

5 Conclusiones

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

5.2 Conclusiones relacionadas al desarrollo de modelos para una clasificación mecánica

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

5.4 Futuras investigaciones

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

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

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

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