
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA
Facultad de Ingeniería
Departamento de Construcciones

**Clasificación por resistencia de la madera aserrada como
material estructural. Desarrollo de un método para el
Eucalyptus grandis de Argentina**

Juan Carlos Jesús Piter
Raúl Luis Zerbino (Director)
Hans Joachim Blaß (Co-Director)

Tesis presentada para el grado de
DOCTOR EN INGENIERIA

La Plata, Octubre de 2003

Resumen

Esta tesis persigue dos objetivos principales: 1) diseñar un método de clasificación visual por resistencia para la madera aserrada de *Eucalyptus grandis* cultivado en Argentina, y proponer su inserción en el sistema internacional de clases resistentes establecido en las normas europeas, 2) desarrollar modelos para una clasificación mecánica por resistencia de la madera considerada, en el marco del sistema internacional citado precedentemente. Para alcanzar estos objetivos, se diseñó una investigación empírica sobre cuatro muestras de vigas y una de tablas sometidas a flexión, una muestra de tablas ensayada a tracción paralela a las fibras y una con cuerpos de prueba sometidos a compresión.

Se investigó la influencia de los parámetros visuales sobre las propiedades mecánicas, y se analizaron diferentes perfiles de resistencia, rigidez y densidad con los correspondientes límites para los principales parámetros visuales, de acuerdo con el sistema internacional de clases resistentes establecido en la norma europea EN 338 (1996). También se compararon las propiedades mecánicas en flexión con las correspondientes a tracción y compresión paralela a las fibras. Fue encontrada una relación relativamente baja entre la nudosidad y la resistencia a flexión, en comparación con valores publicados para otras especies. La presencia de médula, frecuentemente asociada con otros defectos como grandes fisuras, reduce significativamente la resistencia a flexión y tracción, así como el módulo de elasticidad en flexión, tracción y compresión, pero su influencia es pequeña sobre la resistencia a compresión. La investigación también revela particularidades para esta especie, como la elevada relación entre el módulo de elasticidad y la densidad y entre la resistencia y la densidad, en comparación con otras especies frondosas, entre otras.

Fue estudiada la eficiencia de parámetros mecánicos tanto simples como combinados para predecir la resistencia a flexión. La combinación del módulo de elasticidad con la densidad y la nudosidad produce la mayor correlación con la resistencia, pero también fue encontrada una muy buena relación para el módulo de elasticidad actuando como parámetro simple. Se analizaron perfiles de resistencia, rigidez y densidad basados en el parámetro combinado y en el módulo de elasticidad, con muy buenos rendimientos para ambos casos, lo cual prueba una excelente aptitud de esta especie para ser clasificada mecánicamente. La efectividad de ambos modelos fue probada también aplicándolos a la muestra de tablas sometidas a ensayos de tracción paralela a las fibras, encontrándose un rendimiento similar al obtenido con las muestras sometidas a flexión. Fue analizado el método dinámico de la frecuencia fundamental de vibración, y los resultados evidencian su eficiencia para determinar las propiedades elásticas de esta madera en diferentes tamaños y calidades.

Se estudiaron aspectos complementarios, de importancia para el desempeño de esta especie como material estructural: i) influencia de la nudosidad sobre la resistencia a tracción paralela a las fibras, ii) relación entre el módulo de elasticidad global y local en flexión, iii) resistencia y rigidez en compresión paralela a las fibras con relación a las correspondientes a flexión, a partir de ensayos sobre cuerpos de prueba provenientes de la misma pieza, iv) aptitud de los coeficientes de corrección para la resistencia y el módulo de elasticidad en flexión dados en la norma EN 384 (1996), v) influencia de la región de cultivo sobre las propiedades, vi) influencia de la distancia a la médula, vii) influencia de la altura en el árbol.

Los resultados obtenidos alientan futuros estudios relacionados a las otras propiedades de resistencia y rigidez de esta madera de rápido crecimiento, la cual exhibe muy buen comportamiento para los aspectos investigados, y puede comportarse ventajosamente tanto en calidad de madera aserrada como en la conformación de vigas laminadas encoladas.

Palabras clave: Clasificación visual por resistencia; perfiles de resistencia, rigidez y densidad; propiedades mecánicas; parámetros de clasificación; *Eucalyptus grandis*; clasificación mecánica por resistencia; métodos dinámicos no destructivos.

Abstract

The thesis addresses two main goals: 1) the design of a method for visually strength grading sawn timber of Argentinean *Eucalyptus grandis* according to European standards, 2) the development of models for machine strength grading this timber species. For this purpose an empirical research project was carried out, which included four samples of beams and one sample of boards subjected to bending, one sample of boards subjected to tension parallel to the grain and one sample of specimens subjected to compression.

The influence of the visual parameters on the mechanical properties was scrutinised, and different strength, stiffness and density profiles with the corresponding limits for the main visual features were analysed in comparison with the international strength class system established in the European standard EN 338 (1996), also bending properties were compared with those corresponding to tension and compression parallel to the grain. A relatively poor relationship between knot ratio and bending strength was found in comparison with results reported for other timber species. The presence of pith, often associated with other defects as large fissures, significantly reduces bending and tensile strength and the modulus of elasticity in bending, tension and compression, but little influence was registered on compression strength. The research also reveals particularities for this timber species as the high ratio of modulus of elasticity and strength to density, in comparison with other deciduous species, among others.

The usefulness of single and combined mechanical parameters for predicting the mechanical properties of this timber species was studied. The combination of modulus of elasticity with density and knot ratio produces the highest correlation with strength, but a very good relationship was also found between strength and global modulus of elasticity by itself. Strength, stiffness and density profiles based on both the combined grading parameter and the modulus of elasticity were analysed, and very good yield was obtained in both cases, proving that this timber species may advantageously perform in a machine strength grading process. Both models were also applied to the sample of boards subjected to tension tests and their effectiveness was proved with similar yield to the one found for bending specimens. The dynamic method of measuring the fundamental frequencies of vibration was analysed and results give evidence of its effectiveness for determining the elastic properties of this timber species in different sizes and quality.

Other important aspects connected with the performance of this Argentinean sawn timber as a building material were studied and presented: i) influence of knot ratio on tensile strength parallel to the grain, ii) relationship between global and local modulus of elasticity in

bending, iii) compression strength and stiffness in relation to the bending ones, by testing specimens prepared from the same pieces, iv) fitness of the adjustment factors for bending strength and modulus of elasticity according to EN 384 (1996), v) influence of the source on timber properties, vi) influence of the distance to the pith, vii) influence of the height in the tree.

The results obtained encourage further studies regarding the other strength and stiffness properties of this fast-growing wood, which exhibits very good behaviour connected with the investigated values, and may therefore advantageously perform in solid as well as in glued laminated timber structures.

Key words: Visual strength grading; strength, stiffness and density profiles; mechanical properties; grading parameters; *Eucalyptus grandis*; machine strength grading; non destructive dynamic methods.

Lista de símbolos

Iniciados en letra griega minúscula

ρ	Densidad aparente de un trozo libre de defectos, cercano a la zona de rotura
$\bar{\rho}$	Valor medio de la densidad aparente
ρ_{05}	Percentil inferior 5% de la densidad aparente
ρ_k	Valor característico (5%) de la densidad aparente
ρ_{mean}	Valor característico (medio) de la densidad aparente
ρ_p	Densidad aparente promedio de todo el cuerpo de prueba
ϖ	Deformación
ϖ_1	Valor de la deformación correspondiente a F_1 en período elástico
ϖ_2	Valor de la deformación correspondiente a F_2 en período elástico

Iniciados en letra latina mayúscula

A	Area de la sección transversal de un cuerpo de prueba
C	Clase resistente para especies de coníferas y álamo
Ca	Ensayo a flexión con el cuerpo de prueba ubicado de canto
Co	Provincia de Corrientes
COV	Coefficiente de variación

D	Clase resistente para especies frondosas
$E_{0,05}$	Valor característico (5%) del módulo de elasticidad paralelo a las fibras
$E_{0,mean}$	Valor característico (medio) del módulo de elasticidad paralelo a las fibras
$E_{90,mean}$	Valor característico (medio) del módulo de elasticidad perpendicular a las fibras
$E_{c,0}$	Módulo de elasticidad en compresión paralela a las fibras
$\bar{E}_{c,0}$	Valor medio del módulo de elasticidad en compresión paralela a las fibras
E_f	Módulo de elasticidad dinámico flexional
E_l	Módulo de elasticidad dinámico longitudinal
E_m	Módulo de elasticidad en flexión
$E_{m,g}$	Módulo de elasticidad global en flexión
$\bar{E}_{m,g}$	Valor medio del módulo de elasticidad global en flexión
$E_{m,l}$	Módulo de elasticidad local en flexión
$\bar{E}_{m,l}$	Valor medio del módulo de elasticidad local en flexión
$E_{t,0}$	Módulo de elasticidad en tracción paralela a las fibras
$\bar{E}_{t,0}$	Valor medio del módulo de elasticidad en tracción paralela a las fibras
Ec	Ecuación
ER	Provincia de Entre Ríos
F	Carga aplicada
F_1	Menor valor elegido para la carga aplicada en período elástico
F_2	Mayor valor elegido para la carga aplicada en período elástico
$F_{m\acute{a}x}$	Carga máxima aplicada
G	Módulo de cizalladura
G_{mean}	Valor característico (medio) del módulo de cizalladura
H	Contenido de humedad de un trozo libre de defectos
I	Momento de inercia de la sección
K	Nudosidad expresada con relación al lado en el que se manifiesta el nudo
KAR	Nudosidad expresada con relación al área de la sección transversal
KAR_{vi}	KAR aplicable solamente a vigas
K_{ta}	K aplicable solamente a tablas
K_{vi}	K aplicable solamente a vigas
M	Muestra
$M\acute{a}x$	Valor máximo
Med	Valor medio
$M\acute{i}n$	Valor mínimo
MOE	Módulo de elasticidad

Lista de símbolos

MOR	Módulo o tensión de rotura
P	Ensayo a flexión con el cuerpo de prueba ubicado de plano
PC	Parámetro combinado de clasificación por resistencia
S	Desviación estándar
V_c	Volumen del cuerpo de prueba
V_l	Volumen de un trozo libre de defectos
W	Módulo resistente de la sección

Iniciados en letra latina minúscula

a	Distancia entre la carga y el apoyo en el ensayo de flexión estática
a_f	Distancia entre las cargas aplicadas en el ensayo de flexión estática
ab	Ataques biológicos
b	Ancho de la sección de un cuerpo de prueba flexionado o dimensión transversal menor de uno traccionado o comprimido
cp	Cuerpo de prueba
$f_{c,0}$	Tensión de rotura en compresión paralela a las fibras
$f_{c,0,05}$	Percentil inferior 5% de la tensión de rotura en compresión paralela a las fibras
$f_{c,0,k}$	Valor característico de la tensión de rotura en compresión paralela a las fibras
$f_{c,90,k}$	Valor característico de la tensión de rotura en compresión perpendicular a las fibras
f_f	Frecuencia fundamental de vibración flexional
f_l	Frecuencia fundamental de vibración longitudinal
f_m	Tensión de rotura en flexión
\bar{f}_m	Valor medio de la tensión de rotura en flexión
$f_{m,075}$	Percentil inferior 7,5% de la tensión de rotura en flexión
$f_{m,k}$	Valor característico de la tensión de rotura en flexión
$f_{t,0}$	Tensión de rotura en tracción paralela a las fibras
$f_{t,0,05}$	Percentil inferior 5% de la tensión de rotura en tracción paralela a las fibras
$f_{t,0,k}$	Valor característico de la tensión de rotura en tracción paralela a las fibras
$f_{t,90,k}$	Valor característico de la tensión de rotura en tracción perpendicular a las fibras
$f_{v,k}$	Valor característico de la tensión de rotura en cortante
fis	Fisuras
gd	Grandes defectos
h	Alto de la sección de un cuerpo de prueba flexionado o dimensión transversal

	mayor de uno traccionado o comprimido
i	Radio de giro de la sección en el plano de la vibración
if	Inclinación general de las fibras
k_1	Constante dependiente del modo de vibración
k_{def}	Coefficiente para el cálculo de la deformación diferida
k_h	Coefficiente de corrección en función del valor de h
k_l	Coefficiente de corrección en función de la disposición del ensayo de flexión
k_s	Coefficiente de corrección en función de la cantidad y tamaño de muestras
k_v	Coefficiente de corrección en función del tipo de clasificación por resistencia
l	Separación entre apoyos de un cuerpo de prueba sometido a flexión, distancia libre entre mordazas para tracción y longitud total para compresión
l_1	Longitud utilizada para medir las deformaciones y calcular el <i>MOE</i>
l_{es}	Coefficiente obtenido con las longitudes normalizadas de la prueba de flexión
l_{et}	Coefficiente obtenido con las longitudes reales de la prueba de flexión
l_t	Longitud total del cuerpo de prueba
m_a	Masa anhidra de un trozo libre de defectos
m_c	Masa del cuerpo de prueba
m_t	Masa de un trozo libre de defectos
m_n^4	Constante dependiente del modo de vibración
m_v	Modo de vibración
$méd$	Médula
n	Número de cuerpos de prueba
p	Probabilidad asociada al nivel de significación de una prueba estadística
pm	Posición respecto de la médula
pr	Procedencia
r	Coefficiente de correlación
$rech\ vis$	Rechazo visual
tr	Troza

1 Introducción

En este primer capítulo se explica la esencia del problema planteado y se detallan los objetivos trazados, con una breve descripción de la metodología utilizada para alcanzarlos. Se mencionan los antecedentes relacionados al caso y los fundamentos que justifican la realización de la investigación, junto a la presentación de una síntesis de los resultados logrados.

1.1 Presentación del problema

En la República Argentina hay más de 200000 hectáreas plantadas con eucaliptos, de las cuales más del 60% están localizadas en la Mesopotamia, totalizando aproximadamente 130000 hectáreas, con una gran predominancia de la especie *Eucalyptus grandis* (INTA, 1995). La misma encuentra en esta región condiciones naturales favorables para su cultivo, produciendo excelentes rendimientos debido al rápido crecimiento y a la calidad de su madera. Su cultivo comenzó en la década del 50, alcanzando su mayor incremento a partir de 1970, fundamentalmente en las provincias de Corrientes y Entre Ríos.

La incorporación de tecnologías adecuadas impulsó el desarrollo de productos de excelente calidad, como los tableros fenólicos, entre otros, pero la utilización de la madera aserrada de *Eucalyptus grandis* en la construcción se ha producido sin conocer sus propiedades físicas y mecánicas más importantes y en la ausencia de un marco normativo que garantice la calidad necesaria para un buen uso (Belvisi et al., 1998). Estas condiciones condujeron a una pérdida de prestigio del material y, consecuentemente, a su empleo en estructuras poco importantes, con escaso valor agregado.

Un caso particular de utilización de esta especie es el constituido por las tablas destinadas a la construcción de vigas laminadas encoladas. Durante muchos años las láminas fueron empleadas luego de eliminar todos los defectos visibles en las mismas, lográndose en consecuencia un material de excelente calidad, pero con valores resistentes y de rigidez desconocidos. Por su parte, la extracción total de defectos conduce a la fabricación de numerosas uniones dentadas (finger joint), las cuales generan costos adicionales y en muchas ocasiones debilitan más la tabla que la presencia de los defectos eliminados.

Para revertir la pérdida de competitividad frente a otros materiales de construcción en general y a otras especies en particular, para uso estructural, es necesario en primer lugar determinar sus propiedades mecánicas, como la resistencia y la rigidez ante distintos tipos de esfuerzos, y las propiedades físicas más importantes. A su vez, estudiar la influencia que los defectos ejercen sobre esas propiedades y desarrollar un método que permita clasificar las piezas aserradas en distintas calidades, con propiedades garantizadas (Blaß & Görlacher, 1996; Glos, 1995b). De esta manera se podría eliminar el desconcierto que existe tanto en los proyectistas como en los constructores, comerciantes y usuarios en general, acerca de su comportamiento.

Resulta entonces de fundamental importancia clasificar por resistencia la madera aserrada de *Eucalyptus grandis* cultivado en Argentina, como primer paso para resolver el problema existente y potenciar su empleo como material estructural, garantizando la confiabilidad que los modernos conceptos de diseño llevan implícita. El método a desarrollar debe estar fundamentado en los modernos conceptos publicados sobre el tema, y a su vez reunir las condiciones de sencillez en su aplicación, que un país carente de tradición en la temática como Argentina requiere para lograr una efectiva utilización práctica del mismo. Los métodos complejos generan dificultades en su aplicación aún en países con gran experiencia en la clasificación por resistencia (Glos & Diebold, 1987). La expansión de la utilización de este recurso generaría además un aumento de la actividad económica regional y mejoras sustanciales en el medio ambiente, tanto por la escasa energía requerida para su transformación como por el favorable efecto que las plantaciones programadas causan sobre la atmósfera (Vihavainen, 1995).

1.2 Antecedentes y fundamentación

No se conocen antecedentes sobre el desarrollo de un método de clasificación por resistencia para la madera aserrada de *Eucalyptus grandis* cultivado en el país, y tampoco referidos a la realización de ensayos mecánicos planificados sobre cuerpos de prueba de tamaño estructural. Las publicaciones e informes referidos a esta especie (INTA, 1995) se relacionan con otros objetivos

que los perseguidos en este trabajo, involucrando una relativamente reducida cantidad de pruebas llevadas a cabo sobre probetas pequeñas y libres de defectos. Por lo tanto, no responden a la concepción actual de determinación de los valores característicos de resistencia, rigidez y densidad aparente, sobre probetas de tamaño y condiciones normales de uso en estructuras, obtenidas a través de un muestreo diseñado para tal fin, como el presentado en la norma europea EN 384 (1996).

El sistema de clases resistentes previsto en EN 338 (1996), en pleno afianzamiento en el nivel internacional (Glos, 1995a), contempla la inserción en el mismo de nuevas normas de clasificación por resistencia, con la condición que estén probadas sobre una base estadística confiable para una determinada especie y procedencia de la misma (Europäisches Komitee für Normung, 1998b). Es decir que actualmente es necesario investigar y considerar el conjunto “método de clasificación/especie/procedencia” para lograr un material con reconocimiento internacional. Sus valores característicos de resistencia, rigidez y densidad, deben estar determinados sobre una base científica que otorgue adecuada confiabilidad conforme al moderno concepto de diseño estructural por estados límite.

La inexistencia de un método de clasificación por resistencia tiene como consecuencia el desaprovechamiento de las piezas que exhiben mayor calidad, pues ellas no pueden ser distinguidas de aquellas de menor resistencia, sobre la base de un método confiable. La gran dispersión en los resultados conduce a la consideración de valores característicos globales muy bajos para la resistencia, rigidez y densidad aparente, en comparación con los que se obtendrían separando adecuadamente grupos de diferente calidad. Por lo tanto, el uso adecuado de este recurso natural está ligado al diseño de un método de clasificación por resistencia para las piezas aserradas que de él se obtienen, y al conocimiento de sus propiedades físicas y mecánicas.

1.3 Objetivos y metodología de desarrollo

Esta tesis persigue dos objetivos principales:

- 1) Diseñar un método de clasificación visual por resistencia para la madera aserrada de *Eucalyptus grandis* cultivado en Argentina, y proponer su inserción en el sistema internacional de clases resistentes establecido en las normas europeas.
- 2) Desarrollar modelos para una clasificación mecánica por resistencia de la madera considerada, en el marco del sistema internacional citado precedentemente.

Para alcanzar estos objetivos y ampliar el conocimiento de esta especie con fines estructurales, numerosos interrogantes deben ser investigados y respondidos:

- Cuáles son los parámetros visuales y mecánicos de mayor correlación con la resistencia?
- Cuáles son los valores característicos de la resistencia y del módulo de elasticidad en flexión, así como de la densidad aparente, y su relación con los parámetros más importantes?
- Qué relaciones vinculan la resistencia y rigidez en flexión, así como la densidad aparente, con las otras propiedades?
- Cuál es la efectividad de los métodos dinámicos para determinar el módulo de elasticidad?
- Cuál es la variabilidad de las propiedades físicas y mecánicas más importantes?.

Teniendo en cuenta los objetivos planteados, se diseñó una investigación empírica sobre 7 muestras con un total de 550 cuerpos de prueba representativos de la población a analizar. Las probetas fueron seleccionadas al azar de plantaciones ubicadas en las regiones de mayor importancia para el cultivo de la especie, que son el Nordeste de Corrientes y el Nordeste de Entre Ríos. El tamaño de las piezas respondió a las medidas estructurales más usuales, y su producción y secado a los procesos habituales para el país.

Las determinaciones y ensayos se llevaron a cabo conforme a la normativa y prácticas de reconocimiento en los países con mayor desarrollo en la temática, de manera de obtener resultados con la precisión y condiciones requeridas para su comparación en el nivel internacional. El marco teórico de referencia para el análisis y discusión, que se expone en el Capítulo 2, fue elaborado considerando publicaciones científicas y normas que delinean el estado actual del conocimiento y las modernas tendencias en la materia. El listado de la bibliografía se encuentra en el Capítulo 6. Los materiales y métodos empleados están detallados en el Capítulo 3, habiéndose desarrollado las actividades en el Departamento de Construcciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata y en el Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Concepción del Uruguay de la Universidad Tecnológica Nacional, en cooperación con la Cátedra Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe. El trabajo contó con el apoyo de empresas madereras de las provincias de Corrientes y Entre Ríos y de la Red de Instituciones para el Desarrollo Tecnológico de la Industria Maderera de nuestro país (RITIM).

1.4 Resultados

El trabajo de tesis ha permitido alcanzar los objetivos planteados, conocer importantes particularidades de la especie analizada, y a su vez ha hecho surgir nuevos interrogantes que

ameritan futuras investigaciones. A continuación se efectúa un breve resumen de los resultados alcanzados, cuya presentación y discusión se lleva a cabo en el Capítulo 4 y sus conclusiones son expuestas en el Capítulo 5. Entre ellos se destaca:

- Los estudios de correlación y regresión, tanto simple como múltiple, llevados a cabo entre distintos parámetros y la resistencia, así como la determinación de las propiedades de resistencia, rigidez y densidad aparente, han producido soluciones originales que se materializan en el desarrollo de un método visual de clasificación por resistencia de sencilla aplicación, y en el análisis de distintos modelos aptos para clasificar mecánicamente por resistencia esta especie.
- Las relaciones rigidez/densidad y resistencia/densidad encontradas son elevadas en comparación con las obtenidas para la especie en otros continentes, y a su vez resultan más similares a las encontradas para las especies de coníferas que para las maderas provenientes de especies frondosas.
- La resistencia y la rigidez en tracción comparan bien con las de flexión, en tanto que la resistencia y la rigidez en compresión son elevadas con relación a las de flexión, en comparación con las relaciones previstas en las normas.
- La eficiencia del método basado en la frecuencia fundamental de vibración para determinar el módulo de elasticidad fue comprobada para la especie estudiada. Se confirmó la existencia de una excelente correlación entre los valores obtenidos a través de los ensayos estáticos estandarizados y de los determinados por medio de vibraciones longitudinales y flexionales. Los resultados corroboran asimismo su aptitud para piezas estructurales de distintas dimensiones y calidad.

El trabajo aporta datos que permiten esclarecer otros aspectos complementarios, que mejoran el conocimiento de la especie como material estructural. Dentro de estos se encuentran:

- La influencia de la nudosidad sobre la resistencia en tracción paralela a las fibras.
- Las diferencias existentes entre el módulo de elasticidad global y el local en flexión, como consecuencia de la acción del esfuerzo cortante.
- La relación existente entre las propiedades mecánicas de flexión y de compresión en probetas obtenidas de la misma pieza aserrada.
- La aptitud, para esta especie, de los ajustes propuestos para las condiciones de referencia de la resistencia y el módulo de elasticidad.
- La influencia que la región de cultivo ejerce sobre las principales propiedades del material.
- La variación de las propiedades en función de la distancia a la médula.
- La variación de las propiedades en función de la altura en el árbol.

De la discusión de los resultados, así como de las conclusiones, surge la necesidad de

efectuar nuevas investigaciones, las que son también expuestas en el Capítulo 5. En particular, se comenzó con el desarrollo de un programa destinado a estudiar las deformaciones diferidas en flexión para vigas aserradas de esta especie, bajo cargas permanentes de un año de duración. Un detalle de este proyecto complementario se presenta en el Anexo B.

2 Clasificación por resistencia y características del E. grandis

En el presente capítulo se desarrolla el marco teórico de referencia necesario tanto para el diseño y ejecución de la investigación, como para la discusión de los resultados que la misma produce. Se analizan las propiedades más significativas de la madera como material estructural y, con enfoque en la clasificación por resistencia, se presenta el estado actual del conocimiento y las modernas tendencias en lo referente al desarrollo de métodos de clasificación tanto visuales como mecánicos. En particular se describe el sistema internacional de clases resistentes contemplado en las normas europeas, que reviste una importancia destacada en la actualidad. Por último, se analizan las características particulares de la especie *E. grandis*.

2.1 La clasificación por resistencia

La clasificación por resistencia conduce a dividir una población de madera en clases, o grupos, de distinta calidad, sobre la base de un análisis individual de cada pieza estructural. Esta inspección, que puede ser visual o mecánica, tiene en cuenta el nivel de los parámetros considerados y, en función de los límites establecidos para los mismos, origina la asignación de cada elemento a una determinada clase resistente. A diferencia de la clasificación relacionada a aspectos estéticos, la clasificación por resistencia se fundamenta en la influencia que los parámetros ejercen sobre las propiedades mecánicas del material, y la medición de los mismos se realiza con ese objetivo (Comité Europeo de Normalización, 1997).

Existen actualmente en el mundo dos sistemas de clasificación por resistencia de madera aserrada para uso estructural, el visual y el mecánico. Los países con mayor tradición en la

temática han desarrollado a través del tiempo sus propios métodos, basados en su experiencia y conocimiento de las especies utilizadas. Hasta comienzos del siglo veinte la clasificación visual se realizaba fundamentalmente apoyándose en experiencias regionales, habiéndose comenzado a desarrollar las primeras reglas detalladas en la década de 1920 en Estados Unidos de Norteamérica y en la de 1930 en varios países europeos (Glos, 1995b). Las máquinas de clasificar fueron introducidas a partir de la década de 1960, permitiendo evaluar parámetros no percibidos visualmente e incorporando mayor precisión y velocidad al proceso (Glos & Diebold, 1994; Glos, 1995b).

Las numerosas normas de clasificación redactadas en las décadas posteriores difieren en los parámetros considerados 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. En este sentido pueden consultarse, entre otras, la norma alemana DIN 4074, Teil 1 (1989), la estadounidense ASTM D 245-98 (1999) y la australiana AS 2082/2000 (2000). Todas tienen en común la consideración de la correlación existente entre los parámetros considerados y la resistencia y rigidez del material evaluado.

Los modernos conceptos de diseño estructural, basados en los estados límite de resistencia y de servicio, requieren del conocimiento preciso de los valores característicos de las propiedades mecánicas del material. La consideración de una población de madera aserrada sin clasificar conduce a la obtención de valores característicos muy bajos, como consecuencia de la naturalmente alta dispersión de sus propiedades. Por el contrario, la división de la población original en clases, que constituyen sub-poblaciones de características más homogéneas, permite sacar provecho de las piezas de mayor calidad y a su vez trabajar con mayor confiabilidad. Razones técnicas y económicas son, entonces, las que justifican la clasificación por resistencia de este material (Blaß & Görlacher, 1996; Glos, 1995b; Glos & Lederer, 2000).

Asociada a la modernización de los conceptos de diseño y a la conformación de grandes bloques culturales y económicos, existe actualmente una fuerte tendencia hacia la adopción de criterios técnicos de equivalencia internacional. Un claro ejemplo en este sentido es el desarrollo de las normas europeas, que, para el caso particular de las estructuras de madera, acompañan a los criterios de diseño establecidos en el Eurocódigo 5. La norma EN 338 (1996) establece un sistema internacional de clases resistentes que permite insertar en el mismo grados de calidad para distintas especies y procedencias, con la condición que las normas de clasificar utilizadas respondan a los requisitos establecidos en la norma EN 518 (1996) para métodos visuales, y en la EN 519 (1996) para procesos mecánicos. Estas últimas se encuentran actualmente en proceso de actualización a través de los proyectos prEN 14081-1/2/3 (2000).

2.1.1 Características generales de la madera como material estructural

El punto de partida para lograr un correcto uso de este material en estructuras es conocer sus propiedades físicas y mecánicas más importantes. Los métodos de clasificación por resistencia encuentran su fundamento en la correlación existente entre esas propiedades y las características consideradas como variables independientes, con capacidad de predecir la capacidad mecánica. Es decir que la eficiencia de un determinado parámetro, sea de detección visual o mecánica, se verifica por su capacidad para predecir la resistencia, la rigidez y la densidad aparente del material analizado, pues estas propiedades definen la calidad y el comportamiento estructural del mismo. Tanto las características como las propiedades están íntimamente ligadas a la organización interna, la cual debe ser abordada tanto en su micro, como en su macro estructura, para posibilitar la explicación de sus respuestas en diversas condiciones.

La madera es un sólido natural, de porosidad fina. Su naturaleza es orgánica, compuesta fundamentalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina. De acuerdo a la especie, se encuentran presentes también resinas, terpenos, taninos, minerales y sustancias incrustantes. Debido a la forma alargada de las paredes de las células y a su estructura orientada, así como a las diferencias que presentan por su función y la época y forma de crecimiento, es fuertemente heterogénea y anisótropa, lo cual motiva que las propiedades se deban analizar según tres direcciones principales, la longitudinal, la radial y la tangencial (Coronel, 1994; Hoffmeyer, 1995). Su obtención proviene de dos categorías de árboles conocidos como angiospermas y gimnospermas. Al primer grupo pertenecen las especies frondosas, provenientes de árboles con hojas caducas, y en el segundo se incluyen las especies de coníferas. Si bien el objetivo de este trabajo no es profundizar los detalles referidos a estos dos grupos, es necesario considerar algunas características básicas de cada uno, pues tienen gran influencia en las propiedades físicas y mecánicas, diferenciándose claramente en algunos aspectos.

Las especies frondosas presentan una anatomía más compleja, conteniendo un mayor número de tipos de células que cumplen distintas funciones fisiológicas. Se pueden diferenciar a las fibras, que proveen la resistencia mecánica, constituyendo el tejido de sostén, con paredes celulares más gruesas que en las coníferas y longitudes comprendidas entre 1mm y 1,5mm. Dentro de este tejido se distribuye un segundo tipo, los vasos conductores, con diámetros variables entre 0,02mm y 0,5mm, que se extienden verticalmente en el árbol y aparecen con distinta distribución según las especies. La porosidad existente en aquellos casos, en los cuales se distinguen claramente los vasos más grandes en la madera temprana, de los pequeños en la madera tardía, recibe el nombre de anular. Si esa distribución no presenta un cambio brusco se denomina porosidad semianular. Sin

embargo, en la mayoría de las especies existe una disposición irregular de los vasos, recibiendo el nombre de porosidad difusa. Un tercer grupo es el constituido por el tejido de almacenamiento o parénquima, que aparece tanto en sentido longitudinal como radial, y su número es mayor que en las coníferas.

Las especies de coníferas muestran una estructura más simple, con mayoría de fibras traqueidas, de longitud variable entre *2mm* y *5mm* y esbeltez muy grande, ya que el diámetro es aproximadamente la centésima parte de su longitud. Este tejido, que constituye un porcentaje variable entre el 90% y el 95% del total, cumple la función de dar resistencia y a su vez de transportar alimentos. Se organiza en filas radiales, presentando paredes más gruesas y menores diámetros en la madera tardía que en la temprana, originando diferentes densidades, y su longitud coincide con la dirección del eje del árbol. El otro grupo es el constituido por el tejido de reserva, el parénquima, que se ocupa de almacenar los elementos nutritivos y se desarrolla fundamentalmente en sentido radial. Los canales de resina son longitudinales y forman cavidades en el tejido. En la Figura 2.1 puede apreciarse la mayor complejidad de la estructura anatómica presente en las especies frondosas en comparación con la de las especies de coníferas.

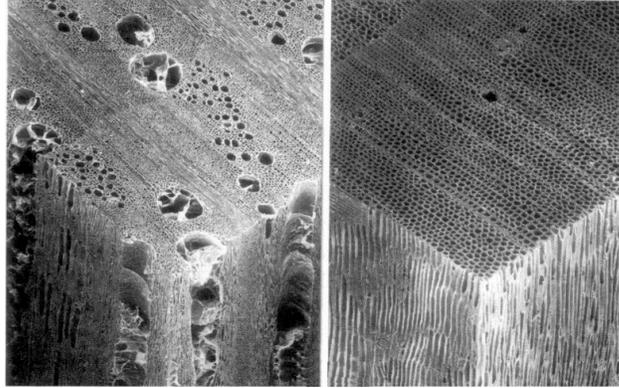


Figura 2.1 Estructura anatómica de la madera

Izquierda: especie frondosa; derecha: especie de coníferas; escala 45:1 (adaptada de Hoffmeyer, 1995)

A pesar de las diferencias existentes, las características fundamentales de las paredes celulares son comunes a la mayoría de las especies. La sustancia básica que la compone es la celulosa, que se presenta agregada en unidades largas llamadas fibrillas elementales, las que, a su vez, se unen para formar las microfibrillas, en las cuales la celulosa está embebida en una matriz de hemicelulosa y revestida por lignina. Los espacios existentes entre las fibrillas elementales son

accesibles a las moléculas de agua y, consecuentemente una microfibrilla, formada por la unión de varias fibrillas elementales, es hinchable.

La capa existente entre las células individuales se denomina laminilla media, la que mantiene la cohesión necesaria para formar el tejido y está compuesta fundamentalmente por lignina y pectina. Entre ésta y el espacio interior, denominado lumen, se ubica la pared celular, que posee tres capas denominadas pared primaria, secundaria y terciaria. La pared primaria se encuentra en contacto con la laminilla media y en la misma las microfibrillas se orientan al azar, entrelazándose, siendo su espesor muy delgado. La secundaria se puede descomponer en tres partes bien diferenciadas, una externa muy delgada, con un espesor del orden de décimas de micrómetro, que presenta un promedio de inclinación de las microfibrillas, con respecto al eje de la célula, de entre 50° y 70°. Una parte media que cuenta con un mayor espesor, de varios micrómetros, y con las microfibrillas orientadas mayoritariamente en la dirección longitudinal (de 5° a 20°). Finalmente, una parte interna que no ofrece un orden estricto en su orientación. La pared terciaria se ubica contra el espacio interior de la célula. La Figura 2.2 muestra esquemáticamente la organización de las células, donde se puede apreciar la disposición de la laminilla media, en el contorno, y el espacio interior en cada una. Entre ambos, y para una célula en particular, se detalla la estructura de la pared, con sus tres capas características, de las cuales sobresalen las tres partes que constituyen la capa media, conforme a la descripción efectuada anteriormente.

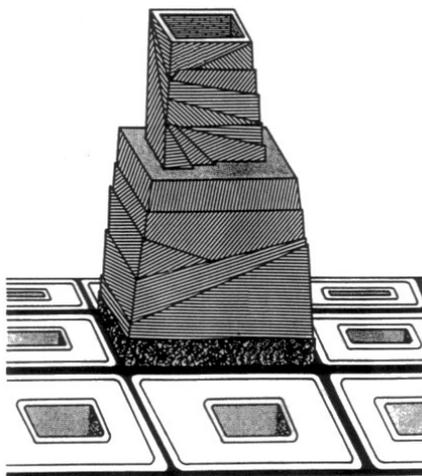


Figura 2.2 Estructura de una célula

(Adaptada de Hoffmeyer, 1995)

La estructura de la pared celular puede analizarse también, desde el punto de vista de su comportamiento estructural, considerando que la capa media de la pared secundaria, que es la más importante, puede absorber los esfuerzos de tracción favorablemente, debido a la orientación predominantemente longitudinal de las microfibrillas que la integran. A su vez cuando es sometida a esfuerzos de compresión, ésta es contenida y arriostrada contra su flexión lateral o pandeo flexional tanto por la capa externa como por la interna, que tienen una mayor inclinación de las fibras.

Considerando los aspectos macro estructurales de la madera, el crecimiento vertical del árbol ocurre en forma continua, y, del mismo, en la parte central, aparece la médula, que en general tiene menor calidad que el resto de la madera. El crecimiento de las capas periféricas del tronco, responsables por el desarrollo horizontal, da lugar a la formación de los anillos anuales de crecimiento. El tejido celular que produce la nueva madera se denomina cambium y está ubicado en la parte externa, recubierto por la cáscara, o corteza, y es muy delgado. Si se observa a simple vista la sección transversal del tronco, se puede apreciar que ese desarrollo se produce con dos tipos diferentes de tejidos, que responden a la madera generada en primavera, o leño temprano, y a la formada en el otoño, o leño tardío, respectivamente. Ambos, sumados, constituyen un anillo anual. La diferencia entre ambos tejidos es más nítida en algunas especies que en otras, pero, en general, los formados en primavera poseen células de paredes más delgadas y mayor lumen, para facilitar el transporte de savia. Por el contrario, los de otoño tienen células con mayor espesor de paredes y menores huecos, confiriendo mayor resistencia al material que conforman.

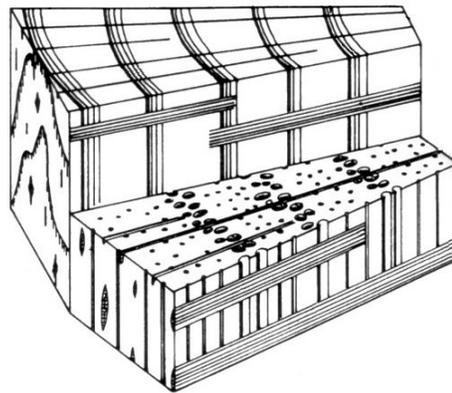


Figura 2.3 Estructura macroscópica de la madera

Izquierda y arriba: especie de coníferas; Derecha y abajo: especie frondosa; (adaptada de Hoffmeyer, 1995)

La madera generada en primavera es en general de color más claro y posee menor densidad que la del otoño, precisamente como consecuencia del menor espesor de sus paredes. Si bien es necesario tener en cuenta algunas variables tales como la especie, el clima y las condiciones del suelo donde se desarrolla la planta, entre otras, en general existe una relación entre el espesor de los anillos y la densidad. En la mayoría de las coníferas, el espesor de leño tardío, de otoño, se mantiene casi constante y la diferencia se produce en el espesor del leño temprano, por lo cual a un mayor espesor del anillo corresponde una menor densidad. Si se toma el caso de las maderas de especies frondosas con porosidad anular, éstas, en general se caracterizan por formar anillos de madera de primavera con marcados poros, los vasos conductores, y con espesor casi constante, apareciendo la variación en el leño tardío, y, en consecuencia, a mayor espesor de los anillos corresponde mayor densidad. Esta circunstancia no se presenta cuando la porosidad es difusa. La relación entre el espesor de los anillos anuales y la densidad, explica la causa por la cual, en la mayoría de las normas de clasificación visual de piezas de madera, se considera al mencionado espesor como un parámetro de importancia, y, en el caso de las coníferas, a menor espesor, mayor calidad de madera. La Figura 2.3, en la cual se presenta un bloque de una madera típica de especies de coníferas y otro de especies frondosas, ilustra la descripción efectuada, siendo visible la facilidad de apreciación de los anillos anuales de crecimiento para el primer caso.

A su vez, en la medida que transcurre la edad del árbol y aumenta la cantidad de anillos, se generan dos grandes zonas en su sección transversal. La parte más joven, la externa, por la cual asciende la savia desde las raíces hacia el extremo superior, se denomina albura. Con el paso del tiempo las células son modificadas, incrustadas con extractivos orgánicos, dando lugar a la formación del duramen en la zona interior. Este es generalmente más denso, menos permeable y más resistente a los ataques de insectos y hongos. A su vez, puede considerarse otra diferencia entre los anillos de crecimiento que se formaron en la época temprana del árbol, habitualmente entre 5 y 20, con aquellos que ocupan la parte exterior del tronco. A la madera formada por los primeros, se le denomina madera juvenil, en alusión a la edad del árbol cuando ella se constituyó, y al resto se le denomina madera adulta. Esta apreciación es más importante en las especies de coníferas, en las cuales la madera juvenil presenta fibras más cortas, con espesores de paredes más delgados y una mediana inclinación de las microfibrillas en la capa media de la pared secundaria. Como consecuencia, la madera juvenil, que se encuentra en este tipo de árboles comprendida fundamentalmente en el duramen, presenta menor resistencia y rigidez, y mayores tenores de contracción y expansión que la madera adulta.

Las anomalías de importancia para el uso estructural de la madera, pues influyen sobre sus propiedades resistentes y de rigidez, provienen tanto de las condiciones de crecimiento del árbol, como del proceso de producción de la madera aserrada. Las más significativas debidas al

crecimiento son la presencia de nudos y la desviación de las fibras.

Los nudos se originan como consecuencia de la existencia de ramas que se desprenden del tronco principal y están conectadas hasta la médula. En la medida que los sucesivos anillos de crecimiento engrosan la parte exterior del árbol, la parte incluida de la rama, la cual también aumenta su diámetro, forma un cono que se desarrolla junto con el tronco. Cuando el corte de la pieza extraída del tronco principal interesa a ese cono, se encuentra un nudo, el cual, en este caso, se denomina nudo fijo. Si la rama se desprende, las sucesivas capas de madera nueva envuelven al cono que ella formaba, el cual no se desarrolla más en conjunto con el árbol ni afecta a los nuevos anillos externos de crecimiento, dando lugar a la formación de un nudo flojo o suelto, que incluso puede contener parte de la cáscara. Es fácil comprender que una adecuada poda puede provocar que en una sección transversal se encuentre un importante manto exterior de madera sana, ya que la eliminación de las ramas en forma temprana ocasiona que los nudos queden solamente en la zona interior del tronco, cercana a la médula. En la Figura 2.4 puede apreciarse tanto la interrupción como la desviación de las fibras que ocasiona la presencia de un nudo, lo que constituye una anomalía que afecta la resistencia y rigidez del material.

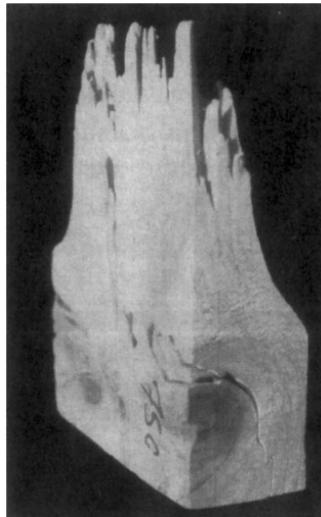


Figura 2.4 Anomalías producidas por la presencia de un nudo

(Adaptada de Hoffmeyer, 1995)

Existen particularidades que es necesario tener en cuenta para las distintas especies. En el caso de las coníferas, que tienen un tronco dominante del cual se desprenden ramas a intervalos regulares, se encuentran espacios sin nudos seguidos luego de grupos de los mismos.

Este agrupamiento es más difícil de encontrar en especies frondosas. Un agrupamiento de nudos típico de las especies de coníferas se puede observar en la Figura 2.5. Los nudos constituyen un defecto al cual investigadores y normas le atribuyen una gran importancia en el uso estructural de la madera, por la reducción que producen en las propiedades mecánicas, y son considerados tanto en forma individual como en forma grupal (Glos & Diebold 1987).

Por su parte, y teniendo en cuenta la descripción efectuada anteriormente de la microestructura de la pared celular y su comportamiento frente a los esfuerzos, resulta de consideración el paralelismo que las fibras de las piezas presentan con relación a su eje longitudinal. En este sentido, desde que las mayores resistencias y rigideces se alcanzan en la dirección de las fibras, para aquellos árboles en los cuales el crecimiento ordena las células en forma no vertical sino espiralada, los cortes producen piezas con sus propiedades mecánicas muy afectadas. La nudosidad, el espesor de los anillos anuales de crecimiento y la desviación de la dirección de las fibras, en consideración a lo expuesto, son características ligadas al crecimiento del árbol que se encuentran limitadas en las normas de clasificación con fines estructurales, tanto para especies frondosas como de coníferas (Deutsches Institut für Normung e. V., 1989a; Southern Pine Inspection Bureau, 1994; Standards Australia, 2000).

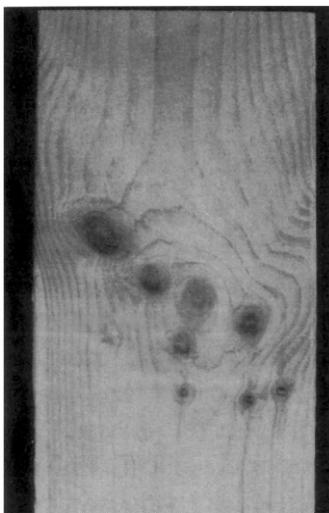


Figura 2.5 Agrupamiento de nudos

(Adaptada de Hoffmeyer, 1995)

A estas características se suman otras de importancia para usos estructurales, pero relacionadas tanto a la constitución interna de la madera como a los procesos de su producción y

exposición al medio ambiente. En este sentido es importante destacar la producción de fisuras, que normalmente ocurre como consecuencia de los diferentes niveles de contracción que experimenta este material según las tres direcciones principales de análisis. La contracción de una pieza de madera se produce como consecuencia de la pérdida de agua de impregnación, es decir la que está contenida en las paredes celulares y por lo tanto su variación las modifica. El contenido de humedad correspondiente al punto de saturación de las fibras se sitúa, para la mayoría de las especies, entre el 25% y el 35%, siendo el valor de $H = 28\%$ suficientemente aproximado para los fines prácticos (Hoffmeyer, 1995). La acumulación de agua por encima de ese punto no produce variaciones en las paredes celulares, ya que se deposita en los orificios, permaneciendo las propiedades físicas y mecánicas prácticamente constantes. La fuerte anisotropía que caracteriza a este material origina grandes diferencias en el valor de las contracciones, experimentándose las mayores en la dirección tangencial, que pueden alcanzar hasta un 10%, siguiéndole en importancia la radial con un 6% y en menor medida la longitudinal con un 0,5%. Debe considerarse que estos valores son estimativos y varían, si se tiene en cuenta la heterogeneidad del material. Este comportamiento produce deformaciones no deseadas en piezas individuales y en estructuras compuestas, y también ocasiona rajaduras y torceduras durante el proceso de secado. Su conocimiento y limitación son especialmente importantes cuando se desean lograr tiempos breves en el secado artificial, que es el que se efectúa con regulación de humedad y temperatura, para reducir el contenido de humedad en la madera aserrada (H) por debajo del 20%. Las deformaciones normalmente no provocan disminuciones en las propiedades mecánicas pero las fisuras deben ser investigadas, siendo más importantes sus consecuencias en los elementos sometidos a flexión que en los solicitados a tracción o compresión paralela a las fibras, conforme al criterio de la norma estadounidense ASTM D 245-98 (1999).

El contenido de humedad en la madera, mientras se encuentra situado por debajo del punto de saturación de las fibras, como se expresó anteriormente, afecta su comportamiento físico y mecánico de manera fundamental. Es también un factor decisivo en lo referente a la durabilidad natural de este material, que es susceptible de ser atacado biológicamente por hongos o por insectos. El ataque de hongos se produce cuando el contenido de humedad se encuentra en un rango aproximado entre el 20% y el 30%, pues necesitan agua y oxígeno para su desarrollo, en cantidades que varían con la especie de que se trate. Su presencia puede disminuir sensiblemente la capacidad mecánica de la madera, y algunos tipos pueden sobrevivir períodos relativamente prolongados con poca humedad, lo que debe ser tenido en cuenta en el diseño y en los procesos de producción y clasificación de este material con destino estructural. La madera debe ser colocada con un contenido de humedad cercano al de equilibrio higroscópico en su condición de servicio, evitando que se produzcan fisuras por contracción originadas por variaciones bruscas de ese

contenido, las que también facilitan el ataque biológico.

El ataque de insectos, por su parte, representa generalmente un mayor peligro en zonas templadas, y fundamentalmente cálidas. La durabilidad natural depende de la especie y de la zona del tronco de la cual se extrajo la pieza, siendo en general más durable el duramen que la albura, y por otra parte, varía con el tipo de insectos de que se trate, mostrando normalmente especial agresividad las termitas. Cuando existen riesgos de ataques de este tipo es conveniente estudiar un tratamiento preservativo. La consideración de la influencia de las fisuras sobre las propiedades mecánicas de la madera, así como las consecuencias de agresiones de carácter biológico, deben estar presentes en una norma de clasificación por resistencia para reunir los requerimientos generales establecidos en el sistema internacional europeo de acuerdo con prEN 14081-1 (2000).

En los párrafos anteriores se hizo referencia a que la madera está formada por células de formas variadas, y que su estructura interna se puede analizar considerando fundamentalmente las direcciones longitudinal, radial y transversal. A su vez, la presencia de nudos y la desviación de las fibras, entre otras particularidades, ejercen normalmente una gran influencia sobre su comportamiento. A la anisotropía y heterogeneidad presentes en este material, se debe sumar la variabilidad que sus propiedades experimentan entre distintas especies, también entre regiones de cultivo, entre árboles, dentro de un mismo árbol y de una sección transversal (Coronel, 1994).

Según Hoffmeyer (1995), la estructura de las paredes de las células, la unión de éstas para constituir los tejidos de la madera libre de defectos, y las anomalías que presenta en tamaños de uso estructural, representan tres niveles fundamentales que es necesario considerar para comprender su comportamiento. En efecto, en el primer nivel se encuentra la explicación a las enormes diferencias experimentadas por la contracción y expansión en sentido transversal respecto del longitudinal (entre 10 y 20 veces superior para el primero). El segundo nivel ofrece la razón por la cual la rigidez encontrada en sentido longitudinal es entre 20 y 40 veces mayor que en el transversal. El tercer nivel, que considera la presencia de nudos, y otros defectos, explica la enorme diferencia que se encuentra para la resistencia a la tracción entre una probeta pequeña, libre de defectos y una de tamaño estructural que no sea de primera calidad.

Es de comprender entonces, que las propiedades físicas y mecánicas estarán muy influenciadas por estas particularidades de la estructura interna. El estudio de aquellas es parte de la tecnología de la madera y tiene como objetivo obtener valores de magnitudes físicas, de resistencia y rigidez que permitan profundizar su conocimiento para mejorar sus condiciones de uso. Coronel (1994) denomina propiedades físicas de la madera a aquellas que determinan su comportamiento ante los factores que intervienen en el medio ambiente natural, sin que éste actúe química o mecánicamente sobre su estructura interna. Por su parte, considera que las propiedades mecánicas son aquellas que indican su comportamiento resistente y elástico bajo la acción de cargas o

solicitaciones exteriores.

Las propiedades físicas más destacadas para el uso estructural de la madera son el contenido de humedad y la densidad aparente. Anteriormente se mencionó que la primera tiene una incidencia directa sobre los fenómenos de contracción y expansión cuando experimenta variaciones por debajo del punto de saturación de las fibras, pudiendo ocasionar deformaciones y fisuras. A su vez, para determinados niveles en su contenido, posibilita el desarrollo de agentes biológicos perjudiciales. Su influencia sobre la resistencia y la rigidez es también muy importante, y debe ser considerada como un aspecto fundamental para el uso estructural de este material.

El contenido de humedad en la madera se define como el cociente de la masa de agua contenida, removible físicamente, y la masa de la madera seca que la contiene. Esta última se obtiene por secado en estufa a una temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$. Se considera que se alcanza esta condición cuando la diferencia entre dos pesadas sucesivas con intervalos de 6 horas es igual o menor al 5% de la masa de la pieza. La norma nacional de aplicación es la IRAM 9532 (1963). Internacionalmente se utiliza también la norma ISO 3130-1975 (E) (1975). La balanza utilizada para determinar la masa debe ser capaz de registrar 0,01g y el calibre destinado a medir las dimensiones del trozo empleado debe indicar 0,01mm.

Como se expresó anteriormente, el agua en este material puede ocupar los espacios celulares e intercelulares del leño, conociéndose como agua libre, o impregnar las paredes de las células. Existe también, aunque no presenta importancia desde el punto de vista estructural, pues no se puede remover por medios físicos, la llamada agua de constitución, que representa generalmente entre el 0,5% y el 1% del total del contenido y forma parte de la pared celular. Por lo tanto, en el análisis de las propiedades mecánicas se hace referencia solamente a las dos primeras. En ese sentido, cuando la madera verde o con un elevado contenido de humedad se seca natural o artificialmente, el agua que primero pierde es el agua libre. Mientras esto sucede, no se producen variaciones volumétricas ni alteraciones de importancia en las propiedades mecánicas. Al ser la madera un material higroscópico, su contenido de humedad depende de la temperatura y la humedad relativa ambiente, e intercambia permanentemente agua con el aire que la rodea. La humedad de equilibrio interno se alcanza luego de un tiempo, variable con las dimensiones de las piezas, y puede conocerse en función de las variables mencionadas anteriormente.

La importancia del punto de saturación de las fibras, que puede considerarse a los fines prácticos para $H = 28\%$ como ya se expresó, deriva del hecho que a partir del mismo el agua perdida es extraída de las paredes y por lo tanto las modifica, produciendo alteraciones tanto de las dimensiones como del comportamiento resistente y elástico de las piezas. Es decir que en la medida que disminuye el contenido de humedad por debajo del punto de saturación, se produce una reducción de las dimensiones y un aumento, en general, en la resistencia y rigidez de la madera. Es

imposible que el tenor de humedad alcance el 0% en forma natural, el que puede ser logrado solo en estufa, pero, en climas secos se pueden alcanzar porcentajes de equilibrio inferiores al 10%. El clima denominado normal es el correspondiente a 20°C de temperatura y 65% de humedad relativa ambiente, que origina una humedad de equilibrio de aproximadamente el 12% en la mayoría de las maderas y es tomado como referencia internacionalmente para la determinación de las propiedades de resistencia y rigidez (International Organization for Standardization, 1985; Standards Association of Australia, 1986).

La influencia negativa que ejerce el incremento de humedad sobre la resistencia y la rigidez varía en general para cada tipo de esfuerzo, e incluso se manifiesta en el valor que alcanzan las deformaciones diferidas en vigas sometidas a esfuerzos de larga duración, donde tiene una fundamental importancia no sólo el contenido de humedad inicial sino las variaciones que éste experimenta mientras el elemento estructural se encuentra cargado (Andriamitantoa, 1995).

La densidad aparente se define como el cociente entre la masa y el volumen correspondiente. Teniendo en cuenta que normalmente este material contiene humedad, cuya masa se agrega a la de la madera y a su vez produce variaciones en el volumen, se debe definir siempre el contenido de humedad para el cual se calcula la densidad. En ingeniería existen dos formas más frecuentes de determinarla. Una es la denominada densidad en clima normal, ya definido, y la otra es la densidad anhidra, para la madera secada al horno, es decir sin contenido de humedad, salvo la de constitución. En silvicultura se utiliza otra forma de cálculo, denominada frecuentemente densidad básica, que se expresa como el cociente entre la masa seca ($H = 0\%$) y el volumen de la pieza saturada de humedad. El principal objetivo de este cálculo es obtener información acerca de la cantidad de madera que aparece en un determinado volumen obtenido de la forestación.

La norma nacional de aplicación para el cálculo de la densidad aparente es la IRAM 9544 (1973). Internacionalmente se aplica también la ISO 3131-1975 (E). La precisión usual requerida para la balanza es de 0,01g. El cálculo habitual del volumen se efectúa midiendo las dimensiones de la probeta destinada a tal fin, con un instrumento cuya precisión debe ser 0,01mm. Teniendo en cuenta la porosidad presente en este material, y que la densidad de las paredes de las células, excluidos los orificios, alcanza un valor aproximado de 1500kg/m^3 , el campo práctico ocupado por la densidad oscila entre valores del orden de 110kg/m^3 y 1300kg/m^3 . Las especies de elevada porosidad se acercan al primero y las muy densas al segundo, el cual no es superado ni aún por las maderas tropicales de mayor dureza. La densidad aparente tiene una correlación positiva con la mayoría de sus propiedades mecánicas de la madera, constituyendo normalmente un parámetro indicativo de la resistencia y la rigidez. Por lo tanto es considerado en investigaciones y en la normativa internacional referida a la clasificación por resistencia (Blaß & Görlacher, 1996; Standards Association of Australia, 1986). Si bien desde el punto de vista de la utilización en

construcciones existen otras propiedades físicas de consideración, como las térmicas, eléctricas, acústicas y de rozamiento, entre otras, teniendo en cuenta el objetivo de este trabajo, no han sido tenidas en cuenta para su desarrollo.

Anteriormente se hizo referencia a que se denomina propiedades mecánicas de la madera a aquellas que indican el comportamiento resistente y elástico bajo la acción de cargas o sollicitaciones exteriores (Coronel, 1994). Una clasificación de las propiedades mecánicas se puede hacer dividiéndolas en resistentes, elásticas y de dureza (Coronel, 1996). A su vez, dentro de las primeras se pueden considerar las estáticas y las dinámicas. Teniendo en cuenta que el objetivo perseguido es analizar a la madera como material estructural, se considerarán las propiedades resistentes estáticas y las elásticas empleadas en el diseño.

La determinación de las propiedades mecánicas se efectúa en general a través de ensayos estáticos, que pueden no requerir de la destrucción total de la pieza, como es el caso de la obtención del módulo de elasticidad. En cambio, para conocer la tensión de rotura es necesario destruir el cuerpo de prueba. Existen también ensayos no destructivos, orientados fundamentalmente a la determinación de las propiedades elásticas, dentro de los cuales se pueden citar el basado en la frecuencia fundamental de vibración, propagación de ondas de ultrasonidos y de impactos, entre otros (American Society for testing and materials, 1998; Pérez del Castillo, 2001).

De acuerdo a los objetivos perseguidos, las pruebas se pueden realizar sobre cuerpos de prueba pequeños y libres de defectos, o en tamaño estructural usual. Los modernos conceptos de diseño por estados límite (Larsen, 1995), desarrollados principalmente a partir de la década de 1970, han sido acompañados por una evolución hacia la realización de los ensayos utilizando probetas de dimensiones y condiciones de utilización normales. Prescripciones en este último sentido se encuentran en la norma estadounidense ASTM D 198-98 (1999), en las europeas EN 408 (1996) y prEN 408 (2000), así como en la ISO 8375-1985 (E) (1985).

En Argentina no existen actualmente normas que contemplen la realización de ensayos para determinar las propiedades mecánicas sobre cuerpos de prueba de tamaño real. Las vigentes prescriben las pruebas sobre probetas pequeñas y libres de defectos, como la IRAM 9545 (1985) para ensayos de flexión, la IRAM 9551 (1985) para ensayos de compresión paralela a las fibras, entre otras. Estas están en línea con los criterios adoptados por la ASTM D 143-94 (1994) y la brasileña NBR 7190 (1997).

La caracterización completa de una población de madera, a través de determinaciones de laboratorio, y para su uso en el diseño de estructuras, requiere actualmente el conocimiento de los valores característicos de resistencia, rigidez y densidad. Dentro de los primeros se incluye la flexión, la tracción paralela y perpendicular a las fibras, la compresión paralela y perpendicular a

las fibras, y el corte. Dentro de los segundos se contemplan los valores característicos medios del módulo de elasticidad paralelo a las fibras y del módulo de cizalladura, que se utilizan para los estados límite de servicio, y el valor característico (5%) del primero de ellos, necesario para el cálculo de tensiones críticas ligadas a la inestabilidad. En el tercer caso se incluyen los valores característicos medio y 5% de la densidad aparente, que revisten fundamental importancia para el cálculo de las uniones.

La anisotropía ya descrita es la que origina resultados muy diferentes para las propiedades en función de la dirección del esfuerzo respecto de la orientación de las fibras. A los fines prácticos, la mayoría de los valores mecánicos se expresan solamente en la dirección longitudinal y en la transversal, resumiendo en esta última tanto la radial como la tangencial. De las propiedades empleadas en el diseño estructural, ya mencionadas, y que por lo tanto deben ser consideradas en la clasificación por resistencia, con la excepción del corte, las restantes adquieren valores mucho mayores en la dirección de las fibras que en la transversal. La explicación se encuentra en la estructura de la pared celular, como se expresó con anterioridad.

La presencia de anomalías ligadas al crecimiento, como los nudos y la desviación de las fibras, las originadas en los procesos de secado y producción, como las fisuras, y los ataques biológicos, entre otros, afectan las propiedades mecánicas en general, pero en algunos casos con distinto nivel de importancia. La presencia de nudos tiene mayor influencia en las zonas sometidas a tracción que a compresión (Glos, 1995b). A su vez, las fisuras afectan más el comportamiento en flexión que en tracción y compresión, pues en el primero de los casos se generan esfuerzos de cizalladura, además de tensiones normales. Esta consideración está contemplada en la norma ASTM D 245-98 (1999).

Las prescripciones modernas fijan condiciones de ensayo normalizadas que tienen por objetivo obtener resultados comparables en el nivel internacional. Dentro de ellas se encuentra el contenido de humedad de referencia ($H = 12\%$), ya mencionado, que requiere una climatización previa de los cuerpos de prueba en una cámara que reúna las condiciones de temperatura y humedad relativa ambiente correspondientes. La precisión requerida habitualmente para las determinaciones es del 1% y se encuentra establecida la velocidad de aplicación de las cargas, que debe ser constante, y el tiempo de duración del ensayo hasta la rotura. Esta última condición reviste gran importancia pues la duración de las cargas ejerce una importante influencia sobre la resistencia y la rigidez de la madera, las que son tenidas en cuenta en el diseño estructural (Andriamitantoa, 1995; Thelandersson, 1995b).

Los cuerpos de prueba de tamaño estructural se preparan con una longitud relacionada a sus dimensiones transversales. En el caso de la flexión, esta disposición asegura una determinada relación altura/vano, manteniendo acotada la influencia de esta variable sobre los resultados en

general y controlando la incidencia del esfuerzo de corte en particular. Para los ensayos de tracción y compresión paralela a las fibras, se logra una transmisión de los esfuerzos en forma similar a la ocurrida en estructuras reales y se evita el riesgo de inestabilidad lateral durante la prueba. La influencia que el tamaño de la sección transversal ejerce sobre las resistencias en flexión y tracción es considerada en la norma europea EN 384 (1996). La longitud de la probeta, sobre la cual se efectúa la medición de las deformaciones con el fin de calcular el módulo de elasticidad, es función también de las dimensiones transversales.

En el caso de la prueba de flexión, con aplicación simétrica de las cargas en los tercios de la distancia entre apoyos, se dispone del tramo medio, libre de la influencia del esfuerzo de corte, para determinar el módulo de elasticidad puro, o local. Si se utiliza todo el vano se puede obtener el módulo de elasticidad global, afectado por la acción del esfuerzo de corte en los tramos laterales. Las normas ASTM D 198-98 (1999) y prEN 408 (2000) contemplan ambas alternativas. Los resultados se obtienen admitiendo un comportamiento mecánico congruente con las hipótesis clásicas de la resistencia de materiales, aceptando que las secciones se mantienen planas durante las deformaciones y que éstas son proporcionales a las tensiones en período elástico (Coronel, 1996).

Como se expresó anteriormente, para caracterizar en forma completa una especie de determinada procedencia, es necesario realizar una serie de ensayos normalizados que proveen resultados para las propiedades utilizadas en el diseño estructural. No obstante, existen relaciones que vinculan a éstas, y que permiten, ante la imposibilidad de efectuar la totalidad de las pruebas de laboratorio necesarias, derivar determinadas propiedades a partir de los resultados obtenidos para otras.

De acuerdo con el criterio de las normas europeas, expresado en EN 384 (1996), es posible calcular la totalidad de las propiedades resistentes y de rigidez a partir del conocimiento de tres valores característicos determinados en el ensayo de flexión estática: la resistencia, el módulo de elasticidad y la densidad aparente. En cambio, para la norma brasileña NBR 7190 (1997) el ensayo fundamental es el de compresión paralela a las fibras, y a partir del mismo prescribe relaciones que permiten calcular los restantes, cuando no es posible efectuar todas las determinaciones en laboratorio. Es de tener en cuenta que en este último caso las pruebas se realizan sobre probetas pequeñas y libres de defectos y en el primero con cuerpos de tamaño estructural usual, lo cual también influye sobre las relaciones adoptadas entre las distintas propiedades. Se debe considerar también que las relaciones presentan diferencias en algunos casos entre las especies frondosas y las de coníferas, lo cual aparece reflejado en las recomendaciones antes mencionadas.

En línea con el criterio de admitir relaciones entre las distintas propiedades para la caracterización de la madera, la norma australiana AS 2878-1986 (1986) prescribe la inserción de

una especie o grupo de especies afines, en un determinado grupo resistente de su sistema, a partir del valor de la resistencia y el módulo de elasticidad en flexión, así como de la resistencia en compresión paralela a las fibras. También contempla una inserción provisional a partir del valor de la densidad aparente.

2.1.2 Clasificación visual

Existen actualmente en el mundo numerosas normas de clasificación visual por resistencia. Ellas difieren en sus particularidades, pero tienen en común la adopción de distintos grados de calidad para una determinada especie, o grupo de ellas, y procedencia (Fachverband der Sägeindustrie Österreichs, 1990). Estas distintas clases surgen del establecimiento de límites para las características visuales adoptadas como parámetros, las cuales tienen influencia sobre las propiedades mecánicas. Es decir que el fundamento de estos métodos se encuentra en la existencia de una correlación conocida entre los parámetros visuales y las propiedades mecánicas. Cuanto más clara es esta relación, más eficiente es el método, y permite dividir con mayor precisión a la población inicial en sub-poblaciones constituidas por los distintos grados de calidad elegidos. Para cada uno de ellos es posible entonces determinar los valores de resistencia, rigidez y densidad característicos, los que adquieren niveles más elevados para aquellos con mayores restricciones en las características visuales, o sea con calidad superior. Esto permite utilizar el potencial de cada grupo con la confiabilidad requerida en los modernos métodos de diseño estructural. Por el contrario, la determinación de las propiedades mecánicas para la población completa, sin clasificar, lleva implícita una disminución de los valores característicos por la importante dispersión que este material presenta, lo cual impide explotar la capacidad de las piezas de mejor calidad.

La clasificación visual por resistencia se basó en la tradición y la experiencia hasta finales del siglo diecinueve, aprovechando los conocimientos regionales de las especies y sus anormalidades más importantes (Glos, 1995b). La evolución experimentada desde las primeras décadas del siglo veinte hasta el presente, ha ido acompañada de la redacción de rigurosas normas de clasificación por parte de los países que más utilizan este recurso, tanto a través de especies frondosas como de coníferas (Deutsches Institut für Normung e. V., 1989a; Standards Australia, 2000; Southern Pine Inspection Bureau, 1994). No obstante, la complejidad y la cantidad de grados de calidad elegidos deben ser evaluadas convenientemente, con el fin de posibilitar una aplicación real y eficiente de los métodos en los procesos ligados a la producción, comercialización y utilización del materia. No sería lógico establecer un número elevado de clases si no se cuenta con un método de clasificación con la confiabilidad necesaria, que permita distinguir con precisión las

propiedades de las mismas, y que sea asimilable por las personas que deben llevarlo a cabo. A su vez se debe considerar el aprovechamiento económico del material, es decir que la producción real de los aserraderos quede equilibradamente incluida en el sistema.

La eficiencia y rapidez de estos métodos dependen de la pericia de la persona que realiza la tarea, y están expuestos a los errores propios de la intervención de un ser humano. En unos pocos segundos el clasificador debe observar las cuatro superficies de una pieza aserrada y decidir, en función de su observación, cual es el grado de calidad que corresponde para la misma. Las limitaciones normalmente consideradas se relacionan a: i) características ligadas al crecimiento del árbol o a los procesos de producción, que afectan las propiedades mecánicas, tales como nudos, desviación de las fibras, espesor de los anillos de crecimiento anual o densidad, madera de reacción, médula o material adyacente a la misma, y fisuras, ii) deterioros causados por ataques biológicos, como hongos e insectos, iii) defectos especiales, tales como severas reducciones de la sección transversal producidas durante el aserrado, y iv) desviaciones de la geometría prevista, como deformaciones o arista faltante.

Los nudos son considerados un defecto de gran importancia en los procesos de clasificación por su influencia sobre las propiedades mecánicas (Glos & Diebold, 1987). La medición de los mismos se realiza generalmente en una de las tres formas siguientes: i) dimensión del nudo con relación a la dimensión de la superficie en la cual se manifiesta, ii) relación entre la proyección del nudo sobre la sección transversal y el área de ésta, y iii) en valores absolutos referidos a dimensiones establecidas para las piezas.

Respecto del primero de los tres criterios expuestos, la tendencia de las normas europeas para la medición del nudo sobre una superficie, es considerarlo únicamente donde se manifiesta cortado oblicua o transversalmente y tomar sus dimensiones perpendicularmente al eje longitudinal de la pieza, es decir entre tangentes a él y paralelas a ese eje (Comité Europeo de Normalización, 1997). Este criterio es coincidente con el de la norma australiana AS 2082/2000 (2000) destinada a madera aserrada de especies frondosas. La norma estadounidense ASTM D 245-98 (1999) y la alemana DIN 4074, Teil 1 (1989) lo establecen pero solamente para la medición de los nudos en tablas. La primera de estas últimas considera también, para el caso de vigas y soportes, el registro de la nudosidad tomando en cuenta los diámetros menor y mayor del nudo, en tanto que la segunda, para el mismo caso, asume como dimensión determinante el diámetro menor. Para el caso de tablas, ambas consideran la nudosidad correspondiente al nudo más grande y al agrupamiento mayor en una longitud de 150mm.

Conforme al segundo criterio, la nudosidad se expresa como relación entre su proyección sobre la sección transversal y el área de ésta, método también previsto en la norma ASTM D 245-98 (1999). Las limitaciones pueden establecerse para el nudo mayor, para todos los

nudos intersecados en una sección o para aquellos comprendidos en una longitud de 150mm. A su vez, para los elementos sometidos a esfuerzos de flexión, puede resultar de importancia limitar en forma especial la relación de la proyección sobre las áreas de margen, que involucran un cuarto de su altura desde los extremos superior e inferior (Fachverband der Sägeindustrie Österreichs, 1990; Glos & Diebold, 1987). Esta consideración surge del hecho que la nudosidad tiene generalmente una influencia mayor sobre la resistencia a tracción que a compresión paralela a las fibras, siendo intermedia para la flexión (Glos, 1995b). Cuando un elemento estructural es sometido a esfuerzos de flexión, las mayores tensiones normales de tracción ocurren en una sección de margen, alejada del eje neutro y adyacente al extremo del mismo, y por lo tanto su capacidad puede ser disminuida significativamente por la presencia de un nudo o grupo de ellos.

Numerosas investigaciones reportan una importante disminución de las propiedades mecánicas por efecto de la nudosidad expresada de acuerdo a los distintos criterios ya expuestos. Elevados coeficientes de correlación negativos entre ambas variables han sido encontrados tanto para madera aserrada de especies frondosas (Glos & Lederer, 2000) como de coníferas (Hermoso Prieto, 2001).

La desviación de las fibras respecto del eje longitudinal de la pieza, se puede determinar por apreciación visual observando las fisuras de contracción o el desarrollo longitudinal de los anillos anuales de crecimiento sobre la superficie, y también por medio de un trazador (Deutsches Institut für Normung e. V., 1989a). Este consiste en una manivela, con una manija articulada en un extremo y una aguja en el otro (Comité Europeo de Normalización, 1997; Standards Australia, 1998). La desviación se considera solamente en forma general, descartándose las localizadas del tipo encontrado alrededor de los nudos, pues su influencia sobre las propiedades mecánicas es considerada a través de la nudosidad. Se expresan y limitan relacionando el valor de la desviación respecto del eje longitudinal con la longitud en la cual se produce, en forma de fracción. Generalmente su correlación negativa con la resistencia es menor a la que presenta la nudosidad (Glos, 1995b).

El espesor de los anillos de crecimiento anual es registrado en dirección radial, descartándose la zona cercana a la médula. La norma ASTM D 245-98 (1999) prescribe ignorar una longitud igual a un cuarto de la menor dimensión transversal, mientras que en otros casos se establece una distancia de 25mm respecto del eje de crecimiento (Deutsches Institut für Normung e. V., 1989a). La restricción se realiza generalmente a través del establecimiento de un límite superior (mm) para el espesor promedio, o de una cantidad máxima de anillos en un radio determinado. La consideración de este parámetro es de mayor importancia en las especies de coníferas que en las frondosas, aunque aún en las primeras su correlación con la resistencia es variable entre especies y procedencias (Hermoso Prieto, 2001). El establecimiento de límites para la densidad también puede

hacerse en forma directa, es decir sin la consideración de los anillos de crecimiento, criterio que encuentra mayor aplicación en las especies frondosas (Standards Australia, 2000). La densidad aparente exhibe generalmente una correlación positiva de valor intermedio con las propiedades mecánicas, siendo levemente mayor cuando se la analiza en forma directa que cuando se lo hace a través del espesor de los anillos de crecimiento (Glos, 1995b; Hoffmeyer, 1995).

En función del análisis de la influencia de las fisuras sobre las propiedades mecánicas, las normas de clasificación fijan limitaciones para las primeras. Aún en el caso que aquellas no produzcan efectos negativos sobre la resistencia y rigidez, deben existir límites máximos para su tamaño conforme al grado de calidad de la pieza analizada, como se establece en prEN 14081-1 (2000). Conforme a la especie considerada, las normas de clasificación visual por resistencia especifican también límites para la madera de reacción, y para la presencia de médula o material adyacente a la misma (Standards Australia, 2000), ya que en algunas especies la zona central se caracteriza por poseer madera con propiedades mecánicas reducidas por la presencia de pequeñas fisuras en las paredes de las fibras, entre otras causas (Hillis, 1978). La norma DIN 4074, Teil 1 (1989) no admite la presencia de médula en la clase de mejor calidad para las tablas clasificadas visualmente. Los deterioros causados por ataques biológicos, como hongos e insectos, se encuentran limitados en función de su tipo e intensidad. Los defectos ligados a los procesos de producción, como severas reducciones de la sección transversal por efecto del aserrado, habitualmente no se aceptan considerando su importante influencia sobre la capacidad portante del elemento que los posee.

Aunque las desviaciones de la geometría prevista no afectan generalmente las propiedades mecánicas, éstas son limitadas por razones de índole constructiva. Dentro de las mismas se puede citar el abarquillado, que se expresa como la deformación máxima referida a la dimensión transversal mayor de la pieza. El combado, el encorvado y la torcedura se expresan y limitan sobre la longitud total de la pieza o considerando su mayor valor sobre una longitud de $2m$. La arista faltante se expresa a través del porcentaje de la longitud de la pieza afectada, y, transversalmente, como el porcentaje de la dimensión transversal faltante (Comité Europeo de Normalización, 1997).

La cantidad de grados de calidad que surgen de la aplicación de los límites para las características, a través de la inspección visual, varían con las normas, pero en general no son muy numerosos. La norma alemana DIN 4074, Teil 1 (1989), destinada a madera aserrada proveniente de especies de coníferas, establece tres clases resistentes. La norma australiana AS 2082/2000 (2000), desarrollada para especies frondosas, prescribe cuatro grados estructurales. En numerosos casos los valores característicos de resistencia, rigidez y densidad no son expresados en la misma norma que prescribe el método de clasificación visual y los grados de calidad resultantes. El

sistema suele completarse a través de un conjunto de normas relacionadas entre sí, que puede tener alcance nacional o internacional, como el establecido en EN 338 (1996) y EN 1912 (1998).

Como se expresó anteriormente, la cantidad de grados de calidad debe estar equilibrada con la precisión que es posible lograr para los valores de las propiedades de cada uno, y con la necesaria sencillez que debe reunir el método, para que su aplicación sea efectiva. Los límites entre cada clase se establecen luego de estudiar la correlación existente entre las variables independientes, que son las características visuales, y la variable dependiente, constituida por las propiedades mecánicas. Para las características expresables cuantitativamente, como la nudosidad, la estrechez de su relación con la resistencia y la rigidez se puede expresar adecuadamente a través del coeficiente de correlación de Pearson, y, a través de un análisis de regresión lineal simple y del correspondiente diagrama de dispersión, es posible fijar los límites necesarios para alcanzar los valores mecánicos requeridos. Para aquellas características visuales que se expresan cualitativamente, destacando su presencia o ausencia, su relación con las propiedades mecánicas se analiza para el grupo de probetas que la poseen, separadamente de las libres de ellas. Dos aspectos resultan de destacada importancia en el proceso del diseño de un método de clasificación visual por resistencia y el establecimiento de los límites para cada grado: i) el alcance de valores característicos elevados que permitan un buen desempeño para cada clase de la combinación especie/procedencia analizada, y ii) el logro del mejor aprovechamiento posible para el material, evitando que un porcentaje elevado del mismo sea rechazado o destinado a las clases inferiores.

Las normas establecen que cada pieza debe ser clasificada de acuerdo a su sección más débil, y asignadas al menor grado de calidad que se corresponde con alguna de las características visuales que posee. En consecuencia, si posteriormente es cortada en trozos más cortos, éstos quedan con suficiente seguridad. No obstante, hay que considerar la eventualidad que las mismas sean aserradas o cepilladas, disminuyendo la sección transversal, lo cual puede alterar su condición en sentido desfavorable. Esta última circunstancia obliga a reclasificar las piezas que hayan sufrido alteraciones luego de su clasificación. Cualquiera sea el método, al estar influenciado el comportamiento del material por sus propiedades físicas, como el contenido de humedad que afecta el tamaño de las fisuras, las normas establecen las condiciones en que se debe efectuar el procedimiento con el fin de que los resultados sean comparables.

Las ventajas de los métodos visuales radican en que no requieren inversiones elevadas para su implementación, a diferencia de los mecánicos. Para su aplicación eficiente es importante que sean simples y fáciles de comprender, y que las personas que lo implementan reciban la capacitación adecuada. Por otro lado, sus desventajas mayores surgen de la subjetividad que llevan implícita, y de los errores humanos que pueden cometerse al realizar el trabajo con la velocidad que requiere su viabilidad económica. En este sentido es de destacar que el análisis de las cuatro

superficies de una pieza debe efectuarse en un tiempo de aproximadamente 4 segundos. A su vez, no permiten apreciar parámetros de elevada correlación con la resistencia, como el módulo de elasticidad, y otros, como la densidad, son considerados indirectamente a través de los anillos anuales de crecimiento. Esta última circunstancia impide aprovechar la elevada calidad como material estructural que poseen algunas piezas, cuyas características registrables visualmente no lo revelan.

En Argentina, con la intervención del Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (IRAM) y de instituciones ligadas al sector tecnológico y productivo de la madera, como la Red de Instituciones para el Desarrollo Tecnológico de la Industria Maderera de nuestro país (RITIM) se encuentran en proceso de desarrollo y discusión métodos de clasificación visual por resistencia para piezas aserradas, y en particular para tablas destinadas a la construcción de vigas laminadas. Los proyectos involucran las especies forestadas más difundidas.

2.1.3 Clasificación mecánica

Con el fin de mejorar la precisión de los métodos visuales de clasificación por resistencia, ya en la década de 1960 fueron desarrollados procesos mecánicos en Australia, Estados Unidos, Reino Unido, y con posterioridad en otros países (Glos, 1995b). Este mecanismo, si bien es más costoso, convenientemente ajustado presenta ventajas desde el punto de vista de la confiabilidad de los resultados, a la vez que una velocidad de operación muy elevada. En este sentido debe señalarse que las máquinas pueden clasificar más de 100 metros lineales de tabla por minuto. Por su parte, permiten determinar otros parámetros, tales como el módulo de elasticidad y la densidad, que están mejor correlacionados con las propiedades resistentes que aquellos que se detectan en la clasificación visual. A consecuencia de las inversiones que requiere, su empleo puede adoptarse si existen volúmenes importantes de material para clasificar. Los métodos mecánicos de clasificación por resistencia han adquirido un desarrollo importante para su aplicación a las tablas destinadas a la construcción de vigas laminadas encoladas (Glos & Diebold, 1994).

El diseño de un método mecánico de clasificación por resistencia requiere en primera instancia la investigación de la correlación existente entre las variables independientes consideradas como parámetros y las propiedades mecánicas. Una vez determinada la aptitud de los parámetros para predecir la resistencia en la especie considerada, se debe seleccionar la máquina de clasificar y proceder a ajustar adecuadamente los procesos que lleva a cabo esta última. En la actualidad existen diversos tipos de máquinas de clasificar, desde las que consideran el módulo de elasticidad como parámetro único, hasta las que incorporan también la densidad y la nudosidad,

formando un conjunto de variables independientes que mejoran la predicción de la resistencia respecto de la obtenida en forma individual (Fachverband der Sägeindustrie Österreichs, 1990; Hermoso Prieto, 2001).

Además de aumentar la velocidad y precisión, disminuyendo la probabilidad que se produzcan errores humanos, los métodos mecánicos de clasificación por resistencia tienen como objetivo alcanzar grados de calidad más elevados que los obtenibles a través de los métodos visuales, lo cual permite aumentar la competitividad de este material con relación a otros como el acero y el hormigón armado (Diebold & Glos, 1994; Glos & Burger, 1998; Görlacher, 1990; Sauter & Diebold, 1997). La variabilidad de los resultados obtenidos es menor, y en consecuencia los valores característicos de las propiedades mecánicas y de densidad son más confiables y aptos para ser empleados en los modernos métodos de diseño.

La mayor eficiencia es producida por las características mecánicas del método, como se expresó anteriormente, y también por la posibilidad de utilizar parámetros más estrechamente relacionados con la resistencia que los apreciables visualmente. En el estado actual del conocimiento, el módulo de elasticidad es el parámetro individual más estrechamente relacionado a la resistencia, pero la combinación de él con la nudosidad y la densidad aparente aumenta aún más esa correlación (Blaß & Görlacher, 1996). El análisis individual de cada pieza a través del registro de uno o más parámetros en forma mecánica, y la consecuente asignación a la clase resistente que le corresponde, permite aprovechar al máximo las propiedades de cada elemento. Cuanto más estrecha es la relación entre las variables independientes y la resistencia, mayor es la precisión lograda si el proceso está ajustado convenientemente.

La relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia, expresada en forma de coeficientes de correlación, puede alcanzar valores del nivel de 0,85 (Johansson et al., 1992). La combinación del módulo de elasticidad con la densidad y la nudosidad permite elevar ese valor hasta 0,88 (Glos & Diebold, 1987). Tanto la consideración de un distinto número de parámetros como la forma de registrarlos, ha dado origen al diseño y construcción de distintos modelos de máquinas de clasificar, que a su vez han evolucionado a través de las últimas cuatro décadas y se encuentran en uso en distintos países.

El módulo de elasticidad puede determinarse flexionando la pieza bajo una carga constante y midiendo la deformación producida, o adoptando una deformación constante y registrando la fuerza necesaria para lograrlo. Conociendo además las dimensiones de la sección transversal y la separación entre apoyos, la obtención del módulo de elasticidad es inmediata. Este principio de deformación de tramos relativamente pequeños, comprendidos entre 0,5m y 1,2m, fue el adoptado en primera instancia. Las máquinas de este tipo, denominadas máquinas de flexión, son alimentadas continuamente con piezas de madera, a las que someten a la deformación descripta

alrededor del eje de menor momento de inercia. La clasificación se realiza tomando en consideración el menor valor promedio del módulo de elasticidad registrado, para el tramo flexionado, lo que origina un marcado automático de la pieza con la clase resistente a la que pertenece.

La determinación del módulo de elasticidad, actuando como parámetro de clasificación, puede efectuarse también por medio de otros métodos, como vibraciones, ultrasonidos o propagación de ondas inducidas por un impacto (Glos, 1995b, Pérez del Castillo, 2001). El método de la frecuencia fundamental de vibración no es exclusivo para la madera y tampoco para el módulo de elasticidad paralelo a las fibras. La norma estadounidense ASTM E 1876-97 (1998) prescribe un procedimiento estándar para la determinación de las propiedades elásticas de materiales a temperatura ambiente a través de esta técnica, que incluye también el módulo de cizalladura y el coeficiente de Poisson. El mismo es de aplicación a cuerpos de geometría cilíndrica o rectangular. Numerosas investigaciones se han llevado a cabo empleando la técnica dinámica de la frecuencia fundamental de vibración para determinar las propiedades elásticas de la madera, tanto sobre probetas pequeñas y libres de defectos, como en tamaño estructural, y obtenidas de especies de coníferas y frondosas (Görlacher, 1984; Ilic, 2001; Pérez del Castillo, 2001).

El procedimiento consiste en producir una excitación en la pieza por medio de un impacto, que puede ser longitudinal o flexional, y posteriormente analizar el espectro de las vibraciones para obtener la frecuencia fundamental o resonante. Conociendo además la densidad de la madera y su geometría es posible calcular el módulo de elasticidad paralelo a las fibras a través de la solución estandar (Goens, 1931; Hearmon, 1966; Kollman & Krech, 1960). La incorporación de este procedimiento a los procesos mecánicos de clasificación ha dado origen a otro modelo de máquina (Görlacher, 1997).

La diferencia fundamental entre ambas formas de obtener el módulo de elasticidad radica en dos aspectos. El primero se refiere a que en el último caso el resultado indica un promedio a lo largo de toda la pieza, mientras que en el primero el valor medio se corresponde con el tramo flexionado, el cual, como se expresó, tiene una longitud reducida, y por lo tanto posibilita la obtención del menor valor. Por otra parte, el método dinámico permite el análisis de piezas sin limitaciones para las dimensiones de la sección transversal, en cambio, las máquinas que flexionan los cuerpos encuentran una restricción en el tamaño de las secciones pues para grandes dimensiones pueden originarse daños ante la necesidad de aplicar fuerzas importantes (Blaß & Görlacher, 1996).

La adición de otros parámetros al proceso mecánico, como la nudosidad y la densidad aparente actuando en forma combinada con el módulo de elasticidad, permite elevar aún más la

correlación con la resistencia. En este caso, la variación entre las variables predictivas, constituidas por los parámetros, y la dependiente, que es la resistencia, se puede analizar a través de la técnica del análisis de regresión lineal múltiple, el cual permite estimar el modelo adecuado para predecir los valores de la variable dependiente.

Las modernas máquinas de clasificar que registran y combinan varios parámetros se diferencian en la modalidad que utilizan para el registro de los mismos (Diebold, 1997; Görlacher, 1997). El módulo de elasticidad puede efectuarse por deformación de la pieza o dinámicamente, como se expresó en los párrafos anteriores. La nudosidad puede registrarse ópticamente, utilizando cámaras, o a través de radiaciones, mientras que la densidad puede calcularse a través de la determinación de la masa y el volumen o por medio de radiaciones (Blaß & Görlacher, 1996; Glos, 1995b). En la Figura 2.6 puede apreciarse la disposición de los dispositivos en una máquina que combina el módulo de elasticidad, la densidad y la nudosidad como parámetros de clasificación. En este caso el primero se determina flexionando la pieza, mientras que a través de la absorción de radiaciones se pueden calcular la densidad aparente y la nudosidad.

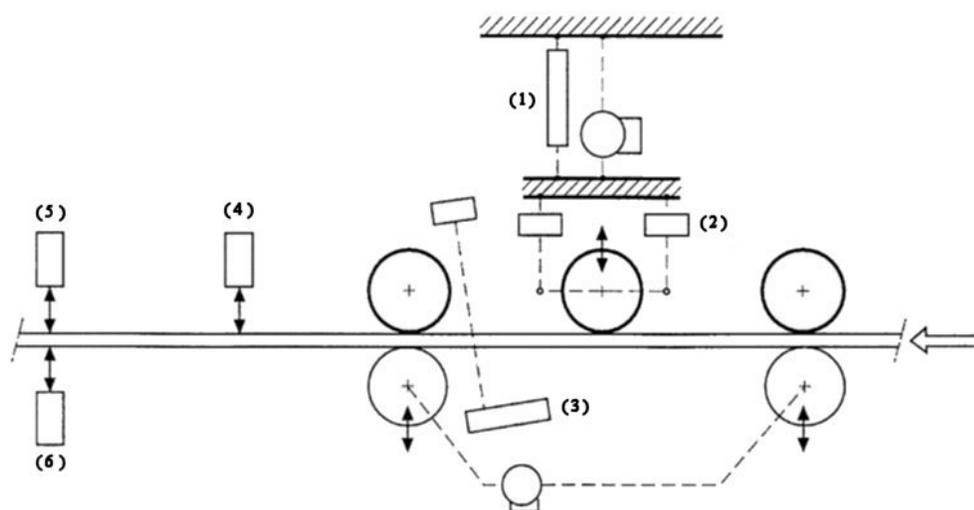


Figura 2.6 Disposición esquemática de una máquina de clasificar

Dispositivos para medir: (1) la deformación originada por la flexión; (2) carga actuante; (3) absorción de radiación; (4) deformaciones previas de la pieza; (5) dimensiones de la sección transversal; (6) contenido de humedad; (adaptada de Glos, 1995b)

La asignación de cada pieza a un determinado grado de calidad, a través de la

clasificación mecánica, se hace en forma directa. El sistema internacional europeo establece como propiedades fundamentales, necesarias para acceder a una clase resistente de las establecidas, la resistencia en flexión, el módulo de elasticidad paralelo a las fibras y la densidad aparente. Por lo tanto, las máquinas que toman una combinación de parámetros, registran en forma directa las dos últimas propiedades, mientras que la resistencia es estimada a través del modelo de regresión múltiple adoptado. Se asume que las restantes propiedades mecánicas están vinculadas a las fundamentales a través de relaciones establecidas, válidas para combinaciones de especies y procedencias reconocidas.

Teniendo en cuenta que las máquinas no pueden registrar todas las características, y que los modelos que flexionan las piezas para determinar el módulo de elasticidad dejan los extremos sin clasificar, es necesario realizar una inspección visual adicional al proceso mecánico. Esta se orienta a detectar la presencia de defectos tales como fisuras, ataques biológicos y desviaciones de la geometría. Las normas contemplan todos estos aspectos y también los referidos al ajuste y control de máquinas y procesos, siendo de aplicación en el sistema europeo la norma EN 519 (1996), actualmente en revisión a través de los proyectos prEN 14081-1/2/3 (2000). Por su relevancia en este aspecto se destaca también la norma DIN 4074, Teil 3/4 (1989).

Las propiedades mecánicas de flexión son las fundamentales para el sistema europeo, como ya fue expresado. Los estudios de correlación se efectúan entre ellas y los parámetros adoptados, y a su vez sus valores característicos son los más importantes para el conocimiento de su comportamiento resistente y elástico. A su vez, el destacado desarrollo que ha experimentado la construcción de vigas laminadas encoladas ha sido acompañado por la redacción de normas específicas. La norma europea EN 1194 (1999) atribuye un rol importante a las propiedades mecánicas en tracción paralela a las fibras para las tablas destinadas a la construcción de estas vigas, y al respecto se han llevado a cabo numerosas investigaciones (Burger & Glos, 1995; Burger & Glos, 1996; Burger & Glos, 1997; Glos & Lederer, 2000; Görlacher, 1990). Es decir que para el caso particular de las láminas, el análisis de sus propiedades en tracción paralela a las fibras adquiere una importancia similar a las de flexión, y teniendo en cuenta que existen máquinas de clasificar instaladas en este tipo de fábricas, existen numerosas experiencias de estudios de correlación entre estas propiedades y diversos parámetros de clasificación (Glos & Diebold, 1994).

La mayor precisión y la posibilidad de acceder a clases resistentes superiores son ventajas que ofrece la clasificación mecánica en comparación con la visual. No obstante, es necesario tener en cuenta el nivel de la inversión económica de acuerdo a la cantidad de material a clasificar. A su vez, el estudio de distintos modelos de clasificación, utilizando parámetros individuales, como el módulo de elasticidad, o combinados con otros, como la densidad aparente y la nudosidad, debe efectuarse para analizar si el incremento de parámetros y la consecuente mayor

inversión y complejidad se ven reflejados adecuadamente en los rendimientos obtenidos. Estas investigaciones previas, que tienen por base el estudio de correlación entre los parámetros y la resistencia, luego deben culminar en la selección de la máquina adecuada y en su apropiado ajuste y control del proceso.

2.1.4 El sistema internacional europeo de clases resistentes

El sistema de clases resistentes contemplado en la norma europea EN 338 (1996) agrupa las calidades y las especies que tienen niveles de resistencia similares, haciéndolas, de esta manera, equivalentes. En consecuencia, los proyectistas pueden adoptar los valores característicos de la clase elegida con prescindencia de una especie en particular. Los usuarios, a su vez, pueden adquirir las piezas de madera con la sola condición que las mismas pertenezcan a la clase resistente empleada en el proyecto, pudiendo elegir especies y procedencias distintas según su conveniencia. De esta manera se logra superar las dificultades inherentes a la multiplicidad de combinaciones posibles entre normas de clasificar, especies, calidades y procedencias, que surgen ante los actuales fenómenos de integración (Glos, 1995a).

La norma EN 338 (1996) contempla 9 clases resistentes para especies de coníferas y álamo y 6 para frondosas. La designación de las primeras se materializa a través de la letra *C* seguida del valor de la resistencia característica en flexión, expresada en N/mm^2 . Las segundas se designan de manera similar, pero utilizando la letra *D* en reemplazo de la *C*. Dada la importancia que este sistema reviste para el presente trabajo, en la Tabla 2.1 se transcriben las clases resistentes establecidas, y los valores característicos correspondientes. Estos últimos abarcan las propiedades resistentes, de rigidez y densidad.

Cada clase resistente constituye una población, o sub-población, que debe estar perfectamente definida en términos de la especie o grupos de especies que la integran, procedencia de las mismas y calidad de la madera. Para asignar un determinado grado de calidad a una clase resistente del sistema, la clasificación debe efectuarse con una norma que cumpla los requisitos establecidos en EN 518 (1996) si es visual, o en EN 519 (1996) si es mecánica. Actualmente estas últimas están siendo revisadas y en proceso de sustitución por los nuevos proyectos prEN 14081-1/2/3 (2000).

Para el caso de la clasificación visual, si el método cumple con los requisitos antes mencionados, la especie o grupos de especies y procedencia se encuentran definidos, y los valores característicos de la resistencia a flexión ($f_{m,k}$), del módulo de elasticidad medio en la dirección paralela a las fibras ($E_{0,mean}$), y de la densidad aparente (ρ_k), son iguales o superiores a los

establecidos en la Tabla 2.1 para una clase resistente determinada, es posible asignar a esa clase el grado de calidad analizado. Para la clasificación mecánica, cuando se dispone de suficiente información y el sistema se encuentra ajustado, es posible asignar directamente las piezas a las clases resistentes que le corresponden, en función de los valores característicos antes mencionados. Los valores característicos empleados en el sistema de clases resistentes deben ser obtenidos con la metodología establecida en EN 384 (1996) y la determinación de las propiedades físicas y mecánicas conforme a EN 408 (1996).

Tabla 2.1 Clases resistentes y valores característicos conforme a EN 338 (1996)

	Especies de coníferas y álamo									Especies frondosas					
	C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	C40	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Propiedades resistentes en N/mm^2															
$f_{m,k}$	14,0	16,0	18,0	22,0	24,0	27,0	30,0	35,0	40,0	30,0	35,0	40,0	50,0	60,0	70,0
$f_{t,0,k}$	8,0	10,0	11,0	13,0	14,0	16,0	18,0	21,0	24,0	18,0	21,0	24,0	30,0	36,0	42,0
$f_{t,90,k}$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,9
$f_{c,0,k}$	16,0	17,0	18,0	20,0	21,0	22,0	23,0	25,0	26,0	23,0	25,0	26,0	29,0	32,0	34,0
$f_{c,90,k}$	4,3	4,6	4,8	5,1	5,3	5,6	5,7	6,0	6,3	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5
$f_{v,k}$	1,7	1,8	2,0	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0
Propiedades de rigidez en kN/mm^2															
$\bar{E}_{0,mean}$	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	12,0	13,0	14,0	10,0	10,0	11,0	14,0	17,0	20,0
$\bar{E}_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,7	7,4	8,0	8,0	8,7	9,4	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8
$\bar{E}_{90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,33	0,37	0,40	0,40	0,43	0,47	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33
\bar{G}_{mean}	0,44	0,50	0,56	0,63	0,69	0,75	0,75	0,81	0,88	0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25
Densidad aparente en kg/m^3															
ρ_k	290	310	320	340	350	370	380	400	420	530	560	590	650	700	900
ρ_{mean}	350	370	380	410	420	450	460	480	500	640	670	700	780	840	1080

Según esta última norma, la climatización previa de los cuerpos de prueba debe efectuarse en una cámara con $20\pm 2^\circ C$ y $65\pm 5\%$ de humedad relativa ambiente, lo cual ocasiona que muchas especies adquieran un contenido de humedad de equilibrio de aproximadamente 12%. Las determinaciones deben efectuarse con una precisión igual o mayor al 1% y, tanto la velocidad de aplicación de las cargas para la determinación del módulo de elasticidad, como el tiempo de

duración del ensayo hasta la rotura, están establecidos. En todos los casos la velocidad de desplazamiento del cabezal de aplicación de las cargas debe ser constante. El cumplimiento de estas condiciones se relaciona con la influencia que el tiempo de duración de las cargas ejerce sobre el comportamiento estructural de este material (Piter, 1998).

El ensayo fundamental para la determinación de las propiedades requeridas en el sistema es el de flexión, que permite calcular el módulo de elasticidad, la tensión de rotura y, posteriormente, la densidad aparente y el contenido de humedad. Para el comportamiento mecánico se aceptan las hipótesis clásicas de la resistencia de materiales, admitiéndose que las secciones se mantienen planas durante las deformaciones y que éstas son proporcionales a las tensiones en período elástico. La obtención del módulo de elasticidad en flexión, que según EN 408 (1996) se realiza sobre un tramo central ($l_1 = 5h$), libre de la influencia del esfuerzo de corte, puede ser ejecutada sobre toda la longitud de la viga conforme al nuevo proyecto prEN 408 (2000), denominándose el primero *MOE* local ($E_{m,l}$) y el segundo *MOE* global ($E_{m,g}$). Para el cálculo se deben seleccionar dos valores de las deformaciones, en período elástico, con sus correspondientes cargas. La determinación de la tensión de rotura se lleva a cabo con la máxima carga soportada por la probeta, efectuando el cociente entre el momento flector y el módulo resistente de la sección transversal. La velocidad de desplazamiento del cabezal de cargas debe ser constante y menor a $0,003h$ (mm/s) para la determinación del módulo de elasticidad, y la duración total de la prueba, hasta alcanzar la rotura, debe estar comprendida en un tiempo de $300 \pm 120s$. La ubicación de las cargas en los tercios de la longitud permite disponer, además, de un tramo central sometido a un momento flector constante, lo cual posibilita estudiar detalladamente la influencia que los parámetros ejercen sobre las propiedades mecánicas del cuerpo de prueba. Esta disposición es de fundamental importancia para la realización de los estudios de correlación necesarios para el diseño de un método de clasificación por resistencia. El cálculo de la densidad aparente y el contenido de humedad se efectúa sobre un trozo cercano a la zona de rotura y libre de defectos, que debe contener la sección transversal completa del cuerpo de prueba, y conforme a las prescripciones de las normas ISO 3131-1975 (E) (1975) e ISO 3130-1975 (E) (1975), respectivamente.

EN 408 (1996) prescribe también la realización de los ensayos estáticos en tracción y compresión paralela a las fibras. Para ambos casos se admiten las mismas hipótesis básicas de la resistencia de materiales ya mencionadas anteriormente. La obtención del módulo de elasticidad se efectúa seleccionando dos valores de la deformación para un tramo central del cuerpo de prueba, en período elástico, con sus correspondientes cargas. La longitud considerada para ese tramo es $l_1 = 5h$ para tracción y $l_1 = 4b$ para compresión. La tensión de rotura se calcula dividiendo la máxima carga que soporta el cuerpo de prueba por el área de su sección transversal. La velocidad de desplazamiento del cabezal de cargas debe ser constante y menor a $0,00005l$ (mm/s) para la

obtención del módulo de elasticidad, y la duración total de la prueba, hasta alcanzar la rotura, debe estar comprendida en un tiempo de 300 ± 120 s. La determinación de la densidad aparente y del contenido de humedad se realiza de la misma forma que la descripta para la prueba de flexión.

La disposición del ensayo está relacionada en todos los casos a las dimensiones de la sección transversal del cuerpo de prueba, con la finalidad de obtener resultados comparables en condiciones similares a las de uso normal estructural. Para la prueba de flexión, la separación entre apoyos se debe ubicar en $18 \pm 3h$, lo que garantiza, además de relaciones usuales, una influencia moderada del esfuerzo de corte sobre los resultados (Thelandersson, 1995b). La realización de los ensayos de tracción y compresión paralela a las fibras con probetas de sección transversal constante también refleja las condiciones usuales en estructuras. La relación entre la longitud del cuerpo de prueba y sus dimensiones transversales, establecidas en una distancia libre entre mordazas $l = 9h$ para el caso de tracción, y $l = 6b$ para el de compresión, garantiza una transmisión uniforme de esfuerzos a través de las secciones transversales y evita el riesgo de inestabilidad por flexión lateral de la probeta.

Las prescripciones de la norma europea EN 408 (1996) son coincidentes a las establecidas en la ISO 8375 (1985) y muy similares a las de la estadounidense ASTM D 198-98 (1999), todas destinadas a pruebas sobre probetas de tamaño estructural. Esta similitud es congruente con la tendencia internacional vigente. En Argentina no existen actualmente normas referidas a ensayos mecánicos para cuerpos de prueba en tamaño estructural usual, siendo la norma IRAM 9545 (1985) la que establece las condiciones para pruebas sobre probetas pequeñas y libres de defectos, en la misma línea que la ASTM D 143-94 (1994) y la ISO 3349 (1975).

Luego de efectuados los ensayos estáticos de acuerdo a EN 408 (1996), con los resultados obtenidos se deben calcular los valores característicos siguiendo las prescripciones de EN 384 (1996). Los resultados de los ensayos deben surgir de colocar los cuerpos de prueba con su sección más débil en la zona de máximo esfuerzo, es decir en el tercio central para los de flexión y en la longitud libre entre mordazas para los de tracción paralela a las fibras. Para la determinación del módulo de elasticidad es necesario procurar que la misma se sitúe en el centro de la probeta. Esa sección crítica, determinada visualmente o a través de medios mecánicos, es la que determina la calidad resistente de la pieza. En el caso del ensayo de flexión, la elección del borde traccionado debe efectuarse al azar.

La definición de la población de la cual se extrajeron las muestras debe efectuarse con precisión, teniendo en cuenta la especie o grupo de especies consideradas, la procedencia, el proceso de producción y la calidad resistente. Las muestras seleccionadas deben ser representativas de la población. En las mismas deben estar contempladas todas las variaciones conocidas o supuestas de las propiedades mecánicas y físicas, en la misma proporción con que se encuentran en

la población, lo cual suele ser un factor determinante en el diseño del tamaño y cantidad de muestras a ensayar. Dentro de cada muestra los cuerpos de prueba deben tener las mismas dimensiones nominales y su número mínimo se establece en 40.

La obtención del percentil 5% para una determinada propiedad mecánica de una muestra se realiza por ordenamiento, es decir en forma no paramétrica. Con este fin, se ubican los resultados ordenados de menor a mayor, y se elige aquel valor que queda precedido por el 5% del total. En caso que el tamaño de la muestra no sea divisible por 20, se debe interpolar linealmente entre los valores sucesivos correspondientes. El valor medio del módulo de elasticidad para una muestra se obtiene como la media aritmética de los resultados calculados para las probetas que la integran. El percentil 5% de la densidad aparente se calcula paraméricamente, adoptando la curva de distribución normal como modelo matemático para la distribución de frecuencias.

Las condiciones de referencia establecidas, que tienen como objetivo lograr resultados comparables, consideran el contenido de humedad, las dimensiones de la sección transversal y la disposición estática del ensayo. En el primer caso, el contenido de humedad adoptado es el que generalmente se logra en la climatización normal antes descripta, o sea el 12%. De no poseer la muestra ese valor, los resultados del módulo de elasticidad, de la densidad aparente y de la resistencia a compresión paralela a las fibras deben ajustarse al mismo. Como dimensiones transversales de referencia se establece una altura de la sección transversal en flexión, o la dimensión mayor de la misma en tracción paralela a las fibras (h) de 150mm. La disposición estática del ensayo de flexión exige una separación entre apoyos igual a $18h$, con las cargas ubicadas en los tercios de esa longitud.

Luego de calculado el valor medio del contenido de humedad de una muestra, y siempre que el mismo esté comprendido entre el 10% y el 18%, la corrección dispuesta por cada 1% de desvío respecto de la condición de referencia, es de 2% para el valor medio del módulo de elasticidad, de 0,5% para la densidad aparente, y de 3% para el percentil de la resistencia a compresión paralela a las fibras. El módulo de elasticidad y la resistencia se deben aumentar cuando el contenido de humedad es superior a 12% y la densidad se debe disminuir para el mismo caso. La corrección del percentil 5% de la resistencia a flexión y a tracción paralela a las fibras, a una altura o ancho de referencia $h = 150mm$, respectivamente, se debe efectuar dividiendo el valor obtenido por el factor $k_h = (150/h)^{0.2}$. Cuando la disposición estática ha diferido de la establecida ($a = a_f = 6h$) pero se ha mantenido la condición de simetría, el percentil 5% de la resistencia a flexión se debe dividir por el factor $k_l = (l_{es}/l_{et})^{0.2}$. El coeficiente $l_{et} = l + 5a_f$ se calcula con las distancias reales utilizadas en la prueba, mientras que l_{es} se obtiene con idéntica expresión pero reemplazando en la misma los valores normalizados ($l = 18h$; $a_f = 6h$).

Hermoso Prieto (2001) encuentra adecuado el ajuste propuesto en EN 384 (1996), en

función de la altura del cuerpo de prueba, para la resistencia en flexión. Sus conclusiones fueron tomadas a través de los resultados de una investigación llevada a cabo sobre *Pinus sylvestris* L. de España. Burger y Glos (1996), sobre la base de valores obtenidos de ensayos realizados con madera de Spruce y Douglas fir europeos, reportan que la resistencia a tracción paralela a las fibras está relacionada fuertemente con el valor de la nudosidad y de la densidad aparente, tendiendo además a disminuir cuando aumenta la longitud de la pieza. Como la nudosidad en general disminuye cuando aumenta el tamaño de la sección transversal, concluyen en que la resistencia a tracción tiende a crecer cuando crecen las dimensiones, lo cual no está en línea con la prescripción establecida en EN 384 (1996).

Para la obtención del valor característico de la resistencia se calcula el valor medio de los percentiles 5% de las distintas muestras consideradas, ajustados a las condiciones de referencia, y ponderados de acuerdo al tamaño de cada una. Si el cociente entre este valor medio y el menor percentil es superior a 1,20, se debe redefinir la población estudiada hasta que presente menor variabilidad, o disminuir aquel hasta no superar esa relación máxima establecida. Finalmente, a este valor se lo afecta de un factor de naturaleza estadística que varía en función del tamaño y cantidad de muestras (k_s), igual o menor a la unidad, y de uno que tiene en cuenta la influencia que el método de clasificar ejerce sobre la variabilidad de los resultados (k_v), igual a la unidad para los métodos visuales y a 1,12 para los mecánicos. El valor característico medio del módulo de elasticidad se obtiene multiplicando el valor medio de cada muestra, ajustado a las condiciones de referencia, por el tamaño de la misma, y luego dividiéndolo por el total de los cuerpos de prueba del conjunto de muestras. Por su parte, el valor característico de la densidad aparente se calcula multiplicando el percentil 5% de cada muestra, ajustado a las condiciones de referencia, por el tamaño de la misma, y luego dividiéndolo por el total de las probetas del conjunto de muestras consideradas.

EN 384 (1996) establece las relaciones que vinculan las propiedades fundamentales, obtenidas a través del ensayo de flexión estática, con las restantes que se expresan para cada clase resistente en la Tabla 2.1. Es decir que conociendo el valor característico de la resistencia en flexión, el valor característico medio del módulo de elasticidad y el valor característico de la densidad aparente, es posible deducir los valores de las restantes propiedades mecánicas. Las relaciones establecidas son las siguientes: $f_{t,0,k} = 0,6f_{m,k}$; $f_{c,0,k} = 5(f_{m,k})^{0,45}$; $f_{v,k} = 0,2(f_{m,k})^{0,8}$; $f_{t,90,k} = 0,001\rho_k$; $f_{c,90,k} = 0,015\rho_k$; $E_{0,05} = 0,67E_{0,mean}$ (para especies de coníferas); $E_{0,05} = 0,84E_{0,mean}$ (para especies frondosas); $E_{90,mean} = E_{0,mean}/30$ (para especies de coníferas); $E_{90,mean} = E_{0,mean}/15$ (para especies frondosas); $G_{mean} = E_{0,mean}/16$. No obstante, es conveniente, sobre todo para especies o procedencias acerca de las cuales no existe un número importante de ensayos realizados, que otorgue una base estadística confiable, efectuar las verificaciones experimentales. EN 408 (1996)

prescribe los ensayos en flexión, tracción y compresión paralela a las fibras, mientras que EN 1193 (1998) reglamenta las pruebas necesarias para determinar la resistencia al corte y las propiedades mecánicas en la dirección perpendicular a las fibras. Ambas normas se encuentran contempladas conjuntamente en el nuevo proyecto prEN 408 (2000).

En el sistema internacional europeo de clases resistentes no se efectúan distinciones entre los módulos de elasticidad en flexión, tracción y compresión paralela a las fibras. No obstante, diversas publicaciones referidas a especies de coníferas como frondosas han reportado moderadas diferencias entre el módulo de elasticidad en flexión y en tracción paralela a las fibras (Burger & Glos, 1995; Glos & Lederer, 2000). Burger & Glos (1997), de acuerdo con resultados encontrados en una investigación llevada a cabo con madera de *Picea abies* de Europa central, en tamaño estructural, proponen una relación variable entre las resistencias en flexión y en tracción paralela a las fibras. La variación se establece en función de la calidad de la madera y se aparta en consecuencia de la prescripción de la norma EN 384 (1996), que establece para todas las clases resistentes $f_{t,0,k} = 0,6f_{m,k}$.

La norma brasileña NBR 7190 (1997), sobre la base de ensayos llevados a cabo con pequeñas y libres de defectos, y a falta de determinaciones experimentales completas, contempla la obtención de los valores característicos de las propiedades de resistencia a partir de los resultados obtenidos en el ensayo de compresión paralela a las fibras. Adopta las relaciones siguientes: $f_{c,0,k}/f_{t,0,k} = 0,77$; $f_{m,k}/f_{t,0,k} = 1,0$; $f_{c,90,k}/f_{c,0,k} = 0,25$; $f_{v,k}/f_{c,0,k} = 0,15$ (para especies de coníferas); $f_{v,k}/f_{c,0,k} = 0,12$ (para especies frondosas). A su vez para las propiedades de rigidez, y siempre a partir del ensayo en compresión, prescribe: $E_m = 0,85E_{c,0}$ (para especies de coníferas); $E_m = 0,90E_{c,0}$ (para especies frondosas); $\bar{E}_{t,0} = \bar{E}_{c,0}$; $E_{90,mean} = E_{0,mean}/20$. Más allá de las diferencias en las relaciones adoptadas, el criterio establecido en NBR 7190 (1997) difiere fundamentalmente del europeo en dos aspectos. El primero es el referido a la adopción de las propiedades en compresión paralela a las fibras como las fundamentales, a partir de las cuales se derivan los restantes, mientras en el último ese rol es desempeñado por la flexión. El segundo es la utilización de probetas pequeñas y libres de defectos para la realización de las pruebas, mientras que en el europeo, como ya se expresó, las determinaciones se realizan sobre cuerpos de prueba de tamaño estructural usual.

Para la inserción de un grado de calidad de madera aserrada en una clase resistente contemplada en EN 338 (1996), habiéndose determinado las propiedades físicas y mecánicas de acuerdo a EN 408 (1996) y los valores característicos siguiendo los lineamientos de EN 384 (1996), se requiere además que el método de clasificación se ajuste a los requerimientos generales establecidos en EN 518 (1996) si es visual, o en EN 519 (1996) si es mecánico. Los nuevos proyectos prEN 14081-1/2/3 (2000) constituyen una actualización de las dos normas mencionadas en último término. Para el caso de los métodos visuales, se requiere que las características

reductoras de las propiedades mecánicas estén limitadas, y sean medidas conforme lo dispuesto en la norma EN 1310 (1997).

Dentro de éstas se debe considerar la nudosidad, la desviación de las fibras, la densidad o espesor de los anillos de crecimiento anuales, y las fisuras. La nudosidad debe ser expresada en alguna de las tres formas siguientes i) relación entre el tamaño del nudo, medido sobre la superficie en la cual se manifiesta, y la dimensión transversal de esa superficie, ii) relación entre la proyección del nudo sobre la sección transversal del cuerpo de prueba y el área de esa sección transversal, iii) en valores absolutos referidos a determinadas dimensiones de la probeta. De acuerdo con EN 1310 (1997), cuando el nudo se mide sobre la superficie en la cual se manifiesta, debe ser considerada solamente la dimensión cortada transversal u oblicuamente, entre tangentes a él y paralelas al eje de la pieza. La desviación de las fibras se debe expresar y limitar relacionando el valor de la desviación respecto del eje longitudinal con la longitud en la cual se produce, con el formato 1/4, 1/6, 1/8 y 1/10. Las desviaciones locales del tipo que ocurre alrededor de los nudos se deben desestimar. La densidad aparente o el espesor de los anillos anuales de crecimiento deben estar especificados. Para el primer caso el requerimiento debe relacionarse a un determinado contenido de humedad. Se debe estudiar la influencia de las fisuras sobre las propiedades mecánicas y establecer sus límites en función de los resultados obtenidos. La máxima longitud para las fisuras se establece en función de su tipo y de las clases resistentes, con los valores presentados en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Longitud máxima de las fisuras de acuerdo a prEN 14081-1 (2000)

(1) De acuerdo a EN 338 (1996); la longitud máxima se refiere a la acumulación de fisuras del mismo tipo en el cuerpo de prueba; los límites están establecidos para madera seca.

Tipo	Clases resistentes iguales e inferiores a C18 ⁽¹⁾	Clases resistentes superiores a C18 ⁽¹⁾
Fisuras no pasantes	Fisuras con una profundidad inferior a la mitad de la menor dimensión del cuerpo de prueba, pueden ser desestimadas	
	No mayores al menor valor entre 1,5m o la mitad de la longitud de la probeta	No mayores al menor valor entre 1,0m o un cuarto de la longitud de la probeta
Fisuras pasantes	No mayores al menor valor entre 1,0m o un cuarto de la longitud de la probeta. En los extremos, menores o iguales al doble de la dimensión transversal mayor	Solamente permitidas en los extremos y con una longitud menor o igual a la dimensión transversal mayor

Además de considerar las cuatro características antes mencionadas, cuya influencia sobre las propiedades mecánicas es normalmente importante y por lo tanto es necesario investigar, prEN 14081-1 (2000) establece criterios para limitar otros defectos. Dentro de ellos se encuentran la presencia de afecciones biológicas, madera de reacción, daños mecánicos, y defectos especiales producidos durante el proceso de elaboración de la madera aserrada, y otros, cuya influencia sobre el comportamiento mecánico sea estudiada y comprobada para una determinada especie. Por otra parte, las características relacionadas a la geometría, en muchos casos originadas durante los procesos de producción y secado, tales como arista faltante y deformaciones, aunque no afecten la tensión resistente y el módulo de elasticidad del cuerpo de prueba, deben ser limitadas por razones constructivas. Las deformaciones comunes se expresan en la forma de abarquillado, combado, encorvadura y torcedura, cuyas definiciones se pueden consultar en la norma nacional IRAM 9502 (1977).

Los procesos mecánicos de clasificación necesitan de una inspección visual adicional para controlar las características no detectadas mecánicamente, tales como la presencia de fisuras, ataques biológicos y deformaciones excesivas. Los modelos que no registran completamente cada pieza, permaneciendo fuera del proceso los extremos de cada cuerpo, requieren de una inspección visual de estas partes. Los requerimientos generales relacionados a la clasificación mecánica están establecidos en la norma EN 519 (1996), en proceso de sustitución por los proyectos prEN 14081-1/2/3 (2000).

Las normas de clasificación visual por resistencia que cumplan los requerimientos generales ya mencionados, y se encuentran respaldadas por una extensa experiencia y suficientes resultados referidos a aplicaciones sobre una especie o grupo de especies, se pueden incorporar al sistema internacional europeo a través de EN 1912 (1998). Esta especifica la clase resistente, de las contempladas en EN 338 (1996), a la cual puede ser asignado cada grado de calidad determinado por una determinada norma. Con este fin se detalla el país al cual pertenece la norma considerada, la denominación del grado o clase de calidad conforme a la misma, la especie o grupo de especies que involucra, y la procedencia o región de cultivo de las mismas. Es decir que a través de EN 1912 (1998) se pueden determinar grados de calidad equivalentes para distintas especies o grupo de ellas, clasificadas con normas de diversos países. Todas las combinaciones referidas a grado de calidad/especie/procedencia, que pueden ser asignadas a una misma clase resistente del sistema contemplado en EN 338 (1996) poseen las propiedades de resistencia, rigidez y densidad especificadas en ésta, y por lo tanto pueden brindar la misma respuesta desde el punto de vista de su comportamiento estructural (Glos, 1995a).

La madera aserrada clasificada mecánicamente puede ser asignada directamente a una

clase resistente del sistema y por lo tanto no se encuentra especificada en la norma. De esta manera se accede a los beneficios, que para todos los sectores de la sociedad que participan de la construcción, lleva implícito el hecho de disponer de una oferta de material más amplia y comparable desde el punto de vista físico y mecánico.

Por otra parte, el importante desarrollo que ha experimentado en los últimos años la producción de vigas laminadas encoladas para uso estructural, ha originado el establecimiento de un sistema de clases resistentes en el marco normativo europeo, el cual está establecido, para especies de coníferas, en EN 1194 (1999). La inserción de una determinada calidad de vigas laminadas en una de las clases resistentes del sistema, requiere que los valores característicos de aquella sean iguales o superiores a los de ésta, para las propiedades establecidas. La obtención de los valores característicos puede efectuarse a través de dos caminos diferentes. El primero consiste en calcularlos a partir de los resultados de ensayos realizados con las vigas laminadas. El segundo contempla la derivación de los mismos a partir de conocer los valores característicos de las láminas destinadas a la construcción de las vigas. Estos pueden ser obtenidos a través de ensayos realizados conforme a la norma EN 408 (1996) y posterior tratamiento estadístico según EN 384 (1996), o directamente de los correspondientes a la clase resistente a la que pertenecen las láminas, de acuerdo con EN 338 (1996). La resistencia característica y el módulo de elasticidad característico medio en tracción paralela a las fibras son los valores fundamentales de las tablas que permiten deducir, a partir de ellos, las propiedades mecánicas de las vigas laminadas que componen. En consecuencia, la influencia que los parámetros ejercen sobre estas propiedades, así como el valor de éstas han motivado la realización de numerosas investigaciones sobre tablas de distintas especies (Colling & Dinort R, 1987; Colling & Görlacher, 1989; Glos & Diebold, 1994; Glos & Lederer, 2000).

Un antecedente destacado del sistema internacional europeo de clases resistentes, presentado en el presente apartado es el australiano, constituido por grupos resistentes formados por especies de similares propiedades mecánicas y de densidad. Este proceso se inició en la década de 1930, con los grupos denominados A, B, C y D, y, posteriormente, dio lugar al actual sistema vigente a través de la norma AS 2878-1986 (1986). Dentro de sus características principales se pueden citar i) la identificación de diversas especies con comportamiento mecánico similar, las que habitualmente no son fáciles de diferenciar en el mercado, ii) la utilización de los valores medios de las propiedades mecánicas para la determinación de los límites correspondientes a los distintos grupos, y iii) la determinación de esas propiedades mecánicas a través de ensayos realizados sobre probetas pequeñas y libres de defectos.

El sistema australiano, para la obtención de la tensión básica de trabajo de un determinado elemento estructural, contempla la consideración de tres aspectos en forma conjunta:

i) el conocimiento del grupo resistente al cual pertenece la especie, ii) la clasificación visual en un grado de calidad estructural, y iii) la asignación final a un determinado nivel de los contemplados para la tensión básica de trabajo, en función de las dos consideraciones anteriores. Los grupos resistentes establecidos en AS 2878 (1986) son 7 para madera verde y 8 para madera seca, o sea con un contenido de humedad del 12%, permitiéndose en consecuencia efectuar el análisis para ambas condiciones. La asignación de una especie a un determinado grupo resistente se materializa a través de comparar el valor medio del *MOR*, *MOE*, y la resistencia en compresión paralela a las fibras, con los valores mínimos establecidos para el grupo. Provisionalmente puede realizarse también sobre la base del valor medio de la densidad aparente. La clasificación visual de cada pieza en un grado estructural se lleva a cabo conforme a las normas de clasificación visual correspondientes, en función de los límites establecidos para cada característica adoptada como parámetro. En este aspecto, y para especies frondosas, es de aplicación la norma AS 2082-2000 (2000), la que considera 4 grados de calidad estructurales. Finalmente, los niveles de la tensión básica de trabajo en flexión fueron determinados conforme a la progresión geométrica contemplada en la serie de números preferidos (R10), que provee una relación constante entre cada grado y el que le sigue en el sistema (Standards Association of Australia, 1985).

La comparación de los procesos previstos en este sistema, sintéticamente descriptos, con los europeos, pone de manifiesto que estos últimos son más simples y confiables. La conformación de las clases resistentes sobre la base del valor característico de las propiedades de resistencia, rigidez y densidad posibilita por un lado la inserción de cualquier combinación norma de clasificar/especie/procedencia a nivel mundial, y por el otro permite lograr una confiabilidad congruente con la filosofía moderna del diseño estructural por estados límites de resistencia y servicio. Este último aspecto encuentra otro sustento en la determinación de las propiedades a través de pruebas ejecutadas sobre cuerpos de prueba de tamaño estructural usual.

2.2 Características particulares del *E. grandis*

En los apartados anteriores se analizaron las propiedades más importantes de la madera como material estructural y se presentó el estado actual del conocimiento en lo concerniente a la clasificación por resistencia, tanto en forma visual como mecánica. Teniendo en cuenta su importancia actual, por separado fue presentado el sistema internacional de clases resistentes contemplado en las normas europeas. En este apartado se describirán las características particulares de la madera de *E. grandis* que se vinculan a los objetivos del trabajo.

Al género *Eucalyptus* pertenecen más de setecientas especies frondosas originarias en

su inmensa mayoría de Australia. A través de miles años de evolución, este género pasó a ser parte integrante del paisaje australiano, y solamente dos especies pueden considerarse endémicas fuera de Australia, *E. Urophylla* y *E. Deglupta*. La primera se considera que es originaria de Timor y otras islas de Indonesia, mientras que la segunda es de Nueva Guinea, Sulawesi y Mindanao (Dadswell, 1972; INTA, 1995).

La velocidad de crecimiento y el elevado rendimiento de varias especies de eucaliptos, especialmente fuera de Australia, pueden considerarse asombrosos. En regiones tropicales el *E. deglupta* y en regiones templadas el *E. grandis* y el *E. globulus*, entre otras especies, superan holgadamente a los pinos. Consecuentemente, la superficie cultivada ha crecido a un ritmo muy importante (Brown & Hillis, 1978).

La introducción de los eucaliptos en la Argentina data de la década de 1850, y se le atribuye a Domingo F. Sarmiento haber dispuesto la siembra de *E. globulus* en la Provincia de Buenos Aires. Para la Mesopotamia se reconocen dos vías de ingreso, una desde Brasil hacia Misiones y la otra desde Australia hacia Entre Ríos. Las primeras plantaciones realizadas en Misiones datan de la década de 1940, y se realizaron con las especies *E. grandis*, *E. saligna* y *E. urophylla*. En la Provincia de Entre Ríos se registran las primeras plantaciones en la misma década, pero el crecimiento importante ocurrió con posterioridad (INTA, 1995).

En la década de 1990 se encontraban más de 200000 hectáreas forestadas con eucaliptos, de las cuales más del 60% estaban localizadas en la Mesopotamia. Los buenos resultados alcanzados con la especie *E. grandis* motivaron que cobrase un impulso superior a las otras y se constituya en la que predomina, sobre todo en las provincias de Corrientes y Entre Ríos. Si bien existen forestaciones diseminadas en toda la Mesopotamia, las dos principales zonas de cultivo pueden definirse como: i) noreste de Entre Ríos y sudeste de Corrientes, con la principal concentración en los Departamentos de Federación Concordia y Colón, ii) noreste de la Provincia de Corrientes, con la mayoría de las plantaciones en los Departamentos de Santo Tomé e Ituzaingó. Ambas regiones poseen suelos muy aptos para el cultivo de esta especie. Las densidades de plantación más usuales oscilan entre 1000 y 1100 plantas por hectárea, con distribuciones rectangulares o cuadradas, lo cual permite obtener diámetros adecuados para el aserrado a edades de diez o doce años (INTA, 1995).

Con referencia a las propiedades microscópicas de los eucaliptos, y en particular de la especie *grandis*, Hillis (1978) señala que la distancia a la médula tiene mayor influencia que la altura en el árbol sobre la longitud de las fibras. Reporta valores de 0,69mm y 1,05mm para mediciones efectuadas sobre la médula y a 120mm de ella, en *E. grandis* de rápido crecimiento de Sudáfrica. Para el mismo caso señala que el diámetro de las fibras se incrementa desde el centro de crecimiento hacia la periferia del tronco. En función de la altura, destaca los mayores valores del

diámetro a aproximadamente 11m sobre el suelo, para luego decrecer hasta el extremo superior del árbol. Respecto de la inclinación de las fibras respecto de la vertical, señala un menor nivel en los eucaliptos que en las especies de coníferas, aunque reporta valores importantes para el *E. grandis* proveniente de Zambia. Informa que el espiralamiento de las fibras se incrementa a una cierta distancia de la médula pero luego decrece hacia los sectores externos del tronco. En Argentina, de las especies pertenecientes a este género, la que mejor comportamiento ha mostrado es el *E. grandis*, presentando fibras derechas o ligeramente entrelazadas (INTA, 1995).

Con respecto a la estructura macroscópica, Dadswell (1972) indica que los anillos anuales de crecimiento no están bien definidos en la mayoría de las especies pertenecientes al género *Eucalyptus*. Señala que si bien la variabilidad es elevada entre especies y aún dentro de cada una de ellas, los eucaliptos muestran, en este aspecto, el mismo comportamiento que la mayoría de las especies frondosas cultivadas en el hemisferio sur. Hillis (1978), en la misma línea, reporta que los anillos anuales de crecimiento son difíciles de distinguir en árboles cultivados a poca altura sobre el nivel del mar y en climas suaves.

Hillis (1978) ha encontrado que en muchas ocasiones la madera proveniente de eucaliptos tiene una excelente apariencia y parece estar sana, pero cuando es aserrada revela la presencia interior de ramas con material de mala calidad. Estas zonas, cuando se ubican en la periferia del tronco, pueden facilitar la penetración de agentes biológicos nocivos, pues no se saturan totalmente con resina como ocurre en las especies de coníferas, lo cual en estos casos impide el acceso del agua. Los eucaliptos poseen en general un desrame natural en la zona inferior del árbol, originado por la falta de suficiente luz natural, siendo en este sentido el *E. grandis* un caso típico (Hillis, 1978; INTA, 1995). En la medida en que la plantación cobra altura, las ramas situadas en la parte inferior se van secando y desprendiendo, generándose un sistema de aislamiento natural en la zona de la fractura con depósitos de kino, aunque no la sellan perfectamente. Este sistema de desrame natural no es perfecto, por lo cual la ejecución de una poda programada elimina la presencia de estos deterioros, a la vez que posibilita la generación de madera sin nudos en la zona exterior del tronco. Prácticas silviculturales como la poda y el raleo, junto al estudio de la edad más conveniente de rotación, permiten optimizar el tamaño de los árboles para la producción de madera aserrada y el rendimiento económico de la plantación. En este último aspecto, la tendencia actual es disminuir la edad de corte, alcanzándose en Argentina muy buenos rendimientos para árboles de *E. grandis* con una edad comprendida entre los 10 y los 15 años (INTA, 1995).

Los depósitos de kino son exudaciones fenólicas de color rojo oscuro que se encuentran en zonas dañadas de la madera, incluyendo los nudos o presencia de restos de ramas, como se expresó anteriormente. Su presencia varía entre especies y procedencias, pero es una

característica de los eucaliptos que puede constituir una forma de degradación (Dasdwell, 1972) y ha sido encontrado en el *E. grandis* de Argentina (INTA, 1995). Se ha informado que solamente los grandes depósitos de kino afectan las propiedades mecánicas (Hillis, 1978).

La presencia de fisuras, normalmente asociada con problemas de contracción ocurridos durante el secado, exhiben una gran variación en los eucaliptos, siendo el *E. grandis* en general la especie que menores problemas ofrece (Hillis, 1978). A iguales conclusiones se ha arribado para el *E. grandis* de Argentina (INTA, 1995).

La zona central del tronco, conteniendo médula o el material adyacente a ella, se caracteriza por poseer propiedades de resistencia y rigidez de menor calidad en los eucaliptos y otras especies frondosas, debido fundamentalmente a la presencia de pequeñas fisuras en las paredes de las células, entre otras causas (Hillis, 1978). Esta circunstancia se encuentra reflejada en la norma australiana AS 2082/2000 (2000), que limita la presencia de madera con médula o adyacente a ésta. En la misma línea, valores de resistencia y rigidez superiores para tablas distantes de la médula que cercanas a ella, fueron encontrados en un programa de investigación que involucró tablas de *E. grandis* de Uruguay (Pérez del Castillo, 2001).

La madera de *E. grandis* de Argentina ha sido reportada como poco durable en tierra, mientras que al aire mantiene esa condición la albura, pero el duramen es durable. No obstante, es resistente a los insectos xilófagos y no se han encontrado importantes afecciones biológicas, como pudriciones o daños causados por insectos y hongos (INTA, 1995).

El *E. grandis* de Argentina se encuentra dentro de las especies de eucaliptos consideradas livianas, y presenta un aspecto claro. Su color es castaño rosado para el duramen y crema para la albura, con textura y brillo medianos. El vetado es suave, siendo frecuentes las variaciones de tonalidad en su superficie. El aserrado se realiza con facilidad en estado verde, siendo regular su aptitud en estado seco, mientras que el cepillado se puede llevar a cabo sin inconvenientes. Respecto de las propiedades físicas, INTA (1995) reporta un valor de $467\text{kg}/\text{m}^3$ para la densidad aparente de esta especie, cultivada en el Departamento de Concordia, Provincia de Entre Ríos y secada naturalmente, lo cual se corresponde con un contenido de humedad de equilibrio comprendido entre el 14% y el 17%. Este valor compara relativamente bien con datos obtenidos para la misma especie procedente del norte de Uruguay (Pérez del Castillo, 2001), pero es significativamente menor que los publicados para otras regiones (Standards Association of Australia, 1986; Standards Australia, 2000).

No se conocen antecedentes de programas de ensayos relacionados con la determinación de las propiedades mecánicas del *E. grandis* de Argentina en tamaño estructural. INTA (1995) informa resultados referidos a pruebas realizadas con probetas pequeñas y libres de defectos, conforme a la norma ASTM D 143. En flexión estática, con madera secada naturalmente,

se obtuvieron valores de $73,1N/mm^2$ y $9835N/mm^2$ para el módulo de rotura y el módulo de elasticidad, respectivamente. En estado verde los correspondientes resultados fueron $58,2N/mm^2$ y $6919N/mm^2$. En compresión paralela a las fibras los valores para madera seca son $34,2N/mm^2$ y $15053N/mm^2$ para la tensión de rotura y el módulo de elasticidad, respectivamente. Para madera verde los resultados correspondientes que se reportan son $24,2 N/mm^2$ y $11846 N/mm^2$. Estos datos muestran una disminución de la resistencia y rigidez para la madera verde en comparación con la seca, lo cual es congruente con la teoría, pero a su vez destacan un llamativamente elevado valor del módulo de elasticidad en compresión paralela a las fibras con relación al obtenido en flexión.

Para una serie de ensayos realizados con tablas de *E. grandis* de Uruguay en tamaño estructural, conforme a la norma ASTM D 198, libres de médula y con un contenido de humedad del 12%, fue reportado un valor medio de $54N/mm^2$ para la tensión de rotura en flexión (Pérez del Castillo, 2001). Para el mismo caso, el valor del módulo de elasticidad osciló entre $11200N/mm^2$ y $12600N/mm^2$. Utilizando la misma madera, este programa incluyó ensayos sobre probetas pequeñas y libres de defectos, respecto de los cuales se publican valores medios de $80,0N/mm^2$ y $11300N/mm^2$ para la resistencia y el módulo de elasticidad en flexión, respectivamente, mientras que el correspondiente a la tensión de rotura en compresión paralela a las fibras alcanzó $44,5N/mm^2$. En el caso de flexión, los resultados confirman una considerable mayor resistencia en los cuerpos de prueba pequeños que en los de tamaño estructural, pero valores similares para la rigidez.

Para las tablas de tamaño estructural mencionadas, se informa una mayor resistencia y rigidez en aquellas distantes de la médula que en las más cercanas a la misma. De igual manera para las ensayadas en estado seco ($H = 12\%$) que con un contenido de humedad cercano al punto de saturación de las fibras ($H = 26\%$). El mismo programa incluyó la determinación de las propiedades elásticas a través de distintos métodos no destructivos, como el basado en la frecuencia fundamental de vibraciones longitudinales, el tiempo de propagación de ondas ultrasónicas y de ondas inducidas por impacto. Todos los métodos demostraron una alta eficiencia para calcular el módulo de elasticidad de esta especie cultivada en Uruguay (Pérez del Castillo, 2001).

En este capítulo se desarrolló el marco teórico utilizado para el diseño de la investigación empírica. Se presentó el estado actual del conocimiento y las tendencias modernas en lo concerniente a la clasificación por resistencia de la madera, tanto a través de métodos visuales como mecánicos. Se dedicó un apartado al análisis de las propiedades de este material que más estrechamente se relacionan con los procesos de clasificación por resistencia. Finalmente se describieron las características particulares del *E. grandis*, y en particular el cultivado en Argentina. Dada su importancia actual, se describió el sistema internacional de clases resistentes contemplado en las

normas europeas, el cual será empleado en la definición de materiales y métodos que se detalla en el Capítulo 3, así como en la discusión de los resultados que se presenta en el Capítulo 4.

3 Programa experimental

En el presente Capítulo se describen los materiales y métodos empleados en la investigación, así como las técnicas utilizadas para el procesamiento de datos y obtención de valores característicos. Los mismos responden al marco teórico desarrollado en el Capítulo anterior.

3.1 Materiales

Los materiales para la investigación empírica fueron preparados de manera de cumplir con la condición de representatividad de la población estudiada, tanto desde el punto de vista de los requerimientos estadísticos básicos del muestreo, como en lo referente a especie, procedencia y edad de corte, y también a los procesos normales de producción del material y dimensiones más usuales en estructuras.

3.1.1 Diseño de las muestras

Fueron consideradas las secciones transversales de vigas y tablas de uso más frecuente en estructuras resistentes para la especie y la cantidad y tamaño de muestras necesarios para lograr resultados estadísticamente confiables conforme a la norma EN 384 (1996). Como las propiedades de resistencia y rigidez en flexión son las más importantes para el diseño de un método de clasificación por resistencia y para la obtención de los correspondientes valores característicos conforme al sistema internacional europeo, 5 de un total de 7 muestras fueron destinadas a este tipo

de ensayo estático, 4 con secciones típicas de vigas y 1 con la sección más usual para tablas. Con el fin complementario de analizar el comportamiento de las piezas a tracción y compresión paralela a las fibras, se destinó 1 muestra a cada uno de estos ensayos. Las dimensiones de las tablas utilizadas en nuestro país, tanto en calidad de madera aserrada como en la condición de láminas destinadas a la construcción de vigas laminadas encoladas, no varían como en el caso de las vigas. En atención a esta circunstancia y a la importancia particular que revisten tanto las propiedades de flexión como las de tracción cuando las tablas son utilizadas como láminas, conforme a EN 1194 (1999), se consideró un tamaño mayor para estas muestras que para las correspondientes a vigas. Un detalle de las muestras diseñadas es presentado en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Muestras para ensayo

<i>M</i>	Ensayo estático	<i>n</i>	Dimensiones nominales (mm)
1	Flexión (Vigas, <i>Ca</i>)	50	50 x 50 x 1000
2	Flexión (Vigas, <i>Ca</i>)	50	50 x 75 x 1500
3	Flexión (Vigas, <i>Ca</i>)	50	50 x 100 x 2000
4	Flexión (Vigas, <i>Ca</i>)	50	50 x 150 x 3000
5	Flexión (Tablas, <i>P</i>)	150	100 x 25 x 500
6	Tracción paralela a las fibras (Tablas)	150	100 x 25 x 1200
7	Compresión paralela a las fibras (Cuerpos preparados de <i>M 2</i>)	50	50 x 75 x 300

3.1.2 Selección y preparación de los cuerpos de prueba

Teniendo en cuenta los principales lugares de forestación de la especie en Argentina y las tendencias para la edad de corte, la mitad de los cuerpos de prueba de cada muestra fue obtenida de árboles seleccionados al azar de una plantación realizada en Otoño de 1984 con semilla sudafricana de *E. grandis*, en el Departamento Santo Tomé, Provincia de Corrientes. La otra mitad de cada muestra se seleccionó al azar de cortes provenientes de una plantación realizada en Otoño de 1981 con semilla sudafricana de *E. grandis* en el Departamento Concordia, Provincia de Entre Ríos. Ambas plantaciones constituían los únicos casos con semilla de origen certificado y en explotación activa para el momento de la selección de muestras, considerando las regiones de procedencia principales para la especie. En el primero de ellos, la plantación se originó con 1111 árboles por hectárea, recibiendo luego una poda algo informal, sin programación estricta, y 3 raleos. En el

segundo, la cantidad de árboles por hectárea fue similar y no se experimentaron tratamientos silviculturales, constituyendo por lo tanto ambos casos ejemplos representativos de la producción para ese momento.

Luego de realizado el apeo y corte de trozas, en longitudes de aproximadamente 4m, el aserrado se produjo siguiendo los procesos habituales en los establecimientos que las empresas proveedoras del material utilizan para su producción. El apeo de árboles y preparación de la madera proveniente de Entre Ríos se llevó a cabo en la última semana del mes de Febrero de 2001, mientras que la proveniente de Corrientes se hizo en la primera semana de Abril del mismo año.

En este último caso, en el cual se seleccionaron árboles completos en la plantación, fue posible ubicar la posición de cada pieza aserrada respecto de la médula y de la altura en el árbol, información que fue conservada durante toda la investigación para analizar la variabilidad de las propiedades en función de esas variables. Para estudiar la variación de las propiedades en función de la distancia a la médula se utilizaron las tablas de las muestras 5 y 6, pues la igualdad de sus dimensiones transversales permite lograr mayor precisión. Con este fin se designó con 0 la posición de la probeta que poseía la médula, y, a partir de ésta, y hacia el borde exterior del tronco, se numeró en orden ascendente la posición de las restantes, considerando intervalos de 25mm. Un detalle esquemático de los cortes y del sistema de marcación se puede apreciar en la Figura 3.1.

Para estudiar la variación de las propiedades en función de la altura en el árbol se utilizaron todas las muestras, y se designó a las trozas en orden ascendente, asignando el número 1 a la inferior, y el 6 a la más elevada. En el caso de la madera proveniente de Entre Ríos, las piezas cortadas fueron seleccionadas al azar en el aserradero, no siendo posible conservar la ubicación de las mismas dentro del árbol debido a la complejidad que esta tarea significaba para la producción de la empresa. No obstante, para ambas procedencias fue factible obtener muestras representativas de la población analizada, considerando dimensiones y procesos de producción normales, así como la diversidad de calidades existentes en el mercado para la especie.

Las longitudes de las piezas aserradas, obtenidas de las trozas con las dimensiones transversales adecuadas, fueron como mínimo 1m mayores a las necesarias para producir los cuerpos de prueba. Esta conformación se adoptó con el fin de posibilitar la ubicación de las secciones más débiles en la zona de mayor esfuerzo durante la realización del correspondiente ensayo estático. Posteriormente a su aserrado, las piezas se estacionaron en un espacio semi-cubierto, protegidas de las acciones climáticas directas, y estibadas con separadores intermedios de un espesor mínimo de 25mm, con el fin de lograr un secado natural. Luego de logrado éste, en un período de tiempo de aproximadamente 8 meses, se prepararon los cuerpos de prueba con las dimensiones nominales indicadas en la Tabla 3.1 y con las secciones más débiles ubicadas en la zona de máximo esfuerzo prevista para los ensayos. La Muestra 7, destinada a pruebas de

compresión paralela a las fibras, fue obtenida de la zona más débil de los trozos sobrantes de las piezas utilizadas para preparar la Muestra 2. De cada una de las 50 piezas aserradas destinadas a producir los cuerpos de prueba de la Muestra 2 se obtuvo uno para la Muestra 7. Para la madera proveniente de la Provincia de Corrientes fue posible adicionalmente identificar las probetas de ambas muestras procedentes de una misma pieza. Posteriormente a su corte, los cuerpos de prueba fueron cepillados, numerados y colocados en cámara climatizada a una temperatura y humedad relativa ambiente de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ y $65\pm 5\%$ respectivamente.

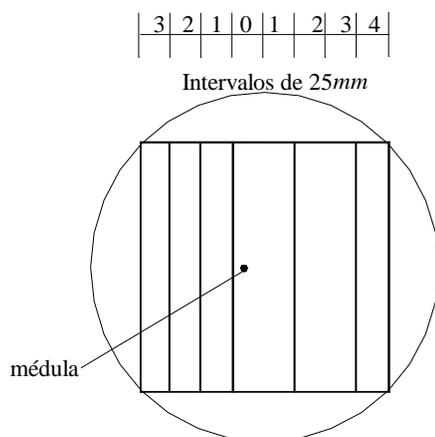


Figura 3.1 Sistema de corte y marcación de las piezas

3.2 Métodos

Todas las determinaciones se llevaron a cabo luego de preparar y acondicionar en clima normalizado a los cuerpos de prueba integrantes de las 7 muestras.

3.2.1 Registro de dimensiones y características visuales

Las dimensiones reales y las características visuales de los cuerpos de prueba fueron registradas con una precisión del 1% y conforme a los lineamientos de las normas EN 1310 (1997) y prEN 14081-1 (2000). Fueron consideradas todas aquellas características que, de acuerdo al análisis efectuado en el marco teórico del Capítulo 2, pueden influir sobre las propiedades mecánicas y físicas del material estudiado. Se registraron también características geométricas, tales como

deformaciones, que no afectan su comportamiento resistente pero pueden tener importancia en aspectos complementarios. A su vez, se relevaron todas las particularidades propias de la especie que fueron encontradas durante el proceso.

Las dimensiones de la sección transversal fueron tomadas a no menos de 150mm de cada extremo del cuerpo de prueba y en el centro, para luego adoptar como valor definitivo el promedio de los mismos. La longitud se midió sobre el eje longitudinal y en la zona central de la dimensión transversal mayor. En el caso de cortes extremos no rectos, se promedió las lecturas efectuadas sobre el centro de dos lados adyacentes.

El tipo de corte se describió para los dos extremos y para el trozo cortado cerca de la zona de rotura con el fin de determinar la densidad aparente y el contenido de humedad. En los correspondientes esquemas se indicó la posición de la médula y de los anillos anuales, indicando el tipo de corte, ya sea central con médula, radial, tangencial o intermedio.

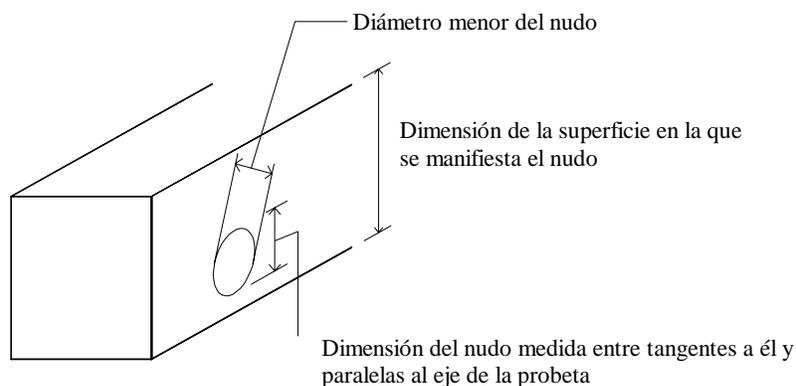


Figura 3.2 Criterios de medición de un nudo sobre la superficie de la pieza

La ubicación y dimensiones de los nudos se registró en todas las caras de cada cuerpo de prueba, sin efectuar distinciones entre distintos tipos e ignorando aquellos con dimensiones menores a 5mm . Teniendo en cuenta el análisis teórico efectuado en el Capítulo 2, y, con la finalidad de investigar con profundidad la influencia de esta característica sobre las propiedades mecánicas, para el estudio de la nudosidad se consideraron 10 diferentes criterios. Estos expresan la relación entre el tamaño del nudo y el de la dimensión de la superficie externa en la cual se manifiesta, como se esquematiza en la Figura 3.2, o la relación entre la proyección del nudo sobre la sección transversal de la probeta y el área de ésta, como se ilustra en la Figuras 3.3 y 3.4.

Cuatro de ellos son aptos tanto para vigas como para tablas: i) relación de la

dimensión del nudo mayor, medida entre líneas tangentes a él y paralelas al eje longitudinal de la probeta, y la dimensión transversal de la superficie en la cual se manifiesta. Para los nudos de arista se considera la menor de las dos relaciones (en adelante este criterio se denominará K); ii) proyección del nudo mayor sobre la sección transversal del cuerpo de prueba, con relación al área de la sección transversal del mismo ($KAR1$); iii) mayor proyección del nudo o nudos intersecados por una sección recta, en relación al área de la sección recta de la probeta. Las proyecciones superpuestas se consideran una sola vez ($KAR2$); iv) igual al anterior, pero aplicado a la mayor proyección de un nudo o nudos ubicados en una longitud del cuerpo de prueba igual a $150mm$ ($KAR3$).

Dos criterios aplicados solamente a vigas: i) relación entre el diámetro menor del nudo mayor y la dimensión transversal de la superficie en la cual aparece. En nudos de arista, para la dimensión del nudo se considera el menor valor entre la distancia entre líneas tangentes a él y paralelas al eje longitudinal, y su diámetro menor (Kvi); ii) relación entre la mayor proyección de un nudo o nudos, o porciones de los mismos, intersecados en el cuarto exterior de la sección recta, de ancho b y altura $h/4$, y el área de esta sección de margen ($KARvi$).

Otros cuatro criterios aplicados solamente a tablas i) relación entre la suma de las dimensiones del nudo mayor en todas las superficies donde se manifiesta y el doble de la dimensión transversal mayor. La dimensión del nudo se considera como la distancia entre líneas tangentes a él y paralelas al eje longitudinal ($Kta1$); ii) igual al anterior, pero aplicado a la mayor suma de nudos en una longitud igual a $150mm$, considerando una sola vez las dimensiones superpuestas ($Kta2$); iii) relación entre el promedio de las dimensiones del nudo mayor sobre las superficies exteriores mayores de las tablas, y este ancho mayor de la probeta. El tamaño del nudo se mide entre líneas tangentes a él y paralelas al eje longitudinal ($Kta3$); iv) mayor relación entre el tamaño del nudo o nudos intersecados en una sección recta, y el ancho mayor de la tabla. Las dimensiones de los nudos se consideran solamente sobre las superficies exteriores mayores de las tablas y se miden entre líneas tangentes a ellos y paralelas al eje longitudinal ($Kta4$).

La desviación general de las fibras fue determinada en las cuatro superficies de cada cuerpo de prueba utilizando un trazador, consistente en una manivela provista de un mango articulado en un extremo y un clavo afilado y ligeramente inclinado en el otro. Aplicando este instrumento con la adecuada presión, su deslizamiento acompaña la dirección de las fibras y permite la medición de ésta con relación al eje longitudinal. Los resultados se expresan como el cociente entre el valor de la desviación y la longitud en la cual ésta se manifiesta. Valores menores a $1/14$ y desviaciones locales no fueron considerados.

El espesor de los anillos de crecimiento anual fue registrado a lo largo de la mayor línea radial en ambos extremos de cada cuerpo de prueba y en el trozo cortado cerca de la zona de

rotura para determinar la densidad aparente y el contenido de humedad. Se ignoró la zona comprendida en un radio de 25mm desde la médula, cuando ésta existía. Para el análisis se registró tanto el espesor del anillo mayor como la cantidad de anillos incluida en la longitud radial, de manera de posibilitar el cálculo del espesor promedio.

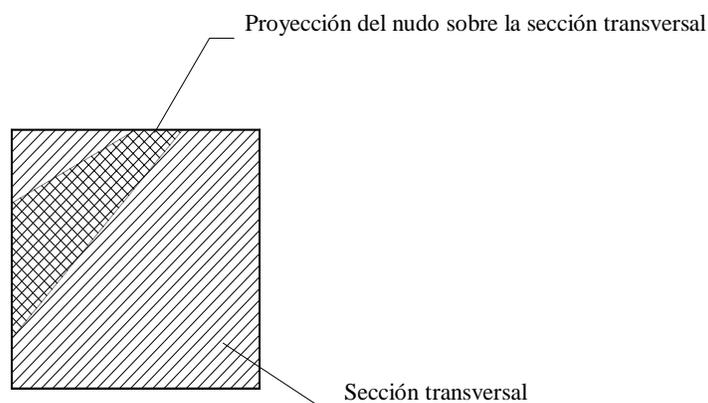


Figura 3.3 Criterio de medición de un nudo sobre la sección transversal de la pieza

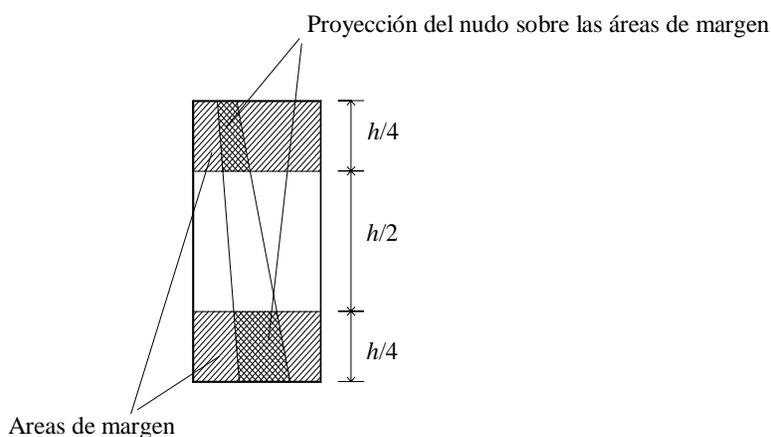


Figura 3.4 Criterio de medición de un nudo sobre el área de margen de la sección transversal

Las fisuras fueron ubicadas, descriptas y medidas en las cuatro superficies laterales de

cada cuerpo de prueba. Igual procedimiento se siguió con la presencia de kino, arista faltante y afecciones biológicas tales como hongos y pudriciones. La existencia de médula fue registrada en todas las superficies laterales y en los extremos, así como en el corte extraído de una zona cercana a la rotura. Importantes disminuciones de la sección transversal por defectos de aserrado fueron encuadradas en la categoría de grandes defectos.

Características relacionadas a la geometría de cada cuerpo de prueba, pero que no afectan directamente su comportamiento mecánico, tal como es el caso de las deformaciones, fueron consideradas como información complementaria. Para el abarquillado se midió el mayor valor de la deformación en el centro de cada superficie mayor y respecto de los correspondientes bordes adyacentes a él, en tanto que para el combado, el encorvado y la torcedura se registraron los mayores valores para una longitud de $2m$ y para toda la probeta. También se efectuó una descripción del color de cada cuerpo de prueba.

3.2.2 Determinación de la frecuencia fundamental de vibración

Luego de registradas las dimensiones y características visuales de todos los cuerpos de prueba, se procedió a realizar este ensayo dinámico a las 200 vigas correspondientes a las muestras 1, 2, 3 y 4 y a 142 tablas de la Muestra 6.

La frecuencia fundamental de vibración de las probetas fue obtenida excitándolas mecánicamente a través de un impacto producido en la dirección de la vibración deseada. Con la finalidad de lograr vibraciones libres de extrañas interferencias, los cuerpos se apoyaron sobre soportes constituidos por bandas estrechas de goma o poliuretano. Para el caso de las vibraciones longitudinales los apoyos se colocaron en el centro y para las flexionales en los puntos nodales de cada cuerpo de prueba, situados estos últimos a una distancia igual a $0,224l_i$ desde cada extremo para el primer modo de vibración, que fue el utilizado en este caso.

Las frecuencias longitudinales fueron analizadas impactando suavemente una sección transversal extrema con una pequeña herramienta y registrando las vibraciones mecánicas producidas por el golpe a través de un sensor de contacto directo ubicado en la otra sección extrema. La disposición esquemática del ensayo puede apreciarse en la Figura 3.5. Las frecuencias flexionales fueron producidas efectuando el impacto en un extremo, en el plano deseado para las vibraciones, y colocando el sensor en el centro del cuerpo, en la posición anti-nodal, como se indica en la Figura 3.6. Para las vigas de la Muestra 1 este tipo de análisis fue efectuado de canto, para las de las muestras 2, 3 y 4 de canto y de plano, y para las tablas solamente de plano. El sistema de detección consistió de un acelerómetro piezo-eléctrico tipo Vibrator PZ-10, el cual es

capaz de transformar las vibraciones en señales eléctricas. El sistema de análisis de señales consistió de un osciloscopio tipo Fluke 123 Scopemeter 20 MHz, una interfase y una computadora con el software correspondiente. El software tiene capacidad de presentar el espectro armónico y permite identificar la frecuencia fundamental de vibración a través de una transformada de Fourier. El ensayo fue repetido varias veces y el promedio de las 5 lecturas más similares entre si fue utilizado en los cálculos.

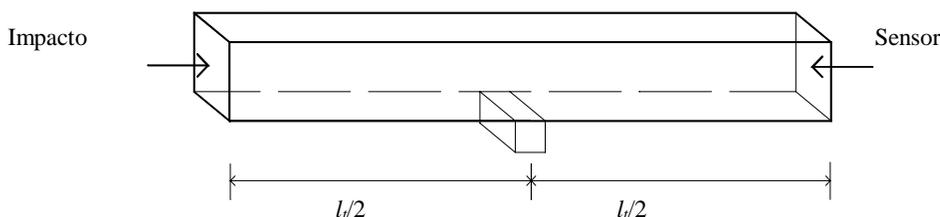


Figura 3.5 Disposición del ensayo para determinar la frecuencia fundamental de vibración longitudinal

Tanto el módulo de elasticidad dinámico longitudinal como el flexional fueron obtenidos de la solución estándar:

$$E_l = \frac{4l_t^2 f_l^2 \rho_p}{m_v^2} \quad (Ec 3.1)$$

$$E_f = \frac{4\pi^2 l_t^4 f_f^2 \rho_p}{m_n^4 i^2} \left(1 + \frac{i^2}{l_t^2} k_1 \right) \quad (Ec 3.2)$$

donde las constantes dependientes del modo de vibración m_n^4 y k_1 tienen un valor igual a 500,6 y 49,48, respectivamente, para el primer modo.

Teniendo en cuenta que la relación entre la longitud y la altura de los cuerpos de prueba es en este caso mayor a 15/1, y que la influencia del esfuerzo de corte es despreciada cuando se determina el módulo de elasticidad global en el ensayo estático de flexión (ver Ec 3.5) el término que contempla la influencia del esfuerzo de corte ha sido también ignorado en la Ecuación 3.2 (Görlacher, 1984). El valor de la densidad aparente promedio de cada cuerpo de prueba fue calculado a través del cociente entre la masa y el correspondiente volumen, determinados con una precisión mínima del 1% y utilizando la siguiente expresión:

$$\rho_p = \frac{m_c}{V_c} \quad (Ec 3.3)$$

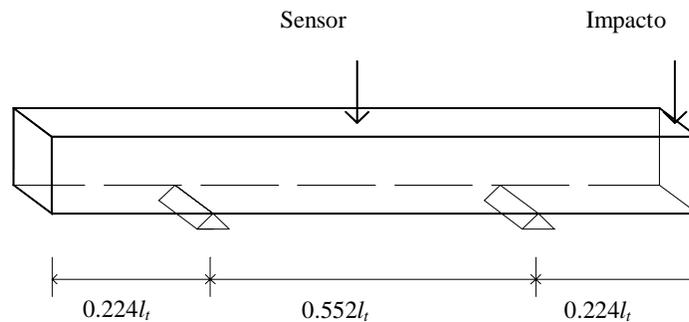


Figura 3.6 Disposición del ensayo para determinar la frecuencia fundamental de vibración flexional

3.2.3 Ensayos estáticos

Inmediatamente después de determinar las frecuencias fundamentales de vibración longitudinal y flexional, se procedió a llevar a cabo las pruebas estáticas de flexión, tracción y compresión paralela a las fibras, conforme a las prescripciones de la norma EN 408 (1996) y su actualización prEN 408 (2000). Para la aplicación de las cargas se utilizó una máquina tipo Shimadzu UH 1000 con capacidad máxima de 1000kN y escalas variables que permiten obtener una precisión del 1% de la carga aplicada en todos los casos. El cabezal puede desplazarse a velocidad constante y en cada caso particular se utilizaron adecuados dispositivos de aplicación de cargas y de apoyo. Los correspondientes pares de valores carga/deformación en período elástico necesarios para calcular el *MOE*, así como la carga máxima alcanzada en el momento de la rotura y una descripción detallada de esta última, fueron registrados en un protocolo individual para cada ensayo.

Los cuerpos de prueba sometidos al ensayo de flexión estática fueron ubicados con una separación entre apoyos igual a $18 \pm 3h$ y cargados simétricamente a una distancia igual a $6 \pm 1,5h$ de cada apoyo. La disposición general se indica esquemáticamente en la Figura 3.7. La zona aparentemente más débil fue ubicada en el tercio central y, con el fin de investigar con mayor precisión la influencia de las características visuales sobre la resistencia, se eligió como borde traccionado el que presentaba los mayores defectos. Las vigas de muestras 1, 2, 3 y 4 fueron ensayadas de canto y las tablas de Muestra 5 de plano. Para evitar daños originados en la concentración de cargas, placas de acero de adecuado espesor, ancho igual al de las probetas y

longitud inferior a la mitad de la altura de las mismas, fueron ubicadas en la zona de aplicación de cargas y de apoyos. La velocidad de desplazamiento del cabezal de cargas fue en todos los casos constante y menor a $0,0002h$ (mm/s), alcanzándose la carga de rotura en un tiempo de $300\pm 120s$.

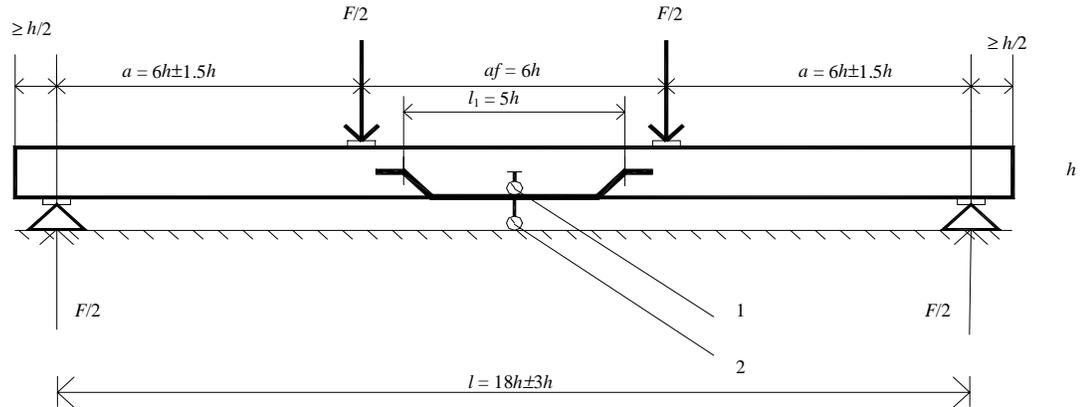


Figura 3.7 Disposición general del ensayo de flexión estática

(1) Un extensómetro a cada lado del eje neutro para determinar las deformaciones locales; (2) extensómetro inferior para determinar las deformaciones globales.

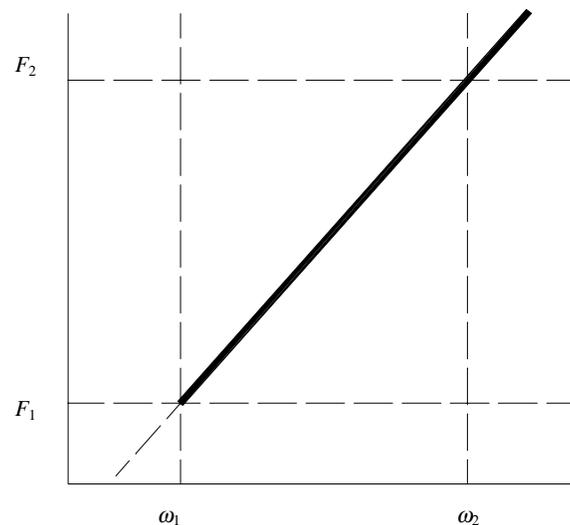


Figura 3.8 Lecturas de cargas y deformaciones en período elástico

Las deformaciones en período elástico (ver Figura 3.8) fueron medidas en la parte inferior del centro del vano respecto de los apoyos para el cálculo del *MOE* global, y sobre el eje neutro a ambos lados del cuerpo de prueba, respecto de puntos ubicados simétricamente y separados $5h$ para el *MOE* local (ver también Figura 3.7). Con este fin se utilizaron extensómetros tipo Somet, con una sensibilidad igual a $0,01mm$.

La tensión de rotura, el *MOE* global y el *MOE* local, fueron calculados con las siguientes expresiones:

$$f_m = \frac{F_{m\acute{a}x}a}{2W} \quad (Ec\ 3.4)$$

$$E_{m,g} = \frac{l^3(F_2 - F_1)}{4,7bh^3(\omega_2 - \omega_1)} \quad (Ec\ 3.5)$$

$$E_{m,l} = \frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16I(\omega_2 - \omega_1)} \quad (Ec\ 3.6)$$

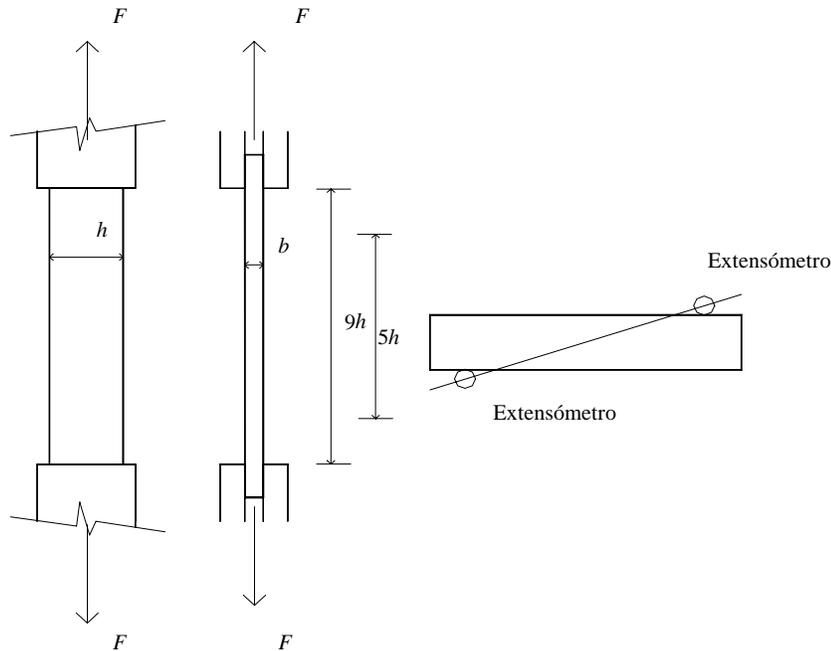


Figura 3.9 Disposición general del ensayo de tracción paralela a las fibras

Los ensayos de tracción paralela a la dirección de las fibras fueron llevados a cabo con las tablas de la Muestra 6, manteniendo una separación libre entre las mordazas de la máquina igual a 9 veces la dimensión transversal mayor (h). La disposición general del ensayo se indica esquemáticamente en la Figura 3.9.

La velocidad de desplazamiento del cabezal de cargas fue constante y menor a $0,00005l$ (mm/s) con el fin de obtener los valores de carga y deformación en período elástico necesarios para el cálculo del correspondiente módulo de elasticidad. Las deformaciones fueron medidas sobre una longitud igual a $5h$ ubicada simétricamente en el tramo central y conteniendo la zona más débil. Dos extensómetros tipo Kafer, ubicados sobre aristas opuestas diagonalmente (ver también Figura 3.9) con el fin de minimizar los efectos de posibles distorsiones y con una sensibilidad igual a $0,001mm$, fueron utilizados.

Luego de registradas las lecturas necesarias en período elástico, los ensayos fueron detenidos, procediéndose a la descarga para volver en forma inmediata a reiniciarlos con una velocidad constante pero adecuada para lograr la rotura en el tiempo establecido de $300\pm 120s$. La tensión de rotura y el módulo de elasticidad en tracción paralela a las fibras, fueron calculados con las siguientes expresiones:

$$f_{t,0} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A} \quad (Ec\ 3.7)$$

$$E_{t,0} = \frac{l_1(F_2 - F_1)}{A(\omega_2 - \omega_1)} \quad (Ec\ 3.8)$$

Los ensayos de compresión paralela a la dirección de las fibras fueron llevados a cabo con los cuerpos de prueba de la Muestra 7, preparados con una longitud igual a 6 veces la menor dimensión transversal (b). La disposición general del ensayo se indica esquemáticamente en la Figura 3.10.

La velocidad de desplazamiento del cabezal de cargas fue constante y menor a $0,00005l$ (mm/s), alcanzándose la carga de rotura en un tiempo de $300\pm 120s$. Las deformaciones fueron medidas sobre una longitud igual a $4b$ ubicada simétricamente en el tramo central y conteniendo la zona más débil. Dos extensómetros tipo Kafer, ubicados sobre aristas opuestas diagonalmente con el fin de minimizar los efectos de posibles distorsiones (ver también Figura 3.10) y con sensibilidad igual a $0,001mm$, fueron utilizados.

Los ensayos se efectuaron en forma continua hasta alcanzar la rotura en un tiempo de $300\pm 120s$. La tensión de rotura y el módulo de elasticidad en compresión paralela a las fibras fueron calculados respectivamente con las siguientes expresiones:

$$f_{c,0} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A} \quad (Ec\ 3.9)$$

$$E_{c,0} = \frac{l_1(F_2 - F_1)}{A(\omega_2 - \omega_1)} \quad (Ec 3.10)$$

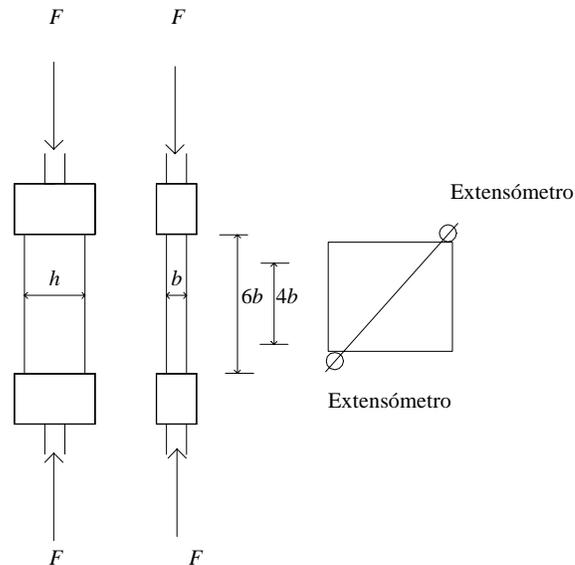


Figura 3.10 Disposición general del ensayo de compresión paralela a las fibras

3.2.4 Determinación de la densidad aparente y el contenido de humedad

La densidad aparente (ρ) y el contenido de humedad de cada cuerpo de prueba fueron determinados inmediatamente después de finalizado el correspondiente ensayo estático conforme a los lineamientos de las normas EN 408 (1996), ISO 3131-1975 (E) (1975) e ISO 3130-1975 (E) (1975), utilizando un trozo libre de defectos y cortado de un lugar cercano a la zona de rotura.

Para la determinación de la masa se utilizó una balanza electrónica tipo AND Fx - 3000, con capacidad de registrar 0,01g. Las dimensiones necesarias para la obtención del volumen se tomaron a cabo con un calibre tipo Mitutoyo, capaz de registrar 0,01mm. El secado del trozo hasta lograr su masa anhidra, se realizó en estufa a una temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$. Los valores de la densidad aparente y el contenido de humedad fueron calculados con las siguientes expresiones:

$$\rho = \frac{m_t}{V_t} \quad (Ec 3.11)$$

$$H = \frac{m_t - m_a}{m_a} \quad (\text{Ec 3.12})$$

3.2.5 Procesamiento de datos

Luego de finalizadas las tareas de laboratorio, los datos obtenidos fueron ordenados y procesados utilizando una computadora y software adecuado para darles tratamiento estadístico. En las operaciones se utilizan los símbolos matemáticos universales y los particulares detallados en la Lista de Símbolos presentada al comienzo de este trabajo. Las unidades se expresan para todos los casos en el Sistema Internacional de Unidades actualmente vigente. Las variables cuantitativas se operaron con la cantidad de cifras necesaria para asegurar una precisión mínima del 1% en los resultados. La presencia de una característica o atributo de una variable cualitativa se indicó con el número 1 y su ausencia con el 0.

El ajuste de los resultados de resistencia, rigidez y densidad a las condiciones de referencia que se establecen en la norma EN 384 (1996) se efectuó en forma individual. El valor del módulo de elasticidad en flexión, tracción y compresión paralela a las fibras fue ajustado a un contenido de humedad común del 12%, aumentándose el valor obtenido en el ensayo en un 2% por cada 1% de exceso en el contenido de humedad sobre la condición normalizada, y viceversa. Para la resistencia en compresión paralela a las fibras el incremento fue del 3% por cada 1% de exceso, y viceversa. Los valores de la densidad aparente se disminuyeron un 0,5% por cada 1% de exceso, y viceversa.

Los resultados obtenidos en los ensayos para la resistencia en flexión y en tracción paralela a las fibras fueron corregidos a la dimensión de referencia de $h = 150\text{mm}$ dividiéndolos por el factor $k_h = (150/h)^{0.2}$. Los valores de la resistencia a flexión, cuando los ensayos fueron realizados con disposición simétrica pero difiriendo de la distancia normalizada de $6h$ entre las cargas y los apoyos, se ajustaron a la disposición estática establecida dividiendo por el factor $k_l = (l_{es}/l_{et})^{0.2}$. En este caso el coeficiente $l_{et} = l + 5a_f$ se calculó con las distancias reales utilizadas en la prueba, mientras que l_{es} se obtuvo con idéntica expresión pero reemplazando en la misma los valores normalizados ($l = 18h$; $a_f = 6h$).

Para el análisis estadístico, la media aritmética fue adoptada como medida de centralidad y la desviación estándar y el coeficiente de variación como medidas de la dispersión. Para este último caso fueron utilizados también los valores mínimo y máximo.

Los percentiles y valores característicos fueron determinados siguiendo los lineamientos de la norma EN 384 (1996). Los percentiles inferiores 5% para la resistencia a tracción y compresión paralela a las fibras fueron calculados por ordenamiento, eligiéndose el valor

precedido por el 5% de los considerados. Para cantidades no divisibles por 20 se interpoló linealmente entre los dos valores consecutivos correspondientes. Un criterio equivalente se aplicó para la obtención del percentil inferior 7,5% utilizado para la resistencia a flexión. El percentil inferior 5% de la densidad aparente fue determinado paramétricamente, adoptando la curva de distribución normal como modelo matemático para las distribuciones de frecuencias. Los valores medios del *MOE* y de la densidad aparente se consideraron como la media aritmética de los resultados individuales.

Para calcular los valores característicos de la resistencia a flexión, tracción y compresión paralela a las fibras, los percentiles correspondientes fueron ajustados de acuerdo al tamaño de las muestras y también considerando la influencia que sobre la variabilidad de los datos tiene el método de clasificación por resistencia utilizado. Para el primero de los casos se aplicó el factor k_s , cuyos valores pueden consultarse en la norma EN 384 (1996). Para el segundo se consideró el factor k_v , igual a 1,0 para métodos visuales y a 1,12 para métodos mecánicos.

La variación concomitante entre una variable independiente o predictiva y otra dependiente fue analizada a través del coeficiente de correlación de Pearson, o coeficiente de correlación por el producto de los momentos. A través de la técnica del análisis de regresión lineal simple se obtuvo la ecuación de la recta de regresión, la que se expresó para cada caso en el diagrama de dispersión de valores correspondiente.

La variación entre dos o más variables predictivas y una dependiente, se estudió a través de la técnica del análisis de regresión lineal múltiple, con la cual se estimó el modelo adecuado para predecir los valores de la variable dependiente. La comparación entre los valores medios de dos grupos se realizó a través de la prueba de la diferencia de las medias, con el modelo de Student y el análisis de variancia.

La determinación del nivel de significación de las correlaciones y de las diferencias entre medias se llevó a cabo a través de la prueba de hipótesis nula con el modelo de Student y el análisis de variancia. El cumplimiento de la hipótesis de igualdad entre las variancias de las muestras analizadas se verificó utilizando la prueba de Levene.

En el presente Capítulo se describió el material seleccionado para la investigación empírica y los métodos empleados para el desarrollo de la misma. Para su diseño se utilizó como marco teórico de referencia el presentado en el Capítulo 2, y en particular los lineamientos del sistema internacional europeo de clases resistentes. El tamaño de muestra adoptado contempla en todos los casos la cantidad mínima de cuerpos de prueba admitida estadísticamente (40), más un margen del 25% que contempla la eventualidad de posibles ensayos no válidos. Los métodos descriptos, tanto para la realización de las pruebas, como para el procesamiento de los datos, permiten arribar a los

resultados necesarios para el alcance de los objetivos trazados. La presentación y discusión de éstos se efectúa en el Capítulo siguiente.

4 Presentación y discusión de los resultados

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos a partir del programa experimental. Los apartados 4.1 y 4.2 se refieren al desarrollo de un método de clasificación visual y al análisis de modelos teóricos para una clasificación mecánica por resistencia de la especie estudiada, respectivamente, los cuales constituyen los objetivos centrales del trabajo. En los restantes apartados se presentan y discuten otros aspectos complementarios, que amplían el conocimiento del material investigado en lo referente a su uso estructural.

4.1 Diseño de un método visual de clasificación por resistencia

Los resultados de las características relevadas para ser utilizadas como parámetros en una clasificación visual por resistencia están presentados en la Tabla 4.1. Del total de probetas preparadas fue descartada una, perteneciente a la Muestra 5. En numerosos casos fue imposible distinguir los anillos anuales de crecimiento, en coincidencia con otras investigaciones realizadas con la especie (Dadswell, 1972) y, consecuentemente, el ancho máximo y el promedio de los mismos fueron descartados como parámetros de clasificación para el propósito planteado.

De los cuatro criterios aptos para medir la nudosidad tanto en tablas como en vigas, y por lo tanto útiles para este proyecto diseñado con distintas secciones de uso estructural normal, *K* exhibe generalmente mayores valores medios y máximos pero menores coeficientes de variación que los otros. Las diferencias entre los valores medios son mayores para las vigas que para las tablas, y los cuerpos de prueba de la Muestra 1, con las menores dimensiones para la sección transversal de las vigas, presentan el mayor valor medio en todos los casos. El valor medio de

$KAR2$ para todas las muestras es 6% mayor que el de $KAR1$, y esta relación entre $KAR3$ y $KAR2$ es 23%. Las mismas diferencias para las tablas son 8% y 19% respectivamente, lo cual indica una presencia similar de nudos agrupados en vigas y en tablas.

Tabla 4.1 Parámetros visuales para las muestras ensayadas a flexión

(1) Registrados en el tercio central, sometido al máximo esfuerzo de flexión.

Parámetro		M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	Todas
$K^{(1)}$	<i>Min</i>	0	0	0	0,087	0	0
	<i>Med</i>	0,425	0,333	0,410	0,343	0,296	0,343
	<i>Máx</i>	0,855	1,000	0,836	0,690	0,738	1,000
	<i>S</i>	0,206	0,236	0,210	0,157	0,165	0,194
	<i>COV</i>	0,49	0,71	0,51	0,46	0,56	0,57
$KAR1^{(1)}$	<i>Min</i>	0	0	0	0,021	0	0
	<i>Med</i>	0,252	0,152	0,141	0,138	0,215	0,189
	<i>Máx</i>	0,831	0,699	0,325	0,308	0,564	0,831
	<i>S</i>	0,172	0,157	0,085	0,064	0,145	0,141
	<i>COV</i>	0,68	1,03	0,60	0,46	0,68	0,75
$KAR2^{(1)}$	<i>Min</i>	0	0	0	0,021	0	0
	<i>Med</i>	0,259	0,154	0,153	0,149	0,232	0,201
	<i>Máx</i>	0,831	0,699	0,454	0,380	0,643	0,831
	<i>S</i>	0,179	0,157	0,102	0,076	0,163	0,153
	<i>COV</i>	0,69	1,02	0,67	0,51	0,70	0,76
$KAR3^{(1)}$	<i>Min</i>	0	0	0	0,021	0	0
	<i>Med</i>	0,309	0,191	0,213	0,189	0,276	0,247
	<i>Máx</i>	0,843	0,699	0,568	0,480	0,822	0,843
	<i>S</i>	0,196	0,183	0,131	0,098	0,187	0,175
	<i>COV</i>	0,64	0,95	0,62	0,52	0,68	0,71
Inclinación fibras	<i>n (%)</i>	4 (8)	2 (4)	4 (8)	4 (8)	9 (6)	23 (7)
Fisuras	>C18 <i>n (%)</i>	15 (30)	10 (20)	26 (52)	27 (54)	13 (9)	91 (26)
	≤C18 <i>n (%)</i>	12 (24)	8 (16)	20 (40)	20 (40)	5 (3)	65 (19)
Médula ⁽¹⁾	<i>n (%)</i>	14 (28)	13 (26)	31 (62)	26 (52)	42 (28)	126 (36)
Kino ⁽¹⁾	<i>n (%)</i>	12 (24)	13 (26)	10 (20)	26 (52)	23 (15)	84 (24)
Ataques biológicos ⁽¹⁾	<i>n (%)</i>	0 (0)	2 (4)	0 (0)	1 (2)	0 (0)	3 (1)
Grandes defectos ⁽¹⁾	<i>n (%)</i>	0 (0)	1 (2)	1 (2)	1 (2)	0 (0)	3 (1)

Fueron encontrados solamente 23 cuerpos de prueba (7%) con inclinación general de las fibras mayor que 1/14, con similar porcentaje en todas las muestras. Un análisis particular muestra una inclinación máxima de 1/9 en una probeta y la presencia del valor 1/10 en cuatro casos, lo cual es consistente con resultados de otras investigaciones sobre la especie (Hillis, 1978; INTA, 1995) e indica que esta particularidad puede ser desestimada como parámetro visual para este estudio. Un total de 91 (26%) cuerpos de prueba presentaron fisuras excediendo los límites establecidos en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18, con mayores valores para vigas que para tablas. Las tablas de la Muestra 5 muestran un valor mínimo de 9% y para las vigas, con la única excepción de la Muestra 2, el porcentaje se incrementa cuando crece el tamaño de las probetas, con valores máximos de 52% y 54% para las muestras 3 y 4 respectivamente. Un análisis detallado indica que 31 (34%) cuerpos de prueba con este tipo de fisuras estaban libres de médula, mientras 60 (66%) la contenían. Fisuras con dimensiones mayores a las permitidas en prEN 14081-1 (2000) para la clase resistente C18 y menores fueron encontradas en 65 (19%) probetas. Un total de 126 (36%) cuerpos de prueba tenían médula en su tercio central, alcanzando las muestras 3 y 4 los mayores valores de 62% y 52% respectivamente, en coincidencia con la elevada presencia de fisuras ya descrita para las mismas muestras. Fueron encontrados depósitos de kino en 84 (24%) casos, exhibiendo una gran variación tanto en su tamaño como en su forma. Solamente 3 (1%) cuerpos de prueba presentaron pequeñas afecciones biológicas, confirmando datos disponibles para esta especie (INTA, 1995), en tanto que en igual cantidad de casos fueron encontrados grandes defectos producidos en el proceso de aserrado y preparación, tales como severas reducciones de las dimensiones en la sección transversal.

Los resultados para las propiedades mecánicas y la densidad aparente son indicados en la Tabla 4.2. El contenido de humedad medio para los 349 cuerpos de prueba sometidos a ensayos de flexión, utilizados para el diseño del método, fue 15%. Pocos datos se encuentran disponibles sobre esta especie cultivada en Argentina. Valores de $73,1N/mm^2$ para la tensión de rotura y de $9835N/mm^2$ para el módulo de elasticidad fueron reportados por el INTA (1995) para una serie de ensayos realizados de acuerdo a la norma ASTM D 143 sobre probetas pequeñas, libres de defectos y secadas naturalmente, de *Eucalyptus grandis* de Argentina. Pérez del Castillo (2001) obtuvo un valor medio de $54,0N/mm^2$ para el *MOR* y valores medios oscilando entre $11200N/mm^2$ y $12600N/mm^2$ para el *MOE*, en un programa de ensayos efectuados conforme a la norma ASTM D 198 con tablas en tamaño estructural, libres de médula y con un contenido de humedad del 12%, de *Eucalyptus grandis* de Uruguay. Los coeficientes de variación encontrados en este estudio para el *MOR* son mayores que los correspondientes al *MOE* en todas las muestras, y están en línea con resultados informados por Glos & Lederer (2000) para madera de Roble y Haya en dimensiones estructurales y por Pérez del Castillo (2001) para *Eucalyptus grandis* de Uruguay. Los valores

medios de la densidad oscilan entre 513kg/m^3 y 567kg/m^3 y los coeficientes de variación entre 0,07 y 0,19. Estos resultados son similares a los publicados para la especie cultivada en Argentina (INTA, 1995) y Uruguay (Pérez del Castillo, 2001), pero significativamente menores a los reportados por las normas australianas AS 2878-1986 (1986) y AS 2082-2000 (2000).

Tabla 4.2 Propiedades mecánicas y densidad para las muestras ensayadas a flexión

		M 1	M 2	M 3	M 4	M 5
f_m N/mm^2	Mín	17,4	22,9	21,6	11,5	27,5
	Med	42,4	53,6	43,9	40,3	62,1
	Máx	80,3	115,1	65,2	67,2	111,4
	S	12,3	16,8	10,2	13,1	15,8
	COV	0,29	0,31	0,23	0,32	0,26
$E_{m,g}$ N/mm^2	Mín	6768	7442	9006	8250	6117
	Med	10878	12714	11790	11955	12155
	Máx	14128	21491	14946	16446	19297
	S	1855	2700	1557	1590	2443
	COV	0,17	0,21	0,13	0,13	0,20
ρ kg/m^3	Mín	419	444	430	431	421
	Med	533	567	527	513	564
	Máx	705	1094	732	587	739
	S	76	110	72	37	65
	COV	0,14	0,19	0,14	0,07	0,12

Con el fin de evaluar la influencia de los principales parámetros visuales sobre la resistencia a flexión, fue investigada en primer lugar la correlación existente entre sus valores y los correspondientes a la nudosidad. Con este objetivo todos los cuerpos de prueba fueron considerados como una gran muestra y los valores del *MOR* ajustados a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996). Los valores del coeficiente de correlación encontrados para los criterios *K*, *KAR1*, *KAR2* y *KAR3* son -0,32, -0,30, -0,30 y -0,33 respectivamente. Estos resultados indican que la nudosidad y el *MOR* no están estrechamente relacionados para las 349 probetas, aunque la correlación es altamente significativa en todos los casos, con niveles de probabilidad (*p*) menores a 0,0005. Glos & Diebold (1987) publicaron valores para *r* entre el *MOR* y la nudosidad, expresada en la misma forma que *KAR1*, *KAR2* y *KAR3*, de -0,59, -0,53 y -0,62 respectivamente, obtenidos en una serie de ensayos con probetas de *Picea abies* en tamaño estructural. Johansson et

al. (1992) encontraron un coeficiente de correlación de $-0,51$ entre la resistencia a flexión y la nudosidad, expresada en igual forma que $KAR2$, en un programa de ensayos llevado a cabo con *Picea abies* en tamaño estructural, mientras que Glos & Lederer (2000), para el mismo criterio, informan valores de $-0,62$ y $-0,57$ para Roble y Haya respectivamente. El valor de $r = -0,30$ encontrado en este estudio para los criterios $KAR1$ y $KAR2$ es congruente con la pequeña diferencia existente entre los valores medios de los mismos (6%), presentados en la Tabla 4.1.

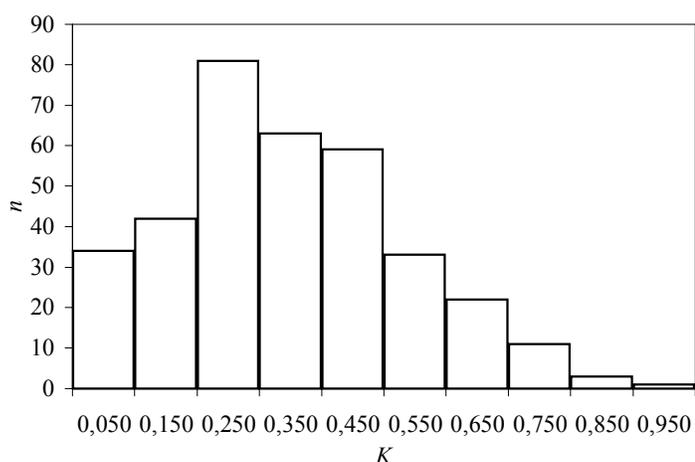


Figura 4.1 Histograma de frecuencias para K en las muestras ensayadas a flexión

Los criterios para medir la nudosidad basados en la relación entre la proyección del o los nudos sobre la sección transversal y las dimensiones de ésta, aportan resultados confiables pero son difíciles de determinar aún en países con tradición en la temática (Glos & Diebold, 1987). A ese concepto responden $KAR1$, $KAR2$ y $KAR3$, y de ellos solamente el último exhibe una correlación levemente superior a K , el cual se basa en las dimensiones superficiales del nudo y del lado de la probeta en el cual se manifiesta. Teniendo en cuenta que en Argentina no existe experiencia relacionada a la clasificación visual por resistencia de piezas aserradas, resulta de fundamental importancia que el método desarrollado sea simple. Desde este punto de vista, y considerando la facilidad con que se puede determinar K en comparación con $KAR3$ y que la diferencia en la eficiencia para predecir el MOR no es relevante, en lo que resta del presente apartado la nudosidad será expresada como K . Este coincide con el criterio adoptado por la norma australiana AS 2082 (2000) para la clasificación por resistencia de piezas aserradas de especies frondosas y presenta en este caso la distribución de frecuencias que se muestra en el histograma de

la Figura 4.1, cuyas medidas de tendencia central y de dispersión están en la Tabla 4.1. La dificultad normal existente para la determinación de características visuales siguiendo criterios complejos, se ve acentuada en esta especie por su textura y color, que no permiten distinguir con claridad el límite de las singularidades, situación que ya ha sido puesta de manifiesto en otras investigaciones con madera aserrada de especies frondosas (Glos & Lederer, 2000).

Tabla 4.3 Propiedades mecánicas y densidad para los cuerpos de prueba con y sin médula, ensayados a flexión.

(1) Ajustados a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); (2) ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996).

		$f_m^{(1)}$	$E_{m,g}^{(2)}$	$\rho^{(2)}$
		N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³
Todas (n = 349)	Mín	11,3	6427	415
	Med	40,5	12639	540
	Máx	97,7	22502	1065
	S	11,7	2372	72
	COV	0,29	0,19	0,13
Sin médula (n = 223)	Mín	13,8	7066	415
	Med	43,8	13353	554
	Máx	97,7	22502	1065
	S	11,5	2368	77
	COV	0,26	0,18	0,14
Con médula (n = 126)	Mín	11,3	6427	415
	Med	34,6	11374	514
	Máx	63,0	15118	655
	S	9,5	1785	54
	COV	0,27	0,16	0,11

La influencia de la médula sobre las propiedades mecánicas y la densidad puede ser apreciada en la Tabla 4.3, en la cual, y para obtener resultados comparables, los valores del MOR se encuentran ajustados a una altura de referencia de 150mm y los del MOE y la densidad aparente a un contenido de humedad del 12% de acuerdo con la norma EN 384 (1996). El ajuste a las condiciones de referencia internacional será mantenido en adelante para todos los cálculos presentados en este apartado. El valor medio de 43,8N/mm² obtenido para el MOR en los cuerpos

de prueba libres de médula es un 27% mayor que el correspondiente a los que la contienen ($34,6N/mm^2$), y el valor medio de $13353N/mm^2$ alcanzado por el *MOE* en el primer caso es un 17% mayor que en el segundo ($11374N/mm^2$). Estos resultados son congruentes con otros reportados por investigadores y normas (Hillis, 1978; Standards Australia, 2000; Pérez del Castillo, 2001) y confirman que la presencia de médula, la cual involucra a su vez la mayor cantidad de probetas con fisuras importantes, reduce significativamente la resistencia y rigidez de esta especie cultivada en Argentina. Por lo tanto, ella debe ser tenida en cuenta como un importante parámetro para el desarrollo de un método de clasificación visual por resistencia. Contrariamente a lo encontrado para el *MOR* y el *MOE*, su influencia sobre la densidad aparente es reducida, exhibiendo los cuerpos de prueba libres de médula un valor medio solamente 8% mayor al correspondiente para los que la contienen y con un mayor coeficiente de variación en el primer caso.

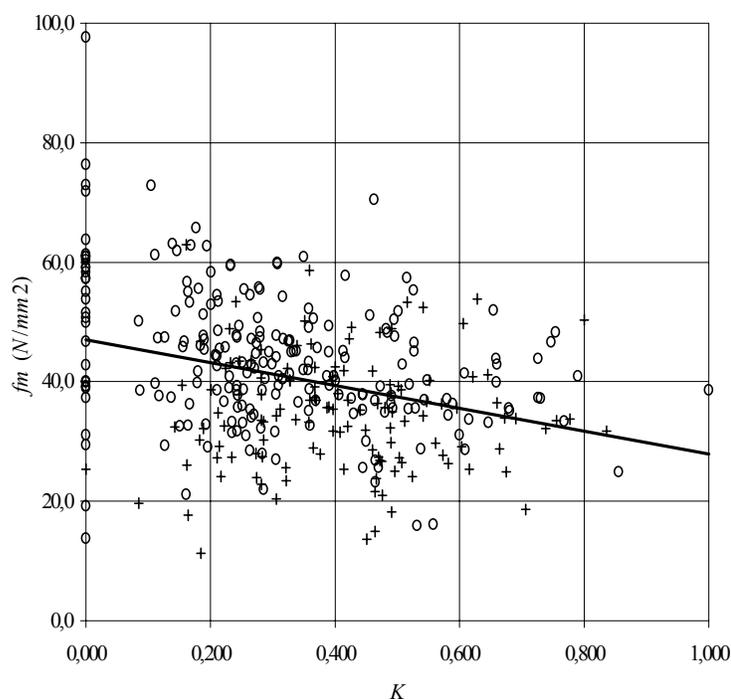


Figura 4.2 Relación entre K y f_m para las muestras ensayadas a flexión

(o) Cuerpos de prueba libres de médula; (+) cuerpos de prueba con médula; $r = -0,32$; ecuación de la recta de regresión: $f_m = -19,133K + 47,051$; f_m ajustada a una altura de referencia de $150mm$ conforme a EN 384 (1996).

En coincidencia con publicaciones que señalan una disminución de las propiedades

mecánicas solamente cuando la presencia de depósitos de kino adquiere un tamaño importante (Hillis, 1978), no fue posible relacionar esta característica con el *MOR* y el *MOE* para el caso estudiado. Leves afecciones biológicas, encontradas en 1% de las probetas, pueden ser ignoradas, y las severas reducciones del ancho o el alto de la sección transversal, también presentes en 1% de los cuerpos de prueba, deben ser tenidas en cuenta en la condición de grandes o especiales defectos, pues afectan el comportamiento estructural de los elementos que las poseen.

La Figura 4.2 indica la relativamente pobre correlación existente entre *K* y el *MOR* para todos los cuerpos de prueba. También pueden apreciarse separadamente las probetas sin médula y las que la contienen.

Tabla 4.4 Propiedades mecánicas y densidad para las muestras ensayadas a flexión. Comparación de resultados para vigas, tablas y el total

(1) Ajustados a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); (2) ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996).

	M 1	M 2	M 3	M 4	M 1+2+3+4	M 5	Todas	
$f_m^{(1)}$ N/mm ²	Mín	13,7	19,2	19,7	11,3	11,3	18,7	11,3
	Med	33,0	45,5	39,8	39,8	39,5	41,8	40,5
	Máx	62,0	97,7	59,1	65,9	97,7	72,9	97,7
	S	9,5	14,3	9,2	13,0	12,4	10,5	11,7
	COV	0,29	0,31	0,23	0,33	0,31	0,25	0,29
	$f_{m,075}$	18,1	31,3	28,7	21,1	24,9	26,4	25,3
$E_{m,g}^{(2)}$ N/mm ²	Mín	7066	7567	9232	9039	7066	6427	6427
	Med	11418	13304	12511	12655	12472	12863	12639
	Máx	15614	22502	16919	16990	22502	20419	22502
	S	2025	2768	1871	1547	2193	2584	2372
	COV	0,18	0,21	0,15	0,12	0,18	0,20	0,19
$\rho^{(2)}$ kg/m ³	Mín	415	443	428	428	415	415	415
	Med	526	560	519	505	527	556	540
	Máx	692	1065	688	578	1065	726	1065
	S	73	107	64	35	76	63	72
	COV	0,14	0,19	0,12	0,07	0,14	0,11	0,13
	ρ_{05}	406	384	413	447	401	451	420

A diferencia de la Tabla 4.2, la Tabla 4.4 presenta los valores de las propiedades

mecánicas y de densidad, ajustados a las condiciones de referencia. Los mismos aparecen discriminados para cada muestra, para el conjunto de vigas y para el total. Como resultan de fundamental importancia para la asignación de clases resistentes, se muestran también el percentil 7,5% del MOR y el 5% de la densidad aparente. Para la resistencia a flexión se ha calculado el percentil 7,5% en lugar del 5% teniendo en cuenta que los ensayos se efectuaron ubicando siempre los cuerpos de prueba con los mayores defectos en la zona traccionada, desatendiendo el criterio de la norma europea EN 384 (1996) que establece una selección al azar para este caso. La disposición elegida en esta investigación permite estudiar con mayor profundidad la influencia de los parámetros sobre las propiedades mecánicas, y los efectos negativos que origina sobre los resultados pueden ser corregidos con la adopción del percentil 7,5% en reemplazo del 5% (Glos & Tratzmiller, 1996; Glos & Lederer, 2000). Las vigas de la Muestra 2 muestran los mayores valores medios para las tres propiedades y el más alto percentil 7,5% del MOR . La misma muestra presenta para la densidad, llamativamente, el mayor coeficiente de variación y el menor valor para el percentil 5%. Contrariamente, las vigas de la Muestra 1 exhiben el menor valor medio para el MOR y el MOE , así como el más bajo percentil 7,5% para el MOR , pero niveles intermedios para la densidad aparente. Las tablas de la Muestra 5 muestran mayores valores medios en todos los casos y mayores percentiles para el MOR y la densidad que los encontrados para el conjunto de vigas.

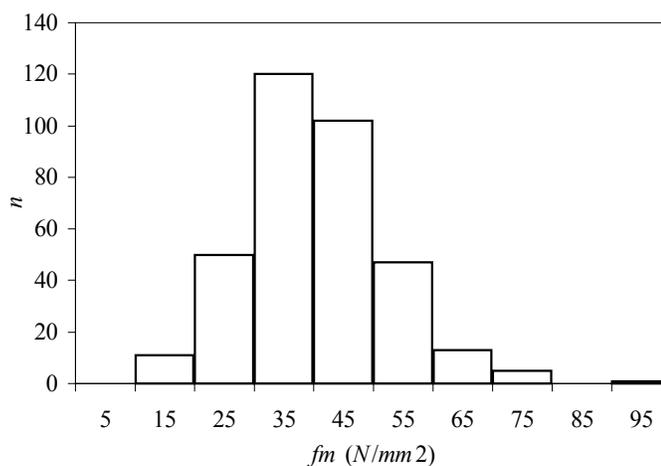


Figura 4.3 Histograma de frecuencias para f_m correspondiente a las muestras ensayadas a flexión f_m ajustada a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996).

Las figuras 4.3, 4.4 y 4.5 muestran los histogramas de distribución de frecuencias para el MOR , el MOE , y ρ , respectivamente, cuyas medidas de tendencia central y de dispersión se

detallan en la Tabla 4.4. Estas propiedades, ajustadas a las condiciones de referencia, junto a las características visuales y a las correlaciones que las vinculan, son la base para el diseño de un método de clasificación visual por resistencia para la especie.

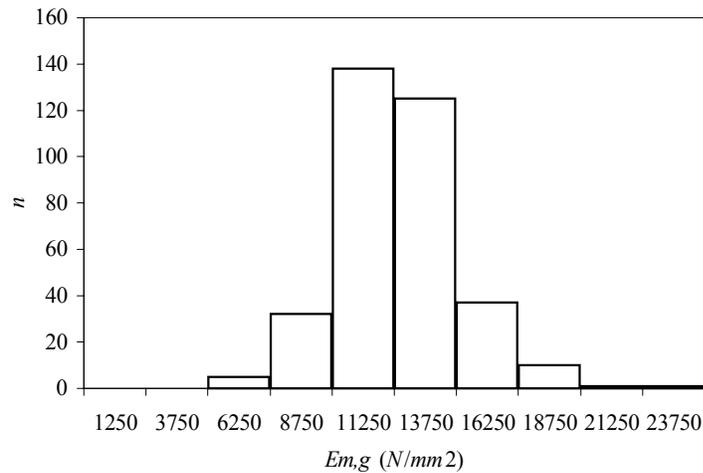


Figura 4.4 Histograma de frecuencias para $E_{m,g}$ correspondiente a las muestras ensayadas a flexión

$E_{m,g}$ ajustado a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996).

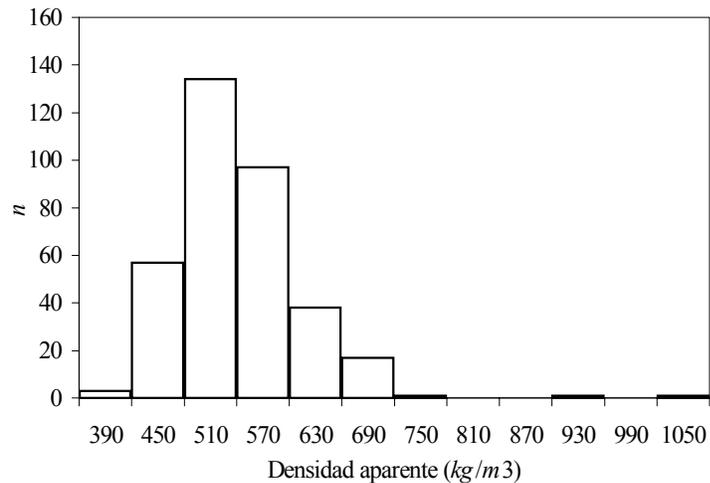


Figura 4.5 Histograma de frecuencias para ρ correspondiente a las muestras ensayadas a flexión

ρ ajustada a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996).

Los resultados indican que la médula disminuye significativamente las propiedades

mecánicas, y, junto a la nudosidad, que tiene una influencia intermedia, deben ser tenidas en cuenta como parámetros de clasificación. Para el análisis de grados de calidad elevados es necesario considerar también las características que exceden los límites establecidos en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18.

Tabla 4.5 Perfiles de resistencia, rigidez y densidad

(1) Ajustados a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); (2) ajustados por tamaño de muestra conforme a EN 384 (1996); (3) ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996); (4) fisuras que exceden la longitud máxima establecida en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18.

Perfil	$f_{m,075}^{(1)} / f_{m,k}^{(2)}$ N/mm ²	$\bar{E}_{m,g}^{(3)} = E_{0,mean}$ N/mm ²	$\rho_{05}^{(3)} = \rho_k$ kg/m ³	$\bar{\rho}^{(3)}$ kg/m ³	Rendimiento n (%)
a) Todos los cuerpos de prueba	25,3 / 22,8	12639	420	540	349 (100)
b) Sin médula	29,3 / 26,4	13353	426	554	223 (64)
Con médula	22,1 / 19,2	11374	424	514	126 (36)
c) Sin médula, fisuras ⁽⁴⁾ y gd	31,1 / 28,0	13527	427	557	190 (54)
Restantes	21,6 / 19,0	11577	424	519	159 (46)
d) Sin médula, $f_{is}^{(4)}$ y gd. K[1/2	31,6 / 27,8	13728	436	554	163 (46)
Sin médula, $f_{is}^{(4)}$ y gd. K∃1/2	28,8 / 21,6	12317	386	578	27 (8)
Restantes	21,6 / 19,0	11577	424	519	159 (46)
e) Sin médula, $f_{is}^{(4)}$ y gd. K[1/3	32,7 / 28,1	13902	431	550	119 (34)
Sin médula, $f_{is}^{(4)}$ y gd. K∃1/3	27,4 / 22,5	12898	422	569	71 (20)
Restantes	21,6 / 19,0	11577	424	519	159 (46)
f) Sin médula, $f_{is}^{(4)}$ y gd. K[1/4	36,2 / 30,0	14491	426	556	78 (22)
Sin médula, $f_{is}^{(4)}$ y gd. K∃1/4	28,6 / 24,3	12856	426	558	112 (32)
Restantes	21,6 / 19,0	11577	424	519	159 (46)
g) Sin médula, $f_{is}^{(4)}$ y gd. K[1/5	36,4 / 29,1	14827	418	559	55 (16)
Sin médula, $f_{is}^{(4)}$ y gd. K∃1/5	30,2 / 26,3	12998	430	556	135 (38)
Restantes	21,6 / 19,0	11577	424	519	159 (46)

En la Tabla 4.5 se presentan siete alternativas con el fin de discutir distintos perfiles de resistencia, rigidez y densidad, así como los correspondientes límites para los parámetros seleccionados. Se exhiben el percentil 7,5% del MOR, el valor medio del MOE y tanto el valor medio como el percentil 5% de la densidad aparente, con el fin de posibilitar la comparación de

cada uno con el sistema internacional de clases resistentes establecido en EN 338 (1996). Para la obtención de los valores característicos de la resistencia se aplicó el ajuste estadístico por cantidad y tamaño de muestras previsto en EN 384 (1996).

El perfil a) presenta las propiedades para el conjunto de cuerpos de prueba considerados como una gran muestra. El perfil b) considera dos clases teniendo en cuenta la importancia encontrada para la presencia de médula. En este caso el grupo libre de médula exhibe valores para el *MOR* y el *MOE* 33% (38% para el característico, ajustado por tamaño de muestra) y 17% superiores que el que la contiene, respectivamente. Entre ambas calidades se observa una reducida diferencia de 1% para la densidad característica y de 8% para la media. El rendimiento en el grado superior alcanza 223 (64%) cuerpos de prueba. En el perfil c) las probetas con características visuales que exceden los límites establecidos en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18 están adicionadas a las que poseen médula. El *MOR* y el *MOE* para la mejor calidad crecen levemente desde un valor de $29,3N/mm^2$ a $31,1N/mm^2$ (el característico de $26,4N/mm^2$ a $28,0N/mm^2$) y desde $13353 N/mm^2$ a $13527N/mm^2$ respectivamente. La baja diferencia entre los valores de los perfiles c) y b) es congruente con la elevada presencia simultanea de médula y fisuras en los cuerpos de prueba. Los valores de la densidad en estos dos perfiles son similares y el rendimiento para el perfil c) decrece en la mejor clase de 64% a 54%.

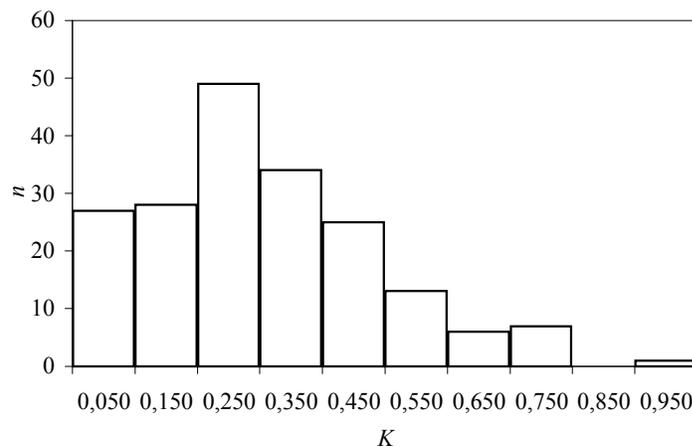


Figura 4.6 Histograma de frecuencias para *K* correspondiente a 190 cuerpos de prueba

Cuerpos de prueba libres de médula, fisuras⁽¹⁾ y grandes defectos; (1) fisuras que exceden la longitud máxima establecida en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18.

Teniendo en cuenta que la nudosidad se manifiesta como el segundo parámetro de

consideración a los fines perseguidos, y que la misma debe ser tenida en cuenta luego de separar los cuerpos con médula, fisuras importantes y grandes defectos, la correlación entre la nudosidad y el *MOR* fue investigada para las 190 probetas libres de esas características. Los valores encontrados para el coeficiente de correlación en los criterios *K*, *KAR1*, *KAR2* y *KAR3* son -0,40, -0,41, -0,42 y -0,43 respectivamente. La correlación es altamente significativa en todos los casos, con niveles de probabilidad (*p*) menores a 0,0005, y, si bien no adquiere niveles altos, crece respecto de los valores obtenidos para el total de los cuerpos de prueba. Las diferencias para el valor del coeficiente de correlación entre los cuatro casos se mantiene en niveles reducidos y por lo tanto se confirma la adopción de *K* como criterio para medir la nudosidad. Los histogramas de frecuencias para las variables *K* y *MOR* correspondientes a los 190 cuerpos de prueba involucrados, y que se correlacionan al nivel de $r = -0,40$, son mostrados en las figuras 4.6 y 4.7. Un valor medio de 0,300 y una desviación estándar de 0,195 para *K* manifiestan una distribución estadística similar a la encontrada para todos los cuerpos de prueba (ver Tabla 4.1 y figuras 4.1 y 4.6). Esta distribución evidencia la conveniencia de analizar cuatro alternativas con límites para la nudosidad variando entre 1/2 y 1/5, las que son presentadas en la Tabla 4.5 en los perfiles d), e), f) y g). En todos los casos la clase de menor calidad permanece sin cambios.

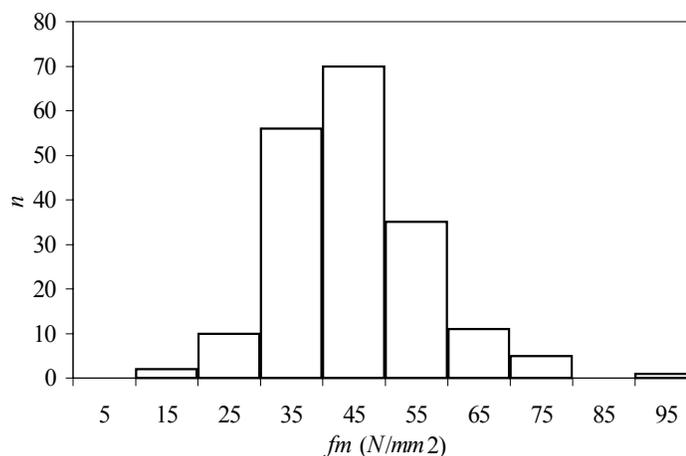


Figura 4.7 Histograma de frecuencias para f_m correspondiente a 190 cuerpos de prueba

Cuerpos de prueba libres de médula, fisuras⁽¹⁾ y grandes defectos; (1) fisuras que exceden la longitud máxima establecida en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18; f_m ajustada a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996).

El perfil d) presenta valores similares para el *MOR* y el *MOE* en el mejor grado que el

perfil c), pero menor rendimiento, con 27 (8%) cuerpos de prueba en una segunda clase de menor calidad. Los perfiles e), f) y g) muestran tres opciones con valores en general crecientes para el *MOR* y el *MOE* en los mejores grados y un rendimiento equilibrado oscilando entre 34% y 16% para la mejor calidad y entre 20% y 38% para la segunda. No es posible encontrar diferencias en la densidad entre las dos mejores clases para fines prácticos, mientras que ambas exhiben una pequeña diferencia con la tercera. En la Figura 4.8 se puede apreciar la relación existente entre la nudosidad y el *MOR* y a su vez se indican los límites para *K* y los percentiles 7,5% correspondientes a las dos clases superiores de los perfiles e) y f), que son las que ofrecen mejores resultados para rendimientos equilibrados.

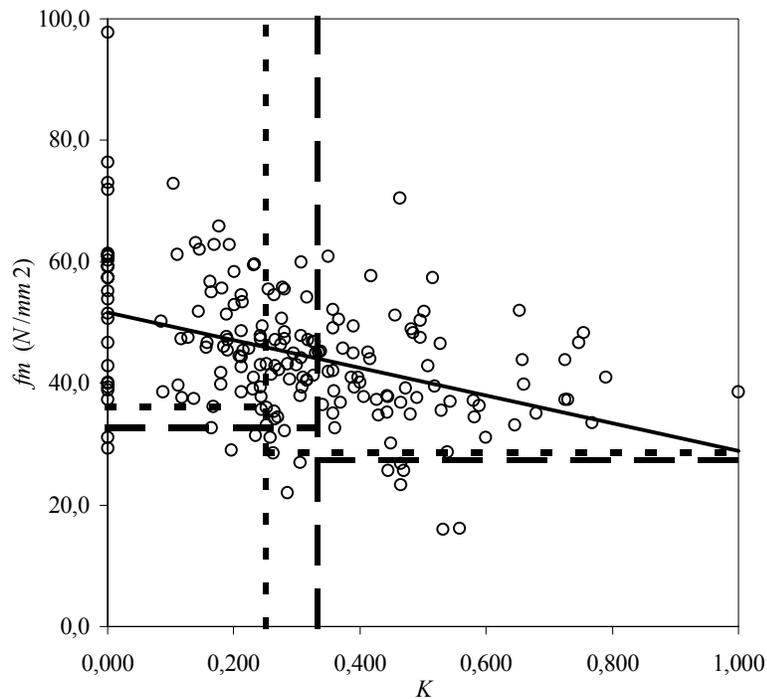


Figura 4.8 Relación entre *K* y *f_m* para 190 cuerpos de prueba

Cuerpos de prueba libres de médula, fisuras⁽¹⁾ y grandes defectos; (1) fisuras que exceden la longitud máxima establecida en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18; las líneas verticales indican los límites para la nudosidad y las horizontales los percentiles 7,5% correspondientes a las dos clases superiores de los perfiles e) y f); $r = -0,40$; ecuación de la recta de regresión: $f_m = -22,783K + 51,665$; f_m ajustada a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996).

Es necesario señalar la elevada relación existente entre los valores del *MOE* y de la

densidad aparente, así como entre los correspondientes al *MOR* y a la densidad aparente, lo cual puede constituir una importante ventaja para el uso estructural de esta especie. En particular, la relación *MOE/ρ* encontrada en esta investigación es más elevada que en todas las clases resistentes contempladas en la norma europea EN 338 (1996) para especies frondosas.

La relación *MOE/ρ* existente en el *E. grandis* de Argentina es más similar a la presente en las especies de coníferas y, por consiguiente, esta especial característica fundamenta la conveniencia de comparar los valores de resistencia, rigidez y densidad de los perfiles analizados con los correspondientes a las clases resistentes contempladas en EN 338 (1996) para las especies de coníferas y el álamo, aunque es necesario efectuar investigaciones complementarias para determinar otras propiedades mecánicas adicionales de esta especie. De acuerdo con este planteo, es posible asignar el grado de mayor calidad presentado en el perfil f) a la clase resistente C30, pues los valores característicos que presenta para el *MOR* ($30,0N/mm^2$), *MOE* ($14491N/mm^2$) y la densidad ($426kg/m^3$) superan los mínimos establecidos en la mencionada norma. El segundo grado puede ser asimilado a la C24, con valores característicos de $24,3N/mm^2$, $12856N/mm^2$ y $426kg/m^3$ para la resistencia, rigidez y densidad respectivamente. En ambos casos se logra un rendimiento equilibrado. Los valores característicos del *MOR*, *MOE* y densidad del tercer grado son superiores a los exigidos para la clase C18, pero la existencia de características que afectan las propiedades mecánicas, tales como fisuras y grandes defectos, en algunos casos asociados a la presencia de médula, pueden constituir una causa de rechazo para los cuerpos de prueba que las poseen conforme a la normativa vigente (Standards Australia, 2000; European Committee for standardization, 2000b). Es de destacar que el valor característico del *MOR* se encuentra afectado con el coeficiente de disminución por tamaño de muestra. Esta penalización se podría eliminar adicionando a los presentes nuevos ensayos que provean una mayor base estadística, lo cual permitiría aspirar a clases resistentes aún superiores a las alcanzadas con los actuales valores.

La Figura 4.9 muestra la evolución del percentil 7,5% del *MOR* y del rendimiento para la clase de mejor calidad de los perfiles d), e) f) y g) en función de los límites establecidos para *K*. En la misma es posible apreciar los valores correspondientes a los cuatro perfiles analizados, de los cuales el e) y el f) proveen los resultados más convenientes, permitiendo el último alcanzar las clases resistentes ya mencionadas en el párrafo anterior conforme a EN 338 (1996).

Los rendimientos globales indicados en la Tabla 4.5 para cada clase de los perfiles analizados conforme al método visual desarrollado, son discriminados por muestra en la Tabla 4.6. Para las vigas, la Muestra 2 presenta el mayor número de cuerpos de prueba en las dos clases superiores (32) a partir del perfil d), lo que representa un 64% de los 50 que la integran, mientras que las muestras 1, 3 y 4 alcanzan para igual concepto 56%, 30% y 30% respectivamente. Paralelamente exhibe la mayor cantidad en el mejor grado a partir del b). Este resultado es

congruente con los elevados valores para las propiedades mecánicas mostrados para esta muestra en la Tabla 4.4 (ajustados a las condiciones de referencia) e incluso en la Tabla 4.2 (sin ajustar).

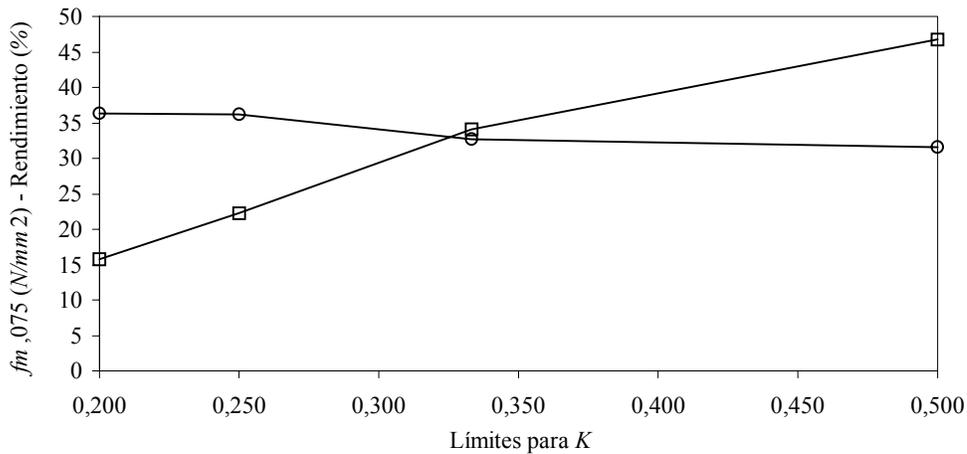


Figura 4.9 Evolución del percentil 7,5% y del rendimiento en función de los límites fijados para K

(o) Percentil 7,5%; (□) rendimiento; $f_{m,075}$ ajustada a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996).

A su vez, la Muestra 2 es la que presenta menor cantidad de probetas con médula y fisuras importantes del conjunto de vigas, características que causan una inclusión inmediata del cuerpo de prueba que las posee en la clase de menor calidad. La Muestra 1, que exhibe valores bajos para las propiedades mecánicas, posee una relativamente reducida cantidad de probetas con médula y fisuras importantes, lo que origina un buen rendimiento para los dos grados superiores a partir del perfil d) y consecuentemente en el mejor grado de los perfiles b) y c). No obstante, sus relativamente pobres valores para las propiedades mecánicas originan que a partir del perfil e) el rendimiento sea muy superior en el segundo grado que en el primero. Las muestras 3 y 4 poseen un elevado porcentaje de cuerpos de prueba con médula y con fisuras importantes, lo que motiva que los mismos integren el grado más pobre y que su rendimiento en las dos clases superiores sea bajo.

Las tablas de la Muestra 5 poseen el menor porcentaje de fisuras importantes de todas las muestras, alcanzando un valor de 9% el cual resulta muy favorable frente a los correspondientes a las vigas de las muestras 1, 2, 3 y 4 que llegan a 30%, 20%, 52% y 54% respectivamente. La presencia de médula en ellas (28%) es levemente superior a la encontrada en las vigas de las muestras 1 y 2 (28% y 26%) y mucho más bajo que en las 3 y 4 (62% y 52%). Considerando que

las tablas exhiben también un percentil 7,5% para el *MOR* solamente superado por el de las muestras 2 y 3, su rendimiento en las clases superiores alcanza niveles más favorables que para el resto de las muestras compuestas por vigas. El número de probetas que esta muestra incluye en las dos clases superiores a partir del perfil d), y naturalmente en el mejor grado del c) es de 100, lo que representa un 67% del total de 149 que la integran, superando los valores porcentuales ya expuestos anteriormente para las muestras integradas por vigas.

Tabla 4.6 Rendimiento de las muestras sometidas a flexión

(1) Fisuras que exceden la longitud máxima establecida en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18.

Perfil	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	
	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	
a) Todos los cuerpos de prueba	50	50	50	50	149	
b)	Sin médula	36	37	19	24	107
	Con médula	14	13	31	26	42
c)	Sin médula, fisuras ⁽¹⁾ y <i>gd</i>	28	32	15	15	100
	Restantes	22	18	35	35	49
d)	Sin médula, $\tilde{f}is^{(1)}$ y <i>gd</i> . $K[1/2$	18	26	11	14	94
	Sin médula, $\tilde{f}is^{(1)}$ y <i>gd</i> . $K\exists 1/2$	10	6	4	1	6
	Restantes	22	18	35	35	49
e)	Sin médula, $\tilde{f}is^{(1)}$ y <i>gd</i> . $K[1/3$	8	19	9	12	71
	Sin médula, $\tilde{f}is^{(1)}$ y <i>gd</i> . $K\exists 1/3$	20	13	6	3	29
	Restantes	22	18	35	35	49
f)	Sin médula, $\tilde{f}is^{(1)}$ y <i>gd</i> . $K[1/4$	4	13	5	7	49
	Sin médula, $\tilde{f}is^{(1)}$ y <i>gd</i> . $K\exists 1/4$	24	19	10	8	51
	Restantes	22	18	35	35	49
g)	Sin médula, $\tilde{f}is^{(1)}$ y <i>gd</i> . $K[1/5$	3	12	4	6	30
	Sin médula, $\tilde{f}is^{(1)}$ y <i>gd</i> . $K\exists 1/5$	25	20	11	9	70
	Restantes	22	18	35	35	49

Un análisis detallado del rendimiento en el grado de mayor calidad correspondiente a los perfiles e) y f), los cuales, como se expresó, manifiestan los mejores resultados para una utilización racional del recurso, indica que la Muestra 5 alcanza niveles de 48% y 33% respectivamente, seguida por la Muestra 2 que llega a 38% y 26%. El peor comportamiento desde

este punto de vista corresponde a la Muestra 1, que ubica solamente 16% y 8% de sus probetas en la mejor clase de estos perfiles. Como se desprende de los valores expuestos en las tablas 4.1, 4.2 y 4.4, y ya fuera expresado anteriormente, este pobre desempeño en el mejor grado se origina en los relativamente bajos valores de las propiedades mecánicas mostrados por la Muestra 1 y no en la presencia de defectos. Los porcentajes expresados en el análisis del rendimiento de cada muestra, fueron calculados respecto del tamaño de las mismas.

La elevada relación MOE/ρ encontrada para esta especie en comparación con las consideradas en la normativa internacional para las maderas provenientes de especies frondosas ha originado que los distintos grados de calidad analizados deban ser comparados con las clases resistentes correspondientes a las especies de coníferas y el álamo. Teniendo en cuenta que los valores mínimos prescriptos para la densidad aparente en EN 338 (1996) para las clases que integran este grupo es considerablemente menor al establecido para las piezas aserradas provenientes de especies frondosas, los valores de la densidad encontrados en este estudio satisfacen plenamente aquellas prescripciones. Considerando además que los resultados del presente trabajo arrojan elevados niveles para el valor medio del MOE , también se cumplen adecuadamente los requerimientos establecidos para esta propiedad elástica. En consecuencia, y como surge de la discusión desarrollada, la inclusión de los distintos grados de la especie analizada en el sistema internacional de clases resistentes contemplado en la norma europea EN 338 (1996), está condicionado por el valor característico de su resistencia a flexión.

En el presente apartado se determinó la eficiencia de los parámetros visuales para predecir las propiedades mecánicas del *Eucalyptus grandis* de Argentina. El reconocimiento de las singularidades es más complejo que en otras especies debido a la textura y color de la superficie. Se comprobó que la presencia de médula disminuye significativamente el MOR y el MOE , y la nudosidad, que si bien no alcanza los niveles de correlación con el MOR publicados para otras especies, afecta negativamente al mismo. Una de las particularidades salientes puesta de manifiesto es la elevada relación entre el MOE y la densidad aparente, lo que ubica a esta madera en el tipo de comportamiento que tienen las especies de coníferas y el álamo. Se desarrolló un método de clasificación visual por resistencia de sencilla aplicación, que permite analizar perfiles integrados por tres grados de distinta calidad. El inferior nuclea los cuerpos de prueba que poseen médula y singularidades que exceden los límites establecidos en prEN 14081-1 (2000) para clases superiores a C18, tales como fisuras y grandes defectos. Los dos de mejor calidad se componen de las probetas libres de esos defectos y se dividen entre sí de acuerdo al límite fijado para K . Es posible insertar el primer grado, de excelentes propiedades mecánicas, en la clase resistente C30, el segundo en la C24, y el inferior en la C18, del sistema internacional establecido en EN 338 (1996).

La adopción de procesos que disminuyen la presencia de fisuras importantes, relacionadas a la producción y secado, conduciría a un mejor rendimiento en las dos clases superiores. Asimismo, la práctica de podas programadas produciría una reducción de la nudosidad y aumentaría la cantidad de piezas en la primera clase, optimizando aún más la calidad del material. Nuevas investigaciones permitirían determinar otras propiedades mecánicas adicionales, y proporcionarían más resultados del tipo de los analizados en este trabajo, lo que posibilitaría eliminar la penalización estadística por tamaño de muestra que afecta al *MOR* y en consecuencia aspirar a clases resistentes aún mayores que las alcanzadas.

4.1.1 Relaciones entre las propiedades mecánicas de flexión, tracción y compresión

Los valores característicos de la resistencia a flexión, del módulo de elasticidad (medio) y de la densidad aparente, permiten asignar una combinación de clase, especie y procedencia a una clase resistente del sistema internacional contemplado en la norma europea EN 338 (1996). Los restantes pueden ser calculados a partir de esos valores fundamentales conforme a las ecuaciones establecidas en EN 384 (1996). Con el fin de comprobar, para la especie investigada, las relaciones existentes entre las propiedades mecánicas de flexión y las de tracción y compresión paralela a las fibras, los cuerpos de prueba de las muestras 6 y 7 fueron sometidos a ese tipo de ensayos, respectivamente.

Un resumen de los resultados para los principales parámetros empleados en el método visual desarrollado, es indicado en la Tabla 4.7. El valor medio de *K* para la Muestra 6 es levemente superior al encontrado para la Muestra 5 sometida a flexión (ver Tabla 4.1), lo cual se repite con el coeficiente de variación. Esta diferencia puede ser explicada por la mayor longitud relevada en las tablas de la Muestra 6. Para la Muestra 7, el valor medio de *K* es el menor de todos los encontrados, pero su desviación estándar indica una dispersión importante, lo que origina el mayor coeficiente de variación para esta variable. La presencia de 15 fisuras importantes en la Muestra 6 (10%), junto al 9% ya descripto para la Muestra 5, confirman una menor cantidad de fisuras en tablas que en vigas. Los 11 casos encontrados en la Muestra 7 indican un nivel comprendido entre los exhibidos por las muestras 2 y 3. La presencia de médula en el sector de máximo esfuerzo, factor que decide la inclusión de la probeta en el grado inferior, es levemente superior en la Muestra 6 (32%) que en la Muestra 5 (28%). Esta singularidad para la Muestra 7 (26%) es igual a la encontrada en la Muestra 2, lo que resulta natural, pues los cuerpos de prueba de la primera se prepararon de las mismas piezas que los de la segunda. No se encontraron grandes defectos en las muestras 6 y 7.

Tabla 4.7 Parámetros visuales para las muestras ensayadas a tracción y compresión paralela a las fibras

(1) Registrados en la longitud libre entre mordazas para los cuerpos de prueba de la M 6 y en toda la longitud para los de la M 7, zonas sometidas al máximo esfuerzo de tracción y compresión respectivamente.

Parámetro		Muestra 6	Muestra 7
$K^{(1)}$	<i>Min</i>	0	0
	<i>Med</i>	0,331	0,264
	<i>Máx</i>	1,000	0,733
	<i>S</i>	0,191	0,213
	<i>COV</i>	0,58	0,81
Fisuras	>C18 <i>n</i>	15	11
Médula ⁽¹⁾	<i>n</i>	48	13
Grandes defectos ⁽¹⁾	<i>N</i>	0	0

Los resultados de las propiedades mecánicas y densidad para estas dos muestras se indican en la Tabla 4.8. Los mismos, ajustados a las condiciones de referencia, se pueden comparar con los correspondientes a los ensayos de flexión (ver Tabla 4.4) y, en particular, las tablas de la Muestra 6 con las de la Muestra 5. El contenido de humedad promedio de los cuerpos de prueba de las dos muestras fue de 15%. Además de las medidas de tendencia central y de dispersión, se han incluido los percentiles 5% de la resistencia y la densidad para apreciar la tendencia general de sus valores característicos. El percentil 5% del *MOR* y el valor medio del *MOE* en tracción paralela a las fibras para la Muestra 6 se relacionan bien con el percentil 7,5% del *MOR* y con el valor medio del *MOE* en la Muestra 5 sometida a flexión, ya que representan el 63% y el 104% de estos resultados respectivamente. Estos valores son congruentes con el criterio de los Eurocódigos, pues la norma europea EN 384 (1996) establece $f_{i,0,k} = 0,6f_{m,k}$ y valores iguales para los correspondientes *MOE*. El percentil 5% de la densidad en la Muestra 6 (454kg/m^3) es prácticamente coincidente con el de la Muestra 5 (451kg/m^3) y lo mismo sucede con los coeficientes de variación del *MOE* (0,20) y de ρ (0,11). El *MOR* tiene mayor dispersión en las tablas ensayadas a tracción que en las sometidas a flexión, como lo indican los valores de *S* y *COV*. La Muestra 7 exhibe valores elevados para el *MOR* con relación a los correspondientes al conjunto de muestras sometidas a flexión, si se toma como referencia lo estipulado en EN 384 (1996) y en la norma brasileña NBR 7190 (1997), que establecen las $f_{c,0,k} = 5(f_{m,k})^{0,45}$ y $f_{c,0,k} = 0,77f_{m,k}$ respectivamente. La dispersión es menor para la resistencia en compresión que en flexión. Los valores del módulo de elasticidad en compresión paralela a las fibras son llamativamente mayores y con una dispersión muy superior a los

encontrados en flexión y en tracción. La norma EN 384 (1996) no diferencia los valores medios de los módulos de elasticidad en flexión, tracción y compresión paralela a las fibras, y la NBR 7190 (1997) recomienda $\bar{E}_{c,0} = \bar{E}_{t,0}$ y $E_m = 0,90E_{c,0}$. El percentil 5% de la densidad aparente (414kg/m^3) se mantiene prácticamente en el nivel encontrado para el conjunto de cuerpos de prueba ensayados a flexión (420kg/m^3), pero con mayor dispersión.

Tabla 4.8 Propiedades mecánicas y densidad para las muestras ensayadas a tracción y compresión paralela a las fibras

(1) Ajustados a un ancho de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); (2) ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996).

	Muestra 6			Muestra 7		
	$f_{t,0}^{(1)}$ N/mm^2	$E_{t,0}^{(2)}$ N/mm^2	$\rho^{(2)}$ kg/m^3	$f_{c,0}^{(2)}$ N/mm^2	$E_{c,0}^{(2)}$ N/mm^2	$\rho^{(2)}$ kg/m^3
<i>Mín</i>	9,5	7873	413	25,4	8155	442
<i>Med</i>	30,9	13391	555	39,9	18364	586
<i>Máx</i>	74,8	22746	813	65,2	61378	970
<i>S</i>	12,5	2649	61	7,4	9381	105
<i>COV</i>	0,40	0,20	0,11	0,19	0,51	0,18
$f_{t,0,05}$	16,7	-	-	-	-	-
$f_{c,0,05}$	-	-	-	30,1	-	-
ρ_{05}	-	-	454	-	-	414

La comparación de las propiedades mecánicas de tracción y compresión paralela a las fibras con las de flexión puede hacerse con un mayor grado de detalle clasificando las probetas conforme al método visual desarrollado en el apartado anterior y asignándolas a los grados de calidad contemplados en los perfiles detallados en la Tabla 4.5. Con el fin de evitar grupos con un número reducido de cuerpos de prueba, la comparación se efectúa solamente para los perfiles a), b) y c), y los resultados se indican en la Tabla 4.9.

La influencia de la médula sobre la resistencia a tracción es mayor que la encontrada para el caso de flexión como se desprende del análisis del perfil b), y concuerda con resultados informados por Glos & Lederer (2000) para una serie de ensayos con vigas y tablas de Haya en tamaño estructural. Contrariamente la médula afecta poco la resistencia a compresión, exhibiendo los cuerpos de prueba libres de ella valores solamente 5% mayores que los que la contienen. Llamativamente, el módulo de elasticidad en compresión paralela a las fibras muestra la mayor

influencia de la médula, con un valor medio 53% superior para el mejor grado que para el segundo. Las diferencias correspondientes para el *MOE* en tracción y en flexión son 22% y 17%, respectivamente. Una pobre influencia de las fisuras tanto sobre las propiedades de tracción como de compresión paralela a las fibras se aprecia comparando los valores de los perfiles b) y c), lo cual es consistente con los criterios expuestos en la norma ASTM D 245-98 (1999).

Tabla 4.9 Resistencia y rigidez a flexión para los perfiles a), b) y c) del método visual, comparados con los correspondientes en tracción y compresión paralela a las fibras

(1) Ajustados a una altura / ancho de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); (2) ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996); (3) el menor valor para $n < 20$.

Perfil	$f_{m,075}^{(1)} / \bar{E}_{m,g}^{(2)}$ N/mm ²	$f_{t,0,05}^{(1)} / \bar{E}_{t,0}^{(2)}$ N/mm ²	$f_{c,0,05}^{(2)} / \bar{E}_{c,0}^{(2)}$ N/mm ²
a) Todos	25,3 / 12639 (n = 349)	16,7 / 13391 (n = 150)	30,1 / 18364 (n = 50)
b) Sin médula	29,3 / 13353 (n = 223)	19,5 / 14219 (n = 102)	31,2 / 20175 (n = 37)
Con médula	22,1 / 11374 (n = 126)	13,6 / 11630 (n = 48)	29,7 ⁽³⁾ / 13213 (n = 13)
c) Sin médula, <i>fis</i> y <i>gd</i>	31,1 / 13527 (n = 190)	19,7 / 14292 (n = 96)	30,5 / 20093 (n = 30)
Restantes	21,6 / 11577 (n = 159)	14,4 / 11789 (n = 54)	30,4 / 15772 (n = 20)

Las relaciones entre los percentiles correspondientes a la resistencia a tracción y a flexión son 0,66, 0,67, 0,62, 0,63 y 0,67, respectivamente, para los cinco grados presentados en la Tabla 4.9. Estas son congruentes con la norma EN 384 (1996), y no están en función de la calidad de la clase resistente, como fue sugerido por Burger & Glos (1997) de acuerdo a los resultados de una investigación que involucró madera de *Picea abies* de Europa central. Tampoco están en línea con la norma NBR 7190 (1997), la cual asume $f_{t,0,k} = f_{m,k}$. La resistencia a compresión exhibe valores mayores que en flexión en este estudio, con la única excepción del mejor grado en el perfil c). Considerando que la presencia de médula tiene una menor influencia sobre la resistencia a compresión que sobre las restantes, esta diferencia se incrementa para los grados de menor calidad. Los resultados para el *MOR* en compresión son mayores en todos los grados de calidad que los que se obtendrían a partir del *MOR* en flexión aplicando la norma EN 384 (1996) o la NBR 7190 (1997), cuyas prescripciones ya fueron expuestas en este apartado. Las relaciones estipuladas en la norma brasileña corresponden a pruebas sobre probetas pequeñas y libres de defectos, y el ensayo de flexión se efectúa con una carga concentrada en el centro.

Burger & Glos (1995) reportan resultados para el *MOE* en flexión, libre de la

influencia del esfuerzo de corte, 9% mayores que el *MOE* en tracción paralela a las fibras para Spruce europeo. Sin embargo, en esta investigación se encontraron valores medios del *MOE* en tracción entre 2% y 7% mayores, para los distintos grados de calidad, que los correspondientes para el *MOE* global en flexión. En consecuencia, los resultados del *MOE* en flexión y en tracción mostrados en la Tabla 4.9 están más en línea con la norma NBR 7190 (1997). No obstante, considerando que la influencia del esfuerzo de corte puede explicar una disminución de los valores del *MOE* global calculados en este trabajo, un estudio detallado del tema se presenta en el apartado 4.4 del presente. Las relaciones encontradas entre el *MOE* en flexión y el *MOE* en compresión alcanzan niveles que oscilan entre 0,66 y 0,86 para los distintos grados de calidad, valores menores al de 0,90 previsto en la norma brasileña y más distantes aún del ya mencionado criterio europeo.

En el presente apartado se presentaron y analizaron los principales parámetros visuales de las muestras 6 y 7 utilizados en el método de clasificación visual por resistencia desarrollado en el apartado 4.1, así como las propiedades mecánicas de estas muestras en tracción y compresión paralela a las fibras, respectivamente. La presencia de médula en la zona de mayor esfuerzo tiene más influencia negativa sobre las propiedades mecánicas de tracción que de flexión. Por su parte, es contradictoria su incidencia sobre las propiedades mecánicas de compresión, ya que afecta levemente esta resistencia pero acusa una gran influencia sobre el módulo de elasticidad. La presencia de fisuras es poco importante para el comportamiento mecánico en tracción y compresión. La relación entre las resistencias de tracción y flexión compara bien con el criterio de los Eurocódigos, mientras que para los módulos de elasticidad puede considerarse congruente tanto con el criterio europeo como con el brasileño. Las propiedades mecánicas en compresión paralela a las fibras, con relación a las correspondientes a flexión, alcanzan en este estudio valores superiores a los contemplados en las normas.

4.2 Desarrollo de modelos para una clasificación mecánica por resistencia

En el apartado 4.1 se desarrolló un método visual de clasificación por resistencia para tablas y vigas aserradas, con dimensiones estructurales usuales, de madera de *Eucalyptus grandis* de Argentina. Con este fin se presentaron y discutieron los resultados de los parámetros visuales relevados y de los ensayos mecánicos llevados a cabo. En aquel caso la sencillez del método era una condición muy importante a cumplir, con el fin de que pueda ser aceptado y aplicado. En el presente apartado se utilizarán muchos de esos valores y se analizarán otros parámetros cuya capacidad de aportar eficiencia a los modelos debe ser probada, no siendo un impedimento la

complejidad de su medición en razón de la naturaleza mecánica del proceso de clasificación.

En particular, se exploró más ampliamente la utilidad de la nudosidad para predecir la resistencia a flexión, separando el análisis para cada muestra, para el conjunto de vigas, de tablas y para el total. Para ello, a los cuatro criterios aptos tanto para tablas como para vigas (K , $KAR1$, $KAR2$ y $KAR3$) utilizados en el desarrollo del método visual, se ha agregado la consideración de los dos criterios útiles para vigas (K_{vi} y KAR_{vi}) y de los cuatro para tablas (K_{ta1} , K_{ta2} , K_{ta3} y K_{ta4}). Además de estudiar la importancia individual del MOE y de la densidad aparente como parámetros mecánicos, a través de la técnica del análisis de correlación y regresión múltiple, se determinó la eficiencia de parámetros combinados para determinar el MOR , considerando para ello el módulo de elasticidad, la nudosidad y la densidad aparente. Teniendo en cuenta la inspección visual adicional que contempla la norma prEN 14081-1 (2000), para el conjunto de vigas, para las tablas y para el total, los estudios se efectuaron con todas las probetas y con aquellas libres de las características visuales no permitidas para clases resistentes superiores a C18.

La Tabla 4.10 presenta los principales resultados, expresados en forma de coeficientes de correlación, donde se aprecia que el módulo de elasticidad es el parámetro individual mejor correlacionado con la resistencia. Sus valores son muy buenos para las vigas de las muestras 1 y 2 y para las tablas de la Muestra 5, y moderados para las muestras 3 y 4, coincidiendo con la presencia de una elevada cantidad de fisuras importantes en las mismas.

La densidad aparente exhibe un muy bajo valor de 0,11 para la Muestra 4 y niveles normales para las otras. La nudosidad presenta mayores valores en tablas que en vigas, con la particularidad que una correlación positiva fue encontrada para los criterios K y K_{vi} en la Muestra 1, así como para $KAR1$ y $KAR2$ en la Muestra 4. Teniendo en cuenta que el conjunto de vigas, la muestra de tablas y el total presentan un número de probetas que asegura una mayor base estadística, en adelante el estudio continuará para esos tres grupos, descartándose un análisis individual de las muestras de vigas.

Los resultados indican que la correlación se incrementa si se consideran solamente los cuerpos de prueba libres de fisuras importantes y grandes defectos. Como las vigas presentan una mayor cantidad de estas características que las tablas, el incremento es más importante en las primeras que en las segundas. Teniendo en cuenta estos datos y considerando que los métodos de clasificación mecánicos por resistencia tienen como uno de sus objetivos principales lograr importantes rendimientos en las clases de mayor calidad, superiores a la C18, en adelante se continuará el análisis con los cuerpos libres de esas singularidades. Los resultados correspondientes a las mismas ya fueron presentados en la Tabla 4.1 y los relacionados a las propiedades de resistencia, rigidez y densidad en la Tabla 4.4.

Tabla 4.10 Coeficientes de correlación entre los parámetros considerados para una clasificación mecánica y la resistencia a flexión

(1) Valores correspondientes a los cuerpos de prueba libres de características visuales que exceden los límites establecidos en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18; los valores de la resistencia a flexión fueron ajustados a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996).

Parámetro	M 1, 2, 3 y 4 <i>n</i> = 50 para cada una				M 1+2+3+4 <i>n</i> = 200/119 ⁽¹⁾	M 5 <i>n</i> = 149/136 ⁽¹⁾	Todas <i>n</i> = 349/255 ⁽¹⁾
	$E_{m,g}$	0,82	0,84	0,61	0,66	0,77/0,83 ⁽¹⁾	0,80/0,81 ⁽¹⁾
ρ	0,53	0,34	0,57	0,11	0,38/0,46 ⁽¹⁾	0,47/0,48 ⁽¹⁾	0,42/0,46 ⁽¹⁾
K	0,12	-0,32	-0,16	-0,22	-0,21/-0,29 ⁽¹⁾	-0,50/-0,54 ⁽¹⁾	-0,32/-0,39 ⁽¹⁾
$KAR1$	-0,15	-0,29	-0,20	0,05	-0,25/-0,36 ⁽¹⁾	-0,43/-0,44 ⁽¹⁾	-0,30/-0,40 ⁽¹⁾
$KAR2$	-0,14	-0,30	-0,11	0,05	-0,23/-0,36 ⁽¹⁾	-0,47/-0,49 ⁽¹⁾	-0,30/-0,42 ⁽¹⁾
$KAR3$	-0,22	-0,35	-0,07	-0,03	-0,27/-0,40 ⁽¹⁾	-0,49/-0,50 ⁽¹⁾	-0,33/-0,44 ⁽¹⁾
Kvi	0,06	-0,36	-0,20	-0,13	-0,26/-0,38 ⁽¹⁾	-	-
$KARvi$	-0,11	-0,41	-0,14	-0,05	-0,30/-0,47 ⁽¹⁾	-	-
$Kta1$	-	-	-	-	-	-0,39/-0,43 ⁽¹⁾	-
$Kta2$	-	-	-	-	-	-0,51/-0,52 ⁽¹⁾	-
$Kta3$	-	-	-	-	-	-0,42/-0,46 ⁽¹⁾	-
$Kta4$	-	-	-	-	-	-0,50/-0,55 ⁽¹⁾	-
$E_{m,g}+\rho$	-	-	-	-	0,77/0,84 ⁽¹⁾	0,81/0,81 ⁽¹⁾	0,77/0,81 ⁽¹⁾
$E_{m,g}+KAR3$	-	-	-	-	-	-	0,78/0,82 ⁽¹⁾
$E_{m,g}+KARvi$	-	-	-	-	0,77/0,85 ⁽¹⁾	-	-
$E_{m,g}+Kta2/4^{(1)}$	-	-	-	-	-	0,81/0,82 ⁽¹⁾	-
$\rho+KAR3$	-	-	-	-	-	-	0,57/0,67 ⁽¹⁾
$\rho+KARvi$	-	-	-	-	0,50/0,67 ⁽¹⁾	-	-
$\rho+Kta2/4^{(1)}$	-	-	-	-	-	0,74/0,73 ⁽¹⁾	-
$E_{m,g}+\rho+KAR3$	-	-	-	-	-	-	0,78/0,82 ⁽¹⁾
$E_{m,g}+\rho+KARvi$	-	-	-	-	0,78/0,85 ⁽¹⁾	-	-
$E_{m,g}+\rho+Kta2/4^{(1)}$	-	-	-	-	-	0,83/0,84 ⁽¹⁾	-

El coeficiente de correlación entre el *MOE* y el *MOR* alcanza los muy buenos niveles de 0,83, 0,81 y 0,81 para el conjunto de vigas, tablas y el total respectivamente. Johansson et al. (1992) reportaron un coeficiente de 0,85 para una serie de ensayos con *Picea abies* en tamaño estructural procedente de Alemania y Suecia, mientras que Glos & Diebold (1987) encontraron valores oscilando entre 0,71 y 0,82 para cuatro series de pruebas que involucraron madera de *Picea*

abies y *Pinus sylvestris*.

Los coeficientes de correlación para la densidad aparente son 0,46, 0,48 y 0,46 para las vigas, las tablas y el total, respectivamente, y comparan bien con el valor de 0,45 informado por Johansson et al. (1992). Estos son a su vez mayores que los publicados por Glos & Diebold (1987), los que oscilan entre 0,23 y 0,44, en ambos casos para las ya mencionadas series de ensayos.

La nudosidad exhibe valores más altos para tablas que para vigas en este estudio. *KARvi* (-0,47), *Kta4* (-0,55) and *KAR3* (-0,44) muestran las mejores correlaciones para las vigas, para las tablas y para el total, respectivamente. Aunque los resultados de los distintos criterios confirman que la nudosidad y la resistencia a flexión no están estrechamente relacionadas en esta especie, es considerable la mejora que se logra al descartar los cuerpos de prueba con fisuras importantes y grandes defectos. Glos & Lederer (2000) publicó valores de -0,64 y -0,69 para casos analizados en la línea de *KARvi* en una serie de pruebas con vigas de Roble y Haya en tamaño estructural, respectivamente, y niveles de -0,63 y -0,56 cuando el criterio adoptado fue coincidente con *KAR3*. Glos & Diebold (1987) encontraron coeficientes de correlación variando desde -0,40 hasta -0,60 y desde -0,61 hasta -0,74 de acuerdo a los criterios *KARvi* y *KAR3* respectivamente, para las ya mencionadas series de ensayos con madera de *Picea abies* y *Pinus sylvestris*.

La adición de dos o más variables independientes resulta generalmente en una mejor correlación que cuando se las considera individualmente. A través de un análisis de regresión lineal múltiple los coeficientes de correlación entre dos o más parámetros combinados y la variable dependiente (resistencia a flexión) fueron calculados y luego presentados en la Tabla 4.10. La combinación del módulo de elasticidad con la densidad aparente permite alcanzar valores de 0,84, 0,81 y 0,82 para las vigas, las tablas y el total respectivamente, pero niveles algo superiores de 0,85, 0,82 y 0,82 se logran adicionando el módulo de elasticidad con la nudosidad. Para la combinación de parámetros, la nudosidad se analiza en cada grupo con el criterio de mayor correlación individual con la resistencia, es decir *KARvi* para las vigas, *Kta4* para las tablas y *KAR3* para el total general (ver Tabla 4.10). La adición de la densidad aparente con la nudosidad produce los valores combinados más pobres, mientras que la consideración conjunta del módulo de elasticidad, la densidad aparente y la nudosidad muestra los coeficientes mayores, con valores de 0,85, 0,84 y 0,82 para los tres grupos analizados. Este último valor de 0,82 obtenido para todas las muestras es congruente con los reportados por Glos & Diebold (1987) para cuatro series de ensayos con *Pinus sylvestris* y *Picea abies* en tamaño estructural, que están comprendidos entre 0,80 y 0,88.

Las vigas y las tablas exhiben separadamente, en algunos casos, mejores correlaciones entre los parámetros analizados y la resistencia a flexión que cuando se consideran todas las muestras en forma conjunta. No obstante, la mayor cantidad de cuerpos de prueba presente en este último caso proporciona una mayor base estadística y, por otra parte, las diferencias encontradas en

la eficiencia para predecir el *MOR*, o sea entre los coeficientes de correlación, no puede considerarse importante. En consecuencia, tales datos hacen aconsejable continuar la investigación con el total de los cuerpos de prueba.

Teniendo en cuenta esta decisión, el mayor coeficiente de correlación encontrado corresponde a la acción conjunta del *MOE*, la densidad y *KAR3*, y alcanza el valor de 0,82. Este valor elevado al cuadrado, o sea el coeficiente de determinación para este caso, es 0,67. Conociendo $E_{m,g}$, ρ y *KAR3*, se puede explicar, consecuentemente, aproximadamente un 67% de la variabilidad de la resistencia a flexión en los 255 cuerpos de prueba libres de características visuales que exceden los límites establecidos en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18. El modelo de regresión múltiple propuesto para expresar este parámetro combinado de clasificación mecánica por resistencia (*PC*) es:

$$PC = -6,7650 + 0,0032850E_{m,g} + 0,015950\rho - 9,7890KAR3 \quad (Ec 4.1)$$

El análisis estadístico de las variables que intervienen en el modelo, indica que *KAR3* presenta un promedio de 0,244, una desviación estándar de 0,178 y un coeficiente de variación de 0,73. Para el *MOR* los correspondientes valores son $\bar{f}_m = 42,2N/mm^2$, $S = 11,6 N/mm^2$, y $COV = 0,27$. El *MOE* exhibe $\bar{E}_{m,g} = 12992N/mm^2$, $S = 2416N/mm^2$ y $COV = 0,19$, y ρ muestra $\bar{\rho} = 546kg/m^3$, $S = 76 kg/m^3$ y $COV = 0,14$. En los histogramas de las figuras 4.10, 4.11, 4.12 y 4.13 se aprecian las distribuciones de frecuencias de estas variables, respectivamente, que son similares a las ya encontradas para las 349 probetas, como se desprende de la observación de las tablas 4.1 y 4.4, y de las figuras 4.3, 4.4 y 4.5.

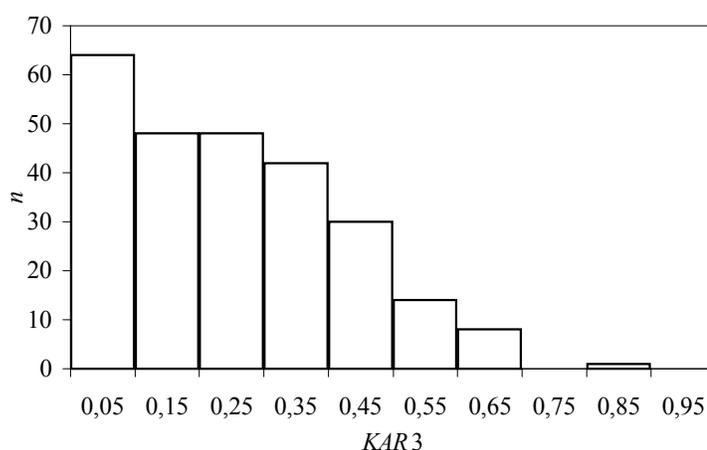


Figura 4.10 Histograma de frecuencias para *KAR3* correspondiente a 255 cuerpos de prueba

Cuerpos de prueba libres de fisuras⁽¹⁾ y grandes defectos; (1) fisuras que exceden la longitud máxima establecida en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18.

Un análisis detallado confirma una correlación levemente menor (0,816) para la combinación de $E_{m,g}$ y $KAR3$ que para PC , aunque ambos aparecen con el valor de 0,82 en la Tabla 4.10. Por su parte, el módulo de elasticidad exhibe un coeficiente de correlación igual a 0,81 con la resistencia a flexión, o sea que considerado individualmente explica aproximadamente un 66% de la variabilidad de ésta. Estos resultados confirman la conveniencia de desarrollar modelos de clasificación por resistencia considerando al MOE y a PC como parámetros mecánicos, y descartando otras combinaciones por su bajo aporte a la eficiencia del proceso. Las correlaciones entre las variables que intervienen en estos dos modelos y el MOR , cuyos valores ya han sido analizados, son en todos los casos altamente significativas, con niveles de probabilidad (p) menores a 0,0005.

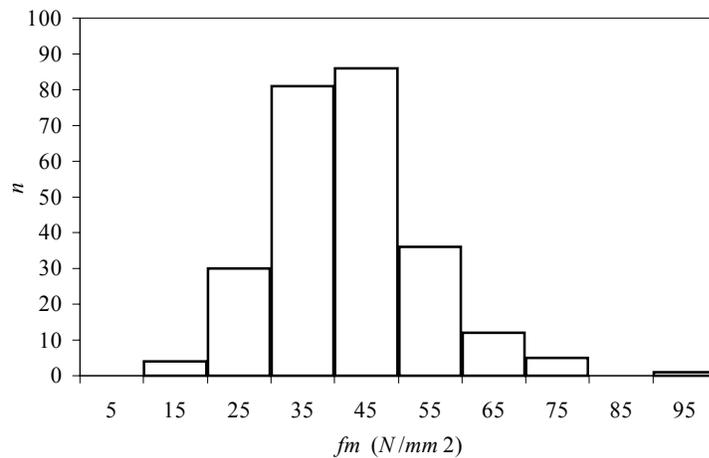


Figura 4.11 Histograma de frecuencias para f_m correspondiente a 255 cuerpos de prueba

Cuerpos de prueba libres de fisuras⁽¹⁾ y grandes defectos; (1) fisuras que exceden la longitud máxima establecida en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18; f_m ajustada a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996).

Con el fin de analizar distintos perfiles de resistencia, rigidez y densidad para los modelos basados en PC y en $E_{m,g}$ como parámetros, combinado y simple, respectivamente, la Tabla 4.11 presenta los datos más importantes de las variables involucradas. En la misma aparecen los percentiles 7,5% para la resistencia a flexión y 5% para la densidad aparente, así como el valor medio del módulo de elasticidad, y los correspondientes valores característicos. Este último

coincide con el valor medio para el MOE y con el percentil 5% para la densidad, pero es menor que el percentil 7,5% en el MOR , debido a la influencia del coeficiente que penaliza estadísticamente el tamaño de la muestra (k_s), de acuerdo a EN 384 (1996). También se pueden apreciar los límites establecidos en cada grado de calidad para los parámetros empleados, el rendimiento global y la clase resistente del sistema internacional previsto en la norma EN 338 (1996) a que se puede aspirar en cada caso.

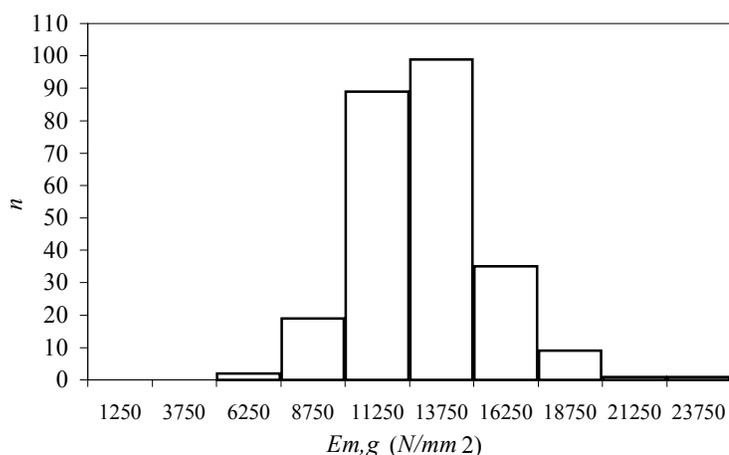


Figura 4.12 Histograma de frecuencias para $E_{m,g}$ correspondiente a 255 cuerpos de prueba

Cuerpos de prueba libres de fisuras⁽¹⁾ y grandes defectos; (1) fisuras que exceden la longitud máxima establecida en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18; $E_{m,g}$ ajustado a un contenido de humedad de referencia de 12% conforme a EN 384 (1996).

Una de las características más salientes encontradas en este trabajo para la especie investigada son las elevadas relaciones MOE /densidad aparente y MOR /densidad aparente, las que fueron presentadas y discutidas en el apartado 4.1. Esta particularidad hace aconsejable comparar sus perfiles de resistencia, rigidez y densidad con los contemplados en el sistema internacional para las especies de coníferas y el álamo, si bien es necesario estudiar otras propiedades adicionales. Por este motivo se considera esta especial particularidad, también en el presente apartado, para comparar los grados de calidad que surgen de aplicar los modelos de clasificación mecánica.

En el método visual propuesto en el apartado 4.1, la asignación de los cuerpos de prueba a un determinado grado de calidad se efectúa separando los que contienen médula, fisuras y grandes defectos en primera instancia (grado inferior), y, en un segundo paso, dividiendo en función del límite fijado para la nudosidad (K) a los libres de esas características. Los valores

característicos para cada grupo se calculan luego considerando la cantidad de probetas que lo integran, y sus valores determinan la clase resistente a la cual se puede asignar cada uno.

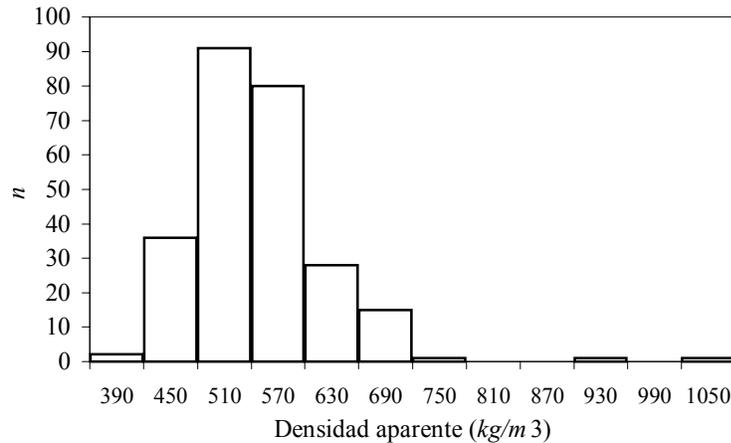


Figura 4.13 Histograma de frecuencias para la densidad correspondiente a 255 cuerpos de prueba

Cuerpos de prueba libres de fisuras⁽¹⁾ y grandes defectos; (1) fisuras que exceden la longitud máxima establecida en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18; densidad aparente ajustada a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996).

En los modelos mecánicos, en cambio, la asignación se efectúa separando en primera instancia todos los cuerpos de prueba libres de fisuras importantes y grandes defectos (grado inferior), los cuales no pueden aspirar a clases resistentes superiores a la C18 del sistema internacional. Posteriormente se ordenan las probetas libres de esos defectos en orden decreciente del parámetro correspondiente al modelo utilizado (PC o $E_{m,g}$). A la mayor clase resistente del sistema internacional a la cual se aspira se la considera el grado óptimo, y a ella se asignan todos los cuerpos de prueba que sea posible. Se procede ordenadamente a partir del que posee el mayor valor del parámetro y continuando en forma decreciente, hasta que los valores característicos de la resistencia a flexión, del módulo de elasticidad y de la densidad aparente satisfagan los requisitos de la clase elegida. Cuando deja de cumplirse esta condición, se llega al límite inferior del parámetro para ese grado y a partir del mismo comienza la asignación de probetas a una clase inferior.

A través de un análisis previo se descartó la clase resistente C40 como grado óptimo para este caso, pues solamente 24 probetas pueden ser asignadas a la misma considerando el parámetro PC . La incidencia negativa que sobre los valores característicos del MOR tiene el antes

mencionado coeficiente de penalización estadística por tamaño de muestra (k_s), desempeña un papel importante, lo cual podría superarse con un programa adicional de ensayos que aporte una mayor cantidad de resultados. En consecuencia se eligió como grado óptimo a la clase C35, y después otro análisis resultó la C24 como segundo nivel al que se puede aspirar.

Tabla 4.11 Perfiles de resistencia, rigidez y densidad

(1) Ajustados a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); (2) ajustados por tamaño de muestra conforme a EN 384 (1996); (3) ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996); (4) porcentaje referido a la cantidad de cuerpos de prueba libres de características visuales que exceden los límites establecidos en prEN 14081 (2000) para clases resistentes superiores a C18; el parámetro $E_{m,g}$ está expresado en N/mm^2 .

Perfil	Clase resistente	Límites para los parámetros mecánicos analizados	$f_{m,075}^{(1)} / f_{m,k}^{(2)}$ N/mm^2	$\bar{E}_{m,g}^{(3)} = E_{0,mean}$ N/mm^2	$\rho_{05}^{(3)} = \rho_k$ kg/m^3	Rendimiento n (%)
a)	C35	$PC/39,16$	35,9 / 35,4	14361	440	159 (45/62 ⁽⁴⁾)
	C24	$39,16 > PC/27,53$	25,7 / 24,2	11012	411	86 (25/34 ⁽⁴⁾)
	C18	rechazo visual y $PC < 27,53$	19,6 / 18,6	11350	423	104 (30)
b)	C35	$E_{m,g}/12346$	35,7 / 35,2	14450	444	154 (44/60 ⁽⁴⁾)
	C24	$12346 > E_{m,g}/9365$	25,7 / 24,2	11086	412	89 (26/35 ⁽⁴⁾)
	C18	rechazo visual y $E_{m,g} < 9365$	19,6 / 18,7	11311	420	106 (30)

El perfil a) muestra que 159 y 86 cuerpos de prueba pueden ser asignados a las clases resistentes C35 y C24 respectivamente, representando el 45% y el 25% del total de las muestras. Cuando el rendimiento se calcula respecto de los 255 cuerpos de prueba libres de características visuales que exceden los límites establecidos en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18, los valores para los dos primeros grados son 62% y 34%, respectivamente. Este procedimiento permite asignar, por lo tanto, 245 (96%) de las 255 probetas sometidas al modelo de clasificación mecánica por resistencia, a las clases consideradas como objetivo. Se rechazan solamente 10 (4%) cuerpos de prueba, los cuales, junto a los descartados en la inspección visual adicional, componen el tercer grado de calidad.

Un detalle del rendimiento discriminado por cada muestra se indica en la Tabla 4.12, donde es posible apreciar que solamente 3 cuerpos de prueba de la Muestra 1 y 7 de la Muestra 5 presentan valores de PC menores al límite inferior para el segundo grado (27,53). Esta tabla también muestra que más del 50% de las probetas de las muestras 3 y 4 son rechazadas de los

grados superiores a causa de defectos no permitidos en la inspección visual adicional (ver también la Tabla 4.1).

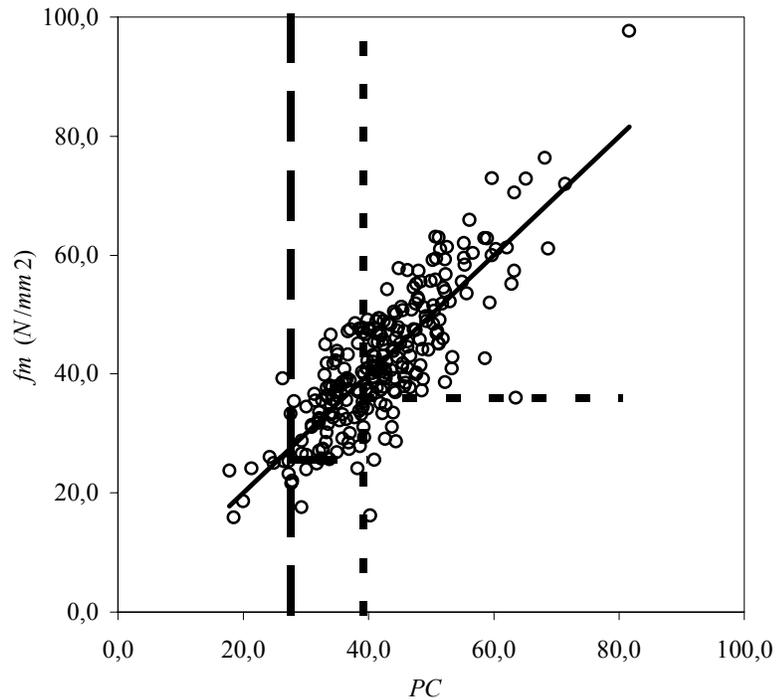


Figura 4.14 Relación entre PC y f_m para 255 cuerpos de prueba

Cuerpos de prueba libres de fisuras⁽¹⁾ y grandes defectos; (1) fisuras que exceden la longitud máxima establecida en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18; las líneas verticales indican los límites para PC y las horizontales los percentiles 7,5% correspondientes a las dos clases superiores del modelo a); $r = 0,82$; ecuación de la recta de regresión: $f_m = PC + 0,001$; f_m ajustada a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996).

El perfil b), que considera a $E_{m,g}$ como parámetro, exhibe valores característicos y rendimientos similares al del perfil a), como puede observarse en las tablas 4.11 y 4.12. En este último caso, solamente 3 cuerpos de prueba de la Muestra 1, y 9 de la Muestra 5 presentan valores de $E_{m,g}$ menores al límite inferior para el segundo grado (9365N/mm²).

Los modelos presentados en los perfiles a) y b) permiten asignar más del 60% de los cuerpos de prueba que superan los requisitos visuales adicionales al grado óptimo (C35) y más del 30% al segundo (C24). Los valores característicos del tercer grado superan los requeridos para la

clase resistente C18, pero la presencia de defectos que afectan negativamente el comportamiento mecánico pueden constituir en algunos casos una razón de rechazo para propósitos estructurales (European Committee for standardisation, 2000b). En particular, hay 65 probetas con fisuras que exceden los límites establecidos en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes iguales o menores a C18 (ver Tabla 4.1) y 3 que poseen grandes defectos.

Tabla 4.12 Rendimiento de las muestras sometidas a ensayos de flexión

(1) Número de cuerpos de prueba que exceden el límite establecido en prEN 14081 (2000) para clases superiores a C18; el parámetro $E_{m,g}$ está expresado en N/mm^2 .

Perfil	Límites para los parámetros	M 1 <i>n</i>	M 2 <i>n</i>	M 3 <i>n</i>	M 4 <i>n</i>	M 5 <i>n</i>
a)	$PC/39,16$	16	29	14	18	82
	$39,16 > PC/27,53$	16	10	9	4	47
	rechazo visual y $PC < 27,53$	18 (15 ⁽¹⁾)	11 (11 ⁽¹⁾)	27 (27 ⁽¹⁾)	28 (28 ⁽¹⁾)	20 (13 ⁽¹⁾)
b)	$E_{m,g}/12346$	14	29	13	18	80
	$12346 > E_{m,g}/9365$	18	10	10	4	47
	rechazo visual y $E_{m,g} < 9365$	18 (15 ⁽¹⁾)	11 (11 ⁽¹⁾)	27 (27 ⁽¹⁾)	28 (28 ⁽¹⁾)	22 (13 ⁽¹⁾)

Teniendo en cuenta que los rendimientos obtenidos en el perfil a) superan apenas levemente a los del perfil b) y considerando la mayor sencillez que implica utilizar $E_{m,g}$ como parámetro, en comparación con PC , estos aspectos de eficiencia y economía deberían ser evaluados en el momento de implementar un proceso de clasificación mecánico por resistencia de esta especie. Los resultados ponen en evidencia, para este caso, que la disminución de las fisuras a través de la mejora de los procesos de producción y secado, adquiere una importancia mayor que la adopción de modelos complejos. El excelente rendimiento encontrado para ambos modelos de clasificación se fundamenta en las estrechas relaciones encontradas entre la resistencia a flexión y los parámetros PC (ver Ec 4.1) y $E_{m,g}$, las cuales se ponen de manifiesto en las figuras 4.14 y 4.15, respectivamente.

Teniendo en cuenta el modelo de regresión lineal múltiple adoptado para analizar el parámetro combinado de clasificación PC (ver Ec 4.1), las relaciones mostradas en la Figura 4.14 son las existentes entre los valores estimados de la resistencia a través del modelo (PC) y los obtenidos en los ensayos mecánicos (f_m). Los límites inferiores para el parámetro y los percentiles 7,5% del MOR para los dos grados de calidad superior son indicados con líneas verticales y

horizontales, respectivamente. Es posible también observar, en el sector izquierdo de la figura, los 10 cuerpos de prueba con valores para PC menores al límite inferior del segundo grado (27,53), los cuales deben ser adicionados a los 94 con defectos visuales no permitidos para clases superiores a la C18, y, consecuentemente, analizados en el tercer grado (ver también tablas 4.11 y 4.12).

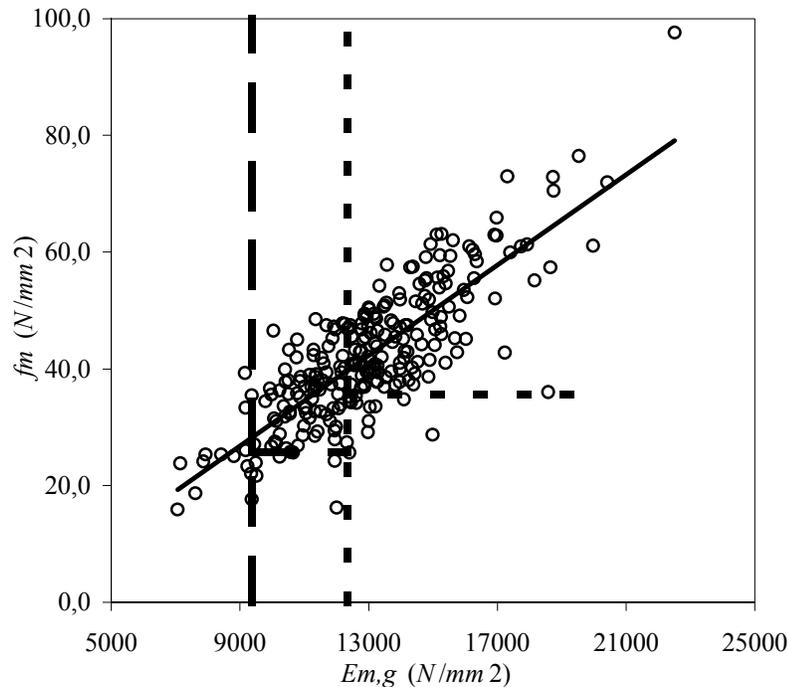


Figura 4.15 Relación entre $E_{m,g}$ y f_m para 255 cuerpos de prueba

Cuerpos de prueba libres de fisuras⁽¹⁾ y grandes defectos; (1) fisuras que exceden la longitud máxima establecida en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18; las líneas verticales indican los límites para $E_{m,g}$ y las horizontales los percentiles 7,5% correspondientes a las dos clases superiores del modelo b); $r = 0,81$; ecuación de la recta de regresión: $f_m = 0,0039E_{m,g} - 8,1194$; f_m ajustada a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); $E_{m,g}$ ajustado a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996).

En la Figura 4.15 es mostrada la relación entre $E_{m,g}$ (parámetro individual) y la resistencia a flexión. Los límites para el parámetro y los percentiles 7,5% del MOR son indicados en la misma forma que en la Figura 4.14. Hay en este caso 12 cuerpos de prueba con valores menores al límite inferior de $E_{m,g}$ para el segundo grado ($9365N/mm^2$), los cuales pueden ser observados en el sector izquierdo de la figura y que, sumados a los 94 descartados en la inspección

visual, conforman el grupo de menor calidad (106).

Los resultados presentados posibilitan ahora comparar más detalladamente los procesos del método visual propuesto (ver apartado 4.1) con los de los modelos mecánicos desarrollados. En estos últimos, los cuerpos con médula no son separados inicialmente, a diferencia de lo que ocurre en el primero. La influencia negativa de la médula encontrada para esta especie (ver también la Tabla 4.3 y la Figura 4.2) se tiene en cuenta, en los modelos mecánicos, a través de la disminución que ella produce en el valor del parámetro. Los cuerpos de prueba que poseen una elevada cantidad de médula exhiben un valor del *MOE* mucho menor y una densidad aparente un poco más baja que los libres de ella, y, en consecuencia, su menor *MOR* es detectado por el nivel bajo del parámetro, ya sea combinado (*PC*) o simple ($E_{m,g}$), lo que provoca automáticamente su asignación a un grado de calidad menor a los que no la poseen.

El análisis de las tablas 4.6 y 4.12 permite apreciar la diferencia que la naturaleza de los métodos ocasiona en el rendimiento de cada muestra. Aquellas con un número elevado de probetas con médula bajan automáticamente su rendimiento en las dos clases superiores para el método visual, aumentando el grupo inferior, lo que no ocurre en los modelos mecánicos. En estos últimos, esas probetas pueden estar incluidas en el primer o en el segundo grado, de acuerdo con la calidad de sus propiedades. Un razonamiento similar se puede aplicar a la consideración de la nudosidad, la cual en el método visual ocasiona, en función de un límite fijo, la división automática de las probetas entre las dos clases superiores. Por el contrario, en el modelo mecánico que utiliza el parámetro *PC* (el otro no la tiene en cuenta), la nudosidad aporta su influencia a través del modelo adoptado (ver *Ec* 4.1), pero su valor no constituye en sí mismo un impedimento insalvable para aspirar a clases superiores. En consecuencia, las muestras que poseen altos niveles de nudosidad, pero que también exhiben elevados valores para el *MOE* y la densidad aparente, pueden alcanzar buenos rendimientos en el mejor grado de calidad, lo que no es posible lograr con el método visual.

Esa capacidad de los modelos mecánicos de evaluar la calidad de la probeta a través de parámetros que no pueden apreciarse visualmente y que están altamente relacionados con la resistencia, y a su vez de detectar individualmente el nivel de sus propiedades mecánicas, conduce a un mejor aprovechamiento del material. Este, junto al logro de una alta confiabilidad, constituyen sus objetivos principales. Para el caso investigado, la simple comparación de los rendimientos obtenidos con los dos procesos para las mismas muestras, lo cual se puede hacer a través de la observación de las tablas 4.5, 4.6, 4.11 y 4.12, comprueba el logro de aquel propósito. Con los modelos mecánicos no solamente se logra para la especie un mejor rendimiento porcentual en los grados más elevados, sino que se puede acceder a la clase resistente *C35* del sistema internacional, mientras que con el visual no puede superarse la *C30*. Naturalmente, la eficiencia de los modelos

teóricos desarrollados debe ser finalmente confirmada con una adecuada selección y ajuste de la máquina de clasificación y de los procesos involucrados, teniendo en cuenta todas las variables que pueden afectar su funcionamiento real.

En el presente apartado se investigó la aptitud de los parámetros utilizables en el desarrollo de modelos mecánicos de clasificación por resistencia. Los estudios demostraron que la correlación de los parámetros con el *MOR* adquiere valores más elevados cuando se consideran solamente los cuerpos libres de fisuras importantes y grandes defectos. Se encontró que el módulo de elasticidad, la densidad aparente y la nudosidad, actuando como en forma conjunta (*PC*), producen la mejor correlación con el *MOR*, y que el *MOE*, actuando individualmente, exhibe un valor levemente inferior al caso anterior. Se desarrollaron dos modelos teóricos para una clasificación mecánica por resistencia de la especie, uno basado en el parámetro combinado (*PC*) y otro en el *MOE*, obteniéndose para ambos casos excelentes rendimientos en las clases *C35* y *C24* del sistema internacional contemplado en EN 338 (1996). La mayor eficiencia estos modelos mecánicos en comparación con el método visual propuesto en el apartado 4.1, que comprobada por el mayor número de probetas incluidas en los grados de calidad superior que permiten, y por el acceso a la clase *C35* en lugar de la *C30*, que es el mayor nivel alcanzado con la clasificación visual. La realización de nuevas investigaciones permitiría conocer otras propiedades mecánicas complementarias y aportaría resultados adicionales a los obtenidos en el presente trabajo. Esta ampliación del número de datos podría posibilitar el acceso a clases aún superiores a la *C35* y *C24*, a causa de la disminución de la penalización estadística que sobre el valor característico del *MOR* es aplicable por el tamaño de la muestra.

4.2.1 Aplicación de los modelos a piezas ensayadas a tracción

Como ya fue expresado en apartados anteriores, los valores característicos fundamentales que permiten la inclusión de un determinado conjunto calidad/especie/procedencia en una clase del sistema internacional contemplado en EN 338 (1996) son los de la resistencia y la rigidez en flexión, y de la densidad aparente. No obstante, la importancia que las propiedades mecánicas en tracción paralela a las fibras han adquirido para las tablas destinadas a la construcción de vigas laminadas de acuerdo con la norma europea EN 1194 (1999) y numerosas investigaciones (Glos & Diebold, 1994; Glos & Lederer, 2000; Görlacher, 1990), las tablas de la Muestra 6, ensayadas a tracción, fueron utilizadas para comprobar la eficiencia de los modelos analizados en los perfiles a) y b) para una clasificación mecánica por resistencia.

Con este fin, se asumieron valores equivalentes para el módulo de elasticidad global en flexión ($E_{m,g}$) y para el módulo de elasticidad en tracción paralela a las fibras ($E_{t,0}$), y el primero fue sustituido por el segundo en los dos modelos presentados en el apartado anterior. Un análisis de los valores del *MOE* para los cuerpos de prueba libres de las características visuales que exceden los límites establecidos en prEN 14081-1 (2000) para clases superiores a C18, muestra que $\bar{E}_{t,0}$ ($13496N/mm^2$) es un 4% superior a $\bar{E}_{m,g}$ ($12992N/mm^2$). El coeficiente de variación es 0,20 en tracción y 0,19 en flexión, y la cantidad de probetas involucradas es 255 y 135, respectivamente. Glos & Lederer (2000) encontraron valores medios de $14000N/mm^2$ y $14100N/mm^2$ con coeficientes de variación de 0,18 y 0,13 para el módulo de elasticidad en tracción y en flexión respectivamente, en una serie de ensayos con Haya en tamaño estructural. Johansson et al. (1992) informaron un valor medio 1% mayor del *MOE* en tracción que en flexión para ensayos realizados con madera de Picea abies de Suecia, mientras que el valor medio del *MOE* en flexión fue 8% mayor que en tracción para la misma especie procedente de Alemania. En la misma línea que el último resultado, Burger & Glos (1995) encontraron, para Spruce europeo, un valor medio del *MOE* 9% mayor en flexión que en tracción. Estos resultados obtenidos con distintas especies confirman que la adopción de valores equivalentes para ambos módulos de elasticidad no lleva implícito un error importante, y avalan, en consecuencia, la sustitución propuesta en los modelos de clasificación mecánica.

Tabla 4.13 Resistencia, rigidez, densidad y rendimiento para las tablas de Muestra 6

(1) Ajustados a un ancho de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); (2) ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996); (3) porcentaje referido a la cantidad de cuerpos de prueba libres de características visuales que exceden los límites establecidos en prEN 14081 (2000) para clases resistentes superiores a C18; (4) número de cuerpos de prueba que exceden el límite establecido en prEN 14081 (2000) para clases superiores a C18; (5) el menor valor para $n < 20$; el parámetro $E_{t,0}$ está expresado en N/mm^2 .

Perfil	Clase resistente	Límites para los parámetros mecánicos analizados	$f_{t,0,05}^{(1)}$ N/mm^2	$\bar{E}_{t,0}^{(2)}$ N/mm^2	$\rho_{05}^{(2)}$ kg/m^3	Rendimiento n (%)
a)	C35	$PC/39,16$	22,2	14973	478	85 (56/63 ⁽³⁾)
	C24	$39,16 > PC/27,53$	16,2	11297	426	43 (29/32 ⁽³⁾)
	C18	rechazo visual y $PC < 27,53$	11,9	11370	467	22 (15)/15 ⁽⁴⁾
b)	C35	$E_{t,0}/12346$	23,7	15157	480	80 (53/59 ⁽³⁾)
	C24	$12346 > E_{t,0}/9365$	15,9	11283	432	51 (34/38 ⁽³⁾)
	C18	rechazo visual y $E_{t,0} < 9365$	9,5 ⁽⁵⁾	11611	459	19 (13)/15 ⁽⁴⁾

Los valores de resistencia, rigidez y rendimiento para las tablas de la Muestra 6 son mostrados en la Tabla 4.13. Los rendimientos referidos al total de la muestra son superiores a los obtenidos con los cuerpos de prueba sometidos a ensayos de flexión (ver la Tabla 4.11), con 85 y 43 probetas en el primer y segundo grado del perfil a), lo que representa un 56% y 29% del total, respectivamente. No obstante, los rendimientos se hacen muy similares a los indicados en la Tabla 4.11 cuando se calculan respecto de las probetas libres defectos visuales importantes (135), alcanzando 63% y 32% para la primera y segunda clase, respectivamente. Estos rendimientos son los reales del modelo, pues se calculan respecto de la cantidad de cuerpos de prueba sometidos al proceso, y no sobre el total, que incluye los rechazados en la inspección previa adicional.

Es de destacar que solamente en 7 casos se encuentran valores del parámetro *PC* menores al límite inferior del segundo grado (27,53). Estas tablas, junto a las que fueron descartadas de las clases superiores a la C18 por poseer defectos visuales no admitidos, conforman el grupo de menor calidad (22). Este modelo permite asignar, en consecuencia, 95% de los cuerpos de prueba clasificados, a los dos grados esperados.

El perfil b), donde el módulo de elasticidad en tracción paralela a las fibras actúa como parámetro de clasificación, exhibe pequeñas diferencias en rendimiento en comparación con el perfil a), lo cual está en línea con los resultados encontrados anteriormente para los cuerpos de prueba sometidos a ensayos de flexión. Las relaciones entre los percentiles 5% del *MOR* en tracción y los 7,5% del *MOR* en flexión para los grados analizados son: 22,2/35,9=0,62, 16,2/25,7=0,63, 11,9/19,6=0,61, 23,7/35,7=0,66, 15,9/25,7=0,62 y 9,5/19,6=0,48. El valor es considerablemente menor en el último caso, pero es necesario buscar la razón de esto en el reducido número de probetas que integran el grado inferior de las tablas sometidas a ensayos de tracción (19). De acuerdo con estos resultados, las relaciones entre las resistencias de tracción y flexión comparan bien con el valor de 0,6 establecido en EN 384 (1996), confirmando la eficiencia de los modelos propuestos para clasificar mecánicamente por resistencia esta especie conforme a los criterios de las normas europeas.

En este apartado se comprobó la eficiencia de los modelos teóricos desarrollados en 4.2, aplicándolos a las tablas de la Muestra 6 sometidas a ensayos de tracción. Con el respaldo de datos del presente trabajo y de otros publicados anteriormente, se asumió que el *MOE* en tracción paralela a las fibras es equivalente al *MOE* en flexión, y el valor de este último fue sustituido por el primero en ambos modelos. Los resultados indican que las relaciones entre la resistencia a tracción y las calculadas anteriormente para flexión, en las clases correspondientes, comparan bien con las

prescripciones de la norma EN 384 (1996), y que esa congruencia abarca todas las propiedades analizadas. La eficiencia de los modelos para ser utilizados con tablas sometidas a ensayos de tracción queda confirmada, pues se comprueba que también los rendimientos son muy altos y similares a los logrados con el total de muestras ensayadas a flexión.

4.2.2 Determinación del MOE a través de la frecuencia fundamental de vibración

La determinación de las propiedades elásticas de elementos estructurales de madera a través de métodos no destructivos, y en particular de la técnica basada en la frecuencia fundamental de vibración, adquiere importancia creciente. En el Capítulo 2 se hizo referencia a este método dinámico, el cual puede ser empleado ventajosamente para la determinación del MOE en las máquinas de clasificar por resistencia. Con el fin de comprobar la eficiencia de esta técnica para calcular el módulo de elasticidad en cuerpos de prueba con tamaño estructural de la especie investigada, se utilizaron 142 tablas pertenecientes a la Muestra 6 y todas las vigas de las muestras 1, 2, 3 y 4. Antes de la realización de los ensayos estáticos, que fueron de tracción paralela a las fibras para las 142 tablas y de flexión para las 200 vigas, se efectuaron las pruebas dinámicas destinadas a determinar la frecuencia fundamental de vibración de esos cuerpos de prueba, conforme al método descrito en el Capítulo 3.

El valor medio, la desviación estándar y el coeficiente de variación de las propiedades investigadas están resumidas en las tablas 4.14 y 4.15. El valor medio del contenido de humedad para las 142 tablas y para las 200 vigas fue 15%. Teniendo en cuenta que las determinaciones estáticas y dinámicas se efectuaron sobre los mismos cuerpos de prueba, y por lo tanto los resultados son comparables, los valores de las propiedades no se encuentran ajustados al contenido de humedad de referencia en estas dos tablas.

Tabla 4.14 Resumen de los resultados para 142 tablas sometidas a ensayos dinámicos y estáticos

	ρ kg/m^3	$E_{t,0}$ N/mm^2	E_l N/mm^2	$E_f(P)$ N/mm^2
Med	579	12781	11490	12173
S	56	2472	2255	2298
COV	0,10	0,19	0,20	0,19

Los valores de la densidad aparente, la cual ejerce una gran influencia sobre el valor de la frecuencia fundamental de vibración (ver los capítulos 2 y 3), son presentados junto a los resultados encontrados para el módulo de elasticidad estático en tracción y en flexión y el dinámico obtenido tanto por vibraciones longitudinales como flexionales. El valor medio de la densidad es 579kg/m^3 para las tablas y 551kg/m^3 para las vigas, con coeficientes de variación de 0,10 y 0,13, respectivamente. Estos resultados, sin ajustar al contenido de humedad de referencia, pueden ser comparados para las vigas con los presentados en la Tabla 4.2 y exhiben las características generales ya discutidas en los apartados anteriores de este capítulo.

En la serie de ensayos efectuada con las tablas, los valores medios del *MOE* dinámico longitudinal y del *MOE* dinámico flexional son 90% y 95% del valor medio para el *MOE* estático en tracción paralela a las fibras, respectivamente, con similares coeficientes de variación oscilando entre 0,19 y 0,20. Contrariamente al caso de las tablas, los resultados para las vigas exhiben mayores valores para el *MOE* dinámico. Los valores medios del *MOE* dinámico longitudinal y del *MOE* dinámico flexional (de plano y de canto) son 3%, 2% y 4% mayores que el correspondiente al *MOE* estático en flexión, respectivamente. El coeficiente de variación del *MOE* estático para las 200 vigas es 0,18, reduciéndose a 0,17 cuando se consideran solamente las muestras 2, 3 y 4, oscilando entre 0,19 y 0,23 para el *MOE* dinámico.

Tabla 4.15 Resumen de los resultados para 200 vigas sometidas a ensayos dinámicos y estáticos

(1) Solamente para las muestras 2, 3 y 4.

	ρ kg/m^3	$E_{m,g} (Ca)$ N/mm^2	E_l N/mm^2	$E_f (P)$ N/mm^2	$E_f (Ca)$ N/mm^2
Med	551	11834 (12153 ⁽¹⁾)	12224	12415 ⁽¹⁾	12262
S	73	2071 (2047 ⁽¹⁾)	2766	2468 ⁽¹⁾	2348
COV	0,13	0,18 (0,17 ⁽¹⁾)	0,23	0,20 ⁽¹⁾	0,19

Görlacher (1984) encontró un valor medio para el *MOE* dinámico flexional aproximadamente 9% mayor que para el *MOE* estático en flexión, determinado de acuerdo con la norma DIN 52186, en un programa de ensayos con probetas pequeñas, libres de defectos y con vigas en tamaño estructural de Douglas-fir. Ilic (2001) reportó un valor medio para el *MOE* dinámico longitudinal 29% más alto que el correspondiente valor estático en flexión, para una serie de ensayos con probetas de *Eucalyptus delegatensis* de Australia, con sección transversal igual a $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ y sometidas a una carga concentrada en el centro, mientras que los resultados fueron

11% mayores para el *MOE* dinámico flexional, siendo a su vez los coeficientes de variación mayores que los obtenidos en este estudio. Pérez del Castillo (2001), para un programa de pruebas utilizando tablas de *Eucalyptus grandis* de Uruguay, de tamaño estructural, libres de médula y con un contenido de humedad del 26%, informó valores medios para el *MOE* dinámico longitudinal entre 6% y 13% más altos que los correspondientes al ensayo estático de flexión, realizado para distintas longitudes, de plano, y con una carga concentrada en el centro. En una serie de ensayos con las mismas tablas conteniendo el 12% de humedad, encontró un valor medio para el *MOE* dinámico longitudinal 3% mayor que el correspondiente al ensayo estático.

Tabla 4.16 Coeficientes de correlación entre el *MOE* estático y el *MOE* dinámico

(1) Solamente para las muestras 2, 3 y 4.

	E_l	$E_f(P)$	$E_f(Ca)$
$E_{t,0}$ (142 tablas)	0,85	0,92	-----
$E_{m,g}$ (200 vigas de Muestra 1+2+3+4)	0,86	0,92 ⁽¹⁾	0,93

Las relaciones entre las propiedades estáticas y dinámicas de las vigas y las tablas consideradas, expresadas a través de coeficientes de correlación, son indicadas en la Tabla 4.16. En todos los casos la correlación es altamente significativa, con niveles de probabilidad (p) menores que 0,0005. Los valores muestran que el *MOE* dinámico flexional están altamente relacionados tanto al *MOE* estático en tracción paralela a las fibras como al *MOE* estático en flexión, con los excelentes coeficientes de correlación de 0,92 para las tablas, 0,93 para las vigas ensayadas dinámicamente de canto, y 0,92 de plano, respectivamente. El *MOE* dinámico longitudinal exhibe coeficientes de correlación un poco menores al flexional, pero alcanza los muy buenos valores de 0,85 para las tablas y de 0,86 para las vigas. Ilic (2001) publicó un valor de 0,95 para el coeficiente de correlación entre el *MOE* dinámico longitudinal y el *MOE* estático, y un nivel de 0,99 entre el *MOE* dinámico flexional y el *MOE* estático, para ensayos realizados con probetas pequeñas, libres de defectos, de *Eucalyptus delegatensis* sometidos a flexión con una carga concentrada en el centro. Un muy buen valor de $r = 0,98$ entre el *MOE* dinámico longitudinal y el *MOE* estático fue obtenido por Pérez del Castillo (2001) con tablas de *Eucalyptus grandis* de Uruguay, libres de médula y con un contenido de humedad de 26%.

Con el fin de discutir las relaciones entre las propiedades elásticas estáticas y dinámicas para cuerpos de prueba con distintas dimensiones, los coeficientes de correlación son presentados individualmente en la Tabla 4.17 para las 4 muestras compuestas por vigas. Los

resultados muestran valores que oscilan entre 0,83 y 0,88 para el *MOE* dinámico longitudinal, entre 0,85 y 0,95 para el *MOE* elástico flexional obtenido de plano, y entre 0,93 y 0,97 para el *MOE* dinámico flexional obtenido de canto. En todos los casos estas correlaciones son también altamente significativas, con niveles de probabilidad (p) menores que 0,0005. Del análisis de los mismos no es posible encontrar una relación entre el tamaño de los cuerpos de prueba y el coeficiente de correlación. El valor de 0,85 correspondiente a la Muestra 3 para el *MOE* dinámico flexional, de plano, es considerablemente menor que el correspondiente a la Muestra 2 (0,95) y a la Muestra 4 (0,93). No obstante, no puede asumirse una influencia del tamaño de los cuerpos de prueba, porque este es menor en la Muestra 2 y mayor en la Muestra 4.

Tabla 4.17 *Coefficientes de correlación entre el MOE estático y el MOE dinámico para las vigas*

Muestra	E_l	$E_f(P)$	$E_f(Ca)$
1	0,83	-----	0,94
2	0,88	0,95	0,97
3	0,88	0,85	0,93
4	0,84	0,93	0,97

Es importante señalar que los coeficientes de correlación observados en la Tabla 4.17 no muestran influencia de la presencia de médula ni de fisuras importantes y grandes defectos, parámetros que fueron considerados tanto en el método visual como en los modelos mecánicos de clasificación ya desarrollados. Las muestras 3 y 4, con la mayor presencia de esas características para el conjunto de vigas (ver Tabla 4.1), no exhiben diferencias en los valores de r respecto de las muestras 1 y 2. No obstante, y teniendo en cuenta que ya se demostró la influencia negativa de la médula sobre las propiedades mecánicas de esta especie, se efectuará un análisis particular destinado a verificar la eficiencia del método dinámico para las probetas libres de ella y para las que la poseen.

En apartados anteriores se presentaron y analizaron los valores de las propiedades mecánicas y de densidad en forma discriminada para los cuerpos de prueba libres de médula y para los que la contienen. El estudio se efectuó para las 5 muestras sometidas a ensayos de flexión, para la Muestra 6 destinada a tracción y para la Muestra 7 destinada a compresión, y en todos los casos con resultados ajustados a las condiciones de referencia internacional.

En las tablas 4.18 y 4.19 se presenta un resumen de los resultados correspondientes para las 142 tablas y las 200 vigas seleccionadas para los ensayos dinámicos, respectivamente. En

este caso los valores del *MOE* y de la densidad aparente no fueron ajustados al contenido de humedad de referencia por las razones ya expuestas, pero el valor del *MOR* fue corregido al ancho (tracción) o altura (flexión) de referencia con el fin de obtener resultados comparables.

Tabla 4.18 MOR, MOE estático y dinámico, y densidad de las 142 tablas. Comparación de las libres de médula con las que la contienen

(1) Corregidos a un ancho de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996).

		$f_{t,0}^{(1)}$ N/mm ²	ρ kg/m ³	$E_{t,0}$ N/mm ²	E_l N/mm ²	$E_f(P)$ N/mm ²
Sin médula (n = 98)	Med	34,3	584	13531	12126	12944
	S	13,4	56	2397	2178	2183
	COV	0,39	0,10	0,18	0,18	0,17
Con médula (n = 44)	Med	24,3	568	11112	10073	10455
	S	6,9	54	1714	1732	1478
	COV	0,28	0,09	0,15	0,17	0,14

Tabla 4.19 MOR, MOE estático y dinámico, y densidad de las 200 vigas. Comparación de las libres de médula con las que la contienen

(1) Corregidos a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); (2) solamente para muestras 2, 3 y 4.

		$f_m^{(1)}(Ca)$ N/mm ²	ρ kg/m ³	$E_{m,g}(Ca)$ N/mm ²	E_l N/mm ²	$E_f(P)$ N/mm ²	$E_f(Ca)$ N/mm ²
Sin médula n = 110 (74 ⁽²⁾)	Med	42,9	570	12424 (12967 ⁽²⁾)	12927	13682 ⁽²⁾	13030
	S	13,0	81	2232 (2231 ⁽²⁾)	2966	2534 ⁽²⁾	2512
	COV	0,30	0,14	0,18 (0,17 ⁽²⁾)	0,23	0,19 ⁽²⁾	0,19
Con médula n = 90 (76 ⁽²⁾)	Med	35,4	529	11113 (11360 ⁽²⁾)	11364	11182 ⁽²⁾	11324
	S	10,3	54	1593 (1480 ⁽²⁾)	2230	1652 ⁽²⁾	1725
	COV	0,29	0,10	0,14 (0,13 ⁽²⁾)	0,20	0,15 ⁽²⁾	0,15

Los resultados confirman para estos cuerpos de prueba la importante disminución de las propiedades mecánicas que provoca la presencia de médula. Para las tablas, los valores medios

de la resistencia y del módulo de elasticidad estático en tracción paralela a las fibras, son 41% y 22% mayores en las probetas libres de médula que en las que la contienen, respectivamente. En el caso de las vigas ensayadas a flexión, las diferencias correspondientes son 21% y 12%, respectivamente. Estos valores son congruentes con los obtenidos en el apartado 4.1.1, que indicaban una mayor influencia de la presencia de médula sobre las propiedades mecánicas de tracción que sobre las de flexión, y también con las conclusiones de otras investigaciones previamente citadas. Por su parte, también se confirma la relativamente baja influencia sobre los valores de la densidad aparente, siendo en este caso 3% y 8% las diferencias en los valores medios para las tablas y para las vigas, respectivamente.

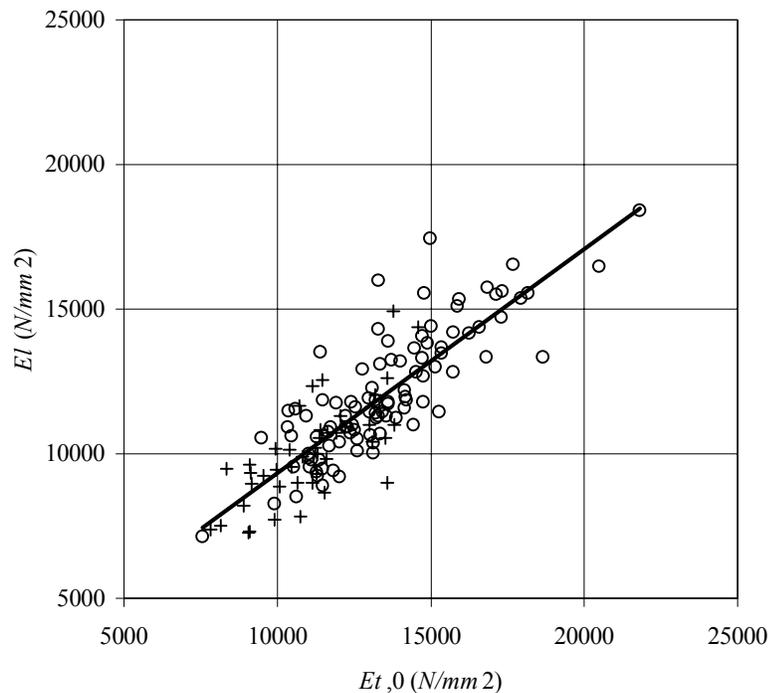


Figura 4.16 Relación entre el MOE estático en tracción paralela a las fibras y el MOE dinámico calculado a través de vibraciones longitudinales

(o) Cuerpos de prueba libres de médula; (+) cuerpos de prueba con médula; $r = 0,85$; ecuación de la recta de regresión: $E_t = 0,7724E_{t,0} + 1617$.

Los datos de las tablas 4.18 y 4.19 permiten analizar también los valores del MOE dinámico y compararlos con los del MOE estático, en las probetas con y sin médula. Para las tablas libres de médula, los valores medios del MOE dinámico longitudinal y flexional son 90% y 96%

del correspondiente al estático, respectivamente, mientras que para las que contienen médula esos resultados son 91% y 94%, respectivamente, con similares coeficientes de variación. En las vigas libres de médula los valores del *MOE* dinámico longitudinal y flexional son 4%, 6% (de plano) y 5% (de canto) mayores que el estático, respectivamente. En las vigas con médula, el valor medio del *MOE* dinámico longitudinal es 2% mayor que el estático, y esa diferencia para el *MOE* flexional obtenido de canto es 2%. En cambio, el *MOE* flexional calculado de plano es el 98% del valor medio para el *MOE* estático, calculado con las muestras 2, 3 y 4. Estas relaciones, comparadas con las obtenidas de las tablas 4.16 y 4.17, demuestran que el método dinámico basado en la frecuencia fundamental de vibración es apto para calcular las propiedades elásticas de esta especie, tanto en probetas de elevada calidad como en aquellas con características que disminuyen de manera importante sus propiedades mecánicas, como la médula, entre otras.

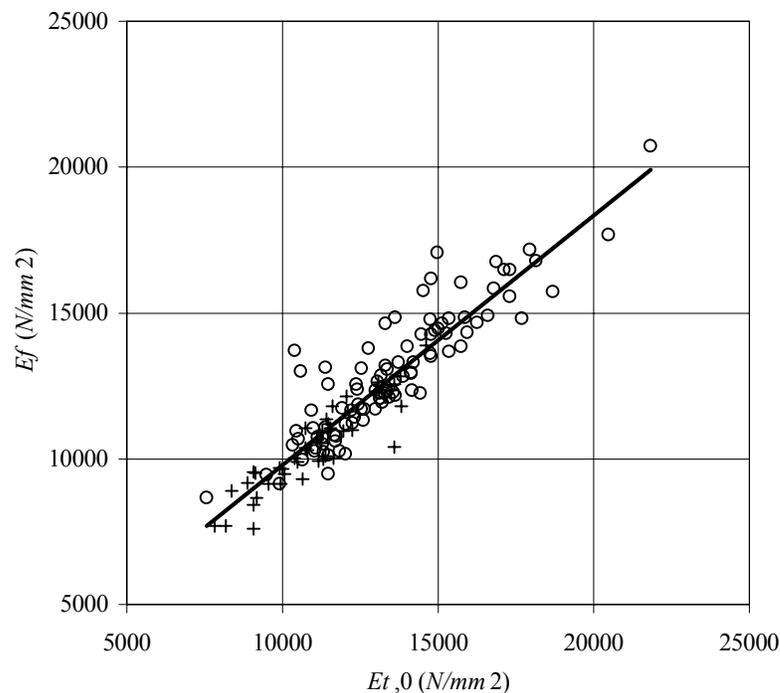


Figura 4.17 Relación entre el *MOE* estático en tracción paralela a las fibras y el *MOE* dinámico calculado a través de vibraciones flexionales (P)

(o) Cuerpos de prueba libres de médula; (+) cuerpos de prueba con médula; $r = 0,92$; ecuación de la recta de regresión: $E_f = 0,8558E_{t,0} + 1236$.

En las figuras 4.16 y 4.17 se pueden apreciar las relaciones entre el *MOE* estático en

tracción paralela a las fibras y el *MOE* dinámico longitudinal y flexional (de plano), respectivamente, para las 142 tablas. Los correspondientes coeficientes de correlación para todas las probetas son 0,85 y 0,92. Las tablas libres de médula alcanzan valores de 0,83 y 0,90, mientras que los valores para las que la contienen son 0,73 y 0,91. Por su parte, las figuras 4.18 y 4.19 exhiben las relaciones existentes entre el *MOE* estático en flexión y el *MOE* dinámico longitudinal y flexional (de canto), respectivamente, para las vigas de las muestras 1, 2, 3 y 4. Los coeficientes de correlación correspondientes son 0,86 y 0,93 para el conjunto de vigas. Las libres de médula presentan valores de 0,83 y 0,93, mientras que las que la contienen alcanzan niveles de 0,88 y 0,93 para las dos correlaciones analizadas.

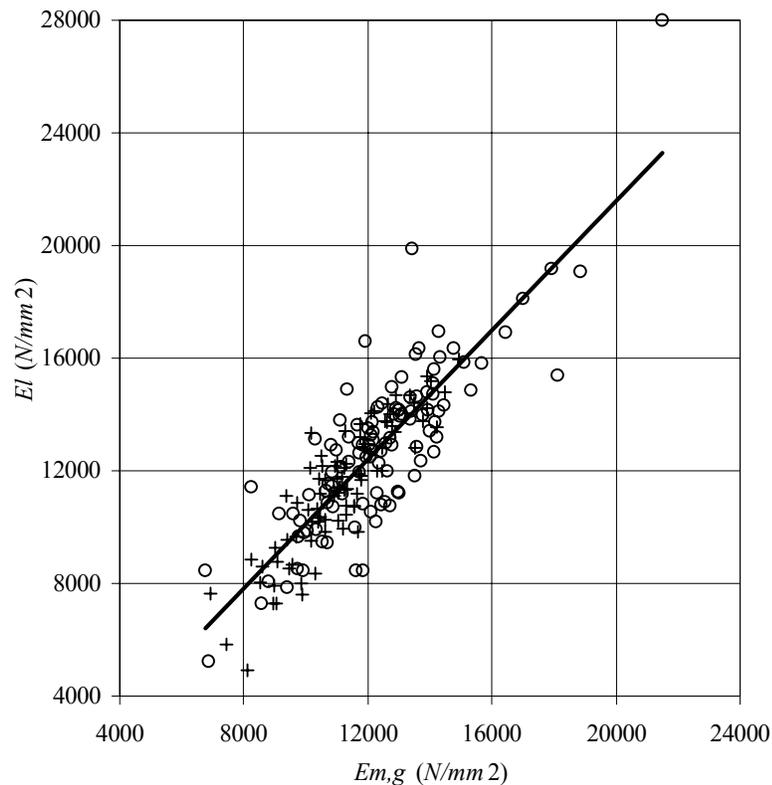


Figura 4.18 Relación entre el *MOE* estático en flexión y el *MOE* dinámico calculado a través de vibraciones longitudinales

(o) Cuerpos de prueba libres de médula; (+) cuerpos de prueba con médula; $r = 0,86$; ecuación de la recta de regresión: $E_l = 1,1476E_{m,g} - 1358$.

En las figuras 4.16, 4.17, 4.18 y 4.19 se aprecia con claridad que los cuerpos libres de medula exhiben mayores valores para el módulo de elasticidad, tanto calculado estáticamente como dinámicamente. La observación de las mismas también evidencia que esa diferencia en los resultados del *MOE* no afecta la correlación entre los valores calculados por ambos métodos. La única excepción es el nivel de 0,73 encontrado para el coeficiente de correlación entre el *MOE* dinámico longitudinal y el *MOE* estático en tracción paralela a las fibras para las tablas que contienen médula. No obstante, esta menor correlación aparece solamente en ese caso, ya que para los mismos cuerpos de prueba se alcanza un nivel de 0,91 entre el *MOE* dinámico flexional (de plano) y el *MOE* estático en tracción paralela a las fibras.

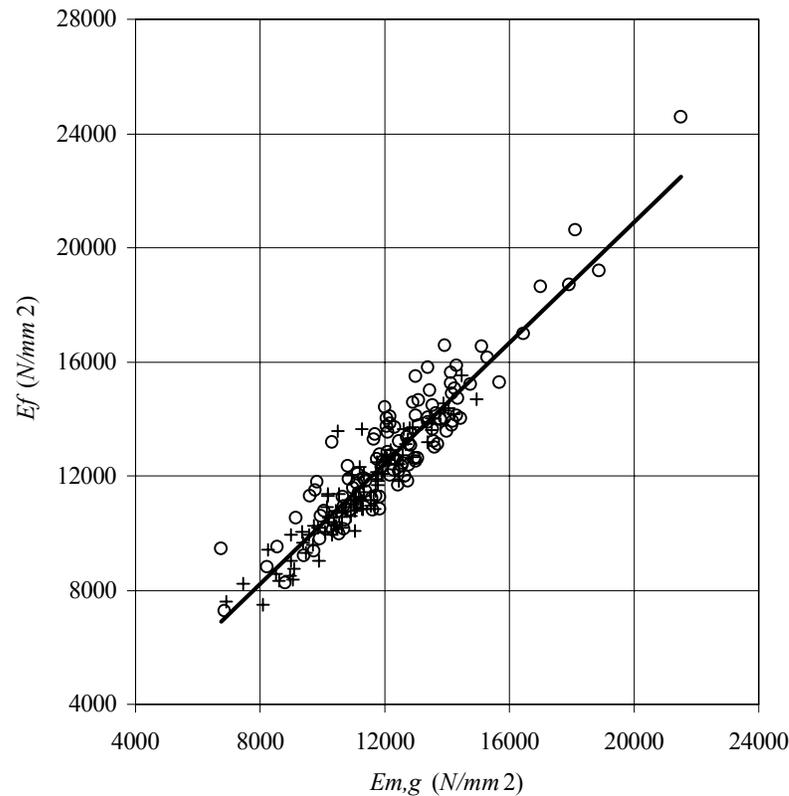


Figura 4.19 Relación entre el *MOE* estático en flexión y el *MOE* dinámico calculado a través de vibraciones flexionales (*Ca*)

(o) Cuerpos de prueba libres de médula; (+) cuerpos de prueba con médula; $r = 0,93$; ecuación de la recta de regresión: $E_f = 1,0595E_{m,g} - 277$.

En este apartado se analizó la eficiencia del método dinámico basado en la frecuencia fundamental de vibración para determinar el valor del módulo de elasticidad en cuerpos de prueba de *E. grandis* de Argentina con tamaño estructural. El análisis incluyó determinaciones del módulo de elasticidad a partir de vibraciones longitudinales y flexionales. Estos valores fueron comparados con los obtenidos estáticamente en ensayos de tracción paralela a las fibras con tablas y de flexión con vigas de diversas dimensiones usuales. La técnica dinámica demostró alta eficiencia para determinar las propiedades elásticas en todas las dimensiones estructurales analizadas. Esa aptitud también fue probada para los cuerpos de prueba de elevada calidad y para los que poseen características que disminuyen sus propiedades mecánicas, tales como la presencia de médula, entre otros. Los resultados obtenidos son consistentes con otros publicados para ensayos realizados con probetas pequeñas, libres de defectos y en tamaño estructural de diversas especies, y, por lo tanto, alientan la utilización de este método con piezas de distinto tamaño y variada calidad de la especie investigada.

4.3 Correlación entre la nudosidad y la resistencia en tracción paralela a las fibras

Como ya fue expresado en la Introducción y también al comienzo del presente capítulo, los objetivos fundamentales de esta tesis son los tratados en los apartados 4.1 y 4.2, y para ese propósito se diseñó la investigación empírica. Los resultados que se presentan y discuten a partir de este apartado aportan conocimientos y responden interrogantes sobre aspectos complementarios a aquellos objetivos, los cuales son necesarios para el conocimiento de la especie como material estructural. El diseño de esta investigación permite alcanzar muchos de esos conocimientos. No obstante, dada la extensión del trabajo, el surgimiento de nuevas preguntas sobre aspectos específicos no relacionados a sus objetivos centrales, amerita el diseño de otros proyectos especialmente orientados a darles respuesta.

En el desarrollo del método visual y de los modelos mecánicos de clasificación por resistencia, que fueron presentados y discutidos en los apartados 4.1 y 4.2, respectivamente, fue estudiada la eficiencia de distintos criterios de evaluación de la nudosidad para predecir la resistencia a flexión. Esta última, junto al módulo de elasticidad en flexión y la densidad aparente, constituyen las propiedades básicas del sistema internacional contemplado en las normas europeas. La resistencia a tracción paralela a las fibras es muy sensible a los efectos negativos que produce la nudosidad, tanto por la disminución de la sección como por la desviación de fibras que ocasiona. Teniendo en cuenta que esta propiedad ha adquirido una importancia destacada para las tablas que

se destinan a la fabricación de vigas laminadas encoladas, en este apartado se realizará un estudio de la influencia que sobre ella tiene la nudosidad, comparándola con la que ejerce sobre la resistencia a flexión. Para ello se ha decidido utilizar los cuerpos de prueba de las muestras 5 y 6, ya que en ambos casos son tablas que presentan iguales dimensiones para la sección transversal, y, en consecuencia, queda controlada la influencia de la forma y el tamaño de la sección sobre los resultados obtenidos.

La Tabla 4.20 muestra la relación existente, expresada en forma de coeficientes de correlación, entre ocho criterios para medir la nudosidad y las resistencias en flexión y en tracción de las tablas pertenecientes a las muestras 5 y 6, respectivamente. En el momento de los ensayos estáticos el contenido medio de humedad de ambas muestras fue de 15%. Los cuatro primeros criterios fueron empleados en el diseño del método visual y son aptos tanto para tablas como para vigas. Los cuatro restantes fueron analizados en el proceso de desarrollo de los modelos mecánicos y son aptos solamente para tablas. Una importante afección de las propiedades mecánicas es originada para esta especie por la presencia de médula, y la existencia de fisuras importantes y grandes defectos disminuye la correlación entre la nudosidad y la resistencia, según se demostró en los apartados 4.1 y 4.2.

En consecuencia, y considerando que tales características afectan la inclusión de los cuerpos de prueba en clases resistentes elevadas, el análisis se ha efectuado para el total de probetas y para las libres de esas características en forma total o parcial, como puede apreciarse en la Tabla 4.20. Glos (1995b) reporta coeficientes de correlación entre la nudosidad, sin especificar el criterio de medición, y la resistencia en flexión y tracción paralela a las fibras, de -0,50 y -0,60, respectivamente. Esta mayor relación de la nudosidad con la resistencia a tracción que a flexión no se evidencia en los datos obtenidos en esta investigación. A su vez, los resultados confirman para esta especie una relativamente pobre correlación de esa característica con ambas resistencias.

Para todos los cuerpos de prueba, hay 3 criterios que exhiben valores mayores en tracción que en flexión, 4 que muestran la relación inversa y uno que alcanza el mismo nivel. Para las tablas sin médula, aumenta la importancia relativa de la correlación con la resistencia a tracción, respecto del caso anterior, ya que existen 4 casos con correlación mayor que en flexión y uno igual. Para las probetas sin fisuras importantes y grandes defectos, así como para las que están libres de todas las características consideradas, se manifiesta un solo caso con mayor nivel de la correlación en tracción que en flexión. El aumento de la correlación encontrado en el apartado 4.2 para los cuerpos de prueba libres de fisuras y grandes defectos, se manifiesta en este caso en la Muestra 5, sometida a flexión. La Muestra 6 no manifiesta ese incremento, lo cual es congruente con la poca influencia que se le asigna a las fisuras sobre las propiedades de tracción en la norma ASTM D 245-98 (1999).

Un análisis de la eficiencia de los distintos criterios para predecir ambas resistencias, demuestra que con la única excepción de *KAR3*, que muestra el máximo coeficiente para las tablas sin médula de la Muestra 5, en todos los otros casos la mayor correlación es exhibida por criterios aptos exclusivamente para tablas. *Kta1*, que es coincidente con la prescripción para nudos individuales en la norma DIN 4074, Teil 1, adquiere el valor mayor para las probetas de la Muestra 6 en todas las calidades analizadas, con la excepción de la totalidad de la muestra. *Kta2*, que coincide con el adoptado por la misma norma para nudos agrupados, muestra el valor mayor para todas las tablas en las dos muestras y para las libres de fisuras y grandes defectos en la Muestra 6. *Kta4*, que es igual al criterio utilizado por la norma ASTM D 3737-99 (2000), exhibe los mayores valores para la Muestra 5 en los cuerpos de prueba sin fisuras y grandes defectos, así como sin médula, fisuras y grandes defectos. *K*, que fue adoptado por su eficiencia y sencillez en el método visual, adquiere valores altos en su correlación con el *MOR* en flexión, pero notoriamente más bajos con el *MOR* en tracción.

Tabla 4.20 Coeficientes de correlación entre los distintos criterios y las resistencias en flexión y tracción paralela a las fibras

(1) Fisuras que exceden la longitud máxima establecida en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18; los valores de la resistencia fueron ajustados a una altura/ancho de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996).

Criterio	Todas		Sin médula		Sin <i>fis</i> ⁽¹⁾ y <i>gd</i>		Sin <i>méd</i> , <i>fis</i> ⁽¹⁾ y <i>gd</i>	
	<i>M5</i> (<i>n</i> = 149)	<i>M6</i> (<i>n</i> = 150)	<i>M5</i> (<i>n</i> = 107)	<i>M6</i> (<i>n</i> = 102)	<i>M5</i> (<i>n</i> = 136)	<i>M6</i> (<i>n</i> = 135)	<i>M5</i> (<i>n</i> = 100)	<i>M6</i> (<i>n</i> = 96)
<i>K</i>	-0,50	-0,39	-0,47	-0,33	-0,54	-0,32	-0,49	-0,29
<i>KAR1</i>	-0,43	-0,44	-0,44	-0,46	-0,44	-0,44	-0,46	-0,43
<i>KAR2</i>	-0,47	-0,45	-0,46	-0,46	-0,49	-0,46	-0,48	-0,43
<i>KAR3</i>	-0,49	-0,47	-0,48	-0,47	-0,50	-0,46	-0,48	-0,44
<i>Kta1</i>	-0,39	-0,49	-0,42	-0,52	-0,43	-0,48	-0,45	-0,50
<i>Kta2</i>	-0,51	-0,51	-0,46	-0,50	-0,52	-0,48	-0,49	-0,48
<i>Kta3</i>	-0,42	-0,46	-0,47	-0,48	-0,46	-0,45	-0,49	-0,45
<i>Kta4</i>	-0,50	-0,46	-0,47	-0,47	-0,55	-0,42	-0,50	-0,43

Una estimación global de la eficiencia de los ocho criterios a través del promedio para todas las calidades de madera analizadas bajo los dos tipos de esfuerzos, indica el mejor nivel para *Kta2* (-0,49), seguido de *Kta4* (-0,48), siendo los menores *KAR1* (-0,44) y *K* (-0,42), en este último

caso por su baja relación con el *MOR* en tracción paralela a las fibras. Además de la relativamente baja correlación general, es de destacar que la diferencia entre los valores extremos no puede considerarse importante para propósitos prácticos.

Resultados de otras investigaciones indican, tanto para especies frondosas como de coníferas, una relación más estrecha entre la nudosidad y el *MOR* que la encontrada en este trabajo. Glos & Lederer (2000) publicaron coeficientes de -0,55 y -0,61 entre la nudosidad, expresada en la misma forma que *KAR1*, y el *MOR* en flexión y tracción, respectivamente, para estudios realizados con madera de Haya en tamaño estructural. Los coeficientes fueron -0,57 y -0,62 para la nudosidad determinada como *KAR2*; -0,56 y -0,62 como *KAR3*; -0,59 y -0,62 como *Kta1* y finalmente -0,60 y -0,64 como *Kta2*. Estos valores, que demuestran una relación más estrecha entre la nudosidad y las resistencias a flexión y tracción que la encontrada para esta especie, confirman además una correlación superior de la nudosidad con la resistencia a tracción que a flexión.

Por otra parte, en coincidencia con los datos mostrados en la Tabla 4.20, los criterios aptos exclusivamente para tablas son, de todos los presentados, los que mejor predicen la resistencia. En la misma línea Johansson et al. (1992), para madera de *Picea abies*, informan coeficientes de correlación de -0,51 y -0,59 entre la nudosidad calculada como *KAR2* y el *MOR* en flexión y tracción, respectivamente.

En este apartado se analizó la relación existente entre la nudosidad y la resistencia en tracción paralela a las fibras, comparándola con la obtenida para la resistencia en flexión. Los resultados obtenidos sobre las tablas de las muestras 5 y 6 confirman en general una relación no tan estrecha entre las variables, si se los compara con datos de otras investigaciones realizadas tanto con especies frondosas como de coníferas. A su vez, la correlación entre la nudosidad y la resistencia a tracción paralela a las fibras no exhibe valores superiores a la encontrada para la resistencia a flexión. De los criterios analizados, presentan una eficiencia mayor para predecir el *MOR* los que son aptos exclusivamente para tablas que aquellos diseñados tanto para vigas como para tablas, si bien las diferencias encontradas no pueden considerarse importantes para propósitos prácticos.

4.4 Comparación del *MOE* global con el *MOE* local en flexión

La norma europea EN 338 (1996) considera el valor característico medio del módulo de elasticidad en flexión dentro de los valores exigidos para la inserción de una combinación clase/especie/procedencia en su sistema de clases resistentes. La obtención del *MOE* en el ensayo estático de flexión, conforme a EN 408 (1996) se realiza dentro del tercio central, sin influencia del

esfuerzo de corte (ver *Ec* 3.6), y se denomina *MOE* local, que es el contemplado para todos los cálculos y para la inserción en el sistema de clases resistentes antes mencionado. El proyecto prEN 408 (2000), revisión de la norma anterior, contempla también la obtención del *MOE* en flexión utilizando las deformaciones que experimenta todo el cuerpo de prueba, y por lo tanto asume la influencia del esfuerzo de corte (ver *Ec* 3.5), denominándolo *MOE* global.

En el diseño del método visual y de los modelos mecánicos de clasificación por resistencia se utilizó el valor del *MOE* global, el cual fue calculado para todos los cuerpos de prueba sometidos al ensayo de flexión estática. Con el fin de estudiar la relación que existe, para la especie investigada, entre los valores de ambos módulos de elasticidad, en las 50 vigas de la Muestra 4 fue obtenido adicionalmente el valor del *MOE* local. En atención a la influencia que la médula, las fisuras importantes, los grandes defectos y la nudosidad ejercen sobre las propiedades mecánicas de los cuerpos de prueba, estos parámetros han sido considerados en la discriminación de los resultados que se presentan y discuten.

Tabla 4.21 *MOE* global y *MOE* local para distintos grados de calidad

(1) Fisuras que exceden la longitud máxima establecida en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18; los valores fueron ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996).

	Todas		Sin médula		Sin <i>fis</i> ⁽¹⁾ y <i>gd</i>		Sin <i>méd</i> , <i>fis</i> ⁽¹⁾ y <i>gd</i>	
	$E_{m,g}$ N/mm^2 ($n = 50$)	$E_{m,l}$ N/mm^2 ($n = 50$)	$E_{m,g}$ N/mm^2 ($n = 24$)	$E_{m,l}$ N/mm^2 ($n = 24$)	$E_{m,g}$ N/mm^2 ($n = 22$)	$E_{m,l}$ N/mm^2 ($n = 22$)	$E_{m,g}$ N/mm^2 ($n = 15$)	$E_{m,l}$ N/mm^2 ($n = 15$)
<i>Mín</i>	9039	9621	10994	10650	11311	10690	12013	10690
<i>Med</i>	12655	13522	13388	14277	13622	14459	13965	14850
<i>Máx</i>	16990	19048	16990	19048	16990	19048	16990	19048
<i>S</i>	1547	1940	1504	2101	1501	2167	1425	2224
<i>COV</i>	0,12	0,14	0,11	0,15	0,11	0,15	0,10	0,15

La Tabla 4.21 muestra un resumen de los resultados obtenidos para ambos *MOE* con todas las vigas consideradas, con las libres de médula, con las que no presentan fisuras importantes y grandes defectos, y finalmente con las libres de todas esas características. El contenido de humedad promedio para las 50 vigas fue de 15%. En todos los casos los valores medios del *MOE* local son superiores a los correspondientes al *MOE* global, lo cual es coherente y puede explicarse

por la influencia que el esfuerzo de corte ejerce sobre las deformaciones medidas para calcular el *MOE* global. El valor medio del *MOE* local es entre 6% y 7% mayor que el valor medio del *MOE* global, para las cuatro calidades de probetas, respectivamente.

Es de destacar que si bien los valores medios crecen a medida que la calidad de la madera aumenta, la diferencia porcentual se mantiene en los niveles indicados, lo cual permite asumir una relación entre ambos módulos independientemente de la presencia de médula, fisuras importantes y grandes defectos. Los coeficientes de variación para el *MOE* global oscilan entre 0,10 y 0,12 y para el *MOE* local entre 0,14 y 0,15. Hermoso Prieto (2001) reporta valores medios para el *MOE* global hasta 7% menores a los del *MOE* local para *Pinus sylvestris* L. de España, midiendo las deformaciones sobre el eje neutro, y diferencias superiores cuando éstas se toman sobre el borde traccionado de la viga.

Una observación de los resultados para cada una de las 50 vigas puede hacerse en la Figura 4.20. La misma permite apreciar que la obtención de valores medios mayores para el *MOE* local que para el global, es producto de resultados individuales que mayoritariamente muestran esa tendencia, ya que en 44 de las 50 vigas analizadas se encuentra un mayor valor para el *MOE* local que para el global. Un análisis detallado de las causas que pueden haber originado esos particulares resultados en 6 vigas escapa a los objetivos de este trabajo. Es necesario reiterar, no obstante, que en la muestra coexisten cuerpos de prueba de muy distinta calidad, cuya heterogeneidad en ocasiones se manifiesta fuertemente tanto en el tercio central como en los laterales.

Con el fin de eliminar la interferencia de otras variables, la influencia de la nudosidad fue estudiada para las 15 vigas libres de médula, fisuras importantes y grandes defectos. En atención a que en el criterio visual de clasificación por resistencia se adoptó *K* y a que en los dos modelos mecánicos se utilizó *KAR3*, se analizaron ambos criterios.

La Figura 4.21 exhibe la relación entre ambos módulos de elasticidad en función de los criterios de nudosidad mencionados. En la misma puede apreciarse que esa relación, que alcanza el valor de 1,063 para los promedios, como se indicó anteriormente y puede obtenerse de la Tabla 4.21, no está vinculada funcionalmente a la variación de *K* y tampoco a la de *KAR3*. Esta confirmación amplía a la totalidad de las calidades de madera, consideradas en el método visual y los modelos mecánicos de clasificación, la validez de la relación encontrada para los dos módulos de elasticidad.

Puede afirmarse, en consecuencia, que para la muestra analizada los valores medios del *MOE* local son mayores al los del *MOE* global en niveles comprendidos entre un 6% y un 7%, y que esa relación se mantiene para distintas calidades del material. Como la influencia relativa del esfuerzo de corte sobre las deformaciones de un elemento estructural sometido a esfuerzos de flexión simple varía en función del tipo de carga y de la relación entre la longitud y la altura de la

probeta (Thelandersson, 1995b), una generalización de estas conclusiones parciales debe tener en cuenta esas circunstancias.

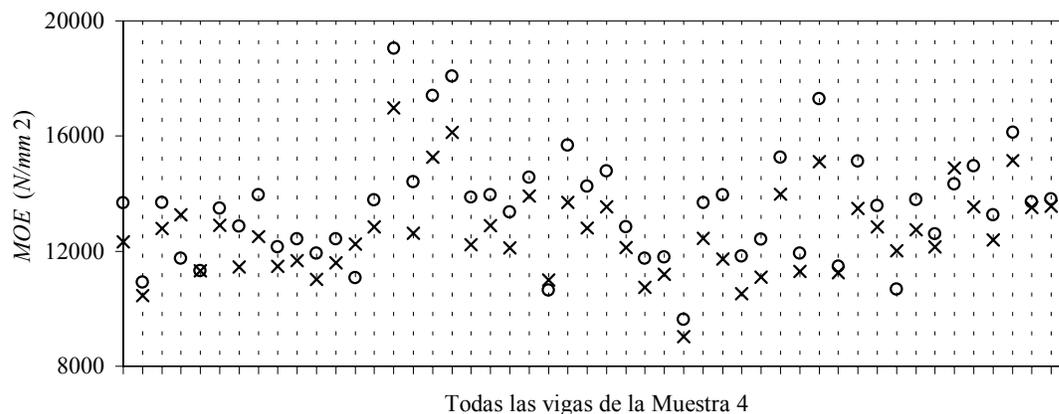


Figura 4.20 *MOE global y el MOE local*

(o) *MOE local*; (x) *MOE global*; *MOE* ajustado a un contenido de humedad del 12% según EN 384 (1996).

La norma ASTM D 198-98 (1999) en su Apéndice X2 propone una ecuación para calcular el módulo de elasticidad libre de la influencia del esfuerzo de corte a partir de la deformación obtenida sobre toda la longitud del cuerpo de prueba. De esa forma es posible corregir teóricamente esa influencia sobre el *MOE* global a partir de los datos del ensayo estático de flexión descrito en el Capítulo 3, con la excepción del módulo de cizalladura. Como éste no fue obtenido en el programa empírico, siguiendo el criterio de la norma EN 384 (1996) que prescribe $G_{mean} = E_{0,mean}/16$ se lo estimó para cada viga como $G = E_{m,l}/16$, relación que está en línea con otras publicaciones sobre el tema (Thelandersson, 1995b).

Los resultados obtenidos aplicando ese criterio a las 50 vigas de la Muestra 4, indican un valor mínimo de $9414N/mm^2$, uno medio de $13199N/mm^2$, uno máximo de $17699N/mm^2$, una desviación estándar de $1614N/mm^2$ y un coeficiente de variación de 0,12. El valor medio del *MOE* local ($13522N/mm^2$) es entonces un 2% mayor que el obtenido a través del ajuste teórico del *MOE* global ($13199N/mm^2$), y, ante la imposibilidad de contar con datos provenientes de ensayos, puede considerarse que esta diferencia no explicada por el ajuste teórico no es relevante para fines prácticos. Es necesario destacar que la adopción del *MOE* global conduce a posiciones ubicadas del lado de la seguridad (aproximadamente un 6%), como ha sucedido para la inserción, en el sistema internacional de clases resistentes, de los distintos grados de calidad analizados en los apartados 4.1 y 4.2. Aún en el caso que a su valor se lo ajuste teóricamente con el criterio expuesto, para la

muestra estudiada los resultados quedan del lado de la seguridad (aproximadamente un 2%).

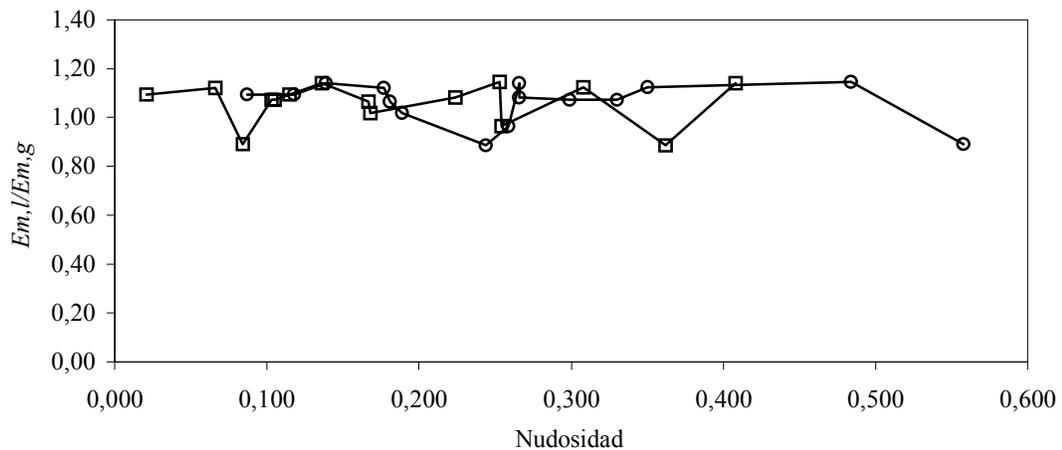


Figura 4.21 Relación entre el MOE local y el MOE global en función de la nudosidad

Vigas libres de médula, fisuras⁽¹⁾ y grandes defectos; (1) fisuras que exceden la longitud máxima establecida en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18; (○) nudosidad conforme al criterio K; (□) nudosidad conforme al criterio KAR3; MOE ajustado a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996).

En el presente apartado se estudió, para la Muestra 4, la relación que vincula el módulo de elasticidad local con el módulo de elasticidad global. Los resultados muestran que el MOE local, libre de la influencia del esfuerzo de corte, alcanza valores medios mayores que el MOE global. Esa diferencia oscila entre el 6% y el 7% y no se manifiestan variaciones en la relación cuando varía la calidad de las probetas, ya sea por la presencia de médula, fisuras importantes, grandes defectos o nudosidad. Se comprobó que el ajuste teórico dispuesto en la norma ASTM D 198-98 (1999) para eliminar la influencia del esfuerzo de corte sobre el MOE global compara bien con los valores obtenidos empíricamente, pues en esta serie de ensayos el MOE local medio es solamente un 2% mayor que el MOE global medio ajustado según ese criterio. Los resultados obtenidos demuestran que la utilización del valor medio del MOE global en sustitución del local, conduce en todos los casos a posiciones situadas del lado de la seguridad.

4.5 Comparación de las propiedades de flexión y compresión en una misma pieza

En el apartado 4.1.1 se presentaron las propiedades de las muestras 6 y 7 sometidas a ensayos de tracción y compresión paralela a las fibras, respectivamente. En particular se compararon sus propiedades mecánicas con las correspondientes a las muestras 1, 2, 3, 4 y 5, sometidas a ensayos de flexión, para los grados de calidad definidos en los perfiles a), b) y c) del método visual. Es posible hacer un análisis más preciso de la relación existente entre las propiedades mecánicas de compresión paralela a las fibras y las de flexión, comparando los resultados de la Muestra 7 con los de la Muestra 2, ya que ambas provienen de las mismas piezas aserradas. Un nivel aún mayor de precisión se logra utilizando solamente las 25 probetas provenientes de Corrientes. Para este caso se ha identificado cada par de ellas, una de cada muestra, procedente de una única pieza. Es posible de esta manera eliminar la influencia de la variación entre árboles, la distancia a la médula, entre otras variables, si bien la heterogeneidad natural del material se mantiene, sobre todo por tratarse de cuerpos de prueba de tamaño estructural. En lo sucesivo se presentarán y discutirán los resultados para los dos niveles mencionados.

La Tabla 4.22 muestra un resumen de los resultados para las propiedades mecánicas de las muestras 2 y 7 completas. El contenido de humedad promedio de la primera fue de 14% y el de la segunda 15%. En atención a la importancia que la médula, las fisuras importantes y los grandes defectos han merecido en el desarrollo del método visual y los modelos mecánicos de clasificación, los valores se presentan para todas las probetas y para las libres de esas características en forma parcial o total.

La Muestra 2 exhibe mejores propiedades de resistencia y rigidez que las encontradas para el conjunto de las muestras ensayadas a flexión (ver Tabla 4.9), lo cual es congruente con los resultados mostrados en la Tabla 4.4. La resistencia media en flexión presentada en la Tabla 4.22 es 14%, 18%, 18% y 22% mayor a la correspondiente en compresión para cada grupo, respectivamente. No obstante, la mayor dispersión que acusan los primeros, disminuye la diferencia para los percentiles, alcanzando niveles de 4%, 4%, 10% y 17%. Como la médula, las fisuras y los grandes defectos tienen poca influencia sobre la resistencia en compresión paralela a las fibras (ver también apartado 4.1.1), las diferencias en el *MOR* se incrementan cuando se eleva la calidad del material.

Contrariamente al caso de la resistencia, el *MOE* en compresión paralela a las fibras exhibe valores medios y medidas de dispersión mucho mayores en compresión que en flexión y en este caso ambos crecen cuando aumenta la calidad de los cuerpos de prueba. Valores de $73,1N/mm^2$ y $34,2N/mm^2$ para el *MOR* en flexión y compresión, respectivamente, fueron reportados por INTA (1995), calculados sobre probetas pequeñas y libres de defectos de *Eucalyptus grandis* de Argentina. En la misma serie de ensayos los resultados fueron $9835N/mm^2$ y $15053N/mm^2$ para el

MOE en flexión y compresión, respectivamente.

Tabla 4.22 Propiedades de flexión y compresión

(1) Ajustados a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); (2) ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996); (3) fisuras que exceden la longitud máxima establecida en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18.

	Todos (n = 50 / 50)	Sin médula (n = 37 / 37)	Sin <i>fis</i> ⁽³⁾ y <i>gd</i> (n = 39 / 39)	Sin <i>méd</i> , <i>fis</i> ⁽³⁾ y <i>gd</i> (n = 32 / 30)	
$f_m^{(1)} / f_{c,0}^{(2)}$ N/mm ²	<i>Mín</i>	19,2 / 25,4	19,2 / 25,4	27,4 / 25,4	32,7 / 25,4
	<i>Med</i>	45,5 / 39,9	47,8 / 40,5	47,6 / 40,3	49,6 / 40,7
	<i>Máx</i>	97,7 / 65,2	97,7 / 65,2	97,7 / 65,2	97,7 / 65,2
	<i>S</i>	14,3 / 7,4	14,9 / 7,8	13,9 / 7,3	14,1 / 7,5
	<i>COV</i>	0,31 / 0,19	0,31 / 0,19	0,29 / 0,18	0,28 / 0,18
	$f_{m,075} / f_{c,0,05}$	31,3 / 30,1	32,5 / 31,2	33,3 / 30,3	35,7 / 30,5
$E_{m,g}^{(2)} / E_{c,0}^{(2)}$ N/mm ²	<i>Mín</i>	7567 / 8155	8515 / 10876	10043 / 8155	10043 / 10876
	<i>Med</i>	13304 / 18364	13775 / 20175	13757 / 18478	13964 / 20093
	<i>Máx</i>	22502 / 61378	22502 / 61378	22502 / 61378	22502 / 61378
	<i>S</i>	2768 / 9381	2839 / 10187	2576 / 9774	2716 / 10528
	<i>COV</i>	0,21 / 0,51	0,21 / 0,50	0,19 / 0,53	0,19 / 0,52

Mayor precisión en los datos se puede obtener cuando se analiza cada par de cuerpos de prueba, uno por cada muestra involucrada, proveniente de una misma pieza aserrada. La Figura 4.22 muestra los valores de la resistencia en flexión y en compresión paralela a las fibras para las 25 probetas de la Muestra 2 y de la Muestra 7, respectivamente, ajustados a los valores de referencia para que sean comparables. En la misma se puede apreciar que en 14 (56%) casos es mayor la resistencia en flexión, mientras que en 11 (44%) se presenta la situación inversa. Tratándose de probetas con la misma procedencia, estos datos, que a su vez presentan una importante dispersión para la flexión, no indican una tendencia definida para la relación entre ambas variables. La influencia de los parámetros que afectan las propiedades mecánicas no fue tenida en cuenta en consideración al reducido número de cuerpos de prueba disponibles.

En la Figura 4.23 puede apreciarse el mismo tipo de análisis aplicado a ambos módulos de elasticidad, pero con resultado diferente al anterior. Es posible distinguir en este caso 20 (80%) valores mayores para el *MOE* en compresión paralela a las fibras que en flexión. Si bien aquel exhibe elevadas medidas de dispersión, puede aceptarse, considerando además los valores

para las dos muestras completas de la Tabla 4.22, y los de la totalidad de las muestras ensayadas a flexión presentados en la Tabla 4.9, que esta especie presenta mayores valores medios para el *MOE* en compresión paralela a las fibras que para flexión.

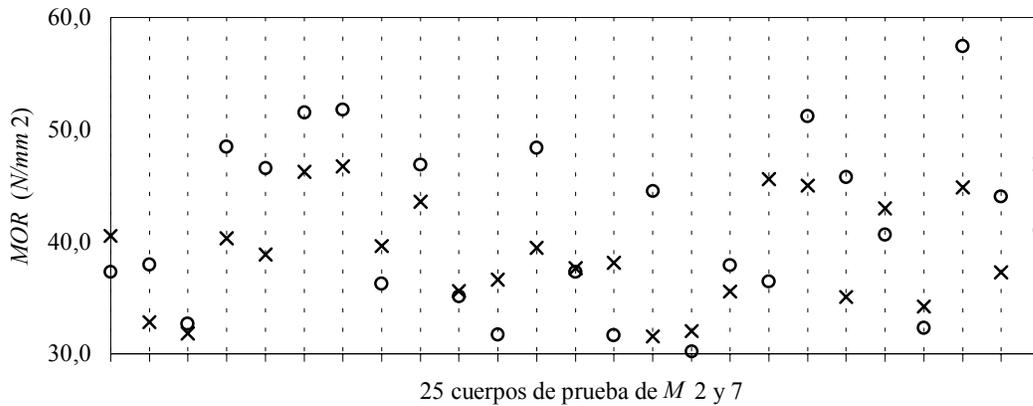


Figura 4.22 *MOR en flexión y en compresión paralela a las fibras*

(o) *MOR* en flexión ajustado a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); (x) *MOR* en compresión paralela a las fibras ajustado a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996).

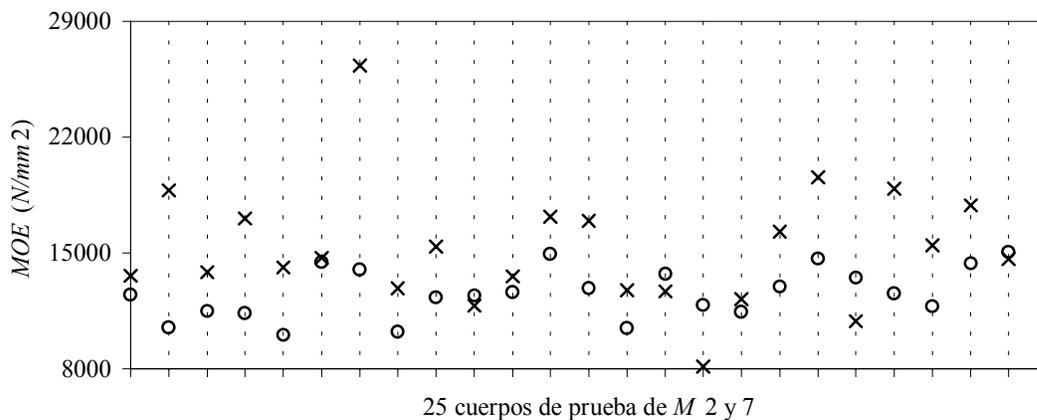


Figura 4.23 *MOE en flexión y en compresión paralela a las fibras*

(o) *MOE* en flexión; (x) *MOE* en compresión paralela a las fibras; *MOE* ajustado a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996).

La mayor variabilidad del *MOR* en flexión que en compresión paralela a las fibras y a su vez del *MOE* en compresión que en flexión, para los 25 pares de probetas, puede apreciarse en los diagramas de dispersión de las figuras 4.24 y 4.25. Por tratarse de una reducida cantidad de valores no se presenta el coeficiente de correlación y la recta de regresión, pero los datos muestran la escasa relación que vincula a las variables. Pérez del Castillo (2001) informa un coeficiente de correlación de 0,931 entre las resistencias de flexión y compresión, obtenidas sobre probetas pequeñas y libres de defectos de *Eucalyptus grandis* de Uruguay.

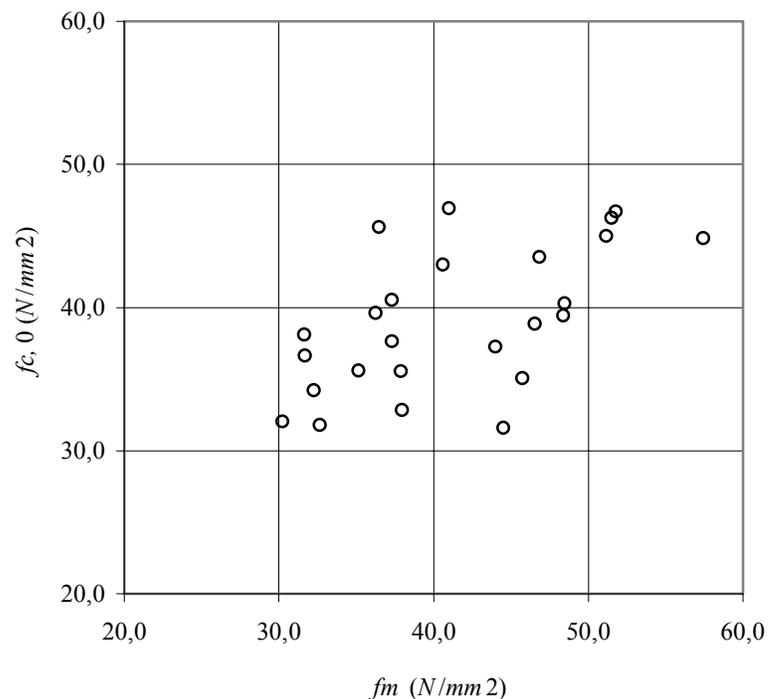


Figura 4.24 Relación entre f_m y $f_{c,0}$ para los 25 pares de cuerpos de prueba

Los valores de f_m fueron ajustados a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); los valores de $f_{c,0}$ fueron ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996).

La comparación de los percentiles en flexión y en compresión presentados en la Tabla 4.22 muestra mayores valores para flexión, con una diferencia que se incrementa al elevarse la calidad del material, por las razones ya expuestas. Por el contrario, la Tabla 4.9 presenta, salvo un caso, valores mayores para el percentil de compresión que para el de flexión obtenido con las muestras 1, 2, 3, 4 y 5. Esta diferencia está originada, como se expresó anteriormente, en los elevados valores de las propiedades mecánicas de la Muestra 2 en comparación con las restantes.

En consecuencia, como las muestras 2 y 7 provienen de las mismas piezas aserradas, los resultados de la Tabla 4.22 expresan más fielmente las relaciones entre ambas resistencias. Si para este último caso se aplica a los percentiles la prescripción establecida en EN 384 (1996) para deducir el *MOR* característico en compresión a partir del de flexión, o sea $f_{c,0,k} = 5(f_{m,k})^{0,45}$, se obtienen para el primero valores de $23,5N/mm^2$, $24,0N/mm^2$, $24,2N/mm^2$ y $25,0N/mm^2$, los cuales son sensiblemente menores a los provenientes de los ensayos. Aplicando el criterio prescrito en NBR 7190 (1997), o sea $f_{c,0,k} = 0,77f_{m,k}$, los resultados calculados son $24,1N/mm^2$, $25,0N/mm^2$, $25,6N/mm^2$ y $27,5N/mm^2$, también mucho menores a los empíricos.

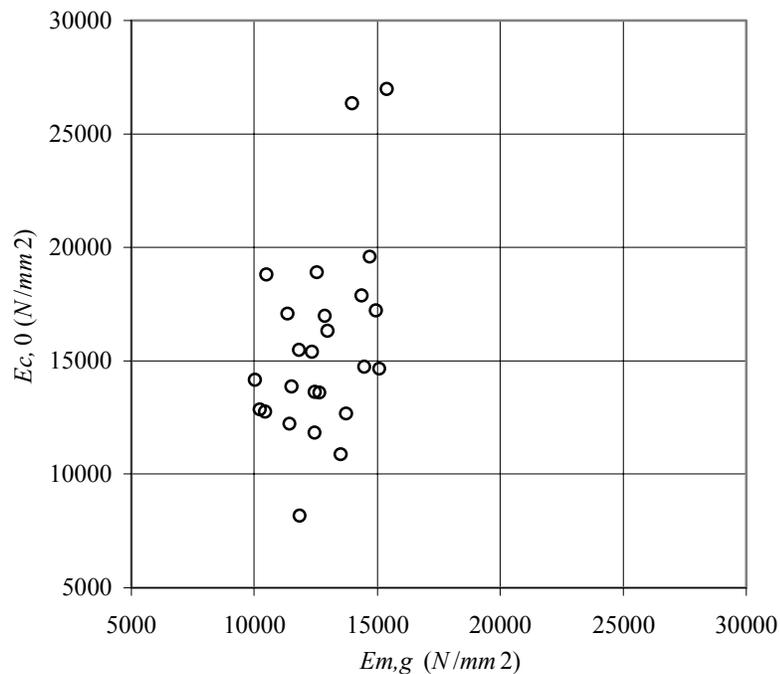


Figura 4.25 Relación entre $E_{m,g}$ y $E_{c,0}$ para los 25 pares de cuerpos de prueba

Los valores fueron ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996).

Estos datos confirman la tendencia encontrada en el apartado 4.1.1, y demuestran que los resultados del *MOR* en compresión, para las muestras analizadas, son sensiblemente mayores que los que se obtienen a partir del *MOR* en flexión aplicando las ecuaciones dadas en las normas mencionadas anteriormente. Hay que destacar que las relaciones estipuladas en la norma brasileña corresponden a pruebas sobre probetas pequeñas y libres de defectos, y el ensayo de flexión se

efectúa con una carga concentrada en el centro.

Si bien la norma EN 384 (1996) no diferencia los valores medios del *MOE* en flexión y el de compresión paralela a las fibras, la NBR 7190 (1997) prescribe $E_m = 0,90E_{c,0}$, expresión que si es aplicada a los resultados de la Tabla 4.22 conduce a valores medios del *MOE* en flexión iguales a $16528N/mm^2$, $18158N/mm^2$, $16630N/mm^2$ y $18084N/mm^2$. Estos son mayores a los obtenidos empíricamente, confirmando la tendencia encontrada en el apartado 4.1.1. Los resultados prueban que para esta especie el *MOE* en compresión paralela a las fibras exhibe valores medios mucho mayores a los correspondientes a flexión. La diferencia entre ambos se mantiene para clases de distinta calidad, ya que las relaciones entre el *MOE* en flexión y el *MOE* en compresión, para los cuatro grados presentados en la Tabla 4.22, son 0,72, 0,68, 0,74 y 0,69, respectivamente.

En el presente apartado se presentaron y discutieron las propiedades de resistencia y rigidez a flexión de la Muestra 2, y se compararon con las de compresión paralela a las fibras para la Muestra 7. Como ambas muestras proceden de las mismas piezas aserradas, y, adicionalmente, para la mitad de los cuerpos de prueba se identificó las probetas de ambas muestras que tienen origen en la misma pieza, la comparación de las propiedades presenta un mayor nivel de precisión que el efectuado en el apartado 4.1.1. Los resultados son congruentes con los encontrados en ese apartado y confirman que el *MOR* en compresión es mayor que el que se obtiene a partir del de flexión por aplicación de las relaciones prescriptas en EN 384 (1996) y NBR 7190 (1997). Respecto del *MOE*, la primera de estas normas no señala diferencias entre los valores medios, mientras que la segunda contempla $E_m = 0,90E_{c,0}$. La relación empírica encontrada para las calidades analizadas de esta especie oscila entre 0,68 y 0,74, confirmando la tendencia que se manifestó en el apartado 4.1.1, e indicando un *MOE* mucho mayor en compresión paralela a las fibras que en flexión.

4.6 Variación de las propiedades mecánicas de flexión entre muestras

En el apartado 4.1 se presentaron y discutieron los resultados para las propiedades mecánicas de cada una de las muestras sometidas a flexión (ver tablas 4.2 y 4.4). Posteriormente se analizaron los rendimientos de cada una para cada grado de calidad considerado (Tabla 4.6), lo cual se reiteró para los modelos mecánicos en el apartado 4.2 (Tabla 4.12). El sistema internacional de clases resistentes establecido en la norma europea EN 338 (1996) contempla que los valores característicos de la resistencia a flexión se consideren ajustados a una altura de referencia (150mm). El objetivo de esa corrección es eliminar la influencia que la altura del elemento ejerce sobre el *MOR*, y, en consecuencia, trabajar con resultados comparables.

A su vez, el valor medio del *MOE* se refiere a un contenido de humedad estándar (12%). En el presente apartado se profundizará la discusión de las propiedades mecánicas de flexión exhibidas por cada muestra, discriminadas para distintos grados de calidad. Se verificará la aptitud, con esta especie, de los ajustes previstos para las condiciones de referencia en la norma EN 384 (1996).

Tabla 4.23 Propiedades de resistencia y rigidez en flexión para las distintas muestras conforme a los perfiles a), b), c), e), y f) analizados para una clasificación visual

(1) Ajustados a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); (2) ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996); (3) fisuras que exceden la longitud máxima establecida en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18.

Perfil	Propiedades N/mm^2	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5
a) Todos	$\bar{f}_m / \bar{f}_m^{(1)}$	42,4 / 33,0	53,6 / 45,5	43,9 / 39,8	40,3 / 39,8	62,1 / 41,8
	$\bar{E}_{m,g}^{(2)}$	11418	13304	12511	12655	12863
b) Sin médula	$\bar{f}_m / \bar{f}_m^{(1)}$	45,8 / 35,6	56,4 / 47,8	50,3 / 45,5	44,3 / 43,8	66,8 / 44,9
	$\bar{E}_{m,g}^{(2)}$	11924	13775	13884	13388	13586
Con médula	$\bar{f}_m / \bar{f}_m^{(1)}$	33,7 / 26,2	45,5 / 38,9	40,0 / 36,4	36,6 / 36,2	50,0 / 33,7
	$\bar{E}_{m,g}^{(2)}$	10116	11964	11668	11977	11019
c) Sin méd., fis ⁽³⁾ y gd	$\bar{f}_m / \bar{f}_m^{(1)}$	47,4 / 36,9	58,5 / 49,6	50,7 / 45,8	46,0 / 45,4	67,4 / 45,3
	$\bar{E}_{m,g}^{(2)}$	12101	13964	13832	13965	13675
Restantes	$\bar{f}_m / \bar{f}_m^{(1)}$	36,0 / 28,0	44,8 / 38,3	41,0 / 37,3	37,8 / 37,4	51,3 / 34,6
	$\bar{E}_{m,g}^{(2)}$	10548	12131	11944	12093	11204
e) Sin méd., fis ⁽³⁾ y gd. K[1/3	$\bar{f}_m / \bar{f}_m^{(1)}$	52,0 / 40,4	60,7 / 51,5	50,4 / 45,6	47,0 / 46,4	70,9 / 47,5
	$\bar{E}_{m,g}^{(2)}$	12673	13880	13665	13969	14066
Sin méd., fis ⁽³⁾ y gd. K∃1/3	$\bar{f}_m / \bar{f}_m^{(1)}$	45,6 / 35,5	55,1 / 46,8	51,1 / 46,2	42,2 / 41,8	58,8 / 39,8
	$\bar{E}_{m,g}^{(2)}$	11873	14087	14083	13947	12719
f) Sin méd., fis ⁽³⁾ y gd. K[1/4	$\bar{f}_m / \bar{f}_m^{(1)}$	56,8 / 44,3	64,9 / 54,9	53,4 / 48,3	50,7 / 50,0	73,3 / 49,2
	$\bar{E}_{m,g}^{(2)}$	13576	14868	14836	14534	14425
Sin méd., fis ⁽³⁾ y gd. K∃1/4	$\bar{f}_m / \bar{f}_m^{(1)}$	45,8 / 35,7	54,1 / 46,0	49,3 / 44,6	41,9 / 41,5	61,7 / 41,5
	$\bar{E}_{m,g}^{(2)}$	11856	13346	13330	13466	12955

La Tabla 4.23 muestra los valores medios de la resistencia y del módulo de elasticidad en flexión para las muestras 1, 2, 3, 4 y 5, las que presentaron un contenido promedio de humedad de 14%, 14%, 15%, 15% y 15%, respectivamente. Con la finalidad de efectuar el análisis para distintos grados de calidad del material, los datos se han discriminado para 5 de los perfiles analizados en el método visual. En atención al reducido número de vigas que conforman algunos grados, información detallada en la Tabla 4.6, se ha decidido presentar los valores medios del *MOR* en reemplazo de los percentiles 7,5%, los cuales se exhiben sin ajustar y también ajustados a la altura de referencia. Conforme a EN 384 (1996), estos últimos surgen de dividir los primeros por el factor $k_h = (150/h)^{0,2}$, y, en consecuencia, la diferencia entre ellos es mayor para las muestras compuestas por los cuerpos de prueba que más difieren en altura de la tomada como referencia.

La Muestra 4 exhibe un pequeño ajuste, ya que las medidas nominales de la sección transversal de sus probetas (Tabla 3.1) son 50mm x 150mm y solamente experimentan una pequeña pérdida ocasionada por el cepillado. En el extremo opuesto, la Muestra 5, compuesta por tablas ensayadas de plano con altura nominal igual a 25mm, acusa una importante diferencia entre ambos valores resistentes. Como el *MOE* no se corrige a una altura sino a un contenido de humedad de referencia, el cual es muy similar para todas las muestras, se presentan para él solamente los valores ajustados.

De forma similar son presentados en la Tabla 4.24 los datos de los perfiles a) y b) correspondientes a los modelos desarrollados para una clasificación mecánica por resistencia de la especie. Un detalle de la cantidad de cuerpos de prueba de cada muestra existente en los distintos grados de calidad, se encuentra en la Tabla 4.12 del apartado 4.2. La diferente naturaleza de los métodos de clasificación ocasiona que en esta última tabla uno de las propiedades analizadas, el módulo de elasticidad, actúe como parámetro en ambos modelos, y, consecuentemente, defina en forma directa la inclusión de los cuerpos de prueba en un determinado grado de calidad. Esta circunstancia, que no ocurre en el método visual, debe ser tenida en cuenta en la discusión.

Los datos de la Tabla 4.23 muestran las propiedades para distintos grupos obtenidos por clasificación visual, y, consecuentemente, en la medida en que el grado de calidad aumenta por eliminación o limitación de las características que disminuyen las propiedades mecánicas de la especie, los valores crecen. Paralelamente se produce un mayor nivel de uniformidad dentro de cada clase que la existente en la población original, el cual disminuye la dispersión y posibilita un análisis más preciso de la relación entre las propiedades.

Para el cálculo del valor característico del *MOR* a partir de los percentiles obtenidos de un conjunto de muestras pertenecientes a una clase resistente, la norma EN 384 (1996) prescribe que el promedio de los percentiles, ajustados a las condiciones de referencia y ponderados por

tamaño de muestra, no puede exceder 1,20 veces el percentil menor. De ser mayor esa relación, es necesario redefinir la población para considerar estadísticamente las propiedades de esa muestra de menor calidad, o disminuir el promedio del conjunto hasta alcanzar ese límite. En este caso, como se indicó anteriormente, la baja cantidad de probetas en algunas de las muestras para determinados grados de calidad, motivó la adopción de los valores medios en reemplazo de los percentiles.

Tabla 4.24 Resistencia y rigidez en flexión para las distintas muestras conforme a los modelos desarrollados para una clasificación mecánica

(1) Ajustados a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); (2) ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996); el parámetro $E_{m,g}$ está expresado en N/mm^2 .

Perfil y límites para los parámetros	Propiedades N/mm^2	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5
a) $PC/39,16$ $39,16 > PC/27,53$ rechazo visual y $PC < 27,53$	$\bar{f}_m / \bar{f}_m^{(1)}$	53,2 / 41,4	60,1 / 51,0	51,6 / 46,6	47,1 / 46,5	70,9 / 47,7
	$\bar{E}_{m,g}^{(2)}$	13275	14648	14347	14000	14553
	$\bar{f}_m / \bar{f}_m^{(1)}$	39,3 / 30,6	44,4 / 37,8	37,7 / 34,3	36,6 / 36,3	52,3 / 35,2
	$\bar{E}_{m,g}^{(2)}$	10871	11171	11039	11924	10943
	$\bar{f}_m / \bar{f}_m^{(1)}$	35,5 / 27,7	44,7 / 38,0	42,0 / 38,2	36,4 / 36,0	48,8 / 32,8
	$\bar{E}_{m,g}^{(2)}$	10253	11700	12049	11894	10441
b) $E_{m,g}/12346$ $12346 > E_{m,g}/9365$ rechazo visual y $E_{m,g} < 9365$	$\bar{f}_m / \bar{f}_m^{(1)}$	54,9 / 42,8	59,9 / 50,9	51,6 / 46,6	48,1 / 47,5	71,0 / 47,7
	$\bar{E}_{m,g}^{(2)}$	13519	14664	14529	14034	14616
	$\bar{f}_m / \bar{f}_m^{(1)}$	39,5 / 30,8	44,9 / 38,2	39,1 / 35,5	32,1 / 31,8	53,4 / 36,0
	$\bar{E}_{m,g}^{(2)}$	10948	11125	11133	11769	11061
	$\bar{f}_m / \bar{f}_m^{(1)}$	35,5 / 27,7	44,7 / 38,0	42,0 / 38,2	36,4 / 36,0	48,1 / 32,4
	$\bar{E}_{m,g}^{(2)}$	10253	11700	12049	11894	10335

Siguiendo el criterio de la precitada norma, las relaciones entre los promedios generales de nueve grados de calidad del método visual y los valores medios de las muestras que los integran, son presentadas en la Tabla 4.25. No se incluyeron los grados inferiores de los perfiles e) y f) porque coinciden con el de menor calidad del perfil c). Cada uno de los grados constituye una sub-población de la población investigada, definida a través de límites establecidos para los parámetros visuales, los cuales garantizan un determinado nivel de calidad. La relación entre el

valor medio del *MOR* de cada sub-población y los correspondientes a cada muestra integrante, ajustados a las condiciones de referencia, debe estar comprendida en el límite fijado por la norma, y, cuanto más cercana a la unidad es, más adecuado resulta el criterio de ajuste propuesto.

Los valores encontrados para el *MOR* muestran que la Muestra 1 es la única que no se encuadra en el límite prescrito (1,20), alcanzando en un grado el valor máximo de 1,32, seguido de 1,26, 1,23 y 1,22. Para esta muestra, en 5 de los 9 grados analizados se excede el límite prescrito. Es de destacar que los mayores desvíos corresponden a las clases de menor calidad, y, en la medida que ésta aumenta, la relación alcanza valores admisibles, como es el caso de los dos mejores grados en los perfiles e) y f). Si bien la norma no establece una relación máxima para el *MOE*, su valor indica la aptitud del ajuste realizado, que en este caso se efectúa a un contenido de humedad de referencia, ignorando otras variables.

Tabla 4.25 Relaciones entre los valores medios del *MOR* y el *MOE* de distintos grados de calidad y los valores medios correspondientes a cada muestra, para los perfiles a), b), c), e) y f) del método visual
MOR ajustado a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); *MOE* ajustado a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996); (1) fisuras que exceden la longitud máxima establecida en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18.

Perfil	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3		Muestra 4		Muestra 5	
	<i>MOR</i>	<i>MOE</i>	<i>MOR</i>	<i>MOE</i>	<i>MOR</i>	<i>MOE</i>	<i>MOR</i>	<i>MOE</i>	<i>MOR</i>	<i>MOE</i>
a) Todos	1,23	1,11	0,89	0,95	1,02	1,01	1,02	1,00	0,97	0,98
b) Sin médula	1,23	1,12	0,92	0,97	0,96	0,96	1,00	1,00	0,98	0,98
	Con médula	1,32	1,12	0,89	0,95	0,95	0,97	0,96	0,95	1,03
c) Sin <i>méd, fis⁽¹⁾</i> y <i>gd</i>	1,22	1,12	0,90	0,97	0,98	0,98	0,99	0,97	0,99	0,99
	Restantes	1,26	1,10	0,92	0,95	0,95	0,97	0,94	0,96	1,02
e) Sin <i>méd, fis⁽¹⁾</i> y <i>gd. K</i> [1/3	1,17	1,10	0,92	1,00	1,04	1,02	1,02	1,00	1,00	0,99
	Sin <i>méd, fis⁽¹⁾</i> y <i>gd. K</i> >1/3	1,14	1,09	0,87	0,92	0,88	0,92	0,97	0,92	1,02
f) Sin <i>méd, fis⁽¹⁾</i> y <i>gd. K</i> [1/4	1,13	1,07	0,91	0,97	1,03	0,98	1,00	1,00	1,01	1,00
	Sin <i>méd, fis⁽¹⁾</i> y <i>gd. K</i> >1/4	1,16	1,08	0,90	0,96	0,93	0,96	1,00	0,95	1,00

Los resultados indican un máximo para la Muestra 1 (1,12), aunque en todos los casos la relación es más cercana a la unidad, o sea que la media general compara mejor que para el *MOR*, con la media de cada muestra. La menor resistencia y rigidez encontrada para la Muestra 1, en comparación con las correspondientes a las sub-poblaciones que integra, es congruente con los

datos presentados en las tablas 4.2 y 4.4 y ya discutidos previamente. De la misma manera es coherente que la Muestra 2, que ha mostrado elevada resistencia y rigidez en comparación al resto, exhiba en este caso valores que generalmente son menores a la unidad, pues sus promedios superan a los de los grados que integra.

Los resultados demuestran, con la excepción de la Muestra 1, que el ajuste propuesto para el *MOR* en EN 384 (1996), en función de la altura del cuerpo de prueba, se adecua a la influencia que esta variable ejerce sobre la resistencia en la especie estudiada. La particularidad mostrada por la Muestra 1 ($h = 50\text{mm}$) no puede atribuirse a la expresión utilizada para ajustar los valores en función de h , pues ella resulta apta tanto para alturas inferiores como superiores a la de estas probetas. Son coherentes los resultados encontrados para la Muestra 5 ($h = 25\text{mm}$), y para las muestras 2 ($h = 75\text{mm}$), 3 ($h = 100\text{mm}$) y 4 ($h = 150\text{mm}$). Por otra parte, los resultados prueban que también es adecuado para esta especie el criterio de ajuste adoptado para el *MOE*, el cual ignora la influencia de la altura de la probeta y corrige los valores en función del contenido de humedad.

Tabla 4.26 Relaciones entre los valores medios del MOR y el MOE de cada grado de calidad y los valores medios correspondientes a cada muestra, para los perfiles a) y b) de los modelos mecánicos

MOR ajustado a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); *MOE* ajustado a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996); el parámetro $E_{m,g}$ está expresado en N/mm^2 .

Perfil y límites para los parámetros	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3		Muestra 4		Muestra 5	
	<i>MOR</i>	<i>MOE</i>								
a) $PC/39,16$	1,15	1,08	0,93	0,98	1,02	1,00	1,02	1,03	0,99	0,99
$39,16 > PC/27,53$	1,13	1,01	0,92	0,99	1,01	1,00	0,95	0,92	0,98	1,01
<i>rechazo visual y</i> $PC < 27,53$	1,25	1,11	0,91	0,97	0,91	0,94	0,96	0,95	1,06	1,09
b) $E_{m,g}/12346$	1,12	1,07	0,94	0,99	1,02	0,99	1,01	1,03	1,00	0,99
$12346 > E_{m,g}/9365$	1,13	1,01	0,91	1,00	0,98	1,00	1,10	0,94	0,97	1,00
<i>rechazo visual y</i> $E_{m,g} < 9365$	1,25	1,10	0,91	0,97	0,91	0,94	0,96	0,95	1,07	1,09

La Tabla 4.26 muestra la relación entre el promedio general para los seis grados de calidad de los modelos mecánicos y el valor medio de cada muestra que lo integra. En este caso debe considerarse la concepción diferente que caracteriza a una clasificación mecánica de una visual. El módulo de elasticidad es un parámetro que participa de los dos modelos desarrollados y por lo tanto su valor determina de forma directa la inclusión de un cuerpo de prueba en una determinada clase. Como a su vez el módulo de elasticidad es el parámetro que mejor correlación

ha mostrado con la resistencia, los valores encontrados presentan en general un acercamiento mayor a la unidad que los correspondientes a la tabla anterior.

Los únicos casos que exceden la relación establecida en la norma para el *MOR* son los de la Muestra 1 en los grados de menor calidad pertenecientes a ambos modelos, donde alcanza el valor de 1,25. En las restantes clases los valores presentados por esta muestra son 1,15, 1,13 y 1,12, encontrándose para las otras cuatro muestras relaciones que oscilan en +/-10% respecto de la unidad. La presencia de los mayores desvíos en los grados de menor calidad se explica porque los mismos no tienen límite inferior para los parámetros y a su vez incluyen los cuerpos de prueba rechazados en la inspección visual adicional.

Los datos correspondientes al *MOE* muestran para todas las muestras valores con desvíos reducidos respecto de la unidad. En esta tabla se confirma nuevamente la menor resistencia y rigidez en relación con conjunto que presenta la Muestra 1. De igual manera ratifica las buenas propiedades de la Muestra 2, la cual, con la excepción de un caso que presenta una relación igual a uno, en las restantes muestra valores menores, confirmando una leve superioridad de sus valores medios respecto de los correspondientes a los grados que integra. Los resultados demuestran también para los modelos mecánicos, con la excepción de la Muestra 1, la aptitud de los ajustes propuestos en EN 384 (1996) para la especie investigada. En un estudio realizado con madera de *Pinus sylvestris* L. de España, Hermoso Prieto (2001) arriba a conclusiones similares.

Dentro de las causas que pueden explicar el particular comportamiento de la Muestra 1 se encuentra la elevada nudosidad que ella exhibe en comparación con las otras muestras (Tabla 4.1). En consecuencia, aún dentro de los límites fijados para ese parámetro en cada clase, él puede alcanzar en esta muestra niveles superiores al resto, afectando negativamente su capacidad mecánica.

En este apartado se profundizó el análisis de las propiedades resistentes y de rigidez de cada una de las muestras destinadas al ensayo estático de flexión, y en particular se estudió la aptitud de los ajustes previstos para el *MOR* y el *MOE* en EN 384 (1996). Los resultados demuestran que los mismos son adecuados para esta especie, ya que las relaciones entre la media general de cada clase y la particular de cada muestra que la integra, calculadas sobre los valores ajustados, se apartan poco de la unidad. Para el caso del *MOR*, solamente las clases de menor calidad de la Muestra 1 exceden el valor máximo adoptado por la mencionada norma, encontrándose todos los restantes casos dentro del límite estipulado. Con referencia al *MOE*, que no tiene un límite establecido, las relaciones muestran una reducida dispersión respecto de la unidad, siendo también la Muestra 1 la que exhibe los mayores valores. En oposición a la Muestra 1, que confirma sus relativamente bajas propiedades de resistencia y rigidez, la Muestra 2 ratifica en este análisis que posee propiedades

levemente superiores al conjunto.

4.7 Variación de las propiedades en función de la región de procedencia

El análisis de propiedades y rendimientos para los distintos grados de calidad analizados en los apartados 4.1 y 4.2 no discriminó valores en función de la región de procedencia. En este apartado se presentarán y discutirán los resultados obtenidos con la finalidad de conocer la influencia que sobre la calidad de la madera ejerce la región de cultivo. En atención a que las principales plantaciones de la especie se localizan en las provincias de Corrientes y Entre Ríos, lo que fue tenido en cuenta en el muestreo, según se explicó en el Capítulo 2, en lo sucesivo los resultados se discriminan para esos dos orígenes de los cuerpos de prueba.

La Tabla 4.27 muestra un resumen de resultados para las características más importantes de las muestras ensayadas a flexión, las cuales fueron empleadas como parámetros en el método visual y/o en los modelos desarrollados para una clasificación mecánica. Sus valores medios y de dispersión permiten inferir la calidad del material para cada procedencia, pues esas características afectan las propiedades mecánicas y consecuentemente condicionan el rendimiento en las clases superiores.

K exhibe valores medios similares para ambas regiones en todas las muestras y también en el total (0,333/0,352), mostrando el material de Corrientes un valor 6% mayor al de Entre Ríos. La dispersión, medida por los coeficientes de variación, es similar para el conjunto (0,56/0,57) pero presenta distintas relaciones individuales, con diferencias importantes en las muestras 2, 3 y 4, las cuales se compensan. *KAR3* muestra una diferencia en la media levemente mayor al criterio anterior, siendo en este caso la de Entre Ríos 9% superior a la de Corrientes (0,158/0,236). Los coeficientes de variación (0,66 y 0,76) indican una dispersión similar para las dos zonas pero superior a la de *K*. La presencia de fisuras que exceden los límites establecidos en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18 es equilibrada (47/44), y lo mismo puede decirse respecto de los grandes defectos (2/1). La diferencia más importante que muestran los datos de esta tabla se produce en la cantidad de cuerpos de prueba que poseen médula en el tercio central (82/44), parámetro que, como ya se demostró, disminuye significativamente la resistencia y la densidad de esta especie.

En los valores de la nudosidad, que en este caso acusa diferencias muy pequeñas entre ambas regiones, tiene una incidencia importante el tipo de prácticas silviculturales utilizadas. Las fisuras y grandes defectos, que también muestran una presencia similar en ambos grupos, se relacionan con los procesos de producción y secado. La selección y toma de muestras se hizo en

este trabajo al azar en ambas regiones, pero con criterios distintos, tal como fue explicado en el Capítulo 2. Para el material procedente de Corrientes, se eligieron árboles completos, los cuales luego fueron cortados para dar origen a las probetas con ubicación conocida dentro de cada árbol.

Tabla 4.27 Parámetros visuales para las muestras sometidas a flexión, discriminados por procedencia

Parámetro		M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	Todas
		ER / Co (n = 25 / 25)	ER / Co (n = 74 / 75)	ER / Co (n = 174 / 175)			
K	Min	0 / 0	0 / 0	0,184 / 0	0,139 / 0,087	0 / 0	0 / 0
	Med	0,416 / 0,434	0,320 / 0,347	0,403 / 0,416	0,351 / 0,335	0,281 / 0,312	0,333 / 0,352
	Máx	0,855 / 0,790	1,000 / 0,754	0,800 / 0,836	0,621 / 0,690	0,738 / 0,706	1,000 / 0,836
	S	0,212 / 0,204	0,270 / 0,201	0,162 / 0,253	0,138 / 0,177	0,150 / 0,179	0,187 / 0,201
	COV	0,51 / 0,47	0,84 / 0,58	0,40 / 0,61	0,39 / 0,53	0,53 / 0,57	0,56 / 0,57
KAR3	Min	0 / 0	0 / 0	0,100 / 0	0,066 / 0,021	0 / 0	0 / 0
	Med	0,334 / 0,284	0,217 / 0,166	0,268 / 0,158	0,209 / 0,169	0,259 / 0,292	0,258 / 0,236
	Máx	0,843 / 0,637	0,699 / 0,517	0,568 / 0,454	0,408 / 0,480	0,685 / 0,822	0,843 / 0,822
	S	0,215 / 0,176	0,206 / 0,156	0,120 / 0,120	0,091 / 0,102	0,167 / 0,203	0,170 / 0,180
	COV	0,64 / 0,62	0,95 / 0,94	0,45 / 0,76	0,44 / 0,60	0,65 / 0,70	0,66 / 0,76
fis > C18	n	8 / 7	6 / 4	13 / 13	13 / 14	7 / 6	47 / 44
med	n	12 / 2	10 / 3	19 / 12	12 / 14	29 / 13	82 / 44
gd	n	0 / 0	0 / 1	1 / 0	1 / 0	0 / 0	2 / 1

Los cuerpos de prueba procedentes de Entre Ríos provienen de piezas seleccionadas en el aserradero, y esta diferencia puede explicar la distinta cantidad de probetas con médula que ha sido encontrada en el análisis. A las variaciones debidas al azar puede sumarse el tamaño de las trozas y el esquema de corte utilizados en el momento de la selección de las piezas. La utilización de trozas con diámetros pequeños, ocasiona un aumento relativo de la presencia de la médula y la utilización de distintos esquemas de corte también pueden producir diferencias importantes en el mismo sentido. Esta circunstancia será tenida en cuenta en lo sucesivo, donde las propiedades mecánicas y de densidad serán analizadas para el conjunto de las muestras y también para los distintos grados de calidad ya presentados en los apartados 4.1 y 4.2. Consecuentemente se podrán comparar las propiedades en condiciones de calidad equivalente para las dos procedencias.

La Tabla 4.28 muestra un resumen de las propiedades mecánicas y densidad para las muestras ensayadas a flexión y discriminados por región de procedencia. El MOR exhibe valores

medios y de dispersión que varían para las procedencias analizadas en las distintas muestras, pero que en el conjunto se compensan y no acusan una diferencia importante. Esas diferencias en el *MOE* son más elevadas y el material de Entre Ríos muestra un menor valor medio y una mayor dispersión que el de Corrientes, con coeficientes de variación de 0,21 y 0,16, respectivamente.

Tabla 4. 28 Propiedades de resistencia y rigidez en flexión para cada muestra, discriminadas por procedencia

(1) Ajustados a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); (2) ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996).

	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	Todas	
	ER / Co						
	(n = 25 / 25)	(n = 74 / 75)	(n = 174 / 175)				
$f_m^{(1)}$ N/mm ²	Min	13,7 / 13,8	19,2 / 30,2	24,2 / 19,7	21,1 / 11,3	20,4 / 18,7	13,7 / 11,3
	Med	29,3 / 36,8	49,6 / 41,4	38,1 / 41,6	45,2 / 34,4	41,4 / 42,1	40,9 / 40,1
	Máx	40,5 / 62,0	97,7 / 57,5	53,9 / 59,1	65,9 / 63,0	72,9 / 71,9	97,7 / 71,9
	S	7,8 / 9,7	18,0 / 7,6	8,0 / 10,1	10,4 / 13,2	11,1 / 10,0	12,8 / 10,5
	COV	0,27 / 0,26	0,36 / 0,18	0,21 / 0,24	0,23 / 0,38	0,27 / 0,24	0,31 / 0,26
	$f_{m,075}$	17,4 / 25,7	28,9 / 31,7	27,2 / 29,8	33,9 / 16,1	24,8 / 28,5	24,2 / 26,4
$E_{m,g}^{(2)}$ N/mm ²	Min	7066 / 7259	7567 / 10043	9232 / 10510	10463 / 9039	6427 / 7624	6427 / 7259
	Med	10814/12021	13902/12706	11768/13253	12703/12606	12471/13249	12371/12905
	Máx	13211/15614	22502/15403	15567/16919	16990/15146	19980/20419	22502/20419
	S	1707 / 2167	3515 / 1593	1699 / 1765	1561 / 1564	2805 / 2300	2634 / 2053
	COV	0,16 / 0,18	0,25 / 0,13	0,14 / 0,13	0,12 / 0,12	0,22 / 0,17	0,21 / 0,16
$\rho^{(2)}$ kg/m ³	Min	415 / 451	443 / 464	428 / 491	428 / 437	415 / 481	415 / 437
	Med	478 / 574	580 / 541	483 / 554	490 / 520	537 / 574	520 / 559
	Máx	552 / 692	1065 / 644	610 / 688	542 / 578	708 / 726	1065 / 726
	S	43 / 65	143 / 47	51 / 56	28 / 35	63 / 59	80 / 58
	COV	0,09 / 0,11	0,25 / 0,09	0,11 / 0,10	0,06 / 0,07	0,12 / 0,10	0,15 / 0,10
	ρ_{05}	408 / 466	345 / 464	398 / 462	444 / 462	433 / 477	388 / 463

Las diferencias mayores entre los cuerpos de prueba provenientes de ambas regiones son encontradas para la densidad, con un valor medio del conjunto proveniente de Corrientes 8% mayor al de Entre Ríos y un coeficiente de variación 50% más alto. Johansson et al. (1992) publican valores medios del *MOR* en flexión de 46,4N/mm² y 45,9N/mm² para *Picea abies*

procedente de Alemania y Suecia, respectivamente, con coeficientes de variación de 0,24 y 0,26. Para el *MOE*, los valores medios reportados son 12830N/mm² y 12790N/mm², con coeficientes de variación de 0,19 y 0,21.

La prueba de la diferencia entre medias para los parámetros y propiedades exhibidas en las tablas 4.27 y 4.28, respectivamente, muestra que solamente la densidad aparente exhibe una diferencia altamente significativa entre ambas procedencias, con un nivel de probabilidad (*p*) menor a 0,0005. La diferencia entre las medias de ambas regiones no es significativa para *K*, *KAR3* y *MOR*, con niveles de probabilidad (*p*) iguales a 0,362, 0,154 y 0,500 respectivamente, y es significativa para el *MOE*, (*p* = 0,036). Los grados de significación encontrados corresponden a los grupos formados con la totalidad de los cuerpos de prueba, o sea que incluyen todos los niveles de calidad.

Tabla 4.29 *Parámetros visuales para las muestras 6 y 7, discriminados por procedencia*

Parámetro		<i>M 6</i> <i>ER / Co</i> (<i>n</i> = 75 / 75)	<i>M 7</i> <i>ER / Co</i> (<i>n</i> = 25 / 25)
<i>K</i>	<i>Mín</i>	0 / 0	0 / 0
	<i>Med</i>	0,345 / 0,317	0,242 / 0,286
	<i>Máx</i>	0,873 / 1,000	0,700 / 0,733
	<i>S</i>	0,179 / 0,201	0,232 / 0,194
	<i>COV</i>	0,52 / 0,64	0,96 / 0,68
<i>KAR3</i>	<i>Mín</i>	0 / 0	-
	<i>Med</i>	0,290 / 0,265	-
	<i>Máx</i>	0,914 / 0,653	-
	<i>S</i>	0,153 / 0,190	-
	<i>COV</i>	0,53 / 0,72	-
Fisuras	>C18 <i>n</i>	8 / 7	6 / 5
Médula	<i>n</i>	32 / 16	10 / 3
Grandes defectos	<i>n</i>	0 / 0	0 / 0

Con el fin de corroborar estos resultados para grupos más homogéneos, se eligieron las probetas sin médula del perfil b) incluido en la Tabla 4.31, pues, como se señaló anteriormente, la presencia de médula es mucho mayor en los cuerpos de prueba provenientes de Entre Ríos que en los de Corrientes, y ella ejerce una influencia importante sobre las propiedades de la especie.

Las diferencias son menos significativas en este caso que en el anterior, con un valor de $p = 0,011$ para la densidad aparente y de $p = 0,457$ para el módulo de elasticidad, lo cual resulta congruente con el mayor nivel de homogeneidad que se logra al limitar los defectos. Estos resultados demuestran, en consecuencia, que las diferencias entre las propiedades de los cuerpos de prueba procedentes de Corrientes y Entre Ríos no son estadísticamente significativas, a excepción de la densidad aparente. Hermoso Prieto (2001) reporta diferencias altamente significativas entre las medias del *MOR*, *MOE* y densidad aparente, para *Pinus sylvestris* L. procedente de cinco regiones de España.

Tabla 4. 30 Propiedades de resistencia y rigidez en tracción y compresión paralela a las fibras, discriminadas por procedencia

(1) Ajustados a un ancho de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); (2) ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996).

	Muestra 6			Muestra 7		
	$f_{t,0}^{(1)}$ <i>N/mm²</i> <i>ER / Co</i> (<i>n</i> = 75 / 75)	$E_{t,0}^{(2)}$ <i>N/mm²</i> <i>ER / Co</i> (<i>n</i> = 75 / 75)	$\rho^{(2)}$ <i>kg/m³</i> <i>ER / Co</i> (<i>n</i> = 75 / 75)	$f_{c,0}^{(2)}$ <i>N/mm²</i> <i>ER / Co</i> (<i>n</i> = 25 / 25)	$E_{c,0}^{(2)}$ <i>N/mm²</i> <i>ER / Co</i> (<i>n</i> = 25 / 25)	$\rho^{(2)}$ <i>kg/m³</i> <i>ER / Co</i> (<i>n</i> = 25 / 25)
<i>Min</i>	9,5 / 11,8	7873 / 9371	413 / 468	25,4 / 31,6	8530 / 8155	442 / 469
<i>Med</i>	29,2 / 32,6	12989 / 13793	542 / 567	40,7 / 39,2	21016 / 15713	592 / 580
<i>Máx</i>	74,8 / 68,1	22746 / 21849	691 / 813	65,2 / 46,9	61378 / 26955	970 / 795
<i>S</i>	12,6 / 12,1	2905 / 2316	59 / 61	9,3 / 5,0	12120 / 4257	129 / 76
<i>COV</i>	0,43 / 0,37	0,22 / 0,17	0,11 / 0,11	0,23 / 0,13	0,58 / 0,27	0,22 / 0,13
$f_{t,0,05}$	15,7 / 18,5	-	-	-	-	-
$f_{c,0,05}$	-	-	-	29,3 / 31,9	-	-
ρ_{05}	-	-	445 / 467	-	-	380 / 455

Las tablas 4.29 y 4.30 presentan un resumen de resultados para las características más importantes y para las propiedades mecánicas y densidad correspondientes a las muestras 6 y 7 respectivamente, discriminadas por región de procedencia. En la Muestra 6, destinada a ensayos de tracción paralela a las fibras, la nudosidad para ambos criterios presenta mayores valores medios y menor dispersión en la madera de Entre Ríos que en la de Corrientes. El caso opuesto se observa para el criterio *K* en la Muestra 7, destinada a ensayos de compresión paralela a las fibras. En este caso no se ha presentado *KAR3* por no haber sido empleado para esa muestra en este trabajo.

De manera similar a lo sucedido con las muestras 1, 2, 3, 4 y 5, se encuentran cantidades equilibradas de fisuras importantes y grandes defectos, pero mucho mayor presencia de médula en las probetas procedentes de Entre Ríos que en las de Corrientes. Las propiedades mecánicas y densidad en la Muestra 6 exhiben mayores valores medios en Corrientes que en Entre Ríos, con dispersiones equilibradas. En tanto, para las mismas propiedades en la Muestra 7, la madera de Entre Ríos muestra mayores valores medios y una dispersión mucho más importante, interpretada por los coeficientes de variación, que la procedente de la Provincia de Corrientes.

Tabla 4.31 Perfiles a), b), c) e), y f) de resistencia, rigidez y densidad para el método visual, aplicados a las muestras sometidas a flexión y discriminados por procedencia

(1) Ajustados a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); (2) ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996); (3) fisuras que exceden la longitud máxima establecida en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18.

Perfil	$f_{m,075}^{(1)}$ N/mm^2 ER / Co	$\bar{E}_{m,g}^{(2)}$ N/mm^2 ER / Co	$\rho_{05}^{(2)}$ kg/m^3 ER / Co	$\bar{\rho}^{(2)}$ kg/m^3 ER / Co	Rendimiento n (%) ER / Co
a) Todos los cuerpos de prueba	24,2 / 26,4	12371 / 12905	388 / 463	520 / 559	174 (50) / 175 (50)
b) Sin médula	29,1 / 31,1	13502 / 13249	379 / 468	537 / 566	92 (26) / 131 (37)
Con médula	23,5 / 20,1	11102 / 11880	413 / 458	502 / 538	82 (24) / 44 (13)
c) Sin <i>méd, fis⁽³⁾ y gd</i>	31,1 / 31,1	13742 / 13380	376 / 470	542 / 568	77 (22) / 113 (32)
Restantes	23,0 / 20,5	11282 / 12038	413 / 456	503 / 542	97 (28) / 62 (18)
e) Sin <i>méd, fis⁽³⁾ y gd. K[1/3</i>	32,9 / 33,0	14029 / 13782	401 / 466	539 / 561	58 (17) / 61 (17)
Sin <i>méd, fis⁽³⁾ y gd. K∃1/3</i>	29,3 / 26,7	12867 / 12910	317 / 476	550 / 575	19 (5) / 52 (15)
Restantes	23,0 / 20,5	11282 / 12038	413 / 456	503 / 542	97 (28) / 62 (18)
f) Sin <i>méd, fis⁽³⁾ y gd. K[1/4</i>	35,3 / 36,5	14705 / 14317	389 / 462	550 / 562	35 (10) / 43 (12)
Sin <i>méd, fis⁽³⁾ y gd. K∃1/4</i>	30,4 / 27,4	12940 / 12805	365 / 475	535 / 571	42 (12) / 70 (20)
Restantes	23,0 / 20,5	11282 / 12038	413 / 456	503 / 542	97 (28) / 62 (18)

Johansson et al. (1992) informan valores medios del *MOR* en tracción paralela a las fibras, para *Picea abies* procedente de Alemania y de Suecia, de 28,5N/mm² y 33,9N/mm², respectivamente, con coeficientes de variación de 0,42 y 0,37. Para el *MOE*, los valores medios reportados son 11850N/mm² y 12850N/mm², y los coeficientes de variación 0,24 y 0,17.

Los resultados de la prueba de la diferencia entre las medias para los parámetros y propiedades presentados en las tablas 4.29 y 4.30, están en línea con los obtenidos con las muestras

1, 2, 3, 4 y 5. Para la Muestra 6, las probabilidades asociadas a los niveles de significación de las diferencias entre medias de las dos procedencias son 0,364, 0,379, 0,093, 0,063 y 0,011 para K , $KAR3$, la resistencia a tracción paralela a las fibras, el módulo de elasticidad y la densidad aparente, respectivamente.

Tabla 4.32 Resistencia y rigidez de las muestras sometidas a tracción y compresión paralela a las fibras, conforme a los perfiles a), b) y c) del método visual y discriminadas por procedencia

(1) Ajustados a un ancho de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); (2) ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996); (3) fisuras que exceden la longitud máxima establecida en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18; (4) El menor valor para $n < 20$.

Perfil	Muestra 6			Muestra 7			
	$f_{t,0,05}^{(1)}$ N/mm ²	$\bar{E}_{t,0}^{(2)}$ N/mm ²	n	$f_{c,0,05}^{(2)}$ N/mm ²	$\bar{E}_{c,0}^{(2)}$ N/mm ²	n	
	ER / Co	ER / Co	ER / Co	ER / Co	ER / Co	ER / Co	
a) Todos	15,7 / 18,5	12989 / 13793	75 / 75	29,3 / 31,9	21016 / 15713	25 / 25	
b)	Sin médula	19,3 / 20,6	14140 / 14277	43 / 59	25,4 ⁽⁴⁾ / 31,9	25966 / 16225	15 / 22
	Con médula	14,2 / 11,8 ⁽⁴⁾	11443 / 12005	32 / 16	29,7 ⁽⁴⁾ / 32,1 ⁽⁴⁾	13590 / 11953	10 / 3
c)	Sin méd, fis ⁽³⁾ y gd	19,3 / 21,1	14165 / 14390	42 / 54	25,4 ⁽⁴⁾ / 31,8 ⁽⁴⁾	25592 / 16427	12 / 18
	Restantes	14,3 / 16,2	11492 / 12257	33 / 21	29,7 ⁽⁴⁾ / 31,6 ⁽⁴⁾	16792 / 13877	13 / 7

En la comparación del conjunto de cuerpos de prueba sin clasificar, en el cual coexisten las más variadas calidades y una diferencia importante en la presencia de médula, solamente la densidad exhibe un nivel de probabilidad menor al 5%. Le siguen en este caso en importancia las diferencias para el MOE ($p = 6,3\%$) y el MOR ($p = 9,3\%$). En la Muestra 7, los niveles alcanzados para p son 0,466, 0,481, 0,048 y 0,677 para la nudosidad (K), la resistencia a compresión paralela a las fibras, el módulo de elasticidad y la densidad aparente, respectivamente. En este caso es el MOE el único que exhibe un nivel de probabilidad menor al 5%. Estos valores confirman, para el conjunto de las muestras analizadas en el presente trabajo, que las diferencias entre las propiedades de las probetas procedentes de Corrientes y Entre Ríos no son altamente significativas. No puede rechazarse, sin una elevada probabilidad de cometer un error, la hipótesis que plantea la igualdad de las medias para las propiedades analizadas en el material de ambas regiones. Se debe asumir, en consecuencia, que las diferencias están originadas en la variabilidad propia del muestreo y en el azar, procediendo todos los cuerpos de prueba de una única población con propiedades similares. Es necesario señalar, no obstante, que la densidad aparente en primer

lugar y el módulo de elasticidad en segundo término, presentan las diferencias más importantes.

Tabla 4.33 Resistencia, rigidez y densidad de las muestras ensayadas a flexión conforme a los modelos desarrollados para una clasificación mecánica y discriminadas por procedencia

(1) Ajustados a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); (2) ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996); (3) porcentaje referido a la cantidad de cuerpos de prueba libres de características visuales que exceden los límites establecidos en prEN 14081 (2000) para clases resistentes superiores a C18; el parámetro $E_{m,g}$ está expresado en N/mm^2 .

Perfil y clase	Límites para los parámetros mecánicos analizados	$f_{m,075}^{(1)}$ N/mm^2 ER / Co	$\bar{E}_{m,g}^{(2)}$ N/mm^2 ER / Co	$\rho_{05}^{(2)}$ kg/m^3 ER / Co	Rendimiento n (%) ER / Co
a)	C35 $PC/39,16$	37,6 / 35,1	14588 / 14200	396 / 479	66 (19-26 ⁽³⁾) / 93 (27-37 ⁽³⁾)
	C24 $39,16 > PC/27,53$	24,8 / 26,1	11049 / 10958	401 / 454	51 (15-20 ⁽³⁾) / 35 (10-14 ⁽³⁾)
	C18 $rech\ vis\ y\ PC < 27,53$	20,6 / 19,2	10987 / 11791	410 / 448	57 (16) / 47 (13)
b)	C35 $E_{m,g}/12346$	35,3 / 36,9	14618 / 14324	404 / 481	66 (19-26 ⁽³⁾) / 88 (25-35 ⁽³⁾)
	C24 $12346 > E_{m,g}/9365$	26,1 / 25,7	11081 / 11091	399 / 456	49 (14-19 ⁽³⁾) / 40 (11-16 ⁽³⁾)
	C18 $rech\ vis\ y\ E_{m,g} < 9365$	20,7 / 19,2	10929 / 11791	407 / 448	59 (17) / 47 (14)

Las tablas 4.31 y 4.32 presentan la discriminación por procedencia de los resultados correspondientes a los perfiles analizados en el desarrollo del método visual. En la primera de ellas se seleccionaron cinco perfiles representativos para las muestras ensayadas a flexión y en la segunda los tres estudiados con las muestras ensayadas a tracción y compresión paralela a las fibras. Los valores característicos de la Tabla 4.31 ponen en evidencia que, cuando las características visuales se limitan a través de la clasificación, las propiedades mecánicas son prácticamente equivalentes para ambas procedencias. La densidad, en cambio, confirmando los resultados obtenidos con las pruebas de las diferencias entre medias, muestra en todos los casos valores mayores para la madera de Corrientes. El rendimiento acusa niveles más bajos en la madera de Entre Ríos para las dos clases superiores. Estos valores son congruentes con la mayor presencia de médula encontrada para ese grupo, explicada por el tipo de muestreo realizado, lo cual ocasiona la automática inserción de los cuerpos de prueba que la poseen en la tercera clase. La Tabla 4.32 refleja propiedades mecánicas similares, dentro de cada grado de calidad, en tracción paralela a las fibras para ambas procedencias. El rendimiento en los grados superiores es mayor en la madera procedente de Corrientes, lo cual se puede explicar, al igual que en el caso de las muestras 1, 2, 3,

4 y 5, por la menor presencia de médula en ese material. En la Muestra 7, el *MOR* exhibe mayores valores para las probetas provenientes de Corrientes, mientras que para el *MOE* se da el caso opuesto. Para el rendimiento caben las mismas consideraciones que en los casos anteriores.

Tabla 4.34 Resistencia, rigidez y densidad para las tablas ensayadas a tracción paralela a las fibras, conforme a los modelos desarrollados para una clasificación mecánica y discriminadas por procedencia

(1) Ajustados a un ancho de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); (2) ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996); (3) porcentaje referido a la cantidad de cuerpos de prueba libres de características visuales que exceden los límites establecidos en prEN 14081 (2000) para clases resistentes superiores a C18; (4) el menor valor para $n < 20$; el parámetro $E_{t,0}$ está expresado en N/mm^2 .

Perfil y clase	Límites para los parámetros mecánicos analizados	$f_{t,0,05}^{(1)}$ N/mm^2 ER / Co	$\bar{E}_{t,0}^{(2)}$ N/mm^2 ER / Co	$\rho_{05}^{(2)}$ kg/m^3 ER / Co	Rendimiento n (%) ER / Co
a)	C35 $PC/39,16$	22,9 / 22,3	15181/14827	484/475	35 (23-26 ⁽³⁾) / 50 (33-37 ⁽³⁾)
	C24 $39,16 > PC/27,53$	16,1 / 16,1 ⁽⁴⁾	11247/11382	409/458	27 (18-20 ⁽³⁾) / 16 (11-12 ⁽³⁾)
	C18 $rech\ vis\ y\ PC < 27,53$	9,5 ⁽⁴⁾ / 11,8 ⁽⁴⁾	10706/12330	460/477	13 (9) / 9 (6)
b)	C35 $E_{t,0}/12346$	24,5 / 22,7	15372/15007	492/474	33 (22-24 ⁽³⁾) / 47 (31-35 ⁽³⁾)
	C24 $12346 > E_{t,0}/9365$	16,2 / 16,2	11276/11292	415/461	30 (20-22 ⁽³⁾) / 21 (14-16 ⁽³⁾)
	C18 $rech\ vis\ y\ E_{t,0} < 9365$	9,5 ⁽⁴⁾ / 18,3 ⁽⁴⁾	10719/13141	444/486	12 (8) / 7 (5)

Un análisis similar al anterior puede realizarse con los datos de las tablas 4.33 y 4.34, referentes a los modelos desarrollados para una clasificación mecánica. En la primera de ellas, referida a la totalidad de las probetas pertenecientes a las muestras 1, 2, 3, 4 y 5, puede observarse un rendimiento similar, para ambos modelos, si se considera a los dos grados superiores en forma conjunta. En este caso la presencia de médula, que es mucho mayor en la madera de Entre Ríos, no decide en forma automática la inclusión del cuerpo de prueba en la tercera clase. Por lo tanto, y a diferencia del método visual, la influencia de esa característica no es tan fuerte en el grado de menor calidad. No obstante, la misma se manifiesta en el mejor rendimiento de la primera clase para la madera procedente de Corrientes.

Los valores de las propiedades mecánicas dentro de cada grado son similares para ambas procedencias, notándose la mayor diferencia en el más pobre, el cual no tiene un límite inferior para el parámetro. Para los modelos mecánicos aplicados a las tablas se obtienen los datos exhibidos en la Tabla 4.34, y en general caben iguales consideraciones que en el caso anterior. Es

de hacer notar que las diferencias encontradas en los percentiles del *MOR* de la clase menor, para ambas procedencias, pueden explicarse por la poca cantidad de probetas que la integran. Además, es de destacar que, con la excepción del mejor grado de calidad de las tablas para ambos modelos, en todas las restantes clases la densidad es mayor en la madera de Corrientes que en la de Entre Ríos (ver también tablas 4.31 y 4.33).

En el presente apartado se analizaron, discriminados por región de procedencia, las principales propiedades y los rendimientos conforme al método visual y los modelos mecánicos para una clasificación por resistencia de la especie investigada. Con referencia a los parámetros, la presencia de médula es mucho mayor en la madera de Entre Ríos que en la de Corrientes, siendo los restantes similares para ambas procedencias. Esa mayor diferencia puede explicarse por el método de muestreo utilizado. Las propiedades mecánicas son similares para la madera de ambas regiones dentro de cada grado de calidad. La densidad muestra mayores valores para las probetas provenientes de Corrientes, con la sola excepción de una clase. La prueba de la diferencia entre los valores medios de las propiedades analizadas para ambas procedencias, indica que la misma no es altamente significativa, y, en consecuencia, se debe aceptar que las diferencias se originan en la variabilidad debida al muestreo y al azar. No obstante, la densidad aparente y el módulo de elasticidad son las propiedades que muestran las diferencias mayores.

4.8 Variación de las propiedades en función de la distancia a la médula

Utilizando cuerpos de prueba procedentes de la provincia de Corrientes, para los cuales fue posible conservar la información relativa a su ubicación en el árbol, se analizará en el presente apartado la variación de la nudosidad, la resistencia, el módulo de elasticidad y la densidad aparente, en función de la distancia a la médula. El conocimiento de la calidad de la madera para distintas posiciones dentro del tronco, producida en tamaño estructural, es de importancia para optimizar el aprovechamiento del material. No obstante, es necesario tener en cuenta que la variación de su posición en la troza está condicionada por las dimensiones de ésta, de las piezas aserradas, y por los procesos de producción, a diferencia de lo que ocurre cuando se utilizan cuerpos de prueba pequeños y libres de defectos. Se seleccionaron las tablas de las muestras 5 y 6, ya que las mismas permiten el análisis de las propiedades mecánicas de flexión eliminando la influencia del tamaño de la sección transversal, y también las de tracción paralela a las fibras, en ambos casos con un número considerable de probetas. Las otras muestras fueron descartadas por ser menos numerosas y por la pérdida de precisión que originan sus dimensiones, tanto la influencia de *h* sobre el *MOR*,

mencionada anteriormente, como las dificultades de ubicación respecto de la médula.

Tabla 4.35 Cantidad de tablas sometidas a flexión y tracción paralela a las fibras, discriminadas por su posición respecto de la médula

(1) Fisuras que exceden la longitud máxima establecida en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18.

	Posición 0	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	
	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	
M 5	Todas	9	16	24	13	4
	Sin fis ⁽¹⁾ y gd	7	16	22	13	3
M 6	Todas	10	17	23	13	3
	Sin fis ⁽¹⁾ y gd	8	17	20	12	3

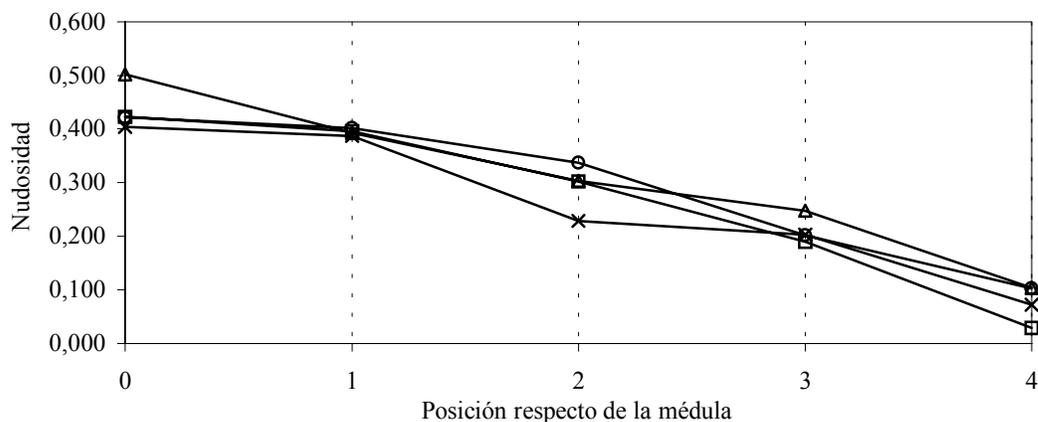


Figura 4.26 Variación de la nudosidad en función de la distancia a la médula

(○) K para M 5; (Δ) K para M 6; (□) KAR3 para M 5; (x) KAR3 para M 6; se han considerado los valores medios.

Las tablas fueron divididas en cinco grupos de acuerdo con su posición respecto de la médula, los que se indicaron como 0, 1, 2, 3 y 4. La primera posición corresponde a las probetas que poseen médula y las siguientes a aquellas cuyo centro se ubica a 25mm, 50mm, 75mm 100mm

de ella, respectivamente, conforme al esquema de corte presentado en el Capítulo 3. En total fueron seleccionadas 66 tablas de la Muestra 5 e igual cantidad de la Muestra 6, para las cuales fue posible determinar su ubicación con la precisión requerida, y cuya cantidad discriminada por posición es presentada en la Tabla 4.35. En la misma tabla se indican las probetas que presentaron fisuras importantes y grandes defectos, con el fin de considerar posibles influencias negativas de esas características sobre las propiedades mecánicas. Como es posible apreciar, la mayor cantidad de tablas procede de posiciones intermedias, siendo las ubicaciones 4 y 0 las que presentan el menor número de cuerpos de prueba.

Para el análisis de la variación de la nudosidad fueron seleccionados los criterios K y $KAR3$, en razón que fueron los empleados en el método visual y en los modelos mecánicos, respectivamente. En la Figura 4.26 puede apreciarse que la nudosidad decrece para ambos criterios y para ambas muestras, en la medida que la distancia a la médula es mayor, lo cual es congruente con resultados encontrados por Glos & Tratzmiller (1996) con madera de *Picea abies* de Alemania.

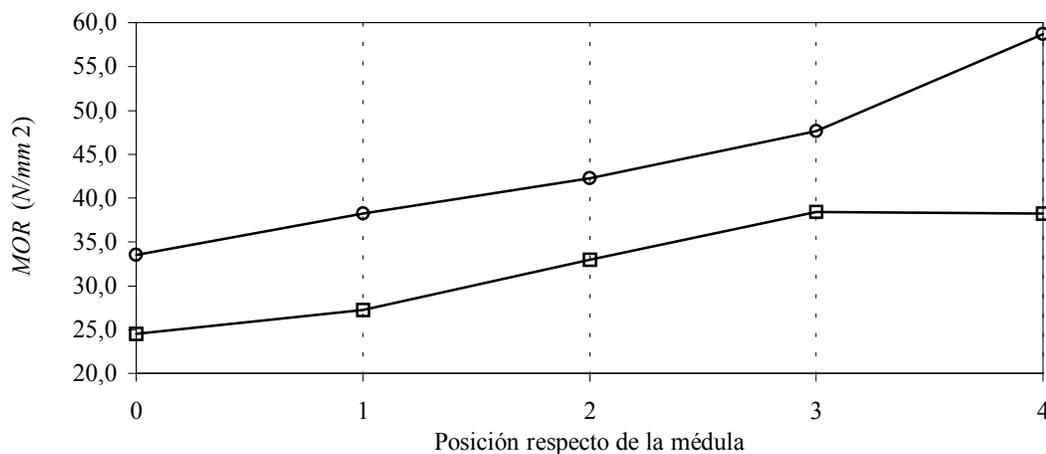


Figura 4.27 Variación del MOR en función de la distancia a la médula

(o) MOR en flexión para M 5; (□) MOR en tracción para M 6; se han considerado los valores medios y ajustados a una altura/ancho de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996).

Esta disminución de la nudosidad en la medida que aumenta la distancia al centro de crecimiento puede ser más importante si se emplean prácticas silviculturales orientadas a la mejora de la calidad de la madera para uso estructural, como la poda planificada. Como resulta congruente con la influencia negativa que la presencia de médula y la nudosidad ejercen sobre la resistencia a

flexión y tracción, la Figura 4.27 permite apreciar un incremento de ambas en la medida en que las tablas proceden de zonas más distantes del centro del tronco. El incremento responde a una función prácticamente lineal entre las posiciones 0 y 3. Entre esta ubicación y la extrema exterior, o sea la 4, la resistencia a flexión presenta un incremento mayor mientras la resistencia en tracción paralela a las fibras sufre una leve disminución. El contenido de humedad promedio de las tablas fue de 15%.

En todos los casos analizados se han considerado los valores medios, en atención a la baja cantidad de cuerpos de prueba disponibles para cada posición. A su vez, para una misma ubicación respecto de la médula, los resultados responden a un promedio en la altura del árbol.

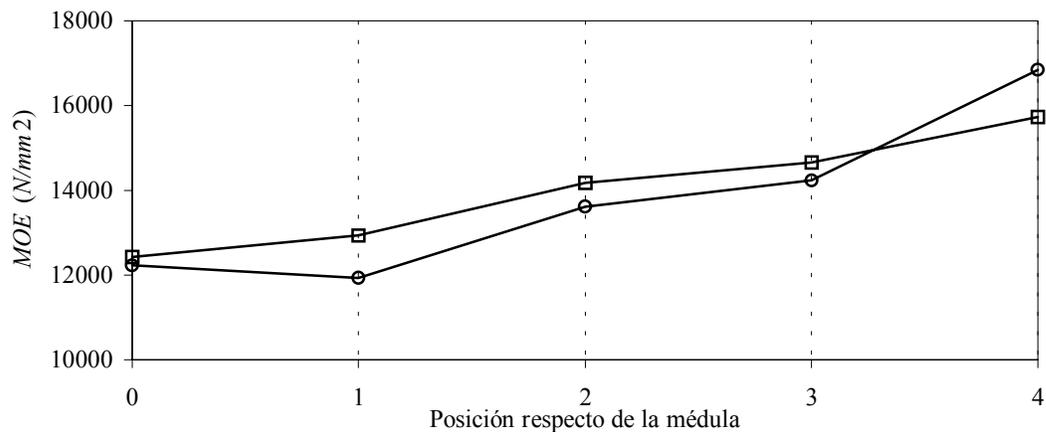


Figura 4.28 Variación del MOE en función de la distancia a la médula

(○) MOE en flexión para M5; (□) MOE en tracción para M6; se han considerado los valores medios y ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996).

Para el módulo de elasticidad la variación es presentada en la Figura 4.28, con resultados similares a los encontrados para la resistencia. El MOE en flexión exhibe valores ascendentes cuando crece la distancia al centro, con la sola excepción de la posición 1. A su vez, la pendiente se incrementa entre las posiciones 3 y 4. El MOE en tracción paralela a las fibras muestra un incremento casi constante en función de la distancia a la médula. Los resultados encontrados son coherentes con los presentados y discutidos en el apartado 4.1, ya que la presencia de médula afecta significativamente el valor del módulo de elasticidad en flexión y en tracción paralela a las fibras, y están en línea con los informados para las mismas propiedades por Glos & Tratzmiller (1996), en

un estudio realizado empleando madera aserrada de *Picea abies* de Alemania con distintas dimensiones de uso estructural.

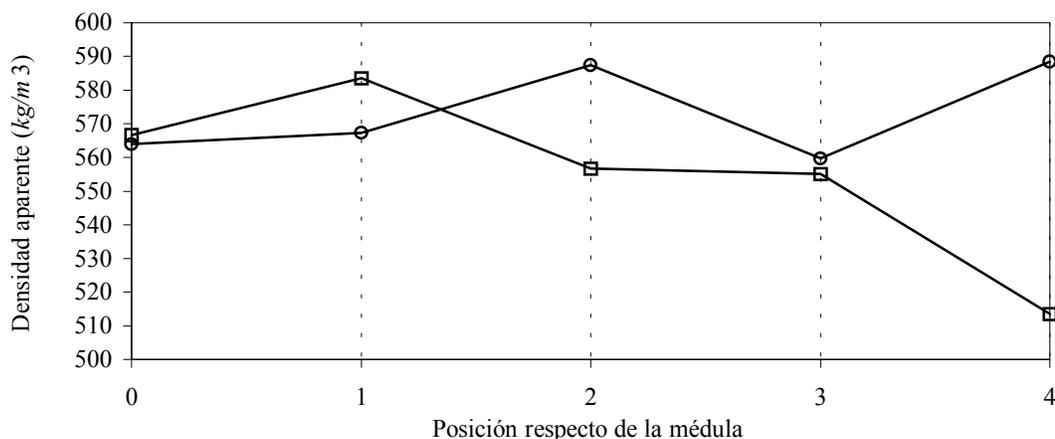


Figura 4.29 Variación de ρ en función de la distancia a la médula

(○) M 5; (□) M 6; se han considerado los valores medios y ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996).

A diferencia de los tres casos analizados anteriormente, los valores medios de la densidad aparente muestran una variación que no se puede relacionar con la distancia a la médula, como se aprecia en la Fig. 4.29. Los resultados obtenidos para las tablas ensayadas a flexión exhiben sus valores mayores para las posiciones 2 y 4, siendo mínimo el de la ubicación 3, e intermedios, y muy similares entre ellos, los de las posiciones 0 y 1. Las tablas de la Muestra 6 presentan un incremento entre las posiciones 0 y 1 para luego decrecer hacia el exterior del tronco. Estos resultados son congruentes con las pequeñas variaciones encontradas para la densidad aparente en cuerpos de prueba de muy variada calidad, tal como fue presentado y discutido en los apartados precedentes. Glos & Tratzmiller (1996), en el estudio realizado con *Picea abies* ya mencionado, encontró valores generalmente crecientes, para la densidad aparente, en función de la distancia a la médula. La obtención de valores más precisos acerca de la variación de estas propiedades escapa a los objetivos de esta investigación y debería encararse a través de un estudio diseñado a tal fin utilizando probetas de dimensiones pequeñas.

En el presente apartado se investigó la variación de las características y propiedades más importantes en función de la distancia al centro de crecimiento, a través del estudio de tablas de las muestras 5 y 6. Los valores medios de la nudosidad, expresada según los criterios K y $KAR3$, disminuyen cuando crece la distancia a la médula. Tanto el MOR en flexión como en tracción paralela a las fibras, y los correspondientes MOE se incrementan con esa distancia, mientras que para la densidad no fue posible establecer una relación. La adopción de prácticas silviculturales orientadas a optimizar las condiciones del material para uso estructural, como la poda planificada, produciría alteraciones en las relaciones encontradas, disminuyendo aún más la nudosidad en los sectores externos del tronco y aumentando en consecuencia el valor de las propiedades mecánicas. Los resultados encontrados confirman que la madera exterior es de mejor calidad para uso en estructuras que la interior.

4.9 Variación de las propiedades en función de la altura en el árbol

Con similar criterio al empleado en el apartado anterior, en el presente se analizará la variación de la nudosidad, la resistencia, el módulo de elasticidad y la densidad aparente en función de la altura en el árbol. Para ese fin fueron utilizados, por las razones ya expuestas, cuerpos de prueba procedentes de Corrientes, y se identificó a las trozas en orden ascendente, utilizando los números 1, 2, 3, 4, 5 y 6. Con el objetivo de disponer de un mayor número de datos, en las cuatro trozas inferiores (1 a 4) se seleccionaron probetas pertenecientes a todas las muestras, mientras que en las en las dos trozas superiores consideradas, la quinta y la sexta, solamente se utilizaron tablas de las muestras 5 y 6. Un detalle de la cantidad de cuerpos de prueba utilizados se presenta en la Tabla 4.36. En la misma se han discriminado los datos por muestra y por troza, identificando además la cantidad de probetas que poseen características visuales que influyen negativamente sobre las propiedades mecánicas. Cada troza posee una longitud aproximada de 4m y las propiedades analizadas se presentarán para ese nivel de discriminación.

La Figura 4.30 indica la variación de la nudosidad, expresada de acuerdo a los criterios K y $KAR3$, en función de la altura. Para este caso, y con el propósito de eliminar la influencia que las dimensiones transversales de la sección ejercen sobre la variable analizada, se utilizaron solamente las tablas de las muestras 5 y 6. Los valores medios experimentan en general un crecimiento en función de la altura, aunque K exhibe en la Muestra 5 una disminución inicial entre las trozas 1 y la 2 y posteriormente entre las 4 y 5, siendo el valor máximo el de la troza 4.

Hermoso Prieto (2001), en una investigación realizada con madera aserrada de *Pinus sylvestris* L. de España, encontró los máximos valores de la nudosidad en una altura situada entre

los 6m y los 9m, permaneciendo luego constantes o con cierta tendencia a disminuir. Es de destacar que la Figura 4.30 exhibe los valores medios de cada troza, y, en consecuencia, el crecimiento experimentado con la altura es congruente con la mayor nudosidad encontrada cerca de la médula en el apartado anterior, ya que las trozas superiores poseen menor diámetro.

Tabla 4.36 Cantidad de cuerpos de prueba discriminados por la posición de la troza de la cual fueron extraídos

(1) Fisuras que exceden la longitud máxima establecida en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18.

	Troza 1	Troza 2	Troza 3	Troza 4	Troza 5	Troza 6	
	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	
<i>M 1</i>	Todos	7	3	3	5	-	-
	Sin médula	6	3	3	5	-	-
<i>M 2</i>	Todos	9	8	4	4	-	-
	Sin médula	9	6	4	3	-	-
<i>M 3</i>	Todos	9	7	3	5	-	-
	Sin médula	7	3	0	3	-	-
<i>M 4</i>	Todos	7	5	7	6	-	-
	Sin médula	3	1	4	3	-	-
<i>M 5</i>	Todos	22	16	7	7	12	6
	Sin médula	20	15	6	6	9	3
	Sin <i>fis</i> ⁽¹⁾ y <i>gd</i>	21	13	6	7	12	5
	Sin <i>méd</i> , <i>fis</i> ⁽¹⁾ y <i>gd</i>	19	13	5	6	9	3
<i>M 6</i>	Todos	22	15	8	6	12	6
	Sin médula	18	14	8	5	7	3
	Sin <i>fis</i> ⁽¹⁾ y <i>gd</i>	19	15	6	5	11	6
	Sin <i>méd</i> , <i>fis</i> ⁽¹⁾ y <i>gd</i>	16	14	6	4	7	3
<i>M 7</i>	Todos	9	8	4	4	-	-
	Sin médula	9	6	4	3	-	-

La variación de la resistencia en función de la altura puede apreciarse con distintos niveles de discriminación en las figuras 4.31, 4.32 y 4.33. En la primera de ellas se presentan los valores medios del *MOR* en flexión sin corregir por altura de probeta y discriminados por muestra. De esta manera se puede observar la evolución de la resistencia con independencia de otras variables, tales como el tamaño de la sección recta. Como consecuencia de sus dimensiones, las

vigas fueron producidas de las 4 trozas inferiores, mientras que las tablas se extrajeron de 6 trozas.

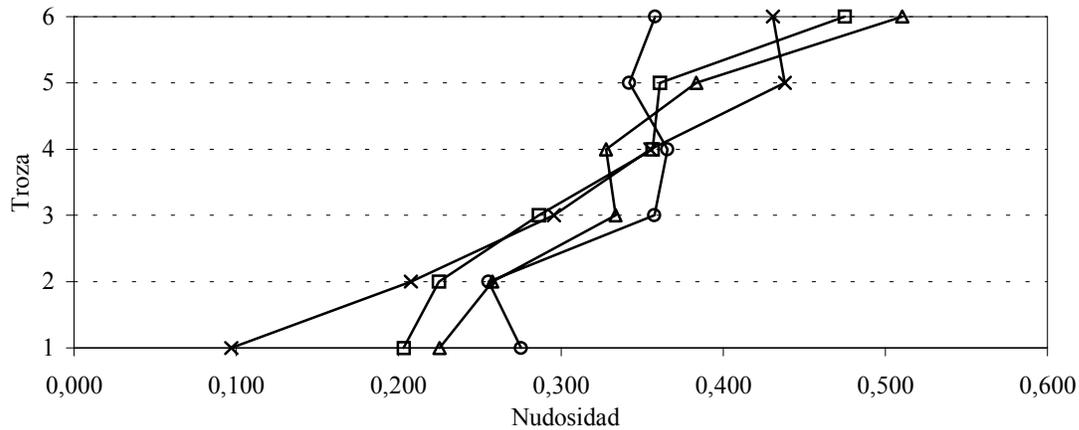


Figura 4.30 Variación de la nudosidad en función de la altura en el árbol

(o) K para M 5; (Δ) K para M 6; (□) KAR3 para M 5; (x) KAR3 para M 6; se han considerado los valores medios.

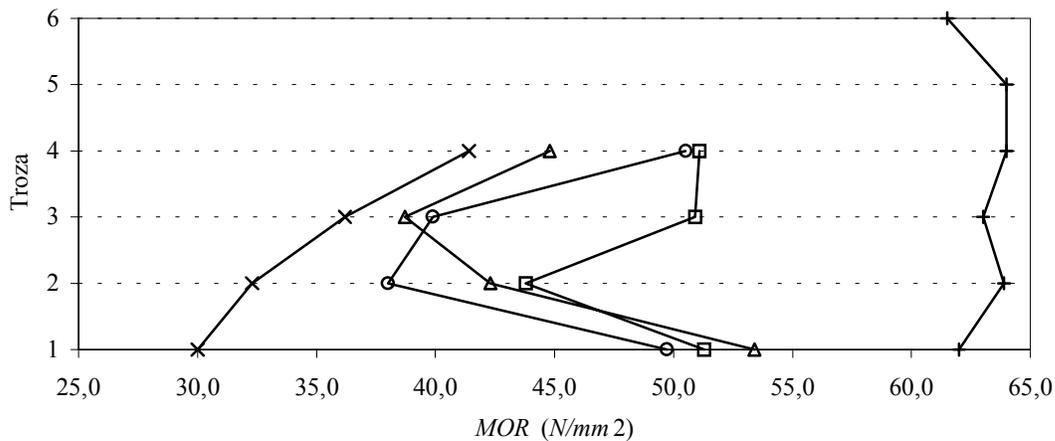


Figura 4.31 Variación del MOR en flexión en función de la altura en el árbol

(o) M 1; (□) M 2; (Δ) M 3; (x) M 4; (+) M 5; se han considerado los valores medios.

Con la información disponible no es posible establecer una relación que vincule esta propiedad con la altura de la probeta. La Muestra 1 exhibe una disminución del MOR en las trozas

2 y 3, teniendo valores prácticamente equivalentes las 1 y 4. La Muestra 2 presenta un valor menor en la troza 2, siendo similares los correspondientes a las 1, 3 y 4. Por su parte la Muestra 3 muestra la mayor resistencia en la troza 1, disminuyendo acentuadamente en las 2 y 3, para luego recuperarse en la 4. La Muestra 4, compuesta por las vigas de mayor tamaño, es la única que presenta un crecimiento continuo del *MOR* en función de la altura, el cual se acentúa para las trozas más altas. Por último, las tablas de la Muestra 5 exhiben muy poca variación del *MOR* para las 6 trozas consideradas.

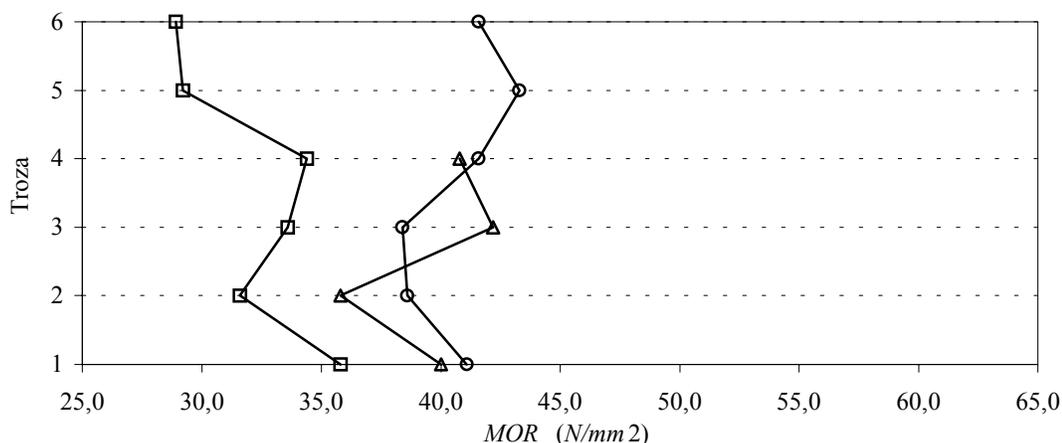


Figura 4.32 Variación del MOR en función de la altura en el árbol

(o) *MOR* para las 5 muestras sometidas a ensayos de flexión ajustado a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); (□) *MOR* en tracción para *M* 6 ajustado a un ancho de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); (Δ) *MOR* en compresión para *M* 7 ajustado a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996); se han considerado los valores medios.

La observación del total de cuerpos de prueba y de los libres de médula para cada muestra y cada troza (ver Tabla 4.36) tampoco permite explicar totalmente las variaciones encontradas en la Figura 4.31. Es de destacar, que el tamaño y la heterogeneidad de las probetas introducen variables no controlables que pueden influir en los resultados, si bien éstos responden a la finalidad planteada, ya que reflejan las condiciones usuales de explotación para uso en estructuras resistentes.

La Figura 4.32 permite comparar la evolución de la resistencia en función de la altura pero con sus valores corregidos a las condiciones de referencia. El contenido promedio de humedad

para las probetas de las muestras 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7, fue de 15%, 15%, 17%, 16%, 15%, 15% y 17%, respectivamente. Los valores correspondientes a los cuerpos de prueba de las 5 muestras ensayadas a flexión aparecen unificados y ajustados a la altura de referencia, pudiendo ser analizados en forma conjunta. También se presentan los valores medios de la resistencia a tracción y compresión paralela a las fibras. Tampoco en este caso es posible advertir una relación entre la resistencia y la altura.

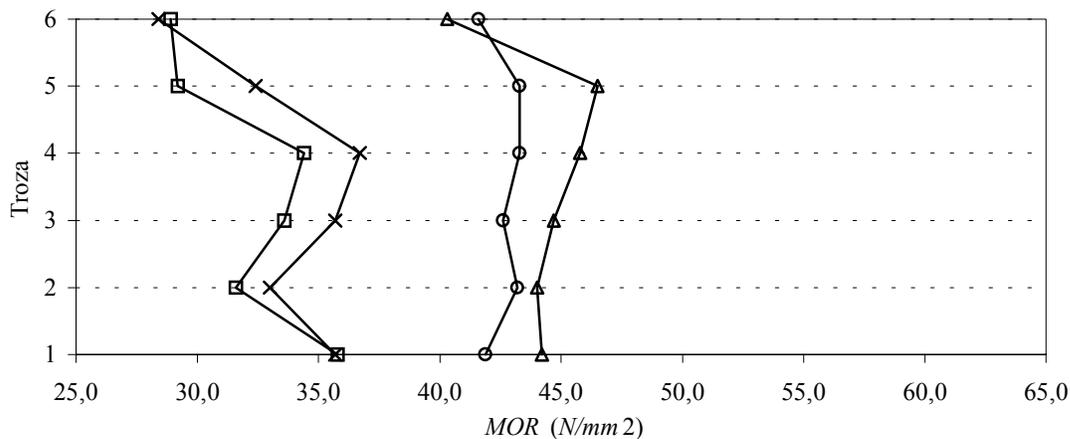


Figura 4.33 Variación del MOR en tablas de M 5 y 6 en función de la altura en el árbol

(o) Todas las tablas de M 5; (Δ) tablas de M 5 libres de médula, fisuras⁽¹⁾ y grandes defectos; (□) todas las tablas de M 6; (x) tablas de M 6 libres de médula, fisuras⁽¹⁾ y grandes defectos; (1) fisuras que exceden la longitud máxima establecida en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18; se han considerado los valores medios y ajustados a una altura/ancho de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996).

La Figura 4.33, por su parte, discrimina los resultados para las tablas libres de médula, fisuras importantes y grandes defectos, de aquellos correspondientes al total de probetas de las muestras 5 y 6 utilizadas en este estudio. Un detalle de las mismas se puede apreciar en la Tabla 4.36. En este caso se ha eliminado la influencia del tamaño de la sección y de las características visuales anteriormente mencionadas, aunque no fue posible controlar los efectos de la nudosidad sobre los resultados.

Tampoco estos datos aportan claridad acerca de la influencia de la altura sobre la resistencia. Es posible apreciar, y resulta congruente con las conclusiones parciales de los apartados 4.1 y 4.1.1, que, en general, los valores obtenidos para las probetas libres de los parámetros

considerados resultan mayores que para el total.

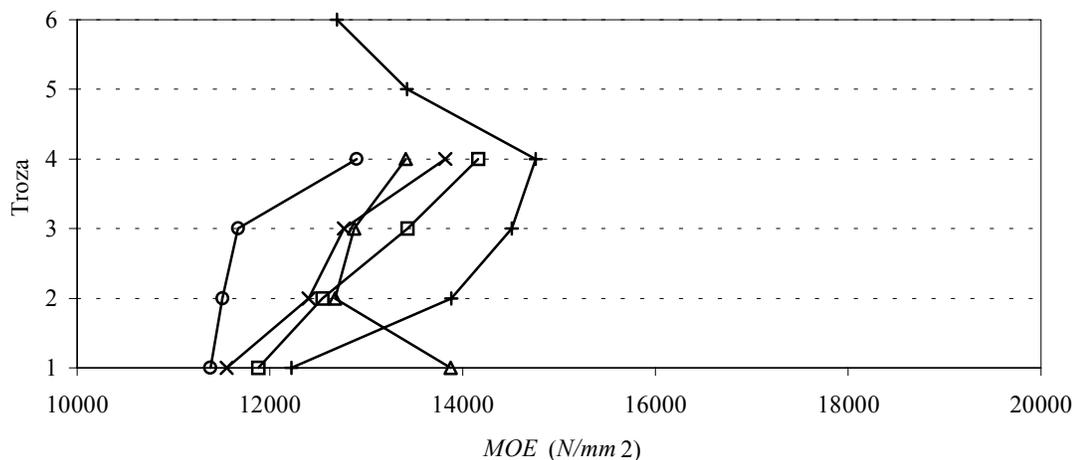


Figura 4.34 Variación del MOE en flexión en función de la altura en el árbol

(o) M 1; (□) M 2; (Δ) M 3; (x) M 4; (+) M 5; se han considerado los valores medios para cada troza y ajustados un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996).

Las figuras 4.34, 4.35 y 4.36 muestran las variaciones del módulo de elasticidad en función de la altura, para los mismos niveles de discriminación empleados en el estudio de la resistencia. En la primera de ellas se presentan los valores para cada una de las 5 muestras ensayadas a flexión, ajustados a las condiciones de referencia.

Las muestras 1 y 2 exhiben un crecimiento en los valores medios en función de la altura, en el primer caso más acentuado entre las trozas 3 y 4, y prácticamente con variación lineal en la segunda. La Muestra 3, en cambio, muestra el mayor valor en la troza inferior, para luego acusar una fuerte disminución en la segunda y un nuevo crecimiento en la tercera y la cuarta. La Muestra 4 tiene un comportamiento similar al que mostró con el *MOR*, creciendo el *MOE* con la altura. Las tablas de la Muestra 5 exhiben los mayores valores para alturas intermedias, siendo mínimos para las trozas inferior y superior.

La Figura 4.35 compara los valores de los módulos de elasticidad en flexión, tracción y compresión paralela a las fibras, en todos los casos ajustados a las condiciones de referencia. Los valores de las 5 muestras ensayadas a flexión aparecen unificados. Tampoco de esta figura puede extraerse una relación que vincule el *MOE* con la altura dentro del árbol, por lo que el estudio se reiteró para las tablas de las muestras 5 y 6 con discriminación de características visuales, presentándose los resultados en la Figura 4.36.

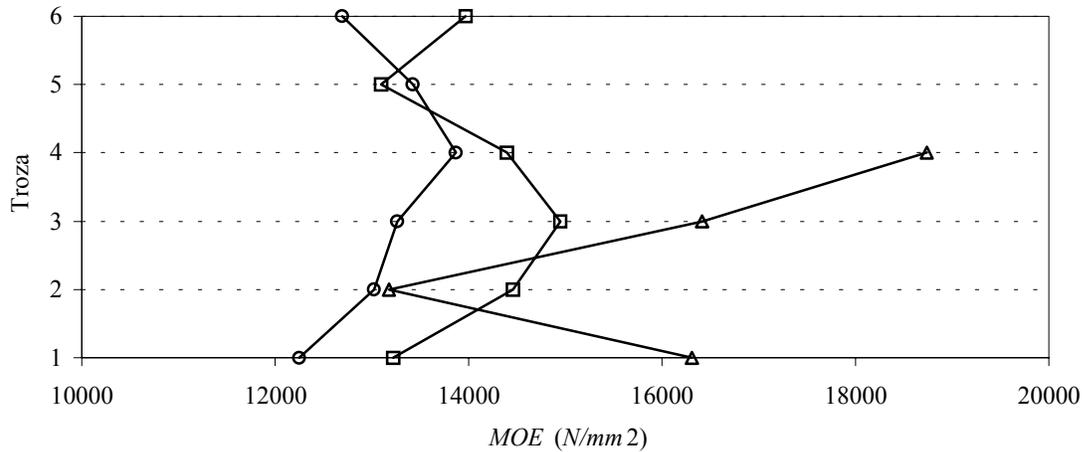


Figura 4.35 Variación del MOE en función de la altura en el árbol

(o) MOE para las 5 muestras sometidas a ensayos de flexión; (□) MOE en tracción para la M 6; (Δ) MOE en compresión para la M 7; se han considerado los valores medios y ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996).

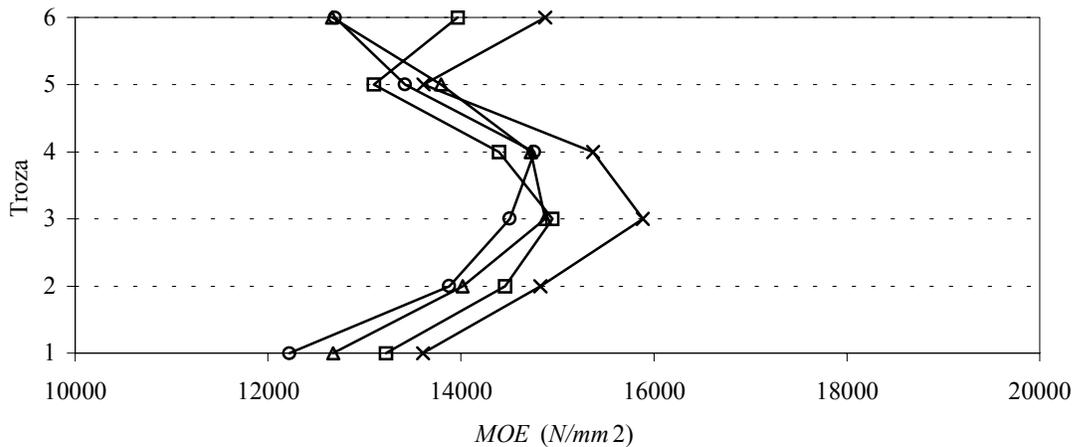


Figura 4.36 Variación del MOE en tablas de M 5 y 6 en función de la altura en el árbol

(o) Todas las tablas de M 5; (Δ) tablas de M 5 libres de médula, fisuras⁽¹⁾ y grandes defectos; (□) todas las tablas de M 6; (x) tablas de M 6 libres de médula, fisuras⁽¹⁾ y grandes defectos; (1) fisuras que exceden la longitud máxima establecida en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18; se han considerado los valores medios y ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996).

En este caso vuelve a reiterarse el comportamiento observado para las mismas tablas con relación a la resistencia, donde las probetas libres de defectos exhiben mayores valores que el total. No es posible establecer una relación clara del módulo de elasticidad con la altura, pudiendo señalarse, en línea con los datos de la Figura 4.35 para flexión y tracción, que los mayores valores se observan en las trozas intermedias.

La Figura 4.37 presenta la variación de la densidad aparente en función de la altura en el árbol. Para esta propiedad se ha considerado en forma conjunta el total de cuerpos de prueba indicados en la Tabla 4.36, efectuando la discriminación para aquellos que están libres de médula y los que la poseen. En este caso es posible apreciar valores levemente mayores en cada troza para las probetas sin médula, lo cual es congruente con los resultados encontrados en el apartado 4.1. A su vez, con la excepción de la troza 2, se observa un crecimiento de la densidad de todos los cuerpos de prueba con la altura.

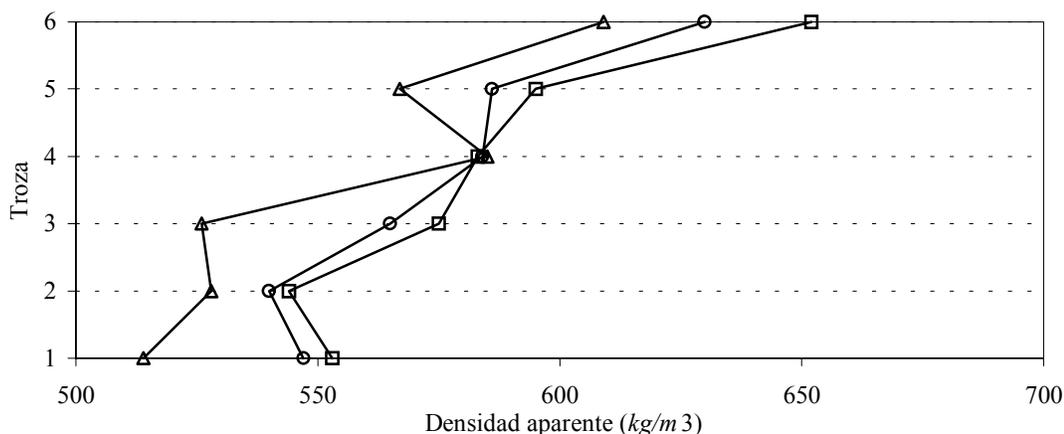


Figura 4.37 Variación de ρ en función de la altura en el árbol

(○) Todos los cuerpos de prueba; (□) cuerpos de prueba libres de médula; (Δ) cuerpos de prueba con médula; se han considerado los valores medios y ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996).

En el presente apartado se investigó la variación de la nudosidad, las propiedades mecánicas y la densidad en función de la altura en el árbol, utilizando para ello cuerpos de prueba de tamaño estructural usual. Para el estudio de la resistencia y de la rigidez se incluyó un análisis eliminando la influencia del tamaño de la sección, así como de la presencia de médula, fisuras importantes y

grandes defectos. En general no fue posible encontrar una relación que vincule las propiedades resistentes y de rigidez con la altura, exhibiendo la nudosidad y la densidad aparente un crecimiento general en función de ésta. Si bien los resultados presentados y discutidos no permiten apreciar una variación clara de las propiedades mecánicas en función de la altura de la troza, es necesario considerar que las inferiores, de mayor diámetro, producen más altos rendimientos para piezas de tamaño estructural.

En este capítulo se presentaron y discutieron los resultados obtenidos de la investigación empírica. En la parte final de cada apartado se redactaron sintéticamente las conclusiones parciales del mismo.

5 Conclusiones

Los principales objetivos de este trabajo de tesis, ya expuestos en la Introducción, son:

- 1) Diseñar un método de clasificación visual por resistencia para la madera aserrada de *Eucalyptus grandis* cultivado en Argentina, y proponer su inserción en el sistema internacional de clases resistentes establecido en las normas europeas.
- 2) Desarrollar modelos para una clasificación mecánica por resistencia de la madera considerada, en el marco del sistema internacional citado precedentemente.

Complementariamente se lograron otros resultados que amplían el conocimiento de esta especie, de alto impacto social y económico, e investigada en este caso para su uso estructural. En el presente capítulo se presentan las conclusiones obtenidas y se destacan recomendaciones tecnológicas y la necesidad de efectuar estudios en el futuro.

5.1 Conclusiones relacionadas al diseño de un método visual de clasificación por resistencia

Se determinó la influencia de los parámetros visuales sobre las propiedades mecánicas de la madera aserrada de *Eucalyptus grandis* cultivado en Argentina, tomando como base 349 cuerpos de prueba pertenecientes a 5 muestras de vigas y tablas en dimensiones estructurales usuales, sometidos al ensayo estático de flexión. La descripción y el registro de las características presentaron dificultades ocasionadas por el color y la textura de la superficie. Los resultados exhiben una

relativamente baja correlación entre la nudosidad y la resistencia. En numerosos casos no se distinguieron los anillos anuales de crecimiento, y la inclinación de las fibras presentó valores muy reducidos. La presencia de médula, asociada en muchos casos a otras características reductoras de la calidad del material, como fisuras, disminuye significativamente la resistencia y el módulo de elasticidad en flexión.

Se determinaron los valores característicos de la resistencia y del módulo de elasticidad en flexión, así como de la densidad aparente. Se encontró que la madera de *Eucalyptus grandis* de Argentina presenta una muy alta relación resistencia/densidad aparente y módulo de elasticidad/densidad aparente, siendo la última mayor a todas las contempladas en la norma EN 338 (1996) para especies frondosas. Esta particularidad, que puede constituir una especial ventaja para el uso estructural del material, indica un comportamiento similar al de las especies de coníferas. En consecuencia, y si bien es necesario determinar otras propiedades adicionales, contempladas en la norma EN 384 (1996), sus propiedades mecánicas y de densidad pueden ser comparadas con las previstas en el sistema internacional para las especies de coníferas y el álamo.

Se diseñó un método de clasificación visual por resistencia, basado en los parámetros con mayor influencia sobre las propiedades mecánicas, que permite obtener tres grados de calidad con rendimientos equilibrados:

- i) Primera clase, formada con probetas libres de médula, fisuras no permitidas en prEN 14081-1 (2000) para clases superiores a C18, grandes defectos, y nudosidad (K) menor o igual a 1/4. Esta puede ser insertada en la clase resistente C30 del sistema internacional contemplado en la norma europea EN 338 (1996).
- ii) Segunda clase, con iguales condiciones a la anterior, salvo una nudosidad (K) mayor a 1/4. Esta alcanza los resultados de resistencia, rigidez y densidad aparente estipulados para la clase C24 del mismo sistema.
- iii) Tercera clase, constituida por cuerpos de prueba sin limitación de defectos y que presenta valores de un nivel suficiente para integrar la clase C18. No obstante, en este último caso, la presencia de fisuras de tamaño excesivo aún para clases resistentes iguales o inferiores a C18, así como grandes defectos, entre otros, pueden constituir una causa de rechazo para algunas probetas que la integran.

El método desarrollado cumple con las condiciones de rigurosidad científica y sencillez en su aplicación que requiere un país carente de tradición en la temática como Argentina,

siendo apto tanto para vigas como para tablas de tamaño estructural usual. A su vez, pone de manifiesto que la adopción de procesos que disminuyen la presencia de fisuras, relacionados a la tecnología de producción y secado, así como la realización de podas programadas para minimizar la nudosidad, conducirían a un mejor rendimiento y a una optimización de la calidad del material.

Se estudiaron las propiedades en tracción y compresión paralela a las fibras y se las comparó con las de flexión. En el primer caso se utilizó una muestra integrada por 150 tablas, y en el segundo una muestra de 50 cuerpos de prueba, en ambos casos con secciones de uso normal en estructuras. Se encontró que la presencia de médula en la zona de mayor esfuerzo tiene más influencia negativa sobre las propiedades mecánicas de tracción que sobre las de flexión. Por su parte, es contradictoria su incidencia sobre las propiedades mecánicas de compresión, ya que afecta levemente la resistencia pero acusa una gran influencia sobre el módulo de elasticidad. La presencia de fisuras es poco importante para el comportamiento mecánico en tracción y compresión paralela a las fibras.

La relación entre la resistencia en tracción paralela a las fibras y la de flexión compara bien con la propuesta en las normas europeas y, en consecuencia, cuando no se dispone de datos provenientes de ensayos estáticos para la primera, sus valores para cada grado de calidad pueden obtenerse a partir de las ecuaciones establecidas en la norma EN 384 (1996). Los correspondientes módulos de elasticidad son similares, no habiéndose encontrado diferencias importantes, desde un punto de vista práctico, entre sus valores medios. Por el contrario, la resistencia y el módulo de elasticidad en compresión paralela a las fibras presentaron resultados mucho más elevados en esta especie, con relación a los de flexión, que los propuestos en normas europeas y brasileñas. En particular, la relación entre la resistencia en compresión paralela a las fibras y en flexión se incrementa para los grados de menor calidad.

5.2 Conclusiones relacionadas al desarrollo de modelos para una clasificación mecánica

La correlación entre los parámetros mecánicos, individuales y combinados, y la resistencia a flexión fue investigada para los mismos 349 cuerpos de prueba mencionados en el apartado anterior. El módulo de elasticidad en flexión es el parámetro que mejor se relaciona individualmente con la resistencia, mientras que la densidad aparente lo hace con un nivel intermedio. Se estudiaron diez criterios para expresar la nudosidad, confirmándose en general una relativamente baja relación entre esta característica y la resistencia a flexión. Los resultados prueban que la correlación se incrementa de manera importante cuando se consideran solamente los cuerpos de prueba libres de fisuras mayores a las permitidas para clases resistentes superiores a

C18 en prEN 14081-1 (2000), y grandes defectos.

Para las probetas libres de estos defectos se desarrollaron dos modelos de clasificación mecánica por resistencia, uno adoptando como parámetro el módulo de elasticidad y el otro considerando un parámetro combinado. Este último se obtuvo a través de un estudio de regresión lineal múltiple considerando como variables independientes el módulo de elasticidad, la densidad aparente y la nudosidad (*KAR3*), lo que permite alcanzar las siguientes clases:

- i) Primera clase, formada por los cuerpos de prueba con un valor para el parámetro combinado (*PC*) mayor o igual a 39,16. Esta alcanza valores característicos de resistencia, rigidez y densidad que permiten su inserción en la clase resistente *C35* del sistema internacional europeo.
- ii) Segunda clase, constituida por los cuerpos de prueba que cumplen la condición $39,16 > PC \geq 27,53$, y que reúne los requisitos para aspirar a la clase resistente *C24*.
- iii) Tercera clase, integrada por las probetas que tienen un valor del parámetro combinado menor que 27,53 y aquellas que son rechazadas en la inspección visual adicional. En este grupo, que presenta valores característicos adecuados para aspirar a la clase resistente *C18*, se incluyen casos con fisuras de tamaño excesivo aún para clases resistentes iguales o inferiores a *C18*, así como grandes defectos, entre otros, lo que puede constituir una causa de rechazo.

El modelo que utiliza al Módulo de Elasticidad global como parámetro, permite lograr los siguientes resultados:

- i) Primera clase, formada por los cuerpos de prueba con un valor para $E_{m,g}$ mayor o igual a $12346 N/mm^2$. Esta alcanza valores característicos de resistencia, rigidez y densidad que permiten su inserción en la clase resistente *C35* del sistema internacional europeo.
- ii) Segunda clase, constituida por los cuerpos de prueba que cumplen la condición $12346 N/mm^2 > E_{m,g} \geq 9365 N/mm^2$, y que reúne las condiciones para aspirar a la clase resistente *C24*.
- iii) Tercera clase, integrada por las probetas que tienen un valor del módulo de elasticidad global menor que $9365 N/mm^2$ y aquellas que son rechazadas en la inspección visual adicional. En este grupo, que presenta valores característicos adecuados para aspirar a la clase resistente *C18*, se incluyen casos con fisuras de tamaño excesivo aún para clases resistentes iguales o inferiores a *C18*, así como grandes defectos, entre otros, puede constituir una causa de rechazo.

Con ambos modelos se logró un excelente rendimiento, siendo posible asignar más del 60% de los cuerpos de prueba, sometidos al proceso de clasificación, a la clase resistente C35, considerada en este caso como grado óptimo, y más del 30% a la C24. La presencia de un importante número de probetas con fisuras importantes, que no les permiten ser asignadas a clases resistentes superiores a C18, hace aconsejable proponer, como recomendación tecnológica, la mejora de los procesos de secado y producción, con el objetivo de disminuir esos defectos.

Los dos modelos fueron también utilizados para clasificar las tablas sometidas a ensayos de tracción paralela a las fibras, con la finalidad de probar su efectividad para este caso, que reviste particular importancia en la clasificación de láminas destinadas a la construcción de vigas laminadas encoladas. En este proceso se asumió valores equivalentes para los módulos de elasticidad en flexión y en tracción. Ambos modelos mostraron rendimientos muy elevados, similares a los obtenidos con las muestras sometidas a flexión.

La mayor eficiencia de los modelos mecánicos en comparación con el método visual quedó comprobada, ya que los primeros permiten alcanzar la clase resistente C35 del sistema internacional, mientras que con el último no es posible superar la C30. A su vez, los rendimientos son muy superiores en los primeros que en el segundo. Las propiedades de la madera aserrada de *Eucalyptus grandis* de Argentina aseguran, en consecuencia, una excelente aptitud de la misma para ser sometida a una clasificación mecánica por resistencia, tanto en secciones típicas de vigas como de tablas, y en variadas dimensiones de uso estructural.

Los resultados muestran una aptitud solo levemente superior del modelo que utiliza el parámetro combinado (PC), en comparación con el que utiliza el módulo de elasticidad global ($E_{m,g}$). Esta similitud debe ser tenida en cuenta para decidir la elección de un tipo de máquina de clasificar, ya que la adopción del parámetro combinado implica mayor complejidad y costos, en comparación con la otra alternativa. Los valores encontrados justifican más la realización de programas orientados a disminuir la cantidad y tamaño de las fisuras, entre otros defectos, antes que la adopción de procesos mecánicos complejos.

La eficiencia del método dinámico de la frecuencia fundamental de vibración, para determinar el módulo de elasticidad de los cuerpos de prueba en tamaño estructural de esta especie, quedó confirmada. Los resultados prueban que esta técnica es apta para ser aplicada a probetas de muy variada calidad y tamaño. El módulo de elasticidad dinámico, obtenido a través de las vibraciones flexionales, exhibe una correlación superior con el estático que el calculado utilizando las vibraciones longitudinales, pero los coeficientes de correlación son muy altos para ambos casos. En consecuencia, puede ser tenida en cuenta la implementación de esta técnica para determinar el módulo de elasticidad en una máquina de clasificación por resistencia, representando una

alternativa al tradicional método mecánico que registra la deformación de la probeta y la fuerza que la flexiona.

5.3 Otras conclusiones del comportamiento estructural del *Eucalyptus grandis* de Argentina

Además de las conclusiones relacionadas a los objetivos centrales del trabajo, el desarrollo de la investigación empírica permitió esclarecer otros aspectos del comportamiento de este material con fines estructurales. Estas conclusiones, obtenidas de los resultados presentados y discutidos en los apartados 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9 del capítulo anterior, se sintetizan a continuación.

i) Se estudió la relación existente entre la nudosidad y la resistencia en tracción paralela a las fibras, comparándola con la obtenida para la resistencia en flexión. Los resultados obtenidos sobre un total de 299 tablas, 149 sometidas a flexión y 150 a tracción, confirman:

- La relación entre las variables no es tan estrecha si se la compara con datos de otras investigaciones realizadas tanto con especies frondosas como de coníferas. A su vez, la relación entre la nudosidad y la resistencia a tracción paralela a las fibras, expresada en forma de coeficientes de correlación, no exhibe valores superiores a la encontrada entre la nudosidad y la resistencia a flexión.
- Los criterios que son aptos exclusivamente para tablas presentan una mayor eficiencia para predecir la resistencia que aquellos diseñados tanto para vigas como para tablas, aunque las diferencias encontradas no pueden considerarse importantes para propósitos prácticos.

ii) Se investigó la relación que vincula el módulo de elasticidad global con el módulo de elasticidad local en flexión. Los resultados indican:

- El módulo de elasticidad local, libre de la influencia del esfuerzo de corte, alcanza valores medios mayores que el primero. Esa diferencia oscila entre el 6% y el 7% y no se manifiestan variaciones en la relación cuando varía la calidad de las vigas, ya sea por la presencia de médula, fisuras importantes, grandes defectos o nudosidad.
- El ajuste teórico dispuesto en la norma ASTM D 198-98 (1999) para eliminar la influencia del esfuerzo de corte sobre el módulo de elasticidad global compara bien con los valores obtenidos empíricamente. En esta serie de ensayos el módulo de elasticidad local medio es solamente un 2% mayor que el módulo de elasticidad global medio ajustado según ese criterio.
- La utilización del valor medio del módulo de elasticidad global en sustitución del local, conduce en todos los casos a posiciones situadas del lado de la seguridad.

iii) Las propiedades mecánicas en compresión paralela a las fibras fueron comparadas con las de flexión a partir de ensayos realizados sobre cuerpos de prueba provenientes de las mismas piezas aserradas. Los resultados ratifican, ahora con mayor precisión, las conclusiones obtenidas de la comparación general, ya presentadas en el apartado 5.1, destacando:

- Una elevada resistencia en compresión paralela a las fibras con relación a la de flexión. La primera, obtenida de los ensayos, es mayor que la que se calcula a partir de la de flexión por aplicación de las relaciones prescriptas en la norma europea EN 384 (1996) y brasileña NBR 7190 (1997).
- El módulo de elasticidad en compresión paralela a las fibras exhibe valores también muy elevados con relación al módulo de elasticidad en flexión, si se los compara con los estipulados en las normas mencionadas anteriormente. La relación empírica encontrada entre los valores medios del módulo de elasticidad en flexión y el de compresión paralela a las fibras, para las calidades de madera analizadas, oscila entre 0,68 y 0,74. La norma europea EN 384 (1996) no señala diferencias entre los valores medios, mientras que la brasileña NBR 7190 (1997) contempla $E_m = 0,90E_{c,0}$.

iv) Se estudió la aptitud de los ajustes previstos en la norma europea EN 384 (1996) para convertir a las condiciones de referencia la resistencia y el módulo de elasticidad en flexión. Los resultados demuestran:

- Los ajustes son adecuados para esta especie, ya que las relaciones entre la media general de cada clase resistente y la particular de cada muestra que la integra, calculadas sobre los valores ajustados, se apartan poco de la unidad.
- La resistencia, que se corrige a una altura de referencia de $150mm$, muestra que solamente en las clases de menor calidad de una muestra es excedido el valor máximo de desvío aceptado por la mencionada norma (1,20).
- El módulo de elasticidad, que se ajusta a un contenido de humedad del 12% independientemente del tamaño de la sección transversal, y no tiene un límite máximo establecido para las variaciones entre muestras, exhibe relaciones con una reducida dispersión respecto de la unidad.
- La muestra que presenta el mayor desvío respecto de la media general para la resistencia también lo hace con el módulo de elasticidad. Considerando que los ajustes para ambas propiedades se realizan según criterios distintos, el comportamiento de esa muestra podría atribuirse a la variabilidad natural del material y no al criterio utilizado para establecer condiciones de referencia comunes.

v) Se investigó la influencia que la región de cultivo ejerce sobre las principales propiedades, arribándose a las siguientes conclusiones:

- La presencia de médula es mucho mayor en la madera de Entre Ríos que en la de Corrientes, siendo las restantes características similares para ambas procedencias. Esa mayor diferencia puede explicarse por el método de muestreo utilizado, ya que en el primer caso la toma de cuerpos de prueba se hizo al azar en el aserradero y en el segundo se seleccionaron árboles completos en la plantación.
- Las propiedades mecánicas son similares para la madera de ambas regiones dentro de cada grado de calidad.
- La densidad muestra mayores valores para las probetas provenientes de Corrientes, con la sola excepción de una clase resistente.
- La prueba de la diferencia entre los valores medios de las propiedades analizadas para ambas procedencias dentro de una misma clase, indica que las diferencias no son altamente significativas y, en consecuencia, se debe aceptar que las mismas se originan en la variabilidad debida al muestreo y al azar. No obstante, la densidad aparente y el módulo de elasticidad son las propiedades que muestran las diferencias mayores.

vi) Se estudió la variación de las características y propiedades más importantes en función de la distancia al centro de crecimiento, utilizando para ese fin 66 tablas sometidas al ensayo estático de flexión e igual cantidad sometidas al ensayo de tracción paralela a las fibras. Las conclusiones son:

- Los valores medios de la nudosidad, expresada según los criterios K y $KAR3$, disminuyen cuando crece la distancia a la médula.
- La resistencia a flexión y a tracción paralela a las fibras, y los correspondientes módulos de elasticidad, se incrementan con esa distancia, mientras que para la densidad aparente no es posible establecer una relación clara con la distancia considerada.
- La adopción de prácticas silviculturales orientadas a optimizar las condiciones del material para su uso estructural, como la poda planificada, produciría alteraciones en las relaciones encontradas, disminuyendo aún más la nudosidad en los sectores externos del tronco y aumentando en consecuencia el valor de las propiedades mecánicas.
- Los resultados encontrados confirman que la madera exterior es de mejor calidad para uso en estructuras que la interior.

vii) Se analizó la variación de la nudosidad, de las propiedades mecánicas y la densidad aparente, en función de la altura en el árbol, utilizando para ello cuerpos de prueba de las 7 muestras

seleccionadas para el proyecto. El estudio de la resistencia y de la rigidez pudo efectuarse eliminando la influencia del tamaño de la sección, así como de la presencia de médula, fisuras importantes y grandes defectos. Los resultados indican:

- No se encontró una relación que vincule las propiedades resistentes y de rigidez con la altura de extracción de la troza.
- La nudosidad y la densidad aparente exhiben un crecimiento general en función de la altura.
- No obstante que los resultados presentados y discutidos no permiten apreciar una variación clara de las propiedades mecánicas en función de la altura de la troza, es necesario destacar que las inferiores, de mayor diámetro, producen más altos rendimientos para piezas de tamaño estructural.

5.4 Futuras investigaciones

A través de la investigación fue posible desarrollar un método visual y modelos mecánicos para clasificar por resistencia la madera aserrada de *Eucalyptus grandis* cultivado en Argentina. Paralelamente se esclarecieron aspectos importantes referidos al comportamiento de esta especie como material estructural. No obstante, de la discusión realizada, así como de las conclusiones alcanzadas, surge la necesidad de efectuar estudios que podrían dar respuesta a nuevos interrogantes, así como confirmar las tendencias ya encontradas, sobre una mayor base estadística. Dentro de ellos se encuentran los que se exponen a continuación:

- Determinación de las otras propiedades mecánicas complementarias, contempladas en la norma EN 384 (1996), con la finalidad de comprobar las relaciones que las vinculan entre sí, y con las fundamentales obtenidas en este trabajo (resistencia y rigidez en flexión, y densidad aparente). Esto permitiría corroborar el comportamiento similar al de las especies de coníferas y el álamo encontrado para esta especie, conforme a las relaciones establecidas en el sistema internacional establecido en la norma europea EN 338 (1996).
- Realización de mayor cantidad de ensayos estáticos en tamaño estructural usual, y con muestras seleccionadas para cada clase resistente analizada en los métodos diseñados. Esta mayor disponibilidad de resultados permitiría confirmar los valores obtenidos en el método visual y en los modelos mecánicos, y a su vez eliminar la penalización estadística por tamaño de muestra que se utilizó para el cálculo de los valores característicos. De esta manera se podría aspirar a la inserción de los grados de calidad analizados para la especie, en clases resistentes aún superiores a las obtenidas, de acuerdo con el sistema internacional antes mencionado.
- Realización de nuevos estudios de correlación entre la nudosidad y la resistencia a flexión,

diseñando un mayor número y tamaño de muestras constituidas por vigas y por tablas. Esto permitiría confirmar, dentro de niveles relativamente bajos de correlación, los mejores valores encontrados para las tablas y para las vigas por separado que para el conjunto.

- Estudio de las deformaciones diferidas bajo cargas de larga duración. Un proyecto que tiene como objetivo estudiar el comportamiento de vigas aserradas de esta especie sometidas a cargas de larga duración, ha comenzado a desarrollarse durante la ejecución del presente trabajo de tesis. Su concreción anticipada se origina luego de la obtención de conclusiones parciales y se fundamenta en el tiempo y complejidad que reviste su ejecución, así como en la importancia que reviste para el diseño. Un detalle del mismo se presenta en el Anexo B de este trabajo.

6 Bibliografía

ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997) NBR 7190, Projeto de estruturas de Madeira. ABNT, Brasil.

American Society for Testing and Materials (1994) ASTM D 143-94, Standard Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber. ASTM, West Conshohocken, PA.

American Society for Testing and materials (1998) ASTM E 1876-97, Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. ASTM, West Conshohocken, PA.

American Society for Testing and Materials (1999a) ASTM D 198-98, Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes. ASTM, West Conshohocken, PA.

American Society for Testing and Materials (1999b) ASTM D 245-98, Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber. ASTM, West Conshohocken, PA.

American Society for Testing and Materials (2000) ASTM D 3737-99, Standard Practice for Establishing Stresses for Structural Glued Laminated Timber (Glulam). ASTM, West Conshohocken, PA.

Andriamitantoa L. D. (1995) Creep. In Timber Engineering STEP 1, pp. A19/1-A19/5. Centrum

Hout, The Netherlands.

Arbeitsgemeinschaft Holz e. V. & Bruderverlag (1995) Eurocode 5, Nationales Anwendungsdokument, STEP 4. Fachverlag Holz, Düsseldorf, und Bruderverlag, Karlsruhe.

Armstrong L.D. & Kingston R.S.T. (1962) The effect of moisture content changes on the deformation of wood under stress. *Australian Journal of Applied Science*, 13(4): 257-276.

Bamber R. K.; Horne R.; Graham-Higgs A. (1982) Effect of Fast Growth on the Wood Properties of *Eucalyptus grandis*. *Aust. For. Res.*, 12: 163-167.

Belvisi Irigoyen D. S., Blanc P. F., Calvo C. F., Cotrina A. D., Cuffré A. G., Larocca F. D., Piter J. C., Torrán E. A., Villalba D. I. (1998) Utilización de nuestras maderas con fines estructurales - Análisis y propuesta. *Anales de las XVI Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural*. Asociación de Ingenieros Estructurales, Buenos Aires.

Bengtsson C. (2001) "Short-term" mechano-sorptive creep of well-defined spruce timber. *Holz als Roh- und Werkstoff* 59: 117-128.

Blaß H.J. & Görlacher R. (1996) Visuelle und maschinelle Festigkeitssortierung von Vollholz. *Mikado* 5:64-71.

Brown A. G. & Hillis W. E. (1978) General introduction. In *Eucalypts for Wood Production*, eds. W. E. Hillis and A. G. Brown, pp. 3-5. CSIRO, Melbourne.

Burger N. & Glos P. (1995) Verhältnis zwischen Zug- und Biege-Elastizitätsmoduln von Vollholz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 53: 73-74.

Burger N. & Glos P. (1996) Einfluß der Holzabmessungen auf die Zugfestigkeit von Bauschnittholz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 54: 333-340.

Burger N. & Glos P. (1997) Verhältnis von Zug- zu Biegefestigkeit bei Vollholz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 55: 345-350.

Colling F. & Dinort R. (1987) Die Ästigkeit des in den Leimbaubetrieben verwendeten

Schnittholzes. Holz als Roh- und Werkstoff 45: 23-26.

Colling F. & Görlacher R. (1989) Eigenschaften des in Leimbaubetrieben verarbeiteten Schnittholzes. Sonderdruck aus Bauen mit Holz, Nachdruck aus Heft 5/89.

Comité Europeo de Normalización (1997) UNE-EN 1310, Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de las singularidades. AENOR, Madrid.

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.

Dadswell H. (1972) The Anatomy of Eucalypt Woods. CSIRO Div. Appl. Chem. Tech. Pap. No. 66, Australia.

Deutsches Institut für Normung e. V. (1989a) DIN 4074, Teil 1, Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit. Beuth Verlag, Berlin.

Deutsches Institut für Normung e. V. (1989b) DIN 4074, Teil 3, Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit, Sortiermaschinen, Anforderungen und Prüfung. Beuth Verlag, Berlin.

Deutsches Institut für Normung e. V. (1989c) DIN 4074, Teil 4, Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit, Nachweis der Eignung zur maschinellen Schnittholzsortierung. Beuth Verlag, Berlin.

Diebold R. (1997) Möglichkeiten der maschinellen Holzsortierung mit dem Euro-GreComat. In Grazer Holzbau-Fachtagung, Sortierung und Festigkeit, B/1:1-19.

Diebold R. & Glos P. (1994) Verbesserte Holznutzung durch neuartige maschinelle Festigkeitssortierung. Holz als Roh- und Werkstoff 52:222.

Europäisches Komitee für Normung (1996a) DIN EN 338, Bauholz für tragende Zwecke, Festigkeitsklassen. Beuth Verlag, Berlin.

Europäisches Komitee für Normung (1996b) DIN EN 384, Bauholz für tragende Zwecke, Bestimmung charakteristischer Festigkeits-, Steifigkeits- und Rohdichtewerte. Beuth Verlag, Berlin.

Europäisches Komitee für Normung (1996c) DIN EN 408, Holzbauwerke, Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz, Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften. Beuth Verlag, Berlin.

Europäisches Komitee für Normung (1996d) DIN EN 518, Bauholz für tragende Zwecke, Sortierung, Anforderungen an Normen über visuelle Sortierung nach der Festigkeit. Beuth Verlag, Berlin.

Europäisches Komitee für Normung (1996e) DIN EN 519, Bauholz für tragende Zwecke, Sortierung, Anforderungen an maschinell nach der Festigkeit sortiertes Bauholz und an Sortiermaschinen. Beuth Verlag, Berlin.

Europäisches Komitee für Normung (1998a) DIN EN 1193, Holzbauwerke, Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz, Bestimmung der Scherfestigkeit und der mechanischen Eigenschaften rechtwinklig zur Faserrichtung. Beuth Verlag, Berlin.

Europäisches Komitee für Normung (1998b) DIN EN 1912, Bauholz für tragende Zwecke, Festigkeitsklassen, Zuordnung von visuellen Sortierklassen und Holzarten. Beuth Verlag, Berlin.

Europäisches Komitee für Normung (1999) DIN EN 1194, Holzbauwerke, Brettschichtholz, Festigkeitsklassen und Bestimmung charakteristischer Werte. Beuth Verlag, Berlin.

European Committee for standardization (2000a) Draft prEN 408, Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. CEN, Brussels.

European Committee for standardization (2000b) Draft prEN 14081-1, Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 1: General requirements. CEN,

Brussels.

European Committee for standardization (2000c) Draft prEN 14081-2, Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 2: Machine Grading - Additional requirements for initial type testing. CEN, Brussels.

European Committee for standardization (2000d) Draft prEN 14081-3, Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 3: Machine Grading - Additional requirements for factory production control. CEN, Brussels.

Fachverband der Sägeindustrie Österreichs (1990) Erforschung von Methoden zur Festigkeitssortierung von Schnittholz. Schlussbericht Projekt Nr. ZI. 4/110/806, Wien.

Glos P. (1995a) Solid timber - Strength classes. In Timber Engineering STEP 1, pp. A7/1-A7/8. Centrum Hout, The Netherlands.

Glos P. (1995b) Strength grading. In Timber Engineering STEP 1, pp. A6/1-A6/8. Centrum Hout, The Netherlands.

Glos P. Burger N. (1998) Maschinelle Sortierung von frisch eingeschnittenem Schnittholz. Holz als Roh- und Werkstoff 56:319-329.

Glos P. & Diebold R. (1987) Einfluß verschiedener Sortierbedingungen auf die Biegefestigkeit von Bauholz (Kantholz). Abschlußbericht 84510, Institut für Holzforschung der Universität München.

Glos P. & Diebold R. (1994) Verfahrensentwicklung und Erprobung zur maschinellen 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.

Glos P. & Tratzmiller M. (1996) Höherwertige Starkholznutzung durch verbesserte Einschnitt- und Sortierverfahren. Abschlußbericht 94506 an LWF, München.

Goens E. (1931) Determination of Young's Modulus from Flexural Vibrations. *Ann. Phys.* 11:649-78.

Görlacher R. (1984) Ein neues Messverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Holz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 42:219-222.

Görlacher R. (1990) Sortierung von Brettschichtholzlamellen nach DIN 4074 durch Messung von Longitudinalschwingungen. *Bauingenieur* 65:517-522.

Görlacher R. (1997) Möglichkeiten der maschinellen Holzsortierung mit dem GradeMaster 403. In *Grazer Holzbau-Fachtagung, Sortierung und Festigkeit, B/2: 1-10*

Hearmon R. (1966) Vibration testing of wood. *Forest Products Journal* 16:29-39.

Hermoso Prieto E. (2001) Caracterización mecánica de la madera estructural de *Pynus sylvestris L.*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Madrid.

Hillis W. E. (1978) Wood quality and utilization. In *Eucalypts for Wood Production*, eds. W. E. Hillis and A. G. Brown, pp. 258-289. CSIRO, Melbourne.

Hoffmeyer P. (1995) Wood as a building material. In *Timber Engineering STEP 1*, pp. A4/1-A4/21. Centrum Hout, The Netherlands.

Hunt D. G. (1999) A unified approach to creep of wood. *The Royal Society* 455: 4077-4095.

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.

Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (1963) IRAM 9532, Maderas, Método de determinación de la humedad. IRAM, Buenos Aires.

Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (1973) IRAM 9544, Maderas, Método de determinación de la densidad aparente. IRAM, Buenos Aires.

Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (1977) IRAM 9502, Maderas, Definiciones. IRAM, Buenos Aires.

Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (1985a) IRAM 9545, Maderas, Método de ensayo de flexión estática. IRAM, Buenos Aires.

Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (1985b) IRAM 9551, Maderas, Método de determinación de la compresión axial o paralela al grano. IRAM, Buenos Aires.

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, INTA (1995) Manual para Productores de Eucaliptos de la Mesopotamia Argentina. Grupo Forestal, EEA INTA Concordia, Argentina.

International Organization for Standardization (1975a) ISO 3130-1975 (E), Wood - Determination of moisture content for physical and mechanical tests.

International Organization for Standardization (1975b) ISO 3131-1975 (E), Wood - Determination of density for physical and mechanical tests.

International Organization for Standardization (1975c) ISO 3349-1975 (E), Wood - Determination of modulus of elasticity in static bending.

International Organization for Standardization (1985) ISO 8375-1985 (E), Solid timber in structural sizes - Determination of some physical and mechanical properties.

Johansson C.J., 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.

Kollman F. & Krech H. (1960) Dynamische Messung der elastischen Holzeigenschaften und der Dämpfung. Holz Roh- Werkstoff 18:41-54.

Larsen H. J. (1995) Limit state design and safety format. In Timber Engineering STEP 1, pp. A2/1-A2/8. Centrum Hout, The Netherlands.

Martensson A. & Thelandersson S. (1992) Control of deflections in timber structures with reference to Eurocode 5. In International Council for Building Research Studies and Documentation, Working Comisión W 18-Timber Structures, CIB-W18/25-102-2. Åhus, Sweden.

Pérez del Castillo A. (2001) Propiedades Mecánicas y Calidad de Madera de *Eucalyptus Grandis* del Norte de Uruguay. Informe de Investigación N°4, LATU, Montevideo.

Piter J. C. (1998) Análisis de deformaciones en vigas de madera según el Eurocódigo 5. Ingeniería estructural 13:15-20.

Ranta-Maunus A. (1995) Creep and effects of moisture in timber. In Informationsdienst Holz, STEP 3, pp. 4/1-4/21. Fachverlag Holz, Düsseldorf.

Sauter U.H. & Diebold R. (1997) Steigerung der Ausbeute von Kiefern-Brettlamellen hoher Tragfähigkeit durch maschinelle Festigkeitsortierung. Holz als Roh- und Werkstoff 55:237-244.

Southern Pine Inspection Bureau (1994) Standard Grading Rules for Southern Pine Lumber. SPIB, Florida.

Standards Association of Australia (1985) AS 2752-1985, Preferred numbers and their use. Standards Association of Australia, North Sydney, N.S.W.

Standards Association of Australia (1986) AS 2878-1986, Timber - Classification into strength groups. Standards Association of Australia, North Sydney, N.S.W.

Standards Australia (1998) AS/NZS 1080.2.1:1998, Timber - Methods of test - Slope of grain by scribe. Standards Australia, Australia.

Standards Australia (2000) AS 2082/2000, Timber - Hardwood - Visually stress-graded for structural purposes. Standards Australia, Australia.

Thelandersson, S. (1995a) Deformations in timber structures. In Informationsdienst Holz, STEP 3, pp. 11/1-11/16. Fachverlag Holz, Düsseldorf.

Thelandersson S. (1995b) Serviceability limit states - Deformations. In Timber Engineering STEP

Bibliografía

1, pp. A17/1-A17/8. Centrum Hout, The Netherlands.

Vihavainen T. (1995) Environmental aspects of timber. In Timber Engineering STEP 1, pp. A16/1-A16/8. Centrum Hout, The Netherlands.

Bibliografía

Anexos

Anexo A Características y propiedades de cada cuerpo de prueba

En el presente anexo se incluyen los datos particulares de cada cuerpo de prueba. Estos valores son los que se emplearon en el desarrollo del trabajo de tesis y permiten, por lo tanto, verificar los resultados presentados y discutidos.

Las abreviaturas y símbolos utilizados se encuentran detallados en la lista correspondiente (páginas v a viii). El criterio elegido para presentar la información es coincidente en general con el utilizado en los capítulos anteriores, señalándose las siguientes particularidades:

La inclinación general de las fibras se ha cuantificado solamente para aquellos casos en que la misma es igual o superior a 1/14, indicándose las restantes con el número 0.

Para el caso de las fisuras, se han señalado aquellas que superan los límites establecidos en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18, e iguales o menores a C18, Los restantes casos se indican con el número 0.

La presencia de las variables cualitativas se indican con el número 1 y su ausencia con el 0.

La ausencia de valores de determinadas variables para algunos cuerpos de prueba, indica que en esos casos los mismos no fueron utilizados en el trabajo de tesis.

Tabla AA.1 Características de los cuerpos de prueba de la Muestra 1

cp	K	KAR1	KAR2	KAR3	Kvi	KARvi	if	fis	méd	Kino	ab	gd	pr	tr
1	0,659	0,529	0,529	0,574	0,659	0,626	0	0	0	0	0	0	ER	
2	0,45	0,359	0,359	0,359	0,45	0,862	0	0	0	0	0	0	ER	
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	ER	
4	0,164	0,101	0,101	0,144	0,495	0,404	0	0	1	1	0	0	ER	
5	0,451	0,338	0,338	0,338	0,451	0,819	1/13	>C18	1	0	0	0	ER	
6	0,491	0,24	0,24	0,498	0,468	0,573	0	≤C18	1	0	0	0	ER	
7	0,493	0,376	0,376	0,376	0,493	0,47	0	≤C18	0	0	0	0	ER	
8	0,162	0,649	0,649	0,649	1	0,979	0	0	1	0	0	0	ER	
9	0,376	0,268	0,268	0,277	0,398	0,388	0	0	1	0	0	0	ER	
10	0,538	0,307	0,307	0,548	0,59	0,923	0	0	0	1	0	0	ER	
11	0,496	0,366	0,366	0,435	0,472	0,463	0	0	1	0	0	0	ER	
12	0,211	0,073	0,073	0,094	0,162	0,052	1/9	0	1	1	0	0	ER	
13	0,855	0,831	0,831	0,843	0,832	0,838	0	≤C18	0	1	0	0	ER	
14	0,675	0,174	0,226	0,226	0,675	0,572	0	0	1	0	0	0	ER	
15	0,282	0,229	0,229	0,384	0,795	0,645	0	≤C18	1	0	0	0	ER	
16	0,36	0,14	0,14	0,534	0,731	0,495	0	0	1	0	0	0	ER	
17	0,283	0,032	0,032	0,056	0,306	0,128	0	≤C18	0	0	0	0	ER	
18	0,541	0,271	0,271	0,377	0,471	0,341	0	>C18	1	0	0	0	ER	
19	0,468	0,233	0,233	0,385	0,702	0,258	0	>C18	1	1	0	0	ER	
20	0,532	0,494	0,494	0,494	0,742	0,988	1/13	0	0	0	0	0	ER	
21	0,358	0,118	0,118	0,118	0,493	0,428	0	0	0	0	0	0	ER	
22	0,768	0,365	0,365	0,387	0,698	0,71	0	0	0	0	0	0	ER	
23	0,316	0,13	0,13	0,13	0,519	0,495	0	0	0	0	0	0	ER	
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ER	
25	0,473	0,134	0,134	0,134	0,566	0,432	0	0	0	1	0	0	ER	
26	0,495	0,295	0,295	0,295	0,495	0,448	0	0	0	0	0	0	Co	1
27	0,146	0,022	0,022	0,022	0,149	0,087	1/13	0	0	0	0	0	Co	1
28	0,235	0,041	0,041	0,041	0,345	0,162	0	≤C18	0	0	0	0	Co	1
29	0,305	0,061	0,061	0,111	0,402	0,248	0	0	0	0	0	0	Co	1
30	0,365	0,271	0,271	0,446	0,519	0,512	0	≤C18	1	1	0	0	Co	1
31	0,257	0,234	0,234	0,234	0,503	0,828	0	0	0	0	0	0	Co	1
32	0,341	0,172	0,172	0,172	0,888	0,639	0	0	0	1	0	0	Co	1
33	0,47	0,47	0,47	0,493	0,659	0,867	0	0	0	0	0	0	Co	2
34	0,406	0,344	0,344	0,344	0,519	0,772	0	0	0	0	0	0	Co	2
35	0,445	0,233	0,233	0,24	0,613	0,436	0	0	0	0	0	0	Co	2
36	0,679	0,335	0,335	0,335	0,634	0,699	0	≤C18	0	0	0	0	Co	3
37	0	0	0	0	0	0	0	≤C18	0	1	0	0	Co	3
38	0,658	0,122	0,122	0,122	0,353	0,486	0	0	0	0	0	0	Co	3
39	0,518	0,361	0,361	0,361	0,817	0,987	0	≤C18	0	0	0	0	Co	4
40	0,726	0,474	0,474	0,484	0,685	0,918	0	0	0	1	0	0	Co	4
41	0,426	0,165	0,165	0,165	0,753	0,549	0	0	0	0	0	0	Co	4
42	0,73	0,368	0,368	0,368	0,66	0,679	0	0	0	0	0	0	Co	4
43	0,66	0,207	0,263	0,263	0,613	0,592	0	≤C18	0	0	0	0	Co	4
44	0,79	0,342	0,342	0,342	0,865	0,729	0	0	0	0	0	0	Co	5
45	0,589	0,389	0,637	0,637	0,655	0,814	0	0	0	1	0	0	Co	5
46	0,266	0,072	0,072	0,124	0,557	0,288	0	0	0	0	0	0	Co	5
47	0,519	0,227	0,227	0,227	0,616	0,665	0	0	0	0	0	0	Co	5
48	0,234	0,13	0,13	0,624	0,448	0,525	0	≤C18	1	0	0	0	Co	5
49	0,224	0,179	0,179	0,179	1	0,717	0	0	0	0	0	0	Co	5
50	0,36	0,315	0,341	0,472	0,847	1	0	0	0	0	0	0	Co	5

Anexos

Tabla AA.2 Propiedades de los cuerpos de prueba de la Muestra 1

cp	b	h	lt	f _m	E _{m,g}	E _l	E _f (Ca)	ρ	ρ _c	H
	mm	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	kg/m ³	%
1	42,5	44,37	999	51,0	12763	12920	12398	527	574	14
2	42,44	44,47	1001	38,3	11579	9992	11229	501	539	14
3	40,88	44,61	1002	51,1	11845	8472	10833	451	460	14
4	42,46	42,6	998	22,7	9062	7305	8377	423	452	14
5	42,83	44,34	1001	17,4	8104	4929	7502	419	441	13
6	42,74	44,84	1000	23,2	8602	8600	8316	484	517	14
7	42,56	42,82	1005	45,7	12276	10200	12591	545	539	14
8	43,31	41,42	998	33,7	8963	7297	8521	453	479	13
9	42,55	42,73	1003	35,8	11549	10750	11160	557	563	14
10	42,39	42,75	1004	37,0	9923	8445	9791	494	536	14
11	42,35	42,97	997	32,1	8524	8045	8590	442	457	14
12	42,66	43,09	997	35,0	9894	7620	9034	451	443	13
13	42,65	42,09	1000	32,1	8552	7287	9533	490	512	13
14	42,66	44,46	998	31,8	9860	8014	10189	449	483	14
15	42,61	42,76	996	29,3	11309	10448	10864	532	538	13
16	42,4	44,48	1000	47,1	12453	12008	11817	522	545	14
17	42,47	44,6	997	35,6	9739	8519	9366	438	466	13
18	42,42	44,33	1005	43,7	11701	9841	11483	548	555	14
19	42,61	42,75	1001	46,7	10308	8336	9949	472	504	14
20	43,15	43,22	996	20,4	6847	5246	7282	434	438	14
21	42,63	44,64	999	44,7	10537	9479	9981	453	462	14
22	42,95	41,63	1000	43,2	10683	9447	10159	539	548	14
23	42,41	41,2	1001	52,4	12413	10811	11686	504	518	14
24	42,33	44,42	998	37,5	11609	8446	10803	432	446	13
25	42,41	44,43	1001	50,1	12721	10769	11818	500	515	13
26	42,42	41,05	1000	65,4	12087	10540	12832	705	710	16
27	40,38	41,12	1001	80,3	14128	12677	13771	700	710	17
28	40,53	42,59	1002	42,9	11719	11972	11289	620	603	16
29	42,58	42,26	1000	34,8	8797	8059	8247	575	552	16
30	42,42	41,12	1002	37,5	6923	7629	7586	470	516	14
31	39,79	42,83	999	39,9	10847	11475	10952	606	616	16
32	40,56	41,09	1002	47,4	9413	7870	9198	457	495	15
33	42,51	44,71	998	32,8	9937	9807	10608	588	600	15
34	42,35	44,38	999	48,3	12557	10907	12365	567	572	15
35	42,4	42,74	1002	33,0	10048	9888	10787	505	552	15
36	42,35	44,19	1000	45,4	13523	11840	13634	606	623	16
37	42,15	40,9	1000	18,0	6768	8459	9447	660	667	16
38	42,54	42,56	1000	56,5	12457	14392	12159	536	563	15
39	40,37	44,36	1001	45,2	10105	11141	10157	512	547	15
40	42,35	41,3	999	56,8	11162	11193	11411	503	576	15
41	42,47	44,62	1000	47,5	13589	14661	13027	608	623	15
42	42,44	42,47	1002	47,9	12995	11207	12510	574	611	15
43	42,43	42,61	1002	55,3	13046	13934	12636	628	612	15
44	40,45	44,32	1002	52,3	11856	10820	11254	700	634	16
45	42,42	42,73	999	46,8	10884	10731	10798	558	582	15
46	42,49	41,29	1002	61,1	12296	11228	12206	631	613	15
47	42,23	42,42	1002	50,9	12963	11262	12625	618	592	15
48	42,37	42,67	998	35,1	9563	8667	9925	540	592	15
49	42,61	44,6	1000	58,3	13704	12362	13120	577	602	15
50	42,49	44,45	1004	41,7	10717	11552	10460	542	587	15

Tabla AA.3 Características de los cuerpos de prueba de la Muestra 2

<i>cp</i>	<i>K</i>	<i>KAR1</i>	<i>KAR2</i>	<i>KAR3</i>	<i>Kvi</i>	<i>KARvi</i>	<i>if</i>	<i>fis</i>	<i>méd</i>	<i>Kino</i>	<i>ab</i>	<i>gd</i>	<i>pr</i>	<i>tr</i>
1	0,603	0,131	0,245	0,473	0,603	0,431	0	≤C18	1	1	1	0	ER	
2	0,163	0,02	0,02	0,02	0,239	0,08	0	0	0	0	0	0	ER	
3	0,606	0,182	0,182	0,329	0,606	0,48	0	0	1	0	0	0	ER	
4	0,645	0,421	0,421	0,505	1	0,935	0	0	1	0	0	0	ER	
5	0,444	0,407	0,407	0,407	0,444	0,382	0	0	0	0	0	0	ER	
6	0,251	0,067	0,067	0,067	0,534	0,268	0	0	0	0	0	0	ER	
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ER	
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ER	
9	0	0	0	0	0	0	0	≤C18	0	0	0	0	ER	
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ER	
11	0,463	0,248	0,248	0,248	0,447	0	0	0	0	0	0	0	ER	
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ER	
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ER	
14	0,397	0,127	0,127	0,247	0,374	0,32	0	0	1	1	0	0	ER	
15	1	0,699	0,699	0,699	1	0,908	0	0	0	0	0	0	ER	
16	0,328	0,334	0,334	0,334	0,281	0,345	0	0	0	0	0	0	ER	
17	0,359	0,215	0,215	0,333	0,244	0,012	0	≤C18	1	1	0	0	ER	
18	0,512	0,356	0,356	0,356	0,781	0,762	1/12	0	1	1	0	0	ER	
19	0	0	0	0	0	0	0	≤C18	0	1	1	0	ER	
20	0,417	0,078	0,078	0,078	0,417	0,155	0	0	0	0	0	0	ER	
21	0,47	0,325	0,325	0,473	0,358	0,455	1/13	0	1	1	0	0	ER	
22	0,351	0,194	0,201	0,334	0,398	0,435	0	>C18	1	0	0	0	ER	
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ER	
24	0,491	0,193	0,193	0,224	0,491	0,413	0	0	1	1	0	0	ER	
25	0,492	0,12	0,12	0,296	0,492	0,367	0	≤C18	1	0	0	0	ER	
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Co	1
27	0,305	0,058	0,058	0,058	0,305	0,233	0	0	0	0	0	0	Co	1
28	0,164	0,057	0,057	0,084	0,398	0,135	0	0	0	0	0	0	Co	1
29	0,28	0,021	0,021	0,021	0,28	0,083	0	0	0	0	0	0	Co	1
30	0,527	0,083	0,083	0,146	0,527	0,331	0	0	0	1	0	0	Co	1
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Co	1
32	0,144	0,012	0,012	0,012	0,164	0,047	0	0	0	0	0	0	Co	1
33	0,167	0,137	0,137	0,137	0,7	0,548	0	0	0	0	0	0	Co	2
34	0,325	0,044	0,044	0,069	0,673	0,172	0	0	0	0	0	0	Co	2
35	0,68	0,027	0,027	0,027	0,563	0,108	0	0	0	0	0	0	Co	2
36	0,243	0,03	0,03	0,053	0,243	0,12	0	0	0	0	0	1	Co	3
37	0,754	0,056	0,056	0,056	0,653	0,224	0	0	0	0	0	0	Co	3
38	0,726	0,424	0,424	0,424	0,468	0,704	0	0	0	0	0	0	Co	3
39	0,304	0,213	0,213	0,517	0,536	0,825	0	≤C18	0	0	0	0	Co	4
40	0,208	0,09	0,09	0,09	0,868	0,36	0	0	0	1	0	0	Co	4
41	0,183	0,066	0,066	0,066	0,183	0,045	0	≤C18	1	0	0	0	Co	4
42	0,246	0,411	0,411	0,411	0,448	0,493	0	0	1	0	0	0	Co	4
43	0,49	0,432	0,432	0,432	0,651	0,475	0	>C18	0	0	0	0	Co	4
44	0,456	0,133	0,133	0,133	0,585	0,433	0	0	0	0	0	0	Co	5
45	0,372	0,272	0,272	0,272	0,329	0,286	0	0	0	0	0	0	Co	5
46	0,288	0,191	0,191	0,211	0,537	0,746	0	0	0	1	0	0	Co	5
47	0,489	0,237	0,237	0,252	0,489	0,372	0	≤C18	1	1	0	0	Co	5
48	0,515	0,23	0,23	0,361	0,633	0,508	0	0	0	1	0	0	Co	5
49	0,416	0,178	0,178	0,238	0,416	0,413	0	0	0	1	0	0	Co	5
50	0,398	0,065	0,065	0,08	0,469	0,26	0	0	0	0	0	0	Co	5

Anexos

Tabla AA.4 Propiedades de los cuerpos de prueba de la Muestra 2

cp	b	h	lt	f _m	E _{m,g}	E _i	E _f (Ca)	E _f (P)	ρ	ρ _c	H
	mm	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	kg/m ³	%
1	36,51	69,64	1497	33,9	7442	5857	8243	6358	491	489	13
2	42,85	62,8	1494	67,6	15109	15846	16545	15769	533	545	13
3	42,87	69,68	1492	58,0	14472	14788	15543	14660	627	652	14
4	42,77	69,72	1500	48,0	14210	13557	14164	14159	591	603	13
5	42,83	67,6	1497	41,4	12328	14282	13718	12829	528	493	13
6	43,1	67,79	1500	50,7	11145	12141	12075	11493	444	438	13
7	36,42	67,23	1503	89,7	18870	19093	19197	19749	676	642	14
8	38,24	65,75	1500	86,1	16979	18135	18623	18771	601	610	13
9	42,86	67,5	1501	74,8	17908	19201	18719	19607	562	587	13
10	42,92	66,04	1500	67,6	14103	15099	15634	15964	493	502	13
11	41,12	62,66	1503	84,0	18106	15408	20644	19501	683	704	14
12	42,77	66,12	1496	115,1	21491	27996	24562	25333	916	916	14
13	42,88	67,57	1500	46,2	11852	12920	12781	11801	471	472	13
14	42,81	69,63	1500	37,0	10170	9532	11312	10408	449	466	13
15	35,77	58,72	1500	46,6	13428	19911	15005	16767	1094	1003	17
16	42,74	65,81	1502	55,4	12097	13271	13544	12644	534	536	13
17	42,74	69,72	1501	68,4	13908	14215	14288	13706	601	590	13
18	40,98	67,48	1501	39,2	12616	13752	13633	12559	606	650	14
19	42,52	62,86	1499	22,9	8240	11443	8831	11583	670	689	14
20	42,7	69,51	1501	67,4	13361	14616	14067	13757	491	505	13
21	44,69	69,74	1495	31,9	12072	12648	12617	11838	492	553	13
22	42,71	67,41	1501	58,9	10940	12180	12023	10821	604	657	13
23	44,77	69,61	1500	69,1	15303	14863	16167	15695	499	500	13
24	44,84	69,73	1500	57,0	12723	14009	13278	13330	485	516	13
25	42,68	69,44	1500	40,8	8992	7936	9935	8817	471	487	13
26	35,61	58,85	1497	45,0	12050	12930	14034	13180	495	516	14
27	42,69	62,79	1497	45,2	9600	10473	11296	10452	497	513	17
28	42,72	65,57	1503	38,6	10825	12907	12358	12676	482	492	15
29	42,86	67,53	1503	56,8	10857	11958	11905	11973	478	493	14
30	36,06	65,6	1500	54,9	9149	10461	10517	9422	589	606	17
31	39,78	62,5	1499	61,4	11673	13004	13470	12579	637	632	24
32	42,73	62,53	1504	61,7	13368	13839	15798	14649	538	551	14
33	42,85	65,73	1499	42,8	9761	9663	11510	10616	508	512	14
34	44,59	67,59	1503	54,9	11731	12635	12611	12943	556	619	15
35	42,62	62,59	1500	41,8	11646	13634	13306	13701	515	562	15
36	41,23	62,53	1504	37,8	12174	13103	13836	12410	527	535	14
37	39,81	67,29	1500	56,8	14240	13193	15086	14838	542	540	14
38	42,72	67,33	1505	43,8	12075	12507	13741	12649	536	574	15
39	41,03	65,78	1502	37,3	9808	10215	11806	10864	553	567	15
40	42,65	62,64	1500	53,0	12995	14160	15507	14872	553	551	15
41	42,57	65,73	1503	35,6	11211	9956	12310	9918	546	532	15
42	44,65	67,36	1500	44,5	10487	12539	13559	12013	555	584	16
43	42,85	67,59	1504	42,8	12150	12759	14109	10412	575	584	15
44	42,76	65,78	1500	60,3	13929	14144	16580	14869	547	579	15
45	42,74	69,82	1498	53,3	12903	14214	14584	13868	470	574	14
46	42,8	69,56	1503	47,3	11997	13530	14412	14520	579	581	14
47	42,97	65,8	1500	38,1	11251	13413	13648	11214	642	631	14
48	42,7	69,52	1504	67,0	13542	16151	14480	14108	596	667	15
49	39,82	67,37	1501	51,7	14111	14739	15239	14841	587	612	15
50	42,67	69,34	1505	47,8	14302	16962	15892	16667	656	623	16

Tabla AA.5 Características de los cuerpos de prueba de la Muestra 3

cp	K	KAR1	KAR2	KAR3	Kvi	KARvi	if	fis	méd	Kino	ab	gd	pr	tr
1	0,396	0,109	0,151	0,22	0,396	0,303	0	0	1	0	0	0	ER	
2	0,8	0,208	0,382	0,568	0,727	0,608	1/13	>C18	1	0	0	0	ER	
3	0,214	0,198	0,198	0,198	0,214	0,521	0	0	1	0	0	0	ER	
4	0,222	0,144	0,144	0,151	0,508	0,246	0	>C18	0	0	0	0	ER	
5	0,404	0,229	0,229	0,455	0,538	0,526	0	0	1	0	0	0	ER	
6	0,282	0,109	0,133	0,317	0,209	0,181	0	≤C18	1	1	0	0	ER	
7	0,358	0,255	0,255	0,418	0,348	0,165	0	>C18	0	0	0	0	ER	
8	0,421	0,166	0,166	0,248	0,421	0,332	1/12	0	1	0	0	0	ER	
9	0,196	0,109	0,109	0,114	0,12	0,079	0	0	0	0	0	0	ER	
10	0,312	0,114	0,114	0,213	0,297	0,05	1/11	≤C18	1	1	0	0	ER	
11	0,672	0,252	0,301	0,337	0,672	0,588	0	>C18	1	0	0	0	ER	
12	0,184	0,067	0,067	0,1	0,218	0,199	0	≤C18	1	0	0	0	ER	
13	0,503	0,07	0,07	0,159	0,303	0,244	0	≤C18	1	0	0	0	ER	
14	0,628	0,211	0,342	0,509	0,604	0,457	0	≤C18	1	0	0	0	ER	
15	0,281	0,265	0,265	0,265	0,48	0,812	0	0	0	0	0	0	ER	
16	0,596	0,187	0,187	0,227	0,596	0,501	0	0	1	0	0	0	ER	
17	0,324	0,117	0,117	0,205	0,324	0,307	0	0	1	0	0	1	ER	
18	0,516	0,172	0,172	0,352	0,516	0,271	1/10	≤C18	1	0	0	0	ER	
19	0,328	0,098	0,098	0,16	0,328	0,321	0	≤C18	1	0	0	0	ER	
20	0,217	0,067	0,067	0,157	0,217	0,145	0	0	1	1	0	0	ER	
21	0,49	0,112	0,112	0,196	0,35	0,303	0	≤C18	1	0	0	0	ER	
22	0,42	0,121	0,121	0,305	0,42	0,306	0	0	1	0	0	0	ER	
23	0,294	0,076	0,076	0,248	0,294	0,172	0	0	0	0	0	0	ER	
24	0,507	0,236	0,236	0,282	0,528	0,285	0	≤C18	1	0	0	0	ER	
25	0,508	0,157	0,157	0,296	0,508	0,407	0	0	0	0	0	0	ER	
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Co	1
27	0	0	0	0	0	0	0	≤C18	0	0	0	0	Co	1
28	0,836	0,087	0,087	0,136	0,729	0,351	0	≤C18	1	1	0	0	Co	1
29	0,44	0,063	0,063	0,114	0,275	0,257	0	>C18	1	1	0	0	Co	1
30	0,747	0,122	0,122	0,122	0,602	0,487	0	0	0	0	0	0	Co	1
31	0,276	0,073	0,073	0,073	0,265	0	0	0	0	0	0	0	Co	1
32	0,213	0,062	0,062	0,062	0,179	0,199	0	0	0	0	0	0	Co	1
33	0,501	0,053	0,053	0,085	0,501	0,214	0	0	0	1	0	0	Co	2
34	0,654	0,052	0,052	0,052	0,537	0,209	0	0	0	0	0	0	Co	2
35	0,283	0,267	0,267	0,267	0,261	0,913	0	≤C18	0	1	0	0	Co	2
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Co	3
37	0,506	0,217	0,217	0,217	0,45	0,06	0	≤C18	1	0	0	0	Co	3
38	0,777	0,097	0,097	0,17	0,211	0,182	0	>C18	1	1	0	0	Co	3
39	0,085	0,033	0,033	0,033	0,612	0,131	0	≤C18	1	0	0	0	Co	4
40	0,482	0,305	0,305	0,305	0,343	0,486	0	0	0	0	0	0	Co	4
41	0,49	0,122	0,122	0,122	0,319	0,204	0	≤C18	1	0	0	0	Co	4
42	0,397	0,082	0,082	0,105	0,281	0,324	0	≤C18	1	1	0	0	Co	4
43	0,755	0,108	0,108	0,116	0,324	0,278	0	≤C18	1	0	0	0	Co	4
44	0,66	0,325	0,325	0,371	0,802	0,227	0	≤C18	1	0	0	0	Co	5
45	0,547	0,275	0,275	0,338	0,57	0,26	0	0	1	0	0	0	Co	5
46	0,48	0,315	0,454	0,454	0,648	0,789	0	0	0	0	0	0	Co	5
47	0,156	0,133	0,133	0,137	0,748	0,533	0	0	0	0	0	0	Co	5
48	0,31	0,186	0,186	0,213	0,397	0,693	0	0	0	0	0	0	Co	5
49	0,247	0,093	0,133	0,209	0,214	0,304	0	≤C18	1	0	0	0	Co	5
50	0,561	0,133	0,147	0,238	0,611	0,307	0	≤C18	1	1	0	0	Co	5

Anexos

Tabla AA.6 Propiedades de los cuerpos de prueba de la Muestra 3

cp	b	h	lt	f _m	E _{m,g}	E _l	E _f (Ca)	E _f (P)	ρ	ρ _c	H
	mm	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	kg/m ³	%
1	42,92	94,2	2000	44,8	12885	13384	12654	11989	477	485	13
2	41,27	94,15	1997	55,3	13363	14679	13189	13711	593	640	14
3	42,78	93,39	2004	32,1	11103	11441	10912	10982	447	467	13
4	43,27	90,11	2002	40,6	14946	15954	14675	14506	561	574	14
5	42,78	94,1	2005	41,8	11292	10768	10834	10002	444	470	13
6	41,9	95,9	2004	41,3	11557	10723	10943	10671	483	489	14
7	40,57	92,08	2002	47,8	13568	12845	13220	12629	492	507	14
8	40,39	93,49	2005	40,5	10907	11098	10608	10325	500	509	13
9	39,91	91,67	2002	32,1	12626	12012	12007	11470	499	523	13
10	40,43	96	2002	38,7	11229	12117	11150	10634	524	557	13
11	41,67	96,57	2005	37,1	10380	10659	10278	9817	442	472	13
12	41,37	92,6	2006	51,5	9089	8780	8761	8138	469	468	13
13	42,96	95,43	1994	29,9	11030	10217	10072	8893	442	458	13
14	41,39	94,64	2001	59,0	13784	13779	13823	13546	615	633	14
15	41,71	96,03	2005	35,2	10348	9923	10097	10472	430	445	13
16	41,93	94,05	2001	39,0	9683	9651	9601	8942	484	468	14
17	40,13	94,1	2000	46,4	10628	9836	10182	8988	432	470	13
18	42,6	94,28	2004	58,5	12308	11988	12410	11999	588	627	14
19	42,68	95	1997	44,0	9474	8534	9324	8591	456	466	13
20	41,41	92,61	2000	26,6	11665	11176	10832	10573	460	478	13
21	42,85	93,43	1998	41,9	10420	10334	10238	10256	503	525	14
22	42,87	95,61	2001	35,6	10384	10212	10392	10151	452	468	13
23	44,19	91,59	1999	49,7	10448	10383	10159	9933	435	469	14
24	40,3	94,7	2001	29,1	9006	9288	9032	8651	460	479	13
25	41,3	92,64	2001	47,2	13995	13428	13584	13538	474	495	13
26	41,3	91,51	2003	59,5	14436	14340	14011	14579	580	585	15
27	42,62	91,51	2003	64,5	13782	13980	13982	14025	581	611	15
28	42,55	92,09	2004	35,0	9388	9560	9663	9749	509	536	18
29	42,88	90,9	2003	38,9	10619	11692	10583	11210	501	545	16
30	41,52	90,42	2002	51,7	11385	12310	11481	12460	523	527	15
31	41,51	90,63	2003	56,0	12586	12982	12459	12960	559	568	15
32	41,3	89,17	2006	59,3	12992	14169	14114	13882	710	670	23
33	39,9	90,38	2002	57,4	11119	13819	11771	12683	714	733	29
34	42,8	87,48	2002	57,9	13643	16341	14199	14361	732	646	24
35	40,32	91,88	2002	42,6	11398	13212	11823	13495	529	541	15
36	41,83	92,2	2005	65,2	14168	13751	13915	13913	534	553	14
37	42,27	89	1998	42,9	10923	11279	11014	10953	505	529	16
38	42,65	92,64	2005	37,1	11066	11394	11148	11604	512	524	16
39	42,5	94,65	2000	21,6	10451	11181	10726	11063	510	553	15
40	42,71	93,3	2005	53,8	14288	14124	14121	13931	570	593	15
41	42,33	93,91	2004	32,7	11275	11315	11124	11911	530	529	15
42	42,77	94,62	1999	38,8	13494	14396	13601	13728	610	614	16
43	41,63	92,66	2004	36,9	11923	12767	12053	12935	519	541	14
44	42,42	87,82	1999	40,5	11012	11715	11169	11790	536	567	15
45	42,57	87,74	2008	40,9	11777	11676	11688	11219	551	572	16
46	41,68	89,64	2004	38,6	10310	13129	13175	13830	524	564	17
47	42,8	90,03	2005	50,9	14142	15618	14898	16279	631	652	16
48	42,85	90,44	2002	45,4	13088	14016	13796	14559	582	596	15
49	44,17	88,9	2005	48,2	12794	13596	13661	14028	591	604	16
50	44,22	90,95	2003	32,9	11338	11351	12063	12162	565	582	15

Tabla AA.7 Características de los cuerpos de prueba de la Muestra 4

cp	K	KAR1	KAR2	KAR3	Kvi	KARvi	if	fis	méd	Kino	ab	gd	pr	tr
1	0,161	0,15	0,15	0,15	0,14	0,025	0	0	0	1	0	1	ER	
2	0,362	0,112	0,161	0,218	0,362	0,301	0	≤C18	1	1	0	0	ER	
3	0,299	0,103	0,103	0,103	0,506	0,279	0	0	0	0	0	0	ER	
4	0,244	0,192	0,192	0,362	0,87	0,704	0	0	0	1	0	0	ER	
5	0,571	0,172	0,172	0,301	0,571	0,41	0	0	1	0	0	0	ER	
6	0,526	0,121	0,121	0,187	0,551	0,461	0	≤C18	0	0	0	0	ER	
7	0,339	0,158	0,226	0,343	0,453	0,425	0	≤C18	1	1	0	0	ER	
8	0,488	0,162	0,162	0,24	0,666	0,488	0	>C18	1	0	0	0	ER	
9	0,4	0,089	0,089	0,146	0,207	0,159	0	≤C18	1	0	0	0	ER	
10	0,37	0,156	0,156	0,192	0,395	0,37	0	>C18	1	1	0	0	ER	
11	0,273	0,252	0,252	0,252	0,259	0,078	1/13	≤C18	0	1	0	0	ER	
12	0,621	0,127	0,127	0,209	0,621	0,501	0	0	1	1	0	0	ER	
13	0,222	0,197	0,197	0,197	0,483	0,507	0	≤C18	1	1	0	0	ER	
14	0,33	0,105	0,105	0,105	0,4	0,396	0	0	0	1	0	0	ER	
15	0,177	0,066	0,066	0,066	0,177	0,085	0	0	0	0	0	0	ER	
16	0,266	0,234	0,234	0,408	0,435	0,196	0	0	0	1	0	0	ER	
17	0,139	0,136	0,136	0,136	0,139	0,221	0	0	0	0	0	0	ER	
18	0,35	0,308	0,308	0,308	0,35	0,252	0	0	0	1	0	0	ER	
19	0,154	0,147	0,147	0,147	0,147	0,377	0	≤C18	1	0	0	0	ER	
20	0,426	0,255	0,311	0,311	0,426	0,22	0	0	1	1	0	0	ER	
21	0,241	0,091	0,091	0,108	0,207	0,106	1/13	≤C18	1	0	0	0	ER	
22	0,308	0,075	0,075	0,112	0,486	0,292	0	>C18	0	1	0	0	ER	
23	0,548	0,17	0,17	0,234	0,523	0,539	0	≤C18	0	0	0	0	ER	
24	0,484	0,147	0,147	0,253	0,484	0,422	0	0	0	1	0	0	ER	
25	0,472	0,139	0,139	0,139	0,309	0,35	0	≤C18	1	1	0	0	ER	
26	0,087	0,021	0,021	0,021	0,316	0,074	0	0	0	0	0	0	Co	1
27	0,414	0,074	0,074	0,15	0,406	0,296	0	≤C18	1	0	0	0	Co	1
28	0,273	0,071	0,071	0,112	0,472	0,285	0	≤C18	1	1	0	0	Co	1
29	0,193	0,156	0,156	0,223	0,324	0,266	0	≤C18	0	1	0	0	Co	1
30	0,476	0,081	0,081	0,097	0,426	0,322	0	≤C18	1	1	0	0	Co	1
31	0,151	0,057	0,057	0,057	0,151	0,137	0	>C18	0	1	0	0	Co	1
32	0,573	0,088	0,153	0,219	0,524	0,292	0	≤C18	1	0	0	0	Co	1
33	0,185	0,093	0,093	0,11	0,164	0,149	0	≤C18	1	0	0	0	Co	2
34	0,189	0,095	0,095	0,142	0,422	0,258	0	≤C18	1	1	0	0	Co	2
35	0,118	0,115	0,115	0,115	0,118	0,458	0	0	0	1	0	0	Co	2
36	0,464	0,239	0,239	0,239	0,464	0,25	1/12	>C18	1	0	0	0	Co	3
37	0,161	0,052	0,052	0,052	0,119	0,06	0	0	1	0	0	0	Co	3
38	0,387	0,227	0,38	0,48	0,606	0,562	0	≤C18	1	0	0	0	Co	3
39	0,167	0,032	0,032	0,032	0,384	0,128	0	>C18	0	1	0	0	Co	4
40	0,472	0,122	0,186	0,277	0,458	0,355	0	≤C18	1	1	0	0	Co	4
41	0,558	0,084	0,084	0,084	0,413	0,336	0	0	0	1	0	0	Co	4
42	0,266	0,224	0,224	0,224	0,266	0,32	0	0	0	0	0	0	Co	4
43	0,69	0,169	0,169	0,231	0,69	0,524	0	0	1	0	0	0	Co	4
44	0,259	0,254	0,254	0,254	0,563	0,758	0	0	0	0	0	0	Co	5
45	0,609	0,158	0,158	0,165	0,515	0,188	0	>C18	0	0	0	0	Co	5
46	0,321	0,075	0,075	0,094	0,186	0,3	1/10	0	1	0	0	0	Co	5
47	0,181	0,167	0,167	0,167	0,181	0,219	0	0	0	1	0	0	Co	5
48	0,449	0,102	0,102	0,221	0,449	0,326	0	≤C18	1	1	0	0	Co	5
49	0,189	0,125	0,125	0,168	0,516	0,501	0	0	0	0	0	0	Co	5
50	0,541	0,171	0,27	0,296	0,518	0,47	0	0	1	0	1	0	Co	5

Anexos

Tabla AA.8 Propiedades de los cuerpos de prueba de la Muestra 4

cp	b	h	lt	f _m	E _{m,g}	E _{m,l}	E _l	E _f (Ca)	E _f (P)	ρ	ρ _c	H
	mm	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	kg/m ³	%				
1	42,55	143,06	3006	21,3	11930	13220	12490	12537	10848	490	480	14
2	41,47	145,14	2995	46,6	10067	10501	10634	10056	9555	538	513	14
3	43,51	143,98	3001	43,4	12150	13018	13744	12743	12591	515	530	15
4	40,25	143,18	3001	38,1	12708	11264	13158	13358	13194	511	540	14
5	42,06	143,87	2994	36,6	10764	10779	11067	10927	10634	486	525	15
6	39,92	142,56	2991	55,9	12433	13007	12693	13222	12455	503	499	14
7	41,95	147,29	2999	46,2	11016	12377	12308	11268	10484	504	539	14
8	42,04	147,65	3000	39,6	11894	13257	12957	12080	11483	503	518	15
9	41,27	144,92	3003	42,8	11045	11683	11217	10781	10415	490	493	14
10	40,5	144,02	2994	37,2	11179	11905	11785	11192	11259	508	515	14
11	41,01	143	3000	45,2	10610	11483	10264	10716	10466	437	457	14
12	40,29	141,84	2999	41,3	11314	12111	12259	11449	10857	431	467	13
13	41,43	143,99	3008	32,9	11745	10626	13670	12149	11392	508	521	14
14	42,47	142,89	2997	45,4	12345	13245	12299	12591	12299	504	521	14
15	40,18	135,85	3003	67,2	16446	18438	16928	16980	15563	494	526	14
16	41,34	142,97	3005	34,4	12087	13798	14037	12569	11797	522	539	14
17	41,48	136,3	3001	64,3	14760	16834	16344	15231	14641	546	565	14
18	39,7	142,92	3008	61,5	15671	17589	15818	15293	14796	526	549	13
19	41,24	143,15	2998	39,8	11791	13392	11836	11815	11287	461	466	14
20	40,87	143,03	3003	49,6	12569	13612	13769	12726	11848	464	508	13
21	41,4	145,22	3004	53,8	11718	12940	11879	11886	11002	462	477	14
22	41,11	142,82	2999	60,4	13515	14155	12816	14013	13591	497	529	13
23	40,16	137,72	3001	41,0	10695	10361	10870	10948	10888	469	506	13
24	41,32	142,97	3003	48,7	13380	15315	14140	13871	13450	492	522	13
25	42,1	146,09	3005	48,5	12454	13875	12797	12425	11387	496	498	13
26	41,16	138,41	3000	39,1	12167	13297	13376	12025	11830	545	560	18
27	39,45	135,25	2996	25,8	10201	10806	10193	10521	9695	525	545	21
28	40,29	136,27	2993	28,6	9726	10637	10868	10264	11171	515	517	17
29	40,14	134,76	3000	33,6	10644	11211	11278	11275	11353	505	531	15
30	39,93	136,46	2999	21,4	8250	8782	8862	9403	8728	497	509	17
31	39,57	132,73	2999	33,4	10987	12077	12750	11578	10976	532	578	19
32	40,11	137,4	2999	28,2	10185	12129	13345	11381	11162	587	587	20
33	42,78	140,32	2998	11,5	9357	10519	11126	10043	9530	451	490	18
34	40,33	137,21	2997	32,7	10143	11347	12121	10917	10156	551	513	17
35	39,7	135,26	2994	38,5	13091	14318	15313	14644	14208	547	547	15
36	43,04	135,96	3001	15,3	10421	11006	11703	10783	10770	509	509	16
37	40,01	142,5	3005	63,6	14044	16067	15191	14378	13944	565	570	16
38	41,27	144,88	2998	35,9	10519	10725	12183	11369	10311	484	531	15
39	41,66	143,7	2999	53,8	12842	14402	14018	13087	12306	484	519	15
40	43,63	137,77	2996	27,3	12189	12893	14122	12894	12405	530	556	15
41	41,19	137,44	3005	16,4	11332	10085	14916	11933	12278	538	581	15
42	43,63	142,77	3001	43,3	11905	12893	16613	12310	11266	519	528	16
43	42,02	142,81	3000	34,2	11250	11683	11328	10857	10162	490	539	16
44	42,65	138,97	3000	42,1	13909	13398	14801	14037	13147	555	585	16
45	42,71	142,68	3004	29,0	12896	14259	14695	13708	13103	545	552	14
46	41,33	140,04	3004	25,9	11735	12563	13207	12493	11795	503	545	15
47	42,13	143,59	3000	56,1	14328	15259	16029	14710	14074	549	600	15
48	42,31	142,99	2995	32,3	12659	12849	14379	13125	12256	583	579	15
49	40,7	142,55	2997	51,8	12762	13008	14978	13121	12835	580	587	15
50	42,51	139,76	3001	53,2	13900	13610	15376	14544	13758	587	623	15

Tabla AA.9 Características de los cuerpos de prueba de la Muestra 5

cp	K	KAR1	KAR2	KAR3	Kta1	Kta2	Kta3	Kta4	if	fis	méd	Kino	ab	gd	pr	pm	tr
1	0,306	0,211	0,211	0,287	0,237	0,253	0,153	0,306	1/13	0	1	1	0	0	ER		
2	0,327	0,086	0,086	0,295	0,056	0,266	0,163	0,327	0	0	0	0	0	0	ER		
3	0,306	0,291	0,291	0,541	0,291	0,541	0,291	0,306	0	0	0	0	0	0	ER		
4	0,464	0,392	0,392	0,477	0,343	0,464	0,232	0,464	0	0	1	0	0	0	ER		
5	0,278	0,244	0,244	0,244	0,139	0,139	0,139	0,278	0	0	0	1	0	0	ER		
6	0,285	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,285	0	0	0	0	0	0	ER		
7	0,46	0,332	0,332	0,518	0,332	0,501	0,332	0,46	0	0	1	0	0	0	ER		
8	0,408	0,202	0,202	0,443	0,107	0,347	0,204	0,408	0	0	1	0	0	0	ER		
9	0,316	0,269	0,269	0,269	0,269	0,269	0,269	0,316	0	0	0	0	0	0	ER		
10	0,501	0,222	0,417	0,611	0,143	0,388	0,25	0,94	1/13	0	1	0	0	0	ER		
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	ER		
12	0,231	0,076	0,076	0,308	0,06	0,292	0,116	0,231	0	0	1	0	0	0	ER		
13	0,254	0,223	0,223	0,223	0,223	0,223	0,223	0,254	0	0	0	0	0	0	ER		
14	0,265	0,133	0,133	0,204	0,133	0,204	0,133	0,265	0	≤C18	1	0	0	0	ER		
15	0,524	0,278	0,537	0,537	0,322	0,608	0,266	0,531	0	0	1	0	0	0	ER		
16	0,552	0,247	0,247	0,247	0,097	0,22	0,276	0,552	0	0	1	0	0	0	ER		
17	0,306	0,286	0,286	0,413	0,209	0,337	0,153	0,306	0	>C18	1	0	0	0	ER		
18	0,327	0,164	0,164	0,246	0,164	0,337	0,164	0,327	0	0	1	0	0	0	ER		
19	0,368	0,184	0,184	0,184	0,184	0,184	0,184	0,368	0	0	1	0	0	0	ER		
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ER		
21	0,231	0,216	0,216	0,264	0,216	0,279	0,216	0,231	0	0	0	0	0	0	ER		
22	0,253	0,237	0,237	0,237	0,237	0,237	0,237	0,253	0	≤C18	0	0	0	0	ER		
23	0,491	0,498	0,498	0,498	0,532	0,532	0,46	0,491	0	0	0	0	0	0	ER		
24	0,28	0,265	0,265	0,36	0,265	0,36	0,265	0,28	1/13	0	0	0	0	0	ER		
25	0,28	0,054	0,054	0,054	0,035	0,035	0,14	0,28	0	0	0	0	0	0	ER		
26	0,232	0,142	0,142	0,142	0,116	0,116	0,116	0,232	0	0	0	0	0	0	ER		
27	Desestimado																
28	0,39	0,332	0,332	0,369	0,332	0,385	0,332	0,39	0	0	0	0	0	0	ER		
29	0,235	0,235	0,235	0,242	0,235	0,26	0,235	0,235	0	0	0	0	0	0	ER		
30	0,316	0,285	0,285	0,285	0,285	0,285	0,285	0,316	1/13	0	0	0	0	0	ER		
31	0,391	0,146	0,146	0,304	0,084	0,243	0,195	0,391	0	0	0	0	0	0	ER		
32	0,169	0,169	0,169	0,169	0,169	0,169	0,169	0,169	0	0	0	0	0	0	ER		
33	0,317	0,164	0,164	0,164	0,158	0,158	0,158	0,317	0	0	0	0	0	0	ER		
34	0,184	0,112	0,112	0,112	0,112	0,112	0,112	0,184	0	0	0	0	0	0	ER		
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ER		
36	0,496	0,448	0,448	0,448	0,448	0,448	0,448	0,496	0	0	0	0	0	0	ER		
37	0	0	0	0	0	0	0	0	1/10	0	1	0	0	0	ER		
38	0,616	0,319	0,319	0,461	0,455	0,624	0,389	0,777	0	0	1	0	0	0	ER		
39	0,322	0,287	0,287	0,618	0,211	0,548	0,161	0,322	0	>C18	1	0	0	0	ER		
40	0,369	0,31	0,31	0,31	0,343	0,343	0,29	0,369	0	0	0	0	0	0	ER		
41	0,201	0,159	0,159	0,159	0,159	0,159	0,159	0,201	0	0	0	0	0	0	ER		
42	0,112	0,112	0,112	0,112	0,112	0,112	0,112	0,112	0	0	0	0	0	0	ER		
43	0,251	0,035	0,035	0,035	0,026	0,026	0,125	0,251	0	0	0	0	0	0	ER		
44	0,337	0,222	0,222	0,260	0,169	0,235	0,169	0,337	1/13	0	1	0	0	0	ER		
45	0,212	0,18	0,18	0,390	0,18	0,365	0,18	0,212	0	≤C18	1	1	0	0	ER		
46	0,232	0,156	0,156	0,272	0,142	0,259	0,116	0,232	0	0	1	0	0	0	ER		
47	0,215	0,06	0,06	0,154	0,061	0,164	0,107	0,215	0	0	0	0	0	0	ER		
48	0,527	0,443	0,443	0,443	0,443	0,443	0,443	0,527	1/13	>C18	0	0	0	0	ER		
49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ER		
50	0,143	0,056	0,08	0,08	0,077	0,148	0,071	0,143	0	0	1	0	0	0	ER		

Anexos

Tabla AA.10 Características de los cuerpos de prueba de la Muestra 5

cp	K	KAR1	KAR2	KAR3	Kta1	Kta2	Kta3	Kta4	if	fis	méd	Kino	ab	gd	pr	pm	tr
51	0,225	0,107	0,107	0,176	0,107	0,174	0,112	0,225	0	0	1	0	0	0	ER		
52	0,201	0,082	0,082	0,093	0,1	0,148	0,1	0,201	1/13	0	1	0	0	0	ER		
53	0,127	0,095	0,095	0,243	0,095	0,169	0,095	0,127	0	>C18	0	1	0	0	ER		
54	0,475	0,247	0,29	0,415	0,311	0,628	0,237	0,739	0	0	1	0	0	0	ER		
55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	ER		
56	0,264	0,233	0,391	0,444	0,233	0,439	0,233	0,264	0	0	0	0	0	0	ER		
57	0,264	0,185	0,185	0,333	0,185	0,317	0,185	0,264	0	0	0	0	0	0	ER		
58	0,127	0,121	0,121	0,121	0,121	0,121	0,121	0,127	0	0	0	0	0	0	ER		
59	0,285	0,314	0,314	0,314	0,316	0,316	0,264	0,285	0	0	1	0	0	0	ER		
60	0,211	0,195	0,195	0,195	0,195	0,195	0,195	0,211	0	0	0	0	0	0	ER		
61	0,274	0,269	0,269	0,269	0,269	0,269	0,269	0,274	0	0	0	0	0	0	ER		
62	0,283	0,077	0,077	0,101	0,032	0,053	0,274	0,548	0	0	1	1	0	0	ER		
63	0,111	0,015	0,015	0,015	0,028	0,028	0,056	0,111	0	0	0	0	0	0	ER		
64	0,23	0,088	0,088	0,148	0,115	0,193	0,115	0,23	0	0	0	0	0	0	ER		
65	0,466	0,389	0,53	0,685	0,46	0,889	0,365	0,963	0	0	1	0	0	0	ER		
66	0,285	0,088	0,167	0,341	0,079	0,148	0,142	0,506	0	0	1	0	0	0	ER		
67	0,179	0,174	0,174	0,26	0,174	0,284	0,174	0,179	0	0	0	0	0	0	ER		
68	0,164	0,164	0,164	0,319	0,164	0,292	0,164	0,164	0	0	0	0	0	0	ER		
69	0,105	0,07	0,07	0,07	0,052	0,052	0,052	0,105	0	0	0	1	0	0	ER		
70	0,158	0,143	0,143	0,176	0,143	0,206	0,143	0,158	0	0	0	0	0	0	ER		
71	0,414	0,26	0,44	0,489	0,258	0,517	0,232	0,738	0	0	1	0	0	0	ER		
72	0,211	0,064	0,064	0,166	0,069	0,137	0,105	0,211	0	0	0	0	0	0	ER		
73	0,738	0,501	0,56	0,56	0,501	0,564	0,501	0,939	0	0	1	0	0	0	ER		
74	0,423	0,317	0,317	0,436	0,317	0,375	0,317	0,423	0	0	1	0	0	0	ER		
75	0,27	0,216	0,216	0,389	0,216	0,389	0,216	0,27	0	0	0	0	0	0	ER		
76	0,706	0,564	0,643	0,643	0,564	0,638	0,564	0,706	0	0	1	1	0	0	Co	1	1
77	0,244	0,238	0,238	0,238	0,238	0,238	0,238	0,244	0	0	0	0	0	0	Co	2	1
78	0,19	0,189	0,189	0,189	0,248	0,248	0,179	0,19	0	0	0	0	0	0	Co	3	1
79	0,243	0,232	0,232	0,232	0,232	0,232	0,232	0,243	0	0	0	0	0	0	Co	3	1
80	0,243	0,079	0,079	0,079	0,121	0,121	0,121	0,243	0	0	0	0	0	0	Co	2	1
81	0,263	0,153	0,17	0,17	0,153	0,179	0,153	0,263	0	0	0	0	0	0	Co	1	1
82	0,211	0,051	0,051	0,051	0,106	0,106	0,106	0,211	0	0	0	0	0	0	Co	4	1
83	0,189	0,179	0,179	0,179	0,179	0,179	0,179	0,189	0	0	0	0	0	0	Co	3	1
84	0,285	0,047	0,047	0,047	0,037	0,037	0,142	0,285	0	0	0	0	0	0	Co	2	1
85	0,338	0,338	0,338	0,338	0,38	0,38	0,332	0,338	0	0	0	0	0	0	Co	3	1
86	0,274	0,269	0,269	0,33	0,269	0,401	0,269	0,274	0	0	1	0	0	0	Co	0	1
87	0,646	0,516	0,516	0,516	0,516	0,516	0,516	0,646	0	0	0	0	0	0	Co	1	1
88	0,116	0,046	0,046	0,046	0,079	0,079	0,058	0,116	0	0	0	0	0	0	Co	2	1
89	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	Co		1
90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Co		1
91	0,085	0,012	0,012	0,012	0,032	0,032	0,042	0,085	0	0	0	0	0	0	Co		1
92	0,58	0,204	0,204	0,229	0,079	0,19	0,29	0,58	0	0	0	0	0	0	Co	1	1
93	0,445	0,126	0,126	0,337	0,064	0,275	0,222	0,445	0	0	0	0	0	0	Co	2	1
94	0,233	0,239	0,239	0,239	0,259	0,259	0,233	0,233	0	0	0	0	0	0	Co	2	1
95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	Co	2	2
96	0,212	0,212	0,212	0,328	0,212	0,328	0,212	0,212	1/10	0	0	0	0	0	Co	3	2
97	0,615	0,449	0,449	0,488	0,103	0,151	0,5	1	0	>C18	0	1	0	0	Co	0	2
98	0,465	0,476	0,476	0,54	0,508	0,622	0,427	0,465	0	0	0	0	0	0	Co	1	2
99	0,349	0,314	0,314	0,314	0,354	0,354	0,301	0,349	0	0	0	0	0	0	Co	2	2
100	0,359	0,322	0,322	0,322	0,322	0,322	0,322	0,359	0	0	0	0	0	0	Co	3	2

Tabla AA.11 Características de los cuerpos de prueba de la Muestra 5

cp	K	KAR1	KAR2	KAR3	Kta1	Kta2	Kta3	Kta4	if	fis	méd	Kino	ab	gd	pr	pm	tr
101	0,39	0,321	0,637	0,637	0,316	0,637	0,321	0,716	0	>C18	1	0	0	0	Co	2	2
102	0,137	0,132	0,132	0,132	0,132	0,132	0,132	0,137	0	0	0	0	0	0	Co	2	2
103	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Co	3	2
104	0	0	0	0	0	0	0	0	0	≤C18	0	0	0	0	Co	4	2
105	0,465	0,445	0,445	0,445	0,502	0,502	0,423	0,465	0	0	0	0	0	0	Co	2	2
106	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Co	4	2
107	0,307	0,043	0,043	0,043	0,153	0,153	0,153	0,307	0	0	0	0	0	0	Co	2	2
108	0,211	0,079	0,079	0,079	0,106	0,106	0,106	0,211	0	0	0	0	0	0	Co	3	3
109	0,6	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,6	0	0	0	0	0	0	Co	2	3
110	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0	0	0	0	0	0	Co	3	3
111	0,608	0,486	0,486	0,486	0,523	0,523	0,453	0,647	0	>C18	0	0	0	0	Co	2	3
112	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	Co	3	3
113	0,282	0,091	0,091	0,176	0,141	0,272	0,141	0,282	0	0	1	0	0	0	Co	0	3
114	0,413	0,365	0,365	0,365	0,365	0,365	0,365	0,413	0	0	0	0	0	0	Co	2	3
115	0,366	0,309	0,309	0,309	0,309	0,309	0,309	0,366	0	0	0	1	0	0	Co	1	4
116	0,242	0,226	0,226	0,303	0,226	0,337	0,226	0,242	0	0	0	0	0	0	Co	1	4
117	0,664	0,294	0,468	0,661	0,174	0,437	0,332	0,81	0	0	1	1	0	0	Co	0	4
118	0,444	0,391	0,415	0,415	0,391	0,465	0,391	0,444	0	0	0	0	0	0	Co	2	4
119	0,18	0,164	0,164	0,238	0,164	0,238	0,164	0,18	0	0	0	0	0	0	Co	2	4
120	0,358	0,353	0,353	0,353	0,353	0,353	0,353	0,358	0	0	0	0	0	0	Co	2	4
121	0,582	0,556	0,556	0,556	0,556	0,556	0,556	0,582	0	0	1	0	0	0	Co	0	5
122	0,309	0,325	0,325	0,47	0,334	0,445	0,3	0,309	0	0	0	1	0	0	Co	1	5
123	0,582	0,52	0,52	0,52	0,618	0,618	0,557	0,582	0	0	0	0	0	0	Co	1	5
124	0,271	0,237	0,441	0,468	0,237	0,484	0,237	0,349	0	0	0	0	0	0	Co	1	5
125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Co	3	5
126	0,242	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,199	0,242	0	0	0	0	0	0	Co	1	5
127	0,368	0,121	0,121	0,121	0,068	0,068	0,184	0,368	0	0	1	0	0	0	Co	0	5
128	0,387	0,305	0,305	0,445	0,305	0,378	0,305	0,387	0	0	0	0	0	0	Co	1	5
129	0,358	0,331	0,331	0,408	0,394	0,476	0,307	0,358	0	0	0	1	0	0	Co	2	5
130	0,543	0,485	0,508	0,508	0,485	0,533	0,435	0,543	0	0	0	0	0	0	Co	2	6
131	0,281	0,257	0,257	0,318	0,257	0,325	0,257	0,281	0	0	1	1	0	0	Co	0	6
132	0,43	0,432	0,432	0,822	0,506	0,9	0,419	0,43	0	0	0	0	0	0	Co	2	6
133	0,368	0,249	0,327	0,665	0,102	0,465	0,184	0,543	0	≤C18	1	1	0	0	Co	0	6
134	0,246	0,23	0,23	0,25	0,23	0,276	0,23	0,246	0	0	0	1	0	0	Co	1	6
135	0,281	0,189	0,189	0,288	0,189	0,256	0,261	0,521	0	0	1	1	0	0	Co	1	6
136	0,46	0,234	0,251	0,491	0,281	0,424	0,23	0,531	0	0	1	0	0	0	Co		
137	0,252	0,277	0,476	0,476	0,295	0,494	0,247	0,474	0	0	0	0	0	0	Co		
138	0,464	0,337	0,337	0,337	0,337	0,337	0,337	0,464	0	0	0	1	0	0	Co		
139	0,357	0,332	0,332	0,332	0,332	0,332	0,332	0,357	0	0	0	0	0	0	Co	1	
140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Co		1
141	0,242	0,231	0,231	0,231	0,231	0,231	0,231	0,242	0	>C18	0	0	0	0	Co		1
142	0,529	0,367	0,367	0,367	0,367	0,367	0,367	0,529	0	0	0	0	0	0	Co		1
143	0,19	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,19	0	0	0	0	0	0	Co	3	2
144	0,401	0,097	0,097	0,097	0,201	0,201	0,201	0,401	0	0	0	0	0	0	Co	2	2
145	0,201	0,0665	0,0665	0,0665	0,074	0,074	0,1	0,201	0	0	0	0	0	0	Co	4	2
146	0,306	0,2176	0,2176	0,2176	0,079	0,079	0,153	0,306	0	0	0	0	0	0	Co	3	4
147	0,334	0,329	0,329	0,329	0,329	0,329	0,329	0,334	0	0	0	0	0	0	Co	2	5
148	0,48	0,542	0,542	0,649	0,511	0,618	0,429	0,48	0	0	1	0	0	0	Co	1	5
149	0,194	0,169	0,169	0,169	0,169	0,169	0,169	0,194	0	0	0	0	0	0	Co	2	5
150	0,358	0,272	0,469	0,491	0,228	0,562	0,179	0,61	0	0	1	1	0	0	Co	0	

Anexos

Tabla AA.12 Propiedades de los cuerpos de prueba de la Muestra 5

cp	b	h	f _m	E _{m,g}	ρ	H
	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	%
1	94,76	21,29	50,6	11785	535	15
2	97,89	20,99	61,3	12400	488	15
3	97,96	20,96	70,8	12026	585	15
4	94,79	21,31	31,9	9007	499	15
5	96,99	18,25	85,1	14538	607	15
6	94,8	20,94	32,6	8844	421	15
7	97,88	21,18	61,8	11056	532	14
8	97,87	21,15	46,7	10565	508	15
9	94,82	21,23	80,2	12583	545	15
10	97,89	21,4	57,9	8643	570	15
11	91,91	18,31	92,9	19105	625	14
12	99,39	18,22	74,5	12485	569	15
13	94,31	18,38	84,5	14097	551	15
14	98,06	21,33	64,3	13558	609	15
15	97,87	21	35,7	7429	477	15
16	97,81	21,2	59,5	12198	581	16
17	97,97	21,16	30,1	8962	484	15
18	97,85	21,07	59,7	11459	526	15
19	97,95	21,3	55,1	11178	502	15
20	90,13	17,99	92,3	15411	640	15
21	95,04	18,22	62,4	11942	504	14
22	90,76	21,36	57,2	12659	611	15
23	97,75	21,03	55,9	9815	686	15
24	99,98	18,19	72,4	11081	573	15
25	99,83	18,22	84,6	15537	557	14
26	94,7	21,32	87,8	14452	570	15
27	Desestimado					
28	94,79	21,32	66,5	15340	567	14
29	97,91	21,05	46,6	9601	445	14
30	94,90	21,34	59,7	12107	554	15
31	94,75	21,43	58,2	12278	519	15
32	94,42	17,99	96,1	15897	720	15
33	94,73	21,26	69,8	14447	593	15
34	97,88	21,20	68,2	12348	591	15
35	94,82	21,21	84,8	17845	557	14
36	94,84	21,19	70,4	11682	598	15
37	92,85	21,11	37,5	7536	504	15
38	97,79	21,11	37,5	7865	644	16
39	99,52	18,02	35,8	8822	540	15
40	94,85	21,45	54,4	10782	458	15
41	94,51	18,40	80,5	13129	658	15
42	97,96	21,36	58,8	12338	487	15
43	95,68	18,12	54,9	17685	611	15
44	97,91	21,25	49,7	9799	474	15
45	94,49	18,19	53,1	6117	537	15
46	94,74	21,09	64,0	11835	563	15
47	97,84	21,35	67,2	13030	578	15
48	94,82	21,32	66,7	10668	518	15
49	99,56	18,06	65,5	15077	534	14
50	97,91	21,20	48,0	10445	491	15

Tabla AA.13 Propiedades de los cuerpos de prueba de la Muestra 5

cp	b	h	f _m	E _{m,g}	ρ	H
	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	%
51	97,91	21,27	62,4	11592	526	15
52	94,73	20,90	57,3	10341	519	15
53	94,42	17,96	44,9	9956	468	14
54	94,77	21,38	39,4	9534	472	14
55	94,59	18,19	59,4	10753	447	14
56	94,59	18,21	54,0	8904	540	15
57	94,68	21,38	80,5	13844	591	15
58	94,83	21,39	70,1	13443	545	15
59	94,82	21,10	49,3	8763	457	14
60	94,66	21,05	57,3	10924	455	14
61	94,86	21,27	68,7	12741	491	14
62	94,94	21,22	40,6	9610	462	15
63	90,05	18,02	93,6	17224	639	14
64	95,75	18,24	59,5	10982	463	14
65	94,49	18,23	36,3	6840	488	14
66	94,78	21,06	44,7	10558	460	14
67	94,94	21,42	58,9	9901	514	15
68	97,77	21,36	81,4	13998	577	15
69	95,38	17,95	111,4	17740	708	15
70	94,66	21,28	69,1	12138	494	15
71	94,79	20,98	62,1	10121	610	15
72	94,88	21,44	65,4	12575	579	14
73	94,83	21,16	47,6	11152	587	14
74	94,65	21,32	69,7	11301	552	15
75	92,59	18,14	52,6	11895	568	14
76	94,88	21,43	27,5	7160	512	15
77	94,41	17,94	54,6	10215	504	15
78	94,80	21,42	67,1	11828	546	15
79	94,74	21,13	70,2	11979	516	14
80	94,81	21,49	58,1	12584	514	15
81	94,95	21,52	42,0	10771	514	15
82	94,66	20,82	81,0	14457	548	15
83	94,99	21,15	70,6	11663	546	14
84	94,77	21,26	64,0	10021	496	15
85	94,81	21,32	66,8	11283	597	15
86	94,88	21,39	35,3	8917	566	15
87	92,95	21,32	49,1	11378	547	14
88	94,94	21,20	70,1	13428	525	15
89	94,27	21,08	90,9	13523	659	17
90	94,05	21,26	75,1	12217	598	17
91	94,40	21,35	74,1	12023	546	16
92	94,89	21,36	54,8	10546	648	16
93	94,42	21,25	56,0	10057	546	16
94	94,62	21,20	88,1	15132	687	16
95	92,52	21,16	46,0	12119	498	16
96	94,46	21,38	71,7	12163	614	16
97	92,65	21,14	49,9	10355	510	16
98	92,45	21,42	34,3	8531	573	16
99	94,59	21,35	62,0	12454	551	16
100	94,72	21,01	57,5	11982	548	15

Anexos

Tabla AA.14 Propiedades de los cuerpos de prueba de la Muestra 5

cp	b	h	f _m	E _{m,g}	ρ	H
	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	%
101	94,94	21,21	52,9	12897	613	15
102	94,88	21,38	55,3	11677	499	14
103	94,80	21,14	69,2	14227	515	15
104	94,89	20,97	74,1	14423	561	15
105	94,65	21,37	39,6	10033	675	16
106	96,45	20,98	106,6	19297	703	15
107	94,47	21,30	88,6	16150	623	16
108	94,70	21,30	63,1	16110	606	15
109	95,14	21,35	45,9	9497	595	15
110	94,86	21,26	73,0	12578	570	14
111	92,80	21,39	61,1	13024	716	16
112	94,55	21,39	81,4	16970	637	15
113	95,68	21,59	49,4	12470	575	15
114	94,53	21,24	66,8	14478	637	16
115	95,50	21,16	74,8	14545	591	15
116	95,08	21,59	70,5	12879	594	15
117	94,86	21,45	42,4	14016	534	15
118	94,63	21,29	56,1	13471	619	15
119	94,55	21,23	61,8	13302	524	15
120	94,79	21,37	77,1	15105	669	15
121	97,96	21,18	39,0	9896	508	15
122	103,33	21,32	58,2	10983	606	15
123	97,86	21,36	50,9	9144	621	16
124	103,26	21,23	62,5	10603	574	15
125	94,79	21,48	89,9	16927	559	14
126	103,25	21,22	63,7	13452	577	14
127	103,23	21,29	57,9	13659	587	15
128	103,25	20,74	60,9	11859	601	15
129	97,72	21,27	72,6	14880	646	15
130	103,15	21,05	54,7	10370	653	15
131	103,11	21,29	60,0	12536	631	15
132	97,78	21,32	51,3	13219	722	15
133	103,13	20,98	62,8	11280	665	15
134	97,73	21,31	72,9	12209	552	15
135	97,84	21,32	67,1	12194	553	15
136	97,91	20,99	42,3	10332	562	15
137	103,29	21,22	49,0	11262	676	16
138	94,84	21,09	54,6	12744	644	15
139	97,97	20,84	62,4	12337	519	15
140	94,75	20,88	59,3	13273	541	15
141	95,08	21,18	57,1	10524	486	14
142	92,63	21,35	52,6	9850	541	15
143	94,68	21,11	69,8	13283	532	15
144	94,72	21,50	59,3	13646	519	15
145	94,74	21,11	86,4	15592	575	14
146	94,64	21,12	65,4	13850	597	15
147	92,80	21,35	66,6	13371	560	15
148	97,92	21,21	52,7	11314	639	15
149	97,69	21,32	92,7	15877	739	15
150	103,23	21,05	49,2	10363	581	15

Tabla AA.15 Características de los cuerpos de prueba de la Muestra 6

cp	K	KAR1	KAR2	KAR3	Kta1	Kta2	Kta3	Kta4	fis	méd	gd	pr	pm	tr
1	0,203	0,165	0,165	0,233	0,165	0,24	0,165	0,203	0	0	0	ER		
2	0,352	0,314	0,314	0,314	0,314	0,314	0,314	0,352	0	0	0	ER		
3	0,452	0,38	0,647	0,914	0,38	0,914	0,38	0,76	0	0	0	ER		
4	0,293	0,278	0,278	0,278	0,278	0,278	0,278	0,293	0	0	0	ER		
5	0,438	0,293	0,428	0,591	0,27	0,428	0,255	0,438	0	1	0	ER		
6	0,242	0,206	0,206	0,206	0,206	0,206	0,206	0,242	0	0	0	ER		
7	0,716	0,16	0,16	0,394	0,194	0,367	0,194	0,388	>C18	1	0	ER		
8	0,212	0,051	0,051	0,091	0,106	0,146	0,106	0,212	0	0	0	ER		
9	0,304	0,304	0,304	0,462	0,304	0,462	0,304	0,304	0	0	0	ER		
10	0,265	0,12	0,12	0,127	0,133	0,199	0,133	0,265	0	1	0	ER		
11	0,756	0,104	0,104	0,156	0,229	0,448	0,229	0,459	>C18	1	0	ER		
12	0,264	0,243	0,243	0,243	0,243	0,243	0,243	0,264	0	1	0	ER		
13	0,359	0,261	0,261	0,271	0,261	0,288	0,261	0,359	0	0	0	ER		
14	0,228	0,206	0,206	0,295	0,263	0,352	0,183	0,228	0	1	0	ER		
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ER		
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ER		
17	0,42	0,227	0,227	0,227	0,21	0,21	0,21	0,42	0	0	0	ER		
18	0,354	0,317	0,317	0,317	0,317	0,317	0,317	0,354	0	0	0	ER		
19	0,282	0,172	0,172	0,277	0,172	0,277	0,172	0,282	0	1	0	ER		
20	0,761	0,111	0,111	0,149	0,212	0,292	0,212	0,423	0	1	0	ER		
21	0,812	0,275	0,275	0,439	0,297	0,494	0,247	0,312	0	0	0	ER		
22	0,327	0,117	0,117	0,19	0,117	0,169	0,163	0,327	0	1	0	ER		
23	0,434	0,399	0,399	0,498	0,405	0,504	0,355	0,434	>C18	1	0	ER		
24	0,195	0,18	0,18	0,226	0,18	0,277	0,18	0,195	0	1	0	ER		
25	0,222	0,237	0,237	0,237	0,252	0,252	0,227	0,242	>C18	0	0	ER		
26	0,393	0,342	0,342	0,715	0,342	0,709	0,342	0,393	0	1	0	ER		
27	0,247	0,116	0,116	0,116	0,123	0,123	0,123	0,247	0	0	0	ER		
28	0,408	0,347	0,347	0,484	0,438	0,687	0,333	0,408	0	1	0	ER		
29	0,395	0,395	0,395	0,395	0,395	0,395	0,395	0,395	0	0	0	ER		
30	0,263	0,176	0,176	0,192	0,242	0,242	0,163	0,263	0	0	0	ER		
31	0,575	0,122	0,122	0,187	0,137	0,305	0,137	0,275	>C18	1	0	ER		
32	0,38	0,369	0,369	0,485	0,369	0,485	0,369	0,38	0	0	0	ER		
33	0,277	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,277	0	0	0	ER		
34	0,395	0,302	0,302	0,302	0,302	0,302	0,302	0,395	0	0	0	ER		
35	0,213	0,177	0,177	0,177	0,106	0,106	0,106	0,213	0	0	0	ER		
36	0,388	0,149	0,246	0,29	0,194	0,414	0,194	0,388	>C18	1	0	ER		
37	0,422	0,158	0,178	0,336	0,158	0,255	0,296	0,816	0	1	0	ER		
38	0,439	0,275	0,275	0,355	0,275	0,412	0,275	0,325	0	1	0	ER		
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ER		
40	0,159	0,159	0,159	0,159	0,159	0,159	0,159	0,159	0	0	0	ER		
41	0,215	0,116	0,116	0,116	0,107	0,107	0,107	0,215	0	0	0	ER		
42	0,375	0,194	0,194	0,26	0,194	0,338	0,194	0,277	0	1	0	ER		
43	0,622	0,373	0,373	0,547	0,373	0,547	0,373	0,428	0	0	0	ER		
44	0,205	0,182	0,182	0,182	0,102	0,102	0,102	0,205	0	0	0	ER		
45	0,598	0,258	0,258	0,301	0,258	0,344	0,258	0,334	>C18	1	0	ER		
46	0,286	0,265	0,265	0,265	0,265	0,265	0,265	0,286	0	1	0	ER		
47	0,485	0,212	0,212	0,291	0,267	0,464	0,212	0,424	>C18	1	0	ER		
48	0,418	0,184	0,184	0,215	0,209	0,278	0,209	0,418	0	0	0	ER		
49	0,367	0,346	0,346	0,477	0,346	0,477	0,346	0,367	0	0	0	ER		
50	0,308	0,298	0,341	0,341	0,298	0,338	0,298	0,497	0	0	0	ER		

Anexos

Tabla AA.16 Características de los cuerpos de prueba de la Muestra 6

cp	K	KAR1	KAR2	KAR3	Kta1	Kta2	Kta3	Kta4	fis	méd	gd	pr	pm	tr
51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ER		
52	0,298	0,144	0,144	0,253	0,175	0,409	0,149	0,298	0	1	0	ER		
53	0,352	0,308	0,308	0,308	0,402	0,402	0,308	0,352	0	0	0	ER		
54	0,209	0,144	0,144	0,293	0,167	0,381	0,209	0,523	0	1	0	ER		
55	0,33	0,261	0,261	0,261	0,261	0,261	0,261	0,33	0	0	0	ER		
56	0,391	0,179	0,179	0,303	0,179	0,309	0,179	0,304	0	1	0	ER		
57	0,185	0,159	0,159	0,251	0,147	0,239	0,092	0,185	0	1	0	ER		
58	0,286	0,293	0,293	0,276	0,35	0,35	0,265	0,286	0	0	0	ER		
59	0,211	0,178	0,178	0,32	0,2	0,342	0,153	0,211	0	0	0	ER		
60	0,21	0,195	0,195	0,195	0,195	0,195	0,195	0,21	0	0	0	ER		
61	0,824	0,314	0,314	0,385	0,323	0,329	0,252	0,263	0	1	0	ER		
62	0,314	0,23	0,23	0,335	0,23	0,308	0,23	0,314	0	1	0	ER		
63	0,341	0,277	0,277	0,277	0,277	0,277	0,277	0,341	0	0	0	ER		
64	0,235	0,197	0,197	0,204	0,197	0,224	0,197	0,235	0	1	0	ER		
65	0,256	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,256	0	0	0	ER		
66	0,873	0,172	0,172	0,275	0,208	0,304	0,149	0,235	0	0	0	ER		
67	0,149	0,092	0,092	0,092	0,075	0,075	0,075	0,149	0	0	0	ER		
68	0,408	0,303	0,303	0,303	0,204	0,204	0,204	0,408	0	0	0	ER		
69	0,222	0,222	0,222	0,222	0,222	0,222	0,222	0,222	0	0	0	ER		
70	0,352	0,309	0,309	0,446	0,309	0,48	0,309	0,352	0	1	0	ER		
71	0,291	0,265	0,265	0,461	0,251	0,447	0,201	0,382	0	1	0	ER		
72	0,383	0,307	0,445	0,453	0,277	0,6	0,242	0,605	0	1	0	ER		
73	0,369	0,226	0,226	0,353	0,226	0,293	0,226	0,226	0	1	0	ER		
74	0,284	0,273	0,273	0,273	0,273	0,273	0,273	0,284	0	0	0	ER		
75	0,384	0,378	0,378	0,378	0,378	0,378	0,378	0,384	0	0	0	ER		
76	0,335	0,167	0,167	0,23	0,167	0,167	0,167	0,335	0	1	0	Co	1	1
77	0,363	0,175	0,175	0,175	0,181	0,181	0,181	0,363	0	0	0	Co	2	1
78	0,155	0,066	0,066	0,066	0,078	0,078	0,078	0,155	0	0	0	Co	3	1
79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Co	3	1
80	0,064	0,011	0,011	0,011	0,043	0,043	0,032	0,064	0	0	0	Co	2	1
81	0,232	0,063	0,063	0,063	0,085	0,085	0,085	0,171	0	0	0	Co	1	1
82	0,149	0,069	0,069	0,069	0,074	0,074	0,074	0,149	0	0	0	Co	4	1
83	0,178	0,095	0,095	0,095	0,089	0,089	0,089	0,178	>C18	0	0	Co	3	1
84	0,211	0,179	0,179	0,179	0,179	0,179	0,179	0,211	0	1	0	Co	2	1
85	0,23	0,175	0,175	0,175	0,115	0,115	0,115	0,23	0	0	0	Co	3	1
86	0,56	0,074	0,074	0,074	0,06	0,06	0,181	0,362	>C18	1	0	Co	0	1
87	0,203	0,155	0,155	0,251	0,155	0,251	0,155	0,203	0	0	0	Co	1	1
88	0,159	0,048	0,048	0,048	0,08	0,08	0,08	0,159	0	0	0	Co	2	1
89	0	0	0	0	0	0	0	0	>C18	0	0	Co		1
90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Co		1
91	0,198	0,132	0,132	0,165	0,132	0,132	0,132	0,198	0	0	0	Co		1
92	0,583	0,047	0,047	0,073	0,144	0,165	0,133	0,267	0	1	0	Co	1	1
93	1	0,208	0,208	0,208	0,213	0,213	0,208	0,219	0	0	0	Co	2	1
94	0,058	0,026	0,026	0,026	0,105	0,105	0,029	0,058	0	0	0	Co	2	1
95	0,34	0,302	0,302	0,302	0,302	0,302	0,302	0,34	0	0	0	Co	2	2
96	0,32	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,32	0	0	0	Co	3	2
97	0,666	0,582	0,582	0,582	0,574	0,574	0,522	0,666	0	1	0	Co	0	2
98	0,421	0,332	0,332	0,462	0,332	0,404	0,332	0,421	0	0	0	Co	1	2
99	0,435	0,245	0,245	0,245	0,245	0,245	0,245	0,435	0	0	0	Co	2	2
100	0,143	0,137	0,137	0,137	0,137	0,137	0,137	0,143	0	0	0	Co	3	2

Tabla AA.17 Características de los cuerpos de prueba de la Muestra 6

cp	K	KAR1	KAR2	KAR3	Kta1	Kta2	Kta3	Kta4	fis	méd	gd	pr	pm	tr
101	0,075	0,016	0,016	0,016	0,048	0,048	0,038	0,075	0	0	0	Co	2	2
102	0,132	0,132	0,132	0,132	0,132	0,132	0,132	0,132	0	0	0	Co	3	2
103	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Co	4	2
104	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Co	2	2
105	0,326	0,029	0,029	0,029	0,163	0,163	0,163	0,326	0	0	0	Co	3	2
106	0,24	0,224	0,224	0,224	0,224	0,224	0,224	0,24	0	0	0	Co	1	2
107	0,554	0,277	0,277	0,543	0,277	0,393	0,277	0,554	>C18	0	0	Co	2	3
108	0,196	0,158	0,158	0,158	0,158	0,158	0,158	0,196	0	0	0	Co	2	3
109	0,317	0,296	0,296	0,296	0,296	0,296	0,296	0,317	>C18	0	0	Co	2	3
110	0,329	0,303	0,303	0,303	0,303	0,303	0,303	0,329	0	0	0	Co	2	3
111	0,374	0,231	0,231	0,415	0,231	0,418	0,231	0,374	0	0	0	Co	1	3
112	0,241	0,176	0,176	0,176	0,176	0,176	0,176	0,241	0	0	0	Co	2	3
113	0,277	0,128	0,128	0,128	0,139	0,139	0,139	0,277	0	0	0	Co	2	3
114	0,308	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,308	0	0	0	Co	0	4
115	0,506	0,382	0,382	0,576	0,382	0,576	0,382	0,506	0	1	0	Co	1	4
116	0,285	0,279	0,279	0,455	0,279	0,455	0,279	0,285	0	0	0	Co	2	4
117	0,283	0,137	0,137	0,137	0,141	0,141	0,141	0,283	0	0	0	Co	3	4
118	0,33	0,29	0,29	0,407	0,266	0,282	0,266	0,33	0	0	0	Co	3	4
119	0,262	0,131	0,131	0,243	0,131	0,247	0,131	0,262	0	0	0	Co	1	5
120	0,418	0,318	0,492	0,568	0,393	0,646	0,288	0,418	0	1	0	Co	0	5
121	0,249	0,234	0,234	0,334	0,234	0,339	0,234	0,249	0	0	0	Co	2	5
122	0,566	0,162	0,191	0,191	0,061	0,077	0,286	0,981	0	1	0	Co	0	5
123	0,375	0,361	0,361	0,361	0,385	0,385	0,321	0,375	0	0	0	Co	2	5
124	0,385	0,315	0,315	0,612	0,375	0,646	0,296	0,385	0	0	0	Co	1	5
125	0,467	0,393	0,393	0,393	0,393	0,393	0,393	0,467	0	0	0	Co	2	5
126	0,491	0,341	0,609	0,609	0,362	0,641	0,245	0,818	>C18	1	0	Co	0	5
127	0,301	0,341	0,341	0,491	0,348	0,493	0,301	0,301	0	0	0	Co	1	5
128	0,453	0,406	0,406	0,468	0,403	0,489	0,403	0,453	0	1	0	Co	1	6
129	0,388	0,323	0,323	0,403	0,323	0,408	0,323	0,388	0	0	0	Co	0	6
130	1	0,202	0,202	0,365	0,202	0,365	0,202	0,405	0	1	0	Co	1	6
131	0,42	0,381	0,381	0,605	0,381	0,596	0,381	0,42	0	0	0	Co	1	6
132	0,476	0,241	0,241	0,438	0,325	0,544	0,291	0,583	0	1	0	Co	0	6
133	0,326	0,306	0,306	0,306	0,306	0,306	0,306	0,326	0	0	0	Co	2	6
134	0,409	0,096	0,096	0,096	0,054	0,054	0,204	0,409	0	0	0	Co		
135	0,322	0,277	0,277	0,277	0,277	0,277	0,277	0,322	0	0	0	Co		
136	0,342	0,195	0,195	0,376	0,195	0,376	0,195	0,342	0	0	0	Co		
137	0,298	0,236	0,236	0,346	0,293	0,383	0,204	0,298	0	1	0	Co	1	
138	0,84	0,325	0,325	0,653	0,188	0,727	0,213	0,427	0	1	0	Co	0	
139	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Co		1
140	0,108	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,108	0	0	0	Co		1
141	0,175	0,143	0,143	0,143	0,252	0,252	0,137	0,175	0	0	0	Co		1
142	0,395	0,166	0,166	0,317	0,249	0,389	0,197	0,395	0	0	0	Co	2	2
143	0,213	0,208	0,208	0,208	0,208	0,208	0,208	0,213	0	0	0	Co	3	2
144	0,163	0,148	0,148	0,148	0,138	0,138	0,138	0,163	0	0	0	Co	4	2
145	0,381	0,348	0,348	0,348	0,348	0,348	0,348	0,381	0	0	0	Co	3	3
146	0,256	0,208	0,208	0,276	0,208	0,261	0,208	0,256	>C18	0	0	Co	2	4
147	0,527	0,478	0,478	0,591	0,478	0,591	0,478	0,527	0	0	0	Co	3	5
148	0,249	0,23	0,257	0,623	0,224	0,623	0,224	0,339	0	1	0	Co	1	5
149	0,311	0,17	0,17	0,241	0,209	0,438	0,156	0,467	0	1	0	Co	0	5
150	0,412	0,262	0,262	0,532	0,323	0,565	0,237	0,313	0	0	0	Co	1	

Anexos

Tabla AA.18 Propiedades de los cuerpos de prueba de la Muestra 6

cp	b	h	lt	f _{i,0}	E _{i,0}	E _I	E _f (P)	ρ	ρ _c	H
	mm	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	kg/m ³	%
1	20,61	93,71	1200	29,8	11470	8901	9495	478	500	14
2	19,45	93,81	1201	30,6	13354	10676	12311	565	551	14
3	20,68	97,34	1200	19,7	9482	10542	9438	581	609	14
4	21,45	98,86	1198	26,6	12399	11781	12398	528	550	15
5	22,7	98,16	1201	13,3	11383	10565	10092	539	579	15
6	21,19	99,3	1203	38,7	13145	10374	12070	551	565	14
7	20,96	97,97	1199	19,6	11270	9295	10940	557	608	15
8	20,93	99,23	1200	41,1	15265	11461	14305	587	586	14
9	21,16	98,58	1202	24,0	11279	9380	10741	446	477	14
10	21,19	97,98	1204	17,2	11130	12357	10629	482	500	14
11	22,2	95,9	1200	16,6	9900	7740	9671	490	487	15
12	21,17	98,63	1201	32,8	13085	10415	12614	527	550	14
13	21,03	91,95	1201	23,8	11007	10011	11064	505	527	14
14	21,08	100,86	1203	38,1	13507	10558	12338	567	585	14
15	20,98	91,35	1205	73,3	21824	18415	20734	596	619	14
16	20,49	92,15	1203	51,5	17943	15385	17178	568	567	14
17	18,51	90,58	1201	42,9	13996	13192	13842	659	667	14
18	21,17	96,1	1199	37,0	14731	14064	13625	625	668	15
19	22,79	95,81	1200	40,4	10398	10128	10028	527	547	14
20	21,03	99,2	1204	33,1	9931	10158	9145	522	523	15
21	19,71	99,24	1197	26,5	11062	9541	10361	418	525	14
22	22,46	97,92	1200	35,9	11475	12548	11204	556	583	15
23	22,78	101,28	1200	23,3	10749	7842	10351	511	545	15
24	21,3	97,32	1200	33,8	13589	12609	12540	542	554	14
25	22,53	99,05	1202	37,1	12433	11002	11862	569	559	15
26	17,07	96,62	1198	27,8	9083	9630	9556	545	575	14
27	21,28	93,12	1199	30,3	16843	15743	16761	545	550	14
28	21,32	100,46	1204	22,8	10733	11663	11038	676	656	15
29	20,57	93,64	1203	54,9	14732	13316	14785	645	649	14
30	18,40	95,01	1200	31,2	10636	8506	9969	537	538	14
31	22,62	98,30	1202	22,7	7829	7393	7699	484	521	14
32	20,00	94,85	1200	32,3	13298	14309	14636	680	707	14
33	20,34	94,03	1202	29,2	12984	11919	12343	530	552	14
34	18,36	91,08	1198	21,5	10937	11298	11651	699	696	15
35	22,80	94,11	1202	56,9	15930	15333	14347	601	576	14
36	22,84	97,94	1205	25,1	10811	9909	10307	519	532	14
37	21,31	98,04	1201	24,9	9984	9456	9661	520	530	14
38	22,78	98,35	1200	18,0	11142	9015	9912	516	531	14
39	20,24	93,40	1204	42,2	16252	14185	14677	581	574	14
40	20,79	94,40	1198	43,2	15745	12841	13851	565	589	14
41	18,47	97,71	1200	81,5	17693	16548	14826	559	587	14
42	21,34	90,12	1202	21,6	8164	7505	7697	469	475	14
43	19,28	100,55	1197	27,3	11275	10602	10502	577	617	14
44	19,17	97,71	1204	64,0	18155	15538	16804	576	604	14
45	20,08	98,81	1205	19,2	13316	11580	12116	581	653	15
46	19,46	98,00	1200	32,6	11626	10724	10010	511	535	14
47	22,70	99,13	1198	26,2	13788	14932	12812	586	614	14
48	22,63	100,54	1201	29,8	11721	10926	10770	538	570	14
49	20,03	95,30	1200	26,7	11915	11750	11746	508	540	14
50	19,28	100,54	1201	40,1	12233	11302	11210	614	635	14

Tabla AA.19 Propiedades de los cuerpos de prueba de la Muestra 6

cp	b	h	lt	f _{t,0}	E _{t,0}	E _I	E _f (P)	ρ	ρ _c	H
	mm	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	kg/m ³	%
51	19,39	90,35	1200	78,0	20465	16485	17673	600	574	14
52	22,65	94,09	1198	22,5	10057	8876	9478	483	516	14
53	21,32	90,81	1200	10,5	7565	7146	8644	490	473	14
54	20,94	95,69	1200	33,7	13593	8999	10413	582	579	14
55	20,72	93,85	1200	53,5	15876	15112	14849	616	656	15
56	23,03	92,11	1200	20,7	9084	7312	8422	482	466	14
57	21,13	92,09	1200	32,5	12229	10936	10972	552	595	14
58	21,46	94,37	1202	21,2	11827	9401	10251	521	505	14
59	21,36	94,98	1201	29,6	11024	9858	10282	512	555	14
60	18,38	95,09	1201	27,5	9910	8280	9141	427	439	14
61	20,63	91,26	1207	13,9	8357	9467	8900	553	589	14
62	21,42	95,67	1199	20,5	9172	8954	8657	586	529	15
63	20,95	93,91	1200	39,0	13284	11327	12263	483	613	13
64	20,47	93,75	1200	28,3	11239	10223	10524	557	560	14
65	21,27	93,75	1200	25,5	12616	10509	11714	498	497	14
66	20,62	93,71	1202	35,4	11072			477		14
67	21,04	93,77	1198	24,2	11779			458		14
68	17,53	88,23	1203	33,4	17371			659		14
69	17,50	90,08	1200	29,9	14257			619		14
70	20,67	93,82	1198	32,2	11916			542		14
71	20,46	99,56	1199	23,2	10942			539		15
72	21,88	99,22	1197	18,8	8401			653		15
73	21,67	97,22	1200	18,3	11653			458		14
74	18,73	95,12	1203	29,2	12990	11436	11692	580	608	14
75	20,49	91,23	1192	32,9	13371	13116	13075	529	573	14
76	18,99	95,53	1201	17,6	9079	7276	7597	479	490	14
77	20,70	93,69	1199	19,8	11314	9243	10247	538	555	15
78	21,20	96,59	1201	31,5	12033	9206	10171	512	533	14
79	22,81	88,43	1200	41,8	12598	10117	11320	566	544	13
80	22,50	93,55	1200	24,1	13034	10642	12657	496	508	14
81	21,57	93,81	1194	25,7	11363	9795	11083	523	545	14
82	21,52	94,08	1204	45,6	14431	11005	12257	495	520	14
83	18,72	95,28	1200	51,4	13558	11327	12284	546	574	14
84	21,27	95,01	1200	25,0	10653	8988	9297	473	522	14
85	19,63	91,45	1197	49,1	12226	10920	11673	576	587	15
86	19,64	91,20	1201	30,0	11546	8668	11056	567	547	15
87	20,74	93,81	1200	24,5	11480	9495	10123	554	556	15
88	21,25	94,09	1202	57,8	13868	11229	12844	562	591	15
89	22,70	89,83	1200	69,9	13189	11418	12467	602	632	15
90	21,33	93,53	1203	46,0	13629	11713	12173	542	569	14
91	20,33	90,83	1197	34,6	11656	10747	10803	595	591	15
92	20,60	93,69	1198	44,1	11599	9837	11801	625	636	15
93	21,37	91,49	1202	58,5	14762	11789	14266	601	615	15
94	20,56	85,80	1198	33,6	15012	14416	14465	612	629	15
95	20,82	91,19	1200	23,5	10518	9541	10684	478	535	14
96	19,45	93,62	1202	30,1	12374	10718	12543	529	576	14
97	20,90	87,11	1207	13,2	8893	8214	9187	510	526	15
98	20,96	90,31	1203	21,9	11694	10286	10596	545	548	15
99	23,00	91,96	1200	27,5	11472	11865	12547	522	570	14
100	20,24	91,03	1200	69,7	16805	13342	15841	546	573	14

Tabla AA.20 Propiedades de los cuerpos de prueba de la Muestra 6

cp	b	h	lt	f _{i,0}	E _{i,0}	E _I	E _f (P)	ρ	ρ _c	H
	mm	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	kg/m ³	%
101	21,04	92,86	1198	26,1	14145	11586	12944	508	512	14
102	22,81	91,22	1201	24,5	13421	11443	12094	492	525	15
103	22,63	93,87	1201	54,0	15343	13480	14805	533	559	14
104	21,14	94,80	1206	74,6	17315	15618	15578	594	624	15
105	22,60	92,08	1202	49,2	17124	15507	16471	673	680	26
106	21,46	91,71	1201	30,6	14207	11866	13301	548	550	15
107	21,31	92,03	1200	20,2	10451	10612	10946	627	585	15
108	21,22	92,06	1200	28,7	14456	13651	14274	593	575	15
109	21,37	91,34	1200	40,5	12525	10838	11709	507	532	15
110	21,34	94,09	1200	26,9	15141	13009	14651	563	590	14
111	20,30	90,83	1200	30,2	13633	13887	14851	613	638	15
112	21,45	91,15	1199	45,4	17292	14741	16473	629	636	15
113	21,71	93,72	1202	62,7	16593	14387	14929	561	589	15
114	22,35	91,05	1202	29,6	14527	12842	15770	615	588	15
115	21,38	92,94	1199	31,7	11325	10014	9991	549	577	15
116	22,39	91,25	1200	40,5	14789	15537	16185	715	672	15
117	20,63	91,94	1198	51,2	18672	13345	15722	572	580	14
118	22,73	93,91	1202	40,5	10376	11499	13719	569	587	14
119	22,69	99,31	1199	41,2	13180	11854	12848	531	557	15
120	21,03	100,57	1202	20,2	9144	9329	9516	523	565	15
121	20,96	100,36	1199	53,4	13107	12280	12249	549	577	14
122	21,22	97,90	1208	29,5	9559	9237	9150	581	577	15
123	21,07	93,37	1203	22,6	10578	11549	13005	578	573	14
124	21,36	101,35	1200	26,1	11391	13504	13148	662	678	15
125	21,12	100,56	1204	29,8	15730	14208	16034	704	717	15
126	22,75	97,82	1202	23,4	13801	11015	11788	565	590	15
127	21,03	96,26	1204	32,4	14124	12190	12956	553	621	15
128	22,56	97,19	1200	27,5	12058	11307	12145	684	697	15
129	21,13	100,50	1206	33,7	14901	13843	14417	668	647	15
130	21,10	101,31	1202	35,1	14605	14375	13878	622	686	15
131	20,63	102,41	1202	23,9	13719	13233	13313	827	682	15
132	21,15	102,92	1201	32,9	10476	9564	9899	554	614	15
133	21,45	101,26	1199	34,5	13632	11786	12681	546	568	14
134	21,23	92,95	1200	42,9	14969	17461	17079	701	729	15
135	22,42	99,36	1200	35,9	12762	12936	13777	631	678	15
136	20,41	102,34	1199	32,5	14161	11956	12349	631	670	15
137	21,20	100,65	1200	33,6	11407	10833	11344	536	585	15
138	22,63	98,38	1203	26,2	11943	10721	10939	566	610	15
139	21,29	90,86	1200	71,0	14771	12690	13501	636	616	15
140	21,19	93,02	1200	31,8	13133	10036	12062	531	550	14
141	22,92	91,17	1204	34,1	12019	10423	11184	595	532	15
142	20,93	96,32	1199	23,5	11111	9804	10746	496	544	14
143	22,73	93,84	1204	27,5	13212	11259	11944	529	519	14
144	22,72	97,99	1205	26,0	15354	13688	13686	530	551	14
145	20,64	91,98	1201	42,0	13286	15983	13202	633	665	15
146	21,32	93,77	1198	33,7	12300	10927	11442	521	530	15
147	21,44	93,05	1198	41,7	12538	11627	13087	597	627	14
148	21,49	100,32	1202	32,5	13201	12035	12387	600	633	15
149	21,44	102,79	1203	28,5	13010	11015	12329	595	625	15
150	21,82	99,10	1204	27,1	10322	10920	10474	607	589	15

Tabla AA.21 Características de los cuerpos de prueba de la Muestra 7

<i>cp</i>	<i>K</i>	<i>fis</i>	<i>méd</i>	<i>gd</i>	<i>pr</i>	<i>tr</i>
1	0,237	0	1	0	ER	
2	0,134	0	0	0	ER	
3	0,315	>C18	1	0	ER	
4	0,195	0	1	0	ER	
5	0,7	0	1	0	ER	
6	0,417	0	0	0	ER	
7	0,613	0	1	0	ER	
8	0,332	0	0	0	ER	
9	0,34	>C18	1	0	ER	
10	0,407	0	1	0	ER	
11	0	0	0	0	ER	
12	0,233	0	0	0	ER	
13	0	0	0	0	ER	
14	0	0	0	0	ER	
15	0	>C18	0	0	ER	
16	0	0	0	0	ER	
17	0	>C18	0	0	ER	
18	0	>C18	0	0	ER	
19	0	0	0	0	ER	
20	0,683	0	0	0	ER	
21	0,432	>C18	1	0	ER	
22	0,371	0	1	0	ER	
23	0,14	0	1	0	ER	
24	0,489	0	0	0	ER	
25	0	0	0	0	ER	
26	0	0	0	0	Co	1
27	0,318	>C18	0	0	Co	1
28	0,34	0	0	0	Co	1
29	0	0	0	0	Co	1
30	0,409	0	0	0	Co	1
31	0	0	0	0	Co	1
32	0	0	0	0	Co	1
33	0,159	>C18	0	0	Co	1
34	0,145	0	0	0	Co	1
35	0,251	0	0	0	Co	2
36	0,187	0	0	0	Co	2
37	0,376	0	0	0	Co	2
38	0,319	>C18	0	0	Co	2
39	0,362	0	0	0	Co	2
40	0,477	>C18	0	0	Co	2
41	0,412	0	1	0	Co	2
42	0,494	0	1	0	Co	2
43	0,319	0	0	0	Co	3
44	0	0	0	0	Co	3
45	0,234	0	0	0	Co	3
46	0,341	0	0	0	Co	3
47	0,419	>C18	1	0	Co	4
48	0,266	0	0	0	Co	4
49	0,733	0	0	0	Co	4
50	0,587	0	0	0	Co	4

Anexos

Tabla AA.22 Propiedades de los cuerpos de prueba de la Muestra 7

cp	b	h	$f_{c,0}$	$E_{c,0}$	ρ	H
	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	%
1	42,92	71,62	44,1	14321	649	13
2	44,17	66,96	40,0	44803	544	12
3	44,38	69,44	29,2	8430	471	13
4	44	71,8	33,3	12045	457	13
5	42,86	69,23	44,8	11556	627	13
6	44,11	67,12	35,4	21540	519	13
7	44,08	74,06	39,5	18309	509	13
8	42,8	69,3	34,6	12281	562	13
9	44,06	69,25	37,5	14716	631	14
10	44,23	71,6	39,7	15202	511	13
11	43,81	66,85	35,6	20812	443	12
12	44,18	64,5	28,6	22148	537	13
13	42,76	69,34	45,7	18217	598	12
14	42,93	71,76	41,6	60261	625	13
15	38,95	64,68	42,7	14551	725	13
16	39,52	64,35	60,0	29957	930	15
17	42,85	67,08	31,9	35077	593	13
18	42,81	64,33	52,7	29609	990	16
19	42,79	64,56	50,0	21740	711	14
20	43,95	66,8	24,3	12606	591	13
21	44,02	69,3	39,7	14430	618	13
22	44	72,72	28,9	9735	512	14
23	42,84	69,25	48,3	14623	586	13
24	42,93	67,03	35,6	13151	477	13
25	44,22	69,37	38,1	24026	489	12
26	42,77	58,13	37,7	12983	530	14
27	44,04	69,15	26,7	16294	498	20
28	44,06	71,64	28,6	12910	478	16
29	43,91	66,63	35,2	15593	545	17
30	44,03	68,96	32,6	12542	544	18
31	40,55	62,17	32,3	11438	708	26
32	43,89	62,27	42,5	24706	575	15
33	43,93	68,97	35,6	11958	568	16
34	43,89	69,1	38,7	14205	629	16
35	43,81	69,15	32,1	11018	486	16
36	42,54	64,21	33,7	12844	592	15
37	43,82	66,55	34,5	15714	692	17
38	43,86	66,54	32,1	15219	505	18
39	43,99	69,08	31,9	11280	569	19
40	42,73	69,25	25,7	11002	636	20
41	43,66	66,75	25,1	6888	627	21
42	43,82	68,81	28,0	10381	582	21
43	43,84	71,32	38,2	14443	616	18
44	44,12	66,84	41,1	18414	580	15
45	42,69	71,74	31,7	10161	556	16
46	44,01	69,1	38,3	17453	636	16
47	42,96	69,03	29,2	13879	819	18
48	42,99	71,56	40,5	16686	730	16
49	43,67	69,02	33,5	13636	598	16
50	42,57	71,76	42,1	25052	609	16

Anexo B Programa complementario de ensayos

AB.1 Introducción

El diseño de estructuras de madera debe brindar seguridad frente a la rotura y asegurar un correcto funcionamiento durante la vida útil prevista (Thelandersson, 1995a & 1995b). En particular para las vigas sometidas a flexión, el último aspecto, relacionado a las deformaciones, suele determinar las dimensiones finales del elemento estructural. La falta de consideración de este proceso, o una interpretación equivocada de los factores que inciden sobre él, es causa frecuente de comportamientos insatisfactorios.

La deformación final de una pieza estructural puede descomponerse en dos partes: i) la deformación elástica instantánea, dependiente del módulo de elasticidad, o sea de su rigidez, y ii) la que se produce posteriormente, variando en función del tiempo y de otros factores, como la duración e intensidad de las cargas, y las condiciones de servicio que determinan el contenido de humedad de la pieza y su variación. Esta última componente se conoce comúnmente como deformación diferida.

Se han llevado a cabo numerosas investigaciones diseñadas para estudiar el efecto de las diferentes variables controladas en laboratorio (Bengtsson, 2001; Ranta-Maunus, 1995), y una cantidad más reducida se ha desarrollado en condiciones de clima natural, ya sea en ambiente interior o exterior (Thelandersson, 1995a). El estudio de las deformaciones ha merecido una especial atención a partir de las plantaciones de especies de rápido crecimiento, pues los árboles, cortados a temprana edad, presentan en estos casos una importante proporción de madera juvenil, la que brinda en general menores valores de resistencia y rigidez como consecuencia de la conformación que adquiere la importante capa intermedia de la pared secundaria en la estructura celular (Hunt, 1999).

No obstante, los resultados de trabajos realizados con *E. grandis* (Bamber et. al., 1982) no presentan diferencias estadísticamente significativas para la densidad básica y el tamaño de las fibras, en árboles de rápido y normal crecimiento. Asimismo, datos obtenidos de ensayos con muestras de *Picea Abies* (Bengtsson, 2001) tampoco muestran diferencias importantes, en este caso para la deformación diferida, en árboles de crecimiento rápido y lento. En cambio, los resultados de estos últimos, dentro de un mismo árbol, registran variaciones de consideración cuando se comparan las probetas con mayor proporción de madera juvenil, cercanas a la médula, con las más alejadas, presentando mayores valores las primeras.

La madera, siendo un compuesto polimérico natural, es altamente susceptible a las

deformaciones lentas. Hunt (1999) ha descrito los diferentes mecanismos responsables del proceso de deformación diferida: i) componente dependiente del tiempo o viscoelástica, la cual para permanecer constante requiere que otras variables, como la temperatura y la humedad, permanezcan constantes, ii) componente mecano-adsortiva, originada por los cambios de humedad en la madera, iii) pseudo-deformación y recuperación atribuida al hinchamiento y contracción de la madera. La simultaneidad de actuación de estos mecanismos hace muy difícil predecir el comportamiento referido a la deformación diferida de piezas estructurales sometidas a flexión bajo condiciones de servicio reales.

La deformación diferida en una pieza es función del contenido de humedad, de la duración de las cargas, del nivel de esfuerzo en la pieza y de la temperatura ambiente. El contenido de humedad, junto a la duración de la carga, es el parámetro que mayor incidencia tiene en la deformación lenta. Esta crece con el contenido de humedad de la pieza y se acelera, alcanzando valores aún mayores, cuando experimenta cambios de humedad bajo carga, resultando de mayor importancia la intensidad de las variaciones de humedad que el contenido absoluto de la misma (Martensson & Thelandersson, 1992; Thelandersson, 1995a & 1995b). Investigaciones realizadas (Armstrong & Kingston, 1962) con madera de Fresno Alpino, han mostrado distintos comportamientos para piezas que han presentado variadas condiciones de humedad durante el tiempo en que fueron sometidas a cargas, obteniendo la mayor relación entre la deformación final y la instantánea para el caso en que la madera se cargó en estado verde y se secó bajo carga.

La duración de las cargas causa un incremento de la deformación lenta aunque las condiciones de servicio, y, en consecuencia, el contenido de humedad de la pieza, se mantengan invariables. Bajo carga constante es posible encontrar que el valor de la deformación diferida luego de veinte años, alcance valores iguales a dos veces, o incluso cuatro veces, el que se experimentaba a los seis meses (Andriamitantsoa, 1995).

Es conocido que los materiales de construcción experimentan un importante incremento de la deformación en función del tiempo cuando alcanzan niveles de esfuerzos cercanos a los de la rotura. Para el caso de la madera, cuando los mismos son inferiores al 35% del de rotura, la evolución de las deformaciones en función del tiempo se mantiene estable luego de experimentar un crecimiento rápido, el cual ocurre en forma inmediatamente posterior a la deformación instantánea (Andriamitantsoa, 1995). Acerca de la influencia de la temperatura, teniendo en cuenta que la madera es un compuesto polimérico natural, puede afirmarse que cuanto mayor es ésta, mayor es la deformación, pero en general es muy poco importante frente a los otros parámetros que se han descrito, cuando alcanza valores inferiores a 50°C.

Para determinar la influencia del tamaño de la pieza se han desarrollado comparaciones de las deformaciones diferidas experimentadas por probetas pequeñas, libres de

defectos, con otras de tamaño estructural. Estas muestran que en las primeras es menor la componente viscoelástica, dependiente del tiempo y sin experimentar variaciones de humedad, como consecuencia de la ausencia de defectos y de presentar una pequeña desviación de sus fibras. En cambio, las piezas de tamaño estructural acusan una componente mecano-adsortiva menor, pues la influencia de las variaciones cíclicas de humedad las afectan menos por tener mayores dimensiones (Ranta-Maunus, 1995; Thelandersson, 1995b). Sin embargo la influencia del tamaño pareciera que se atenúa con el transcurso del tiempo (Martensson & Thelandersson, 1992).

La mayoría de los experimentos se han llevado a cabo utilizando cuerpos sometidos a flexión, porque resulta más simple medir las deformaciones en este caso que aquellas pequeñas variaciones longitudinales originadas por esfuerzos de tracción o compresión. Por otro lado, en el uso estructural de la madera reviste mucho más importancia, en general, el fenómeno de las deformaciones diferidas en elementos flexionados que en los sometidos a esfuerzos axiales. Si bien el comportamiento del material no es exactamente igual frente a los distintos tipos de esfuerzo debido a la influencia de la anisotropía que lo caracteriza, a los fines prácticos se puede asumir un comportamiento común (Ranta-Maunus, 1995).

El Eurocódigo 5 contempla el cálculo de las deformaciones diferidas a través de un coeficiente, k_{def} , que varía en función de la duración de las cargas y del contenido de humedad de la pieza, así como de su variación. El producto de este coeficiente por la deformación instantánea provee el valor de la deformación diferida. La norma establece cinco clases de duración de cargas: i) carga permanente, cuando su duración supera los diez años, ii) carga de larga duración, para un tiempo comprendido entre seis meses y diez años, iii) carga de media duración, actuando de una semana a seis meses, iv) carga de corta duración, con un tiempo de actuación menor a una semana, v) carga de muy corta duración. Para considerar el contenido de humedad de la pieza, así como su variación, la norma define tres condiciones de servicio, i) condición de servicio 1, correspondiente a un clima donde solamente algunas semanas en el año se superen 20°C de temperatura y 65% de humedad relativa ambiente, ii) condición de servicio 2, para igual temperatura y 85% de humedad relativa ambiente, iii) condición de servicio 3, para situaciones más desfavorables (Arbeitsgemeinschaft Holz e. V. & Bruderverlag, 1995).

Como ya se expresó en el Capítulo 3 de este trabajo, en el sistema europeo el cálculo del módulo de elasticidad se realiza a través de un ensayo estandarizado con velocidad controlada para la aplicación de la carga y un contenido de humedad del cuerpo de prueba del 12%. En caso de diferir las condiciones de ensayo de las establecidas, los valores obtenidos se deben corregir a la condición de referencia. De esta manera, al quedar definida la velocidad de aplicación de la carga, y consecuentemente el tiempo de actuación, así como el contenido de humedad en las probetas al momento de determinar el valor del módulo de elasticidad mediante un ensayo, la aplicación del

coeficiente k_{def} ya mencionado, es el que tiene en cuenta la influencia de ambos parámetros en la deformación diferida. El Eurocódigo 5 no contempla la influencia del tamaño ni de la calidad de la pieza sobre el valor de las deformaciones finales.

En el Capítulo 4 se diseñó un método de clasificación visual por resistencia para la madera de *Eucalyptus grandis* de Argentina, con los correspondientes valores característicos de resistencia, rigidez y densidad para los grados de calidad propuestos. Es posible conocer, a partir de esos datos, tanto la resistencia como la rigidez de cada clase resistente, y en consecuencia calcular las deformaciones instantáneas en condiciones de servicio. Teniendo en cuenta la importancia que revisten las deformaciones diferidas, surge la necesidad de investigar el comportamiento de esta especie bajo cargas de larga duración. Con ese fin se ha diseñado y comenzado a ejecutar un programa complementario de ensayos con piezas de tamaño estructural sometidas a cargas constantes de un año de duración. La causa que motivó el comienzo inmediato de este programa complementario radica en la importancia que para el diseño revisten los datos indagados, así como en la complejidad y tiempo necesarios para llevar a cabo los ensayos.

AB. 2 Objetivos

- 1) Conocer el comportamiento de las deformaciones diferidas en vigas aserradas de *Eucalyptus grandis* de Argentina, sometidas a cargas constantes de un año de duración.
- 2) Conocer la influencia que la calidad de la madera ejerce sobre el valor de las deformaciones diferidas.

AB. 3 Materiales y métodos

El programa complementario se realiza sobre un total de 40 vigas conforme al detalle indicado en la Tabla AB.1. Los cuerpos de prueba fueron seleccionados al azar de la producción de un aserradero, y corresponden a una plantación de *Eucalyptus grandis* realizada en el Departamento de Concordia, Entre Ríos, en 1986 con semilla provista por el INTA de Concordia. Luego de logrado un secado natural, a través de un estacionamiento en espacio cubierto, se procedió al cepillado de la madera. A través de la aplicación del método de clasificación visual por resistencia ya mencionado se formaron los grupos de cuerpos de prueba indicados.

Con el fin de mantener niveles de carga y de deformación similares a los empleados en las estructuras usuales, se sometió a los cuerpos de prueba a la acción de una carga concentrada

en el centro. Los ensayos se llevan a cabo en el laboratorio del Departamento de Construcciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata y en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Concepción del Uruguay de la Universidad Tecnológica Nacional. El ambiente de realización corresponde a las condiciones naturales en espacio cubierto. En el momento del montaje se determinaron las dimensiones reales de las vigas, la densidad aparente y el contenido de humedad, así como la deformación instantánea. Con posterioridad, y con una frecuencia inicial de una semana, se continúa registrando las deformaciones, lo cual se contempla efectuar hasta completar un año de duración.

Tabla AB.1 Cuerpos de prueba del programa de ensayos bajo cargas de larga duración

(1) Conforme al método visual de clasificación por resistencia desarrollado y presentado en el Capítulo 4; (2) y (3) primer y tercer grados de calidad del perfil e), Tabla 4.6, respectivamente.

Cantidad	b <i>mm</i>	h <i>mm</i>	l <i>m</i>	Carga <i>kN</i>	Grado de calidad ⁽¹⁾
8	50	100	1,80	2,0	1 ⁽²⁾
8	50	100	1,80	2,0	3 ⁽³⁾
12	50	100	2,80	0,85	1 ⁽²⁾
12	50	100	2,80	0,85	3 ⁽³⁾

El registro de las deformaciones se lleva a cabo en el centro de cada viga. Los instrumentos y procedimientos para registrar las dimensiones, la densidad aparente, el contenido de humedad y las deformaciones ya fueron descriptos en el Capítulo 3. La Figura AB.1 muestra esquemáticamente el montaje de las pruebas, con la fuerza concentrada en el centro y el dispositivo inferior de medición de las deformaciones.

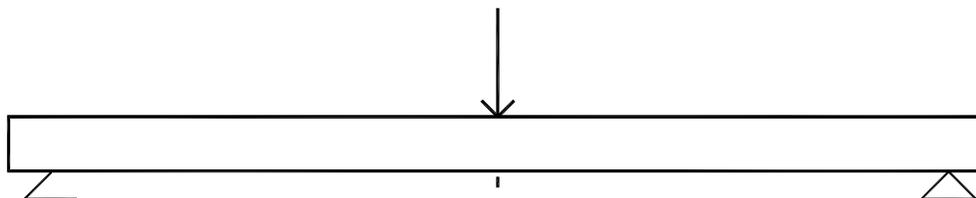


Figura AB.1 Esquema de carga y registro de las deformaciones

