

2 Clasificación por resistencia y características del E. grandis

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

2.1 La clasificación por resistencia

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

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

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

Las numerosas normas de clasificación redactadas en las décadas posteriores difieren en los parámetros considerados y/o en la forma de medirlos, pues recogen experiencias propias de cada país o región, y a su vez se orientan a distintas especies o a especies de diferentes procedencias. En este sentido pueden consultarse, entre otras, la norma alemana DIN 4074, Teil 1 (1989), la estadounidense ASTM D 245-98 (1999) y la australiana AS 2082/2000 (2000). Todas tienen en común la consideración de la correlación existente entre los parámetros considerados y la resistencia y rigidez del material evaluado.

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

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

2.1.1 Características generales de la madera como material estructural

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

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

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

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

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

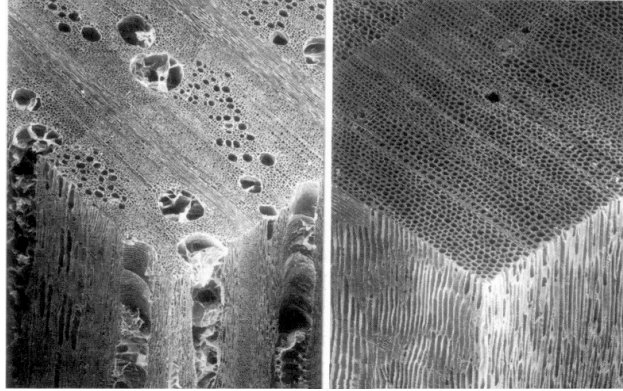


Figura 2.1 Estructura anatómica de la madera

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

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

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

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

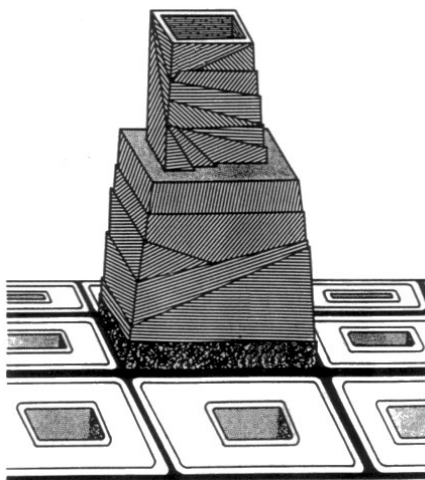


Figura 2.2 Estructura de una célula

(Adaptada de Hoffmeyer, 1995)

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

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

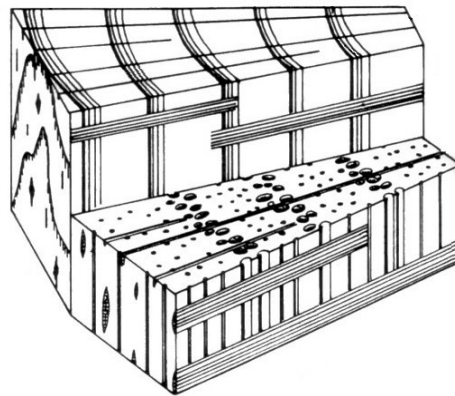


Figura 2.3 Estructura macroscópica de la madera

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

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

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

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

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

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

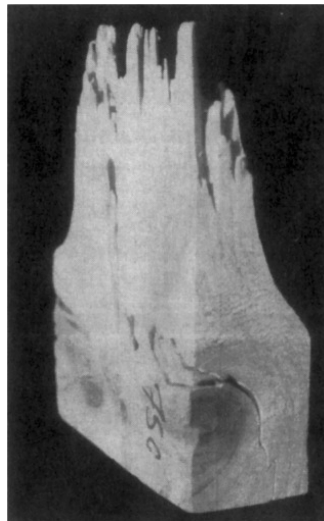


Figura 2.4 Anomalías producidas por la presencia de un nudo

(Adaptada de Hoffmeyer, 1995)

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

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

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

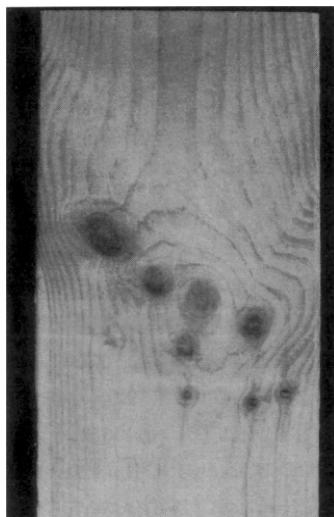


Figura 2.5 Agrupamiento de nudos

(Adaptada de Hoffmeyer, 1995)

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

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

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

contenido, las que también facilitan el ataque biológico.

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

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

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

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

solicitaciones exteriores.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.1.2 Clasificación visual

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.1.3 Clasificación mecánica

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

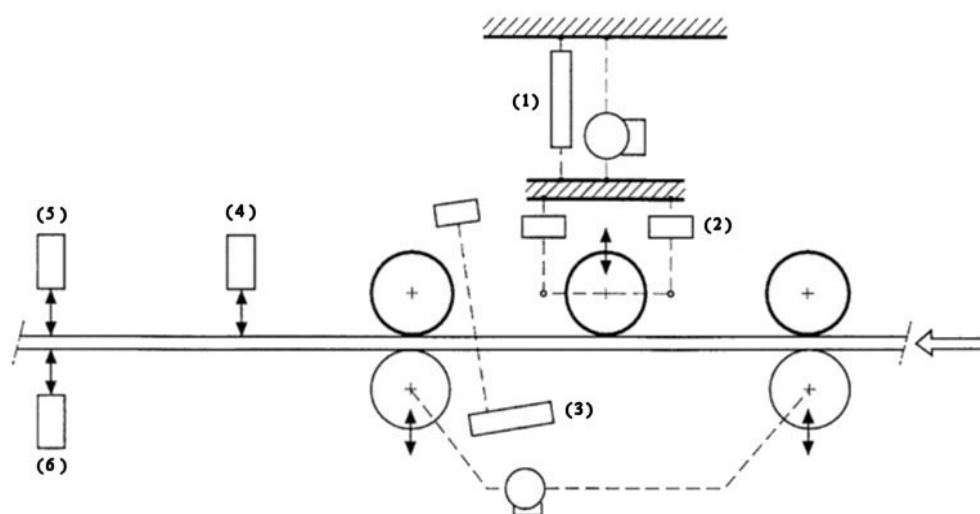


Figura 2.6 Disposición esquemática de una máquina de clasificar

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

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

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

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

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

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

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

2.1.4 El sistema internacional europeo de clases resistentes

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

La madera aserrada clasificada mecánicamente puede ser asignada directamente a una

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

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

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

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

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

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

2.2 Características particulares del *E. grandis*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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