

### ***3 Programa experimental***

---

---

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

#### ***3.1 Materiales***

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

##### ***3.1.1 Diseño de las muestras***

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

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

**Tabla 3.1 Muestras para ensayo**

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

### 3.1.2 Selección y preparación de los cuerpos de prueba

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

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

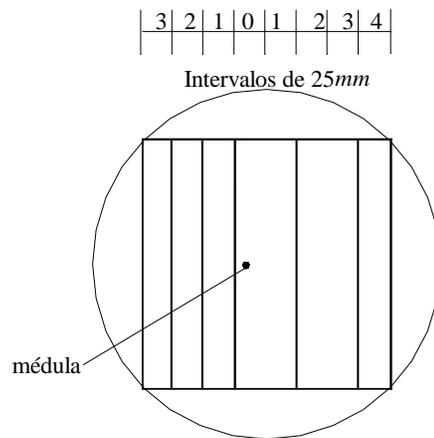
Luego de realizado el apeo y corte de trozas, en longitudes de aproximadamente  $4m$ , el aserrado se produjo siguiendo los procesos habituales en los establecimientos que las empresas proveedoras del material utilizan para su producción. El apeo de árboles y preparación de la madera proveniente de Entre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

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

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

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

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



**Figura 3.1** Sistema de corte y marcación de las piezas

### 3.2 Métodos

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

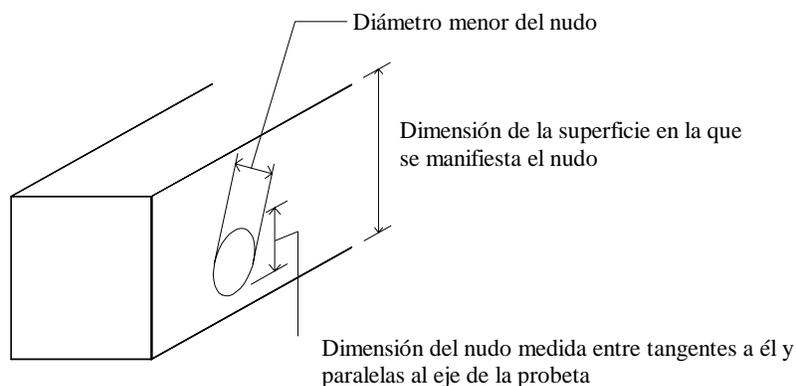
#### 3.2.1 Registro de dimensiones y características visuales

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

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

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

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



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

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

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

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

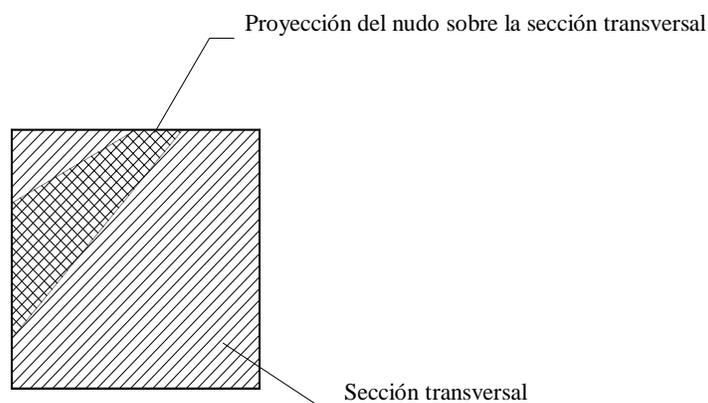
Dos criterios aplicados solamente a vigas: i) relación entre el diámetro menor del nudo mayor y la dimensión transversal de la superficie en la cual aparece. En nudos de arista, para la dimensión del nudo se considera el menor valor entre la distancia entre líneas tangentes a él y paralelas al eje longitudinal,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

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

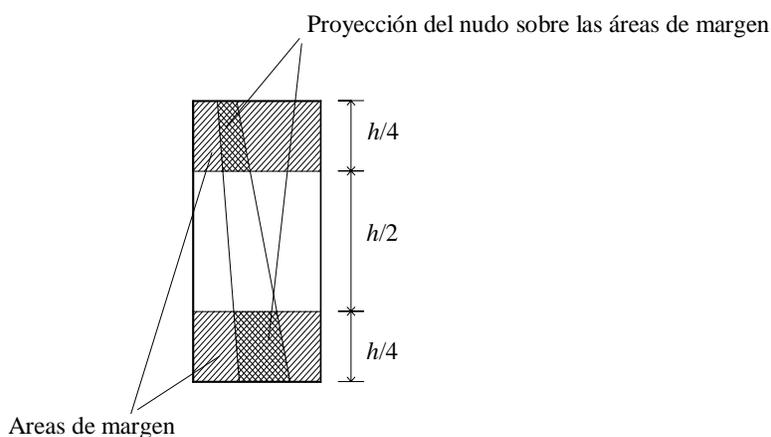
La desviación general de las fibras fue determinada en las cuatro superficies de cada cuerpo de prueba utilizando un trazador, consistente en una manivela provista de un mango articulado en un extremo y un clavo afilado y ligeramente inclinado en el otro. Aplicando este instrumento con la adecuada presión,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

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

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



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



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

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

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

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

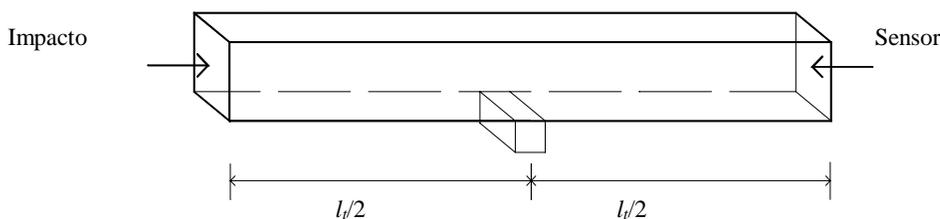
### ***3.2.2 Determinación de la frecuencia fundamental de vibración***

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

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

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

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



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

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

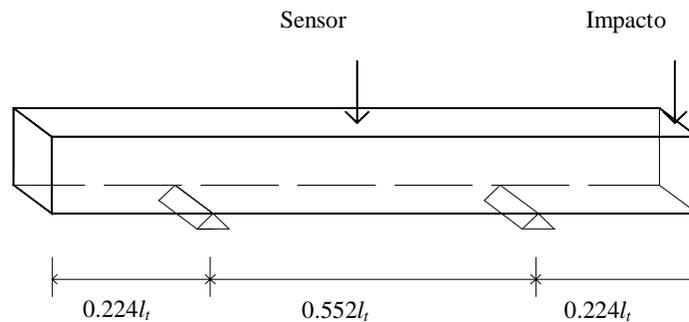
$$E_l = \frac{4l_t^2 f_f^2 \rho_p}{m_v^2} \quad (Ec 3.1)$$

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

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

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

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



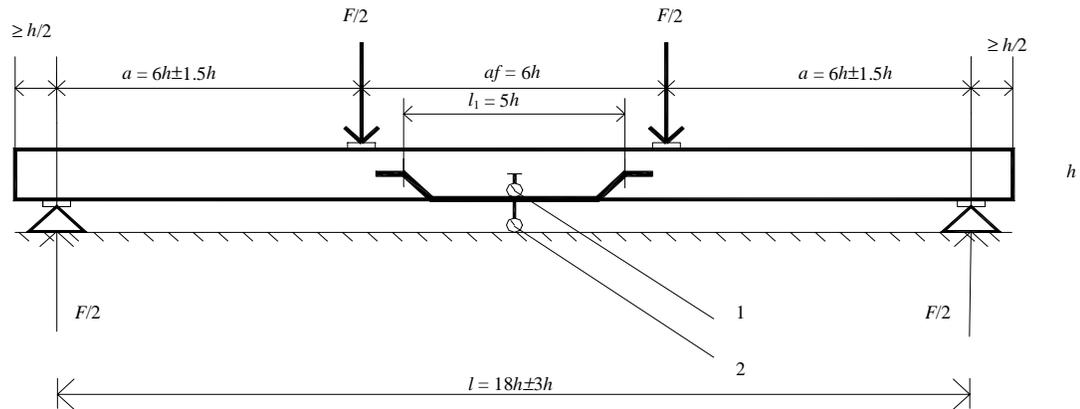
**Figura 3.6 Disposición del ensayo para determinar la frecuencia fundamental de vibración flexional**

### 3.2.3 Ensayos estáticos

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

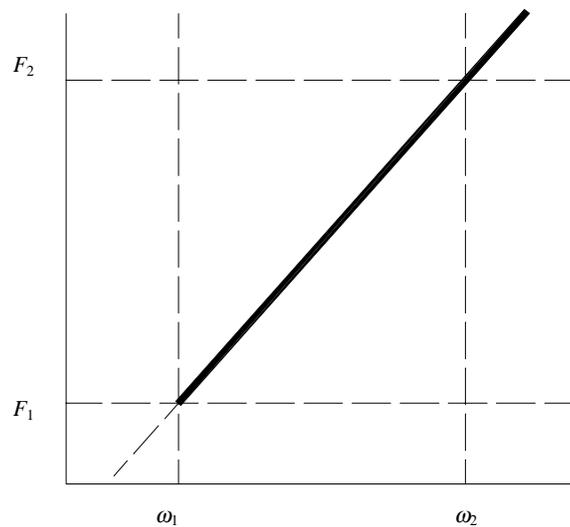
Los cuerpos de prueba sometidos al ensayo de flexión estática fueron ubicados con una separación entre apoyos igual a  $18 \pm 3h$  y cargados simétricamente a una distancia igual a  $6 \pm 1,5h$  de cada apoyo. La disposición general se indica esquemáticamente en la Figura 3.7. La zona aparentemente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

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



**Figura 3.7 Disposición general del ensayo de flexión estática**

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



**Figura 3.8 Lecturas de cargas y deformaciones en período elástico**

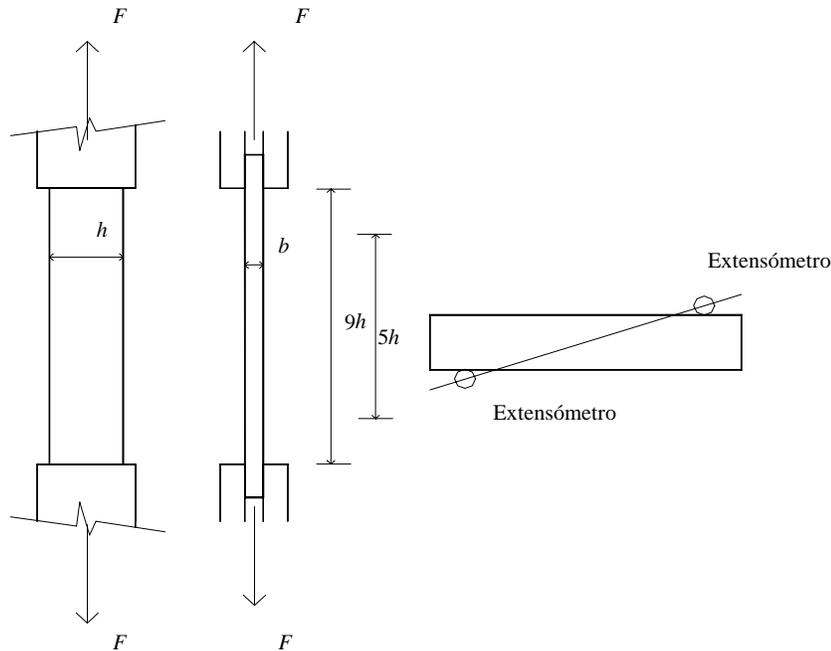
Las deformaciones en período elástico (ver Figura 3.8) fueron medidas en la parte inferior del centro del vano respecto de los apoyos para el cálculo del *MOE* global, y sobre el eje neutro a ambos lados del cuerpo de prueba, respecto de puntos ubicados simétricamente y separados  $5h$  para el *MOE*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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

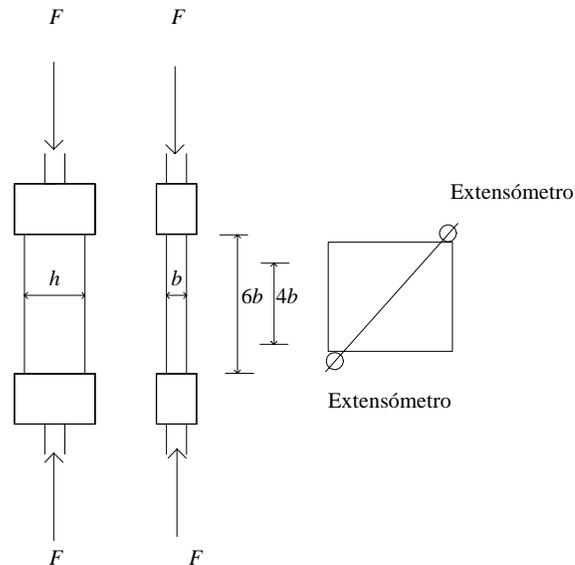
Los ensayos de compresión paralela a la dirección de las fibras fueron llevados a cabo con los cuerpos de prueba de la Muestra 7, preparados con una longitud igual a 6 veces la menor dimensión transversal ( $b$ ). La disposición general del ensayo se indica esquemáticamente en la Figura 3.10.

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

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

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

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



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

### 3.2.4 Determinación de la densidad aparente y el contenido de humedad

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

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

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

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

### 3.2.5 Procesamiento de datos

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

