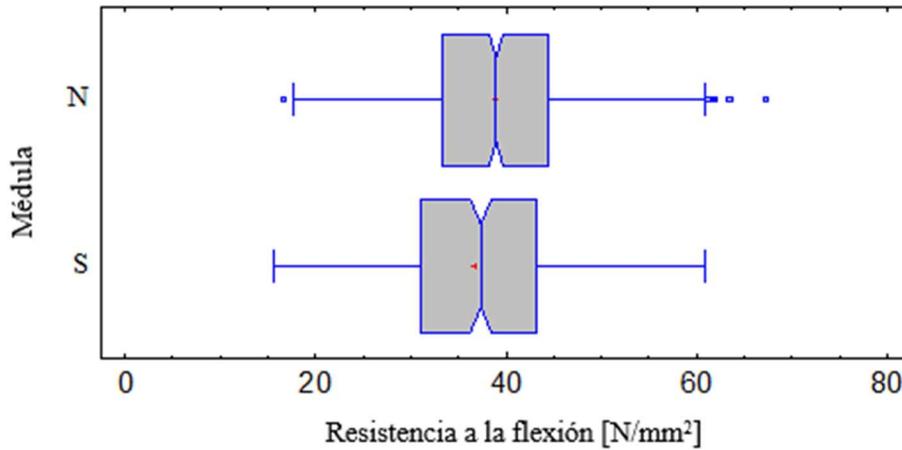
**Tabla A-I.25:** Análisis de normalidad en las muestras de resistencia a la flexión en tablas de acuerdo a la presencia de médula

Clon	Australiano		Stoneville		Todas	
	no	si	no	si	no	si
Sesgo Estandarizado	-1,128	<b>-2,833</b>	-0,501	-0,294	-1,376	-1,548
Curtosis Estandarizada	-1,068	-0,287	-1,175	-0,538	-2,103	-1,184
Chi-Cuadrado	0,607	<b>0,028</b>	0,228	0,181	0,322	<b>0,017</b>

**Tabla A-I.26:** Análisis de normalidad en las muestras de resistencia a la flexión en vigas de acuerdo a la presencia de médula

Clon	Australiano		Stoneville		Todas	
	no	si	no	si	no	si
Sesgo Estandarizado	<b>-2,212</b>	-1,039	0,032	-0,148	-0,401	-0,685
Curtosis Estandarizada	0,046	-1,052	-1,724	-1,302	-0,525	-1,661
Chi-Cuadrado	0,426	0,155	0,182	0,224	0,751	<b>0,038</b>

Anexo I  
Análisis estadístico de los datos experimentales



**Figura A-I.46:** Gráfico de caja y bigotes de la resistencia a la flexión de todas las piezas con y sin médula

N: piezas sin médula. S: piezas con médula

**Tabla A-I.27:** Prueba de Kruskal Wallis para la resistencia a la flexión entre las piezas sin y con médula

Médula	Australiano 129/60		Stoneville 67		Ambos	
	n	Rango promedio	n	Rango promedio	n	Rango promedio
No	343	252	213	182	556	435
Si	150	235	128	152	278	383
	Estadístico: 1,523 Valor-P = 0,217		Estadístico: 7,747 Valor-P = 0,005		Estadístico: 8,559 Valor-P = 0,003	

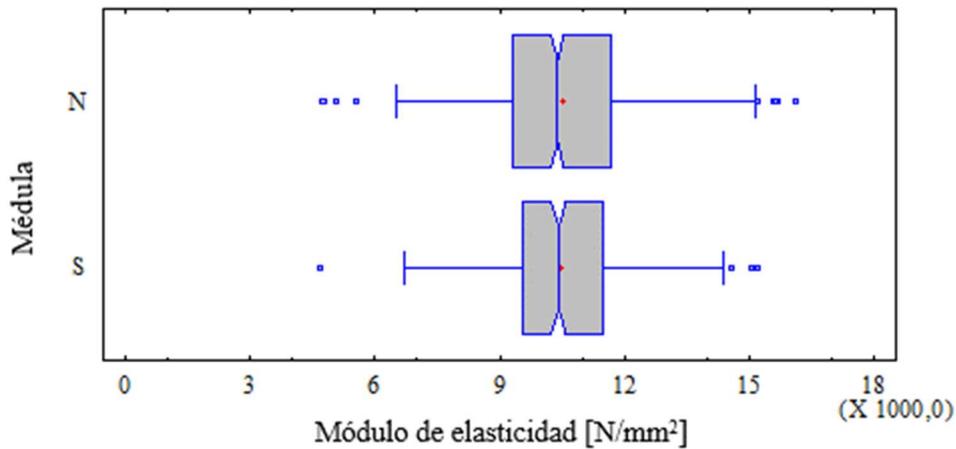
*Influencia de la médula en el módulo de elasticidad*

**Tabla A-I.28:** Análisis de normalidad en las muestras de módulo de elasticidad en flexión en tablas de acuerdo a la presencia de médula

Clon	Australiano		Stoneville		Todas	
	no	si	no	si	no	si
Sesgo Estandarizado	<b>-2,481</b>	<b>-4,115</b>	-0,083	1,257	-1,045	<b>-2,732</b>
Curtosis Estandarizada	0,612	2,983	0,572	0,403	-1,511	1,28
Chi-Cuadrado	0,071	<b>0,041</b>	0,557	0,344	0,258	0,284

**Tabla A-I.29:** Análisis de normalidad en las muestras de módulo de elasticidad en flexión en vigas de acuerdo a la presencia de médula

Clon	Australiano		Stoneville		Todas	
	Médula no	Médula si	Médula no	Médula si	Médula no	Médula si
Sesgo Estandarizado	1,481	0,483	-0,033	1,905	<b>3,471</b>	1,104
Curtosis Estandarizada	0,463	1,089	-0,641	-0,749	-1,056	-0,001
Chi-Cuadrado	0,427	0,247	0,533	<b>0,005</b>	<b>0,016</b>	0,108



**Figura A-I.47:** Gráfico de caja y bigotes del módulo de elasticidad de la totalidad de las piezas con y sin médula

N: piezas sin médula. S: piezas con médula

**Tabla A-I.30:** Prueba de Kruskal Wallis para el módulo de elasticidad entre las piezas sin y con médula

Médula	Australiano 129/60		Stoneville 67		Ambos	
	n	Rango promedio	n	Rango promedio	n	Rango promedio
No	349	244	213	182	562	421
Si	153	267	128	152	281	323
	Estadístico: 2,555 Valor-P = 0,109		Estadístico: 7,431 Valor-P = 0,006		Estadístico: 0,013 Valor-P = 0,909	

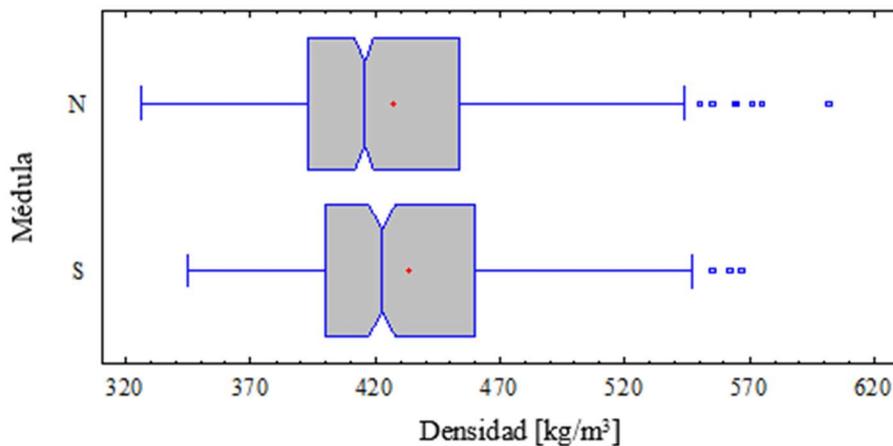
*Influencia de la médula en la densidad*

**Tabla A.I.31:** Análisis de normalidad en las muestras de densidad en tablas de acuerdo a la presencia de médula

Clon	Australiano		Stoneville		Todas	
	no	si	no	si	no	si
Sesgo Estandarizado	3,867	2,403	0,522	-0,533	6,929	4,707
Curtosis Estandarizada	2,403	5,697	-1,157	-1,217	2,114	1,007
Chi-Cuadrado	0,518	0,465	0,151	0,291	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>

**Tabla A.I.32:** Análisis de normalidad en las muestras de densidad en vigas de acuerdo a la presencia de médula

Clon	Australiano		Stoneville		Todas	
	no	si	no	si	no	si
Sesgo Estandarizado	4,450	-0,097	1,361	2,006	4,256	3,055
Curtosis Estandarizada	2,385	-0,699	-1,174	-1,436	-0,307	-0,193
Chi-Cuadrado	<b>0,004</b>	0,746	0,182	0,103	<b>0,001</b>	<b>0,034</b>



**Figura A-I.48:** Gráfico de caja y bigotes de la densidad de la totalidad de las piezas con y sin médula

N: piezas sin médula. S: piezas con médula

**Tabla A-I.33:** Prueba de Kruskal Wallis para la densidad entre las piezas sin y con médula

Médula	Australiano 129/60		Stoneville 67		Ambos	
	n	Rango promedio	n	Rango promedio	n	Rango promedio
No	349	244	213	171	562	409
Si	153	267	128	171	281	448
	Estadístico: 2,596 Valor-P = 0,107		Estadístico: 0,000 Valor-P = 0,985		Estadístico: 4,817 Valor-P = 0,028	

#### V-4.1.3. Desarrollo de modelos de clasificación visual

Para efectuar la comparación solo se consideraron las piezas que en las que se obtuvo valor experimental para las tres propiedades analizadas: resistencia a la flexión, módulo de elasticidad y densidad.

#### Análisis de la normalidad de las distribuciones para cada perfil

**Tabla A.I.34:** Análisis de normalidad en las muestras de resistencia a la flexión en las tablas para cada perfil de clasificación

Perfil	Calidad	Descripción	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada	Chi-Cuadrado
1	Única	Todos	-1,768	-1,658	0,075
2	S	SM	-1,376	-1,548	0,322
	I	AM	<b>-2,103</b>	-1,184	<b>0,017</b>
3	S	SM; K<1/3; IF<1/9	-1,998	-0,681	0,075
	I	AM; K<2/3; IF<1/9	-1,369	-1,369	0,168
	D	Descarte	-0,544	-0,356	0,097
4	S	SM; K<1/3; IF<1/14	-1,765	-0,392	0,116
	I	AM; K<2/3; IF<1/9	-0,392	-1,376	0,412
	D	Descarte	-0,544	-0,356	0,098
5	S	SM; K<1/4; IF<1/9	<b>-2,589</b>	-0,344	0,169
	I	AM; K<3/4; IF<1/9	-1,368	-1,289	0,352
	D	Descarte	-0,803	-1,462	0,309
6	S	SM; K<1/5; IF<1/9	<b>-2,641</b>	-0,363	0,175
	I	AM; K<1/2; IF<1/9	-1,661	-1,056	0,236
	D	Descarte	0,001	-0,271	0,286

SM: Sin médula; AM: admite médula; K: nudosidad de acuerdo la definición del capítulo 3; IF: inclinación de las fibras; S: Grado Superior; I: Grado Inferior; D: Descarte.

Anexo I  
Análisis estadístico de los datos experimentales

**Tabla A.I.35:** Análisis de normalidad en las muestras de resistencia a la flexión en las vigas para cada perfil de clasificación

Perfil	Calidad	Descripción	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada	Chi-Cuadrado
1	Única	Todos	-0,301	-1,377	<b>0,045</b>
2	S	SM	0,408	-0,526	0,750
	I	AM	-0,685	-1,661	<b>0038</b>
3	S	SM; K<1/3; IF<1/9	-0,645	0,046	0,173
	I	AM; K<2/3; IF<1/9	-0,541	-1,417	0,133
	D	Descarte	1,326	-1,378	0,307
4	S	SM; K<1/3; IF<1/14	0,581	1,233	0,141
	I	AM; K<2/3; IF<1/9	-0,162	-1,939	0,058
	D	Descarte	1,326	-0,469	0,307
5	S	SM; K<1/4; IF<1/9	0,347	0,141	0,214
	I	AM; K<3/4; IF<1/9	-0,408	-1,297	0,465
	D	Descarte	<b>2,067</b>	0,685	0,305
6	S	SM; K<1/5; IF<1/9	0,401	0,906	0,798
	I	AM; K<1/2; IF<1/9	-0,230	-1,250	<b>0,023</b>
	D	Descarte	0,675	-1,380	0,667

SM: Sin médula; AM: admite médula; K: nudosidad de acuerdo la definición del capítulo 3; IF: inclinación de las fibras; S: Grado Superior; I: Grado Inferior; D: Descarte.

**Tabla A.I.36:** Análisis de normalidad en las muestras de resistencia a la flexión en todas las piezas para cada perfil de clasificación

Perfil	Calidad	Descripción	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada	Chi-Cuadrado
1	Única	Todos	-0,349	-0,296	<b>&lt;0,001</b>
2	S	SM	0,167	0,040	<b>0,034</b>
	I	AM	-0,627	-0,736	0,092
3	S	SM; K<1/3; IF<1/9	0,479	0,993	0,256
	I	AM; K<2/3; IF<1/9	0,048	-0,841	0,777
	D	Descarte	0,021	-1,201	0,391
4	S	SM; K<1/3; IF<1/14	1,166	<b>2,759</b>	0,069
	I	AM; K<2/3; IF<1/9	0,440	-1,694	<b>0,005</b>
	D	Descarte	0,021	-1,201	0,391
5	S	SM; K<1/4; IF<1/9	-0,078	1,213	0,111
	I	AM; K<3/4; IF<1/9	0,158	-0,571	0,440
	D	Descarte	0,334	-1,080	0,193
6	S	SM; K<1/5; IF<1/9	-0,322	1,627	0,294
	I	AM; K<1/2; IF<1/9	0,505	0,053	0,088
	D	Descarte	0,232	-1,406	0,660

SM: Sin médula; AM: admite médula; K: nudosidad de acuerdo la definición del capítulo 3; IF: inclinación de las fibras; S: Grado Superior; I: Grado Inferior; D: Descarte.

Anexo I  
Análisis estadístico de los datos experimentales

**Tabla A.I.37:** Análisis de normalidad en las muestras del módulo de elasticidad en las tablas para cada perfil de clasificación

Perfil	Calidad	Descripción	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada	Chi-Cuadrado
1	Única	Todos	-1,699	<b>2,210</b>	0,114
2	S	SM	-1,146	1,395	0,410
	I	AM	<b>-2,820</b>	1,266	0,259
3	S	SM; K<1/3; IF<1/9	0,172	0,949	0,942
	I	AM; K<2/3; IF<1/9	<b>-3,133</b>	<b>2,262</b>	0,066
	D	Descarte	0,078	-0,948	0,440
4	S	SM; K<1/3; IF<1/14	1,222	0,817	0,804
	I	AM; K<2/3; IF<1/9	<b>-2,246</b>	1,667	0,064
	D	Descarte	0,078	-0,948	0,440
5	S	-0,474	-0,474	1,534	0,790
	I	AM; K<3/4; IF<1/9	<b>-2,552</b>	<b>2,037</b>	0,234
	D	Descarte	-0,444	-1,098	0,671
6	S	SM; K<1/5; IF<1/9	-0,480	1,497	0,558
	I	AM; K<1/2; IF<1/9	<b>-2,503</b>	0,765	0,191
	D	Descarte	0,341	1,773	0,694

SM: Sin médula; AM: admite médula; K: nudosidad de acuerdo la definición del capítulo 3; IF: inclinación de las fibras; S: Grado Superior; I: Grado Inferior; D: Descarte.

**Tabla A.I.38:** Análisis de normalidad en las muestras del módulo de elasticidad en las vigas para cada perfil de clasificación

Perfil	Calidad	Descripción	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada	Chi-Cuadrado
1	Única	Todos	<b>3,414</b>	-1,084	<b>0,002</b>
2	S	SM	<b>3,471</b>	-1,057	<b>0,016</b>
	I	AM	1,104	-0,001	0,108
3	S	SM; K<1/3; IF<1/9	<b>2,759</b>	-1,134	0,052
	I	AM; K<2/3; IF<1/9	0,929	-0,292	0,124
	D	Descarte	<b>2,528</b>	0,857	0,119
4	S	SM; K<1/3; IF<1/14	<b>2,141</b>	-1,578	0,171
	I	AM; K<2/3; IF<1/9	1,294	-0,128	0,248
	D	Descarte	<b>2,528</b>	0,857	0,119
5	S	SM; K<1/4; IF<1/9	<b>3,151</b>	-0,586	<b>0,004</b>
	I	AM; K<3/4; IF<1/9	0,829	-0,882	0,402
	D	Descarte	<b>3,179</b>	3,635	0,440
6	S	SM; K<1/5; IF<1/9	<b>3,249</b>	-0,293	<b>0,043</b>
	I	AM; K<1/2; IF<1/9	0,716	-1,330	<b>0,026</b>
	D	Descarte	0,968	-0,871	0,428

SM: Sin médula; AM: admite médula; K: nudosidad de acuerdo la definición del capítulo 3; IF: inclinación de las fibras; S: Grado Superior; I: Grado Inferior; D: Descarte.

Anexo I  
Análisis estadístico de los datos experimentales

**Tabla A.I.39:** Análisis de normalidad en las muestras del módulo de elasticidad.  
en todas las piezas para cada perfil de clasificación

Perfil	Calidad	Descripción	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada	Chi-Cuadrado
1	Única	Todos	<b>1,816</b>	1,800	<b>0,033</b>
2	S	SM	<b>2,024</b>	0,812	0,176
	I	AM	-0,152	<b>2,039</b>	0,016
3	S	SM; K<1/3; IF<1/9	<b>2,850</b>	0,324	0,084
	I	AM; K<2/3; IF<1/9	-1,248	<b>2,548</b>	0,203
	D	Descarte	1,860	0,468	0,323
4	S	SM; K<1/3; IF<1/14	<b>3,418</b>	-0,072	0,205
	I	AM; K<2/3; IF<1/9	-1,233	<b>2,239</b>	0,067
	D	Descarte	1,860	0,468	0,323
5	S	SM; K<1/4; IF<1/9	<b>2,558</b>	1,030	0,447
	I	AM; K<3/4; IF<1/9	-0,395	1,648	0,071
	D	Descarte	1,355	1,199	0,690
6	S	SM; K<1/5; IF<1/9	<b>2,484</b>	1,193	0,399
	I	AM; K<1/2; IF<1/9	0,798	0,561	<b>0,001</b>
	D	Descarte	-0,088	1,186	0,822

SM: Sin médula; AM: admite médula; K: nudosidad de acuerdo la definición del capítulo 3; IF: inclinación de las fibras; S: Grado Superior; I: Grado Inferior; D: Descarte.

**Tabla A.I.40:** Análisis de normalidad en las muestras de la densidad  
en las tablas para cada perfil de clasificación

Perfil	Calidad	Descripción	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada	Chi-Cuadrado
1	Única	Todos	<b>8,190</b>	<b>2,152</b>	<b>&lt;0,001</b>
2	S	SM	<b>6,841</b>	<b>2,049</b>	<b>&lt;0,001</b>
	I	AM	4,569	0,897	<b>&lt;0,001</b>
3	S	SM; K<1/3; IF<1/9	<b>7,302</b>	<b>4,008</b>	<b>&lt;0,001</b>
	I	AM; K<2/3; IF<1/9	<b>4,124</b>	-0,114	<b>&lt;0,001</b>
	D	Descarte	1,299	-0,391	<0,681
4	S	SM; K<1/3; IF<1/14	<b>6,641</b>	<b>3,287</b>	<b>&lt;0,001</b>
	I	AM; K<2/3; IF<1/9	<b>4,896</b>	0,475	<b>&lt;0,001</b>
	D	Descarte	1,299	-0,391	0,681
5	S	SM; K<1/4; IF<1/9	<b>6,399</b>	<b>2,764</b>	<b>&lt;0,001</b>
	I	AM; K<3/4; IF<1/9	<b>5,127</b>	0,918	<b>&lt;0,001</b>
	D	Descarte	1,172	-0,273	0,767
6	S	SM; K<1/5; IF<1/9	<b>6,437</b>	<b>2,788</b>	<b>&lt;0,001</b>
	I	AM; K<1/2; IF<1/9	<b>4,836</b>	1,059	<b>&lt;0,001</b>
	D	Descarte	<b>2,004</b>	-0,327	0,130

SM: Sin médula; AM: admite médula; K: nudosidad de acuerdo la definición del capítulo 3; IF: inclinación de las fibras; S: Grado Superior; I: Grado Inferior; D: Descarte.

Anexo I  
Análisis estadístico de los datos experimentales

**Tabla A.I.41:** Análisis de normalidad en las muestras de la densidad en las vigas para cada perfil de clasificación

Perfil	Calidad	Descripción	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada	Chi-Cuadrado
1	Única	Todos	<b>4,711</b>	-0,567	<b>&lt;0,001</b>
2	S	SM	<b>4,256</b>	-0,306	<b>&lt;0,001</b>
	I	AM	<b>3,055</b>	-0,193	<b>0,034</b>
3	S	SM; K<1/3; IF<1/9	<b>4,007</b>	0,529	<b>&lt;0,001</b>
	I	AM; K<2/3; IF<1/9	1,896	-1,171	0,245
	D	Descarte	<b>2,324</b>	0,182	<b>0,030</b>
4	S	SM; K<1/3; IF<1/14	<b>3,117</b>	0,677	<b>0,004</b>
	I	AM; K<2/3; IF<1/9	<b>2,721</b>	-0,962	<b>0,038</b>
	D	Descarte	<b>2,324</b>	0,182	<b>0,030</b>
5	S	SM; K<1/4; IF<1/9	<b>4,085</b>	0,924	<b>0,010</b>
	I	AM; K<3/4; IF<1/9	<b>2,526</b>	-0,887	0,135
	D	Descarte	1,804	0,177	0,369
6	S	SM; K<1/5; IF<1/9	<b>3,778</b>	0,993	<b>0,011</b>
	I	AM; K<1/2; IF<1/9	<b>2,005</b>	-1,226	0,348
	D	Descarte	<b>2,659</b>	0,016	<b>0,049</b>

SM: Sin médula; AM: admite médula; K: nudosidad de acuerdo la definición del capítulo 3; IF: inclinación de las fibras; S: Grado Superior; I: Grado Inferior; D: Descarte.

**Tabla A.I.42:** Análisis de normalidad en las muestras de la densidad en todas las piezas para cada perfil de clasificación

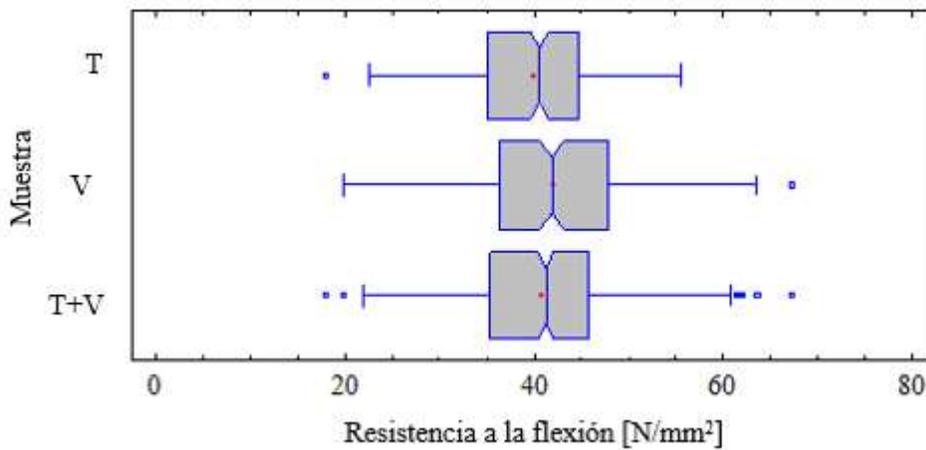
Perfil	Calidad	Descripción	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada	Chi-Cuadrado
1	Única	Todos	<b>9,060</b>	0,751	<b>&lt;0,001</b>
2	S	SM	<b>7,673</b>	1,045	<b>&lt;0,001</b>
	I	AM	<b>5,013</b>	-0,009	<b>&lt;0,001</b>
3	S	SM; K<1/3; IF<1/9	<b>7,916</b>	<b>2,870</b>	<b>&lt;0,001</b>
	I	AM; K<2/3; IF<1/9	<b>4,177</b>	-1,292	<b>&lt;0,001</b>
	D	Descarte	<b>2,513</b>	-0,339	0,099
4	S	SM; K<1/3; IF<1/14	<b>6,845</b>	1,881	<b>&lt;0,001</b>
	I	AM; K<2/3; IF<1/9	<b>5,328</b>	-0,641	<b>&lt;0,001</b>
	D	Descarte	<b>2,513</b>	-0,339	0,099
5	S	SM; K<1/4; IF<1/9	<b>7,421</b>	<b>2,533</b>	<b>&lt;0,001</b>
	I	AM; K<3/4; IF<1/9	<b>5,289</b>	-0,511	<b>&lt;0,001</b>
	D	Descarte	1,960	-0,295	0,252
6	S	SM; K<1/5; IF<1/9	<b>7,283</b>	<b>2,636</b>	<b>&lt;0,001</b>
	I	AM; K<1/2; IF<1/9	<b>4,707</b>	-0,715	<b>&lt;0,001</b>
	D	Descarte	<b>3,243</b>	-0,311	<b>0,019</b>

SM: Sin médula; AM: admite médula; K: nudosidad de acuerdo la definición del capítulo 3; IF: inclinación de las fibras; S: Grado Superior; I: Grado Inferior; D: Descarte.

### Comparación de las propiedades en los grupos: tablas, vigas y muestra completa

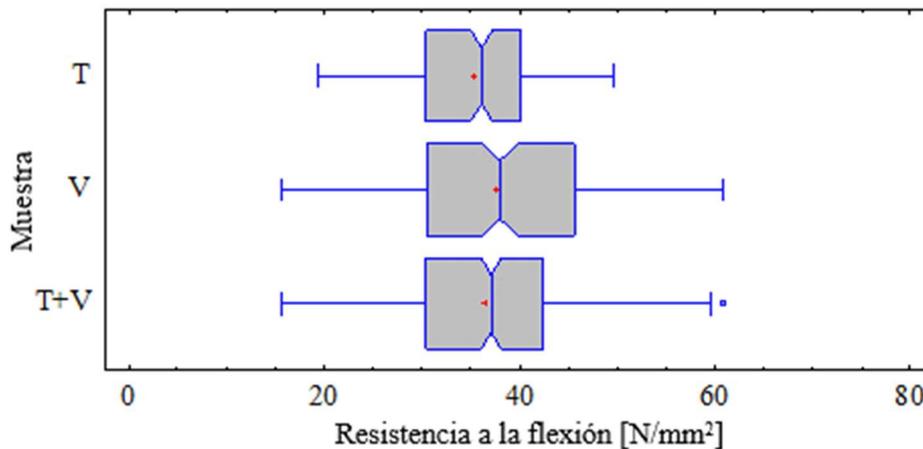
Para efectuar la comparación entre las propiedades resistentes de tablas, vigas y el conjunto de todos los elementos se utilizan los resultados obtenidos al dividir la muestra en calidades de acuerdo al perfil 3.

#### Resistencia a la flexión



**Figura A-I.49:** Gráfico de caja y bigotes de la resistencia a la flexión del Grado Superior del perfil 3, agrupadas en tablas, vigas y para todo el conjunto

T: tablas. V: vigas. T+V: muestra completa



**Figura A-I.50:** Gráfico de caja y bigotes de la resistencia a la flexión del Grado Inferior del perfil 3, agrupadas en tablas, vigas y para todo el conjunto

T: tablas. V: vigas. T+V: muestra completa

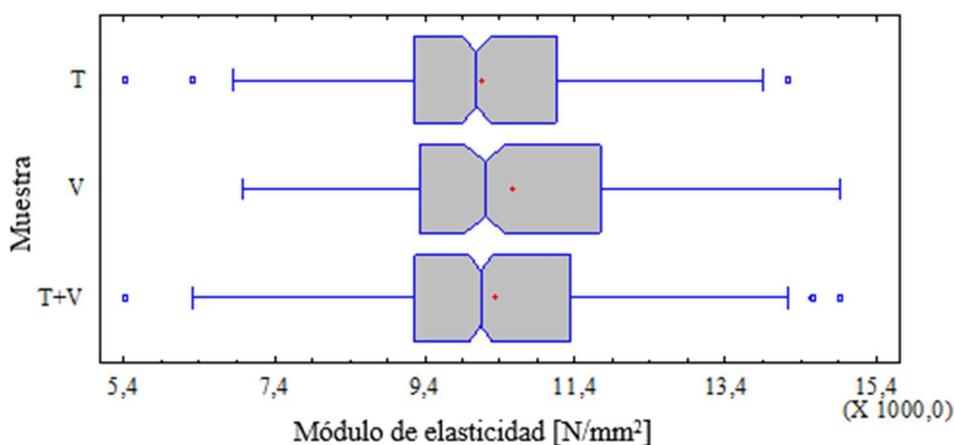
**Tabla A-I.43:** Prueba de Kruskal Wallis para la resistencia a la flexión por grado de calidad del perfil 3 para tablas, vigas y el conjunto de ambos

Muestra	Grado Superior		Grado Inferior		Descarte	
	n	Rango promedio	n	Rango promedio	n	Rango promedio
Tablas	231	397	174	318	437	806
Vigas	189	449	168	368	397	866
Tablas y vigas	420	420	342	342	834	834
	Estadístico: 4,703 Valor-P = 0,095		Estadístico: 5,623 Valor-P = 0,060		Estadístico: 3,207 Valor-P = 0,201	

**Tabla A-I.44:** Prueba de Múltiples Rangos para la resistencia a la flexión por grado de calidad del perfil 3 para tablas, vigas y el conjunto de ambos

Muestra	Grado Superior		Grado Inferior		Descarte	
	n	Grupos Homogéneos	n	Grupos Homogéneos	n	Grupos Homogéneos
Tablas	231	X	174	X	437	X
Vigas	189	X	168	X	397	X
Tablas y vigas	420	X X	342	X X	834	X

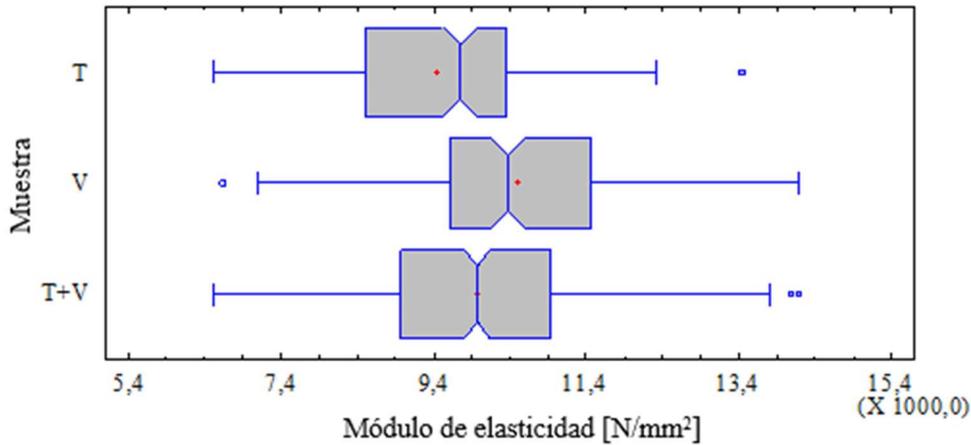
*Módulo de elasticidad*



**Figura A-I.51:** Gráfico de caja y bigotes del módulo de elasticidad del Grado Superior del perfil 3, agrupadas en tablas, vigas y para todo el conjunto

T: tablas. V: vigas. T+V: muestra completa

Anexo I  
Análisis estadístico de los datos experimentales



**Figura A-I.52:** Gráfico de caja y bigotes del módulo de elasticidad del Grado Inferior del perfil 3, agrupadas en tablas, vigas y para todo el conjunto

T: tablas. V: vigas. T+V: muestra completa

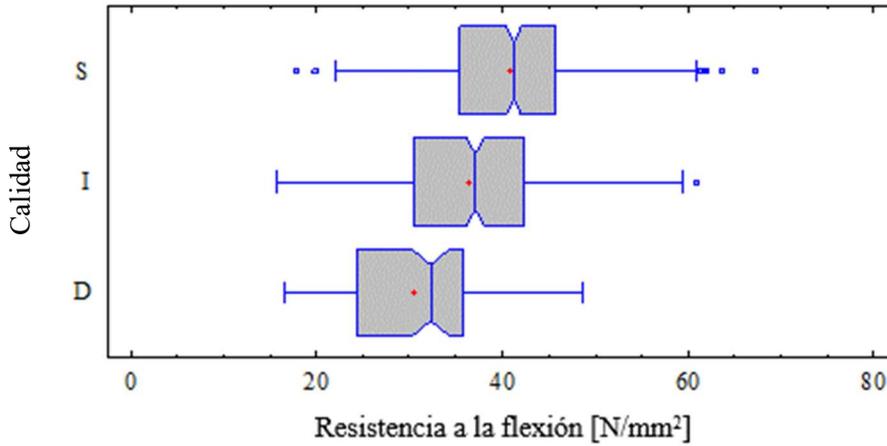
**Tabla A-I.45:** Prueba de Kruskal Wallis para el módulo de elasticidad por grado de calidad del perfil 3 para tablas, vigas y el conjunto de ambos

Muestra	Grado Superior		Grado Inferior		Descarte	
	n	Rango promedio	n	Rango promedio	n	Rango promedio
Tablas	231	401	174	281	437	791
Vigas	189	444	168	406	397	916
Tablas y vigas	420	421	342	342	834	834
	Estadístico: 3,247 Valor-P = 0,197		Estadístico: 34,011 Valor-P = 4,11 10 <sup>-8</sup>		Estadístico: 21,574 Valor-P = 2,06 10 <sup>-5</sup>	

**Tabla A-I.46:** Prueba de Múltiples Rangos para la resistencia a la flexión por grado de calidad del perfil 3 para tablas, vigas y el conjunto de ambos

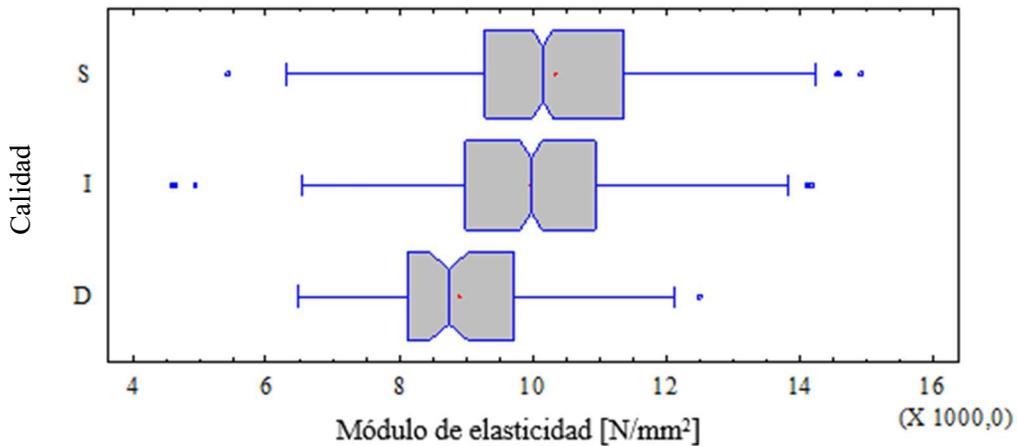
Muestra	Grado Superior		Grado Inferior		Descarte	
	n	Grupos Homogéneos	n	Grupos Homogéneos	n	Grupos Homogéneos
Tablas	231	X	174	X	437	X
Vigas	189	X	168	X	397	X
Tablas y vigas	420	X X	342	X	834	X

**Comparación entre de los valores de las propiedades para cada calidad en el perfil 3**



**Figura A.I. 53:** Gráfico de caja y bigotes para la resistencia a la flexión para todas las piezas clasificadas de acuerdo al perfil 3

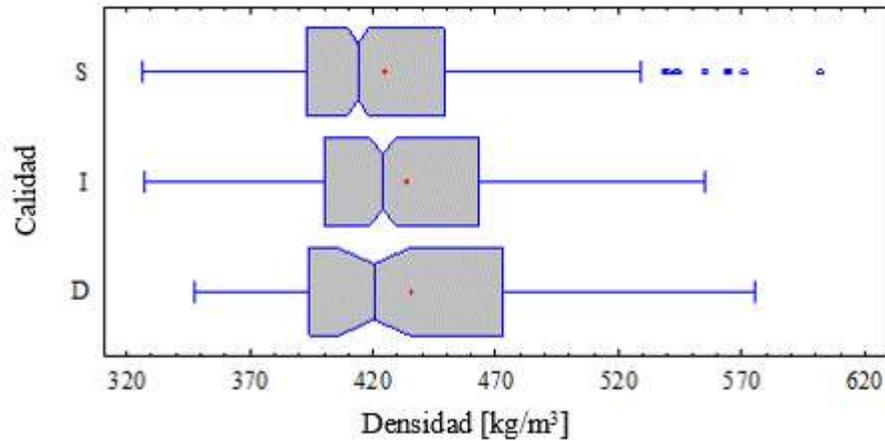
S: Grado Superior; I: Grado Inferior; D: Descarte



**Figura A.I.54:** Gráfico de caja y bigotes para el módulo de elasticidad en flexión para todas las piezas clasificadas de acuerdo al perfil 3

S: Grado Superior; I: Grado Inferior; D: Descarte

Anexo I  
Análisis estadístico de los datos experimentales



**Figura A.I.55:** Gráfico de caja y bigotes para la densidad para todas las piezas clasificadas de acuerdo al perfil 3

S: Grado Superior; I: Grado Inferior; D: Descarte

**Tabla A-I.47:** Prueba de Kruskal Wallis para las propiedades correspondientes a cada grado de calidad en el perfil 3

Calidad	Resistencia a la flexión		Módulo de elasticidad		Densidad	
	n	Rango promedio	n	Rango promedio	n	Rango promedio
Superior	420	490	420	455	420	392
Inferior	342	371	342	410	342	445
Descarte	72	215	72	229	72	434
		Estadístico: 101,452	Estadístico: 44,492		Estadístico: 9,795	
		Valor-P = 0,0	Valor-P = 1,46 10 <sup>-12</sup>		Valor-P = 0,007	

**Tabla A-I.48:** Prueba de Múltiples Rangos para las propiedades correspondientes a cada grado de calidad en el perfil 3

Calidad	Resistencia a la flexión		Módulo de elasticidad		Densidad	
	n	Grupos Homogéneos	n	Grupos Homogéneos	n	Grupos Homogéneos
Superior	420	X	420	X	420	X
Inferior	342	X	342	X	342	X
Descarte	72	X	72	X	72	X

### Comparación entre los valores de las propiedades resistentes de los Grados Superior e Inferior para cada perfil de calidad

Se realiza la comparación entre los valores de resistencia a la flexión, para cada calidad, de los perfiles 3 a 6 dado que son los que incluyen los tres parámetros de clasificación (médula, nudosidad e inclinación de la fibra), la misma comparación se realiza para el módulo de elasticidad.

#### Resistencia a la flexión

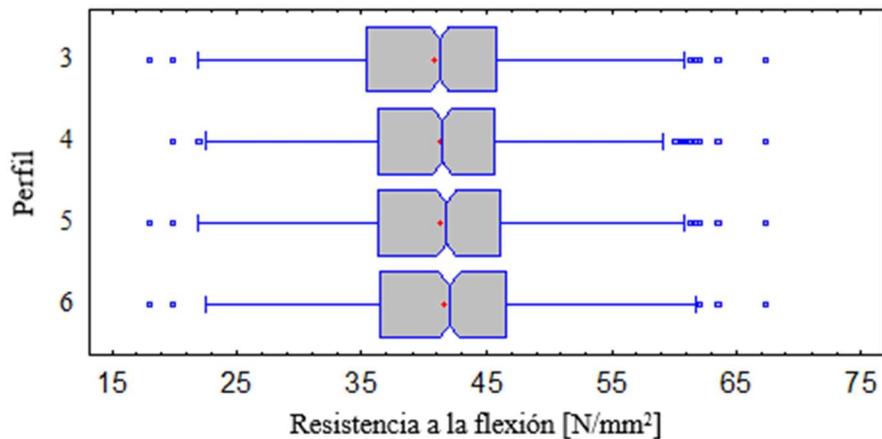


Figura A.I.56: Gráfico de caja y bigotes para la resistencia a la flexión en el Grado Superior de los perfiles 3 a 6

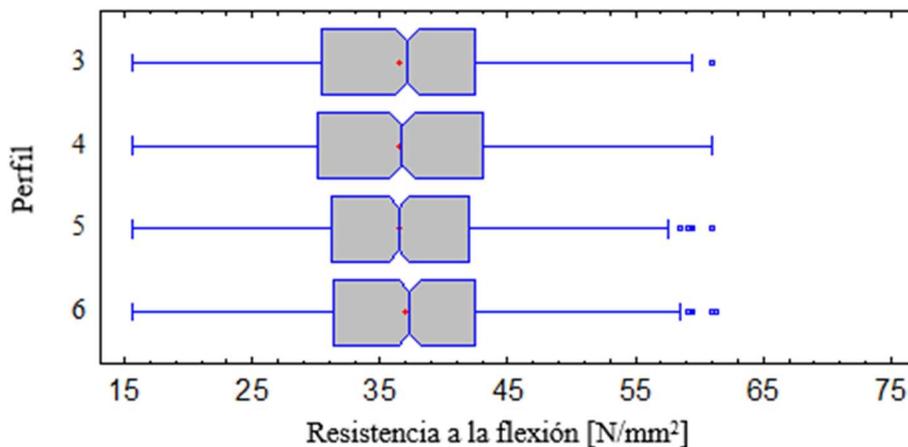
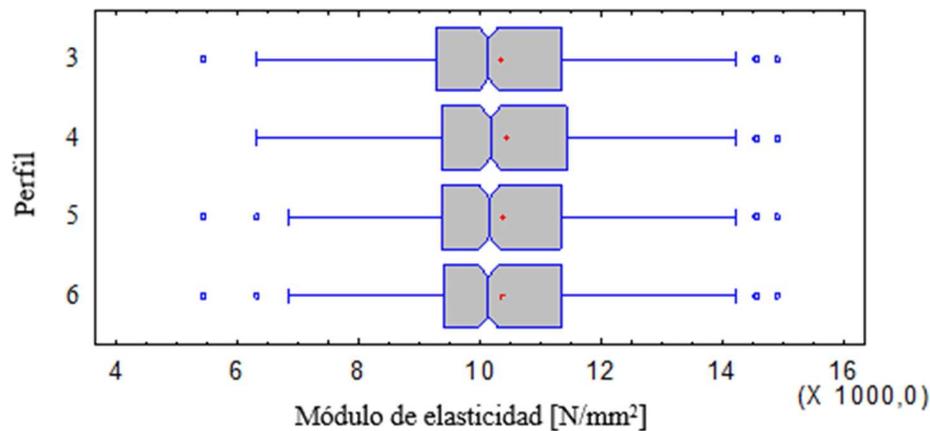


Figura A.I.57: Gráfico de caja y bigotes para la resistencia a la flexión en el Grado Inferior de los perfiles 3 a 6

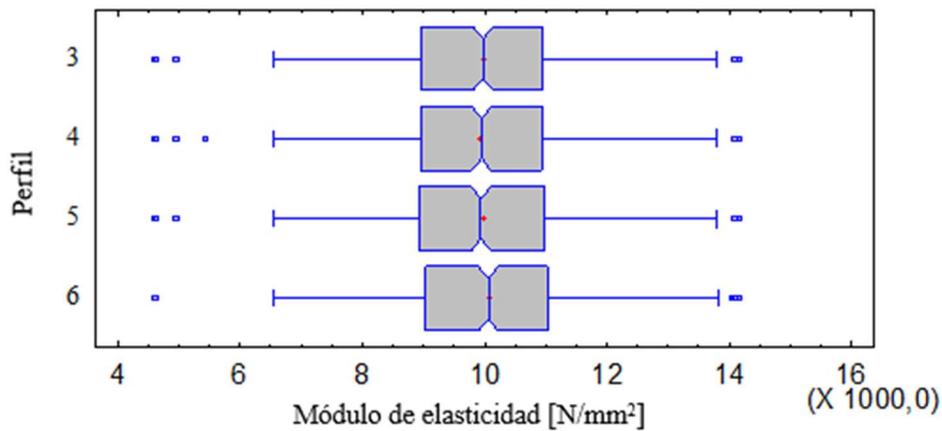
**Tabla A-I.48:** Prueba de Kruskal Wallis para la resistencia a flexión para los perfiles 3 a 6

Perfil	Grado Superior		Grado Inferior		Descarte	
	n	Rango promedio	n	Rango promedio	n	Rango promedio
3	420	716	342	757	72	160
4	360	742	402	761	72	160
5	367	747	409	756	58	150
6	336	768	375	783	123	173
		Estadístico: 2,939	Estadístico: 0,963		Estadístico: 2,734	
		Valor-P = 0,400	Valor-P = 0,810		Valor-P = 0,434	

*Módulo de elasticidad*



**Figura A.I.58:** Gráfico de caja y bigotes para el módulo de elasticidad en la Grado Superior de los perfiles 3 a 6



**Figura A.I.59:** Gráfico de caja y bigotes para el módulo de elasticidad en la Grado Inferior de los perfiles 3 a 6

**Tabla A-I.49:** Prueba de Kruskal Wallis para el módulo de elasticidad para los perfiles 3 a 6

Perfil	Grado Superior		Grado Inferior		Descarte	
	n	Rango promedio	n	Rango promedio	n	Rango promedio
3	420	731	342	762	72	157
4	360	752	402	754	72	157
5	367	743	409	758	58	147
6	336	741	375	785	123	177
Estadístico: 0,481		Estadístico: 1,137		Estadístico: 5,237		
Valor-P: 0,923		Valor-P = 0,767		Valor-P = 0,155		

## I.4.2. CONDICIONES DE REFERENCIA E INTERRELACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS

### I.4.2.1. La resistencia en flexión y su relación con las dimensiones de la sección transversal de la viga

**Tabla A-I.50:** Prueba de Kruskal Wallis para la resistencia a la flexión sin corrección por altura ( $f_m^*$ ) para las muestras III y IV

Muestra	n	Rango promedio
III <sub>25x100</sub>	114	103
IV <sub>50x100</sub>	98	111
Estadístico: 0,825		Valor-P = 0,363

**Tabla A-I.51:** Prueba de Kruskal Wallis para la resistencia a la flexión corregida por altura ( $f_{m150-m}^*$ )

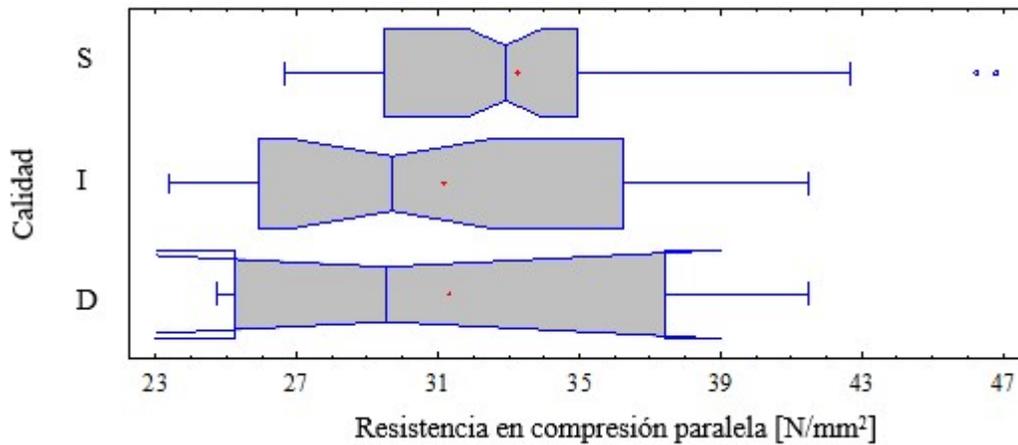
Muestra	Completa		Grado Superior		Grado Inferior		Descarte	
	n	Rango promedio	n	Rango promedio	n	Rango promedio	n	Rango promedio
I	437	403	231	199	174	159	32	45
II	96	434	49	214	37	186	10	40
III	114	423	55	233	43	171	16	28
IV	98	454	38	233	54	197	6	19
V	89	424	47	219	34	179	8	28
Estadístico= 4,30		Estadístico= 5,67		Estadístico= 7,42		Estadístico= 13,47		
Valor-P= 0,367		Valor-P = 0,225		Valor-P = 0,115		Valor-P = 0,009		

**I.4.2.2. Resistencia y rigidez en compresión paralela y perpendicular a las fibras. Su relación con las propiedades mecánicas en flexión y la densidad**

**Compresión paralela a las fibras**

**Tabla A.I.52:** Análisis de normalidad en las muestras de resistencia a la compresión paralela a las fibras

	Muestra completa	Calidad perfil 3		
		Superior	Inferior	Descarte
Sesgo Estandarizado	<b>2,017</b>	<b>3,094</b>	0,558	0,682
Curtosis Estandarizada	-0,166	1,313	-1,659	-0,518
Chi-Cuadrado	0,197	<b>0,048</b>	<b>0,048</b>	0,171



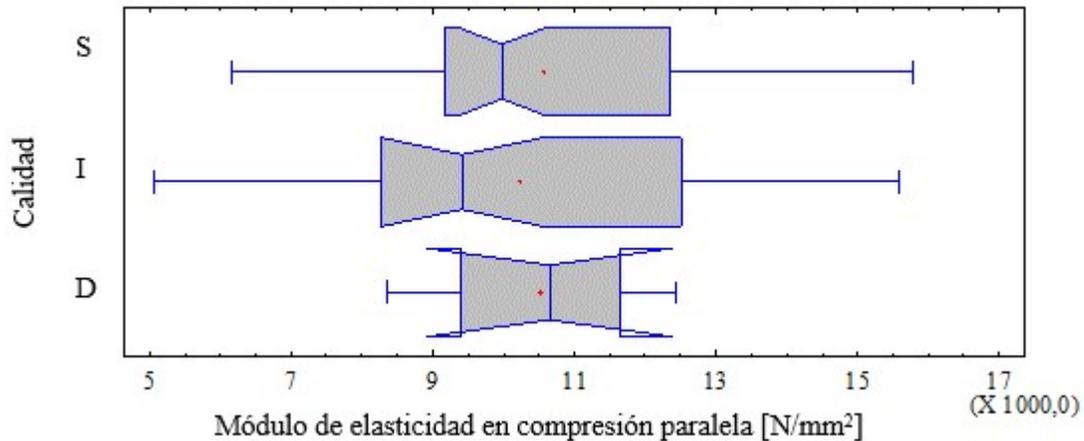
**Figura A.I.60:** Gráfico de caja y bigotes para la resistencia a la compresión paralela a las fibras por calidad

S: Grado Superior; I: Grado Inferior; D: Descarte

**Tabla A.I.53:** Análisis de normalidad en las muestras de módulo de elasticidad en la compresión paralela a las fibras

	Muestra completa	Calidad perfil 3		
		Superior	Inferior	Descarte
Sesgo Estandarizado	0,964	0,639	0,871	-0,352
Curtosis Estandarizada	-1,058	-0,601	-0,845	0,545
Chi-Cuadrado	0,215	<b>0,011</b>	0,879	0,572

Anexo I  
Análisis estadístico de los datos experimentales



**Figura A.I.61:** Gráfico de caja y bigotes para el módulo de elasticidad en la compresión paralela a las fibras

S: Grado Superior; I: Grado Inferior; D: Descarte

**Tabla A-I.54:** Prueba de Kruskal Wallis para en módulo de elasticidad en compresión paralela y flexión

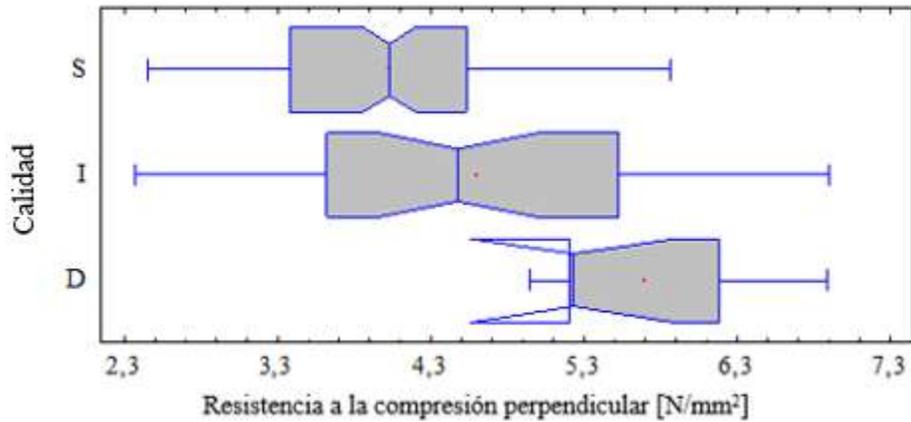
Esfuerzo	Completa		Grado Superior		Grado Inferior		Descarte	
	n	Rango promedio						
Compresión //	100	494	62	249	34	185	4	60
Flexión	834	464	420	240	342	189	72	37
	Estadístico= 1,12 Valor-P= 0,289		Estadístico= 0,22 Valor-P= 0,641		Estadístico= 0,03 Valor-P= 0,861		Estadístico= 3,86 Valor-P= 0,049	

### Compresión perpendicular a las fibras

**Tabla A.I.55:** Análisis de normalidad en las muestras de la resistencia en compresión perpendicular a las fibras

	Muestra completa	Calidad perfil 3		
		Superior	Inferior	Descarte
Sesgo Estandarizado	0,578	-2,737	0,926	0,849
Curtosis Estandarizada	<b>4,660</b>	<b>8,040</b>	-0,780	-0,425
Chi-Cuadrado	<b>0,001</b>	<b>0,012</b>	<b>0,019</b>	0,361

Anexo I  
Análisis estadístico de los datos experimentales

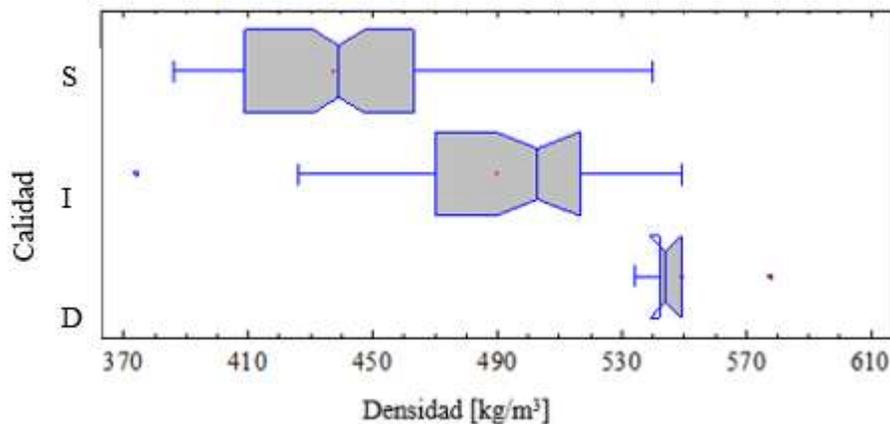


**Figura A.I.62:** Gráfico de caja y bigotes para la resistencia en compresión perpendicular a las fibras

S: Grado Superior; I: Grado Inferior; D: Descarte

**Tabla A.I.56:** Análisis de normalidad en las muestras de densidad de las probetas de compresión perpendicular a las fibras

	Muestra completa	Calidad perfil 3		
		Superior	Inferior	Descarte
Sesgo Estandarizado	<b>2,250</b>	1,256	<b>-2,098</b>	1,517
Curtosis Estandarizada	-1,056	-0,463	0,796	1,477
Chi-Cuadrado	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,025</b>	0,308

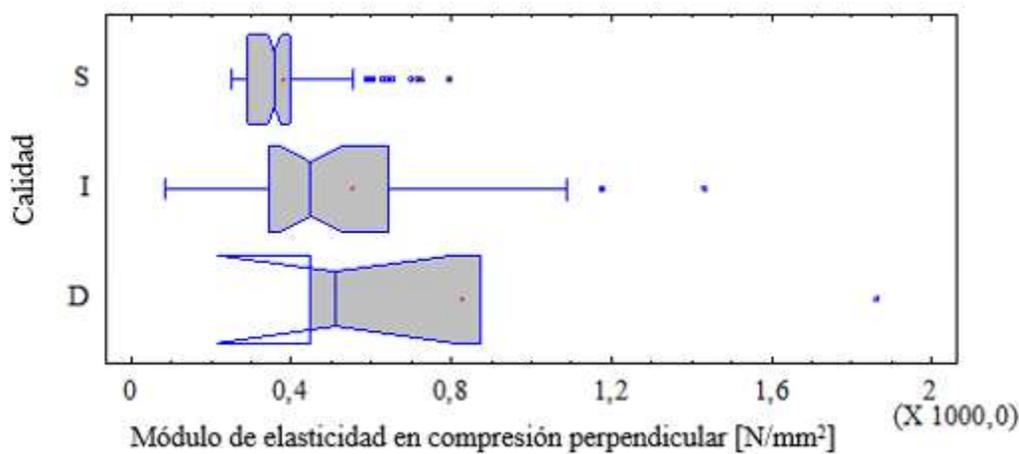


**Figura A.I.63:** Gráfico de caja y bigotes de la densidad de las probetas de compresión perpendicular a las fibras

S: Grado Superior; I: Grado Inferior; D: Descarte

**Tabla A.I.57:** Análisis de normalidad en las muestras del módulo de elasticidad en compresión perpendicular a las fibras

	Muestra completa	Calidad perfil 3		
		Superior	Inferior	Descarte
Sesgo Estandarizado	<b>15,241</b>	<b>6,704</b>	<b>3,038</b>	1,657
Curtosis Estandarizada	1,450	<b>4,933</b>	1,386	1,450
Chi-Cuadrado	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	0,308
Cantidad	143	105	33	5



**Figura A.I.64:** Gráfico de caja y bigotes para el módulo de elasticidad en compresión perpendicular a las fibras

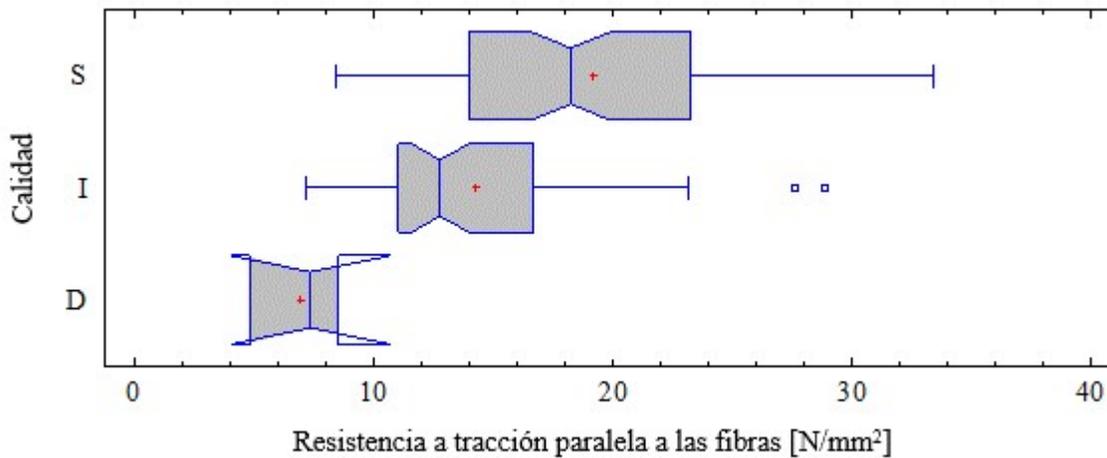
S: Grado Superior; I: Grado Inferior; D: Descarte

### I.4.2.3. Resistencia en tracción paralela a las fibras y su relación con la resistencia en flexión

**Tabla A.I.58:** Análisis de normalidad en las muestras resistencia a la tracción paralela a las fibras

	Muestra completa	Calidad perfil 3		
		Superior	Inferior	Descarte
Sesgo Estandarizado	<b>3,206</b>	<b>2,137</b>	<b>3,120</b>	-
Curtosis Estandarizada	-0,193	-0,804	1,399	-
Chi-Cuadrado	<b>0,001</b>	0,068	0,073	-

Anexo I  
Análisis estadístico de los datos experimentales



**Figura A.I.65:** Gráfico de caja y bigotes para la resistencia a la tracción paralela a las fibras

S: Grado Superior; I: Grado Inferior; D: Descarte

#### I.4.2.4. Módulo de elasticidad. Determinación a través de ensayos estáticos y métodos dinámicos alternativos

**Tabla A.I.59:** Análisis de normalidad de los módulos de elasticidad alternativos

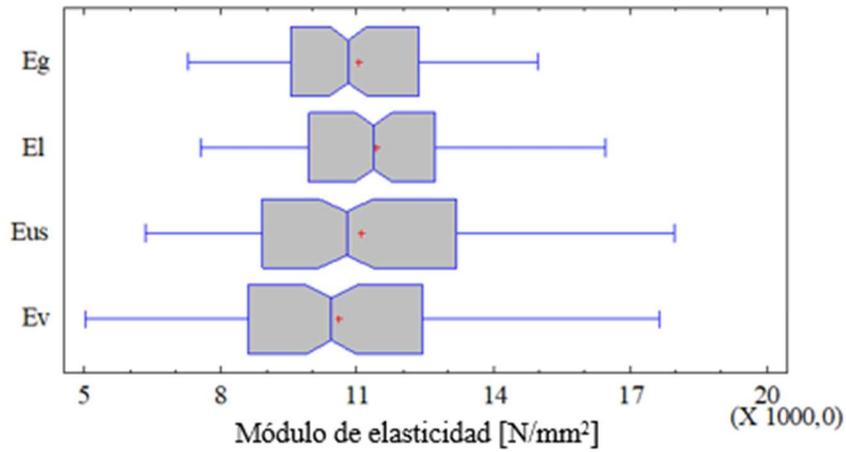
		Muestra completa	Calidad perfil 3		
			Superior	Inferior	Descarte
E <sub>m,g</sub>	Sesgo Estandarizado	1,105	1,282	-0,329	0,933
	Curtosis Estandarizada	-1,762	-1,453	-0,703	-0,319
	Chi-Cuadrado	0,254	0,079	0,265	0,757
E <sub>m,l</sub>	Sesgo Estandarizado	0,529	0,958	0,371	0,228
	Curtosis Estandarizada	-1,070	-1,182	-0,336	-0,574
	Chi-Cuadrado	0,823	0,506	0,886	0,206
E <sub>m,us</sub>	Sesgo Estandarizado	0,385	1,659	-1,293	1,018
	Curtosis Estandarizada	-2,665	-1,411	-1,698	0,001
	Chi-Cuadrado	0,050	0,195	0,228	0,652
E <sub>m,v</sub>	Sesgo Estandarizado	-0,142	1,080	-1,789	1,214
	Curtosis Estandarizada	<b>-2,178</b>	-1,286	-1,146	-0,212
	Chi-Cuadrado	0,045	0,894	<b>0,001</b>	0,272
Cantidad		256	115	117	24

E<sub>m,g</sub> y E<sub>m,l</sub>: Módulo de elasticidad global y local, respectivamente determinados según UNE-EN 408 (2011).

E<sub>m,us</sub>: Módulo de elasticidad dinámico obtenido a través de la medición de velocidad de sonido.

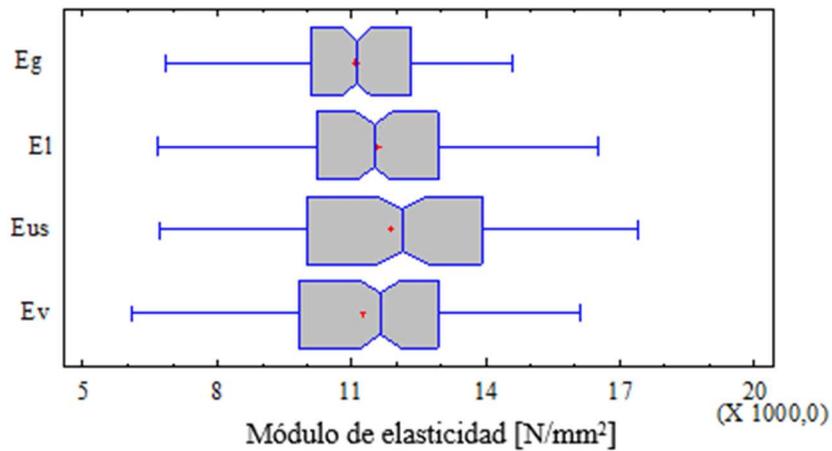
E<sub>m,v</sub>: Módulo de elasticidad dinámico obtenido a través de la medición de la frecuencia de vibración longitudinal.

Anexo I  
Análisis estadístico de los datos experimentales



**Figura A.I.66:** Gráfico de caja y bigotes para las muestras de módulo de elasticidad en el Grado Superior

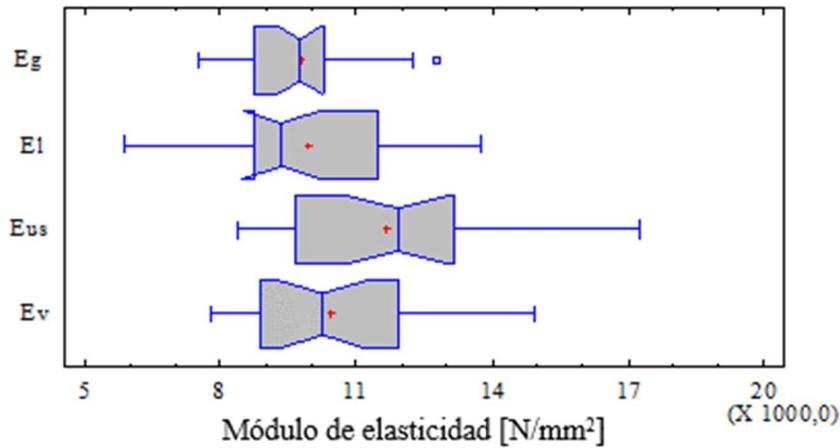
E<sub>g</sub>: módulo de elasticidad global. E<sub>l</sub>: módulo de elasticidad local. E<sub>us</sub>: módulo de elasticidad determinado por velocidad del sonido. E<sub>v</sub>: módulo de elasticidad determinado por la frecuencia de vibración



**Figura A.I.67:** Gráfico de caja y bigotes para las muestras de módulo de elasticidad en el Grado Inferior

E<sub>g</sub>: módulo de elasticidad global. E<sub>l</sub>: módulo de elasticidad local. E<sub>us</sub>: módulo de elasticidad determinado por velocidad del sonido. E<sub>v</sub>: módulo de elasticidad determinado por la frecuencia de vibración

Anexo I  
Análisis estadístico de los datos experimentales



**Figura A.I.68:** Gráfico de caja y bigotes para las muestras de módulo de elasticidad en el Descarte

E<sub>g</sub>: módulo de elasticidad global. E<sub>l</sub>: módulo de elasticidad local. E<sub>us</sub>: módulo de elasticidad determinado por velocidad del sonido. E<sub>v</sub>: módulo de elasticidad determinado por la frecuencia de vibración

**Tabla A-I.60:** Prueba de Kruskal Wallis para los módulos de elasticidad

Muestra	Completa		Grado Superior		Grado inferior		Descarte		
	n	Rango promedio	n	Rango promedio	n	Rango promedio	n	Rango promedio	
E <sub>m,g</sub>	256	428	115	209	117	179	24	35	
E <sub>m,l</sub>	256	558	115	263	117	249	24	43	
E <sub>m,us</sub>	256	566	115	235	117	271	24	65	
E <sub>m,v</sub>	256	498	115	213	117	237	24	49	
		Estadístico= 35,9		Estadístico= 12,0		Estadístico= 29,0		Estadístico= 14,75	
		Valor-P= 7 10 <sup>-8</sup>		Valor-P = 0,007		Valor-P = 2 10 <sup>-6</sup>		Valor-P = 0,002	

E<sub>g</sub>: módulo de elasticidad global. E<sub>l</sub>: módulo de elasticidad local. E<sub>us</sub>: módulo de elasticidad determinado por velocidad del sonido. E<sub>v</sub>: módulo de elasticidad determinado por la frecuencia de vibración

**Tabla A-I.61:** Prueba de Múltiples Rangos para los módulos de elasticidad

Muestra	Completa		Grado Superior		Grado Inferior		Descarte	
	n	Grupos homogéneos	n	Grupos homogéneos	n	Grupos homogéneos	n	Grupos homogéneos
E <sub>m,g</sub>	256	X	115	X	117	X	24	X
E <sub>m,l</sub>	256	X	115	X	117	X X	24	X
E <sub>m,us</sub>	256	X	115	X X	117	X	24	X
E <sub>m,v</sub>	256	X	115	X	117	X	24	X

E<sub>g</sub>: módulo de elasticidad global. E<sub>l</sub>: módulo de elasticidad local. E<sub>us</sub>: módulo de elasticidad determinado por velocidad del sonido. E<sub>v</sub>: módulo de elasticidad determinado por la frecuencia de vibración.

## **ANEXO II**

### **BASES DE DATOS DEL TRABAJO EXPERIMENTAL**

---

En este Anexo se incorporan las tablas con los datos obtenidos en el desarrollo del trabajo experimental. En primer lugar, se presentan los datos de los ensayos a la flexión (Tabla II.1), luego los de compresión paralela a la fibras (Tabla II.2), los de compresión perpendicular a las fibras (Tabla II.3) y finalmente los de tracción paralela a las fibras Tabla II.4). Al pie de cada tabla se explicitan las abreviaturas utilizadas.

Anexo II  
Bases de datos del trabajo experimental

Tabla II.1: Datos experimentales de los ensayos de flexión

Probeta		Dimensiones							Nudosidad						Ataque Biológico			Propiedades							
Nº	M	Clon	B	H	L	Med	A. P.	I. F.	K (TP)	K (TC)	KAR	KARM	KARMs	KARMi	Previo	Final	Pos	C.H.	$f_m$ sc	$f_m$	$E_g$	$E_1$	$E_{us}$	$E_v$	$\rho$
			mm	mm	mm				N/mm <sup>2</sup>				%	N/mm <sup>2</sup>	kg/m <sup>3</sup>										
1	1	A	101,7	22,3	414	N	11	0,036	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	11,5	68,57	46,9	11.213	-	-	-	414
2	1	A	98,5	22,3	414	N	15	0,043	0,23	0,23	-	-	-	-	1	1	-	11,7	53,54	36,6	8.878	-	-	-	424
3	1	A	99,0	22,5	414	N	11	0,036	0,38	0,38	-	-	-	-	1	1	-	10,5	36,47	25,0	8.691	-	-	-	400
4	1	A	96,6	22,6	414	N	11	0,043	0,77	0,77	-	-	-	-	3	3	C	10,4	49,86	34,1	8.780	-	-	-	410
5	1	A	97,5	22,3	414	N	7	0,043	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	10,2	64	43,7	11.557	-	-	-	402
6	1	A	101,8	23,0	414	N	9	0,029	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	10,3	51,84	35,6	9.228	-	-	-	385
7	1	A	100,5	22,9	414	N	17	0,043	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	11,5	55,13	37,9	9.523	-	-	-	379
8	1	A	101,8	22,3	414	N	8	0,08	0,11	0,11	-	-	-	-	1	1	-	11,1	47,83	32,7	7.375	-	-	-	392
9	1	A	99,3	22,3	414	N	13	0,033	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	11,2	65,11	44,5	10.807	-	-	-	389
10	1	A	100,2	22,5	414	N	10	0,036	0,80	0,80	-	-	-	-	1	1	-	11,2	49,67	34,0	9.112	-	-	-	450
11	1	A	100,8	22,5	414	S	11	0,065	0,76	0,76	-	-	-	-	1	1	-	11,0	37,27	25,5	7.005	-	-	-	393
12	1	A	99,3	22,9	414	N	11	0,025	0,57	0,57	-	-	-	-	1	1	-	11,9	44,52	30,6	7.520	-	-	-	403
13	1	A	99,3	22,8	414	S	7	0,022	1,00	1,00	-	-	-	-	1	1	-	11,1	58,59	40,2	9.789	-	-	-	429
14	1	A	99,1	22,5	414	N	10	0,043	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	11,1	69,48	47,6	11.952	-	-	-	426
15	1	A	97,0	22,4	414	S	21	0,014	0,56	0,56	-	-	-	-	1	1	-	11,3	39,25	26,8	6.984	-	-	-	454
16	1	A	99,1	22,5	414	S	6	0,014	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	11,1	55,18	37,8	10.017	-	-	-	408
17	1	A	101,5	22,6	414	S	10	0,043	0,05	0,05	-	-	-	-	1	1	-	11,5	56,41	38,6	9.758	-	-	-	391
18	1	A	101,6	22,3	414	N	12	0,022	1,00	1,00	-	-	-	-	1	1	-	12,0	31,84	21,8	7.685	-	-	-	369
19	1	A	101,5	22,9	414	S	10	0,014	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	10,7	54,48	37,4	9.796	-	-	-	388
20	1	A	99,5	22,8	414	N	8	0,051	0,10	0,10	-	-	-	-	1	1	-	11,0	52,31	35,9	9.283	-	-	-	367
21	1	A	99,0	22,5	414	N	10	0,036	1,00	1,00	-	-	-	-	1	1	-	11,0	37,24	25,5	7.249	-	-	-	482
22	1	A	100,7	22,5	414	N	13	0,036	0,22	0,22	-	-	-	-	1	1	-	10,9	66,44	45,5	10.929	-	-	-	479
23	1	A	100,0	22,0	414	S	11	0,043	0,15	0,15	-	-	-	-	1	1	-	11,0	59,91	40,8	10.506	-	-	-	426
24	1	A	100,8	22,5	414	S	12	0,04	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	10,8	-	-	9.640	-	-	-	391
25	1	A	98,8	22,8	414	S	15	0,043	0,23	0,23	-	-	-	-	1	1	-	10,8	56,46	38,7	9.150	-	-	-	396
26	1	A	101,0	22,4	414	S	9	0,029	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	11,0	51,59	35,3	8.197	-	-	-	350
27	1	A	101,3	22,3	414	N		0,101	0,16	0,16	-	-	-	-	1	1	-	11,1	59,98	41,0	10.099	-	-	-	378
28	1	A	99,9	22,5	414	S	8	0,029	0,10	0,10	-	-	-	-	1	1	-	10,9	39,16	26,8	8.360	-	-	-	378
29	1	A	101,2	22,7	414	S	7	0,029	0,57	0,57	-	-	-	-	1	1	-	10,4	30,73	21,1	7.691	-	-	-	376
30	1	A	99,9	22,6	414	N	9	0,051	0,62	0,62	-	-	-	-	1	1	-	10,3	56,75	38,9	10.886	-	-	-	432
31	1	A	99,9	22,5	414	N	8	0,029	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	9,9	49,2	33,7	9.980	-	-	-	381
32	1	A	100,3	22,0	414	N	8	0,032	0,19	0,19	-	-	-	-	1	1	-	10,5	59,84	40,8	11.068	-	-	-	401
33	1	A	100,7	22,0	414	S	11	0,051	0,91	0,91	-	-	-	-	3	1	-	10,6	54,19	36,9	9.093	-	-	-	449
34	1	A	100,7	23,0	414	N	6	0,014	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	10,4	68,08	46,8	11.054	-	-	-	400
35	1	A	102,0	22,7	414	N	12	0,101	0,79	0,79	-	-	-	-	1	1	-	11,0	35,5	24,3	6.657	-	-	-	517
36	1	A	101,2	22,8	414	N	8	0,047	0,30	0,30	-	-	-	-	1	1	-	10,3	45,53	31,3	8.143	-	-	-	417
37	1	A	100,7	23,0	414	N	11	0,058	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	10,2	45,28	31,1	8.925	-	-	-	416
38	1	A	102,0	22,3	414	N	9	0,029	0,25	0,25	-	-	-	-	1	1	-	9,9	52,62	36,0	9.588	-	-	-	382
39	1	A	101,0	22,5	414	N	12	0,036	0,20	0,20	-	-	-	-	1	1	-	10,2	60,04	41,1	9.921	-	-	-	397
40	1	A	101,0	23,0	414	N	10	0,043	0,08	0,08	-	-	-	-	1	1	-	10,1	41,91	28,8	8.812	-	-	-	365
41	1	A	99,5	23,0	414	N	15	0,094	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	10,3	60,83	41,8	8.433	-	-	-	406
42	1	A	98,7	22,5	414	N	18	0,043	0,30	0,30	-	-	-	-	1	1	-	9,7	51,32	35,1	8.185	-	-	-	444
43	1	A	102,3	23,0	414	N	18	0,029	0,13	0,13	-	-	-	-	1	1	-	9,9	60,83	41,8	9.602	-	-	-	382
44	1	A	100,2	22,9	414	N	24	0,036	0,37	0,37	-	-	-	-	1	1	-	9,7	54,16	37,2	8.384	-	-	-	464
45	1	A	100,3	22,1	414	N	8	0,029	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	9,5	50,24	34,3	10.276	-	-	-	404
46	1	A	100,5	23,0	414	N	25	0,051	0,00	0,00	-	-	-	-	3	3	-	10,1	57,36	39,4	8.240	-	-	-	394
47	1	A	98,6	22,3	414	N	11	0,025	0,00	0,00	-	-	-	-	3	3	-	10,1	74,26	50,7	10.896	-	-	-	400
48	1	A	102,0	22,0	414	S	11	0,04	0,16	0,16	-	-	-	-	1	1	-	10,0	58,49	39,8	10.315	-	-	-	445
49	1	A	101,9	22,8	414	N	7	0,025	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	9,8	60,94	41,8	9.218	-	-	-	363
50	1	A	100,5	22,8	414	S	15	0,029	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	9,5	51,17	35,1	8.081	-	-	-	355
51	1	A	98,5	22,2	414	S	10	0,022	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	9,0	59,08	40,3	9.193	-	-	-	393
52	1	A	97,6	22,8	414	N	39	0,029	0,06	0,06	-	-	-	-	2	2	-	9,4	60,14	41,3	9.520	-	-	-	440
53	1	A	101,8	23,0	414	S	8	0,014	0,18	0,18	-	-	-	-	1	1	-	9,2	61,73	42,4	9.699	-	-	-	431
54	1	A	101,7	22,5	414	N	8	0,036	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	9,7	57,52	39,4	9.733	-	-	-	392
55	1	A	100,7	22,5	414	N	4	0,029	0,23	0,23	-	-	-	-	1	1	-	10,2	59,05	40,4	9.971	-	-	-	396
56	1	A	100,2	22,8	414	N	10	0,043	0,72	0,72	-	-	-	-	3	3	-	9,9	41,13	28,2	8.244	-	-	-	348
57	1	A	98,3	22,5	414	N	10	0,014	0,39	0,39	-	-	-	-	3	3	-	8,9	66,37	45,4	9.852	-	-	-	401
58	1	A	96,8	22,5	414	N	12	0,029	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	9,2	70,07	47,9	9.763	-	-	-	403
59	1	A	100,5	22,6	414	N	11	0,022	0,35	0,35	-	-	-	-	3	3	-	9,3	45,55	31,2	8.822	-	-	-	450
60	1	A	100,4	22,2	414	S	20	0,029	0,48	0,48	-	-	-	-	1	1	-	9,8	42,67	29,1	8.374	-	-	-	514
61	1	A	98,3	22,6	414	N	10	0,014	0,00	0,00	-	-	-	-	2	2	-	10,1	-	-	9.183	-	-	-	397
62	1	A	102,4	22,3	414	S	9	0,025	0,07	0,07	-	-	-	-	1	1	-	9,7	52,68	36,0	9.863	-	-	-	395
63	1	A	102,1	22,5	414	S	10	0,036	0,35	0,35	-	-	-	-	1	1	-	9,6</							

Anexo II  
Bases de datos del trabajo experimental

Tabla II.1: Datos experimentales de los ensayos de flexión. Continuación

Probeta		Dimensiones						Nudosidad						Ataque Biológico			Propiedades									
N°	M	Clon	B	H	L	Med	A. P.	I. F.	K (TP)	K (TC)	KAR	KARM	KARMS	KARMI	Previo	Final	Pos	C.H.	$f_m$	$f_m$	$E_g$	$E_1$	$E_{us}$	$E_v$	$\rho$	
			mm	mm	mm														N/mm <sup>2</sup>		N/mm <sup>2</sup>					
66	1	A	101,3	22,2	414	N	11	0,043	0,40	0,40	-	-	-	-	3	3	-	9,4	41,43	28,3	8.214	-	-	-	-	431
67	1	A	100,5	22,5	414	N	16	0,036	0,29	0,29	-	-	-	-	3	1	-	9,4	60,82	41,6	9.266	-	-	-	-	429
68	1	A	100,7	22,7	414	S	9	0,043	0,26	0,26	-	-	-	-	1	1	-	11,9	32,96	22,6	11.134	-	-	-	-	421
69	1	A	98,7	22,5	414	N	8	0,033	0,14	0,14	-	-	-	-	1	1	-	9,3	63	43,1	10.192	-	-	-	-	421
70	1	A	99,0	21,8	414	S	8	0,058	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	8,9	61,06	41,5	10.354	-	-	-	-	420
71	1	A	98,5	22,5	414	N	10	0,047	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	9,4	35,85	24,5	10.627	-	-	-	-	452
72	1	A	98,3	22,5	414	S	9	0,018	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	9,5	51,94	35,5	9.565	-	-	-	-	409
73	1	A	102,3	22,8	414	S	11	0,036	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	8,8	52,49	36,0	7.993	-	-	-	-	347
74	1	A	98,8	22,8	414	N	10	0,043	0,50	0,50	-	-	-	-	1	1	-	9,5	55,49	38,1	9.494	-	-	-	-	443
75	1	A	101,0	23,0	414	N	7	0,05	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	8,8	51,13	35,1	9.215	-	-	-	-	407
76	1	A	101,1	22,8	414	N	10	0,029	0,36	0,36	-	-	-	-	3	3	-	9,2	57,75	39,6	9.675	-	-	-	-	408
77	1	A	101,0	22,3	414	S	10	0,014	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	8,7	61,59	42,1	9.935	-	-	-	-	402
78	1	A	101,3	23,0	414	N	20	0,036	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	8,9	69,44	47,7	9.311	-	-	-	-	398
79	1	A	100,8	22,9	414	N	9	0,007	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	8,6	66,78	45,9	9.383	-	-	-	-	382
80	1	A	100,5	22,0	414	S	8	0,033	0,00	0,00	-	-	-	-	2	1	-	8,6	65,28	44,5	10.537	-	-	-	-	421
81	1	A	102,8	23,0	414	N	10	0,109	0,35	0,35	-	-	-	-	1	1	-	9,3	39,22	27,0	6.625	-	-	-	-	424
82	1	A	100,1	22,3	414	S	9	0,036	0,54	0,54	-	-	-	-	1	1	-	9,1	49,2	33,6	9.699	-	-	-	-	409
83	1	A	102,3	23,0	414	N	12	0,018	0,83	0,83	-	-	-	-	1	1	-	9,0	53,16	36,5	8.569	-	-	-	-	393
84	1	A	100,8	23,0	414	S	5	0,043	0,48	0,48	-	-	-	-	1	1	-	9,2	39,39	27,1	7.247	-	-	-	-	417
85	1	A	100,7	22,2	414	N	10	0,029	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	8,9	68,13	46,5	10.519	-	-	-	-	409
86	1	A	102,3	22,6	414	S	11	0,018	0,65	0,65	-	-	-	-	3	3	-	9,2	37,59	25,7	9.088	-	-	-	-	419
87	1	A	101,6	22,6	414	N	13	0,036	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	8,9	77,48	53,1	10.114	-	-	-	-	441
88	1	A	99,2	22,6	414	N	12	0,022	0,32	0,32	-	-	-	-	1	1	-	8,5	56,29	38,6	8.946	-	-	-	-	445
89	1	A	100,0	23,0	414	N	17	0,036	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	8,8	52,25	35,9	8.275	-	-	-	-	397
90	1	A	99,8	23,0	414	N	12	0,014	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	9,1	-	-	8.284	-	-	-	-	385
91	1	A	99,5	23,0	414	N	11	0,036	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	9,0	57,75	39,7	9.117	-	-	-	-	417
92	1	A	101,1	22,6	414	S	9	0,022	0,21	0,21	-	-	-	-	1	1	-	9,5	64,46	44,1	9.674	-	-	-	-	450
93	1	A	100,7	22,2	414	S	9	0,022	0,15	0,15	-	-	-	-	1	1	-	9,2	55,88	38,1	10.173	-	-	-	-	422
94	1	A	99,4	22,2	414	N	7	0,036	0,11	0,11	-	-	-	-	1	2	-	8,3	74,54	50,9	10.381	-	-	-	-	431
95	1	A	99,3	23,0	414	N	7	0,036	0,10	0,10	-	-	-	-	1	1	-	9,4	55,53	38,2	9.437	-	-	-	-	427
96	1	A	101,3	23,0	414	S	9	0,029	0,83	0,83	-	-	-	-	1	1	-	9,7	60,67	41,7	9.324	-	-	-	-	421
97	1	A	97,0	23,0	414	N	12	0,029	0,19	0,19	-	-	-	-	1	1	-	9,1	47,67	32,8	9.662	-	-	-	-	425
98	1	A	98,1	22,4	414	N	7	0,098	0,29	0,29	-	-	-	-	1	1	-	9,0	46,5	31,8	8.622	-	-	-	-	433
99	1	A	98,9	22,6	414	S	10	0,036	0,55	0,55	-	-	-	-	1	1	-	9,3	-	-	8.426	-	-	-	-	394
100	1	A	90,2	22,3	414	N	21	0,025	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	9,0	71,6	48,9	9.943	-	-	-	-	386
101	1	A	90,8	22,7	414	N	16	0,022	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	8,7	64,44	44,2	9.136	-	-	-	-	394
102	1	A	88,8	22,5	414	N	8	0,051	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	9,3	74,3	50,8	9.489	-	-	-	-	422
103	1	A	100,7	22,4	414	N	11	0,036	1,00	1,00	-	-	-	-	3	3	-	9,6	48,07	32,9	6.474	-	-	-	-	402
104	1	A	97,7	22,5	414	N	7	0,022	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	8,4	60,49	41,4	10.049	-	-	-	-	417
105	1	A	102,0	23,0	414	N	11	0,022	0,13	0,13	-	-	-	-	1	1	-	8,9	67,82	46,6	9.923	-	-	-	-	431
106	1	A	101,0	23,0	414	N	10	0,014	0,05	0,05	-	-	-	-	1	1	-	12,2	57,46	39,5	10.695	-	-	-	-	436
107	1	A	100,7	23,0	414	N	11	0,02	0,12	0,12	-	-	-	-	1	1	-	9,2	71,5	49,1	10.303	-	-	-	-	441
108	1	A	99,0	22,5	414	S	7	0,014	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	9,2	58,14	39,8	10.024	-	-	-	-	392
109	1	A	102,0	23,0	414	N	8	0,043	0,72	0,72	-	-	-	-	1	2	-	9,7	34,22	23,5	7.534	-	-	-	-	413
110	1	A	98,5	22,5	414	N	17	0,036	1,00	1,00	-	-	-	-	1	3	-	9,2	41,17	28,2	9.723	-	-	-	-	429
111	1	A	97,4	22,6	414	N	11	0,022	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	8,9	73,62	50,4	9.579	-	-	-	-	410
112	1	A	101,3	23,0	414	N	5	0,014	0,14	0,14	-	-	-	-	1	1	-	9,1	61,81	42,5	9.737	-	-	-	-	402
113	1	A	101,3	22,3	414	N	8	0,014	0,54	0,54	-	-	-	-	1	1	-	9,1	50,36	34,4	8.313	-	-	-	-	409
114	1	A	100,7	22,3	414	N	12	0,08	0,24	0,24	-	-	-	-	3	3	-	9,0	61,28	41,8	9.284	-	-	-	-	388
115	1	A	100,0	22,7	414	N	15	0,043	0,21	0,21	-	-	-	-	3	3	-	9,3	58,89	40,4	9.106	-	-	-	-	441
116	1	A	98,8	22,3	414	N	9	0,054	0,00	0,00	-	-	-	-	3	3	-	9,1	81,39	55,6	11.713	-	-	-	-	420
117	1	A	98,8	22,5	414	N	10	0,087	0,26	0,26	-	-	-	-	1	1	-	9,2	51,2	35,0	7.763	-	-	-	-	405
118	1	A	100,3	22,7	414	N	6	0,04	0,99	0,99	-	-	-	-	1	1	-	9,1	51,34	35,2	9.192	-	-	-	-	389
119	1	A	100,8	22,8	414	N	8	0,007	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	9,1	54,08	37,1	9.215	-	-	-	-	393
120	1	A	99,8	22,5	414	N	10	0,047	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	8,8	62,4	42,7	9.685	-	-	-	-	406
121	1	A	100,3	22,7	414	S	10	0,054	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	8,6	48,35	33,1	8.583	-	-	-	-	409
122	1	A	100,2	22,4	414	N	10	0,047	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	10,5	67,47	46,1	10.382	-	-	-	-	395
123	1	A	99,4	22,2	414	S	11	0,029	0,00	0,00	-	-	-	-	1	2	-	9,6	36,51	24,9	4.606	-	-	-	-	370
124	1	A	101,3	23,0	414	N	9	0,045	0,16	0,16	-	-	-	-	3	3	-	9,1	54,63	37,5	10.048	-	-	-	-	430
125	1	A	98,0	22,7	414	N	28	0,036	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	9,3	65,56	44,9	7.638	-	-	-	-	400
126	1	A	99,0	23,0	414	N	10	0,022	0,00	0,00	-	-	-													

Anexo II  
Bases de datos del trabajo experimental

Tabla II.1: Datos experimentales de los ensayos de flexión. Continuación

Probeta		Dimensiones							Nudosidad					Ataque Biológico			Propiedades									
Nº	M	Clon	B	H	L	Med	A. P.	I. F.	K (TP)	K (TC)	KAR	KARM	KARMs	KARMi	Previo	Final	Pos	C.H.	$f_m$ sc	$f_m$	$E_g$	$E_1$	$E_{us}$	$E_v$	$\rho$	
			mm	mm	mm				N/mm <sup>2</sup>	%			%	N/mm <sup>2</sup>	kg/m <sup>3</sup>											
131	1	A	99,8	22,8	414	N	11	0,022	0,66	0,66	-	-	-	-	2	2	-	8,5	52,01	35,7	9,757	-	-	-	-	416
132	1	A	98,7	22,9	414	N	20	0,058	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	8,8	49,71	34,1	7,163	-	-	-	-	388
133	1	A	98,0	23,0	414	N	17	0,08	0,24	0,24	-	-	-	-	2	2	-	8,8	41,71	28,7	7,097	-	-	-	-	395
134	1	A	101,0	23,0	414	N	15	0,08	0,70	0,70	-	-	-	-	1	1	-	9,1	48,7	33,5	7,788	-	-	-	-	390
135	1	A	101,3	22,3	414	S	8	0,033	0,21	0,21	-	-	-	-	1	1	-	10,5	39,11	26,7	8,977	-	-	-	-	397
136	1	A	99,8	22,6	414	S	12	0,036	0,42	0,42	-	-	-	-	1	1	-	8,6	41,59	28,5	8,643	-	-	-	-	427
137	1	A	97,3	22,6	414	N	21	0,014	0,00	0,00	-	-	-	-	3	3	-	8,9	73,26	50,2	9,846	-	-	-	-	417
138	1	A	97,3	22,5	414	N	21	0,031	0,00	0,00	-	-	-	-	3	3	-	8,9	67,07	45,9	9,699	-	-	-	-	410
139	1	A	99,2	22,3	414	N	12	0,072	1,00	1,00	-	-	-	-	1	1	-	8,5	48,84	33,4	7,183	-	-	-	-	380
140	1	A	102,4	22,6	414	N	23	0,098	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,1	44,09	30,2	9,418	-	7,720	-	-	362
141	1	A	103,5	22,4	414	N	16	0,087	0,00	0,00	-	-	-	-	2	2	-	13,2	46,99	32,1	8,159	-	7,465	-	-	359
142	1	A	102,2	22,8	414	S	20	0,058	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,8	53,02	36,4	9,166	-	8,765	-	-	395
143	1	A	103,5	23,1	414	N	14	0,056	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,8	65,84	45,3	11,293	-	9,902	-	-	391
144	1	A	102,2	23,0	414	S	17	0,068	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,7	51,49	35,4	9,918	-	8,397	-	-	364
145	1	A	101,4	22,7	414	N	24	0,061	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,8	52,64	36,1	8,432	-	7,534	-	-	362
146	1	A	101,7	23,0	414	S	-	0,081	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	11,0	-	-	8,694	-	-	-	-	405
147	1	A	103,7	22,6	414	N	25	0,035	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,0	60,77	41,6	10,600	-	8,933	-	-	422
148	1	A	102,0	23,5	414	N	13	0,031	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,3	56,01	38,7	9,840	-	8,876	-	-	380
149	1	A	102,3	22,6	414	S	10	0,008	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,1	59,42	40,7	11,235	-	9,599	-	-	422
150	1	A	101,5	22,8	414	S	8	0,056	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	11,6	64,67	44,4	11,301	-	9,067	-	-	434
151	1	A	102,8	22,8	414	S	10	0,015	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,4	57,82	39,7	12,321	-	10,408	-	-	433
152	1	A	102,1	22,4	414	S	17	0,094	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,6	31,65	21,6	6,533	-	6,760	-	-	396
153	1	A	101,5	23,0	414	N	11	0,048	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,6	66,64	45,8	11,829	-	10,415	-	-	419
154	1	A	103,4	22,2	414	N	10	0,038	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,6	63,91	43,6	11,379	-	10,267	-	-	403
155	1	A	102,2	22,8	414	N	-	0,095	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	11,3	-	-	10,076	-	-	-	-	406
156	1	A	103,0	22,8	414	N	31	0,056	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,4	50,93	34,9	8,497	-	7,530	-	-	367
157	1	A	104,6	22,8	414	N	11	0,016	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,6	60,4	41,4	10,250	-	8,725	-	-	368
158	1	A	103,2	22,6	414	N	13	0,043	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,2	64	43,8	11,081	-	9,543	-	-	410
159	1	A	102,0	22,5	414	S	11	0,029	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,8	63,76	43,6	11,621	-	8,680	-	-	406
160	1	A	102,1	22,9	414	S	15	0,008	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,7	58,54	40,2	10,380	-	8,814	-	-	384
161	1	A	101,0	22,9	414	N	35	0,102	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,4	75,12	51,6	12,385	-	10,001	-	-	427
162	1	A	102,2	22,9	414	N	18	0,053	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,0	65,17	44,8	11,540	-	9,994	-	-	405
163	1	A	101,9	22,9	414	S	16	0,03	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,5	54,35	37,3	10,113	-	9,177	-	-	378
164	1	A	101,4	22,3	414	S	21	0,104	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,0	38,21	26,1	7,271	-	6,397	-	-	370
165	1	A	104,0	22,7	414	S	12	0,069	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,4	47,54	32,6	9,450	-	7,492	-	-	394
166	1	A	102,0	22,8	414	N	15	0,016	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,4	61,75	42,4	9,839	-	9,240	-	-	366
167	1	A	102,4	23,0	414	N	18	0,033	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,0	62,57	43,0	11,061	-	10,263	-	-	408
168	1	A	99,1	22,3	414	N	16	0,062	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,0	48,98	33,4	10,548	-	9,155	-	-	401
169	1	A	101,8	22,4	414	N	20	0,011	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,7	58,22	39,8	10,308	-	8,446	-	-	388
170	1	A	100,9	22,8	414	N	15	0,014	0,00	0,00	-	-	-	-	2	2	-	13,1	56,43	38,7	9,499	-	8,345	-	-	403
171	1	A	98,7	22,3	414	N	18	0,004	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,7	59,04	40,3	12,141	-	9,522	-	-	410
172	1	A	103,0	22,7	414	S	18	0,007	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,2	59,26	40,6	10,926	-	8,629	-	-	403
173	1	A	100,7	23,0	414	S	11	0,017	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,2	54,11	37,2	9,706	-	7,976	-	-	351
174	1	A	101,6	23,0	414	N	12	0,039	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,2	60,93	41,9	11,417	-	10,538	-	-	424
175	1	A	101,9	22,9	414	N	17	0,042	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,8	51,23	35,2	8,284	-	9,596	-	-	444
176	1	A	97,4	22,7	414	S	9	0,012	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,7	56,84	39,0	10,589	-	9,111	-	-	423
177	1	A	100,5	23,1	414	S	14	0,103	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,5	36,17	24,9	8,687	-	8,239	-	-	363
178	1	A	100,2	22,7	414	S	12	0,094	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,2	68,28	46,8	11,157	-	9,397	-	-	424
179	1	A	102,6	22,5	414	N	12	0,034	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,8	62,92	43,1	11,708	-	9,684	-	-	412
180	1	A	102,9	22,4	414	N	12	0,02	0,00	0,00	-	-	-	-	3	3	-	12,6	62,67	42,9	11,851	-	9,942	-	-	416
181	1	A	102,8	22,9	414	S	8	0,05	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,3	66,97	46,0	11,955	-	9,619	-	-	409
182	1	A	104,4	23,0	414	S	12	0,037	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,7	50,85	35,0	9,744	-	8,567	-	-	368
183	1	A	99,4	22,7	414	S	14	0,056	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,7	63,33	43,4	10,695	-	9,629	-	-	428
184	1	A	101,4	22,7	414	N	14	0,081	0,00	0,00	-	-	-	-	3	1	-	12,8	70,12	48,1	11,627	-	10,403	-	-	412
185	1	A	102,2	22,9	414	N	18	0,031	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,2	63,25	43,4	11,591	-	9,793	-	-	417
186	1	A	101,3	23,1	414	N	12	0,08	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,2	68,62	47,2	9,813	-	9,979	-	-	438
187	1	A	101,2	22,7	414	S	12	0,048	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,5	52,06	35,7	9,418	-	8,408	-	-	354
188	1	A	103,7	22,8	414	S	18	0,001	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,2	57,99	39,8	10,097	-	8,487	-	-	371
189	1	A	103,7	22,8	414	S	18	0,017	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,2	59,1	40,6	10,803	-	9,294	-	-	416

Anexo II  
Bases de datos del trabajo experimental

Tabla II.1: Datos experimentales de los ensayos de flexión. Continuación

Probeta		Dimensiones						Nudosidad						Ataque Biológico			Propiedades								
N°	M	Clon	B	H	L	Med	A. P.	I. F.	K (TP)	K (TC)	KAR	KARM	KARMs	KARMi	Previo	Final	Pos	C.H.	$f_{ms}$	$f_m$	$E_g$	$E_1$	$E_{us}$	$E_v$	$\rho$
			mm	mm	mm				N/mm <sup>2</sup>	%	%	%	%	N/mm <sup>2</sup>	kg/m <sup>3</sup>										
196	1	A	104,2	23,2	414	S	13	0,021	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,3	54,36	37,4	8.932	-	8.439	-	369
197	1	A	100,5	22,7	414	N	13	0,058	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,6	66,41	45,5	11.044	-	9.017	-	403
198	1	A	98,8	22,3	414	N	10	0,104	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,3	73,79	50,4	11.164	-	-	-	416
199	1	A	101,2	22,6	414	N	11	0,053	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	11,6	65,38	44,8	11.828	-	-	-	435
200	1	A	100,5	22,4	414	S	7	0,058	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,3	65,19	44,6	10.209	-	-	-	420
201	1	A	103,6	22,8	414	N	10	0,03	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,2	52,01	35,7	10.124	-	-	-	407
202	1	A	100,5	22,4	414	S	10	0,048	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,6	64,79	44,3	10.921	-	-	-	402
203	1	A	103,1	22,5	414	S	11	0,033	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,5	54,24	37,1	10.839	-	-	-	401
204	1	A	102,6	22,9	414	N	10	0,04	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,4	50,49	34,7	9.887	-	-	-	409
205	1	A	102,8	23,3	414	S	12	0,06	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	8,4	65,89	45,4	10.062	-	-	-	414
206	1	A	102,5	22,5	414	S	12	0,034	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,2	62,92	43,1	10.144	-	-	-	405
207	1	A	101,3	23,0	414	N	25	0,064	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,4	66,59	45,8	11.467	-	9.691	-	424
208	1	A	100,3	22,9	414	S	15	0,046	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,5	52,18	35,8	9.172	-	8.103	-	438
209	1	A	100,7	22,4	414	S	14	0,02	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,1	55,3	37,8	9.925	-	8.260	-	393
210	1	A	99,7	22,8	414	N	11	0,103	0,00	0,00	-	-	-	-	2	2	-	12,5	45,05	30,9	9.858	-	8.678	-	406
211	1	A	101,4	22,6	414	N	10	0,066	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,3	49,81	34,1	10.916	-	9.378	-	412
212	1	A	102,7	23,1	414	N	18	0,051	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,2	49,1	33,8	8.312	-	7.050	-	374
213	1	A	102,5	23,0	414	N	16	0,091	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,5	46,3	31,8	10.191	-	8.516	-	376
214	1	A	102,8	22,8	414	S	12	0,049	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	10,4	54,1	37,1	10.245	-	-	-	414
215	1	A	100,3	22,9	414	N	25	0,077	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,5	48,09	33,0	10.548	-	8.647	-	411
216	1	A	101,9	22,9	414	N	-	0,1	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	10,7	-	-	9.716	-	-	-	404
217	1	A	102,6	22,9	414	S	19	0,06	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,0	67,91	46,6	10.970	-	8.522	-	429
218	1	A	103,3	23,0	414	S	11	0,011	0,17	0,17	-	-	-	-	1	1	-	12,0	59,63	41,0	10.360	-	8.657	-	419
219	1	A	101,2	23,2	414	N	14	0,106	0,30	0,30	-	-	-	-	1	1	-	11,7	46,8	32,2	8.161	-	-	-	417
220	1	A	100,6	23,0	414	N	12	0,038	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,2	55,48	38,1	9.475	-	8.352	-	399
221	1	A	101,0	23,0	414	N	16	0,107	0,52	0,52	-	-	-	-	2	2	-	12,3	44,24	30,4	8.913	-	7.760	-	409
222	1	A	102,1	22,7	414	S	12	0,022	0,12	0,12	-	-	-	-	1	1	-	11,8	55,43	38,0	9.943	-	8.904	-	414
223	1	A	100,8	23,0	414	N	10	0,002	0,47	0,47	-	-	-	-	1	1	-	10,3	57,91	39,8	8.744	-	-	-	427
224	1	A	102,0	22,6	414	N	12	0,029	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,6	60,54	41,4	10.469	-	8.864	-	392
225	1	A	101,7	23,0	414	N	12	0,059	0,83	0,83	-	-	-	-	1	1	-	12,3	50,76	34,9	10.755	-	10.145	-	406
226	1	A	101,4	22,5	414	N	8	0,062	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,1	65,36	44,7	10.953	-	9.861	-	440
227	1	A	101,3	22,8	414	N	11	0,04	0,17	0,17	-	-	-	-	1	1	-	12,8	63,5	43,6	10.012	-	9.238	-	413
228	1	A	100,4	22,8	414	S	15	0,057	0,57	0,57	-	-	-	-	1	1	-	12,8	65,22	44,7	10.241	-	8.904	-	412
229	1	A	102,0	22,7	414	N	16	0,06	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,2	67,81	46,5	12.448	-	11.050	-	425
230	1	A	101,2	22,4	414	N	11	0,049	0,18	0,18	-	-	-	-	1	1	-	12,3	49,98	34,2	9.981	-	8.729	-	386
231	1	A	102,6	22,8	414	N	8	0,048	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,1	64,53	44,3	11.335	-	9.136	-	388
232	1	A	101,4	22,9	414	N	7	0,042	0,23	0,23	-	-	-	-	1	1	-	12,7	52,79	36,2	10.604	-	8.307	-	354
233	1	A	101,6	22,5	414	N	11	0,061	0,31	0,31	-	-	-	-	1	1	-	12,5	48,57	33,2	10.255	-	9.207	-	391
234	1	A	101,1	22,9	414	N	13	0,06	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,0	64,64	44,4	11.436	-	-	-	430
235	1	A	102,2	22,3	414	N	10	0,067	0,27	0,27	-	-	-	-	1	1	-	12,6	49,8	34,0	10.189	-	8.944	-	386
236	1	A	102,5	23,0	414	N	-	0,091	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	11,1	-	-	9.791	-	-	-	407
237	1	A	100,8	22,9	414	N	-	0,104	0,11	0,11	-	-	-	-	1	1	-	10,9	-	-	8.760	-	-	-	403
238	1	A	103,7	22,6	414	S	16	0,095	0,49	0,49	-	-	-	-	2	2	-	12,5	38,39	26,3	7.077	-	8.953	-	404
239	1	A	99,2	22,8	414	N	8	0,104	0,44	0,44	-	-	-	-	1	1	-	12,4	42,03	28,8	7.895	-	10.354	-	449
240	1	A	101,4	23,1	414	N	12	0,11	0,65	0,65	-	-	-	-	1	1	-	11,2	31,35	21,6	4.946	-	-	-	415
241	1	A	101,7	22,9	414	S	11	0,041	0,19	0,19	-	-	-	-	1	1	-	12,3	64,74	44,5	10.533	-	8.709	-	401
242	1	A	99,1	22,9	414	N	19	0,022	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,6	60,18	41,3	8.932	-	7.534	-	396
243	1	A	98,0	22,5	414	N	20	0,063	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,2	64,51	44,1	11.024	-	9.191	-	408
244	1	A	100,0	22,5	414	N	18	0,093	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,8	39,03	26,7	5.425	-	6.167	-	410
245	1	A	92,0	22,9	414	N	13	0,038	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,4	60,98	41,9	9.882	-	9.138	-	401
246	1	A	99,9	23,1	414	N	15	0,004	0,31	0,31	-	-	-	-	1	1	-	12,1	57,56	39,6	9.753	-	9.599	-	402
247	1	A	100,3	22,9	414	N	10	0,088	0,35	0,35	-	-	-	-	1	1	-	12,1	71,57	49,1	11.146	-	8.885	-	397
248	1	A	101,0	22,1	414	S	10	0,015	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,2	57,93	39,5	11.012	-	8.377	-	396
249	1	A	101,5	22,9	414	N	-	0,073	0,48	0,48	-	-	-	-	1	1	-	12,2	50,24	34,5	9.751	-	8.433	-	378
250	1	A	102,0	22,7	414	S	10	0,105	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	9,0	72,19	49,5	11.592	-	-	-	391
251	1	A	100,0	22,7	414	S	10	0,04	0,75	0,75	-	-	-	-	1	1	-	9,4	64,72	44,4	11.192	-	-	-	398
252	1	A	101,9	23,2	414	S	13	0,07	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	10,2	47,96	33,0	9.870	-	-	-	436
253	1	A	102,1	22,9	414	S	9	0,053	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	9,8	65,13	44,7	10.975	-	-	-	393
254	1	A	101,4	23,4	414	N	9	0,041	0,20	0,20	-	-	-	-	1	1	-	12,1	52,62	36,3	9.475	-	9.345	-	380
255	1	A	99,7	22,3	414	S	8	0,008	0,16	0,16	-	-	-	-	1	1	-	11,5	60,78	41,5	11.279	-	-	-	390
256	1	A	103,4	22,7	414	S	9	0,041	0,44	0,44	-	-	-	-	1	1	-	12,3	53,41	36,6	10.305	-	8.596	-	401
25																									

Anexo II  
Bases de datos del trabajo experimental

Tabla II.1: Datos experimentales de los ensayos de flexión. Continuación

Probeta		Dimensiones						Nudosidad						Ataque Biológico			Propiedades									
Nº	M	Clon	B	H	L	Med	A. P.	I. F.	K (TP)	K (TC)	KAR	KARM	KARMs	KARMi	Previo	Final	Pos	C.H.	$f_m$	$f_m$	$E_g$	$E_1$	$E_{us}$	$E_v$	$\rho$	
			mm	mm	mm				N/mm <sup>2</sup>				%	N/mm <sup>2</sup>	kg/m <sup>3</sup>											
261	1	A	102,7	22,0	414	N	10	0,016	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	10,1	58,37	39,8	10,089	-	-	-	-	360
262	1	A	102,0	22,3	414	S	15	0,001	0,39	0,39	-	-	-	-	1	1	-	11,9	58,51	40,0	10,815	-	-	-	-	396
263	1	A	101,6	22,7	414	N	13	0,054	0,18	0,18	-	-	-	-	1	1	-	12,3	64,65	44,3	11,753	-	-	-	-	451
264	1	A	102,0	23,0	414	N	10	0,063	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	10,3	66,45	45,7	11,495	-	-	-	-	389
265	1	A	101,0	23,2	414	S	15	0,032	0,00	0,00	-	-	-	-	2	2	-	9,8	62,29	42,9	10,930	-	-	-	-	396
266	1	A	97,4	22,7	414	N	11	0,021	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	10,9	53,27	36,5	9,097	-	-	-	-	383
267	1	A	100,8	23,0	414	N	13	0,032	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,2	61,97	42,6	11,222	-	-	-	-	410
268	1	A	101,4	23,3	414	N	14	0,104	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,1	70,27	48,4	11,114	-	-	-	-	419
269	1	A	100,3	22,5	414	S	8	0,004	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,1	57,28	39,2	10,075	-	-	-	-	405
270	1	A	99,2	22,9	414	N	14	0,085	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,5	74,74	51,3	12,619	-	-	-	-	411
271	1	A	102,6	23,0	414	N	15	0,041	0,14	0,14	-	-	-	-	1	1	-	12,7	53,25	36,6	9,934	-	-	-	-	390
272	1	A	100,3	22,8	414	N	12	0,025	0,10	0,10	-	-	-	-	1	1	-	12,8	61,65	42,3	10,406	-	-	-	-	391
273	1	A	102,8	22,9	414	N	11	0,006	0,19	0,19	-	-	-	-	3	3	-	11,8	59,08	40,6	10,630	-	-	-	-	393
274	1	A	98,9	22,5	414	N	9	0,021	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,1	57,24	39,2	11,394	-	-	-	-	366
275	1	A	101,8	22,4	414	S	12	0,1	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,5	46,51	31,8	10,348	-	-	-	-	383
276	1	A	100,8	22,8	414	N	12	0,027	0,26	0,26	-	-	-	-	1	1	-	12,3	54,69	37,5	8,581	-	-	-	-	374
277	1	A	100,9	22,9	414	N	8	0,091	0,57	0,57	-	-	-	-	2	2	-	12,5	41,16	28,3	8,089	-	-	-	-	387
278	1	A	101,3	22,7	414	S	10	0,084	0,00	0,00	-	-	-	-	3	3	-	12,4	41,33	28,3	10,485	-	-	-	-	417
279	1	A	100,2	22,8	414	N	5	0,028	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,5	60,94	41,8	10,571	-	-	-	-	361
280	1	A	101,4	22,9	414	N	14	0,02	0,32	0,32	-	-	-	-	1	1	-	12,1	54,37	37,3	10,001	-	-	-	-	421
281	1	A	102,8	22,8	414	S	10	0,104	0,22	0,22	-	-	-	-	1	1	-	12,4	39,74	27,3	10,362	-	-	-	-	415
282	1	A	103,5	22,8	414	S	9	0,096	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	9,5	70,92	48,7	11,423	-	-	-	-	391
283	1	A	102,1	22,9	414	N	12	0,026	0,31	0,31	-	-	-	-	1	1	-	11,4	59,12	40,6	10,483	-	-	-	-	393
284	1	A	100,6	22,9	414	N	7	0,051	0,25	0,25	-	-	-	-	1	1	-	10,1	51,63	35,5	8,465	-	-	-	-	378
285	1	A	98,9	22,7	414	S	9	0,085	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	9,8	67,14	46,0	11,215	-	-	-	-	395
286	1	A	100,2	23,0	414	N	10	0,043	0,09	0,09	-	-	-	-	1	1	-	11,1	64,15	44,1	11,668	-	-	-	-	402
287	1	A	99,8	23,1	414	N	6	0,016	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	10,4	62,1	42,7	10,160	-	-	-	-	373
288	1	A	100,3	22,9	414	S	10	0,031	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	10,0	60,12	41,3	9,832	-	-	-	-	406
289	1	A	100,3	23,0	414	N	9	0,109	0,44	0,44	-	-	-	-	1	1	-	11,1	41,69	28,7	6,567	-	-	-	-	414
290	1	A	102,1	23,1	414	N	-	0,047	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,6	64,36	44,3	10,901	-	-	-	-	406
291	1	A	102,0	23,0	414	S	9	0,038	0,92	0,92	-	-	-	-	3	1	-	10,5	54,15	37,2	10,226	-	-	-	-	418
292	1	A	101,7	22,7	414	S	12	0,082	0,36	0,36	-	-	-	-	1	1	-	11,3	28,52	19,5	6,728	-	-	-	-	383
293	1	A	100,5	22,2	414	N	14	0,027	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	9,9	61,29	41,8	10,790	-	-	-	-	383
294	1	A	100,7	22,7	414	S	-	0,007	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	9,4	57,42	39,3	11,241	-	-	-	-	401
295	1	A	98,6	22,8	414	N	14	0,083	0,39	0,39	-	-	-	-	1	1	-	10,4	42,23	29,0	10,020	-	-	-	-	399
296	1	A	101,0	22,8	414	S	13	0,033	0,00	0,00	-	-	-	-	3	3	-	11,8	56,51	38,8	10,331	-	-	-	-	397
297	2	A	45,3	76,5	1386	N	-	0,008	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	14,0	48,19	42,1	10,290	11,228	-	-	-	414
298	2	A	45,6	77,1	1386	N	-	0,025	0,48	0,48	-	-	-	-	2	2	C	15,0	43,15	37,8	8,116	8,274	8,418	8,517	388	
299	2	A	45,8	76,5	1386	N	-	0,017	0,00	0,00	-	-	-	-	2	2	C	14,8	45,96	40,2	8,652	9,211	9,018	5,022	403	
300	2	A	45,9	76,6	1386	N	-	0,018	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	15,1	42,08	36,8	9,657	9,974	9,326	8,832	384	
301	2	A	46,3	77,0	1386	N	-	0,102	0,00	0,00	-	-	-	-	3	4	C	14,6	26,13	22,9	7,822	8,562	8,922	8,636	389	
302	2	A	46,9	76,7	1386	N	-	0,062	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	16,5	38,38	33,6	8,327	9,041	8,884	8,597	385	
303	2	A	45,8	76,3	1386	N	-	0,054	0,30	0,30	-	-	-	-	3	3	C	15,1	40,31	35,2	8,707	8,791	8,929	8,405	385	
304	2	A	46,1	77,2	1386	N	-	0,059	0,45	0,45	-	-	-	-	3	3	E	14,0	37,92	33,2	8,848	11,181	9,405	8,215	369	
305	2	A	46,0	76,7	1386	N	-	0,063	0,35	0,35	-	-	-	-	3	3	C	14,8	39,3	34,4	9,023	9,898	9,604	8,985	385	
306	2	A	45,9	77,0	1386	N	-	0,08	0,98	0,98	-	-	-	-	3	3	C	14,4	37,53	32,8	7,599	7,518	9,780	9,178	411	
307	2	A	45,7	76,3	1386	N	-	0,084	0,61	0,22	-	-	-	-	3	4	C	14,5	27,18	23,7	8,560	9,784	8,701	13,407	377	
308	2	A	46,2	76,8	1386	N	-	0,045	0,23	0,00	-	-	-	-	3	3	C	14,6	50,31	44,0	11,372	12,611	12,652	12,280	438	
309	2	A	46,1	77,3	1386	N	-	0,035	0,24	0,00	-	-	-	-	3	3	C	14,6	49,25	43,1	9,565	10,511	9,602	9,086	389	
310	2	A	45,6	76,5	1386	S	-	0,101	0,79	0,55	-	-	-	-	3	3	E	15,2	36	31,5	8,094	8,546	9,829	9,334	423	
311	2	A	45,7	77,0	1386	N	-	0,015	0,66	0,66	-	-	-	-	3	3	C	15,2	42,75	37,4	8,820	9,644	9,550	8,910	376	
312	2	A	46,3	77,5	1386	S	-	0,083	0,78	0,78	-	-	-	-	3	3	C	15,2	32,15	28,2	8,361	10,781	9,814	8,993	395	
313	2	A	45,9	77,0	1386	N	-	0,037	0,65	0,00	-	-	-	-	3	3	E	14,8	42,56	37,3	9,071	9,674	9,227	7,928	401	
314	2	A	45,8	76,5	1386	N	-	0,012	0,00	0,00	-	-	-	-	3	3	E	14,4	44,56	39,0	9,613	12,241	10,121	9,595	408	
315	2	A	46,0	76,7	1386	N	-	0,032	0,00	0,00	-	-	-	-	3	3	C	14,3	42,54	37,2	8,793	9,540	9,224	8,660	392	
316	2	A	45,9	76,7	1386	S	-	0,015	0,26	0,00	-	-	-	-	1	1	-	15,0	43,97	38,5	9,791	10,995	9,949	9,548	391	
317	2	A	45,9	77,3	1386	N	-	0,088	0,00	0,00	-	-	-	-	3	4	C	15,2	17,38	15,2	8,777	8,548	9,180	9,065	393	
318	2	A	46,0	76,9	1386	N	-	0,082	0,52	0,52	-	-	-	-	1	1	-	14,7	32,5	28,4	8,453	9,460	-	-	396	
319	2	A	45,3	76,4	1386	N	-	0,066	0,00	0,00	-	-	-	-	3	3	E	13,4	52,19	45,6	11,463	12,444	10,997	5,548	396	
320	2	A	45,8	74,4	1386																					

Anexo II  
Bases de datos del trabajo experimental

Tabla II.1: Datos experimentales de los ensayos de flexión. Continuación

Probeta		Dimensiones						Nudosidad						Ataque Biológico			Propiedades								
N°	M	Clon	B	H	L	Med	A. P.	I. F.	K (TP)	K (TC)	KAR	KARM	KARMs	KARMi	Previo	Final	Pos	C.H. %	$f_{msc}$	$f_m$	$E_g$	$E_1$	$E_{us}$	$E_v$	$\rho$
			mm	mm	mm														N/mm <sup>2</sup>						
326	2	A	45,7	77,2	1386	N	-	0,085	0,00	0,00	-	-	-	-	3	4	C	13,6	15,04	13,2	8.774	9.592	8.668	8.378	375
327	2	A	47,7	77,0	1386	N	-	0,074	0,00	0,00	-	-	-	-	3	3	E	13,9	38,06	33,3	8.293	9.662	9.206	8.705	377
328	2	A	45,9	76,7	1386	N	-	0,04	0,00	0,00	-	-	-	-	3	3	C	14,2	41,61	36,4	8.676	10.068	-	-	405
329	2	A	46,3	77,0	1386	N	-	0,025	0,00	0,00	-	-	-	-	3	3	E	14,0	47,48	41,6	9.046	9.399	9.097	7.930	386
330	2	A	45,9	77,0	1386	N	-	0,027	0,00	0,00	-	-	-	-	3	3	C	14,3	42,89	37,5	9.033	9.549	9.014	8.526	380
331	2	A	46,8	77,1	1386	N	-	0,085	0,36	0,36	-	-	-	-	3	3	E	14,2	35,75	31,3	8.288	9.140	9.075	8.003	371
332	2	A	45,8	77,0	1386	N	-	0,074	0,99	0,99	-	-	-	-	3	3	E	14,2	38,11	33,4	8.695	9.197	10.314	8.667	389
333	2	A	45,3	76,5	1386	N	-	0,105	0,00	0,00	-	-	-	-	3	4	C	14,7	16,63	14,5	8.555	9.052	8.985	8.004	397
334	2	A	46,0	77,4	1386	N	-	0,049	0,18	0,18	-	-	-	-	1	1	-	14,2	49,23	43,1	10.484	10.338	11.824	9.766	416
335	2	A	45,9	76,4	1386	N	-	0,015	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	14,0	44,22	38,6	8.185	8.550	8.069	7.829	369
336	2	A	46,2	77,5	1386	N	-	0,056	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,8	50,1	43,9	12.484	14.260	12.501	10.519	422
337	2	A	45,7	76,8	1386	N	-	0,032	0,77	0,77	-	-	-	-	3	3	E	14,8	41,02	35,9	9.319	9.508	9.383	8.435	379
338	2	A	47,2	77,6	1386	N	-	0,018	0,00	0,00	-	-	-	-	3	3	C	14,3	47,9	42,0	8.557	9.875	9.779	9.108	426
339	2	A	46,1	77,0	1386	N	-	0,003	0,00	0,00	-	-	-	-	3	3	E	13,8	45,99	40,3	9.167	9.996	9.407	9.316	390
340	2	A	46,5	76,9	1386	N	-	0,021	0,00	0,00	-	-	-	-	2	2	C	14,7	43,6	38,2	9.722	10.311	10.563	9.845	414
341	2	A	46,0	76,9	1386	N	-	0,046	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	14,7	50,43	44,1	9.300	10.363	9.342	9.296	403
342	2	A	44,6	75,9	1386	N	-	0,06	0,00	0,00	-	-	-	-	3	3	E	14,7	51,99	45,4	10.368	11.125	-	-	341
343	2	A	45,5	76,5	1386	N	-	0,028	0,00	0,00	-	-	-	-	3	3	C	14,5	49,04	42,9	10.006	10.813	10.363	10.701	407
344	2	A	45,1	76,8	1386	N	-	0,091	0,71	0,33	-	-	-	-	3	3	E	14,2	36,39	31,8	7.276	7.568	8.320	10.430	400
345	2	A	46,2	76,9	1386	N	-	0,092	0,74	0,74	-	-	-	-	3	3	C	14,4	36,27	31,7	8.847	8.902	9.155	7.972	384
346	2	A	46,1	76,6	1386	S	-	0,107	0,34	0,00	-	-	-	-	3	4	C	14,4	22,85	20,0	7.065	7.376	8.045	7.522	405
347	2	A	46,2	76,1	1386	N	-	0,02	0,22	0,22	-	-	-	-	3	3	C	14,3	49,56	43,3	11.606	12.411	12.395	10.527	432
348	2	A	46,0	76,9	1386	N	-	0,1	0,44	0,44	-	-	-	-	3	3	E	14,6	29,53	25,8	8.653	8.989	-	-	350
349	2	A	46,1	76,8	1386	N	-	0,071	0,38	0,00	-	-	-	-	3	3	E	14,3	39,44	34,5	8.063	7.555	7.764	7.690	359
350	2	A	45,6	76,9	1386	N	-	0,044	0,70	0,70	-	-	-	-	1	1	-	14,1	39,16	34,3	8.465	7.080	11.101	9.295	421
351	2	A	45,8	77,1	1386	N	-	0,102	0,79	0,44	-	-	-	-	3	3	E	14,9	31,77	27,8	7.094	7.837	-	-	327
352	2	A	46,3	76,9	1386	N	-	0,011	0,29	0,29	-	-	-	-	1	1	-	14,6	47,85	41,9	9.711	9.979	10.758	10.193	393
353	3	A	23,0	94,0	1710	N	7	0,09	1,00	1,00	-	-	-	-	1	1	-	11,8	18,32	16,7	7.692	7.087	-	-	498
354	3	A	23,0	94,0	1710	S	-	0,108	0,83	0,83	-	-	-	-	1	1	-	13,4	27,43	25,0	8.674	9.885	-	-	379
355	3	A	24,0	95,0	1710	S	-	0,092	1,00	1,00	-	-	-	-	1	1	-	12,8	26,79	24,5	8.404	9.419	-	-	429
356	3	A	24,0	94,3	1710	N	10	0,016	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,4	45,41	41,4	8.746	9.359	-	-	381
357	3	A	24,0	95,0	1710	N	-	0,097	0,83	0,83	-	-	-	-	1	1	-	12,1	22,57	20,6	9.349	10.058	-	-	415
358	3	A	23,1	94,8	1710	N	17	0,047	1,00	1,00	-	-	-	-	1	1	-	12,7	39,23	35,8	7.982	8.046	-	-	349
359	3	A	23,2	94,5	1710	N	21	0,039	0,60	0,60	-	-	-	-	1	1	-	12,7	40,04	36,5	10.878	11.963	-	-	436
360	3	A	23,2	94,7	1710	N	-	0,017	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,3	42,41	38,7	9.155	10.044	-	-	411
361	3	A	23,2	94,9	1710	N	7	0,033	0,23	0,23	-	-	-	-	1	1	-	12,5	48,46	44,2	10.011	11.158	-	-	363
362	3	A	23,3	94,7	1710	N	17	0,086	0,99	0,99	-	-	-	-	1	1	-	12,9	22,75	20,8	8.792	7.904	-	-	384
363	3	A	23,0	94,6	1710	N	-	0,084	0,96	0,96	-	-	-	-	1	1	-	12,2	30,64	27,9	8.581	9.604	-	-	446
364	3	A	23,5	94,2	1710	N	17	0,103	0,35	0,35	-	-	-	-	2	2	C	13,1	54,75	49,9	11.367	11.218	-	-	436
365	3	A	23,5	95,0	1710	N	33	0,024	0,00	0,00	-	-	-	-	3	3	C	12,3	39,73	36,3	6.974	7.392	-	-	326
366	3	A	23,2	94,7	1710	N	21	0,013	0,62	0,00	-	-	-	-	3	3	E	13,8	44,56	40,6	9.474	10.540	-	-	396
367	3	A	23,3	95,0	1710	N	-	0,106	0,19	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,4	55,14	50,3	9.940	10.846	-	-	383
368	3	A	23,2	94,7	1710	N	-	0,039	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,4	46,11	42,1	10.176	10.804	-	-	380
369	3	A	23,4	94,5	1710	N	25	0,011	0,36	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,2	42,76	39,0	9.169	10.069	-	-	396
370	3	A	23,3	94,6	1710	S	11	0,081	0,94	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,3	19,07	17,4	8.215	8.311	-	-	398
371	3	A	23,1	94,9	1710	S	7	0,106	0,00	0,00	-	-	-	-	3	4	C	13,2	26,51	24,2	10.730	10.904	-	-	418
372	3	A	22,9	94,5	1710	N	10	0,096	0,61	0,36	-	-	-	-	3	3	C	12,9	28,85	26,3	7.863	8.730	-	-	345
373	3	A	23,1	94,2	1710	N	15	0,1	0,40	0,40	-	-	-	-	2	2	C	12,8	31,61	28,8	9.889	10.408	-	-	382
374	3	A	23,0	94,8	1710	S	11	0,073	0,46	0,22	-	-	-	-	3	3	C	13,0	37,64	34,3	10.145	9.607	-	-	444
375	3	A	23,2	95,0	1710	N	23	0,022	0,27	0,27	-	-	-	-	1	1	-	12,7	43,45	39,7	8.079	8.449	-	-	401
376	3	A	23,3	94,9	1710	N	10	0,067	0,12	0,12	-	-	-	-	1	1	-	12,9	50,02	45,6	7.976	8.510	-	-	378
377	3	A	23,4	94,8	1710	N	9	0,046	0,36	0,00	-	-	-	-	1	1	-	10,8	40,84	37,3	10.507	12.143	-	-	411
378	3	A	23,5	94,9	1710	S	7	0,016	0,34	0,34	-	-	-	-	1	1	-	12,9	43,56	39,7	10.260	11.176	-	-	436
379	3	A	23,4	94,7	1710	N	9	0,071	0,31	0,31	-	-	-	-	1	1	-	12,0	38,35	35,0	9.218	9.890	-	-	359
380	3	A	23,1	94,7	1710	N	-	0,09	1,00	1,00	-	-	-	-	1	1	-	11,4	34,72	31,7	8.298	8.264	-	-	426
381	3	A	23,7	95,1	1710	S	12	0,015	0,89	0,21	-	-	-	-	1	1	-	12,4	44,42	40,6	9.893	10.366	-	-	452
382	3	A	23,2	94,8	1710	N	13	0,063	0,43	0,43	-	-	-	-	1	1	-	10,9	37,88	34,6	10.633	11.920	-	-	419
383	3	A	23,1	94,7	1710	N	7	0,033	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,9	46,77	42,7	7.815	8.658	-	-	397
384	3	A	23,2	94,9	1710	N	9	0,087	0,08	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,3	52,38	47,8	9.930	11.086	-	-	426
385	3	A	24,1	95,1	1710	N	8	0,061	0,50	0,50	-	-	-	-											

Anexo II  
Bases de datos del trabajo experimental

Tabla II.1: Datos experimentales de los ensayos de flexión. Continuación

Probeta		Dimensiones						Nudosidad						Ataque Biológico			Propiedades								
Nº	M	Clon	B	H	L	Med	A. P.	I. F.	K (TP)	K (TC)	KAR	KARM	KARMs	KARMi	Previo	Final	Pos	C.H.	$f_m$ sc	$f_m$	$E_g$	$E_1$	$E_{us}$	$E_v$	$\rho$
			mm	mm	mm				N/mm <sup>2</sup>				%	N/mm <sup>2</sup>	kg/m <sup>3</sup>										
391	3	A	23,1	94,7	1710	N	-	0,021	0,22	0,22	-	-	-	-	1	1	-	12,8	41,16	37,5	8,067	8,316	-	-	362
392	3	A	23,7	94,5	1710	S	18	0,102	0,98	0,98	-	-	-	-	1	1	-	12,3	18,11	16,5	7,253	8,819	-	-	411
393	3	A	23,2	94,8	1710	N	10	0,065	0,24	0,00	-	-	-	-	3	3	C	12,2	50,1	45,7	9,398	10,519	-	-	387
394	3	A	23,4	94,7	1710	N	-	0,092	0,21	0,21	-	-	-	-	1	1	-	12,4	29	26,5	8,638	9,468	-	-	393
395	3	A	23,2	94,9	1710	N	15	0,017	0,99	0,99	-	-	-	-	2	2	C	12,1	42,16	38,5	8,624	9,571	-	-	389
396	3	A	23,4	94,6	1710	S	20	0,06	0,18	0,18	-	-	-	-	1	1	-	12,2	49,8	45,4	10,514	10,889	-	-	395
397	3	A	23,5	95,1	1710	N	8	0,105	0,98	0,98	-	-	-	-	1	1	-	12,5	24,78	22,6	8,178	7,774	-	-	373
398	3	A	23,4	94,9	1710	N	8	0,029	0,24	0,00	-	-	-	-	2	2	E	12,2	45,52	41,5	9,168	9,747	-	-	388
399	3	A	23,3	95,0	1710	N	9	0,068	0,20	0,20	-	-	-	-	2	2	C	12,2	37,97	34,7	9,620	10,634	-	-	404
400	3	A	23,4	95,1	1710	S	11	0,046	0,37	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,0	47,82	43,7	11,087	11,432	-	-	422
401	3	A	23,5	95,4	1710	N	7	0,099	1,00	1,00	-	-	-	-	3	3	E	12,8	30,74	28,1	8,299	8,571	-	-	352
402	3	A	23,2	94,7	1710	N	7	0,065	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	11,7	38,62	35,2	8,022	8,618	-	-	360
403	3	A	23,4	95,0	1710	S	-	0,103	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,1	52,66	48,1	10,115	11,278	-	-	410
404	3	A	23,5	94,6	1710	N	17	0,098	0,30	0,00	-	-	-	-	1	1	-	10,9	52,57	47,9	11,060	11,712	-	-	401
405	3	A	23,5	94,8	1710	N	9	0,007	0,36	0,36	-	-	-	-	2	2	C	11,6	44,4	40,5	9,334	9,900	-	-	399
406	3	A	22,8	94,7	1710	N	7	0,094	0,61	0,61	-	-	-	-	2	2	E	11,1	24,81	22,6	9,683	11,065	-	-	432
407	3	A	23,4	94,4	1710	S	10	0,085	0,81	0,81	-	-	-	-	2	2	E	11,4	53,36	48,6	9,923	11,108	-	-	457
408	3	A	23,3	94,8	1710	N	23	0,007	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,1	45	41,1	9,441	10,394	-	-	371
409	3	A	23,1	94,8	1710	S	8	0,105	0,65	0,65	-	-	-	-	1	1	-	11,3	23,28	21,2	8,845	9,081	-	-	383
410	3	A	23,2	94,9	1710	S	12	0,035	0,60	0,60	-	-	-	-	1	1	-	11,5	41,55	37,9	8,937	9,913	-	-	385
411	3	A	23,4	94,8	1710	N	7	0,046	0,34	0,34	-	-	-	-	3	3	E	11,5	47,63	43,5	7,990	8,308	-	-	420
412	3	A	23,1	94,7	1710	N	9	0,085	0,44	0,44	-	-	-	-	3	3	E	11,1	28,16	25,7	9,604	9,700	-	-	384
413	3	A	22,1	94,8	1710	N	10	0,033	0,31	0,31	-	-	-	-	3	3	C	11,9	47,32	43,2	9,424	9,388	-	-	424
414	3	A	23,1	94,4	1710	N	-	0,104	0,83	0,83	-	-	-	-	1	1	-	11,7	22,66	20,7	7,399	6,157	-	-	550
415	3	A	23,3	94,7	1710	N	9	0,026	0,43	0,43	-	-	-	-	3	3	C	11,3	42,8	39,0	9,630	10,255	-	-	383
416	3	A	23,3	95,1	1710	S	11	0,002	0,19	0,19	-	-	-	-	1	1	-	12,0	44,01	40,2	9,916	10,989	-	-	414
417	3	A	23,4	94,7	1710	N	5	0,086	0,46	0,46	-	-	-	-	2	2	E	12,7	19,32	17,6	7,256	7,911	-	-	425
418	3	A	23,3	94,7	1710	N	8	0,01	0,19	0,19	-	-	-	-	1	1	-	11,4	42,9	39,1	10,275	10,679	-	-	406
419	4	A	46,0	103,5	1854	N	-	0,019	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	3	3	C	14,6	41,23	38,3	9,446	9,498	-	-	395
420	4	A	45,1	103,1	1854	N	-	0,081	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	3	3	C	13,0	35,26	32,7	9,053	9,103	9,634	9,125	384
421	4	A	45,7	103,4	1854	N	-	0,083	0,12	0,12	0,038	0,076	0,152	0,000	3	3	E	13,9	57,32	53,2	10,540	10,967	-	-	427
422	4	A	45,5	101,9	1854	N	-	0,102	0,77	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	3	3	C	13,6	53,1	49,2	10,378	10,955	10,187	10,925	395
423	4	A	45,9	103,3	1854	N	-	0,1	1,00	1,00	0,460	0,547	0,172	0,922	3	3	C	12,9	25,11	23,3	8,092	8,906	8,853	9,278	357
424	4	A	45,7	103,1	1854	N	-	0,102	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	3	3	C	13,8	31,03	28,8	10,528	11,150	11,359	11,750	429
425	4	A	45,7	103,2	1854	N	-	0,095	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	3	4	C	13,6	17,41	16,2	9,342	9,652	9,401	9,726	381
426	4	A	45,4	103,2	1854	N	-	0,043	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	3	3	C	14,1	48,65	45,1	9,126	9,412	-	-	405
427	4	A	45,5	102,8	1854	N	-	0,039	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	3	3	C	14,5	46,44	43,1	9,563	10,149	-	-	399
428	4	A	45,1	103,1	1854	N	-	0,101	0,79	0,79	0,178	0,227	0,006	0,447	3	3	E	21,4	26,49	24,6	9,383	10,353	9,506	9,815	411
429	4	A	46,0	103,0	1854	N	-	0,042	0,71	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	2	2	C	18,3	39,08	36,2	8,585	9,390	8,610	8,725	395
430	4	A	45,3	104,0	1854	S	-	0,096	0,51	0,51	0,252	0,209	0,418	0,000	2	2	E	16,9	32,78	30,5	6,642	6,660	7,751	7,192	345
431	4	A	45,1	102,1	1854	S	-	0,087	0,38	0,38	0,068	0,136	0,000	0,272	3	3	E	12,1	19,39	18,0	8,179	8,633	8,982	8,253	366
432	4	A	45,3	103,2	1854	N	-	0,094	0,19	0,19	0,094	0,188	0,000	0,376	3	3	C	13,0	31,19	28,9	9,092	8,535	9,872	9,925	392
433	4	A	45,7	102,7	1854	N	-	0,096	0,43	0,43	0,152	0,263	0,525	0,000	3	3	C	16,7	32,41	30,0	7,736	8,492	8,897	9,425	369
434	4	A	46,0	103,3	1854	N	-	0,068	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	2	2	C	14,0	47,86	44,4	9,812	10,174	-	-	393
435	4	A	45,9	103,0	1854	N	-	0,105	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	3	4	C	19,2	14,36	13,3	8,885	9,250	9,981	10,724	379
436	4	A	46,0	102,1	1854	N	-	0,106	0,29	0,29	0,188	0,128	0,000	0,257	3	3	C	17,9	34,55	32,0	8,189	8,935	7,979	8,325	344
437	4	A	45,5	101,8	1854	N	-	0,087	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	3	3	C	14,0	54,92	50,8	10,720	12,121	-	-	411
438	4	A	45,3	102,5	1854	S	-	0,087	0,85	0,85	0,154	0,178	0,322	0,035	3	3	E	13,7	24,09	22,3	8,658	9,060	8,920	8,756	372
439	4	A	45,2	102,9	1854	S	-	0,108	0,73	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	3	3	C	14,3	19,57	18,2	9,727	10,047	9,838	10,736	393
440	4	A	46,2	103,1	1854	N	-	0,077	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	3	3	C	14,4	50,76	47,1	9,335	9,741	-	-	400
441	4	A	45,8	103,8	1854	N	-	0,102	0,94	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	3	4	C	13,8	13,57	12,6	9,276	7,702	10,083	10,425	394
442	4	A	45,5	102,9	1854	N	-	0,019	0,35	0,19	0,155	0,310	0,000	0,620	3	3	C	14,3	41,95	38,9	9,709	10,816	-	-	374
443	4	A	45,7	102,9	1854	N	-	0,098	0,18	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	3	4	C	12,7	19,32	17,9	9,386	10,048	-	-	390
444	4	A	45,7	103,4	1854	N	-	0,096	0,24	0,24	0,220	0,429	0,857	0,000	2	2	E	13,7	32,21	29,9	7,836	7,610	8,453	8,725	351
445	4	A	45,3	102,9	1854	N	-	0,022	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	3	3	E	14,4	42,33	39,3	9,952	8,570	-	-	396
446	4	A	45,9	103,9	1854	N	-	0,082	0,52	0,52	0,171	0,336	0,000	0,671	3	3	C	13,9	31,5	29,3	9,507	10,138	11,174	10,325	409
447	4	A	46,2	103,1	1854	N	-	0,088	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000												

Anexo II  
Bases de datos del trabajo experimental

Tabla II.1: Datos experimentales de los ensayos de flexión. Continuación

Probeta		Dimensiones						Nudosidad						Ataque Biológico			Propiedades								
N°	M	Clon	B	H	L	Med	A. P.	I. F.	K (TP)	K (TC)	KAR	KARM	KARMS	KARMI	Previo	Final	Pos	C.H. %	$f_{msc}$	$f_m$	$E_g$	$E_1$	$E_{us}$	$E_v$	$\rho$
			mm	mm	mm														N/mm <sup>2</sup>	kg/m <sup>3</sup>					
456	4	A	46,0	102,6	1854	N	-	0,098	0,10	0,10	0,029	0,058	0,000	0,116	3	4	C	13,8	29,3	27,2	10,043	10,238	10,334	11,051	389
457	4	A	45,5	103,5	1854	N	-	0,017	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	3	3	C	14,0	41,47	38,5	8,738	9,774	9,606	10,200	383
458	4	A	45,5	101,5	1854	N	-	0,003	0,11	0,11	0,076	0,151	0,000	0,303	2	2	C	13,8	43,27	40,0	10,449	10,437	10,821	11,425	395
459	4	A	47,7	98,2	1854	S	-	0,038	0,55	0,38	0,113	0,220	0,000	0,439	1	1	-	12,1	47,27	43,4	11,008	12,010	10,759	11,670	421
460	4	A	47,8	100,8	1854	S	-	0,068	0,38	0,38	0,218	0,066	0,045	0,086	1	1	-	13,5	36,84	34,0	9,925	10,921	10,832	12,090	446
461	4	A	47,0	100,6	1854	S	-	0,106	0,49	0,49	0,104	0,191	0,382	0,000	1	1	-	12,8	56,4	52,1	11,392	14,200	11,587	12,360	439
462	4	A	46,6	98,6	1854	N	-	0,098	0,27	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	1	1	-	12,1	54,3	49,9	10,020	11,452	10,464	11,331	415
463	4	A	47,3	101,0	1854	S	-	0,097	0,66	0,66	0,409	0,319	0,010	0,628	1	1	-	13,3	33,84	31,3	9,657	11,036	10,747	11,640	403
464	4	A	43,1	99,9	1854	S	-	0,088	0,35	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	1	1	-	12,4	53,47	49,3	11,050	13,426	10,377	10,939	401
465	4	A	46,7	99,5	1854	S	-	0,074	0,36	0,36	0,029	0,057	0,000	0,114	1	1	-	13,3	49,79	45,9	10,990	11,505	12,416	11,986	444
466	4	A	47,5	101,1	1854	S	-	0,086	0,46	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	1	1	-	13,6	51,67	47,8	10,730	12,141	11,270	12,076	437
467	4	A	46,7	98,5	1854	S	-	0,084	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	1	1	-	12,5	64,68	59,5	12,982	15,551	11,240	12,316	429
468	4	A	46,4	100,7	1854	N	-	0,012	0,54	0,54	0,073	0,146	0,000	0,291	1	1	-	13,1	43,66	40,3	8,962	10,004	10,210	10,725	402
469	4	A	47,3	100,1	1854	S	-	0,028	0,44	0,21	0,128	0,229	0,459	0,000	1	1	-	13,2	42,04	38,8	9,912	11,193	11,231	12,344	429
470	4	A	47,3	100,6	1854	S	-	0,095	0,30	0,12	0,063	0,126	0,252	0,000	1	1	-	13,1	51,05	47,1	10,378	12,749	10,410	11,108	391
471	4	A	47,1	101,2	1854	S	-	0,102	0,40	0,40	0,341	0,304	0,000	0,609	1	1	-	13,6	33,3	30,8	8,676	9,507	9,998	10,568	397
472	4	A	47,1	98,5	1854	N	-	0,093	0,47	0,47	0,025	0,049	0,000	0,098	1	1	-	12,0	34,41	31,6	10,006	11,753	11,219	10,934	410
473	4	A	46,4	98,7	1854	N	-	0,021	0,37	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	1	1	-	11,4	46,86	43,1	10,136	10,398	9,745	10,237	373
474	4	A	46,7	100,3	1854	S	-	0,06	0,45	0,27	0,152	0,205	0,410	0,000	1	1	-	11,8	37,92	35,0	8,612	6,046	10,715	-	400
475	5	A	44,1	146,1	2646	N	21	0,07	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	3	3	C	12,5	45,75	45,5	8,980	9,773	6,959	6,615	429
476	5	A	45,0	146,1	2646	N	16	0,061	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	1	1	-	13,3	33,77	33,6	7,514	7,805	6,441	6,889	451
477	5	A	44,7	146,3	2646	S	18	0,028	0,16	0,16	0,047	0,000	0,000	0,000	2	2	E	14,1	47,7	47,5	10,428	11,124	7,226	6,555	452
478	5	A	44,6	146,6	2646	S	32	0,04	0,12	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	3	4	C	13,1	29,93	29,8	10,700	7,991	6,861	6,921	471
479	5	A	44,7	146,8	2646	N	22	0,022	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	3	4	C	12,4	21,8	21,7	8,828	10,275	7,363	6,421	441
480	5	A	45,4	146,8	2646	N	12	0,006	0,35	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	2	2	E	12,6	45,35	45,2	11,693	9,935	7,644	7,825	491
481	5	A	44,9	144,6	2646	N	21	0,022	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	2	2	C	12,0	40,26	40,0	9,419	10,506	7,617	8,098	486
482	5	A	44,5	146,8	2646	S	17	0,002	0,19	0,19	0,080	0,008	0,015	0,000	2	2	C	12,9	45,25	45,1	8,733	9,975	8,483	7,753	491
483	5	A	44,5	146,3	2646	S	19	0,014	0,14	0,14	0,068	0,000	0,000	0,000	2	2	C	12,8	36,33	36,2	7,927	8,838	6,736	7,011	434
484	5	A	44,8	145,7	2646	N	19	0,027	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	2	2	C	12,4	51,74	51,4	12,183	13,420	10,264	9,327	519
485	5	A	44,9	146,2	2646	N	12	0,03	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	2	2	C	11,4	49,12	48,9	10,460	11,677	8,292	7,390	452
486	5	A	45,0	146,6	2646	N	23	0,028	0,14	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	2	2	E	12,9	40,65	40,5	10,350	11,836	11,232	11,423	472
487	5	A	45,3	146,7	2646	N	18	0,04	0,80	0,80	0,133	0,265	0,000	0,530	3	4	C	14,1	27,04	26,9	9,265	10,190	10,042	9,608	433
488	5	A	44,3	145,8	2646	S	22	0,024	0,23	0,23	0,547	0,445	0,000	0,889	2	2	C	13,1	23,48	23,3	8,008	9,614	6,968	7,325	436
489	5	A	44,9	145,9	2646	N	32	0,006	0,17	0,17	0,095	0,000	0,000	0,000	3	3	C	12,5	58,95	58,6	10,305	12,140	11,398	10,854	476
490	5	A	43,8	146,0	2646	N	18	0,014	0,19	0,19	0,167	0,335	0,263	0,406	3	3	E	13,9	43,06	42,8	10,629	11,695	7,773	7,932	464
491	5	A	44,7	146,6	2646	N	27	0,034	0,36	0,36	0,248	0,055	0,000	0,110	2	2	C	12,2	41,13	40,9	9,025	11,377	7,036	7,457	416
492	5	A	44,7	146,8	2646	N	17	0,032	0,33	0,33	0,152	0,232	0,000	0,463	2	2	E	13,1	41,3	41,1	8,941	10,102	7,992	7,825	468
493	5	A	44,5	146,0	2646	N	9	0,046	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	2	2	E	12,8	46,2	46,0	9,772	10,629	7,348	7,105	459
494	5	A	45,5	146,7	2646	N	24	0,026	0,27	0,16	0,247	0,022	0,000	0,043	2	2	C	12,1	36,16	36,0	8,768	9,516	7,899	6,907	483
495	5	A	44,9	146,7	2646	S	27	0,02	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	3	4	C	11,7	27,49	27,4	6,975	7,643	-	-	398
496	5	A	45,6	146,8	2646	N	22	0,014	0,19	0,19	0,022	0,041	0,000	0,082	2	2	C	12,7	31,18	31,0	7,370	7,928	6,359	6,947	447
497	5	A	44,9	146,8	2646	S	17	0,018	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	3	4	C	12,7	21,39	21,3	9,341	9,310	7,342	6,549	461
498	5	A	43,9	146,7	2646	S	32	0,024	0,33	0,22	0,140	0,159	0,000	0,319	3	3	C	12,7	25,14	25,0	9,825	9,934	8,270	7,762	463
499	5	A	44,4	146,5	2646	N	20	0,028	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	1	1	-	13,0	50,25	50,0	10,476	11,091	8,315	8,754	496
500	5	A	44,9	146,9	2646	S	15	0,032	0,21	0,15	0,117	0,000	0,000	0,000	1	1	-	12,5	43,72	43,5	9,818	11,891	7,703	7,934	445
501	5	A	44,1	146,5	2646	S	32	0,014	0,36	0,36	0,020	0,015	0,000	0,030	2	2	C	13,3	36,4	36,2	9,072	10,572	7,954	7,815	480
502	5	A	45,1	146,9	2646	S	18	0,028	0,44	0,44	0,084	0,164	0,000	0,328	3	4	C	13,7	27,56	27,4	6,977	7,130	6,450	7,012	449
503	5	A	43,5	146,4	2646	S	19	0,03	0,32	0,18	0,061	0,122	0,243	0,000	2	2	C	13,7	46,33	46,1	9,592	10,521	7,705	7,232	467
504	5	A	43,8	145,8	2646	N	17	0,014	0,54	0,18	0,117	0,223	0,000	0,446	3	3	E	14,3	40,11	39,9	8,821	11,510	8,225	8,015	467
505	5	A	44,3	146,5	2646	N	16	0,016	0,24	0,24	0,135	0,039	0,077	0,000	2	2	C	12,7	38,14	38,0	8,690	9,932	8,800	6,541	427
506	5	A	44,1	145,9	2646	N	12	0,044	0,18	0,14	0,105	0,000	0,000	0,000	2	2	C	11,4	50,09	49,8	9,577	11,343	7,740	7,985	465
507	5	A	44,9	146,7	2646	S	14	0,008	0,27	0,16	0,045	0,043	0,085	0,000	1	1	-	14,1	47,74	47,5	9,041	9,675	8,271	7,145	484
508	5	A	44,8	146,4	26																				

Anexo II  
Bases de datos del trabajo experimental

Tabla II.1: Datos experimentales de los ensayos de flexión. Continuación

Probeta		Dimensiones							Nudosidad						Ataque Biológico			Propiedades								
Nº	M	Clon	B	H	L	Med	A. P.	I. F.	K (TP)	K (TC)	KAR	KARM	KARMS	KARMI	Previo	Final	Pos	C.H.	$f_m$ sc	$f_m$	$E_g$	$E_1$	$E_{us}$	$E_v$	$\rho$	
			mm	mm	mm				N/mm <sup>2</sup>				%	N/mm <sup>2</sup>	kg/m <sup>3</sup>											
521	5	A	44,0	145,2	2646	S	13	0,018	0,19	0,19	0,079	0,030	0,000	0,060	1	1	-	13,6	47,3	47,0	10.127	11.046	7.834	7.204	445	
522	5	A	44,8	146,4	2646	N	20	0,05	0,21	0,21	0,184	0,213	0,000	0,426	2	2	E	12,5	22,1	22,0	8.709	10.499	7.972	7.032	492	
523	5	A	44,8	146,2	2646	N	19	0,012	0,30	0,30	0,290	0,408	0,000	0,817	3	4	C	13,5	23,73	23,6	10.464	11.554	7.968	7.316	458	
524	5	A	44,6	146,3	2646	N	30	0,028	0,39	0,39	0,197	0,015	0,000	0,031	2	2	C	12,3	35,36	35,2	8.455	8.962	7.294	6.365	454	
525	5	A	44,6	145,7	2646	S	26	0,064	0,16	0,16	0,022	0,044	0,000	0,089	2	2	E	12,8	46,59	46,3	10.326	11.238	7.548	6.911	446	
526	5	A	44,4	146,2	2646	N	15	0,024	0,32	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	3	4	C	12,6	25,64	25,5	8.847	9.703	6.232	6.003	400	
527	5	A	44,5	147,2	2646	N	15	0,022	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	2	2	C	12,2	44,43	44,3	9.799	10.979	7.929	7.262	489	
528	5	A	42,4	150,6	2646	N	16	0,036	0,36	0,36	0,031	0,000	0,000	0,000	3	3	C	13,5	18,48	18,5	10.634	11.570	-	-	398	
529	6	S	107,4	22,9	414	S	10	0,048	0,14	0,14	-	-	-	-	1	1	-	12,8	59,49	40,9	9.199	-	-	-	482	
530	6	S	101,2	23,0	414	N	16	0,097	0,40	0,40	-	-	-	-	3	3	-	13,1	42,79	29,4	11.218	-	11.633	-	470	
531	6	S	109,7	22,8	414	N	23	0,071	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,4	37,64	25,8	9.875	-	11.114	-	453	
532	6	S	100,2	22,5	414	S	16	0,065	0,16	0,16	-	-	-	-	1	1	-	13,0	48,25	33,0	9.897	-	11.003	-	457	
533	6	S	109,4	23,3	414	N	20	0,061	0,43	0,43	-	-	-	-	1	1	-	13,3	45,15	31,1	7.931	-	10.232	-	487	
534	6	S	109,5	23,1	414	S	13	0,046	0,41	0,41	-	-	-	-	1	1	-	13,9	51,09	35,2	7.719	-	9.206	-	392	
535	6	S	109,0	22,9	414	N	15	0,087	0,70	0,70	-	-	-	-	1	1	-	12,9	55	37,8	9.305	-	9.338	-	395	
536	6	S	109,3	22,8	414	N	9	0,057	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,8	69,09	47,4	11.317	-	10.715	-	425	
537	6	S	108,8	23,3	414	N	20	0,066	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,0	62,79	43,3	9.979	-	10.031	-	416	
538	6	S	108,4	23,0	414	N	11	0,079	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,6	55,48	38,1	10.261	-	-	-	383	
539	6	S	109,1	22,9	414	N	21	0,062	0,17	0,17	-	-	-	-	1	1	-	12,1	55,67	38,2	9.157	-	-	-	374	
540	6	S	108,0	23,4	414	S	21	0,045	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,1	47,18	32,5	10.059	-	-	-	429	
541	6	S	110,6	23,3	414	N	16	0,049	0,11	0,11	-	-	-	-	1	1	-	13,0	65,85	45,4	12.282	-	12.843	-	484	
542	6	S	109,0	23,1	414	S	17	0,027	0,33	0,33	-	-	-	-	1	1	-	12,5	44,87	30,9	9.215	-	-	-	460	
543	6	S	109,6	23,0	414	S	17	0,064	0,18	0,18	-	-	-	-	1	1	-	11,9	46,65	32,1	8.677	-	-	-	481	
544	6	S	106,9	23,2	414	N	27	0,038	0,17	0,17	-	-	-	-	1	1	-	12,5	52,66	36,2	8.493	-	-	-	493	
545	6	S	108,5	23,3	414	N	15	0,041	0,14	0,14	-	-	-	-	1	1	-	12,0	57,4	39,6	8.826	-	-	-	416	
546	6	S	110,4	23,1	414	N	19	0,017	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,1	70,64	48,6	10.845	-	11.740	-	488	
547	6	S	109,5	23,0	414	N	15	0,055	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	11,7	57,25	39,4	12.133	-	-	-	469	
548	6	S	109,4	22,8	414	N	16	0,054	0,17	0,17	-	-	-	-	1	1	-	13,5	58,36	40,1	12.632	-	-	-	470	
549	6	S	109,2	23,1	414	N	15	0,044	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,4	52,57	36,1	9.281	-	-	-	429	
550	6	S	108,8	23,4	414	N	17	0,012	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,6	69,81	48,2	12.489	-	-	-	474	
551	6	S	106,1	23,1	414	N	10	0,063	0,16	0,16	-	-	-	-	1	1	-	13,4	37,98	26,1	9.916	-	-	-	465	
552	6	S	109,7	23,1	414	N	26	0,025	1,00	1,00	-	-	-	-	2	2	-	13,5	50,28	34,6	8.941	-	-	-	491	
553	6	S	109,7	23,1	414	N	13	0,06	0,48	0,48	-	-	-	-	2	2	-	12,3	41,15	28,3	10.092	-	-	-	458	
554	6	S	107,4	23,1	414	N	22	0,044	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,8	42,31	29,1	8.500	-	-	-	395	
555	6	S	108,1	22,6	414	N	16	0,036	0,28	0,28	-	-	-	-	1	1	-	13,1	47,86	32,8	8.643	-	-	-	406	
556	6	S	108,0	22,7	414	N	23	0,041	0,09	0,09	-	-	-	-	1	1	-	13,1	50,2	34,4	9.106	-	-	-	387	
557	6	S	109,6	23,1	414	N	14	0,043	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,4	37,93	26,1	10.898	-	-	-	450	
558	6	S	108,1	22,8	414	S	13	0,04	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,3	54,95	37,7	9.427	-	-	-	461	
559	6	S	106,8	22,7	414	N	21	0,057	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,7	46,67	32,0	6.307	-	-	-	393	
560	6	S	107,3	22,9	414	N	14	0,043	0,19	0,19	-	-	-	-	1	1	-	12,6	45,96	31,6	11.177	-	-	-	461	
561	6	S	108,2	22,9	414	N	19	0,057	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,1	60,17	41,3	8.937	-	-	-	385	
562	6	S	109,5	22,4	414	N	15	0,02	0,16	0,16	-	-	-	-	2	2	-	13,2	39,11	26,8	8.735	-	9.028	-	385	
563	6	S	108,6	22,9	414	N	14	0,036	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,1	56,32	38,7	8.403	-	-	-	375	
564	6	S	107,0	22,9	414	N	14	0,037	0,00	0,00	-	-	-	-	2	2	-	12,7	59,8	41,1	9.443	-	-	-	390	
565	6	S	108,7	22,8	414	N	11	0,037	0,00	0,00	-	-	-	-	2	2	-	12,7	70,64	48,5	11.743	-	-	-	446	
566	6	S	108,4	23,0	414	N	18	0,041	0,18	0,18	-	-	-	-	1	1	-	12,4	54,6	37,5	9.862	-	-	-	470	
567	6	S	107,4	23,4	414	N	14	0,035	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,7	66,47	45,8	10.148	-	-	-	452	
568	6	S	107,7	23,0	414	N	15	0,047	0,26	0,26	-	-	-	-	3	3	-	13,4	58,35	40,1	9.249	-	-	-	419	
569	6	S	107,6	22,5	414	N	14	0,04	0,14	0,14	-	-	-	-	1	1	-	13,2	63,95	43,8	11.517	-	-	-	416	
570	6	S	105,9	22,7	414	N	20	0,065	1,00	1,00	-	-	-	-	1	1	-	13,7	64,8	44,4	10.030	-	-	-	575	
571	6	S	110,2	23,2	414	N	14	0,031	0,20	0,20	-	-	-	-	1	1	-	13,0	51,18	35,3	9.869	-	-	-	525	
572	6	S	107,4	23,2	414	N	15	0,066	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,2	44,55	30,7	8.143	-	-	-	398	
573	6	S	109,0	23,3	414	N	16	0,093	0,17	0,17	-	-	-	-	1	1	-	12,7	40,15	27,7	10.303	-	-	-	499	
574	6	S	111,1	23,1	414	N	13	0,051	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,1	70,58	48,5	11.341	-	12.263	-	484	
575	6	S	108,6	22,5	414	N	13	0,057	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,3	75,68	51,8	12.990	-	-	-	494	
576	6	S	107,5	22,8	414	N	20	0,08	0,15	0,15	-	-	-	-	1	1	-	13,7	63,17	43,3	11.277	-	-	-	520	
577	6	S	108,3	23,2	414	N	10	0,037	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,9	71,32	49,1	11.326	-	-	-	492	
578	6	S	108,9	23,1	414	N	16	0,018	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,6	63,61	43,8	10.796	-	-	-	432	
579	6	S	109,4	22,7	414	S	15	0,039	0,17	0,17	-	-	-	-	1	1	-	13,4	48,33	33,1	7.789	-	11.161	-	555	
580	6	S	108,3	22,9	414	S	20	0,038	0,14	0,14	-	-	-	-	1	1	-	13,3	55,37	38,0	8.965					

Anexo II  
Bases de datos del trabajo experimental

Tabla II.1: Datos experimentales de los ensayos de flexión. Continuación

Probeta			Dimensiones					Nudosidad						Ataque Biológico			Propiedades								
N°	M	Clon	B	H	L	Med	A. P.	I. F.	K (TP)	K (TC)	KAR	KARM	KARMs	KARMi	Previo	Final	Pos	C.H.	$f_m$ sc	$f_m$	$E_g$	$E_1$	$E_{us}$	$E_v$	$\rho$
			mm	mm	mm				N/mm <sup>2</sup>	%	%	%	%	N/mm <sup>2</sup>	kg/m <sup>3</sup>										
586	6	S	107,7	23,2	414	N	21	0,037	0,00	0,00	-	-	-	-	3	3	-	12,2	57,74	39,8	9.102	-	-	-	437
587	6	S	108,4	22,5	414	N	21	0,041	0,75	0,75	-	-	-	-	3	3	-	12,4	48,53	33,2	8.357	-	-	-	467
588	6	S	109,2	23,2	414	S	14	0,061	0,19	0,19	-	-	-	-	1	1	-	12,0	37,03	25,5	7.162	-	-	8.550	385
589	6	S	109,7	23,0	414	N	15	0,04	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,6	57,47	39,5	8.246	-	-	-	394
590	6	S	107,8	22,8	414	N	21	0,021	0,00	0,00	-	-	-	-	3	3	-	13,5	47,18	32,4	9.516	-	-	-	393
591	6	S	109,4	22,7	414	S	25	0,027	0,39	0,39	-	-	-	-	1	1	-	13,4	49,95	34,2	9.979	-	-	9.779	481
592	6	S	109,0	23,2	414	N	15	0,04	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,5	70,07	48,2	12.976	-	-	-	473
593	6	S	107,7	22,8	414	N	17	0,042	0,44	0,44	-	-	-	-	1	1	-	13,3	52,94	36,3	10.093	-	-	-	437
594	6	S	111,3	23,2	414	S	14	0,076	0,00	0,00	-	-	-	-	2	2	-	12,7	50,8	35,0	8.053	-	-	8.787	430
595	6	S	111,8	22,9	414	N	16	0,076	0,99	0,99	-	-	-	-	1	1	-	13,3	45,48	31,2	7.550	-	-	9.007	447
596	6	S	109,6	23,2	414	N	21	0,092	0,16	0,16	-	-	-	-	1	1	-	12,0	39,65	27,3	8.437	-	-	-	414
597	6	S	112,0	22,4	414	S	16	0,075	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,5	45,18	30,9	9.561	-	-	13.547	434
598	6	S	109,0	22,7	414	S	12	0,054	0,50	0,50	-	-	-	-	1	1	-	12,6	48,66	33,4	9.432	-	-	-	447
599	6	S	109,2	23,0	414	N	24	0,058	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,4	54,79	37,6	10.899	-	-	-	438
600	6	S	109,4	23,3	414	N	15	0,069	0,00	0,00	-	-	-	-	3	3	-	11,8	43,22	29,8	10.415	-	-	-	437
601	6	S	109,6	23,1	414	N	24	0,068	0,15	0,15	-	-	-	-	1	1	-	12,5	46,92	32,3	11.142	-	-	-	449
602	6	S	108,9	23,3	414	N	19	0,067	0,17	0,17	-	-	-	-	1	1	-	12,3	42,57	29,3	9.715	-	-	-	457
603	6	S	107,6	22,5	414	N	25	0,081	0,34	0,34	-	-	-	-	1	1	-	12,3	57,74	39,5	9.142	-	-	-	536
604	6	S	107,5	21,9	414	S	10	0,067	0,55	0,55	-	-	-	-	2	2	-	12,8	54,69	37,2	9.285	-	-	9.978	456
605	6	S	110,6	22,9	414	S	14	0,049	0,39	0,39	-	-	-	-	1	1	-	12,7	37,7	25,9	8.611	-	-	10.402	459
606	6	S	110,7	23,1	414	S	23	0,046	0,43	0,43	-	-	-	-	1	1	-	12,0	35,99	24,8	7.819	-	-	-	461
607	6	S	110,1	22,4	414	N	11	0,048	0,32	0,32	-	-	-	-	1	1	-	12,4	43,6	29,8	10.093	-	-	-	413
608	6	S	110,2	22,6	414	S	15	0,01	0,46	0,46	-	-	-	-	1	1	-	12,5	48,9	33,5	7.538	-	-	-	404
609	6	S	110,4	22,9	414	N	19	0,04	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,4	47,16	32,4	7.888	-	-	8.501	386
610	6	S	109,4	22,9	414	S	12	0,055	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,1	42,59	29,3	7.909	-	-	9.419	402
611	6	S	110,1	23,2	414	S	14	0,027	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,4	61,98	42,7	11.634	-	-	9.319	502
612	6	S	108,4	23,0	414	S	10	0,041	0,38	0,38	-	-	-	-	1	1	-	12,9	52,75	36,3	9.373	-	-	-	508
613	6	S	107,1	22,6	414	S	18	0,045	0,16	0,16	-	-	-	-	1	1	-	13,1	54,68	37,4	10.329	-	-	-	503
614	6	S	108,7	22,9	414	S	14	0,063	1,00	1,00	-	-	-	-	1	1	-	13,4	48,53	33,3	8.204	-	-	9.256	519
615	6	S	109,7	22,4	414	S	18	0,045	0,10	0,10	-	-	-	-	1	1	-	12,5	38,18	26,1	8.105	-	-	-	390
616	6	S	109,3	22,8	414	N	15	0,044	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	11,8	50,71	34,8	10.106	-	-	-	422
617	6	S	108,8	23,2	414	N	17	0,035	0,18	0,18	-	-	-	-	1	1	-	12,6	70,99	48,9	12.563	-	-	-	517
618	6	S	108,7	23,0	414	N	18	0,051	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,5	62,76	43,2	9.676	-	-	-	460
619	6	S	109,2	23,4	414	N	15	0,037	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,4	60,11	41,5	9.558	-	-	-	432
620	6	S	108,0	23,2	414	N	13	0,007	0,32	0,32	-	-	-	-	1	1	-	12,2	71,62	49,3	11.296	-	-	-	571
621	6	S	108,8	22,7	414	N	13	0,041	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,4	74,59	51,1	14.232	-	-	-	510
622	6	S	108,5	23,2	414	N	11	0,04	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,5	71,58	49,3	13.038	-	-	-	518
623	6	S	108,4	22,5	414	N	19	0,012	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,1	75,99	52,0	13.276	-	-	-	499
624	6	S	107,2	23,4	414	N	12	0,041	0,64	0,64	-	-	-	-	1	1	-	12,8	70,9	48,9	13.441	-	-	-	544
625	6	S	107,3	23,4	414	N	14	0,042	0,17	0,17	-	-	-	-	1	1	-	13,4	70,72	48,8	13.892	-	-	14.273	555
626	6	S	108,1	23,1	414	N	19	0,01	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,6	62,08	42,7	10.694	-	-	-	564
627	6	S	107,5	22,4	414	N	15	0,042	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,5	65,17	44,6	12.562	-	-	-	544
628	6	S	107,6	22,0	414	N	15	0,055	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,8	68,96	47,0	9.820	-	-	-	540
629	6	S	108,6	21,7	414	N	20	0,04	0,27	0,27	-	-	-	-	1	1	-	12,0	53,57	36,4	9.099	-	-	-	539
630	6	S	108,8	23,0	414	N	13	0,031	0,37	0,37	-	-	-	-	2	2	-	12,9	59,67	41,0	9.728	-	-	12.495	479
631	6	S	100,0	23,2	414	N	14	0,061	0,40	0,40	-	-	-	-	1	1	-	12,5	41,71	28,7	8.250	-	-	9.959	477
632	6	S	112,5	23,2	414	N	9	0,051	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,8	51,44	35,4	10.150	-	-	12.186	491
633	6	S	108,7	22,6	414	S	24	0,022	0,15	0,15	-	-	-	-	1	1	-	11,8	31,64	21,7	8.113	-	-	-	413
634	6	S	109,6	22,9	414	N	11	0,066	0,44	0,44	-	-	-	-	1	1	-	13,8	56,6	38,9	11.813	-	-	12.330	510
635	6	S	108,1	23,0	414	N	19	0,024	0,19	0,19	-	-	-	-	1	1	-	13,1	71	48,8	11.728	-	-	12.618	520
636	6	S	107,1	23,0	414	N	20	0,029	0,18	0,18	-	-	-	-	1	1	-	12,5	63,45	43,6	9.973	-	-	-	440
637	6	S	108,1	23,3	414	N	14	0,039	0,31	0,31	-	-	-	-	1	1	-	12,8	50,49	34,8	8.438	-	-	-	458
638	6	S	107,6	23,2	414	N	17	0,031	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,5	68,18	46,9	10.301	-	-	-	448
639	6	S	103,1	22,4	414	N	23	0,041	0,54	0,54	-	-	-	-	1	1	-	12,0	58,2	39,8	10.449	-	-	10.836	488
640	6	S	108,4	22,6	414	N	27	0,072	0,10	0,10	-	-	-	-	1	1	-	12,8	59,97	41,1	13.180	-	-	-	444
641	6	S	109,9	22,8	414	S	14	0,048	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,6	48,9	33,6	8.078	-	-	-	390
642	6	S	109,2	22,7	414	S	19	0,033	0,47	0,47	-	-	-	-	1	1	-	12,8	39,3	26,9	7.105	-	-	8.128	393
643	6	S	107,5	22,9	414	N	14	0,051	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,9	33,78	23,2	9.327	-	-	-	427
644	6	S	107,2	22,6	414	S	15	0,006	0,12	0,12	-	-	-	-	1	1	-	12,8	64,22	44,0	9.518	-	-	10.873	503
645	6	S	109,9	22,9	414	S	17	0,037	0,22	0,22	-	-	-	-	1	1	-	13,0	56,31	38,7	10.259	-	-	-	478
646	6	S	110,8	22,9	414	N	19	0,043	0,27	0,27	-	-	-	-	1	1	-	13,0	62,4	42,9	12.279	-	-	11.056	463
647	6	S	111,0	23,0	4																				

Anexo II  
Bases de datos del trabajo experimental

Tabla II.1: Datos experimentales de los ensayos de flexión. Continuación

Probeta		Dimensiones						Nudosidad						Ataque Biológico			Propiedades								
Nº	M	Clon	B	H	L	Med	A. P.	I. F.	K (TP)	K (TC)	KAR	KARM	KARMs	KARMi	Previo	Final	Pos	C.H.	$f_m$ sc	$f_m$	$E_g$	$E_1$	$E_{us}$	$E_v$	$\rho$
			mm	mm	mm													%	N/mm <sup>2</sup>	kg/m <sup>3</sup>					
651	6	S	110,8	23,1	414	N	16	0,066	1,00	1,00	-	-	-	-	1	1	-	12,5	58,54	40,3	9,933	-	-	-	492
652	6	S	107,6	23,2	414	N	25	0,045	0,49	0,49	-	-	-	-	1	1	-	13,1	47	32,4	9,967	-	-	-	495
653	6	S	107,4	22,9	414	N	14	0,026	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,9	51,5	35,4	11,975	-	-	-	488
654	6	S	107,7	23,0	414	N	14	0,06	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,4	41,16	28,3	10,935	-	-	-	484
655	6	S	109,9	22,6	414	S	17	0,018	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,2	65,41	44,8	11,815	-	-	-	536
656	6	S	109,6	22,9	414	N	11	0,043	0,11	0,11	-	-	-	-	1	1	-	13,8	50,57	34,7	9,750	-	-	-	499
657	6	S	110,1	23,1	414	S	19	0,042	0,74	0,74	-	-	-	-	1	1	-	13,8	48,6	33,4	8,148	-	-	-	513
658	6	S	108,2	22,9	414	N	19	0,023	0,13	0,13	-	-	-	-	1	1	-	13,1	53,18	36,5	10,100	-	-	-	509
659	6	S	107,3	22,9	414	N	16	0,034	0,54	0,54	-	-	-	-	3	3	-	13,0	42,98	29,5	7,998	-	-	-	480
660	6	S	108,9	22,9	414	S	10	0,072	0,66	0,66	-	-	-	-	1	1	-	13,9	49,98	34,3	9,792	-	-	-	467
661	6	S	107,3	22,0	414	N	11	0,047	0,43	0,43	-	-	-	-	1	1	-	12,5	54,78	37,3	11,067	-	-	-	489
662	6	S	107,7	23,6	414	S	17	0,069	0,12	0,12	-	-	-	-	1	1	-	12,8	49,65	34,3	10,330	-	-	-	473
663	6	S	108,1	23,0	414	N	12	0,038	0,23	0,23	-	-	-	-	1	1	-	13,0	53,05	36,5	10,231	-	-	-	453
664	6	S	112,1	23,1	414	N	15	0,029	0,45	0,45	-	-	-	-	1	1	-	12,8	44,17	30,4	6,794	-	-	-	443
665	6	S	108,2	23,4	414	N	13	0,043	0,50	0,50	-	-	-	-	1	1	-	13,8	30,42	21,0	7,280	-	-	-	498
666	6	S	109,6	22,8	414	N	20	0,043	0,83	0,83	-	-	-	-	1	1	-	13,3	52,94	36,3	9,164	-	-	-	468
667	6	S	98,2	23,0	414	S	14	0,039	0,42	0,42	-	-	-	-	1	1	-	13,1	58,55	40,3	9,785	-	-	-	525
668	6	S	109,6	23,4	414	S	15	0,045	0,47	0,47	-	-	-	-	1	1	-	13,8	55,25	38,1	9,643	-	-	-	525
669	6	S	109,4	22,9	414	S	12	0,064	0,21	0,21	-	-	-	-	1	1	-	13,0	36,79	25,3	8,771	-	-	-	417
670	6	S	110,0	23,0	414	S	13	0,049	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,7	36,31	25,0	8,976	-	-	-	431
671	6	S	108,4	23,5	414	S	13	0,028	0,94	0,94	-	-	-	-	1	1	-	12,4	50,42	34,8	8,135	-	-	-	495
672	6	S	101,2	22,9	414	S	19	0,032	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,0	55,16	37,9	9,746	-	-	-	511
673	6	S	110,7	22,6	414	S	10	0,069	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	13,2	46,91	32,1	8,505	-	-	-	472
674	6	S	109,9	23,1	414	N	14	0,065	0,39	0,39	-	-	-	-	1	1	-	13,7	51,19	35,2	10,890	-	-	-	497
675	6	S	107,8	23,7	414	N	15	0,038	0,93	0,93	-	-	-	-	1	1	-	12,7	38,1	26,3	6,523	-	-	-	440
676	6	S	105,3	22,8	414	N	17	0,058	0,13	0,13	-	-	-	-	1	1	-	12,9	54	37,1	11,845	-	-	-	430
677	6	S	108,6	23,0	414	N	8	0,076	0,99	0,99	-	-	-	-	1	1	-	12,7	54,31	37,3	10,196	-	-	-	530
678	6	S	112,0	23,5	414	N	5	0,081	0,52	0,52	-	-	-	-	1	1	-	13,4	28,52	19,7	4,633	-	-	-	530
679	7	S	47,8	80,0	1440	S	-	0,072	0,31	0,15	-	-	-	-	3	3	E	11,9	33,76	29,8	11,721	12,205	13,412	12,351	436
680	7	S	47,2	80,2	1440	S	-	0,088	0,59	0,59	-	-	-	-	1	1	C	12,6	38,61	34,1	10,765	11,967	13,989	13,333	464
681	7	S	47,7	79,9	1440	S	-	0,073	0,29	0,29	-	-	-	-	3	3	E	13,3	62,51	55,1	11,637	12,924	14,125	14,002	483
682	7	S	47,5	79,6	1440	N	-	0,066	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,0	59,3	52,3	13,145	16,451	14,763	14,235	498
683	7	S	47,8	80,0	1440	N	-	0,052	0,30	0,30	-	-	-	-	3	4	C	12,2	21,71	19,1	8,243	8,624	9,264	8,983	377
684	7	S	47,7	79,7	1440	N	-	0,074	0,88	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,5	28,05	24,7	9,991	12,078	13,703	12,183	484
685	7	S	47,5	79,8	1440	N	-	0,03	0,00	0,00	-	-	-	-	2	2	C	13,4	72,1	63,5	13,653	14,997	15,425	10,880	602
686	7	S	47,7	80,2	1440	N	-	0,036	0,31	0,31	-	-	-	-	1	1	-	12,7	57,84	51,0	11,707	12,739	13,484	12,825	487
687	7	S	47,4	79,9	1440	S	-	0,053	0,36	0,36	-	-	-	-	1	1	-	13,0	27,44	24,2	10,228	9,844	11,543	11,090	423
688	7	S	48,0	80,7	1440	N	-	0,079	0,79	0,20	-	-	-	-	1	1	-	12,4	31,53	27,9	10,206	13,525	14,605	13,269	543
689	7	S	47,3	78,5	1440	N	-	0,04	0,29	0,29	-	-	-	-	2	2	C	12,4	40,07	35,2	12,405	14,250	14,018	13,808	498
690	7	S	47,6	80,2	1440	N	-	0,083	0,14	0,14	-	-	-	-	3	3	E	12,4	28,83	25,4	11,123	12,153	12,325	11,998	420
691	7	S	47,2	79,5	1440	N	-	0,016	0,15	0,15	-	-	-	-	3	3	C	14,0	65,25	57,5	12,310	13,311	12,828	12,410	458
692	7	S	47,8	79,7	1440	S	-	0,026	0,50	0,50	-	-	-	-	1	1	-	14,1	29,25	25,8	10,820	11,278	12,058	11,616	418
693	7	S	47,6	80,2	1440	N	-	0,028	0,59	0,59	-	-	-	-	1	1	-	12,6	39,02	34,4	10,223	7,802	14,385	12,416	499
694	7	S	47,7	79,3	1440	S	-	0,042	0,34	0,34	-	-	-	-	3	3	E	13,2	55,54	48,9	13,722	13,907	15,320	15,224	501
695	7	S	48,1	79,2	1440	S	-	0,045	0,33	0,33	-	-	-	-	2	2	C	14,1	36,06	31,7	10,190	11,316	11,772	10,754	400
696	7	S	47,4	79,2	1440	N	-	0,043	0,61	0,61	-	-	-	-	1	1	-	13,4	50,19	44,2	11,238	13,040	14,554	14,277	497
697	7	S	47,3	79,6	1440	S	-	0,054	0,06	0,06	-	-	-	-	3	3	C	12,7	54,48	48,0	9,913	15,244	12,293	11,810	419
698	7	S	47,8	81,8	1440	S	-	0,031	0,71	0,71	-	-	-	-	1	1	-	12,0	25,1	22,2	9,432	13,775	13,594	12,779	562
699	7	S	47,7	80,5	1440	N	-	0,038	0,52	0,52	-	-	-	-	1	1	-	12,2	46,93	41,4	12,155	11,690	15,977	15,570	510
700	7	S	47,5	80,5	1440	S	-	0,049	0,51	0,51	-	-	-	-	1	1	-	12,2	36,85	32,5	11,301	11,745	14,950	13,563	539
701	7	S	47,5	79,3	1440	S	-	0,037	0,50	0,50	-	-	-	-	1	1	-	12,2	51,81	45,6	10,764	10,374	13,808	12,090	494
702	7	S	47,4	79,8	1440	N	-	0,065	0,85	0,85	-	-	-	-	1	1	-	13,0	26,19	23,1	7,609	5,849	14,104	10,147	527
703	7	S	47,6	80,1	1440	S	-	0,035	0,50	0,19	-	-	-	-	1	1	-	12,1	46,7	41,2	11,784	14,350	14,471	13,486	502
704	7	S	47,3	79,8	1440	N	-	0,025	0,16	0,16	-	-	-	-	2	2	E	12,2	57,53	50,7	12,324	13,466	14,320	14,384	462
705	7	S	47,2	79,7	1440	S	-	0,043	0,43	0,43	-	-	-	-	1	1	-	12,8	48,51	42,7	12,223	13,197	13,201	12,125	491
706	7	S	47,0	79,8	1440	S	-	0,044	0,39	0,39	-	-	-	-	1	1	-	12,0	29,18	25,7	9,690	8,493	10,326	9,327	407
707	7	S	48,0	80,2	1440	N	-	0,023	0,12	0,00	-	-	-	-	3	3	C	12,4	59,73	52,7	11,057	11,814	12,626	12,386	414
708	7	S	47,9	79,9	1440	N	-	0,031	0,48	0,48	-	-	-	-	3	3	C	12,8	42,91	37,8	10,752	11,249	11,982	11,339	408
709	7	S	47,6	79,3	1440	S	-	0,043	0,71	0,71	-	-	-	-	3	3	E	12,5	40,77	35,9	11,257	12,979	15,190	12,526	520
710	7	S	47,7	79,4	1440	N	-	0,065	0,63																

Anexo II  
Bases de datos del trabajo experimental

Tabla II.1: Datos experimentales de los ensayos de flexión. Continuación

Probeta		Dimensiones						Nudosidad						Ataque Biológico			Propiedades									
N°	M	Clon	B	H	L	Med	A. P.	I. F.	K (TP)	K (TC)	KAR	KARM	KARMs	KARMi	Previo	Final	Pos	C.H.	$f_{ms}$	$f_m$	$E_g$	$E_1$	$E_{us}$	$E_v$	$\rho$	
			mm	mm	mm				N/mm <sup>2</sup>	%			%	N/mm <sup>2</sup>	kg/m <sup>3</sup>											
716	7	S	47,7	80,4	1440	N	-	0,05	0,30	0,30	-	-	-	-	1	1	-	14,1	38	33,6	12.136	11.063	16.371	14.771	498	
717	7	S	47,3	80,2	1440	S	-	0,054	0,27	0,27	-	-	-	-	3	4	C	12,6	37,63	33,2	9.989	14.310	11.690	11.216	415	
718	7	S	47,6	79,3	1440	N	-	0,053	0,38	0,38	-	-	-	-	3	3	C	12,8	49,43	43,5	12.464	13.063	16.061	15.045	514	
719	7	S	47,5	79,9	1440	N	-	0,069	0,21	0,21	-	-	-	-	1	1	-	12,6	43,66	38,5	10.617	12.011	12.025	11.835	400	
720	7	S	47,3	79,1	1440	S	-	0,029	0,23	0,23	-	-	-	-	3	3	E	12,7	54,64	48,1	10.605	11.117	13.041	12.352	429	
721	7	S	47,4	79,2	1440	S	-	0,077	0,21	0,21	-	-	-	-	3	4	C	12,0	19,47	17,1	8.801	9.179	10.984	10.317	390	
722	7	S	47,6	79,9	1440	N	-	0,041	0,33	0,33	-	-	-	-	1	1	-	14,4	55,09	48,6	13.299	14.692	17.967	17.622	565	
723	7	S	47,3	79,4	1440	S	-	0,047	0,35	0,35	-	-	-	-	3	3	C	13,1	36,84	32,4	9.917	10.561	12.318	10.929	415	
724	7	S	47,3	79,7	1440	S	-	0,034	0,40	0,40	-	-	-	-	1	1	-	12,9	47,22	41,6	12.077	13.128	15.049	13.077	547	
725	7	S	47,4	79,8	1440	N	-	0,049	0,44	0,44	-	-	-	-	1	1	-	12,9	52,71	46,5	11.559	13.534	13.412	13.119	423	
726	7	S	47,6	80,9	1440	N	-	0,019	0,31	0,31	-	-	-	-	1	1	-	14,7	36,64	32,4	9.158	8.897	10.295	9.555	406	
727	7	S	47,3	79,4	1440	N	-	0,035	0,15	0,15	-	-	-	-	1	1	-	11,9	58,29	51,3	11.842	12.594	13.539	13.138	448	
728	7	S	47,6	79,8	1440	N	-	0,02	0,61	0,38	-	-	-	-	1	1	-	12,4	59,72	52,6	12.211	14.009	14.882	12.445	528	
729	7	S	47,5	80,0	1440	S	-	0,043	0,36	0,36	-	-	-	-	1	1	-	12,3	59,57	52,5	12.696	13.158	13.838	13.104	514	
730	7	S	47,5	80,4	1440	N	-	0,039	0,21	0,21	-	-	-	-	1	1	-	14,0	69,47	61,3	14.042	13.955	16.524	16.021	509	
731	8	S	22,6	107,0	1854	N	11	0,076	0,33	0,33	-	-	-	-	3	3	C	13,5	40,71	38,1	10.715	11.059	-	-	405	
732	8	S	23,1	105,2	1854	N	13	0,076	0,43	0,43	-	-	-	-	1	1	-	13,3	48,86	45,5	13.801	14.252	-	-	513	
733	8	S	23,0	106,2	1854	N	23	0,062	0,18	0,00	-	-	-	-	1	1	-	11,8	52,41	48,9	14.008	15.666	-	-	522	
734	8	S	23,3	108,2	1854	N	18	0,036	0,61	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,2	31,31	29,3	11.863	16.549	-	-	439	
735	8	S	22,7	109,4	1854	S	14	0,07	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	12,2	39,25	36,9	12.971	15.685	-	-	465	
736	8	S	22,9	107,5	1854	N	13	0,053	0,26	0,26	-	-	-	-	2	2	E	12,5	38,37	35,9	13.692	15.620	-	-	461	
737	8	S	23,2	104,9	1854	N	18	0,013	0,00	0,00	-	-	-	-	2	2	C	12,4	47,07	43,8	12.149	14.825	-	-	441	
738	8	S	23,1	107,8	1854	S	11	0,063	0,26	0,26	-	-	-	-	1	1	-	11,9	38,94	36,5	13.266	14.186	-	-	539	
739	8	S	23,1	107,7	1854	N	12	0,053	0,20	0,20	-	-	-	-	1	1	-	13,6	38,63	36,2	11.290	12.494	-	-	397	
740	8	S	22,2	109,7	1854	S	25	0,065	0,23	0,15	-	-	-	-	1	1	-	12,3	40,76	38,3	12.102	12.564	-	-	441	
741	8	S	22,7	106,5	1854	N	13	0,022	0,28	0,28	-	-	-	-	2	2	C	12,1	45,42	42,4	13.136	14.177	-	-	483	
742	8	S	23,1	107,9	1854	S	16	0,057	0,36	0,36	-	-	-	-	1	1	-	12,6	39,76	37,2	10.178	11.332	-	-	430	
743	8	S	23,0	107,8	1854	N	10	0,047	0,00	0,00	-	-	-	-	3	3	C	12,4	35,68	33,4	10.950	11.389	-	-	404	
744	8	S	22,9	108,5	1854	N	24	0,043	0,44	0,00	-	-	-	-	2	2	E	12,2	44,28	41,5	12.651	12.496	-	-	458	
745	8	S	22,7	107,8	1854	N	13	0,033	0,42	0,42	-	-	-	-	1	1	-	12,0	32,12	30,1	10.834	8.911	-	-	506	
746	8	S	22,6	106,8	1854	N	22	0,033	0,32	0,32	-	-	-	-	1	1	-	11,9	30,86	28,8	13.153	13.444	-	-	499	
747	8	S	23,0	108,4	1854	N	13	0,047	0,45	0,00	-	-	-	-	1	1	-	11,3	49,69	46,6	14.913	16.892	-	-	446	
748	8	S	22,3	110,3	1854	S	14	0,057	0,63	0,00	-	-	-	-	3	3	E	11,7	16,63	15,6	11.968	13.242	-	-	445	
749	8	S	23,0	109,0	1854	N	11	0,075	1,00	1,00	-	-	-	-	2	2	C	11,8	43,09	40,4	12.488	14.546	-	-	478	
750	8	S	22,7	107,1	1854	N	12	0,046	0,12	0,00	-	-	-	-	3	3	C	12,1	42,72	39,9	12.709	14.398	-	-	427	
751	8	S	22,8	107,1	1854	N	14	0,026	0,15	0,15	-	-	-	-	1	1	-	12,2	53,18	49,7	14.566	16.915	-	-	499	
752	8	S	22,0	107,8	1854	S	12	0,092	0,48	0,18	-	-	-	-	1	1	-	12,4	26,28	24,6	14.174	18.992	-	-	524	
753	8	S	23,2	107,0	1854	N	16	0,038	0,95	0,00	-	-	-	-	1	1	-	11,7	52,18	48,8	12.105	12.608	-	-	496	
754	8	S	22,9	104,8	1854	N	19	0,035	0,17	0,00	-	-	-	-	1	1	-	11,2	52	48,4	10.993	12.202	-	-	417	
755	8	S	23,8	104,1	1854	S	9	0,079	0,53	0,53	-	-	-	-	1	1	-	8,7	27,5	25,6	9.252	7.692	-	-	401	
756	8	S	24,3	103,8	1854	N	17	0,024	0,57	0,57	-	-	-	-	3	4	C	11,3	19,36	18,0	8.389	5.414	-	-	528	
757	8	S	24,0	103,6	1854	N	15	0,026	0,18	0,18	-	-	-	-	1	1	-	8,5	56,65	52,6	13.927	14.322	-	-	529	
758	8	S	23,6	103,8	1854	S	14	0,032	0,26	0,26	-	-	-	-	1	1	-	9,9	63,7	59,2	13.342	13.731	-	-	484	
759	8	S	23,1	103,7	1854	N	14	0,036	0,34	0,34	-	-	-	-	2	2	E	9,8	27,76	25,8	10.328	8.114	-	-	487	
760	8	S	23,5	103,9	1854	N	14	0,068	0,60	0,60	-	-	-	-	2	2	C	9,3	42,15	39,2	9.903	11.050	-	-	361	
761	8	S	24,1	104,2	1854	S	15	0,005	0,23	0,00	-	-	-	-	2	2	E	9,7	52,95	49,2	9.523	11.177	-	-	390	
762	8	S	24,5	104,2	1854	S	18	0,079	0,33	0,33	-	-	-	-	1	1	-	9,8	28,47	26,5	10.918	11.018	-	-	536	
763	8	S	24,3	103,4	1854	N	11	0,033	0,13	0,13	-	-	-	-	2	2	E	9,9	51,46	47,8	9.901	10.331	-	-	381	
764	8	S	23,5	103,5	1854	N	9	0,012	0,08	0,08	-	-	-	-	2	2	C	9,4	51,46	47,8	11.073	12.104	-	-	455	
765	8	S	24,1	103,7	1854	N	11	0,034	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	10,1	64,75	60,2	14.214	11.710	-	-	522	
766	8	S	24,2	104,3	1854	S	14	0,031	0,35	0,35	-	-	-	-	2	2	C	10,3	43,77	40,7	9.563	9.021	-	-	375	
767	8	S	24,1	103,2	1854	N	23	0,038	0,33	0,33	-	-	-	-	2	2	C	10,2	52,25	48,5	12.155	14.062	-	-	440	
768	8	S	24,3	104,2	1854	S	17	0,073	0,00	0,00	-	-	-	-	3	4	E	10,4	23,01	21,4	10.743	11.822	-	-	488	
769	8	S	24,1	103,7	1854	N	18	0,05	0,20	0,20	-	-	-	-	2	2	E	10,1	29,77	27,7	10.299	9.614	-	-	412	
770	8	S	24,4	103,6	1854	N	14	0,031	0,00	0,00	-	-	-	-	1	1	-	10,5	49,5	46,0	10.219	9.136	-	-	419	
771	8	S	24,1	103,7	1854	S	17	0,056	0,75	0,00	-	-	-	-	1	1	-	10,1	40,99	38,1	10.699	11.395	-	-	448	
772	8	S	24,3	103,7	1854	S	21	0,033	0,00	0,00	-	-	-	-	2	2	E	10,2	50,67	47,1	9.739	9.126	-	-	408	
773	8	S	24,3	104,0	1854	N	17	0,069	0,13	0,18	-	-	-	-	2	2	C	9,3	53,55	49,8	13.687	13.694	-	-	495	
774	8	S	24,2	104,0	1854	N	14	0,067	0,13	0,13	-	-	-	-	2	2	C	10,2	46,34	43,1	10.039	8				

Anexo II  
Bases de datos del trabajo experimental

Tabla II.1: Datos experimentales de los ensayos de flexión. Continuación

Probeta		Dimensiones						Nudosidad						Ataque Biológico			Propiedades									
Nº	M	Clon	B	H	L	Med	A. P.	I. F.	K (TP)	K (TC)	KAR	KARM	KARMs	KARMi	Previo	Final	Pos	C.H.	$f_m$ sc	$f_m$	$E_g$	$E_1$	$E_{us}$	$E_v$	$\rho$	
			mm	mm	mm				N/mm <sup>2</sup>	%			%	N/mm <sup>2</sup>	kg/m <sup>3</sup>											
781	8	S	24,1	103,6	1854	N	20	0,098	0,22	0,22	-	-	-	-	2	2	C	11,1	30,75	28,6	11,611	9,873	-	-	441	
782	8	S	24,6	103,3	1854	N	13	0,074	0,34	0,34	-	-	-	-	1	1	-	11,0	28	26,0	11,218	10,082	-	-	522	
783	9	S	46,9	101,5	1800	N	-	0,074	0,43	0,43	0,146	0,174	0,000	0,348	2	2	E	14,4	29,03	26,9	10,267	10,630	12,290	9,825	422	
784	9	S	47,4	100,4	1800	N	-	0,055	0,42	0,42	0,101	0,155	0,000	0,311	1	1	-	13,3	27,67	25,5	11,732	9,718	15,550	14,040	498	
785	9	S	47,4	101,5	1800	S	-	0,028	0,32	0,32	0,122	0,134	0,004	0,264	3	3	E	12,3	57,33	53,0	13,337	15,710	14,534	14,144	509	
786	9	S	46,2	101,2	1800	S	-	0,069	0,35	0,35	0,138	0,241	0,000	0,483	3	3	E	12,8	25,21	23,3	9,555	11,233	12,814	12,196	497	
787	9	S	47,6	100,3	1800	S	-	0,042	0,26	0,26	0,131	0,256	0,000	0,511	3	3	E	12,7	46,51	42,9	12,082	13,856	14,348	13,263	488	
788	9	S	47,5	100,4	1800	N	-	0,059	0,48	0,48	0,192	0,062	0,000	0,125	3	4	C	13,8	21,4	19,8	11,472	11,817	13,168	12,294	441	
789	9	S	47,1	99,8	1800	S	-	0,036	0,42	0,42	0,267	0,260	0,000	0,519	2	2	C	13,6	48,04	44,3	12,279	14,190	15,164	13,708	533	
790	9	S	47,1	101,1	1800	S	-	0,01	0,66	0,66	0,025	0,228	0,456	0,000	1	1	-	14,7	49,86	46,1	11,794	13,179	13,880	13,298	436	
791	9	S	47,0	100,6	1800	S	-	0,037	0,26	0,26	0,033	0,063	0,127	0,000	1	1	-	14,8	52,31	48,3	11,885	12,459	14,109	13,413	484	
792	9	S	46,9	100,5	1800	S	-	0,015	0,38	0,38	0,107	0,150	0,000	0,299	1	1	-	15,3	52,59	48,6	10,929	12,396	13,271	13,138	433	
793	9	S	47,4	100,3	1800	S	-	0,039	0,49	0,49	0,133	0,069	0,000	0,137	1	1	-	14,9	49,45	45,6	11,757	12,622	13,351	12,946	427	
794	9	S	47,5	100,4	1800	S	-	0,068	0,42	0,42	0,010	0,004	0,007	0,001	2	2	E	14,6	50,74	46,8	12,333	13,386	13,559	12,161	474	
795	9	S	45,8	100,9	1800	S	-	0,053	0,37	0,37	0,134	0,158	0,003	0,293	1	1	-	15,1	43,35	40,1	10,902	12,170	13,218	11,827	460	
796	9	S	46,9	100,8	1800	S	-	0,068	0,47	0,47	0,207	0,069	0,000	0,137	1	1	-	13,7	36,67	33,9	10,724	10,194	15,965	13,385	528	
797	9	S	46,0	99,8	1800	S	-	0,063	0,52	0,52	0,161	0,184	0,000	0,368	2	2	E	13,5	52,84	48,7	11,522	13,499	11,497	11,343	433	
798	9	S	47,1	100,8	1800	S	-	0,074	0,42	0,42	0,085	0,030	0,000	0,059	3	4	C	13,6	17,95	16,6	10,999	12,072	13,204	12,207	439	
799	9	S	46,9	100,5	1800	N	-	0,039	0,45	0,45	0,17	0,083	0,084	0,000	0,168	1	1	-	13,8	53,9	49,8	11,095	11,922	11,571	11,244	393
800	9	S	47,4	101,1	1800	S	-	0,049	0,38	0,38	0,35	0,050	0,000	0,000	0,000	3	4	C	13,5	35,16	32,5	11,313	12,473	14,039	13,854	473
801	9	S	47,1	100,9	1800	N	-	0,068	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	1	1	-	13,5	46,05	42,5	14,032	13,837	13,614	13,062	455	
802	9	S	47,2	100,7	1800	S	-	0,065	0,32	0,32	0,362	0,310	0,014	0,606	2	2	C	13,6	45,01	41,6	12,542	14,591	14,076	12,833	519	
803	9	S	46,8	101,1	1800	S	-	0,08	0,53	0,53	0,068	0,108	0,000	0,217	2	2	C	13,6	26,31	24,3	11,780	13,094	-	-	460	
804	9	S	47,2	101,4	1800	S	-	0,078	0,55	0,55	0,000	0,000	0,000	0,000	2	2	C	13,0	27,54	25,5	12,018	13,617	13,043	11,936	449	
805	9	S	46,9	101,6	1800	N	-	0,059	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	3	3	C	13,4	51,87	48,0	12,534	13,733	12,549	11,979	433	
806	9	S	45,9	100,0	1800	S	-	0,03	0,45	0,45	0,028	0,003	0,005	0,000	2	2	E	13,6	51,39	47,4	11,788	13,282	13,697	12,546	457	
807	9	S	47,1	101,0	1800	S	-	0,059	0,54	0,54	0,272	0,065	0,000	0,130	2	2	E	13,8	47,01	43,4	10,811	11,596	12,547	11,825	420	
808	9	S	47,7	101,0	1800	S	-	0,07	0,44	0,44	0,20	0,169	0,000	0,000	3	3	C	13,7	37,93	35,1	12,714	14,570	14,757	14,326	493	
809	9	S	48,1	101,8	1800	S	-	0,069	0,42	0,42	0,09	0,085	0,154	0,308	0,000	3	3	C	13,7	29,32	27,1	11,329	11,777	11,016	10,874	420
810	9	S	47,7	101,0	1800	S	-	0,037	0,34	0,34	0,091	0,129	0,000	0,258	1	1	-	13,5	44,48	41,1	11,030	11,931	11,546	11,274	392	
811	9	S	46,9	101,1	1800	S	-	0,042	0,49	0,49	0,130	0,000	0,000	0,000	3	3	C	13,6	38,68	35,7	11,283	12,452	11,683	11,246	401	
812	9	S	48,0	101,4	1800	S	-	0,025	0,28	0,28	0,131	0,020	0,000	0,041	3	3	C	13,7	30,92	28,6	9,947	10,670	11,452	10,516	403	
813	9	S	47,3	100,7	1800	N	-	0,035	0,13	0,13	0,051	0,000	0,000	0,000	1	1	-	13,6	54,75	50,6	13,483	14,768	15,660	15,214	522	
814	9	S	47,6	100,0	1800	S	-	0,046	0,73	0,73	0,211	0,290	0,000	0,579	1	1	-	13,2	39,3	36,2	11,615	12,069	17,271	14,943	567	
815	9	S	47,6	100,8	1800	N	-	0,037	0,17	0,17	0,077	0,000	0,000	0,000	2	2	C	13,4	57,24	52,9	13,177	14,454	16,335	15,712	526	
816	9	S	47,5	101,7	1800	N	-	0,012	0,32	0,32	0,21	0,120	0,003	0,000	0,006	1	1	-	13,7	53,02	49,1	11,632	12,362	12,550	12,449	409
817	9	S	48,0	101,2	1800	S	-	0,04	0,37	0,37	0,24	0,064	0,000	0,000	3	4	C	13,1	16,94	15,7	10,829	11,341	12,191	11,849	434	
818	9	S	47,0	101,2	1800	S	-	0,034	0,18	0,18	0,053	0,000	0,000	0,000	1	1	-	13,3	62,24	57,5	13,456	14,622	13,909	13,931	473	
819	9	S	46,3	101,6	1800	N	-	0,012	0,30	0,30	0,19	0,205	0,398	0,796	0,000	1	1	-	13,2	59,07	54,6	10,884	12,912	13,652	13,244	473
820	9	S	47,2	100,4	1800	S	-	0,061	0,32	0,32	0,102	0,131	0,000	0,262	1	1	-	12,9	43,21	39,9	10,986	12,361	13,283	12,468	440	
821	9	S	47,7	100,3	1800	N	-	0,073	0,29	0,29	0,000	0,000	0,000	0,000	3	4	C	13,2	29,19	26,9	10,928	12,397	12,841	11,996	446	
822	9	S	46,6	100,9	1800	N	-	0,056	0,41	0,41	0,142	0,166	0,333	0,000	2	4	C	12,9	29,06	26,8	12,507	13,456	15,158	13,739	520	
823	9	S	47,6	100,7	1800	S	-	0,072	0,45	0,45	0,29	0,325	0,319	0,000	0,638	3	3	E	13,2	42,29	39,1	12,228	14,328	14,128	13,376	454
824	9	S	47,7	100,9	1800	S	-	0,055	0,52	0,52	0,201	0,182	0,000	0,364	1	1	-	13,1	22,07	20,4	9,663	10,282	16,622	13,966	546	
825	9	S	47,5	100,2	1800	S	-	0,031	0,16	0,16	0,00	0,000	0,000	0,000	2	2	E	13,0	66,01	60,9	13,504	16,523	15,512	16,128	508	
826	9	S	47,3	100,9	1800	S	-	0,055	0,32	0,32	0,14	0,044	0,088	0,000	0,175	3	3	E	13,4	28,24	26,1	11,668	12,680	14,029	13,148	458
827	9	S	47,4	101,0	1800	N	-	0,033	0,99	0,99	0,666	0,384	0,431	0,336	3	3	E	12,9	19,69	18,2	8,337	8,685	13,100	8,492	494	
828	9	S	47,6	100,4	1800	S	-	0,072	0,80	0,80	0,100	0,200	0,000	0,400	3	3	C	13,0	21,34	19,7	9,292	7,712	12,555	10,364	465	
829	9	S	47,2	100,9	1800	S	-	0,062	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	2	2	E	13,3	51,97	48,0	10,932	12,417	13,049	12,138	446	
830	9	S	47,1	100,6	1800	S	-	0,007	0,32	0,32	0,087	0,129	0,258	0,000	1	1	-	13,2	63,29	58,4	12,994	15,034	15,823	14,556	522	
831	9	S	47,5	100,8	1800	N	-	0,054	0,28	0,28	0,066	0,132	0,000	0,263	2	2	E	12,7	44,61	41,2	12,408	14,331	15,206	14,914	501	
832	9	S	47,6	101,1	1800	N	-	0,025	0,27	0,27	0,16	0,075	0,000	0,000	2	2	E</									

Anexo II  
Bases de datos del trabajo experimental

Tabla II.1: Datos experimentales de los ensayos de flexión. Continuación

Probeta		Dimensiones						Nudosidad						Ataque Biológico			C.H.	Propiedades							
N°	M	Clon	B	H	L	Med	A. P.	I. F.	K (TP)	K (TC)	KAR	KARM	KARMS	KARMI	Previo	Final		Pos	%	$f_{m\ sc}$	$f_m$	$E_g$	$E_l$	$E_{us}$	$E_v$
			mm	mm	mm														N/mm <sup>2</sup>	kg/m <sup>3</sup>					
846	10	S	43,9	151,0	2700	N	20	0,046	0,31	0,31	0,102	0,202	0,000	0,404	3	3	C	12,3	31,24	31,3	9,966	11,538	-	-	390
847	10	S	44,4	145,6	2700	N	16	0,068	0,32	0,32	0,302	0,423	0,000	0,846	2	2	C	12,2	38,7	38,5	11,863	12,202	13,576	12,945	466
848	10	S	44,4	150,4	2700	S	14	0,058	0,14	0,14	0,078	0,046	0,000	0,093	2	2	C	12,2	38,82	38,8	11,383	12,093	-	-	443
849	10	S	44,3	150,5	2700	S	19	0,074	0,50	0,50	0,638	0,649	0,666	0,631	3	3	C	12,1	23,48	23,5	10,609	10,830	-	-	436
850	10	S	43,1	145,9	2700	N	23	0,065	0,23	0,23	0,135	0,270	0,000	0,540	3	3	C	12,1	34,56	34,4	10,605	12,523	11,117	10,308	381
851	10	S	44,4	150,4	2700	N	13	0,05	0,19	0,19	0,288	0,560	0,925	0,195	3	3	C	12,1	41,46	41,5	11,348	13,064	12,588	11,739	405
852	10	S	43,2	150,4	2700	N	20	0,071	0,76	0,76	0,248	0,424	0,000	0,848	3	3	E	12,3	23,31	23,3	9,536	10,346	11,925	10,996	420
853	10	S	44,5	149,5	2700	N	14	0,084	0,23	0,23	0,263	0,000	0,000	0,000	2	2	C	11,9	49,26	49,2	13,192	14,299	13,122	12,607	432
854	10	S	44,5	149,9	2700	N	15	0,06	0,13	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	3	4	C	12,6	20,8	20,8	12,213	13,357	13,017	12,569	426
855	10	S	44,2	151,3	2700	S	18	0,078	0,68	0,26	0,099	0,145	0,000	0,289	3	3	C	12,6	16,16	16,2	9,941	11,653	11,664	10,588	414
856	10	S	43,5	150,6	2700	N	16	0,051	0,25	0,25	0,259	0,000	0,000	0,000	2	2	C	12,5	50,83	50,9	10,166	10,912	11,186	10,421	391
857	10	S	44,8	150,6	2700	N	11	0,053	0,17	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	2	2	E	12,5	55,08	55,1	12,464	14,283	13,882	13,518	443
858	10	S	41,7	150,0	2700	S	24	0,074	0,78	0,78	0,309	0,470	0,392	0,547	3	3	C	12,5	27,31	27,3	9,794	11,077	12,035	10,738	445
859	10	S	44,5	150,7	2700	S	15	0,03	0,45	0,27	0,343	0,313	0,129	0,497	2	2	E	12,5	33,03	33,1	10,193	10,957	13,741	11,866	457
860	10	S	45,0	146,8	2700	S	20	0,012	0,64	0,64	0,357	0,371	0,212	0,529	3	3	E	12,8	32	31,9	10,406	11,898	11,749	10,996	426
861	10	S	43,9	150,9	2700	N	18	0,02	0,30	0,23	0,298	0,458	0,000	0,916	3	3	C	12,4	23,39	23,4	10,197	11,567	12,360	12,899	424
862	10	S	42,7	150,6	2700	S	21	0,032	0,52	0,30	0,148	0,187	0,374	0,000	3	4	C	12,3	34,94	35,0	10,148	11,739	11,465	10,925	422
863	10	S	43,6	150,4	2700	N	12	0,052	0,29	0,21	0,000	0,000	0,000	0,000	2	2	C	12,4	30,1	30,1	12,596	14,435	14,810	13,778	489
864	10	S	43,0	147,9	2700	N	15	0,016	0,70	0,70	0,069	0,137	0,000	0,274	2	2	E	11,3	38,79	38,7	12,096	9,130	13,758	13,303	437
865	10	S	43,2	146,1	2700	N	19	0,022	0,31	0,31	0,150	0,301	0,000	0,602	3	4	C	12,8	17,23	17,1	10,950	11,593	-	-	396
866	10	S	43,1	145,3	2700	N	12	0,022	0,19	0,19	0,200	0,000	0,000	0,000	2	2	C	13,1	62,15	61,8	13,419	13,423	13,385	14,128	437
867	10	S	43,5	150,7	2700	N	18	0,006	0,30	0,30	0,271	0,084	0,000	0,168	3	3	E	12,4	35,96	36,0	9,860	8,720	11,885	11,343	409
868	10	S	44,8	154,7	2700	S	18	0,024	0,24	0,24	0,207	0,164	0,111	0,216	2	2	E	12,8	33,39	33,6	9,558	7,568	12,517	11,868	413
869	10	S	43,0	150,1	2700	S	14	0,068	0,37	0,37	0,060	0,119	0,238	0,000	3	4	C	12,2	19,91	19,9	10,482	11,350	12,199	10,953	417
870	10	S	44,9	148,0	2700	N	12	0,016	0,56	0,18	0,281	0,443	0,000	0,885	3	3	C	12,5	25,07	25,0	11,804	12,125	13,896	12,995	449
871	10	S	44,5	150,6	2700	N	10	0,058	0,18	0,18	0,171	0,000	0,000	0,000	2	2	C	12,2	43,02	43,1	11,460	12,592	13,125	11,953	415
872	10	S	43,4	150,3	2700	N	16	0,082	0,22	0,22	0,249	0,000	0,000	0,000	2	2	E	12,6	26,64	26,7	10,151	11,024	11,486	10,649	395
873	10	S	44,5	150,2	2700	S	14	0,002	0,27	0,27	0,296	0,045	0,000	0,090	1	1	-	12,3	49,96	50,0	11,037	11,724	12,930	11,269	407
874	10	S	44,5	150,4	2700	N	16	0,042	0,20	0,20	0,209	0,022	0,045	0,000	2	2	E	12,3	60,84	60,9	11,398	12,722	12,185	12,211	456
875	10	S	43,2	150,1	2700	N	13	0,012	0,42	0,42	0,397	0,285	0,000	0,571	2	2	E	11,9	36,48	36,5	11,693	12,558	14,433	13,425	462
876	10	S	44,5	150,3	2700	N	19	0,042	0,20	0,20	0,284	0,000	0,000	0,000	2	4	C	12,6	21,94	22,0	10,027	11,225	10,586	9,631	373
877	10	S	43,7	150,7	2700	N	16	0,04	0,94	0,94	0,197	0,340	0,000	0,681	2	2	C	11,4	35,77	35,8	9,720	8,469	13,266	12,145	414
878	10	S	44,3	150,2	2700	S	16	0,01	1,00	1,00	0,312	0,445	0,000	0,890	2	2	C	11,6	16,67	16,7	11,199	13,086	12,374	11,746	408
879	10	S	44,5	150,1	2700	S	14	0,006	0,20	0,20	0,252	0,093	0,186	0,000	2	2	C	13,7	48,3	48,3	10,977	12,494	13,576	12,396	407
880	10	S	43,2	150,2	2700	S	15	0,018	0,32	0,32	0,081	0,122	0,000	0,243	2	2	C	12,8	49,36	49,4	11,207	13,098	12,759	11,317	412
881	10	S	43,2	149,7	2700	N	13	0,002	0,32	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	1	1	-	13,6	62,05	62,0	13,106	15,484	14,214	14,505	478
882	10	S	42,9	150,0	2700	N	17	0,008	0,42	0,42	0,327	0,460	0,000	0,919	3	3	C	11,5	21,01	21,0	9,466	10,838	11,630	10,180	412
883	10	S	44,0	150,0	2700	N	11	0,004	0,19	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	1	1	-	14,2	54,22	54,2	12,657	14,896	13,497	13,643	449
884	10	S	44,1	150,1	2700	S	16	0,008	0,66	0,66	0,153	0,283	0,000	0,565	1	1	-	11,4	27,34	27,4	9,787	9,910	12,186	11,408	426
885	10	S	42,7	150,7	2700	N	19	0,04	1,00	1,00	0,272	0,450	0,000	0,901	2	2	C	11,3	26,41	26,4	9,864	11,773	11,879	10,920	398
886	10	S	43,4	150,2	2700	S	16	0,02	0,19	0,19	0,230	0,000	0,000	0,000	3	4	C	13,2	26,36	26,4	11,103	11,796	12,586	11,318	421
887	10	S	43,3	149,7	2700	S	18	0,034	0,63	0,63	0,322	0,410	0,000	0,820	3	3	C	13,4	36,88	36,9	10,594	11,531	11,826	10,916	400
888	10	S	43,5	148,9	2700	N	14	0,06	0,40	0,40	0,158	0,271	0,000	0,541	3	3	C	13,2	45,05	45,0	12,038	12,097	13,908	12,387	439
889	10	S	44,6	150,4	2700	N	14	0,02	0,22	0,22	0,242	0,216	0,000	0,432	2	2	C	12,2	37,17	37,2	11,735	12,856	12,124	11,145	392

N°: número de probeta. A: clon 'Australiano 129/60'. S: clon 'Stoneville 67'. M: muestra. B: base la sección de la probeta. H: altura de la sección de la probeta. L: luz entre apoyos. Med: médula (S: presencia de médula, N: ausencia de médula). A.P.: dimensión del anillo de crecimiento promedio. I.F.: inclinación de las fibras. K (TP): nudosidad K en toda la pieza. K (TC): nudosidad K en el tercio central. KAR, KARM, KARMS, KARMI: criterios de medición de la nudosidad sobre la sección transversal (ver capítulo 3).  $f_{m\ sc}$ : resistencia a la flexión sin corrección por altura.  $f_m$ : resistencia a la flexión con corrección por altura (UNE EN 384 2010).  $E_g$  y  $E_l$ : módulo de elasticidad global y local con corrección por contenido de humedad (UNE EN 384 2010).  $E_{us}$ : módulo de elasticidad dinámico longitudinal por ultrasonidos.  $E_v$ : módulo de elasticidad dinámico por vibraciones longitudinales inducidas.  $\rho$ : densidad corregida al 12% de contenido de humedad (UNE EN 384 2010). Pos: posición del ataque biológico en la pieza (C: en el tercio central, E: en los tercios extremos). C.H.: contenido de humedad

Anexo II  
Bases de datos del trabajo experimental

Tabla II.2: Datos experimentales de los ensayos de compresión paralela a las fibras

Probeta		Dimensiones							Propiedades		
Nº	Clon	B mm	H mm	L mm	K	A. B.	Med	C.H. %	$f_{c,0}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{c,0}$ N/mm <sup>2</sup>	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>
1	A	45,5	47,0	271	0,0	1	N	11,1	28,83	14.047	394
2	A	45,4	47,1	271	0,7	1	N	11,5	31,27	14.626	418
3	A	45,2	46,5	272	0,0	1	N	11,5	32,07	9.855	386
4	A	45,0	47,1	270	0,6	2	N	11,5	34,10	9.975	397
5	A	44,3	46,9	270	0,0	3	N	11,6	30,85	9.164	381
6	A	45,2	47,2	270	0,2	1	N	11,6	27,07	6.890	336
7	A	44,6	46,6	270	0,3	1	N	11,4	26,90	6.241	369
8	A	44,8	47,0	270	0,3	1	S	11,6	23,41	7.586	356
9	A	45,6	47,1	270	0,4	1	N	11,8	30,98	9.586	404
10	A	45,1	47,1	271	0,0	1	N	11,6	32,90	9.296	388
11	A	45,2	47,2	271	0,0	1	N	11,5	34,63	9.351	401
12	A	44,8	46,9	270	0,0	1	N	11,4	34,41	9.453	388
13	A	44,9	47,1	271	0,3	1	N	11,3	30,18	9.040	390
14	A	44,4	47,0	272	0,3	1	N	11,6	32,81	8.829	398
15	A	45,3	46,9	271	0,0	1	N	11,8	30,11	10.179	392
16	A	45,7	45,1	270	0,2	1	N	11,8	34,64	9.882	393
17	A	45,0	47,0	270	0,0	1	N	11,8	32,47	9.449	377
18	A	45,3	46,8	270	0,9	1	N	11,9	33,28	10.549	387
19	A	44,7	46,6	270	1,0	1	S	11,7	24,55	8.266	335
20	A	45,1	46,8	270	0,0	1	N	12,1	29,46	6.238	383
21	A	44,3	47,1	270	0,5	1	N	11,6	33,77	12.248	399
22	A	44,0	46,7	271	0,0	1	N	11,9	34,93	11.119	419
23	A	44,0	46,4	272	0,7	1	N	11,9	32,90	8.818	394
24	A	44,7	47,1	271	0,2	1	N	11,3	28,30	11.441	414
25	A	45,7	45,2	273	0,5	3	N	11,6	27,63	11.152	373
26	A	45,7	45,9	272	0,3	3	N	11,5	33,90	9.981	370
27	A	44,6	45,5	271	0,4	1	N	11,6	27,01	9.438	390
28	A	45,7	46,6	270	0,5	1	N	11,5	34,34	10.202	402
29	A	45,5	46,8	266	0,5	1	N	11,9	31,65	9.736	405
30	A	45,3	47,1	270	0,3	1	N	11,4	28,76	12.402	387
31	A	45,4	46,7	270	0,3	1	N	12,2	28,49	11.059	386
32	A	44,7	46,9	270	0,3	1	N	12,0	31,97	6.560	378
33	A	45,4	46,9	270	0,3	1	N	11,7	29,24	8.461	387
34	A	45,2	44,1	270	0,4	1	N	11,5	35,07	10.750	387
35	A	44,2	46,5	269	0,7	1	N	11,3	34,41	9.411	388
36	A	44,7	46,8	271	0,5	1	N	11,9	29,49	6.151	378
37	A	45,2	46,6	271	0,3	1	S	11,5	24,59	7.994	336
38	A	44,1	45,4	273	0,7	1	S	11,4	26,61	7.512	359
39	A	44,9	45,4	274	0,4	1	S	11,7	25,85	6.884	332
40	A	45,5	46,6	270	0,0	2	S	11,7	27,39	8.529	367
41	A	45,5	46,9	271	0,3	1	N	11,6	30,51	9.584	391
42	A	45,8	47,0	269	0,0	2	S	11,3	25,46	8.414	362
43	A	45,9	47,0	270	0,0	1	S	11,4	25,54	8.673	363
44	A	45,5	46,9	270	0,0	1	N	11,2	27,87	8.617	350
45	A	45,7	45,6	272	0,0	1	N	11,0	28,51	9.122	358
46	A	45,4	45,5	272	0,7	1	N	11,2	26,64	9.623	357
47	A	45,8	46,8	270	0,3	1	N	11,3	29,45	9.147	376
48	A	45,1	45,5	270	0,4	1	N	11,4	32,95	9.063	395
49	A	45,6	45,0	270	0,2	1	N	11,4	29,51	9.361	427
50	A	45,5	45,1	272	0,0	1	N	11,6	28,61	7.566	369
51	A	45,5	44,5	271	0,2	1	N	11,3	25,91	5.070	450
52	S	46,5	46,2	271	0,0	1	N	11,1	35,60	12.359	440
53	S	46,1	45,7	271	0,4	1	N	11,1	25,72	8.361	406
54	S	36,7	46,9	271	0,0	1	N	11,0	38,97	12.174	445
55	S	45,1	45,2	270	0,4	1	N	11,0	27,53	8.744	473
56	S	44,5	44,6	272	0,0	1	N	10,7	37,79	6.875	517
57	S	45,0	44,3	271	0,2	1	N	11,1	35,44	12.601	432
58	S	46,2	46,0	271	0,0	1	S	11,2	34,57	11.345	436
59	S	45,2	44,8	271	0,3	1	N	11,0	30,69	12.093	412
60	S	45,9	47,0	271	0,4	1	S	11,2	36,53	13.820	483
61	S	45,0	44,7	271	0,0	1	N	11,0	46,80	15.673	547
62	S	45,3	43,2	271	0,0	1	N	11,0	40,42	11.656	436
63	S	46,2	46,7	271	0,0	1	N	11,3	40,90	13.012	475
64	S	45,6	44,5	270	0,3	1	N	11,1	33,93	12.599	452
65	S	45,9	47,1	271	0,3	1	S	11,4	34,21	10.720	433

Anexo II  
Bases de datos del trabajo experimental

Tabla II.2: Datos experimentales de los ensayos de compresión paralela a las fibras. Continuación

Probeta		Dimensiones			K	A. B.	Med	C.H. %	Propiedades		
Nº	Clon	B mm	H mm	L mm					$f_{c,0}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{c,0}$ N/mm <sup>2</sup>	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>
66	S	45,5	45,3	271	0,0	1	S	11,1	38,52	13.716	497
67	S	46,1	47,2	272	0,2	1	N	11,0	42,27	13.791	501
68	S	45,9	46,6	273	0,0	1	N	11,0	42,67	13.810	500
69	S	36,8	47,4	271	0,9	1	N	11,3	24,73	10.848	455
70	S	45,6	44,2	271	0,7	1	N	11,0	41,49	12.442	503
71	S	45,9	46,8	271	0,0	1	N	11,1	38,06	14.109	505
72	S	45,3	44,7	271	0,6	1	S	11,3	30,01	12.263	514
73	S	45,4	44,5	271	0,4	1	N	11,2	37,28	15.587	520
74	S	45,8	46,1	273	0,0	1	S	11,3	37,08	7.890	410
75	S	46,5	46,1	272	0,0	1	N	11,2	33,85	14.336	465
76	S	45,4	45,3	271	0,2	1	S	11,3	36,71	12.509	523
77	S	46,0	45,2	271	0,4	1	N	11,3	28,90	10.140	464
78	S	37,4	45,7	271	0,3	1	N	11,0	34,45	10.994	506
79	S	45,1	44,5	270	0,2	1	N	11,2	35,57	9.072	471
80	S	46,1	46,5	273	0,5	1	N	11,3	24,79	10.511	459
81	S	46,2	46,0	272	0,3	1	N	11,0	27,77	7.559	399
82	S	46,2	45,8	270	0,3	1	S	11,1	36,24	11.582	554
83	S	45,3	44,9	270	0,3	1	N	10,9	34,24	12.959	452
84	S	45,4	44,3	271	0,3	1	S	11,1	38,60	9.235	509
85	S	45,6	44,6	271	0,3	1	N	11,1	31,58	13.805	400
86	S	45,3	44,2	271	0,7	2	N	11,4	25,74	6.530	439
87	S	45,3	44,7	271	0,2	1	S	11,5	28,94	9.413	481
88	S	45,3	45,1	271	0,3	1	N	11,4	29,85	9.420	395
89	S	45,4	44,6	271	0,7	1	S	11,4	27,97	9.417	399
90	S	45,5	45,1	271	0,4	1	S	11,5	41,47	15.521	544
91	S	45,2	44,7	273	0,0	1	N	11,2	34,11	10.890	424
92	S	45,4	45,1	272	0,3	1	S	11,5	38,29	13.430	526
93	S	45,1	44,3	271	0,0	1	N	11,4	36,25	13.219	444
94	S	45,1	44,8	271	0,0	1	N	11,2	46,25	15.782	526
95	S	45,1	45,0	271	0,0	1	S	11,6	35,03	13.267	437
96	S	45,1	44,7	271	0,0	1	N	11,4	37,87	13.539	520
97	S	45,5	44,4	272	0,0	1	N	11,3	40,98	9.553	448
98	S	45,3	43,9	271	0,4	1	N	11,3	33,37	10.452	455
99	S	45,8	46,1	271	0,0	1	S	11,6	34,49	12.893	469
100	S	45,4	44,7	271	0,3	1	S	11,4	29,54	10.128	430

Nº: número de probeta. A: clon 'Australiano 129/60'. S: clon 'Stoneville 67'. B y H: dimensiones de la sección transversal de la probeta. L: largo de la probeta. K: nudosidad. A.B.: grado de ataque biológico. Med: médula (S: presencia de médula, N: ausencia de médula). C.H.: contenido de humedad.  $f_{c,0}$ : resistencia a la compresión paralela a las fibras con corrección por contenido de humedad (UNE EN 384 2010).  $E_{c,0}$ : módulo de elasticidad en compresión paralela a las fibras con corrección por contenido de humedad (UNE EN 384 2010).  $\rho$ : densidad corregida al 12% de contenido de humedad (UNE EN 384 2010).

Anexo II  
Bases de datos del trabajo experimental

Tabla II.3: Datos experimentales de los ensayos de compresión perpendicular a las fibras

N°	Clon	Dimensiones			K	A.B.	Med	C.H. %	Propiedades		
		h mm	b mm	l mm					$f_{c,90}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{c,90}$ N/mm <sup>2</sup>	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>
1	A	44,1	70,6	91,5	0,00	1	N	12,6	4,44	726	388
2	A	43,9	70,6	90,9	0,00	1	N	12,8	4,43	652	394
3	A	44,8	70,5	90,5	0,00	1	N	15,2	5,54	591	473
4	A	44,8	70,5	90,5	0,00	1	N	15,3	5,76	587	475
5	A	44,9	70,4	90,3	0,00	1	N	14,3	5,79	638	477
6	A	45,2	71,9	89,6	0,00	1	N	15,1	5,45	602	481
7	A	44,9	69,8	90,5	0,00	1	N	15,1	5,43	604	474
8	A	44,3	68,7	91,5	0,00	1	N	14,5	4,6	382	470
9	A	45,6	71,7	90,2	0,00	1	N	13,8	5,02	408	487
10	A	45,0	69,2	90,5	0,00	1	N	14,4	4,88	399	485
11	A	43,7	70,3	90,9	0,00	1	N	14,4	4,81	404	479
12	A	44,7	70,4	91,4	0,00	1	N	12,9	4,61	398	464
13	A	42,9	70,8	90,7	0,00	1	N	13,2	4,54	380	457
14	A	44,8	70,6	91,0	0,00	1	N	13,5	3,98	372	453
15	A	44,9	70,0	92,3	0,00	1	N	12,4	4,11	343	437
16	A	44,8	70,7	91,8	0,00	1	N	12,7	3,98	343	431
17	A	44,9	71,2	89,5	0,00	1	N	13,6	4,88	418	489
18	A	45,0	71,7	87,9	0,00	1	N	14,1	4,71	396	478
19	A	45,0	70,2	87,7	0,00	1	N	14,4	4,98	398	483
20	A	45,0	69,8	87,4	0,00	1	N	14,3	4,3	348	489
21	A	44,8	70,5	90,6	0,00	1	N	12,7	4,19	446	452
22	A	44,3	70,7	90,6	0,00	1	N	13,1	4,37	396	453
23	A	44,6	70,7	91,2	0,00	1	N	12,2	4,38	430	439
24	A	44,8	70,7	92,3	0,00	1	N	12,6	5,08	492	454
25	A	44,8	70,7	92,8	0,00	1	N	12,6	5,87	628	496
26	A	44,6	70,4	93,5	0,00	1	N	12,5	5,69	795	485
27	A	43,9	70,6	91,1	0,00	1	N	12,9	4,59	428	467
28	A	42,9	70,2	90,3	0,00	1	N	11,7	4,65	427	469
29	A	43,8	70,9	90,7	0,00	1	N	12,2	4,35	363	429
30	A	44,3	70,6	90,7	0,00	1	N	12,5	4,32	375	425
31	A	45,0	71,0	90,6	0,00	1	N	12,4	4,48	391	428
32	A	44,9	70,0	90,5	0,00	1	N	14,3	5,22	489	476
33	A	44,8	71,2	90,2	0,00	1	N	12,9	4,83	489	472
34	A	44,9	70,1	90,5	0,00	1	N	14,6	4,61	376	414
35	A	44,8	70,5	91,2	0,00	1	N	14,7	4,41	367	415
36	A	44,7	70,6	91,3	0,00	1	N	14,6	4,5	368	417
37	A	44,5	71,9	91,2	0,00	1	N	14,6	4,53	362	418
38	A	44,9	70,5	90,9	0,00	1	N	14,8	4,55	376	415
39	A	44,2	70,9	91,4	0,00	1	N	14,3	4,21	355	445
40	A	44,1	70,4	91,1	0,00	1	N	14,4	4,23	352	445
41	A	44,2	70,4	90,7	0,00	1	N	14,5	4,53	394	448
42	A	44,0	70,8	91,5	0,00	1	N	13,2	4,56	424	467
43	A	43,8	70,9	91,9	0,00	1	N	13,3	4,77	408	466
44	A	44,7	70,8	91,0	0,00	1	N	12,3	3,98	357	447
45	A	44,8	70,4	91,7	0,00	1	N	12,4	3,99	364	450
46	A	44,8	70,5	92,5	0,00	1	N	12,3	4,04	340	446
47	A	44,4	70,5	90,1	0,00	1	N	11,8	4,03	379	451
48	A	44,7	70,5	90,5	0,00	1	N	12,2	4,1	383	447
49	A	46,1	70,6	91,4	0,00	1	N	11,0	4,37	383	433
50	A	43,8	70,5	91,4	0,00	1	N	12,7	4,21	368	460
51	A	46,1	70,3	90,4	0,00	1	N	10,9	4,22	712	427
52	A	44,3	70,7	91,8	0,00	1	N	12,5	4,27	355	448
53	S	88,0	43,3	70,1	0,00	1	N	11,6	3,69	340	437
54	S	88,6	43,2	70,1	0,00	1	N	11,6	3,6	358	435
55	S	88,9	44,1	70,2	0,00	1	N	11,4	3,55	329	425
56	S	85,0	44,7	71,9	0,00	1	N	11,8	3,2	259	395
57	S	85,4	44,7	71,9	0,00	1	N	11,8	3,27	284	396
58	S	90,2	44,6	70,5	0,00	1	N	12,0	3,11	273	388
59	S	90,2	44,6	70,1	0,00	1	N	12,1	3,01	255	386
60	S	89,5	43,0	70,3	0,00	1	N	11,7	3,31	274	401
61	S	89,2	44,6	70,4	0,00	1	N	11,4	3,19	281	405
62	S	89,4	43,2	70,1	0,00	1	N	11,7	3,5	315	402
63	S	89,4	43,2	69,6	0,00	1	N	11,8	3,36	292	398
64	S	88,3	44,2	70,2	0,00	1	N	11,7	3,16	370	400
65	S	89,0	44,1	70,0	0,00	1	N	11,6	3,21	253	398

Anexo II  
Bases de datos del trabajo experimental

Tabla II.3: Datos experimentales de los ensayos de compresión perpendicular a las fibras. Continuación

Probeta		Dimensiones			K	A.B.	Med	C.H. %	Propiedades		
N°	Clon	h mm	b mm	l mm					$f_{c,90}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{c,90}$ N/mm <sup>2</sup>	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>
66	S	88,6	44,1	70,2	0,00	1	N	11,5	3,13	274	395
67	S	89,6	43,1	70,1	0,00	1	N	11,9	3,81	344	455
68	S	89,4	43,1	70,3	0,00	1	N	12,1	3,63	699	448
69	S	89,3	43,2	70,3	0,00	1	N	12,3	4,15	330	447
70	S	89,0	43,2	71,0	0,00	1	N	12,0	4,05	329	447
71	S	86,8	43,0	71,6	0,00	1	N	11,5	3,6	292	414
72	S	87,7	43,2	71,8	0,00	1	N	11,6	2,45	264	411
73	S	90,0	45,0	70,0	0,00	1	N	11,9	3,28	292	396
74	S	90,2	43,5	71,9	0,00	1	N	11,7	3,97	350	480
75	S	91,0	43,6	71,4	0,00	1	N	11,7	4,18	382	483
76	S	89,8	43,4	71,4	0,00	1	N	11,6	3,07	275	415
77	S	90,0	45,0	70,0	0,00	1	N	12,4	3,08	265	412
78	S	89,9	43,4	71,9	0,00	1	N	11,9	3,19	290	415
79	S	88,9	43,3	70,1	0,00	1	N	11,7	3,66	332	446
80	S	88,5	43,3	70,1	0,00	1	N	12,0	3,75	343	452
81	S	87,5	43,2	66,8	0,00	1	N	12,2	3,58	302	409
82	S	88,4	43,1	70,4	0,00	1	N	12,0	3,82	284	410
83	S	90,6	43,5	71,7	0,00	1	N	11,9	4,04	358	485
84	S	89,8	44,6	70,8	0,00	1	N	12,5	3,74	319	453
85	S	89,5	44,4	69,9	0,00	1	N	12,5	3,71	318	456
86	S	88,9	44,5	70,3	0,00	1	N	11,7	3,27	270	451
87	S	89,6	42,5	72,1	0,00	1	N	11,7	2,57	279	388
88	S	89,9	42,3	71,8	0,00	1	N	11,6	3,16	295	386
89	S	89,9	43,7	69,8	0,00	1	N	11,5	3,38	294	387
90	S	90,2	43,4	70,2	0,00	1	N	11,7	3,28	261	413
91	S	90,0	43,7	70,1	0,00	1	N	11,3	3,14	260	411
92	S	93,9	43,3	70,2	0,00	1	N	11,8	3,45	266	411
93	S	92,7	43,3	70,3	0,00	1	N	12,2	3,35	262	408
94	S	88,3	43,2	70,2	0,00	1	N	11,5	3,2	253	395
95	S	88,9	43,2	70,1	0,00	1	N	11,3	3,2	287	392
96	S	89,4	43,2	69,9	0,00	1	N	11,4	2,92	557	392
97	S	90,3	43,3	72,1	0,00	1	N	12,1	3,3	289	404
98	S	90,1	43,2	71,6	0,00	1	N	11,9	3,39	274	406
99	S	90,8	43,4	69,5	0,00	1	N	12,0	3,38	287	408
100	S	89,9	43,2	72,1	0,00	1	N	11,9	3,41	272	414
101	S	88,8	46,9	52,3	0,00	1	S	12,2	3,41	84	439
102	S	89,9	44,7	50,2	0,75	1	N	12,1	4,96	563	513
103	S	89,8	44,7	51,1	0,85	1	N	11,8	5,70	640	517
104	S	89,0	44,7	51,0	0,90	1	N	11,7	6,74	1.175	530
105	S	90,0	44,7	50,9	0,57	1	N	11,9	5,42	1.432	549
106	S	90,3	42,8	49,7	0,82	1	N	12,3	6,90	1.179	544
107	S	90,6	42,6	50,1	0,65	1	S	11,7	4,79	464	503
108	S	92,1	44,3	50,5	0,88	1	N	11,6	4,90	513	500
109	S	90,3	42,2	49,1	0,92	1	N	11,5	6,80	884	494
110	S	89,7	44,6	51,1	0,86	1	N	12,2	6,13	883	522
111	S	90,0	43,1	50,0	0,86	1	N	11,9	4,99	643	503
112	S	89,8	43,5	49,6	1,00	1	N	11,5	6,18	874	534
113	S	90,0	42,9	49,7	0,78	1	N	11,8	4,55	829	507
114	S	92,7	43,1	49,7	0,00	1	S	11,9	4,48	449	489
115	S	89,6	44,6	50,4	0,58	1	N	12,3	6,33	488	542
116	S	91,6	43,6	50,2	0,97	1	N	11,7	6,89	1.862	544
117	S	91,7	44,9	51,1	0,00	1	N	11,5	4,47	546	475
118	S	91,7	44,9	51,3	0,71	1	N	11,7	4,95	511	542
119	S	92,7	44,9	51,5	0,98	1	N	11,9	5,21	445	549
120	S	90,4	44,7	51,3	0,45	1	N	11,6	5,58	525	503
121	S	88,9	44,8	51,5	0,53	1	N	12,4	5,60	1.086	535
122	S	90,3	46,2	52,2	0,00	1	S	12,1	4,46	420	517
123	S	90,3	46,5	52,4	0,00	1	S	11,8	4,54	474	517
124	S	91,0	45,4	51,2	0,00	1	N	11,9	3,69	390	540
125	S	91,9	45,8	51,5	1,00	1	N	11,5	5,23	450	578
126	S	90,6	46,3	52,3	0,43	1	S	11,6	3,77	343	477
127	S	91,0	46,8	52,6	0,36	1	S	12,2	3,57	369	474
128	S	89,8	46,2	52,2	0,00	1	S	12,3	3,36	312	470
129	S	90,0	46,0	51,9	0,00	1	S	12,1	3,46	301	470
130	S	91,7	46,5	52,5	0,21	1	S	11,4	3,37	293	432

Anexo II  
Bases de datos del trabajo experimental

Tabla II.3: Datos experimentales de los ensayos de compresión perpendicular a las fibras. Continuación

Probeta		Dimensiones							Propiedades		
Nº	Clon	h mm	b mm	l mm	K	A.B.	Med	C.H. %	$f_{c,90}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{c,90}$ N/mm <sup>2</sup>	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>
131	S	92,4	47,1	52,8	0,00	1	S	12,1	3,82	346	426
132	S	91,4	46,7	52,3	0,00	1	S	11,6	3,77	337	430
133	S	89,8	46,2	52,0	0,65	1	N	11,5	5,53	691	514
134	S	89,5	46,5	52,2	0,00	1	S	12,2	3,62	425	462
135	S	91,1	46,2	52,0	0,21	1	S	11,5	4,13	421	516
136	S	94,7	46,6	52,5	0,00	1	N	11,7	4,00	368	512
137	S	90,9	46,7	52,6	0,57	1	S	11,8	4,39	446	514
138	S	90,4	55,4	59,2	0,00	1	S	12,2	2,37	287	374
139	S	89,9	45,7	51,8	0,60	1	S	12,3	3,29	386	486
140	S	90,2	46,7	52,2	0,00	1	S	11,8	3,75	314	463
141	S	89,7	42,9	49,7	0,34	1	N	11,9	3,30	297	438
142	S	90,4	42,7	49,6	0,00	1	N	11,7	3,22	303	438
143	S	90,0	43,2	49,6	0,32	1	N	11,6	3,54	348	461

Nº: número de probeta. A: clon 'Australiano 129/60'. S: clon 'Stoneville 67'. h: altura de la probeta y b: ancho de la probeta. l: largo de la probeta. K: nudosidad. A.B.: grado de ataque biológico. Med: médula (S: presencia de médula, N: ausencia de médula). C.H.: contenido de humedad.  $F_{c,90}$ : resistencia a la compresión perpendicular a las fibras.  $E_{c,90}$ : módulo de elasticidad en compresión perpendicular a las fibras.  $\rho$ : densidad corregida al 12% de contenido de humedad (UNE EN 384 2010).

Anexo II  
Bases de datos del trabajo experimental

Tabla II.4: Datos experimentales de los ensayos de tracción paralela a las fibras

Probeta		Dimensiones							Propiedades		
Nº	Clon	B mm	H mm	L mm	K	A. B.	Med	C.H. %	$f_{t,0}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{t,0}$ N/mm <sup>2</sup>	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>
1	A	22,3	101,7	900	0,00	2	N	12,4	20,7	6.637	411
2	A	22,0	99,8	900	0,00	1	N	13,0	19,0	6.246	449
3	A	22,3	101,2	900	0,00	1	N	12,4	14,3	7.215	415
4	A	22,4	102,2	900	0,00	1	N	12,5	25,1	7.793	432
5	A	22,6	101,7	900	0,00	2	N	12,6	24,3	8.872	504
6	A	22,3	101,0	900	0,00	2	N	12,1	28,8	9.198	471
7	A	22,0	101,5	900	0,00	1	N	12,6	32,1	8.740	476
8	A	22,5	101,4	900	0,00	1	S	12,8	18,3	6.019	390
9	A	22,6	101,1	900	0,00	1	N	12,1	18,3	7.474	463
10	A	22,5	101,5	900	0,00	1	N	12,2	13,6	7.624	390
11	A	22,6	101,6	900	0,00	1	N	12,4	22,6	10.732	391
12	A	22,2	101,3	900	0,00	1	N	12,5	13,6	7.808	437
13	A	22,4	101,2	900	0,00	2	N	12,2	28,0	9.256	490
14	A	22,6	94,0	900	0,00	1	N	11,7	26,7	7.605	429
15	A	22,5	101,3	900	0,00	1	N	12,5	22,8	7.232	448
16	A	22,9	101,3	900	0,00	1	N	12,3	13,0	6.095	365
17	A	22,5	101,0	900	0,00	1	N	12,3	18,6	7.271	408
18	A	22,2	101,5	900	0,00	1	N	11,5	18,1	6.555	377
19	A	18,1	94,7	95	0,00	1	N	11,8	21,5	4.572	449
20	A	22,7	100,5	900	0,08	2	N	12,3	23,4	6.849	423
21	A	22,3	101,0	900	0,11	1	N	12,0	22,5	8.980	453
22	A	22,4	101,9	900	0,12	1	N	12,1	22,6	10.276	513
23	A	22,6	84,5	900	0,20	2	N	11,9	21,3	6.654	378
24	A	23,3	94,8	95	0,23	1	N	12,6	23,5	3.456	366
25	A	22,4	101,3	900	0,24	2	N	12,2	21,0	7.428	486
26	A	22,3	73,8	900	0,24	1	S	12,4	15,0	10.095	411
27	A	22,7	101,6	900	0,25	1	N	12,7	14,6	5.735	344
28	A	22,4	101,6	900	0,25	1	S	12,3	12,4	6.917	405
29	A	24,0	100,9	900	0,27	2	N	11,7	17,1	7.614	443
30	A	23,7	100,8	900	0,27	1	N	11,7	12,0	6.338	415
31	A	22,8	101,8	900	0,28	1	N	12,6	17,9	5.400	436
32	A	22,5	101,5	900	0,29	1	S	12,1	11,7	7.552	454
33	A	23,7	100,7	900	0,29	1	N	12,3	18,7	5.440	379
34	A	23,0	100,6	101	0,29	1	N	12,4	18,8	3.945	355
35	A	23,4	101,1	101	0,29	1	N	12,3	30,4	6.022	445
36	A	22,6	100,5	900	0,31	1	S	12,4	11,4	6.287	367
37	A	22,4	101,2	900	0,32	1	N	12,4	12,4	7.140	399
38	A	23,3	100,7	900	0,32	1	S	12,1	8,9	4.699	353
39	A	23,4	100,7	900	0,32	1	N	11,9	17,7	6.144	397
40	A	23,7	100,6	900	0,32	1	N	11,8	14,0	5.470	393
41	A	22,4	101,6	900	0,34	1	S	12,4	15,6	6.139	375
42	A	22,5	101,5	900	0,34	1	N	12,3	7,8	7.995	370
43	A	23,8	100,4	900	0,35	1	N	11,5	7,2	4.250	381
44	A	23,2	99,9	900	0,35	1	N	11,3	20,2	7.934	407
45	A	22,0	101,1	900	0,36	1	N	11,8	13,9	6.177	424
46	A	22,6	101,2	900	0,37	1	N	12,5	11,0	5.981	409
47	A	23,5	100,6	101	0,37	1	N	12,2	13,4	4.191	385
48	A	22,6	100,2	900	0,38	1	N	12,2	12,7	6.361	393
49	A	22,5	101,7	900	0,39	1	N	12,3	13,9	6.492	401
50	A	23,8	100,3	100	0,40	1	N	12,6	20,1	4.604	400
51	A	22,8	100,5	900	0,41	1	N	11,6	14,4	7.830	401
52	A	23,5	101,0	900	0,45	1	N	12,1	11,9	6.355	389
53	A	22,6	100,9	900	0,45	3	N	12,4	20,7	6.049	452
54	A	22,5	101,5	101	0,45	1	N	12,7	21,0	4.793	392
55	A	22,4	100,8	900	0,46	2	N	12,6	21,4	6.581	457
56	A	22,4	101,0	900	0,54	2	S	12,4	13,8	6.544	414
57	A	22,3	100,5	900	0,56	1	N	12,2	19,0	6.407	427
58	A	22,5	101,5	900	0,57	2	N	12,3	7,8	5.699	370
59	A	22,4	101,5	900	0,58	1	S	12,4	10,2	7.201	420
60	A	21,9	102,1	900	0,69	1	S	12,4	7,4	5.920	377
61	A	23,7	99,5	100	0,66	1	N	12,6	16,4	4.595	408
62	A	22,4	101,6	900	0,92	3	N	12,1	4,8	4.064	430
63	S	22,6	104,2	900	0,00	1	N	14,1	12,3	8.784	447

Anexo II  
Bases de datos del trabajo experimental

Tabla II.4: Datos experimentales de los ensayos de tracción paralela a las fibras. Continuación

Probeta		Dimensiones			K	A. B.	Med	C.H. %	Propiedades		
N°	Clon	B mm	H mm	L mm					$f_{t,0}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{t,0}$ N/mm <sup>2</sup>	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>
64	S	23,3	105,6	900	0,00	1	N	14,0	19,5	8.522	413
65	S	23,2	105,8	900	0,00	1	N	14,0	15,2	9.547	480
66	S	22,7	105,6	900	0,00	1	N	13,8	26,7	10.066	462
67	S	22,8	105,8	900	0,00	1	N	14,2	12,7	9.050	478
68	S	22,5	106,0	900	0,00	1	S	14,4	10,6	8.116	471
69	S	22,5	106,4	900	0,00	1	S	14,9	11,7	7.038	378
70	S	22,9	105,7	900	0,00	1	N	14,0	15,7	9.151	464
71	S	23,0	106,1	900	0,00	1	N	14,7	13,3	8.045	397
72	S	23,0	106,1	900	0,00	1	N	14,4	28,6	7.308	451
73	S	22,9	105,8	900	0,00	1	S	14,4	10,5	7.641	450
74	S	22,9	104,5	900	0,00	1	N	12,3	18,2	10.482	555
75	S	22,3	105,8	900	0,00	1	S	14,7	11,5	8.370	444
76	S	23,4	106,0	900	0,00	1	N	14,2	18,8	9.371	478
77	S	22,7	105,3	900	0,00	1	N	14,4	16,9	9.055	460
78	S	22,4	108,6	900	0,00	1	N	14,0	8,4	6.871	434
79	S	22,7	105,5	900	0,00	1	N	14,5	17,5	8.686	452
80	S	22,8	104,9	900	0,00	1	N	14,5	12,7	8.821	477
81	S	22,4	105,9	900	0,00	2	S	14,1	10,1	6.791	397
82	S	27,9	99,9	106	0,00	1	N	13,4	15,4	5.672	410
83	S	23,3	106,1	900	0,09	1	N	14,1	14,6	8.876	478
84	S	22,6	104,4	900	0,12	1	N	14,6	26,9	9.028	532
85	S	22,6	104,3	900	0,13	1	S	14,4	15,3	9.409	537
86	S	25,5	105,1	106	0,14	1	N	13,0	18,4	6.825	514
87	S	25,5	109,2	109	0,15	1	N	12,8	29,4	7.792	506
88	S	22,7	104,7	900	0,15	2	S	14,6	10,9	10.123	458
89	S	24,9	99,3	108	0,16	1	N	12,8	33,4	7.766	524
90	S	23,1	106,2	900	0,16	2	S	14,9	15,0	7.379	433
91	S	23,1	106,0	900	0,16	1	N	14,5	16,8	8.939	450
92	S	22,8	104,8	900	0,16	3	N	14,4	13,3	8.843	426
93	S	23,1	106,1	900	0,17	1	N	13,7	29,8	9.454	506
94	S	22,8	104,4	900	0,17	1	N	14,3	19,7	9.856	493
95	S	22,9	106,1	900	0,18	1	N	13,6	11,2	9.537	466
96	S	23,1	105,8	900	0,19	1	N	13,7	17,4	9.312	502
97	S	24,9	99,9	107	0,20	1	N	12,8	24,8	8.452	487
98	S	22,7	105,5	900	0,21	2	N	14,6	13,3	7.168	392
99	S	22,7	105,3	900	0,21	2	N	14,1	12,1	7.800	416
100	S	22,8	106,0	900	0,22	1	N	13,8	33,4	10.464	483
101	S	25,6	106,0	106	0,22	1	N	13,1	25,5	8.716	482
102	S	22,6	105,0	900	0,23	1	N	14,1	15,5	9.904	522
103	S	22,8	104,3	900	0,24	1	N	14,4	11,8	7.889	446
104	S	25,0	107,5	108	0,24	1	N	12,8	23,2	8.570	523
105	S	25,4	106,9	107	0,25	1	N	13,7	16,3	4.432	392
106	S	24,5	105,3	107	0,25	1	S	13,5	20,1	6.838	523
107	S	22,7	106,2	900	0,26	1	N	13,9	12,0	8.924	477
108	S	22,7	105,3	900	0,28	1	N	14,0	19,5	10.437	491
109	S	22,7	104,4	900	0,29	1	S	14,7	18,9	8.808	528
110	S	23,2	106,0	900	0,29	1	N	14,4	12,5	6.894	471
111	S	22,5	106,1	900	0,29	2	N	14,4	14,0	8.383	440
112	S	22,7	104,7	900	0,31	1	S	14,5	16,7	8.400	473
113	S	23,3	105,2	900	0,32	2	N	14,6	13,0	8.217	499
114	S	23,1	105,5	900	0,38	2	S	13,7	7,9	4.639	413
115	S	23,1	105,5	900	0,38	1	N	14,2	11,6	6.759	498
116	S	22,7	106,3	900	0,40	1	N	13,0	9,8	6.083	509
117	S	22,8	104,5	900	0,42	1	S	14,7	15,1	6.732	512
118	S	22,8	106,3	900	0,44	1	N	14,2	28,9	9.413	509
119	S	25,0	99,7	108	0,64	1	N	13,2	23,2	7.466	518
120	S	22,5	106,4	900	0,46	2	S	14,6	11,5	6.506	450
121	S	22,8	104,4	900	0,48	1	N	14,4	11,1	8.412	515
122	S	24,7	106,6	108	0,48	1	N	14,1	17,7	7.025	463
123	S	22,9	105,2	900	0,48	1	N	14,3	10,1	8.811	449
124	S	22,6	106,2	900	0,49	2	S	13,7	11,8	7.683	483
125	S	22,8	106,0	900	0,49	1	N	14,2	11,9	5.797	538

Anexo II  
Bases de datos del trabajo experimental

Tabla II.4: Datos experimentales de los ensayos de tracción paralela a las fibras. Continuación

Probeta		Dimensiones							Propiedades		
Nº	Clon	B mm	H mm	L mm	K	A. B.	Med	C.H. %	$f_{t,0}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{t,0}$ N/mm <sup>2</sup>	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>
126	S	22,6	104,9	900	0,52	1	N	14,0	13,1	6.820	513
127	S	25,3	100,1	106	0,56	1	N	13,0	27,6	6.892	506
128	S	22,5	104,9	900	0,65	1	N	14,2	8,9	3.889	490
129	S	25,0	107,9	108	0,66	1	N	13,1	12,8	5.641	388
130	S	22,0	104,8	900	0,87	1	N	14,0	8,5	5.408	526

Nº: número de probeta. A: clon 'Australiano 129/60'. S: clon 'Stoneville 67'. B: espesor de la probeta y H: ancho de la probeta. L: largo de la probeta entre mordazas. K: nudosidad. A.B.: grado de ataque biológico. Med: médula (S: presencia de médula, N: ausencia de médula). C.H.: contenido de humedad.  $F_{t,0}$ : resistencia a la tracción paralela a las fibras con corrección por tamaño (UNE EN 384 2010).  $E_{t,0}$ : módulo de elasticidad en tracción paralela a las fibras con corrección por contenido de humedad (UNE EN 384 2010).  $\rho$ : densidad corregida al 12% de contenido de humedad (UNE EN 384 2010).