

## ***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 <sup>(1)</sup>	<i>n (%)</i>	14 (28)	13 (26)	31 (62)	26 (52)	42 (28)	126 (36)
Kino <sup>(1)</sup>	<i>n (%)</i>	12 (24)	13 (26)	10 (20)	26 (52)	23 (15)	84 (24)
Ataques biológicos <sup>(1)</sup>	<i>n (%)</i>	0 (0)	2 (4)	0 (0)	1 (2)	0 (0)	3 (1)
Grandes defectos <sup>(1)</sup>	<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

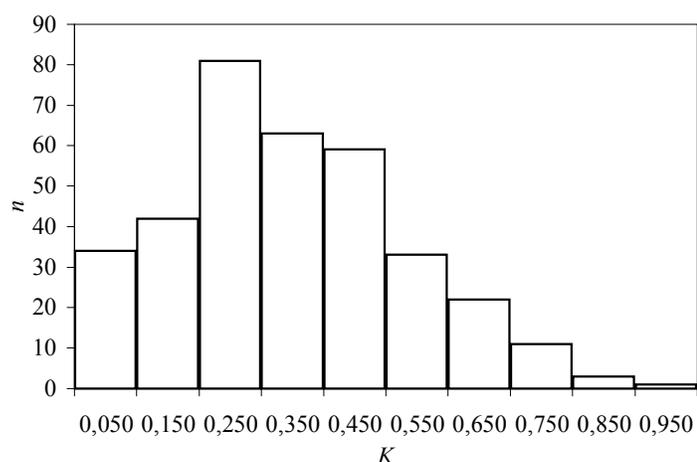
medios de la densidad oscilan entre  $513\text{kg/m}^3$  y  $567\text{kg/m}^3$  y los coeficientes de variación entre 0,07 y 0,19. Estos resultados son similares a los publicados para la especie cultivada en Argentina (INTA, 1995) y Uruguay (Pérez del Castillo, 2001), pero significativamente menores 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
$f_m$ $\text{N/mm}^2$	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
$E_{m,g}$ $\text{N/mm}^2$	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
$\rho$ $\text{kg/m}^3$	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  $150\text{mm}$  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).

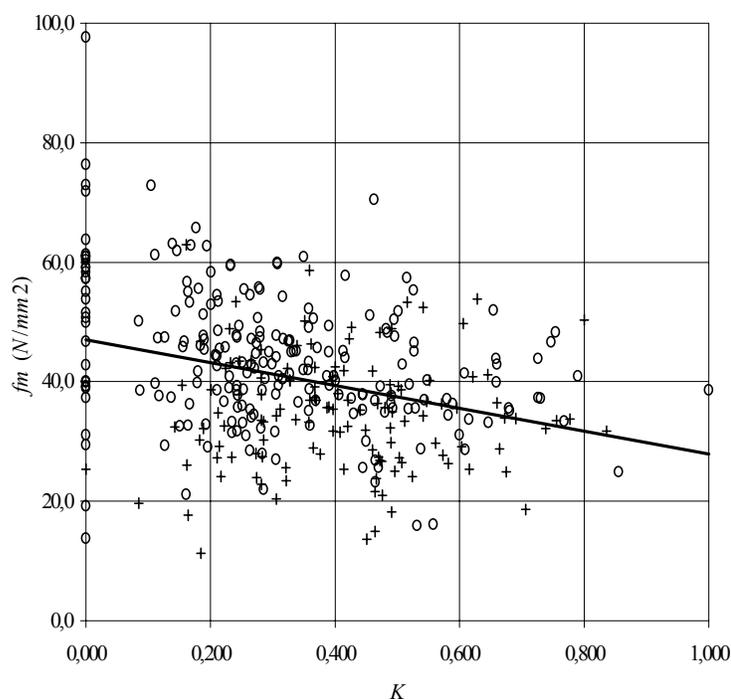
**Tabla 4.3 Propiedades mecánicas y densidad para los cuerpos de prueba con y sin médula, ensayados a flexión.**

(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).

		$f_m^{(1)}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{m,g}^{(2)}$ N/mm <sup>2</sup>	$\rho^{(2)}$ kg/m <sup>3</sup>
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/mm<sup>2</sup> 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.

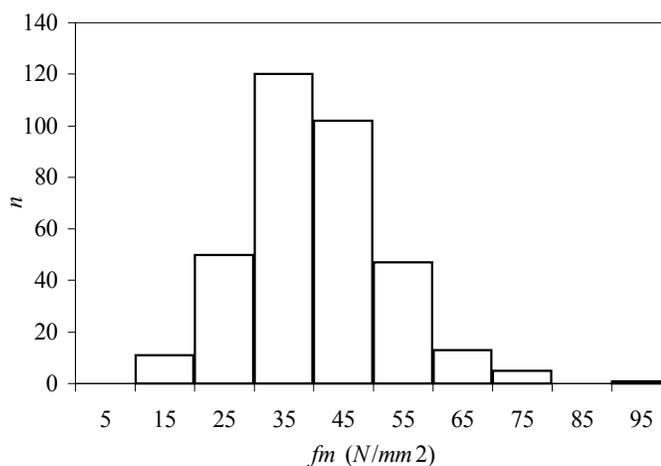
**Tabla 4.4 Propiedades mecánicas y densidad para las muestras ensayadas a flexión. Comparación de resultados para vigas, tablas y el total**

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

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

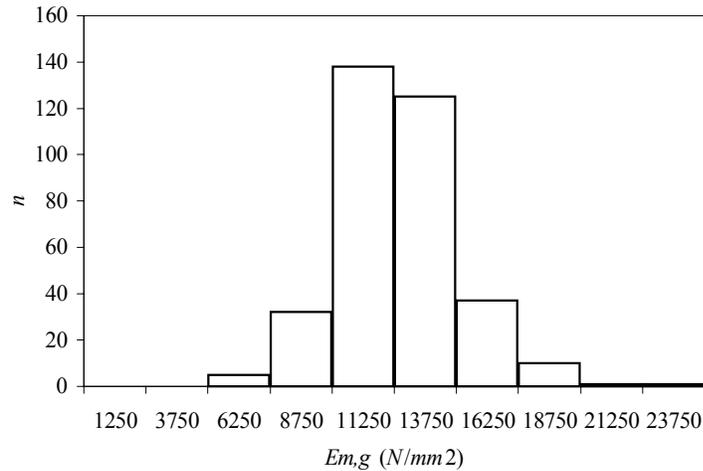
mecánicas y de densidad, ajustados a las condiciones de referencia. Los mismos aparecen discriminados para cada muestra, para el conjunto de vigas y para el total. Como resultan de fundamental importancia para la asignación de clases resistentes, se muestran también el percentil 7,5% del  $MOR$  y el 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).

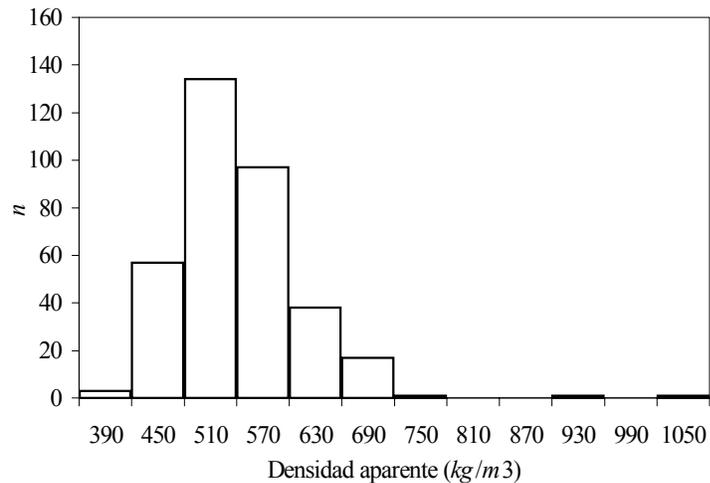
Las figuras 4.3, 4.4 y 4.5 muestran los histogramas de distribución de frecuencias para el  $MOR$ , el  $MOE$ , y  $\rho$ , respectivamente, cuyas medidas de tendencia central y de dispersión se

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  $\rho$  correspondiente a las muestras ensayadas a flexión

$\rho$  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**

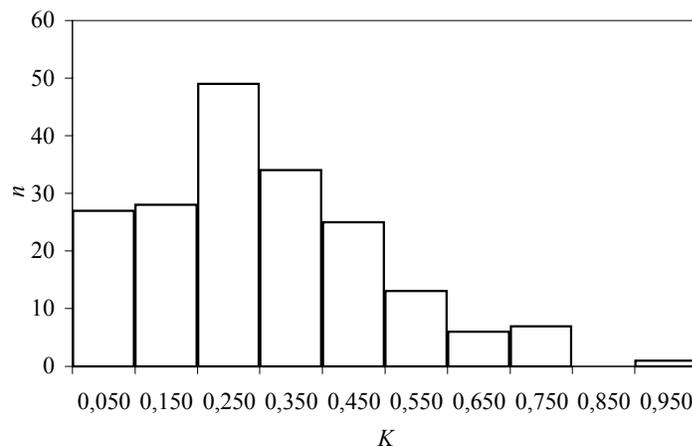
(1) Ajustados a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); (2) ajustados por tamaño de muestra conforme a EN 384 (1996); (3) ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996); (4) fisuras que exceden la longitud máxima establecida en prEN 14081-1 (2000) para clases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

Perfil	$f_{m,075}^{(1)} / f_{m,k}^{(2)}$ N/mm <sup>2</sup>	$\bar{E}_{m,g}^{(3)} = E_{0,mean}$ N/mm <sup>2</sup>	$\rho_{05}^{(3)} = \rho_k$ kg/m <sup>3</sup>	$\bar{\rho}^{(3)}$ kg/m <sup>3</sup>	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 <sup>(4)</sup> 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%.

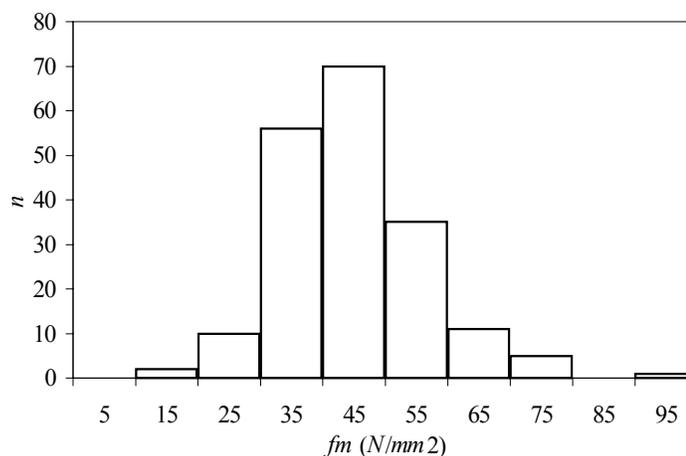


**Figura 4.6** Histograma de frecuencias para *K* correspondiente a 190 cuerpos de prueba

Cuerpos de prueba libres de médula, fisuras<sup>(1)</sup> 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.

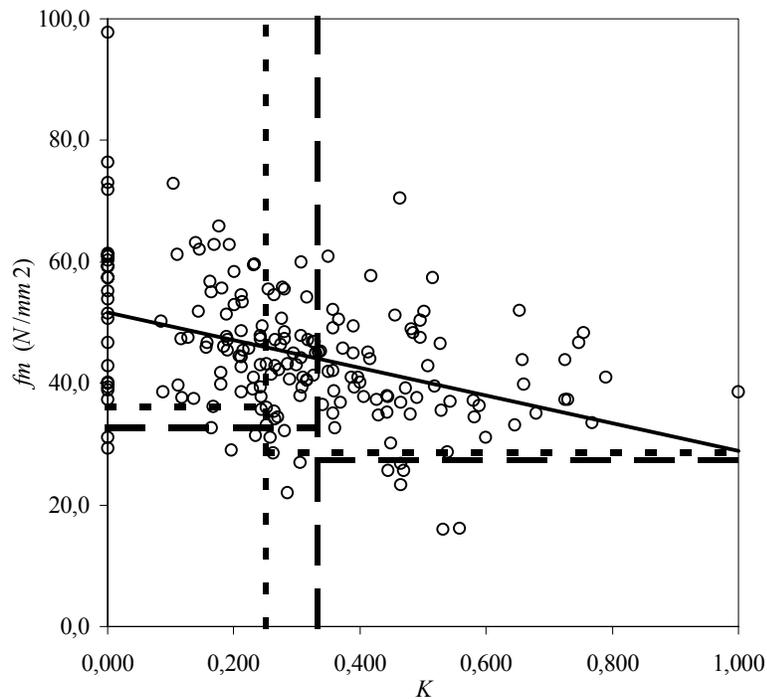


**Figura 4.7** Histograma de frecuencias para  $f_m$  correspondiente a 190 cuerpos de prueba

Cuerpos de prueba libres de médula, fisuras<sup>(1)</sup> 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<sub>m</sub>* para 190 cuerpos de prueba**

Cuerpos de prueba libres de médula, fisuras<sup>(1)</sup> 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

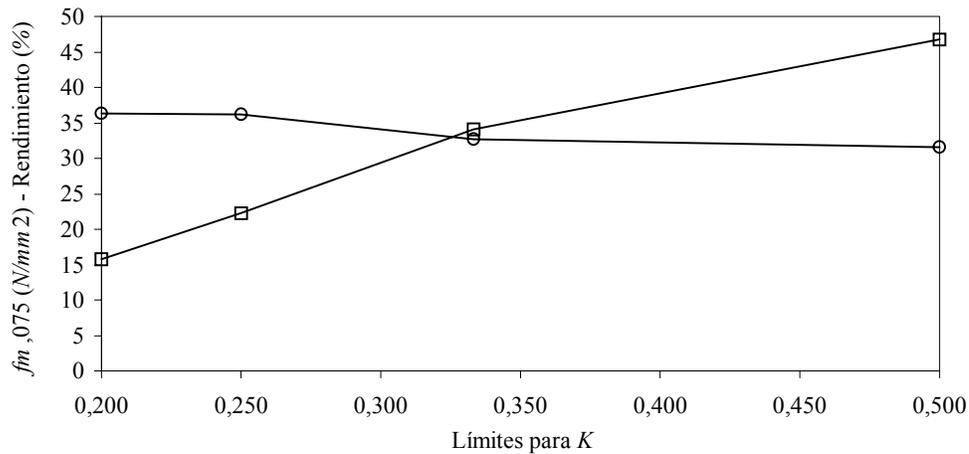
densidad aparente, así como entre los correspondientes al *MOR* y a la densidad aparente, lo cual puede constituir una importante ventaja para el uso estructural de esta especie. En particular, la relación *MOE/ρ* encontrada en esta investigación es más elevada que en todas las clases resistentes contempladas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

(○) 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 <sup>(1)</sup> 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  $MOE/\rho$  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 descrito 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 <sup>(1)</sup>	<i>n</i>	48	13
Grandes defectos <sup>(1)</sup>	<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 ( $454\text{kg/m}^3$ ) es prácticamente coincidente con el de la Muestra 5 ( $451\text{kg/m}^3$ ) y lo mismo sucede con los coeficientes de variación del *MOE* (0,20) y de  $\rho$  (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 ( $414\text{kg/m}^3$ ) se mantiene prácticamente en el nivel encontrado para el conjunto de cuerpos de prueba ensayados a flexión ( $420\text{kg/m}^3$ ), 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  $150\text{mm}$  conforme a EN 384 (1996); (2) ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996).

	Muestra 6			Muestra 7		
	$f_{t,0}^{(1)}$ $\text{N/mm}^2$	$E_{t,0}^{(2)}$ $\text{N/mm}^2$	$\rho^{(2)}$ $\text{kg/m}^3$	$f_{c,0}^{(2)}$ $\text{N/mm}^2$	$E_{c,0}^{(2)}$ $\text{N/mm}^2$	$\rho^{(2)}$ $\text{kg/m}^3$
<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	-	-
$\rho_{05}$	-	-	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 <sup>2</sup>	$f_{t,0,05}^{(1)} / \bar{E}_{t,0}^{(2)}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,0,05}^{(2)} / \bar{E}_{c,0}^{(2)}$ N/mm <sup>2</sup>
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)
	Con médula	22,1 / 11374 (n = 126)	13,6 / 11630 (n = 48)
c)	Sin médula, <i>fis</i> y <i>gd</i>	31,1 / 13527 (n = 190)	19,7 / 14292 (n = 96)
	Restantes	21,6 / 11577 (n = 159)	14,4 / 11789 (n = 54)

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

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.

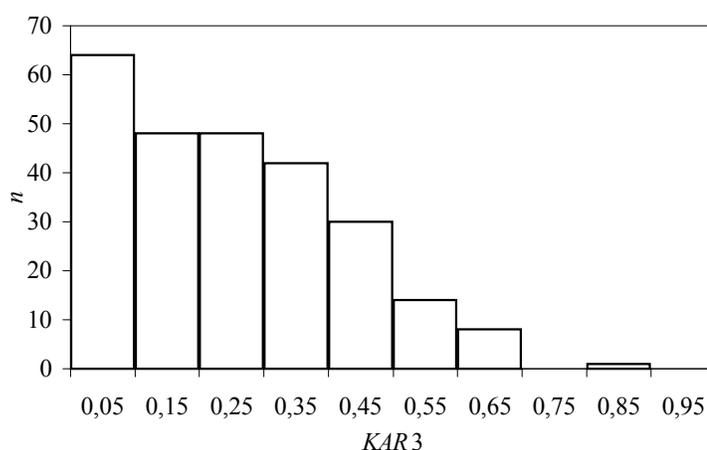
Las vigas y las tablas exhiben separadamente, en algunos casos, mejores correlaciones entre los parámetros analizados y la resistencia a flexión que cuando se consideran todas las muestras en forma conjunta. No obstante, la mayor cantidad de cuerpos de prueba presente en este último caso proporciona 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  $E_{m,g}$ ,  $\rho$  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:

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

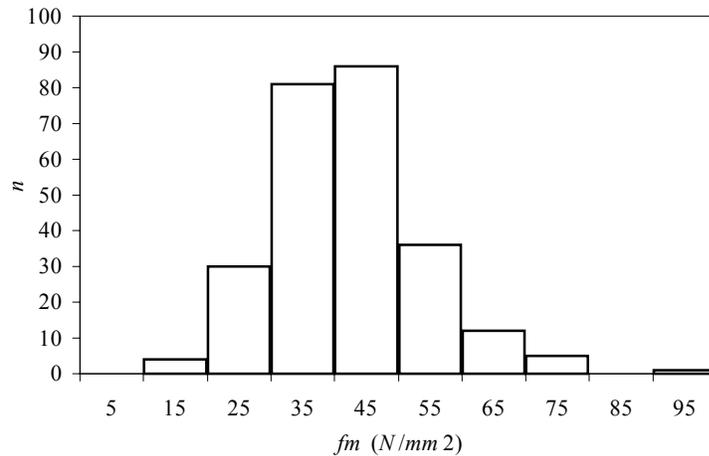
El análisis estadístico de las variables que intervienen en el modelo, indica que *KAR3* presenta un promedio de 0,244, una desviación estándar de 0,178 y un coeficiente de variación de 0,73. Para el *MOR* los correspondientes valores son  $\bar{f}_m = 42,2N/mm^2$ ,  $S = 11,6 N/mm^2$ , y  $COV = 0,27$ . El *MOE* exhibe  $\bar{E}_{m,g} = 12992N/mm^2$ ,  $S = 2416N/mm^2$  y  $COV = 0,19$ , y  $\rho$  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<sup>(1)</sup> 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.

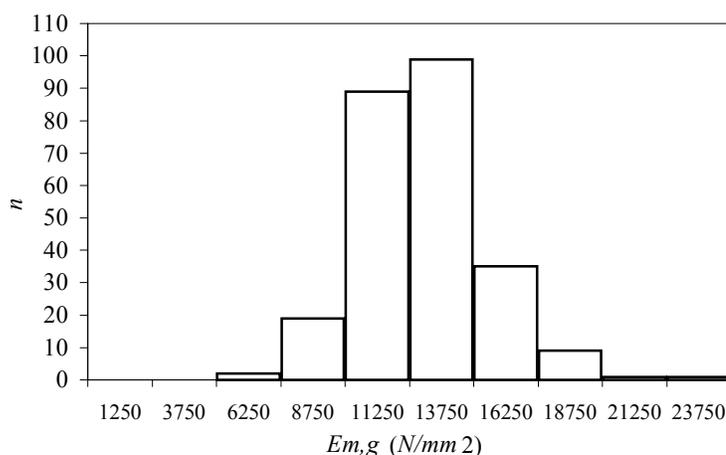


**Figura 4.11** Histograma de frecuencias para  $f_m$  correspondiente a 255 cuerpos de prueba

Cuerpos de prueba libres de fisuras<sup>(1)</sup> 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.



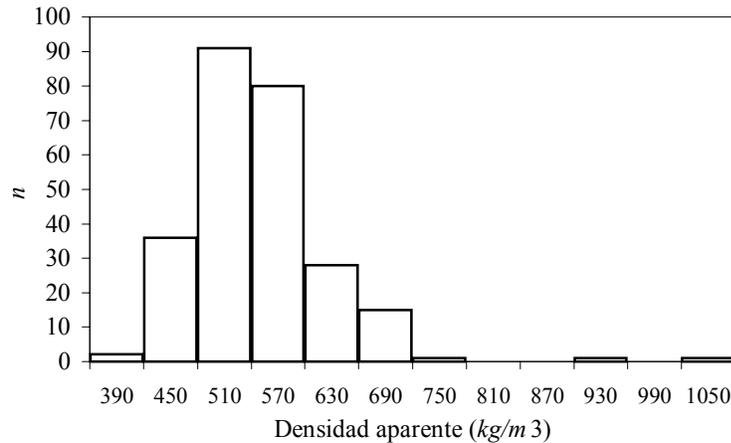
**Figura 4.12** Histograma de frecuencias para  $E_{m,g}$  correspondiente a 255 cuerpos de prueba

Cuerpos de prueba libres de fisuras<sup>(1)</sup> 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<sup>(1)</sup> 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**

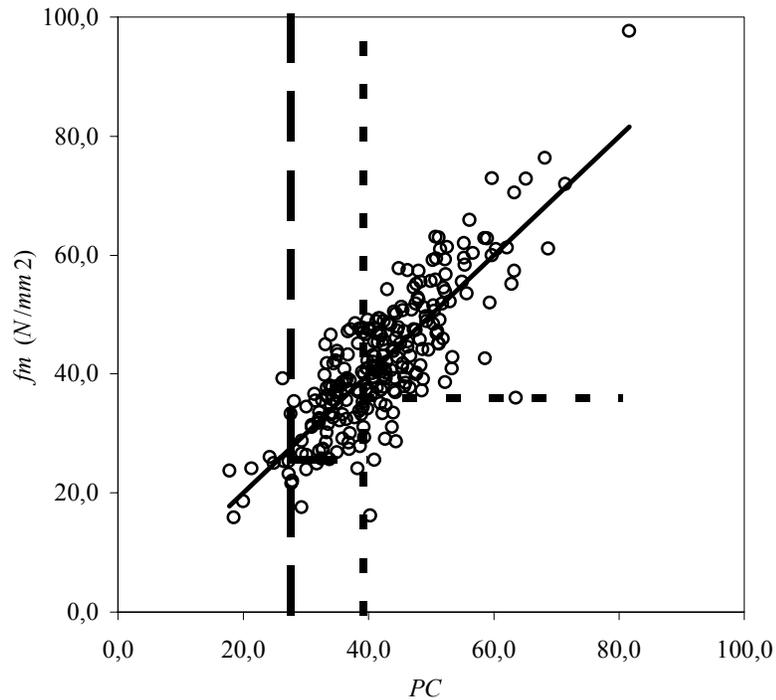
(1) Ajustados a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); (2) ajustados por tamaño de muestra conforme a EN 384 (1996); (3) ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996); (4) porcentaje referido a la cantidad de cuerpos de prueba libres de características visuales 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 <sup>(4)</sup> )
	C24	$39,16 > PC/27,53$	25,7 / 24,2	11012	411	86 (25/34 <sup>(4)</sup> )
	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 <sup>(4)</sup> )
	C24	$12346 > E_{m,g}/9365$	25,7 / 24,2	11086	412	89 (26/35 <sup>(4)</sup> )
	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<sup>(1)</sup> 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/mm<sup>2</sup>).

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**

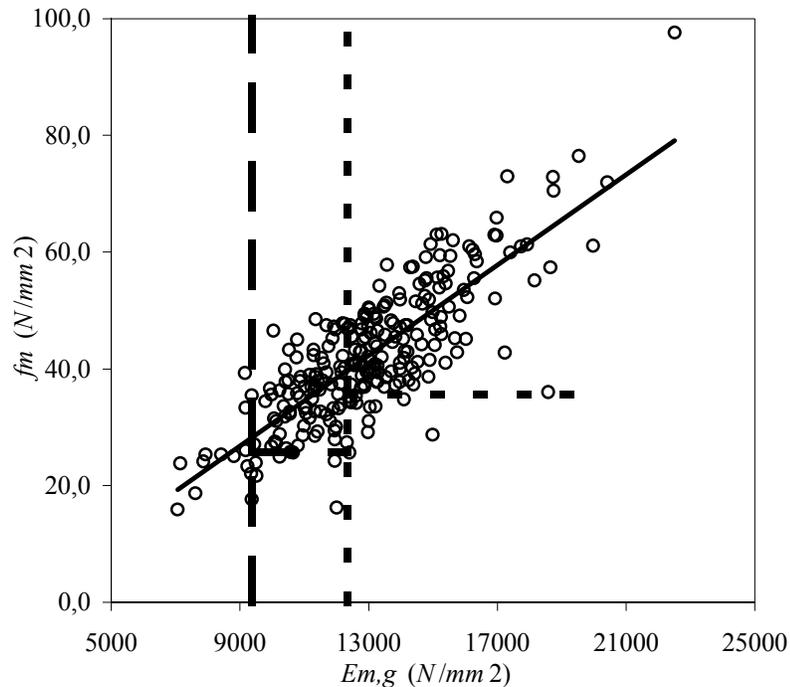
(1) Número de cuerpos de prueba que exceden el límite establecido en prEN 14081 (2000) para clases superiores a C18; el parámetro  $E_{m,g}$  está expresado en  $N/mm^2$ .

Perfil	Límites para los parámetros	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5
		<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<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 <sup>(1)</sup> )	11 (11 <sup>(1)</sup> )	27 (27 <sup>(1)</sup> )	28 (28 <sup>(1)</sup> )	20 (13 <sup>(1)</sup> )
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 <sup>(1)</sup> )	11 (11 <sup>(1)</sup> )	27 (27 <sup>(1)</sup> )	28 (28 <sup>(1)</sup> )	22 (13 <sup>(1)</sup> )

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<sup>(1)</sup> 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 si 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 <sup>(3)</sup> )
	C24	$39,16 > PC/27,53$	16,2	11297	426	43 (29/32 <sup>(3)</sup> )
	C18	rechazo visual y $PC < 27,53$	11,9	11370	467	22 (15)/15 <sup>(4)</sup>
b)	C35	$E_{t,0}/12346$	23,7	15157	480	80 (53/59 <sup>(3)</sup> )
	C24	$12346 > E_{t,0}/9365$	15,9	11283	432	51 (34/38 <sup>(3)</sup> )
	C18	rechazo visual y $E_{t,0} < 9365$	9,5 <sup>(5)</sup>	11611	459	19 (13)/15 <sup>(4)</sup>

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**

	$\rho$ $kg/m^3$	$E_{t,0}$ $N/mm^2$	$E_l$ $N/mm^2$	$E_f(P)$ $N/mm^2$
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  $579\text{kg/m}^3$  para las tablas y  $551\text{kg/m}^3$  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.

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

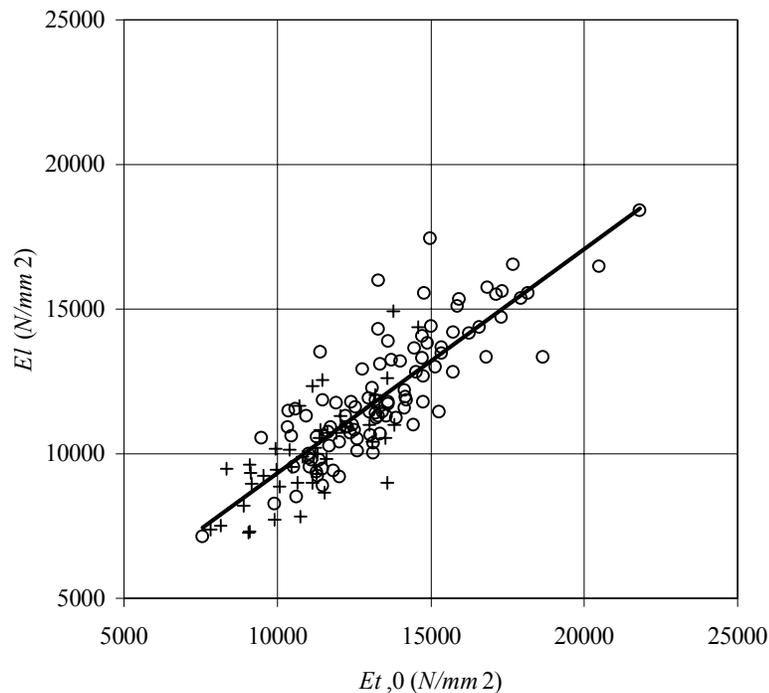
**Tabla 4.19 MOR, MOE estático y dinámico, y densidad de las 200 vigas. Comparación de las libres de médula con las que la contienen**

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

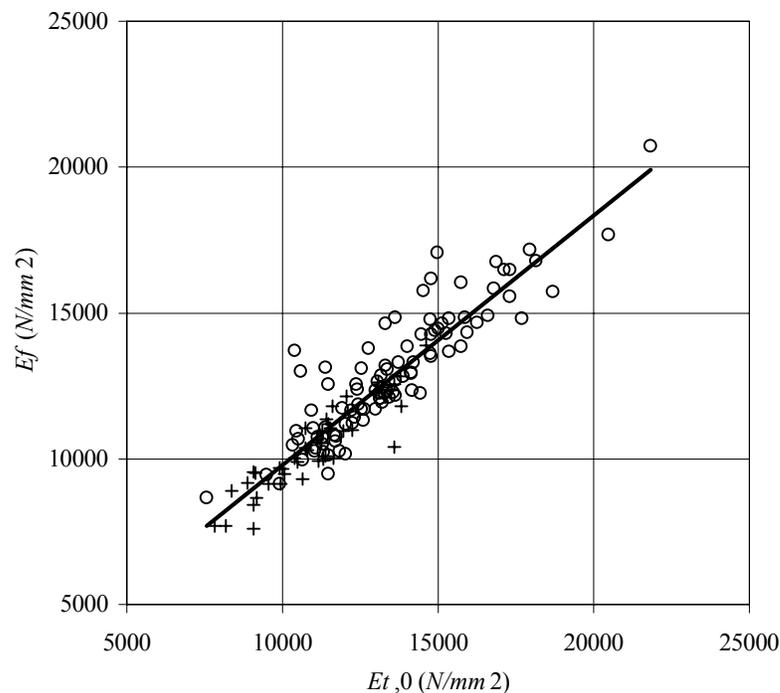


**Figura 4.16** Relación entre el MOE estático en tracción paralela a las fibras y el MOE dinámico calculado a través de vibraciones longitudinales

(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.

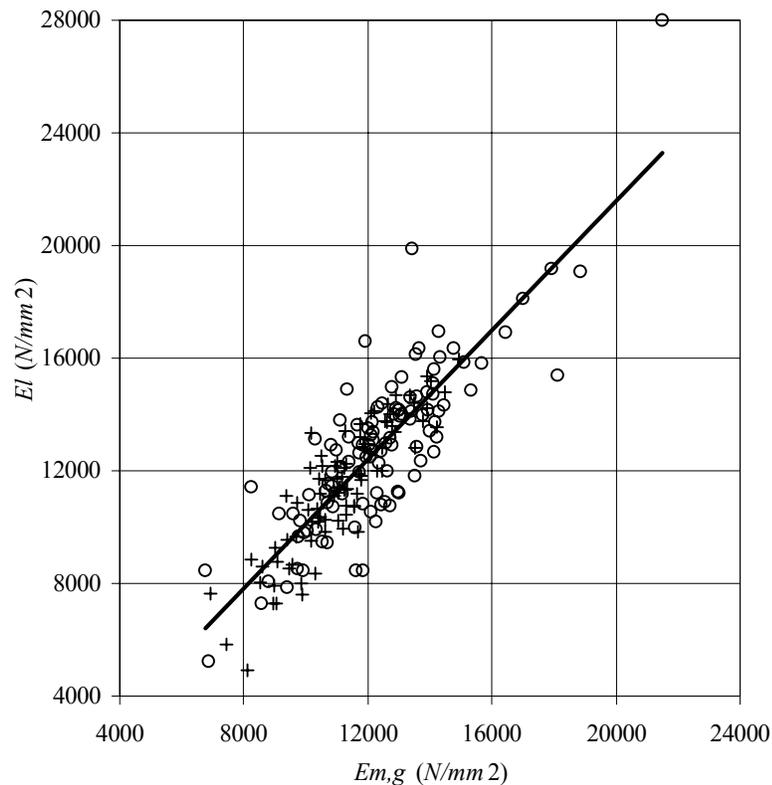


**Figura 4.17** Relación entre el *MOE* estático en tracción paralela a las fibras y el *MOE* dinámico calculado a través de vibraciones flexionales (P)

(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

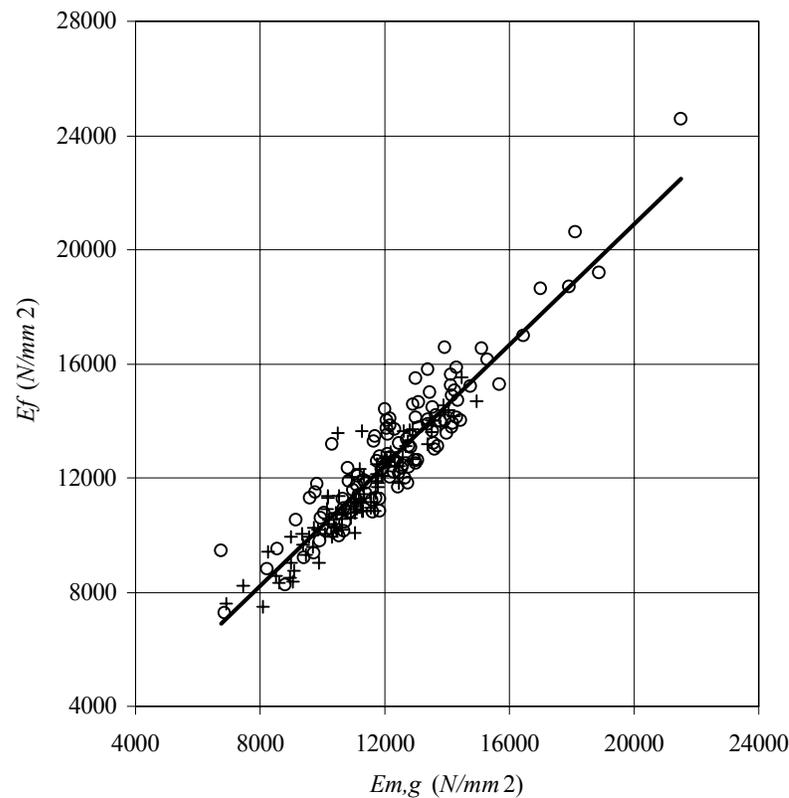
tracción paralela a las fibras y el *MOE* dinámico longitudinal y flexional (de plano), respectivamente, para las 142 tablas. Los correspondientes coeficientes de correlación para todas las probetas son 0,85 y 0,92. Las tablas libres de médula alcanzan valores de 0,83 y 0,90, mientras que los valores 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> <sup>(1)</sup> y <i>gd</i>		Sin <i>méd.</i> , <i>fis</i> <sup>(1)</sup> 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> <sup>(1)</sup> y <i>gd</i>		Sin <i>méd</i> , <i>fis</i> <sup>(1)</sup> 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.

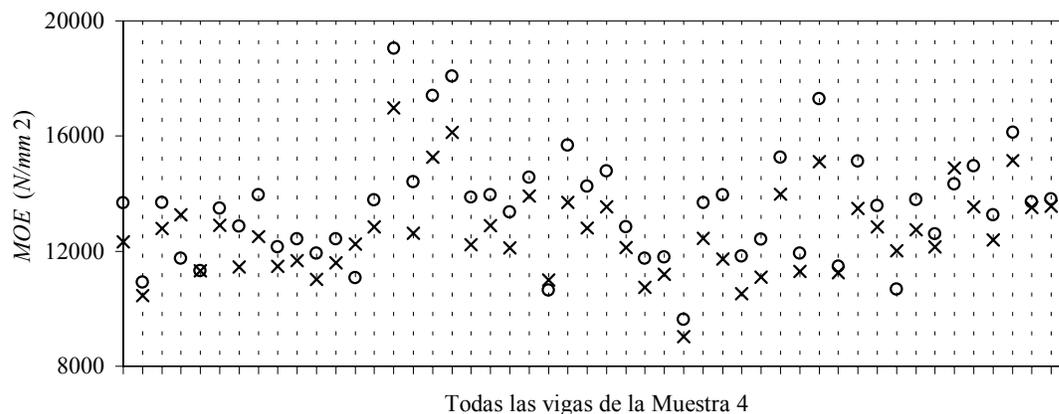
Una observación de los resultados para cada una de las 50 vigas puede hacerse en la Figura 4.20. La misma permite apreciar que la obtención de valores medios mayores para el *MOE* local que para el global, es producto de resultados individuales que mayoritariamente muestran esa tendencia, ya que en 44 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.



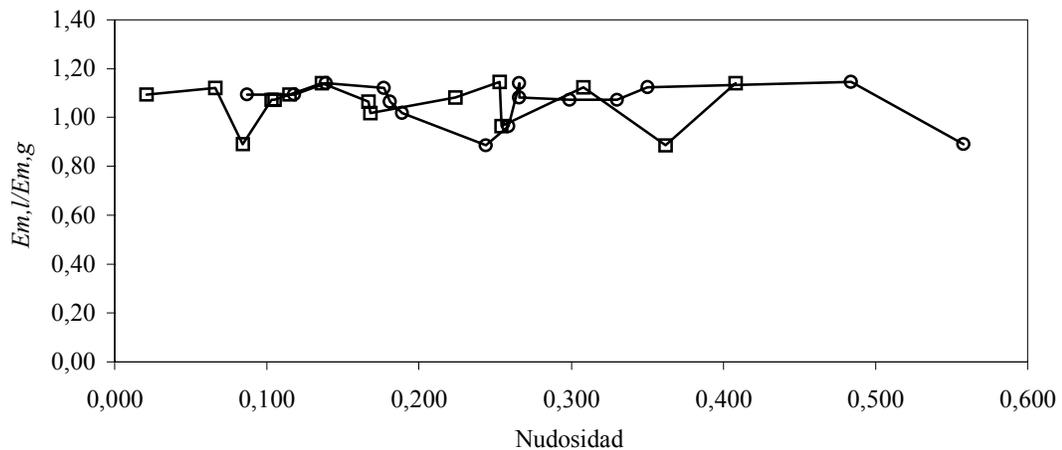
**Figura 4.20** *MOE global y el MOE local*

(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  $G = E_{m,i}/16$ , 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  $9414 N/mm^2$ , uno medio de  $13199 N/mm^2$ , uno máximo de  $17699 N/mm^2$ , una desviación estándar de  $1614 N/mm^2$  y un coeficiente de variación de 0,12. El valor medio del *MOE* local ( $13522 N/mm^2$ ) es entonces un 2% mayor que el obtenido a través del ajuste teórico del *MOE* global ( $13199 N/mm^2$ ), 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<sup>(1)</sup> 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**

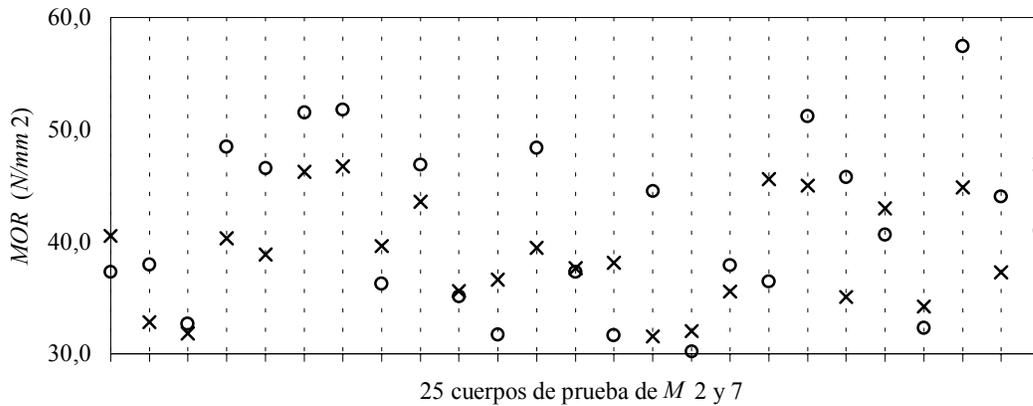
(1) Ajustados a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); (2) ajustados a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996); (3) fisuras que exceden la longitud máxima establecida en prEN 14081-1 (2000) para clases resistentes superiores a C18.

	Todos (n = 50 / 50)	Sin médula (n = 37 / 37)	Sin <i>fis</i> <sup>(3)</sup> y <i>gd</i> (n = 39 / 39)	Sin <i>méd</i> , <i>fis</i> <sup>(3)</sup> y <i>gd</i> (n = 32 / 30)	
$f_m^{(1)} / f_{c,0}^{(2)}$ N/mm <sup>2</sup>	<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 <sup>2</sup>	<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.

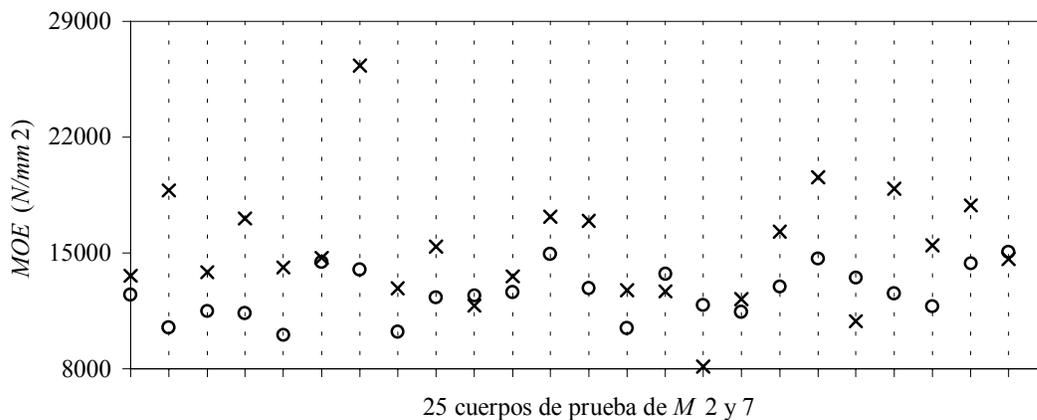
En la Figura 4.23 puede apreciarse el mismo tipo de análisis aplicado a ambos módulos de elasticidad, pero con resultado diferente al anterior. Es posible distinguir en este caso 20 (80%) valores mayores para el *MOE* en compresión paralela a las fibras que en flexión. Si bien aquel exhibe elevadas medidas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

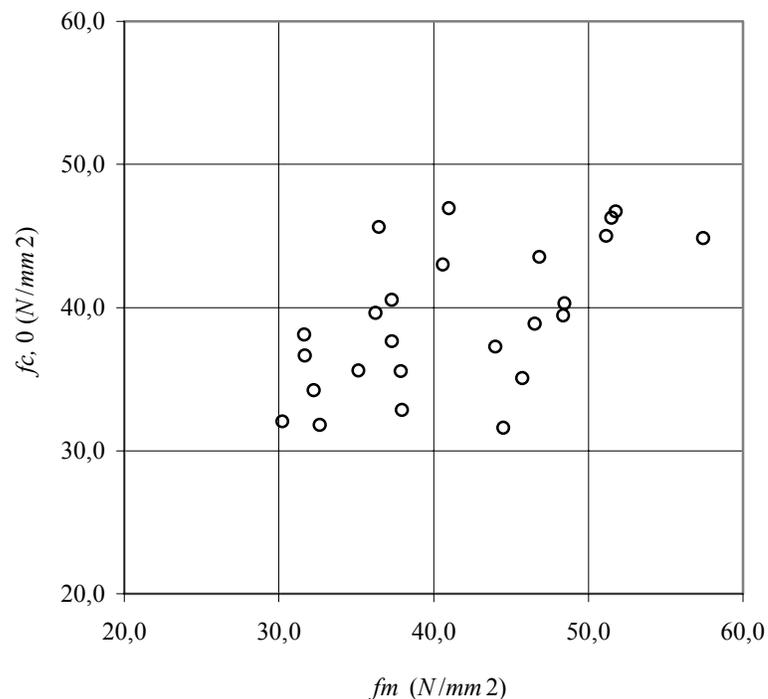
(o) *MOR* en flexión ajustado a una altura de referencia de 150mm conforme a EN 384 (1996); (x) *MOR* en compresión paralela a las fibras ajustado a un contenido de humedad del 12% conforme a EN 384 (1996).



**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.

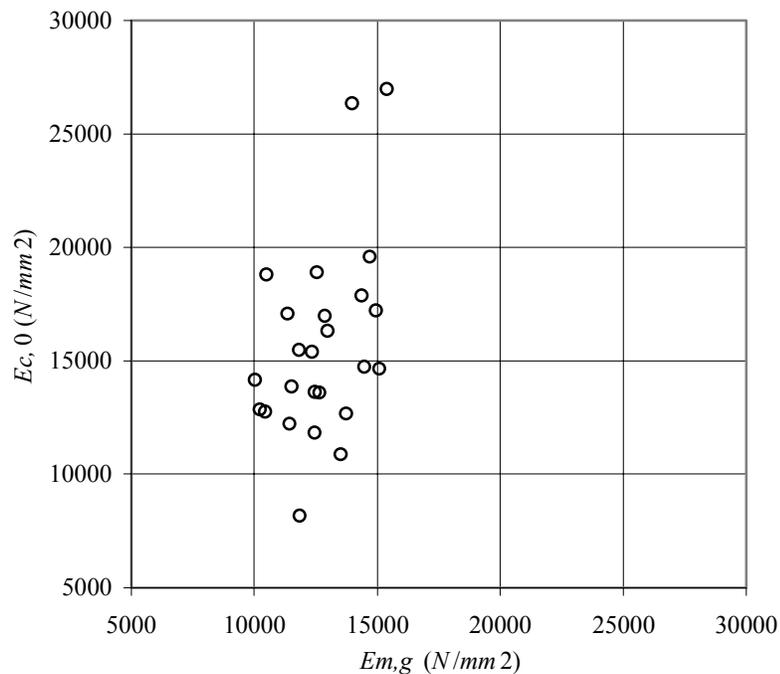


**Figura 4.24** Relación entre  $f_m$  y  $f_{c,0}$  para los 25 pares de cuerpos de prueba

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 <sup>(3)</sup> 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 <sup>(3)</sup> 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 <sup>(3)</sup> 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 <sup>(3)</sup> 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 <sup>(3)</sup> 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<sup>(1)</sup></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<sup>(1)</sup></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<sup>(1)</sup></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<sup>(1)</sup></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<sup>(1)</sup></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 ( $h = 50mm$ ) 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 ( $h = 25mm$ ), y para las muestras 2 ( $h = 75mm$ ), 3 ( $h = 100mm$ ) y 4 ( $h = 150mm$ ). 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 discriminarán 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
méd	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 <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup>	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 <sup>3</sup>	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
	$\rho_{05}$	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/mm<sup>2</sup> y 45,9N/mm<sup>2</sup> 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/mm<sup>2</sup> y 12790N/mm<sup>2</sup>, 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		
	$f_{t,0}^{(1)}$ N/mm <sup>2</sup> ER / Co (n = 75 / 75)	$E_{t,0}^{(2)}$ N/mm <sup>2</sup> ER / Co (n = 75 / 75)	$\rho^{(2)}$ kg/m <sup>3</sup> ER / Co (n = 75 / 75)	$f_{c,0}^{(2)}$ N/mm <sup>2</sup> ER / Co (n = 25 / 25)	$E_{c,0}^{(2)}$ N/mm <sup>2</sup> ER / Co (n = 25 / 25)	$\rho^{(2)}$ kg/m <sup>3</sup> ER / Co (n = 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	-	-
$\rho_{05}$	-	-	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<sup>(3)</sup> 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<sup>(3)</sup> y gd. K[1/3</i>	32,9 / 33,0	14029 / 13782	401 / 466	539 / 561	58 (17) / 61 (17)
Sin <i>méd, fis<sup>(3)</sup> 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<sup>(3)</sup> y gd. K[1/4</i>	35,3 / 36,5	14705 / 14317	389 / 462	550 / 562	35 (10) / 43 (12)
Sin <i>méd, fis<sup>(3)</sup> 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/mm<sup>2</sup> y 33,9N/mm<sup>2</sup>, respectivamente, con coeficientes de variación de 0,42 y 0,37. Para el *MOE*, los valores medios reportados son 11850N/mm<sup>2</sup> y 12850N/mm<sup>2</sup>, 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			
	$f_{t,0,05}^{(1)}$	$\bar{E}_{t,0}^{(2)}$	$n$	$f_{c,0,05}^{(2)}$	$\bar{E}_{c,0}^{(2)}$	$n$	
	$N/mm^2$	$N/mm^2$		$N/mm^2$	$N/mm^2$		
	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 <sup>(4)</sup> / 31,9	25966 / 16225	15 / 22
	Con médula	14,2 / 11,8 <sup>(4)</sup>	11443 / 12005	32 / 16	29,7 <sup>(4)</sup> / 32,1 <sup>(4)</sup>	13590 / 11953	10 / 3
c)	Sin <i>méd, fis</i> <sup>(3)</sup> y <i>gd</i>	19,3 / 21,1	14165 / 14390	42 / 54	25,4 <sup>(4)</sup> / 31,8 <sup>(4)</sup>	25592 / 16427	12 / 18
	Restantes	14,3 / 16,2	11492 / 12257	33 / 21	29,7 <sup>(4)</sup> / 31,6 <sup>(4)</sup>	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 <sup>(3)</sup> ) / 93 (27-37 <sup>(3)</sup> )
	C24 $39,16 > PC/27,53$	24,8 / 26,1	11049 / 10958	401 / 454	51 (15-20 <sup>(3)</sup> ) / 35 (10-14 <sup>(3)</sup> )
	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 <sup>(3)</sup> ) / 88 (25-35 <sup>(3)</sup> )
	C24 $12346 > E_{m,g}/9365$	26,1 / 25,7	11081 / 11091	399 / 456	49 (14-19 <sup>(3)</sup> ) / 40 (11-16 <sup>(3)</sup> )
	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 <sup>(3)</sup> ) / 50 (33-37 <sup>(3)</sup> )
C24	$39,16 > PC/27,53$	16,1 / 16,1 <sup>(4)</sup>	11247/11382	409/458	27 (18-20 <sup>(3)</sup> ) / 16 (11-12 <sup>(3)</sup> )
C18	<i>rech vis</i> y $PC < 27,53$	9,5 <sup>(4)</sup> / 11,8 <sup>(4)</sup>	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 <sup>(3)</sup> ) / 47 (31-35 <sup>(3)</sup> )
C24	$12346 > E_{t,0}/9365$	16,2 / 16,2	11276/11292	415/461	30 (20-22 <sup>(3)</sup> ) / 21 (14-16 <sup>(3)</sup> )
C18	<i>rech vis</i> y $E_{t,0} < 9365$	9,5 <sup>(4)</sup> / 18,3 <sup>(4)</sup>	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***

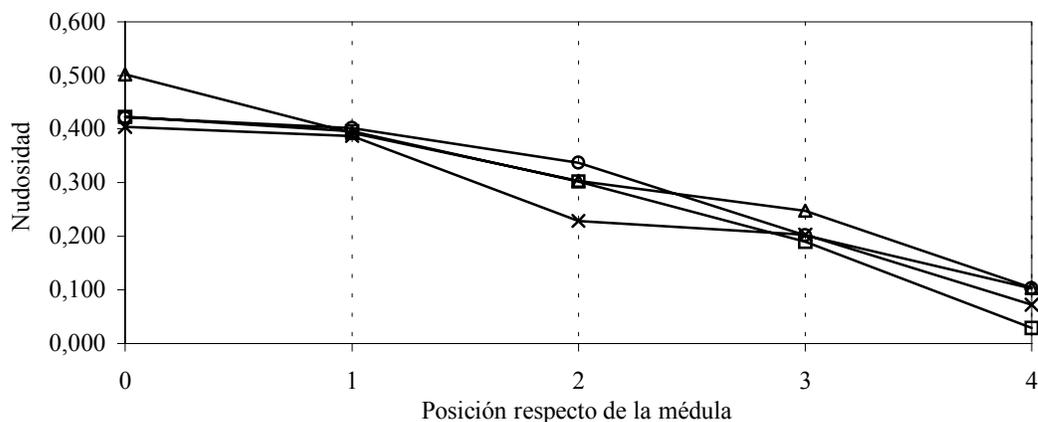
Utilizando cuerpos de prueba procedentes de la provincia de Corrientes, para los cuales fue posible conservar la información relativa a su ubicación en el árbol, se analizará en el presente apartado la variación de la nudosidad, la resistencia, el módulo de elasticidad y la densidad aparente, en función 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>	
<i>M 5</i>	Todas	9	16	24	13	4
	Sin <i>fis</i> <sup>(1)</sup> y <i>gd</i>	7	16	22	13	3
<i>M 6</i>	Todas	10	17	23	13	3
	Sin <i>fis</i> <sup>(1)</sup> y <i>gd</i>	8	17	20	12	3



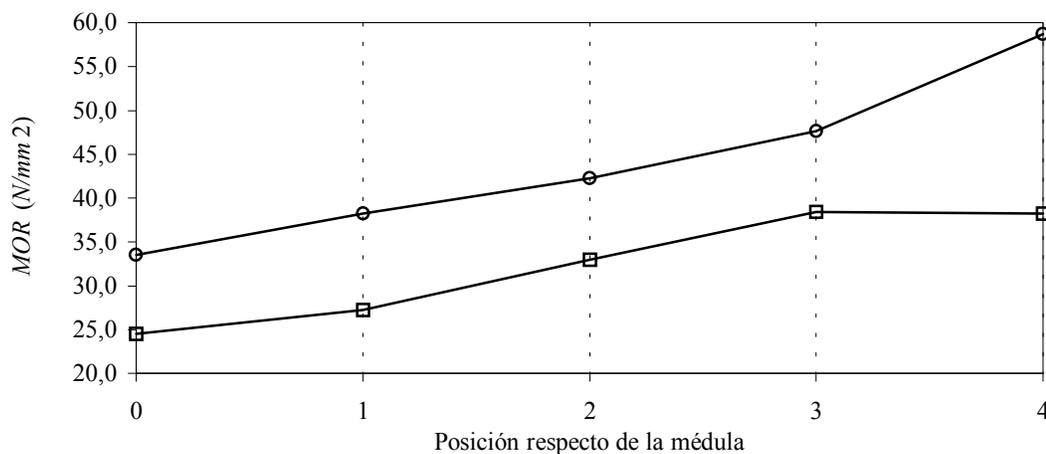
**Figura 4.26 Variación de la nudosidad en función de la distancia a la médula**

(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.

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.



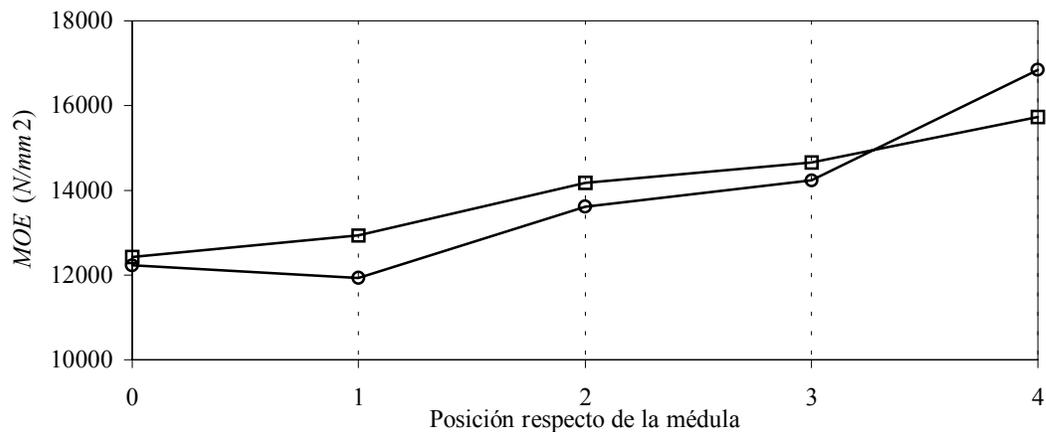
**Figura 4.27 Variación del MOR en función de la distancia a la médula**

(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.

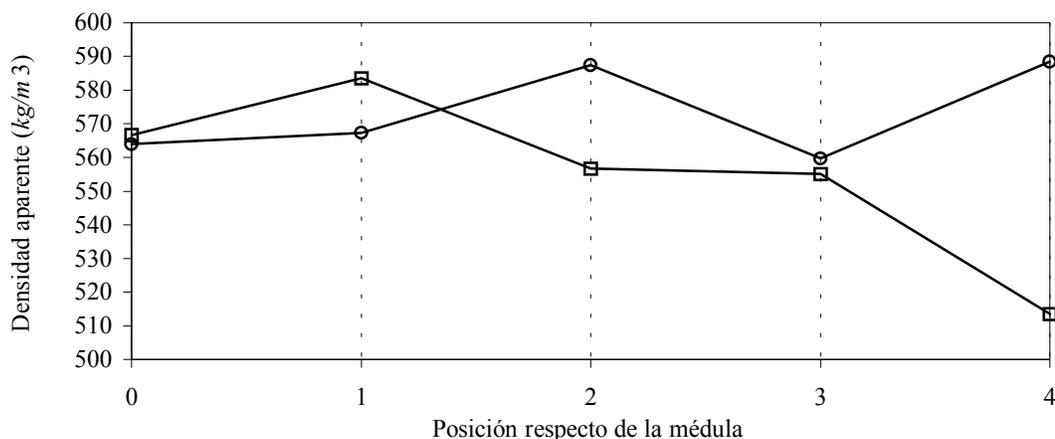


**Figura 4.28** Variación del MOE en función de la distancia a la médula

(○) MOE en flexión para M 5; (□) MOE en tracción para M 6; 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  $\rho$  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.

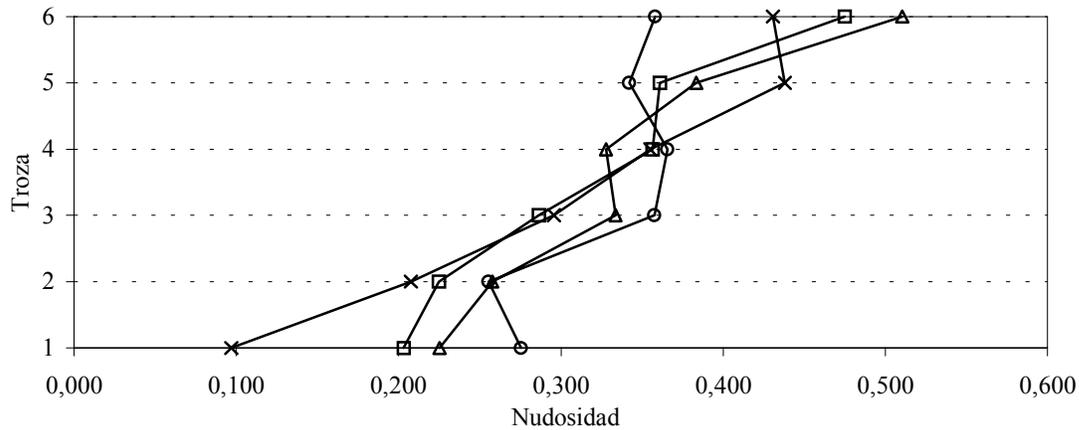
**Tabla 4.36 Cantidad de cuerpos de prueba discriminados por la posición de la troza de la cual fueron extraídos**

(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> <sup>(1)</sup> y <i>gd</i>	21	13	6	7	12	5
	Sin <i>méd, fis</i> <sup>(1)</sup> 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> <sup>(1)</sup> y <i>gd</i>	19	15	6	5	11	6
	Sin <i>méd, fis</i> <sup>(1)</sup> 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	-	-

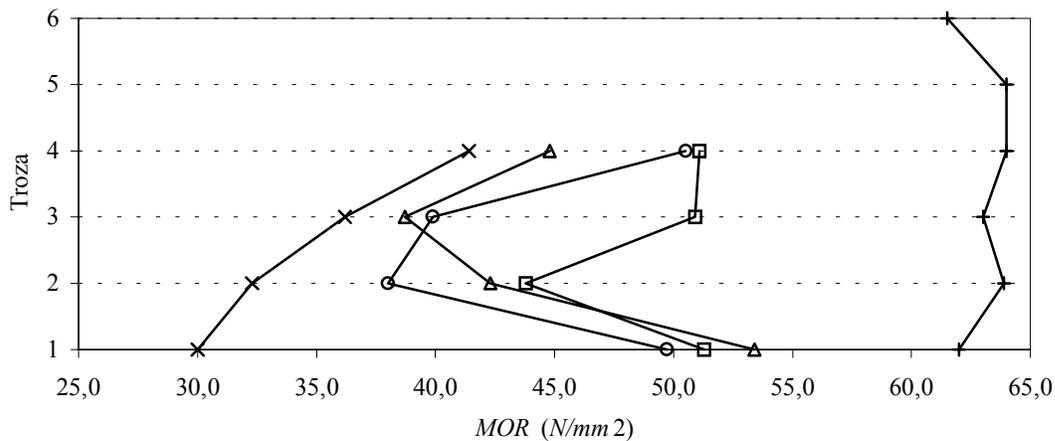
La variación de la resistencia en función de la altura puede apreciarse con distintos niveles de discriminación en las figuras 4.31, 4.32 y 4.33. En la primera de ellas se presentan los valores medios del *MOR* en flexión sin corregir por altura de probeta y discriminados por muestra. De esta manera 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.

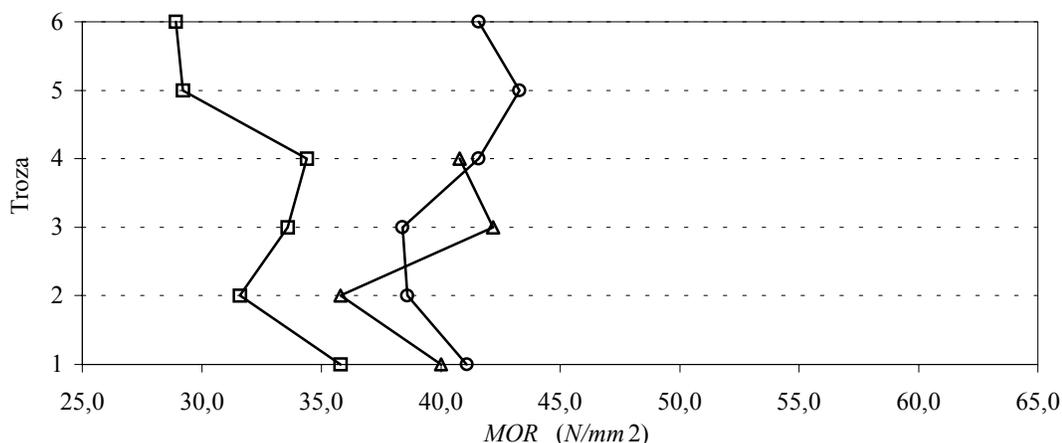


**Figura 4.31** Variación del MOR en flexión en función de la altura en el árbol

(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.



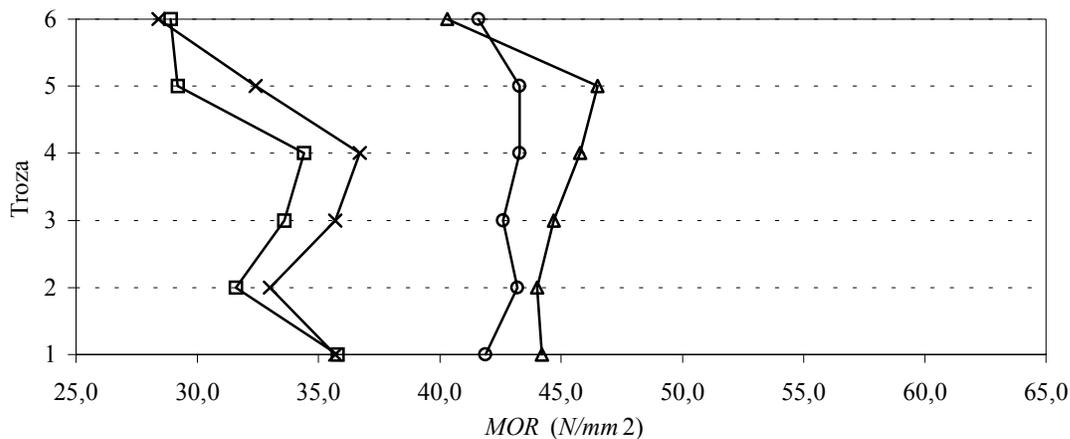
**Figura 4.32 Variación del MOR en función de la altura en el árbol**

(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.



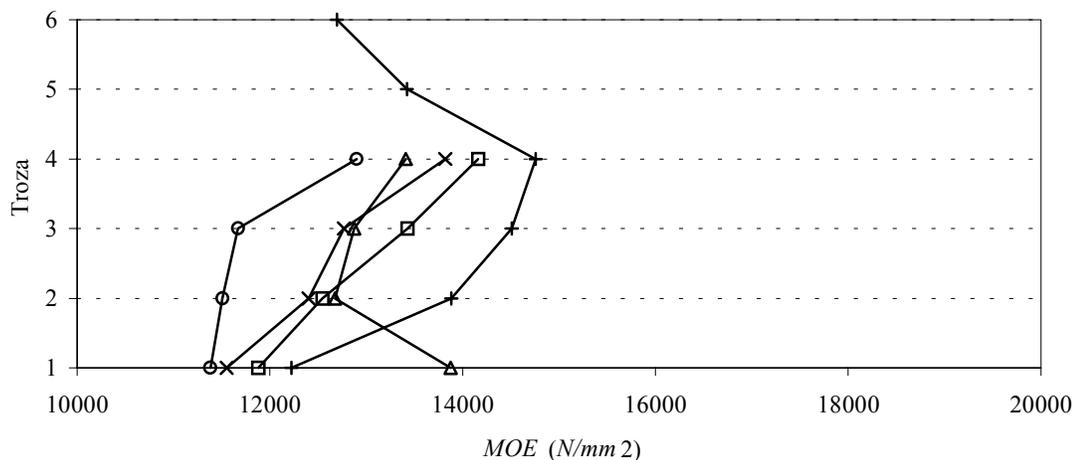
**Figura 4.33 Variación del MOR en tablas de M 5 y 6 en función de la altura en el árbol**

(o) Todas las tablas de M 5; (Δ) tablas de M 5 libres de médula, fisuras<sup>(1)</sup> y grandes defectos; (□) todas las tablas de M 6; (x) tablas de M 6 libres de médula, fisuras<sup>(1)</sup> 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.



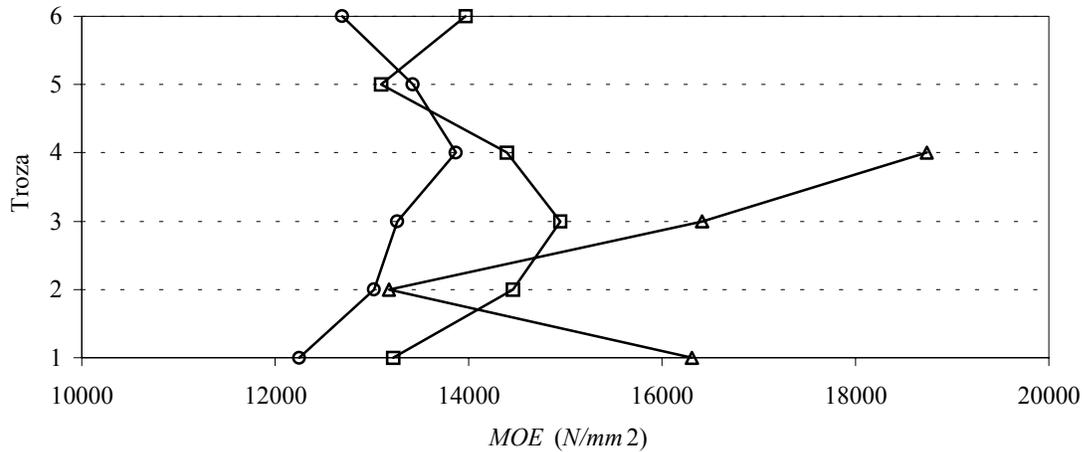
**Figura 4.34 Variación del MOE en flexión en función de la altura en el árbol**

(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.

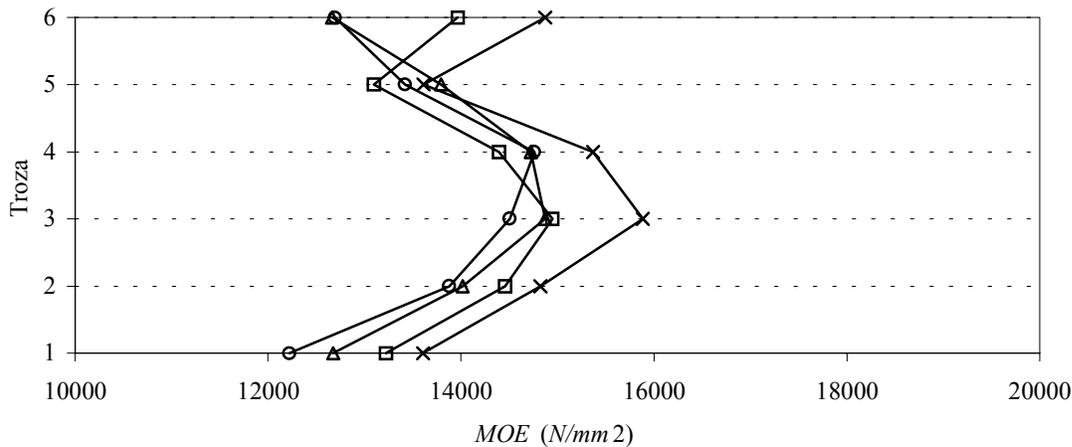
Las muestras 1 y 2 exhiben un crecimiento en los valores medios en función de la altura, en el primer caso más acentuado entre las trozas 3 y 4, y prácticamente con variación lineal en la segunda. La Muestra 3, en cambio, muestra el mayor valor en la troza inferior, para luego acusar una fuerte disminución 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).

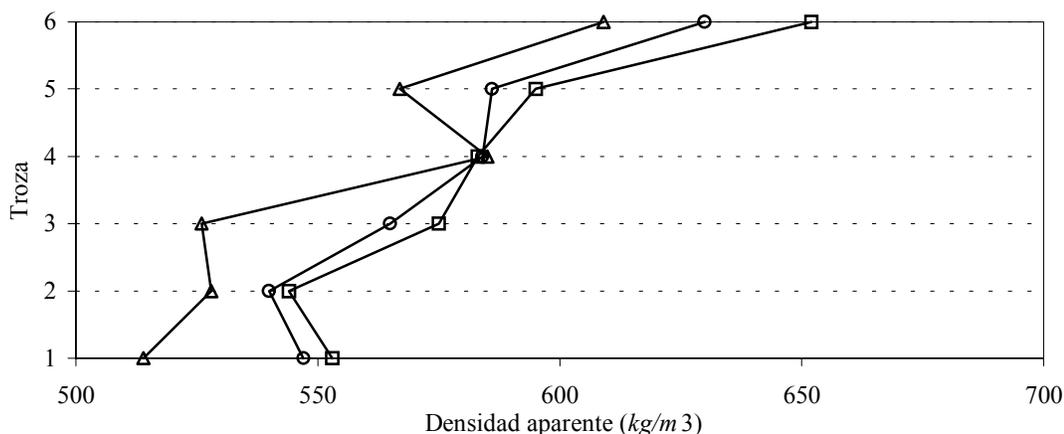


**Figura 4.36** Variación del MOE en tablas de M 5 y 6 en función de la altura en el árbol

(o) Todas las tablas de M 5; (Δ) tablas de M 5 libres de médula, fisuras<sup>(1)</sup> y grandes defectos; (□) todas las tablas de M 6; (x) tablas de M 6 libres de médula, fisuras<sup>(1)</sup> 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  $\rho$  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.