



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL

FACULTAD REGIONAL VENADO TUERTO

Departamento Ingeniería Civil

Proyecto Final N°59

**“DETERMINACIÓN DE RESISTENCIA A FLEXIÓN Y MÓDULO
DE ELASTICIDAD EN PIEZAS DE ÁLAMO PARA EL CLON
POPULUS DELTOIDES AUSTRALIANO 129/60”**

Autor:

OGGERO, Joel

Director técnico:

GUILLAUMET, Alfredo A.

Co-directores:

FILIPPETTI, María C.

MANAVELLA, Roberto D.

Director Académico:

ALBERDI, Carlos R.

2016

DEDICATORIA:

A mi padre, por haberme inculcado los valores de la curiosidad y la perseverancia.

A mi madre, por estimular en mí las virtudes del enfoque y la perspectiva.

A mi hermano, por ayudarme a desarrollar la paciencia y el buen humor.

Al equipo docente de la universidad, por brindarme las herramientas y el conocimiento necesarios para construir la vida que quiera diseñar.

ÍNDICE DE CONTENIDOS:

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1 Marco teórico.....	7
1.2 Objetivos.....	23
2. MATERIAL	24
2.1 Descripción general del Álamo.....	24
2.2 Álamo de ensayo.....	28
3. MÉTODO	31
3.1 Clasificación visual por resistencia.....	31
3.2 Ensayo a flexión:	
3.2.1) Materiales.....	38
3.2.2) Desarrollo experimental.....	41
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
4.1 Piezas aserradas:	
4.1.1) Relación entre los principales parámetros y las propiedades mecánicas.....	46
4.1.2) Análisis de propiedades resistentes frente a la presencia de médula.....	49
4.1.3) Análisis de la relación entre el módulo de elasticidad global y local.....	50
4.1.4) Clasificación visual en clases resistentes según la Norma IRAM 9662/4.....	51
4.1.5) Comparación de las clases resistentes propuestas con el sistema internacional europeo.....	55

4.1.6) Comparación de las propiedades estructurales de tablas de Populus con las presentadas en el Suplemento 1 del Reglamento CIRSOC 601 para el mismo clon.....	56
4.1.7) Comparación de las propiedades estructurales del Populus con las que se presentan para otras especies en el Suplemento 1 del Reglamento CIRSOC 601.....	57
4.2 Piezas industrializadas:	
4.2.1) Tablas con unión finger.....	58
4.2.2) Vigas laminadas encoladas.....	59
4.2.3) Análisis de la relación entre el módulo de elasticidad local y el global.....	60
4.2.4) Comparación de los valores experimentales de resistencia a flexión con los expuestos en la Norma IRAM 9661 para tablas con unión finger joint.....	61
4.2.5) Comparación de los valores experimentales de resistencia a flexión y módulo de elasticidad global con los expuestos en la Norma IRAM 9660-1 para vigas laminadas encoladas.....	61
5. RESOLUCIÓN DE UN ELEMENTO ESTRUCTURAL.....	62
5.1 Miembro curvo sometido a flexión y compresión longitudinal.....	62
6. CONCLUSIONES.....	68
7. AGRADECIMIENTOS.....	70
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
9. ANEXO DE BASES DE DATOS	

1. INTRODUCCIÓN

La madera es un material de origen vegetal, orgánico, que inicialmente fue explotado de bosques naturales pero que en la actualidad, con una tendencia creciente, se obtiene de plantaciones programadas. Dicha condición es importante para que este recurso renovable sea utilizado en un sistema sustentable, aprovechando sus evidentes ventajas desde el punto de vista del bajo consumo de energía que requiere para su producción y los beneficios que ocasiona al medio ambiente.

Desde el punto de vista estructural, la madera se presenta como una alternativa a otros materiales clásicos, como lo son el hormigón y el acero. Respecto de éstos ofrece ventajas y desventajas, estando, en nuestro país, poco difundidas aquellas características positivas. Por ejemplo, su agradable aspecto, sus nobles propiedades resistentes en relación a su peso, su durabilidad cuando el diseño es el adecuado, son condiciones favorables, que si no se consideran adecuadamente, afectan sus posibilidades de utilización.

En nuestro país existe una gran riqueza forestal compuesta por especies tanto nativas como exóticas. No obstante, las especies autóctonas, al no ser forestadas están en un proceso de desaparición, con las consecuencias ecológicas que esto implica y a su vez con la influencia negativa que tiene para un uso sistemático del material. Las especies implantadas de rápido crecimiento no poseen en muchos casos tan elevadas propiedades mecánicas, aunque sí aceptables, y por lo demás se dispone de ellas en cantidad suficiente.

La madera se forma en un proceso que realizan los arboles vivos a partir del dióxido de carbono y del agua, por medio de la energía solar. Los árboles en crecimiento absorben dióxido de carbono y producen oxígeno. Como media, un árbol típico absorbe, a través de la fotosíntesis, el equivalente a 1 t de dióxido de carbono por cada metro cúbico de crecimiento, al mismo tiempo que produce el equivalente a 0,7 t de oxígeno (Edinburgh Centre for Carbon Management).

Por lo tanto, su utilización ayuda a preservar los recursos relacionados a los materiales no renovables. Además, la existencia de plantaciones que puedan ser explotadas de forma planificada contribuye al equilibrio ecológico y a la disminución de fenómenos no deseados- producidos por los efectos de la excesiva polución debida al uso masivo de combustibles fósiles- tales como el llamado efecto invernadero.

La industria de la madera orientada a la construcción requiere de poca energía para su producción. “Para fabricar el mismo peso de hormigón se precisa 4 veces más energía que para la madera; y esta relación sube a 60 en el caso del acero. En el elemento constructivo esta relación se atenúa, a veces, gracias al diseño estructural de cada material, pero en todo caso la madera da lugar a soluciones 10 veces más económicas en consumo de energía” (Arriaga, 1995).

Desde un enfoque ambiental, la madera es el único material constructivo que a lo largo de su elaboración produce un balance negativo de CO₂ (fija el dióxido de carbono). Además, se degrada fácilmente en la naturaleza y sus desechos pueden reciclarse o emplearse para producir energía u otros subproductos.

Todos estos aspectos positivos, requieren para su concreción de una planificación y raciocinio en la explotación.

Existen aspectos fundamentales para lograr el conocimiento y una correcta utilización de este material en estructuras, dentro de los cuales ocupan un lugar destacado la investigación de sus propiedades físico-mecánicas y la existencia de normas de ensayos, clasificación y diseño estructural. Es indudable además, que el punto de partida es conocer las propiedades de las maderas de utilización local, ya que a diferencia de otros materiales, sus particularidades están influenciadas por numerosos aspectos, tales como la especie, las condiciones del suelo donde crecen los árboles, el clima, entre otros.

Dentro de las especies de reforestación de rápido crecimiento se destaca por su potencial el álamo, y si se considera como zona de cultivo el delta del río Paraná se aprecia su cercanía a un mercado de consumo potencial muy importante. “El álamo en general se presenta como una especie de rápido crecimiento, baja densidad de la madera y rigidez, pero con resultados que podrían satisfacer las condiciones para fabricación de vigas laminadas o como vigas aserradas para pequeñas luces” (Castro, 2006).

1.1 Marco teórico

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 su estructura orientada, así como a la diferencia 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).

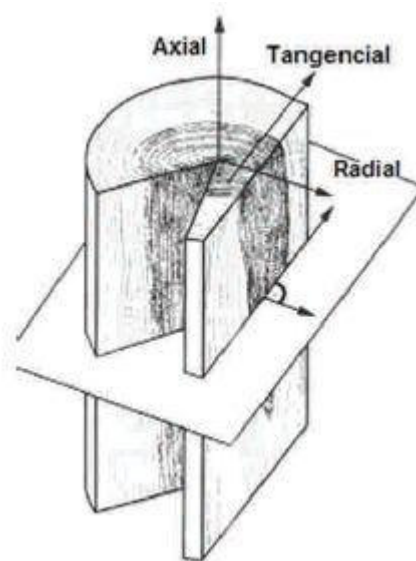


Figura 1: Direcciones principales de análisis.

A nivel de estructura celular, se pueden clasificar las especies arbóreas en dos grandes grupos de árboles: coníferas y latifoliadas.

La madera de coníferas, proveniente del grupo de las gimnospermas, está constituida esencialmente por células de características homogéneas, del grupo traqueidas, las cuales realizan la doble función de sostén del árbol y conducción de la savia.

Las especies pertenecientes a este grupo presentan un tronco recto, cónico hasta su ápice (extremo superior) y revestido de ramas.



Figura 2: Estructura anatómica de la madera de coníferas.

La madera de latifoliadas (frondosas) proviene del grupo de angiospermas, los que están constituidos esencialmente por vasos, los cuales realizan la función conductora de la savia y por fibras que son el sostén del árbol.

Las especies latifoliadas presentan en general, una copa bien ramificada y un tronco que varía en dimensiones y forma.



Figura 3: Estructura anatómica de la madera de latifoliadas.

El punto de partida para lograr un correcto uso de este material en estructuras es conocer sus propiedades físicas y mecánicas más importantes. Como éstas están relacionadas a la organización interna del material, es necesario estudiar sus aspectos más salientes, tanto desde un punto de vista micro como macroscópico.

Descripción simplificada de la microestructura

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.

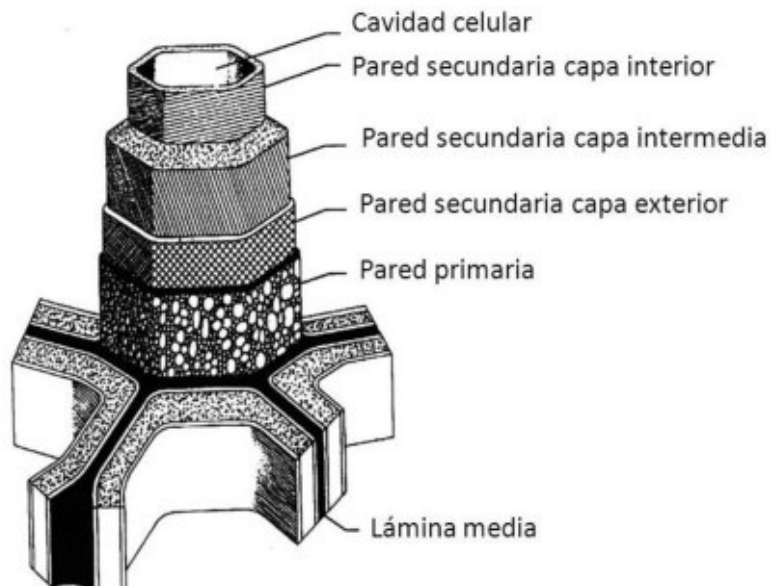


Figura 4: Estructura esquemática de la pared celular (Fuente basada en H. Alvarez, 1992).

Como puede apreciarse en la figura 4, la capa existente entre las células individuales se denomina lámina 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 (cavidad celular en la figura), se ubica la pared celular, que posee partes denominadas pared primaria, secundaria y terciaria.

La primaria se encuentra en contacto con la lámina 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, la exterior, muy delgada, presenta un promedio de inclinación de las microfibrillas de entre 50 y 70°.

La intermedia de mayor espesor (varios micrómetros, contra décimas de los mismos para la anterior) con microfibrillas orientadas mayoritariamente en la dirección longitudinal (de 5 a 20°). La interior no ofrece un orden estricto en su orientación.

La pared terciaria se ubica contra el espacio interior de la célula.

La estructura de la pared celular puede analizarse también, desde el punto de vista de su comportamiento estructural, considerando que la capa intermedia de la pared secundaria (la más importante) puede absorber los esfuerzos de tracción con su orientación interna (las microfibrillas) predominantemente en el sentido longitudinal. A su vez cuando es sometida a esfuerzos de compresión, ésta es contenida contra el pandeo (desplazamiento lateral) por las capas exterior e interior que tienen una mayor inclinación de las fibras.

Descripción simplificada de la macroestructura

La figura 5 muestra la organización macroscópica de la madera y los distintos tipos de cortes que se consideran para su estudio, teniendo en cuenta la anisotropía de este material.

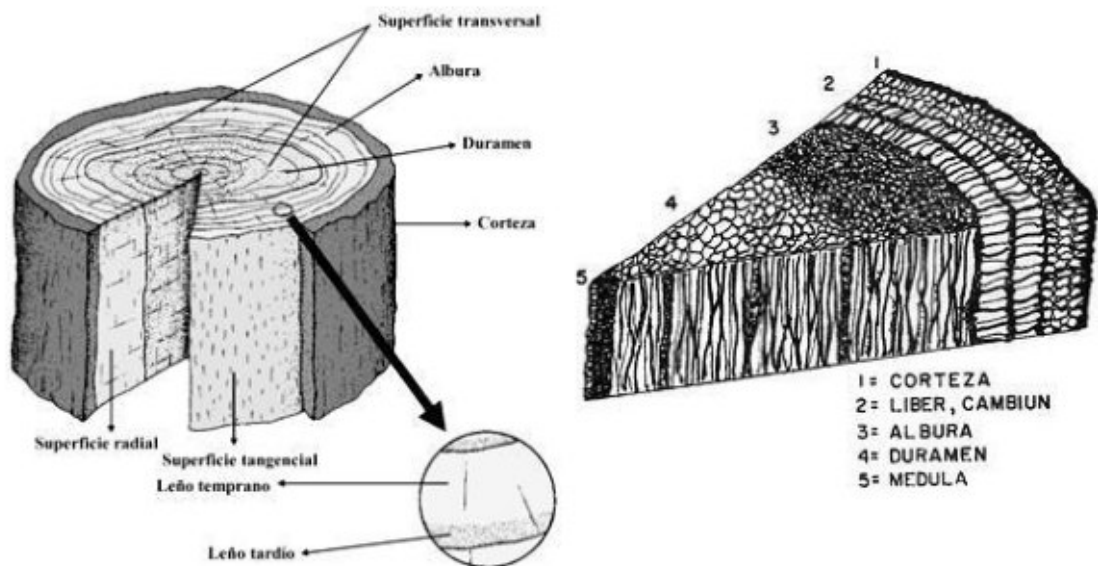


Figura 5: Organización macroscópica de la madera y cortes característicos para su estudio.

El crecimiento vertical del árbol ocurre en forma continua, y, del mismo, en la parte central, aparece la medula, 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 (corteza), y es muy delgado. Si se observa la sección transversal del tronco, se puede apreciar que ese desarrollo se produce con dos tipos diferentes de tejidos, que responden respectivamente a la madera generada en primavera (madera temprana) y a la formada en el otoño (madera tardía). 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 a la madera mayor resistencia.

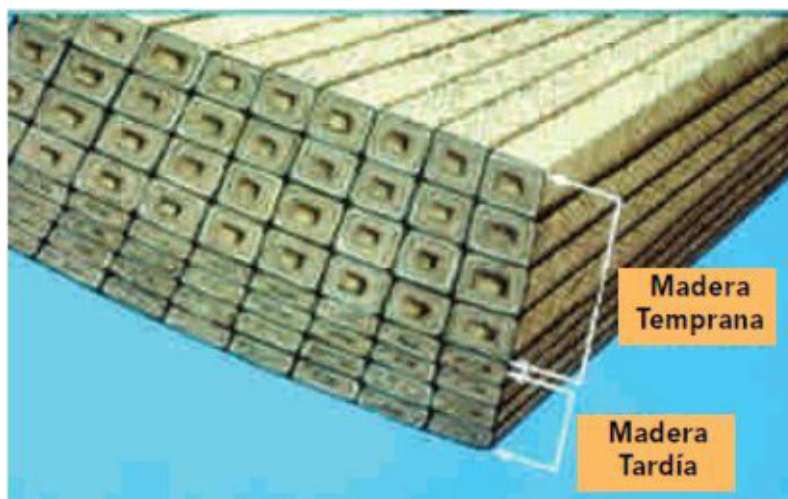


Figura 6: Ampliación de un anillo de crecimiento.

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 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. A modo de ejemplo, en la mayoría de las coníferas, el espesor de la madera tardía (otoño) se mantiene casi constante y la diferencia se produce en el espesor de la madera temprana, por lo cual a un mayor espesor del anillo corresponde una menor densidad.

Si se toma el caso de las maderas latifoliadas con porosidad anular, éstas, en general se caracterizan por formar anillos de madera de primavera con marcados poros (vasos conductores) y con espesor casi constante, apareciendo la variación en la madera tardía, y, en consecuencia a mayor espesor de los anillos corresponde mayor densidad. Esta circunstancia no se da 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.



Figura 7: Ampliación de un anillo de crecimiento.

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 (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.

Anomalías más importantes en el crecimiento

Las anomalías para el uso estructural de la madera, que 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 medula. En la medida que los sucesivos anillos de crecimiento engrosan la parte exterior del árbol, la parte incluida de la rama (que también aumenta su diámetro) forma un cono que se desarrolla junto con el tronco.

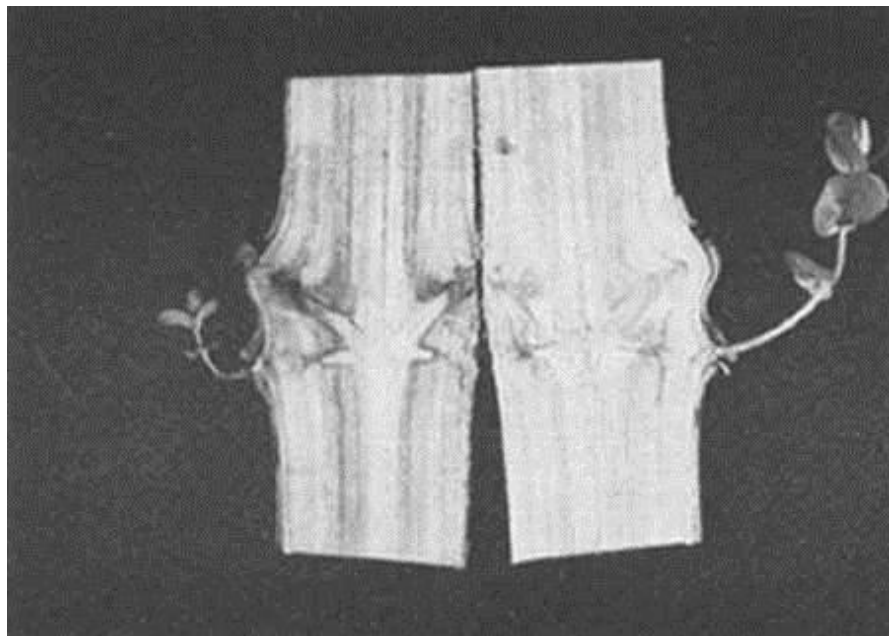


Figura 8: Detalle en corte de la unión médula- rama.

Cuando el corte de la pieza extraída del tronco principal intersecta 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 cascara.

Es fácil comprender que una adecuada poda (desrame) 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 medula.

La figura 9 muestra el corte transversal de dos árboles de similar diámetro, uno sin poda y otro podado. En el primero, el corazón defectuoso comprende la totalidad de la sección; en el segundo, el corazón defectuoso está restringido a una sección pequeña, correspondiendo la mayoría a madera libre de nudos.

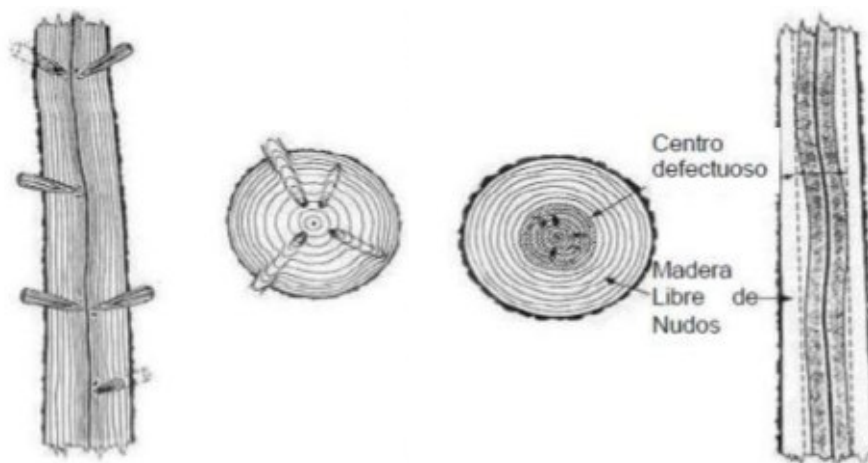


Figura 9: Esquema de distribución de nudos en relación con la poda del árbol (Maclaren 1993).

Existen particularidades para los distintos grupos de árboles, ya que, por ejemplo, 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. De todas maneras, y más allá de los aspectos particulares, los nudos constituyen el defecto de mayor importancia en el uso estructural de la madera, por la reducción que producen en sus propiedades mecánicas.

Por su parte, y teniendo en cuenta la descripción efectuada anteriormente de la microestructura de la pared celular y sus posibilidades resistentes, resulta de consideración el paralelismo que las fibras de las piezas presenten en relación a su eje longitudinal. En este sentido, considerando que las mayores resistencias y rigideces se alcanzan en el sentido 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.

Tanto la nudosidad como la desviación de la dirección de las fibras, en consideración a lo expuesto, se encuentran limitadas en las normas de clasificación de la madera con fines estructurales.

Propiedades físicas y mecánicas más importantes para el uso estructural de la madera

La madera está formada por células de formas variadas y su estructura interna se puede analizar considerando fundamentalmente las direcciones longitudinal, radial y transversal. A su vez, la presencia de nudos, desviación de las fibras, entre otras particularidades, tienen una gran influencia en su comportamiento, por lo cual es necesario destacar dos características muy importantes de este complejo material: la anisotropía y la heterogeneidad.

A esto se debe sumar la variabilidad que experimenta no solo en función de las especies, sino también para una misma especie considerando las regiones de cultivo, entre árboles, dentro de un mismo árbol y de una sección transversal.

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 la madera en tamaños de uso estructural, representan tres niveles fundamentales que es necesario considerar para comprender su comportamiento.

Es de comprender entonces, que las propiedades físicas y mecánicas estarán muy influenciadas por estas particularidades de la estructura interna. El estudio de las propiedades físicas y mecánicas 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 las condiciones de uso.

Según Coronel (1994) se denomina propiedades físicas a aquellas que determinan su comportamiento (de la madera) 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 sollicitaciones exteriores.

Propiedades físicas

Algunas de las propiedades físicas más determinantes para el uso estructural de la madera son la densidad aparente y el contenido de humedad, las que tienen una correlación muy alta con el comportamiento mecánico de la misma. Asimismo, aunque en general con menor entidad, son de consideración las variaciones de dimensiones (contracción y expansión) en función del contenido de humedad. A continuación se hace un análisis detallado de las dos primeras, por su gran importancia en el comportamiento resistente y elástico de las piezas estructurales, y una referencia a la restante.

Densidad aparente:

La densidad (ρ) se define como el cociente entre la masa (m) y el volumen (V). Teniendo en cuenta que la densidad depende del contenido de humedad, pues la masa de agua contenida se agrega a la de madera y a su vez puede originar cambios en el volumen, se debe definir siempre el contenido de humedad para el cual se calcula la densidad.

Una forma de calcularla es la denominada densidad en clima normal (20°C de temperatura ambiente y 65 % de humedad relativa), lo cual origina en la mayoría de las maderas un contenido de humedad de equilibrio del 12 %.

$$\rho_{12} = \frac{m_{12}}{V_{12}} [kg/m^3]$$

Otra es la densidad anhidra, para la madera secada al horno, es decir sin contenido de humedad, salvo la de constitución.

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} [kg/m^3]$$

En todos los casos, cuando se calcula la densidad aparente, se debe efectuar el cociente entre la masa y el volumen que corresponde al mismo contenido de humedad, el cuál debe ser indicado, para que el cálculo tenga sentido.

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} [kg/m^3]$$

En silvicultura se utiliza otra forma de cálculo, denominada frecuentemente “densidad básica” que se expresa como el cociente entre la masa seca (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 (producción propiamente dicha, sin incorporación de agua) que aparece en un determinado volumen obtenido de la forestación.

La norma nacional de aplicación para el cálculo de la densidad es la IRAM 9544. Otra norma –de circulación internacional- es la ISO 3131. La precisión usual requerida para la balanza es de 0,01 g. El cálculo habitual del volumen se efectúa midiendo las dimensiones de la probeta destinada a tal fin, con un instrumento cuya precisión debe ser 0,1 mm.

El campo práctico (real) ocupado por las densidades de las distintas maderas, oscila aproximadamente entre 0,11 y 1,3 kg/m³. El valor máximo (teórico) que podría alcanzarse si no existiesen poros, correspondiente a la densidad de las paredes de las células, es igual a 1,5 kg/m³.

Contenido de humedad:

Se define como el cociente de la masa de agua contenida, removible físicamente (por secado en estufa), y la masa de la madera seca. Esta última se obtiene por secado a una temperatura de 103 +/- 2°C y se considera que se alcanza esa 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. Internacionalmente se utiliza también la ISO 3130. La precisión normal requerida para la balanza es de 0,01 g. La expresión para el cálculo del contenido de humedad es:

$$W = (m_1 - m_2)100/m_2 [\%]$$

Dónde:

m_1 : masa de la madera antes de secar

m_2 : masa de la madera después del secado en estufa

Con el fin de clarificar la influencia que tiene el contenido de agua en la madera, es necesario tener en cuenta que ésta puede ocupar los espacios celulares e intercelulares del leño (se la conoce como “agua libre”) o impregnando las paredes de las células, vasos, fibras, (agua de impregnación). 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 desde el 0,5 % al 1 % del total del contenido y forma parte de la pared celular. Por lo tanto, en lo sucesivo se hará referencia solo 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 se pierde es el agua libre. Mientras esto sucede, no se producen variaciones volumétricas ni alteraciones de importancia en las propiedades mecánicas. A partir de la no existencia de agua en los espacios celulares e intercelulares, queda presente en las paredes de las fibras el agua de impregnación. El máximo contenido de humedad en las mismas se denomina “punto de saturación” y tiene un significado muy importante en el uso ingenieril de la madera.

El punto de saturación de las fibras se encuentra en el rango comprendido entre el 25 % y el 35 % para la mayoría de las especies, por lo que, simplícidamente, se suele tomar para propósitos prácticos el 30 %.

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.

La importancia del punto de saturación de las fibras 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 propiedades de resistencia y rigidez.

Otra consideración acerca de la importancia del contenido de humedad es la referente a la influencia que ésta tiene sobre la durabilidad de la madera. En efecto, cuando el mismo es bajo (en general menor que el 18 %) la degradación por ataques biológicos casi no se produce (por ejemplo la presencia de hongos), lo que da lugar a la búsqueda de la preservación natural sin la utilización de tratamiento preservativo alguno, sino, por el contrario, prestando atención a las condiciones de exposición en que la pieza estará en servicio, y procurando, a través de un adecuado diseño, que las mismas no tengan contacto con el agua.

Contracción y expansión:

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 las modifica. De manera que las variaciones en el contenido de agua libre (por encima del punto de saturación de las fibras, aproximadamente el 30%) no afecta sus dimensiones.

En el caso inverso, el aumento del tenor de humedad desde cero hasta el punto de saturación produce la expansión.

Las mayores variaciones se encuentran 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.

Las consecuencias que tiene este comportamiento no solo se limitan a producir deformaciones no deseadas en piezas individuales y en estructuras compuestas, sino que también a ocasionar rajaduras y torceduras durante el proceso de secado, en atención a las ya mencionadas diferentes variaciones según las tres direcciones de análisis. Su conocimiento es especialmente importante cuando se desean lograr tiempos breves en el secado artificial, que es el que se efectúa con la regulación de humedad y temperatura en secaderos, para reducir el contenido de humedad en la madera aserrada por debajo del 20 %.

Durabilidad natural:

Anteriormente se expresó que el contenido de humedad en la madera 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 de la madera se encuentra en un rango aproximado entre el 20 % y el 30 %, pues necesitan agua y oxígeno para su desarrollo, en cantidad 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 periodos relativamente prolongados con poca humedad, lo que debe ser tenido en cuenta en el diseño. En este sentido, y teniendo en cuenta que el contacto con agua se puede dar cuando ésta se encuentra en estado líquido o en forma de humedad ambiente, cuando se proyecta la estructura se deben considerar aspectos tales como:

- La madera debe ser colocada con un contenido de humedad cercano al de equilibrio en su condición de servicio, evitando que se produzcan fisuras por contracción originadas por variaciones bruscas de ese contenido, las que facilitan el ataque biológico.
- Se debe evitar el contacto de los elementos estructurales con el agua, siempre que sea posible, a través de cubiertas o aleros, y a su vez con el suelo.
- Es conveniente procurar que los ambientes sean ventilados, prestando atención a lugares de potencial condensación, y proveer drenajes adecuados.
- Es necesario estudiar cuidadosamente las juntas con mampostería u otros materiales, incluso en zona de uniones mecánicas o constructivas.

El ataque de insectos, por su parte, ocurre generalmente con 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, siendo de especial agresividad las termitas. Cuando existen riesgos de ataques de este tipo es conveniente estudiar un tratamiento preservativo.

Anteriormente se hizo referencia a que las propiedades mecánicas son aquellas que indican el comportamiento resistente y elástico bajo la acción de cargas o sollicitaciones exteriores.

Una clasificación de las propiedades mecánicas se puede hacer dividiéndolas en resistentes, elásticas y de dureza. 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 prioritariamente las propiedades resistentes estáticas y las elásticas fundamentales para el diseño.

La tendencia moderna internacional es clasificar cada pieza de madera según su resistencia, y, además, establecer sistemas de clases. Los valores resistentes que se utilizan en el diseño, y que figuran en las correspondientes normas son, en general, los siguientes:

- Resistencia a flexión
- Resistencia a tracción paralela a las fibras
- Resistencia a tracción perpendicular a las fibras
- Resistencia a compresión paralela a las fibras
- Resistencia a compresión perpendicular a las fibras
- Resistencia al corte o cizalladura

A los que se agregan los siguientes valores de propiedades elásticas (o de rigidez):

- Módulo de elasticidad paralelo a las fibras
- Módulo de elasticidad perpendicular a las fibras
- Módulo de cizalladura

Otros valores de referencia son la densidad aparente y el contenido de humedad.

La madera es fuertemente anisótropa, variando sus propiedades según se considere la dirección longitudinal, radial o tangencial. A su vez, es heterogénea y presenta anomalías que afectan su comportamiento mecánico, sobre todo en piezas de dimensiones estructurales.

Es fundamental tener en cuenta estas consideraciones previo a describir las principales propiedades mecánicas y los métodos de ensayo establecidos en las distintas normas. Así, por ejemplo, una viga sometida a flexión simple, recibe cuatro tipos diferentes de esfuerzos, tracción y compresión paralelas a las fibras, corte y compresión perpendicular a las fibras en la zona de los apoyos.

La dirección principal del trabajo mecánico de la madera es la longitudinal, y según ella se desarrolla (en general) su mejor respuesta, pero es necesario realizar ensayos según todas sus direcciones para tener un conocimiento acabado de su comportamiento y prever los esfuerzos que la solicitan en distintas situaciones. No obstante, se distinguen normalmente sólo dos direcciones, la longitudinal y la transversal, nucleando en esta última a la radial y la tangencial.

El cálculo de los valores resistentes y de rigidez para el diseño ha evolucionado a la par del desarrollo del sector, e incluye no sólo las pruebas en laboratorio, sino también, previo a ello, la definición de la población, el diseño, toma y preparación de las muestras, y posteriormente, el cálculo de los valores característicos. Los primeros reglamentos de diseño estructural estaban enfocados a la utilización de las tensiones admisibles del material, luego surgieron los que contemplan los estados límites (tanto de resistencia como de servicio). Este último enfoque orienta la tendencia actual a la hora del diseño.

Cada conjunto orgánico de normas, como por ejemplo las europeas, contempla todos los aspectos referentes al problema, incluyendo desde la definición de la población hasta el análisis estadístico y la obtención de los valores característicos. Durante el desarrollo de este trabajo se pondrá acento en los ensayos para determinar las propiedades pertinentes, y luego se tratarán los otros aspectos.

1.2 Objetivos

Los objetivos que persigue el presente trabajo se enumeran a continuación:

- Determinar las principales propiedades mecánicas y físicas de la madera del clon de álamo Populus deltoides "Australiano 129/60" cultivado en el Delta del Río Paraná, para piezas aserradas e industrializadas, conforme a las modernas tendencias internacionales del diseño estructural.
- Determinar los defectos y características que poseen una mayor correlación con su comportamiento mecánico.
- Proponer un método de clasificación por resistencia y los valores característicos de las propiedades mecánicas y físicas correspondientes a cada clase resistente.
- Comparar las propiedades mecánicas y físicas del clon en estudio con las determinadas para madera proveniente de bosques implantados de otras especies de rápido crecimiento en Argentina.
- Resolver un elemento estructural mediante modelado con software de elementos finitos, siguiendo el esquema de cálculo propuesto por el apartado de ejemplos del CIRSOC 601; con el fin de ser incluido en el mismo.

2. MATERIAL

2.1 Descripción general del álamo

El álamo pertenece al género *Populus* Sp. y se inserta en la familia de las salicáceas. Es originario del hemisferio norte y comprende unas 40 especies, a las que se deben agregar numerosos híbridos y clones. En Argentina se cultivan el *Populus nigra* L., el *Populus deltoides* Marsh. y sus híbridos. Las condiciones de clima del Delta del Río Paraná posibilitó implantar más de 20 clones de *P. deltoides* pero de acuerdo a los resultados obtenidos los más recomendados son: 'Australiano 129/60', 'Australiano 106/60' y 'Mississippi Slim' conocido como "Stoneville 67" (Borodowski 2006).

La introducción del álamo en el delta el Río Paraná comenzó a fines del siglo XIX con la introducción del *Populus deltoides* subsp. *angulata* cv *Carolinensis* y su madera era utilizada principalmente para fines energéticos y en carpintería. (Di Marco 2014).

En la Figura 10 se puede apreciar la distribución geográfica de las plantaciones forestales en Argentina.

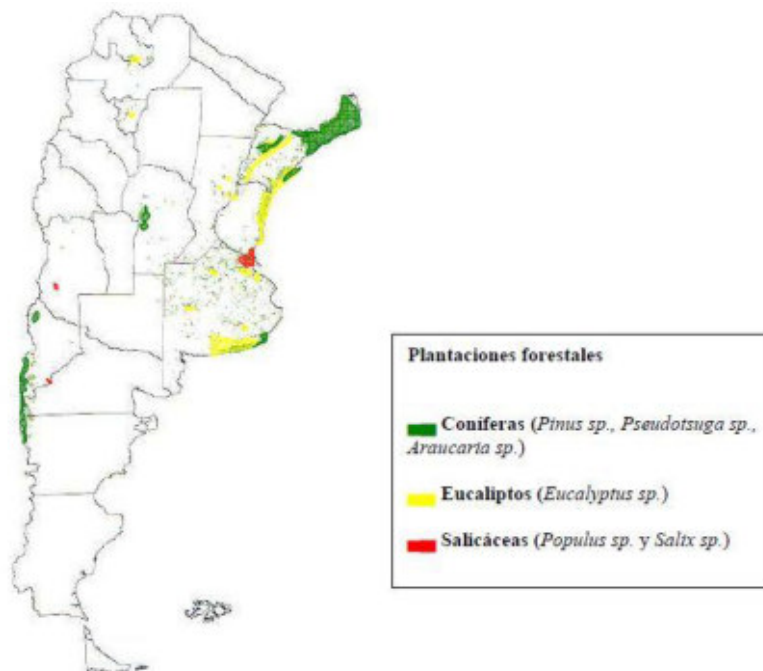


Figura 10: Ubicación geográfica de las plantaciones forestales en Argentina (CNA 2012).

El Delta del Río Paraná ocupa una superficie de 1.730.000 Ha, de las cuales 1.475.000 pertenecen a la Provincia de Entre Ríos y 257.000 Ha a la Provincia de Buenos Aires. La superficie forestada con salicáceas en 2006 era de 58.000 Ha, 38.500 Ha en Buenos Aires y 19.500 en Entre Ríos, muy por debajo de las 110.000 Ha del año 1979. (Borodowski 2006).

El mapa de plantaciones forestales (MPF, 2010) elaborado por el área de SIG e Inventario Forestal de la DPF - Dirección de Producción Forestal, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación Argentina – estimó más de 80.000 ha forestadas en la región, pero cabe aclarar que actualmente se estima que de esa superficie el área forestada bajo manejo con Salicáceas es de 60.000 has aproximadamente, 70 % en Buenos Aires y un 30 % en Entre Ríos (Delta Forestal- Información Técnica MAGP). Un 80 % de la superficie del Delta del Paraná es ocupada por planicies inundables en su estado natural, que resultan aptas para el cultivo una vez efectuadas obras de sistematización.

“En la región del Delta del Paraná, el material de propagación tradicional es la estaca (50 a 70 cm de largo) o la guía de un año. Desde hace aproximadamente ocho años se empezó a utilizar también como material de plantación guías de dos años. Este cambio se debe principalmente a la complementación de las forestaciones de Salicáceas con sistemas ganaderos en esta región. La necesidad de introducir los animales dentro del lote lo antes posible aceleró la incorporación de este material en la plantación” (CNA 2014). El álamo permite su plantación en sistemas silvopastoriles y no existen factores que limiten el manejo de rodeo vacuno en el Delta. La integración de la ganadería con la forestación hace a los sistemas de explotación más intensivos y diversificados. (Suarez 1999).

La figura 11 presenta la distribución de la superficie forestada en el Delta del Río Paraná.

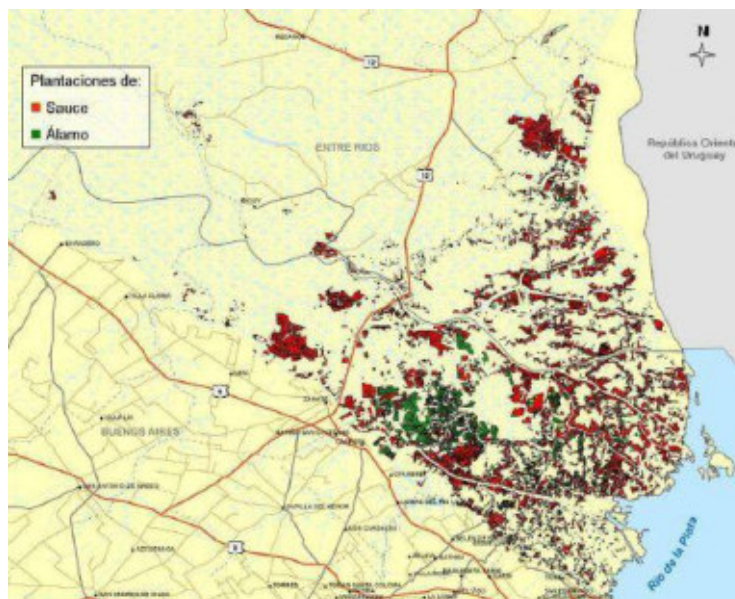


Figura 11: Mapa de la superficie forestada en el delta del Río Paraná.

Fuente: Área de Sistemas de Información Geográfica de la Dirección de Producción Forestal del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, 2011.

“El Delta inferior del Río Paraná es una excelente región para la producción de Salicáceas donde en la actualidad se cultivan unas 20.000 ha de álamo en albardones naturales o áreas protegidas contra inundaciones. Las primeras plantaciones se realizaron hacia la segunda mitad del siglo XIX con álamo carolino (*Populus deltoides* subesp. *angulata* cv. *carolinensis*), originario del Delta del Mississippi (Estados Unidos). Este clon fue diezmado por roya (*Melampsoraspp*) hacia 1920 y dejó de cultivarse. Posteriormente se difundieron diversos clones de *Populus x euroamericana* provenientes de Europa, que rápidamente manifestaron una marcada declinación en su crecimiento y un aumento de la susceptibilidad a plagas y enfermedades, especialmente a cancrisis (*Septoria musiva*). En los años 60 se introdujeron nuevos clones de *Populus deltoides*, provenientes de regiones ecológicamente similares, que rápidamente ocuparon toda el área de cultivo. Entre éstos, los clones “Catfish 2” y “Catfish 5” fueron los más plantados en la década de 1980 y llegaron a cubrir el 90 % de la superficie dedicada al álamo. A mediados de la década de 1990 se produjeron fuertes ataques de roya, que causaron importantes pérdidas de crecimiento. En 1997, al inicio del proyecto, era necesaria una rápida reconversión clonal. En base a estudios de rendimiento y comportamiento ante enfermedades de los materiales disponibles, se estableció que los clones Australiano 106-60, Australiano 129-60, Stoneville 67 y R-22 eran los más adecuados para las nuevas condiciones.” (Cortizo 2005).

En la actualidad, una gran parte de las plantaciones de álamo se realizan en campos protegidos de las inundaciones, con su cota perimetral elevada, donde es posible evacuar los excesos hídricos y evitar el ingreso de agua fluvial. Durante la estación de crecimiento, los establecimientos protegidos pueden presentar un amplio rango de disponibilidad hídrica en el suelo en función del relieve interno de la isla (generalmente irregular con alternancia de 24 sectores bajos y otros más elevados), la sistematización del campo, el manejo de agua que realice el productor y el clima. En este último caso, cabe destacar que las precipitaciones muestran un promedio anual cercano a los 1.000 mm pero su distribución es muy variable y los episodios de sequía durante el verano son frecuentes, especialmente cuando los altos requerimientos hídricos de la especie se combinan con escasas precipitaciones y elevada demanda evaporativa. (CNA 2012)

Habitualmente el turno de corta para el álamo es entre 12 a 16 años. Este depende del objetivo de producción y el mercado. Los rendimientos esperados al turno de corta son de 200 a 400 m³/ha (Borodowsky 2006).

“En cuanto a la oferta de madera, sobre 50.000 hectáreas de forestales disponibles, el 22 % corresponde al álamo. Si tenemos en cuenta un turno de corte de 12 años, con rendimiento de 200 toneladas por hectárea, tenemos una oferta de 183.000 toneladas por año de madera de álamo” (Signorelli A. 2010).

Se califica a la madera de *Populus* europeo como no durable ante la acción de hongos xilófagos y como sensible frente al ataque de insectos y termitas. En contrapartida se presenta como una especie cuya albura es muy fácil de impregnar con un duramen que ofrece dificultades para ser impregnado, aunque la especie presenta una gran variedad de comportamientos (UNE-EN 350/2:2006). Esta posibilidad de impregnación de la albura permite dotar a las piezas construidas con este material una durabilidad conferida muy superior.

Con respecto al ataque de insectos, los daños ocasionados por el “taladrillo grande de los forestales” (*Megaplatypus mutatus*) constituyen la mayor problemática en lo referente a plagas vinculadas al álamo. Las enfermedades con mayor incidencia en las plantaciones de álamos son la roya (*Melampsoraspp.*) y la cancrisis (*Septoria musiva*).

2.2 Álamo de ensayo: *Populus Deltoides Australiano* 129/60

Los álamos son exigentes en luz y agua. Para un buen desarrollo necesita un suelo de al menos dos metros de profundidad con condiciones de arenoso o franco arenoso.

El material de plantación empleado tiene influencia sobre la resistencia a condiciones climáticas adversas en los primeros años de crecimiento, sobre la homogeneidad del cultivo, el porcentaje de fallas como así también sobre el número de podas necesarias y duración del turno de corta.

En la zona del Delta se utilizan de manera tradicional estacas de 0,5 - 0,7 m de largo y guías de un año de edad. Luego, en sistemas silvopastoriles, se incorpora la utilización de guías de dos años.

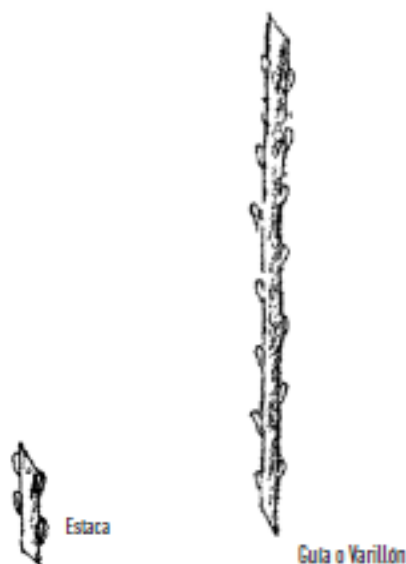


Figura 12: Detalle de estaca y guía

Para la zona mencionada, se dispone de densidades de plantación de entre 1100 y 400 plantas por hectárea.

En caso de sistemas silvopastoriles, la plantación con guías de dos y tres años de edad, a 270 plantas por hectárea, puede acelerar el momento de ingreso del ganado en el campo (Casabón et al., 2009).

El turno de corta final, en el Delta, estaría entre los 12 y 16 años, con rendimientos promedios de 20 – 25 m³/ha/año (Borodowski, 2006). Cabe aclarar que la planta crece a razón de 3 cm/año según el diámetro y 2,5 m/año en altura.



Figura 13: Plantación con sistema silvopastoril.

Presenta una escasa diferenciación entre albura y duramen (UNE EN 350/2:2006). Según la disposición de los vasos, su porosidad es difusa, con vasos de diámetro similar, dispuestos uniformemente en el anillo de crecimiento.

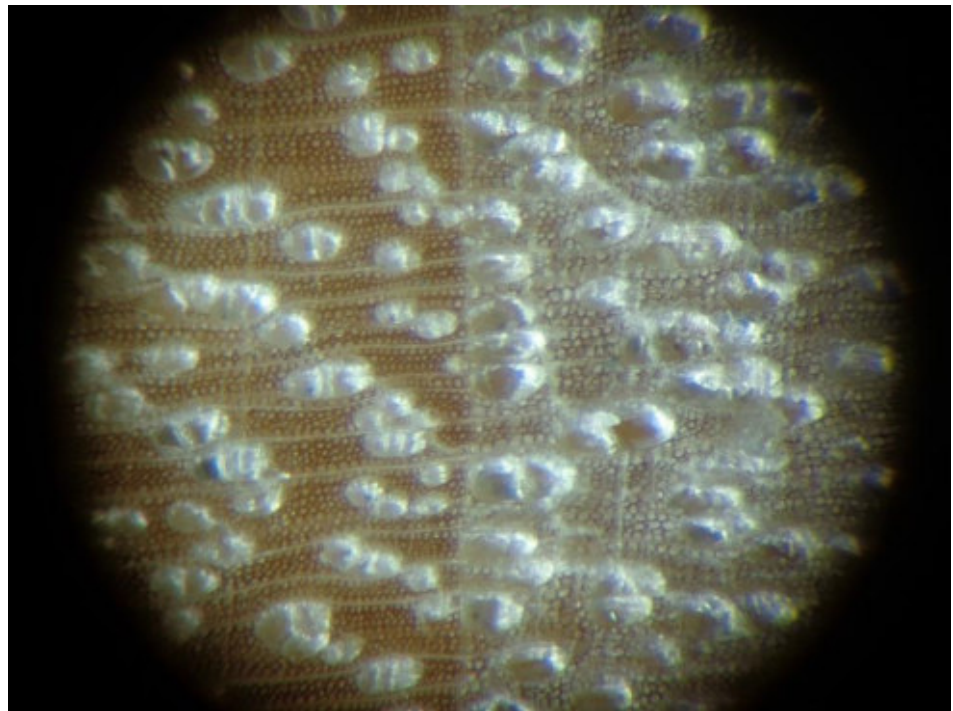


Figura 14: Disposición de los vasos en corte (40x).

La composición volumétrica es dominada por una alta proporción de fibras (53-60 %), seguida por elementos de vaso (28-34 %), radios celulares (11-14 %) y una despreciable proporción de parénquima axial (0,1-0,3 %) (Balactinecz et al., 2001).

La composición química de la madera de álamo se caracteriza por altos contenidos de polisacáridos (aproximadamente 80 % de holocelulas: 50 % celulosa y 30 % de hemicelulosa), y bajo contenido de lignina (alrededor de 20 % o menos).

Desarrollan con bastante facilidad madera de tensión, denominada madera de reacción para las latifoliadas (Balactinecz et al., 2001). Dicha madera es aquella que se forma en la parte superior de la inserción de las ramas o en las ramas inclinadas. Anatómicamente, se caracteriza por la falta de lignificación de la pared celular y a menudo, por la presencia de una capa gelatinosa en las fibras; en relación con la madera normal presenta mayor proporción de celulosa y cenizas pero menor proporción de lignina y hemicelulosa (Balactinecz et al., 2001).

Los anillos de crecimiento interanuales no son fáciles de apreciar y a los efectos de su medición resulta conveniente impregnar la superficie con algún líquido para resaltarlos (una buena opción es el alcohol etílico).

3. MÉTODO

3.1 Clasificación visual por resistencia

La cuantificación y descripción de los defectos presentes en las piezas nos permite efectuar una clasificación por resistencia. Esto conduce a dividir una población de madera en clases de distinta calidad, sobre la base de un análisis individual de cada elemento. Dicha inspección tiene en cuenta el nivel de los parámetros considerados y en función de los límites establecidos para ellos, origina la asignación de cada elemento a una determinada clase resistente. La clasificación por resistencia se fundamenta en la influencia que los parámetros ejercen sobre las propiedades mecánicas del material (Comité Europeo de Normalización, 1997).

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 alta dispersión de sus propiedades. Por el contrario, la división de la población original en clases permite definir sub-poblaciones de características más homogéneas, pudiendo sacar mayor provecho de las piezas de calidad superior y a su vez trabajar con mayor confiabilidad. Razones técnicas y económicas son las que avalan la clasificación por clases resistentes.

Estas clases surgen del establecimiento de límites para las características visuales adoptadas como parámetros, las cuales tienen influencia sobre las propiedades mecánicas. Cuanto más clara es esta relación, más eficiente es el método, y permite dividir con mayor precisión a la población inicial. 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.

Cuando hablamos de defectos, estamos haciendo referencia a:

- características ligadas al crecimiento del árbol o a los procesos de producción, 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
- deterioros causados por ataques biológicos, como hongos e insectos

- defectos especiales, tales como severas reducciones de la sección transversal producidas durante el aserrado
- desviaciones de la geometría prevista, como deformaciones o arista faltante.



Figura 15: Ataque biológico.



Figura 16: Médula.

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:

- dimensión del nudo con relación a la dimensión de la superficie en la cual se manifiesta
- relación entre la proyección del nudo sobre la sección transversal y el área de ésta
- en valores absolutos referidos a dimensiones establecidas para las piezas.

Cuando un elemento estructural es sometido a esfuerzos de flexión, las mayores tensiones normales de tracción ocurren en las fibras inferiores de la pieza y por lo tanto su capacidad portante puede ser disminuida significativamente por la presencia de un nudo o grupo de ellos.

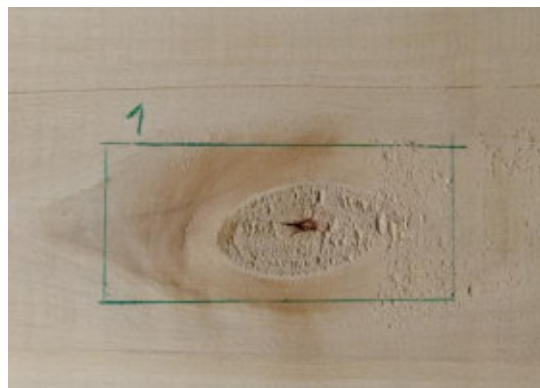


Figura 17: Nudo.

Numerosas investigaciones reportan una importante disminución de las propiedades mecánicas por efecto de la nudosidad. 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).



Figura 18: Trazador para determinar desviación de fibra.

La desviación se considera solamente en forma general, descartándose las localizadas encontradas alrededor de los nudos, ya que 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. 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).

Conforme a la especie considerada, las normas de clasificación visual por resistencia especifican límites para la madera de reacción, y para la presencia de médula o material adyacente a la misma (Standards Australia, 2000), debido a 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).

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 2 m. 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).

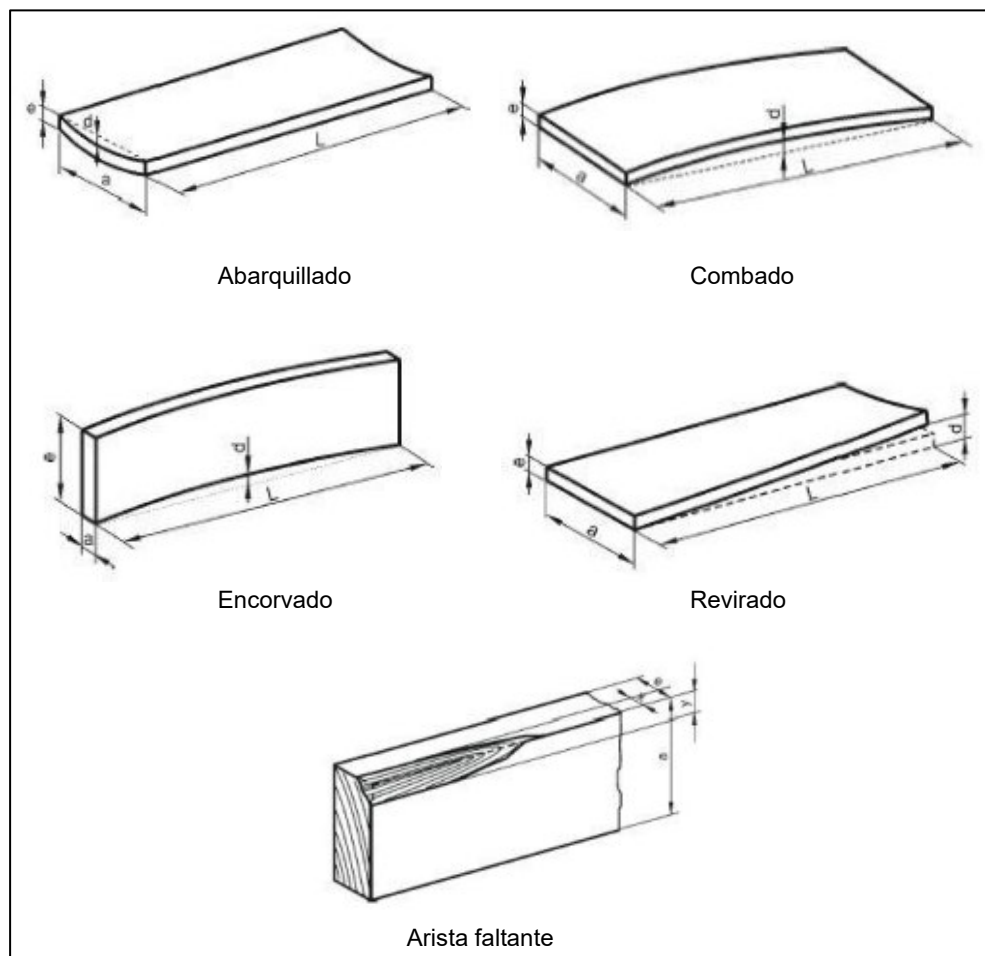


Figura 19: Esquema de medición de las desviaciones geométricas y arista faltante.

La cantidad de grados de calidad que surgen de la aplicación de los límites para las características varían con las normas, pero en general no son muy numerosos.

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 importancia en el proceso del diseño de un método de clasificación visual por resistencia y el establecimiento de los límites para cada grado:

- el alcance de valores característicos elevados que permitan un buen desempeño para cada clase de la combinación especie/procedencia analizada
- 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.

Cualquiera sea el método, al estar influenciado el comportamiento del material por sus propiedades físicas, las normas establecen las condiciones en que se debe efectuar el procedimiento con el fin de que los resultados sean comparables.

La norma UNE-EN 384:2010 prevé correcciones para ajustar los valores de las propiedades a una humedad de referencia del 12 %.

La resistencia en flexión aumenta al disminuir el tamaño de la pieza. Esta variación constatada en diversos trabajos, Denzler and Glos (2008), Piter (2012), Hermoso et al (2002), condujo a la inclusión en los reglamentos NDS (2005), CIRSOC 601 (2013) y Eurocódigo 5 (2005) de correcciones por la altura de la pieza en flexión. En función de esta característica del material, la norma UNE-EN 384:2010 prevé correcciones para ajustar el valor de la resistencia a flexión a una altura de referencia de 150 mm en piezas de madera aserrada, mientras que en piezas laminadas encoladas dicha altura aumenta a 600 mm (según prescripciones de norma UNE-EN 1194:1999).

3.2 Ensayo a flexión:

3.2.1 Materiales

Elementos aserrados

Se analizaron 496 cuerpos de prueba de madera aserrada de *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' provenientes de bosques implantados en el Delta del Río Paraná. La Tabla 1 presenta el detalle de las escuadrías de los mismos, el año de implante y de tala.

Tabla 1: Detalle de los cuerpos de prueba aserrados.

Serie	Plantación	Cantidad (n)	Dimensiones nominales (mm)			Fecha (Año)	
			Base	Altura	Largo	Implante	Tala
1 _{100x25}	1	296	100	25	500	1996	2009
2 _{50x75}	2	48	50	75	2000	1998	2011
3 _{25x100}	1	65	25	100	2000	1996	2009
4 _{50x100}	2	49	50	100	2000	1998	2011
5 _{50x150}	1	38	50	150	3200	1996	2009

Ambas plantaciones se realizaron con un espaciamiento de 6 m x 4 m en un terreno plano. Se anegaron por lluvia en pocas oportunidades con no más de quince días de estancamiento del agua y no más de 15-20 cm de altura del agua sobre el terreno. Se les practicó poda de formación al año, poda en altura a los 4 y 7 años de edad. Se realizó control de hormigas, roleado y rastreado en sus primeros 3 años, luego se introdujo ganado. En la plantación 1 se realizó un raleo al 30 % a los nueve años y en la plantación 2 a los 7 años.

Los cuerpos de prueba se acopiaron entablillados en el Laboratorio de Estructuras de Madera de la Facultad Regional Venado Tuerto de la Universidad Tecnológica Nacional. Previo al relevamiento de los defectos se cepillaron sus cuatro caras. Finalmente se acopiaron en una cámara de estabilizado a 20°C de temperatura y 65 % de humedad relativa hasta el momento del ensayo.



Figura 20: Cuerpos de prueba entablillados.

Elementos con unión finger joint

Se ensayaron un total de 12 piezas de 25 mm de base por 75 mm de altura con unión finger en forma de vigas (dimensión mayor en el sentido del esfuerzo de flexión) y 34 tablas de 75 mm de base por 25 mm de altura, confeccionadas bajo las mismas prescripciones de la Norma IRAM 9661. Las piezas fueron confeccionadas a partir de tablas del mismo origen que la serie 1 descrita en elementos aserrados.

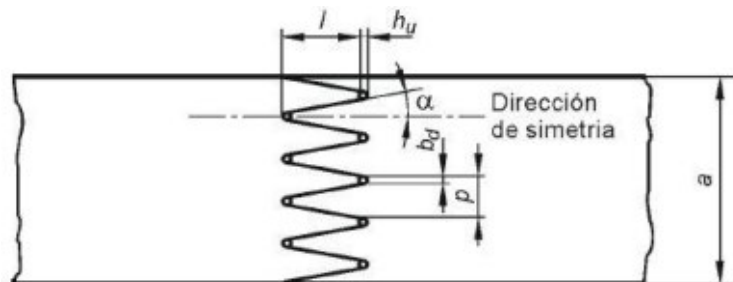


Figura 21: Detalle de la unión finger joint.

Vigas laminadas encoladas

Las vigas de madera laminada encolada se ejecutaron con tablas provenientes de árboles de *Populus deltoides* "Australiano 129/60, del mismo origen que la serie 1.

Dichas tablas fueron clasificadas en grados resistentes según los requisitos establecidos en la Norma IRAM 9662/4.

Cada viga fue conformada con 7 láminas ensambladas por medio de uniones dentadas en el canto.

La sección de las mismas es de 75 mm de base por 25 mm de altura, resultando luego del cepillado, cuerpos de prueba de dimensiones finales de 64,50 x 150 mm en la sección y 2700 mm de longitud.

Se ensayaron un total de 34 vigas, divididas en 2 clases. La composición y el número de cuerpos de prueba ensayados de cada una se presenta en la Tabla 2. Para la unión de las láminas, al igual que en las uniones dentadas, se utilizó adhesivo de urea formaldehído con melamina que satisface los requisitos según la norma IRAM 45055 (2002) para adhesivos estructurales tipo II (uso interior).

La elaboración de las vigas fue realizada por la empresa WOOD SRL de la ciudad de Carcarañá, respetando los requisitos de fabricación y control establecidos en las normas IRAM 9660-1 (2006) y 9661 (2006).

Tabla 2: Detalle de los cuerpos de prueba industrializados.

Serie	Cantidad (n)	Dimensiones nominales (mm)			Observaciones
		Base	Altura	Largo	
1 _i	12	25	75	500	Viga con unión finger joint
2 _i	34	75	25	1500	Tabla con unión finger joint
3 _i	34	50	150	2700	Viga laminada encolada

Todos los elementos se estabilizaron en cámara a 20°C de temperatura y 65% de humedad según la normativa. En la Figura 22 se puede observar un corte transversal de la sección correspondiente a una viga laminada.



Figura 22: Corte de viga laminada.

3.2.2 Desarrollo experimental

Con los cuerpos de prueba cepillados se procedió al relevamiento de sus defectos: presencia de médula, dimensión de los nudos, deformaciones previas al ensayo, arista faltante, fisuras y ataque biológico.

Para realizar estas determinaciones se siguieron las prescripciones de la Norma IRAM 9662/4. La dimensión de los nudos se midió entre paralelas a las aristas para los nudos de cara, Figura 23, para los nudos de arista se consideró la dimensión más chica que se manifestara en una de las caras, Figura 24.

La nudosidad "K" se define como el porcentaje que ocupa la dimensión de cada nudo sobre la dimensión de la cara donde se manifiesta. Las Figuras 23 y 24 corresponden al esquema de norma IRAM 9662/4.

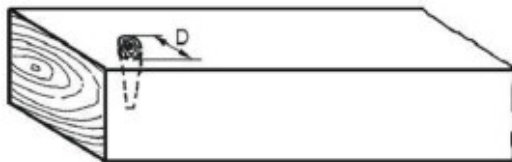


Figura 23: Medición de nudos de cara.

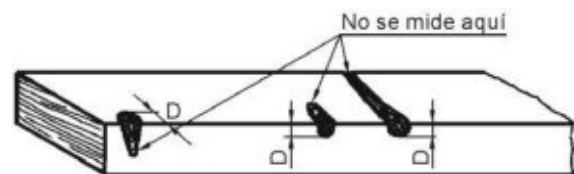


Figura 24: Medición de nudos de arista.

Para la presencia de médula la determinación fue si la pieza incluía o no partes de la misma.

Los ensayos de las series 2, 3, 4 y 5 de la Tabla 1 se realizaron en un pórtico de cargas existente en el laboratorio de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Venado Tuerto, mientras que la serie 1 se ensayó en el Laboratorio de la Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires con una máquina de ensayos universal marca Baldwin de 30 toneladas de carga máxima. El sistema de aplicación de cargas consistió en un equipo hidráulico con válvula reguladora de caudal que permitía ajustar la velocidad de aplicación de la carga, de acuerdo a lo especificado por norma. Para las series 1, 2, 3 y 4 las cargas se registraron con una celda de 20 KN de carga máxima, mientras que para la serie 5 se utilizó una celda de carga de 50 KN de carga máxima con precisión de 0,01 KN. Las deformaciones para la determinación del módulo de elasticidad global se registraron con un comparador digital con una precisión de 0,01 mm y una carrera máxima de 50 mm.

Para registrar las deformaciones correspondientes a la determinación del módulo de elasticidad local se utilizaron dos comparadores digitales con una precisión de 0,01 mm y una carrera máxima de 12 mm.

El procedimiento experimental se realizó de acuerdo a las prescripciones de la norma UNE-EN 408:2011. La Figura 25 presenta el esquema de cargas para el ensayo.

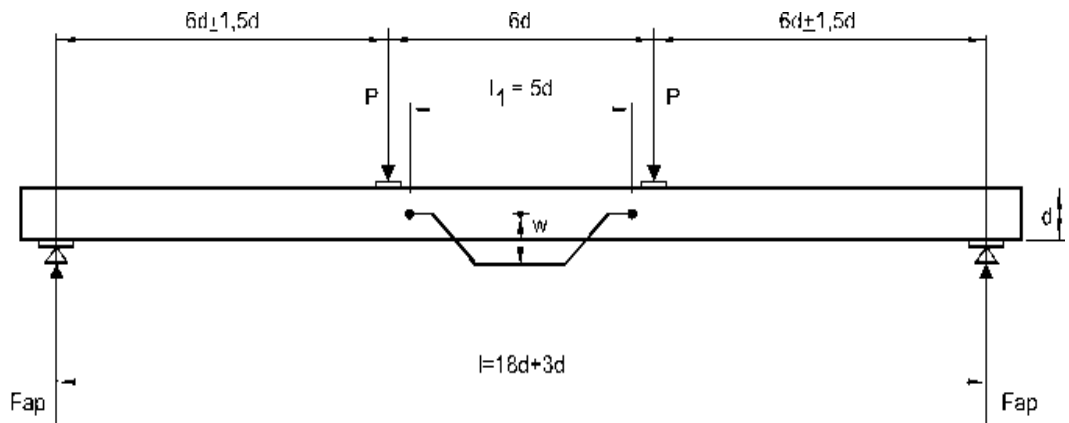


Figura 25: Esquema de cargas de ensayo.

La Figura 26 presenta el ensayo de una viga en la Universidad Tecnológica Nacional FRVT, se aprecian los dispositivos para medir las deformaciones correspondientes al módulo de elasticidad local y al módulo global. Se muestra también el dispositivo de aplicación de cargas.

La Figura 27 presenta el ensayo de una tabla en la Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires, se aprecian los detalles de apoyo y medición de deformaciones.



Figura 26: Ensayo de una viga.



Figura 27: Ensayo de una tabla.

La medición de cargas en ensayo de vigas laminadas se realizó con una celda de carga de 50 KN de capacidad máxima con precisión de 0,01 KN conectada a un transductor de registración continua de la lectura y se llevó a rotura. Se midieron las deformaciones locales a través de dos comparadores de precisión de 0,01 mm, en un largo de 5 veces la altura en la zona de momento flector constante y sin influencia del esfuerzo de corte. Se tomaron lecturas para 7 escalones de carga (10-70 KN).

Se registró la ubicación de la rotura indicando si fue dentro del tercio medio o fuera del mismo, si rompió en la unión dentada o no. La Figura 28 ilustra el dispositivo de ensayo para las vigas laminadas.



Figura 28: Ensayo de viga laminada a flexión.

La determinación de la resistencia a la flexión axial se realizó con la expresión 1

$$f_m = \frac{3 F a}{b h^2} \quad (1)$$

Donde:

f_m : resistencia a la flexión, en Newton por milímetro cuadrado.

F: Carga, Newton.

a: distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo, en milímetros.

b: anchura de la sección transversal, en milímetros.

h: altura de la sección en los ensayos de flexión, en milímetros.

El módulo de elasticidad local en flexión se determinó con la expresión 2

$$E_{m,l} = \frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16 I (w_2 - w_1)} \quad (2)$$

Donde:

$E_{m,l}$: Módulo de elasticidad local en flexión, en newton por milímetro cuadrado.

l_1 : longitud base de medida de deformaciones, en milímetros.

$F_2 - F_1$: incremento de carga en Newton.

$w_2 - w_1$: incremento de deformación en milímetros para $F_2 - F_1$.

I : momento de inercia en milímetros elevados a la cuarta potencia

El módulo de elasticidad global en flexión se determinó con la expresión 3

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)} \quad (3)$$

Donde:

$E_{m,g}$: Módulo de elasticidad global en flexión, en Newton por milímetro cuadrado

G : Módulo de elasticidad transversal, en Newton por milímetro cuadrado.

En la determinación del módulo de elasticidad local " $E_{m,g}$ " se consideró el módulo de elasticidad transversal " $G= 650$ ", de acuerdo a la Norma UNE-EN 408:2011.

Posteriormente a los ensayos en todos los cuerpos de prueba se determinó la densidad según ISO 3131/1975 y humedad según ISO 3130/1975.

Los valores obtenidos para la resistencia a la flexión se ajustaron a la altura de referencia de 150 mm (en el caso de madera aserrada) y de 600 mm (para madera laminada), de acuerdo a lo establecido en las normas UNE-EN 384:2010 y UNE-EN 1194:1999 respectivamente. Los valores de módulo de elasticidad se ajustaron a la humedad de referencia del 12 % de acuerdo a lo establecido en la norma UNE-EN 384:2010. Los valores de densidad se ajustaron a la humedad de referencia del 12 % según lo indicado en la norma UNE-EN 384:2010.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Piezas aserradas:

A continuación se presentan los valores de resistencia a flexión, módulo de elasticidad global, módulo de elasticidad local y densidad para las piezas aserradas divididas en series según su escuadría.

Tabla 3: Resistencia a la flexión en N/mm² por serie.

Serie	Mínimo	Medio	Máximo	Percentil 5%	Desvío	COV	n
1 _{100x25}	20	38	56	26	7	18	287
2 _{50x75}	26	37	46	28	5	14	48
3 _{25x100}	17	36	50	18	9	26	65
4 _{50x100}	18	38	59	22	10	25	49
5 _{50x150}	18	40	59	18	10	26	38
Todas	17	38	59	23	8	21	487

Tabla 4: Módulo de elasticidad global en N/mm² por serie.

Serie	Mínimo	Medio	Máximo	Percentil 5%	Desvío	COV	n
1 _{100x25}	4.699	10.167	13.436	7.337	1.501	15	296
2 _{50x75}	7.276	9.587	13.216	7.859	1.268	13	48
3 _{25x100}	7.197	9.562	11.956	7.649	1.120	12	65
4 _{50x100}	6.842	10.040	13.705	8.116	1.171	12	49
5 _{50x150}	7.507	9.852	12.331	7.619	1.067	11	38
Todas	4.699	9.995	13.705	7.497	1.392	14	496

Tabla 5: Módulo de elasticidad local en N/mm² por serie.

Serie	Mínimo	Medio	Máximo	Percentil 5%	Desvío	COV	n
1 _{100x25}	-	-	-	-	-	-	-
2 _{50x75}	7.080	9.902	14.260	7.555	1.443	15	48
3 _{25x100}	6.157	9.831	12.143	7.774	1.313	13	65
4 _{50x100}	6.046	10.339	15.551	7.610	1.716	17	49
5 _{50x150}	7.805	10.388	12.140	7.928	1.056	10	38
Todas	6.046	10.078	15.551	7.692	1.423	14	200

Tabla 6: Densidad en Kg/m³ por serie.

Serie	Mínimo	Medio	Máximo	Percentil 5%	Desvío	COV	n
1 _{100x25}	347	405	517	364	26	6	291
2 _{50x75}	327	392	438	350	26	6	48
3 _{25x100}	326	402	550	352	36	9	65
4 _{50x100}	344	397	446	351	24	6	49
5 _{50x150}	398	460	496	400	25	6	38
Todas	326	407	550	361	31	8	491

4.1.1 Relación entre los principales parámetros y las propiedades mecánicas

En la labor de caracterizar el comportamiento del clon de madera para uso estructural, es esencial determinar cuáles son los parámetros que impactan sobre sus propiedades mecánicas. A su vez, el hecho de cuantificar el grado de correlación que dichos parámetros presentan sobre ellas nos proporciona información vital para calibrar sistemas de clasificación visual, logrando un uso cada vez más eficiente y racional del material.

Para obtener estas relaciones se realizaron regresiones lineales para todas las series, evaluando la influencia sobre la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad de los parámetros expuestos en las Tablas 7 y 8.

Tabla 7: Relación entre la resistencia a flexión en N/mm^2 y los parámetros de nudosidad (K), densidad (ρ), inclinación de fibra ($I.Fib$) y tamaño promedio de anillo de crecimiento (A).

Muestra	Parámetro	Coefficiente de correlación	Valor-P	n
Vigas y Tablas	K	-0,44	0,0000	486
	ρ	0,14	0,0025	486
Tablas	$I.Fib$	-0,30	0,0000	485
	A	0,02	0,6929	320
Vigas	K	-0,45	0,0000	199
	ρ	0,20	0,0048	199
	$I.Fib$	-0,38	0,0000	198
	A	0,02	0,8883	95
Tablas	K	-0,43	0,0000	286
	ρ	0,07	0,2464	286
	$I.Fib$	-0,19	0,0012	286
	A	0,05	0,4799	224

Se puede apreciar que la nudosidad tiene una relación estadísticamente significativa con la resistencia a la flexión (Valor $-P < 0,05$) y que el coeficiente de correlación indica una correlación relativamente débil y negativa. La densidad se presenta como un parámetro con una relación estadísticamente significativa para el conjunto pero con una correlación muy débil, y sin relación para las tablas. La inclinación de las fibras muestra una relación significativa con la resistencia a la flexión, con un coeficiente de correlación relativamente débil y negativo. Como no se observan valores que superen el máximo permitido en la Norma IRAM, no tienen incidencia en la clasificación. El espesor de anillo de crecimiento no presenta una relación estadísticamente significativa con la resistencia a la flexión.

Tabla 8: Relación del módulo de elasticidad global en N/mm^2 respecto a los parámetros de nudosidad (K), densidad (ρ), inclinación de fibra ($I.Fib$) y tamaño promedio de anillo (A).

Muestra	Parámetro	Coefficiente de correlación	Valor-P	n
Vigas y Tablas	K	-0,36	0,0000	495
	ρ	0,14	0,0016	490
Tablas	$I.Fib$	-0,16	0,0004	494
	A	-0,09	0,1078	323
Vigas	K	-0,25	0,0003	199
	ρ	0,26	0,0002	199
	$I.Fib$	-0,15	0,0386	198
	A	-0,11	0,2670	95
Tablas	K	-0,40	0,0000	295
	ρ	0,09	0,1468	290
	$I.Fib$	-0,14	0,0148	295
	A	-0,04	0,5641	227

Si se atiende a los valores expuestos en la Tabla 8 se puede observar que los parámetros de nudosidad, densidad e inclinación de fibras influyen sobre el módulo de elasticidad con una tendencia análoga a la encontrada para la resistencia a la flexión.

No se aprecia correlación entre el tamaño promedio de anillos de crecimiento en ninguno de los estudios planteados.

A continuación se ilustran las relaciones expuestas entre los parámetros de resistencia a flexión y módulo de elasticidad, respecto del parámetro de nudosidad.

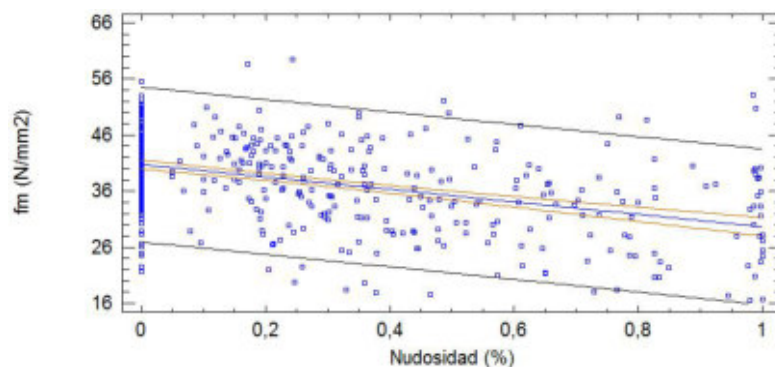


Figura 29: Relación entre nudosidad y resistencia a la flexión para la población total.

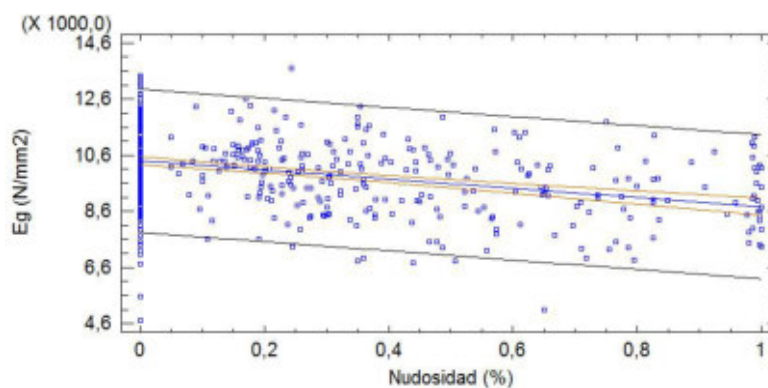


Figura 30: Relación entre nudosidad y módulo de elasticidad global para la población total.

4.1.2 Análisis de propiedades resistentes frente a la presencia de médula

A continuación se presenta un análisis del impacto en la resistencia a la flexión, módulo de elasticidad y densidad sobre el total de la población en estudio respecto a la presencia de médula. Se dividió el total en dos grupos, los que correspondían a cuerpos de prueba con médula y los que no la poseían.

Tabla 9: Resistencia a flexión en N/mm^2 frente a la presencia de médula.

Elemento	Médula	Mínimo	Medio	Máximo	Percentil 5%	Desvío	COV	n
Todas	SI	17	37	60	22	8	22	149
	NO	17	38	59	24	8	20	338

Tabla 10: Módulo de elasticidad global en N/mm^2 frente a la presencia de médula

Elemento	Médula	Mínimo	Medio	Máximo	Percentil 5%	Desvío	COV	n
Todas	SI	4.699	10.099	13.705	7.493	1.371	14	152
	NO	5.079	9.949	13.436	7.612	1.400	14	344

Tabla 11: Densidad en Kg/m³ frente a la presencia de médula.

Elemento	Médula	Mínimo	Medio	Máximo	Percentil 5%	Desvío	COV	n
Todas	SI	345	410	514	364	30	7	151
	NO	326	406	550	360	32	8	340

Se observa una disminución en la resistencia a flexión característica del orden del 8% para las piezas que poseían médula. No se observan diferencias sustanciales para el módulo de elasticidad y la densidad (ambas del orden del 1 %).

4.1.3 Análisis de la relación entre el módulo de elasticidad local y el global

En la Tabla 12 se analiza la relación entre el módulo de elasticidad local “E_{m,l}” y el módulo de elasticidad global “E_{m,g}”. El módulo de elasticidad local se determina en el centro de la viga en la zona de flexión pura y sólo se realizó sobre las series 2 a 5 (correspondientes a vigas). Se puede apreciar que para cada clase resistente y para el total de los cuerpos de prueba el módulo global, que está afectado por la influencia de las deformaciones debidas al esfuerzo de corte, es inferior al local en un porcentaje del orden del 3 a 4 %.

Tabla 12: Módulo de elasticidad global y local en N/mm² para vigas por clase.

Parámetro	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Todas
E _{m,g} medio	9.836	9.982	8.694	9.740
E _{m,l} medio	10.156	10.369	8.931	10.078
Diferencia	-3,16%	-3,73%	-2,66%	-3,36%

4.1.4 Clasificación visual en clases resistentes según la Norma IRAM 9662/4

De acuerdo a los requisitos establecidos en la Norma IRAM 9662/4 se proponen como límites para definir las clases resistentes los que se presentan en la Tabla 13. La clase 3 está formada por el rechazo de las otras clases.

Tabla 13: Pautas para la clasificación visual.

Defecto	Unidad	Clase 1	Clase 2
Médula	-	No se admite	Se admite
Nudosidad	mm/mm	$\leq 1/3$	$\leq 2/3$
Dirección de fibra	mm/mm	Desviación menor que 1:9	
Densidad	Kg/m ³	No se aceptan piezas con densidad excepcionalmente baja	
Fisuras	No pasantes	m	No mayores que 1 m o 1/4 de la longitud de la pieza (la que sea menor)
	Pasantes	m	Sólo se admiten en los extremos y si son de longitud no mayor que el ancho de la pieza
Combado y encorvado	mm	Menor que 8	Menor que 12
Revirado	mm/mm	Menor que 1 mm por cada 25 mm de ancho	Menor que 2 mm por cada 25 mm de ancho
Abarquillado	-	Sin limitación	
Arista faltante	mm/mm	Transversalmente menor que 1/4 de la cara o canto donde aparece	Transversalmente menor que 1/3 de la cara o canto donde aparece
		Sin restricciones para el largo	
Ataques biológicos	-	No se admiten zonas atacadas por los hongos causantes de pudrición Se admiten zonas atacadas por hongos cromogéneos No se admiten orificios causados por insectos	
Madera de reacción	mm/mm	Menor o igual que 1/5	Menor o igual que 2/5

En base a lo observado en el estudio de las relaciones entre los principales parámetros y las propiedades resistentes, se adopta como sistema de clasificación visual para piezas aserradas el propuesto por la Norma IRAM 9662/4.

A su vez, las maderas laminadas encoladas estructurales se clasifican en dos grados según las prescripciones de la norma IRAM 9660/1:

- a) grado 1: construidas con conformación homogénea con tablas de clase resistente 1 o combinadas.
- b) grado 2: construidas con tablas de clase resistente 2.

Los elementos estructurales laminados encolados de grado 1 sometidos a la flexión se denominan homogéneos cuando son construidos con láminas de clase 1. También pueden construirse con láminas de ambas clases resistentes y en este caso se denominan combinados.

Estos deben poseer láminas de la mejor clase resistente en la zona comprendida dentro de 1/4 de la altura, a partir de ambos bordes, con un mínimo de 2 tablas para cada caso. Las láminas restantes, ubicadas en la zona más cercana al eje neutro, pueden pertenecer a la clase de menor resistencia.

Las vigas laminadas combinadas que no cumplan los requisitos establecidos anteriormente deben asignarse al grado 2.

La Tabla 14 presenta el resumen estadístico de los valores obtenidos para la resistencia a flexión para el total de las series ensayadas, divididas en grados resistentes. La serie 1 se corresponde con la categoría tablas y las series de 2 a 5 con la categoría vigas. Se adjuntan también los valores para el total de la población, esto es, tablas y vigas juntas.

Tabla 14: Resistencia a la flexión en N/mm² por clase resistente y tipo de elemento.

Elemento	Clase	Mínimo	Medio	Máximo	Percentil 5%	Desvío	COV	n
Todas	1	20	41	59	29	6	16	237
	2	18	37	60	23	8	21	202
	3	17	30	53	17	8	26	48
Vigas	1	20	40	59	28	7	17	84
	2	18	38	60	21	9	23	88
	3	17	28	53	17	8	30	28
Tablas	1	23	41	56	31	6	15	153
	2	20	36	50	25	7	19	114
	3	22	33	44	23	6	19	20

Puede apreciarse una diferencia entre los valores característicos de cada clase resistente. Esto reafirma el criterio de efectuar dicha clasificación, a fin de obtener subpoblaciones con propiedades resistentes más homogéneas y poder trabajar con distintos estándares de calidad.

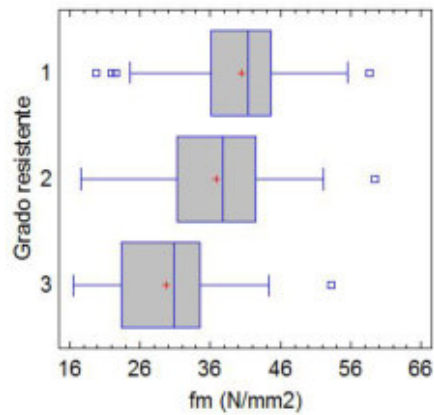


Figura 31: Resistencia a la flexión por clase resistente para el total de la población.

Bajo el mismo criterio de análisis anterior, se presenta el resumen estadístico de los valores obtenidos para el módulo de elasticidad global y la densidad.

Tabla 15: Módulo de elasticidad global en N/mm^2 por clase resistente y tipo de elemento.

Elemento	Clase	Mínimo	Medio	Máximo	Percentil 5%	Desvío	COV	n
Todas	1	5.553	10.244	13.436	8.267	1.319	13	243
	2	4.699	9.986	13.705	7.497	1.364	14	205
	3	6.662	8.770	11.780	6.943	1.229	14	48
Vigas	1	7.197	9.836	13.216	8.267	1.081	11	84
	2	6.842	9.982	13.705	8.286	1.137	11	88
	3	7.276	8.694	11.054	7.319	979	11	28
Tablas	1	5.553	10.460	13.436	7.957	1.383	13	159
	2	4.699	9.989	13.020	6.932	1.518	15	117
	3	6.662	8.877	11.780	6.759	1.534	17	20

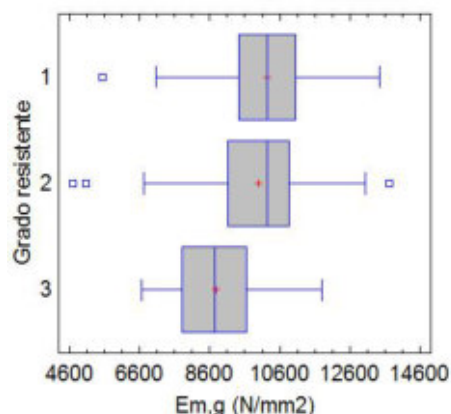


Figura 32: Módulo de elasticidad por clase resistente para el total de la población.

Si se comparan los valores de resistencia a flexión característicos para tablas y vigas se observa que no difieren en más de un 15 % y si se efectúa la misma comparación para el módulo de elasticidad medio se observa que no difieren en más de un 6 %; por lo que podría decirse que las tablas y vigas aserradas pueden estudiarse juntas.

Tabla 16: Densidad en Kg/m³ por clase resistente y tipo de elemento.

Elemento	Clase	Mínimo	Medio	Máximo	Percentil 5%	Desvío	COV	n
Todas	1	326	405	496	362	29	7	239
	2	345	408	514	359	30	7	204
	3	327	412	550	357	43	10	48
Vigas	1	326	407	496	353	38	9	84
	2	345	412	491	352	35	8	88
	3	327	410	550	357	46	11	28
Tablas	1	354	405	479	365	24	6	155
	2	347	405	514	363	25	6	116
	3	348	414	517	359	39	9	20

Observar que el valor medio de la densidad presenta un leve aumento conforme la calidad de la pieza disminuye. Esto se debe a que las clases de menor calidad resistente presentan un mayor porcentaje en la nudosidad.

Físicamente los nudos son puntos que poseen una densidad mayor que el resto de la pieza, pero que no contribuyen a aumentar el valor de resistencia a flexión. Son considerados discontinuidades en la sección.

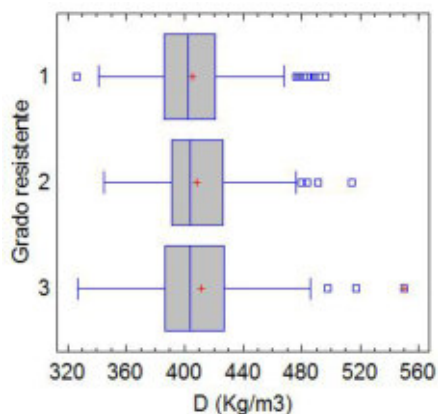


Figura 33: Densidad por clase resistente para el total de la población.

4.1.5 Comparación de las clases resistentes propuestas con el sistema internacional europeo

La Norma UNE-EN 384:2010 contempla, para el caso de que no se disponga de resultados de ensayos de probetas de dimensiones reales de uso, la determinación de algunos valores característicos de propiedades mecánicas y de rigidez a partir de una serie de expresiones en función de la resistencia a flexión, el módulo de elasticidad y la densidad.

La Tabla 17 expone un resumen de los valores de las propiedades mecánicas, de rigidez y densidad para las dos clases resistentes de uso estructural.

Tabla 17: Valores de las propiedades para cada clase resistente.

Propiedades resistentes (N/mm²)		Clase 1	Clase 2
Resistencia a la flexión característica (1)	$f_{m,k}$	29	23
Resistencia a la tracción paralela característica (2)	$f_{t,0,k}$	17	14
Resistencia a la tracción perpendicular característica (2)	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4
Resistencia a la compresión paralela característica (2)	$f_{c,0,k}$	23	20
Resistencia a la compresión perpendicular característica (2)	$f_{c,90,k}$	3	3
Resistencia al cortante paralelo característica (2)	$f_{v,k}$	4	4
Propiedades de rigidez (N/mm²)			
Módulo de elasticidad global paralelo medio (1)	$E_{0,g,medio}$	10.244	9.986
Módulo de elasticidad global paralelo percentil 5% (1)	$E_{0,g,05}$	8.267	7.497
Módulo de elasticidad global perpendicular medio (2)	$E_{90,l,medio}$	341	333
Módulo cortante medio (2)	G_{medio}	640	624
Densidad (Humedad 12 %) (Kg/m³)			
Densidad característica (1)	δ_{05}	362	359
Densidad media (1)	δ_{medio}	405	408

(1) Determinado experimentalmente
 (2) Determinado por aplicación de la Norma UNE-EN 384:2010

Los valores obtenidos para la resistencia a la flexión en las clases 1 y 2 son los exigidos por la Norma UNE-EN 338:2010 para ser incluidas en las clases C27 y C22, pero para la densidad y el módulo de elasticidad corresponden con las clases C22 y C20.

En base a estos resultados podríamos encuadrar al clon en estudio dentro de las clases C22 y C20 con los criterios de clasificación visual que se establecen en la Tabla 13.

4.1.6 Comparación de las propiedades estructurales de tablas de *Populus* con las presentadas en el Suplemento 1 del Reglamento CIRSOC 601 para el mismo clon

Se desarrolla la Tabla 18 con la finalidad de establecer una comparación con los valores de las propiedades resistentes y de rigidez propuestas para tablas en el Suplemento 1 del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601. Para incorporar los valores de resistencia a flexión se los afectó de un coeficiente de seguridad de “2” y de un coeficiente por duración de carga de “1,6”. Al módulo de elasticidad se lo afectó de un coeficiente de 0,86 para ajustar el valor a la humedad de referencia del 19 % (tal como fue explicitado en el trabajo “Especies provenientes de bosques implantados en Argentina caracterizadas para uso estructural” por Guillaumet et al).

Los coeficientes aplicados sirven para ajustar los valores de las condiciones de ensayo a las condiciones de referencia adoptadas por el CIRSOC 601.

Tabla 18: Comparación de valores de módulo de elasticidad global en N/mm^2 , resistencia a la flexión en N/mm^2 y densidad en Kg/m^3 entre tablas del mismo clon.

Muestra	Clase	f_m	E_m	δ
Resultado experimental	1	9,7	8.996	365
Suplemento1	2	7,8	8.591	363
CIRSOC 601	1	7,5	8.800	400
	2	5,6	7.700	400

Se puede observar que los valores expuestos por el Suplemento 1 del CIRSOC 601 para la resistencia a flexión y módulo de elasticidad son inferiores que los obtenidos experimentalmente. Si consideramos la clase 1, esta diferencia se da en un 23 % para el valor de resistencia a flexión y un 3 % para el módulo de elasticidad.

Se puede decir que el reglamento nos coloca del lado de la seguridad. Se debe remarcar que existe una diferencia del orden del 9 % para el valor de la densidad, resulta difícil de alcanzar el valor de la norma, se debería revisar.

4.1.7 Comparación de las propiedades estructurales del Populus con las que se presentan para otras especies en el Suplemento 1 del Reglamento CIRSOC 601

Se confecciona la Tabla 19 a fin de establecer una comparación con los valores de las propiedades resistentes y de rigidez propuestas para tablas en el Suplemento 1 del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601. Para incorporar los valores de resistencia a flexión se los afectó de un coeficiente de seguridad de "2" y de un coeficiente por duración de carga de "1,6". Al módulo de elasticidad se lo afectó de un coeficiente de 0,86 para ajustar el valor a la humedad de referencia del 19 % (tal como fue explicitado en el trabajo "Especies provenientes de bosques implantados en Argentina caracterizadas para uso estructural" por Guillaumet et al).

Los coeficientes aplicados sirven para ajustar los valores de las condiciones de ensayo a las condiciones de referencia adoptadas por el CIRSOC 601.

Tabla 19: Comparación de valores de módulo de elasticidad global en N/mm^2 , resistencia a la flexión en N/mm^2 y densidad en Kg/m^3 del Populus con los valores para otras especies presentados en el CIRSOC 601

Especie	Clase	f_m	E_m	δ
Araucaria	1	10,6	13.339	443
Angustifolia	2	6,6	11.421	390
Eucalyptus Grandis	1	9,4	12.040	430
	2	7,5	10.750	430
Pinus taeda y ellioti	1	6,2	7.740	420
	2	3,2	6.450	390
Populus Australiano	1	9,7	8.996	365
	129/60	2	7,8	8.591

Se puede apreciar que las propiedades resistentes y de rigidez del Populus deltoides Australiano 129/60 cultivado en el Delta del Río Paraná son superiores a las del Pinus taeda y elliotii. Respecto al Eucalyptus Grandis el valor de resistencia a flexión es levemente mayor para ambas clases, pero el módulo de elasticidad resulta

inferior. En comparación con la Araucaria angustifolia, todos los valores de las propiedades resistentes resultan inferiores.

4.2 Piezas industrializadas

4.2.1 Tablas con unión finger

Siguiendo los mismos lineamientos de estudio planteados para las piezas aserradas, se presenta el resumen estadístico con los valores de resistencia a flexión y módulo de elasticidad global para las tablas con unión finger joint. Las piezas que integran la serie 1_i fueron ensayadas en forma de vigas (esto es, con la mayor dirección orientada en coincidencia con el plano de flexión).

El criterio de clasificación visual en grados resistentes es el mismo que el utilizado para las piezas aserradas. Todas las piezas calificaron en clase 1.

Tabla 19: Resistencia a la flexión en N/mm² por clase resistente.

Elemento	Clase	Mínimo	Medio	Máximo	Percentil 5%	Desvío	COV	n
Vigas _{25x75}	1	21	30	37	21	5	18	12
Tablas _{75x25}	1	20	27	32	20	4	14	34

Tabla 20: Módulo de elasticidad global en N/mm² por clase resistente.

Elemento	Clase	Mínimo	Medio	Máximo	Percentil 5%	Desvío	COV	n
Vigas _{25x75}	1	7.485	9.627	11.511	7.485	1.170	12	12
Tablas _{75x25}	1	5.985	8.236	10.181	6.343	1.004	12	32

4.2.2 Vigas laminadas encoladas

Se expone a continuación el resumen estadístico con los valores de resistencia a flexión y módulo de elasticidad global para las vigas laminadas encoladas, divididas en clases resistentes.

Las piezas ensayadas también se clasificaron en clases resistentes. Esto depende de la clasificación resistente de las tablas con las cuales fueron ejecutadas las vigas, según prescripciones de Norma IRAM 9660/1.

Tabla 21: Resistencia a la flexión en N/mm^2 por clase resistente.

Elemento	Clase	Mínimo	Medio	Máximo	Percentil 5%	Desvío	COV	n
Vigas _{50x150}	1	23	30	38	23	5	16	12
	2	20	29	37	22	5	18	22

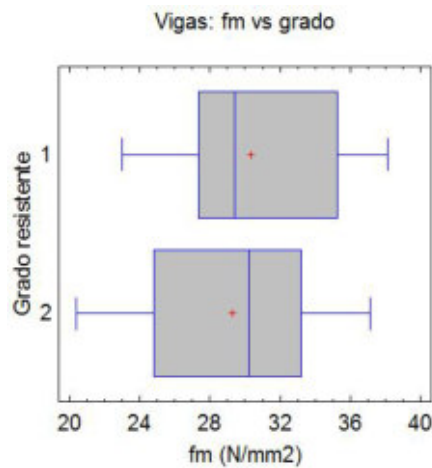


Figura 34: Resistencia a flexión por clase resistente para las vigas_{50x150}.

Tabla 22: Módulo de elasticidad global en N/mm² por clase resistente

Elemento	Clase	Mínimo	Medio	Máximo	Percentil 5%	Desvío	COV	n
Vigas _{50x150}	1	9.260	10.493	11.632	9.260	671	6	12
	2	7.956	9.811	10.700	8.725	673	7	21

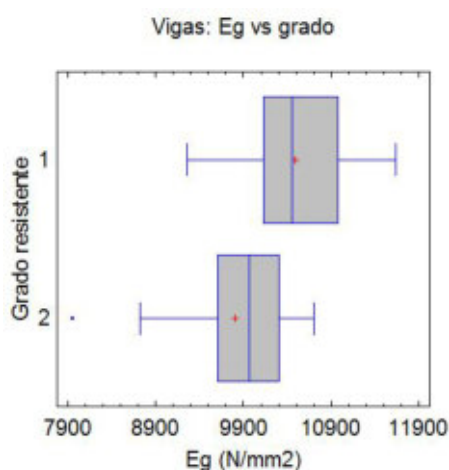


Figura 35: Resistencia a flexión por clase resistente para las vigas_{50x150}.

4.2.3 Análisis de la relación entre el módulo de elasticidad local y el global

En la Tabla 23 se analiza la relación entre el módulo de elasticidad local “ $E_{m,l}$ ” y el módulo de elasticidad global “ $E_{m,g}$ ”. Dicho estudio se realizó sobre la serie 3_i (correspondientes a vigas laminadas encoladas). Se puede apreciar que para cada clase resistente y para el total de los cuerpos de prueba el módulo global es inferior al local en un porcentaje del orden del 3 %, valor similar al expuesto para el caso de vigas aserradas.

Tabla 23: Módulo de elasticidad global y local en N/mm² para vigas_{50x150} por clase.

Parámetro	Clase 1	Clase 2	Todas
$E_{m,g}$ medio	10.493	9.811	10.059
$E_{m,l}$ medio	10.818	10.171	10.406
Diferencia	-3,01%	-3,54%	-3,34%

4.2.4 Comparación de los valores experimentales de resistencia a flexión con los expuestos en la Norma IRAM 9661 para tablas con unión finger joint

La Norma IRAM 9661 propone valores característicos mínimos esperables para tablas con unión finger joint elaboradas con madera de álamo. Se muestra la comparación de dichos valores con los obtenidos experimentalmente en la Tabla 24.

Tabla 24: Valores de resistencia a la flexión.

Grado	Resistencia a la flexión (N/mm ²)	
	Valor experimental	IRAM 9661
1	20	23,8

Se observa que los valores experimentales correspondientes a la resistencia a flexión son inferiores a los expuestos en la norma en un 16 % para la clase 1. Debería mejorarse la ejecución de la unión finger joint para las tablas.

4.2.5 Comparación de los valores experimentales de resistencia a flexión y módulo de elasticidad global con los expuestos en la Norma IRAM 9660-1 para vigas laminadas encoladas

La Norma IRAM 9660-1 propone valores característicos para vigas laminadas encoladas estructurales, elaboradas con madera de álamo y siguiendo los requisitos expuestos en la misma. Dichos valores han sido determinados conforme a la Norma IRAM 9663 (2013).

Tabla 25: Valores de resistencia a la flexión.

Grado	Resistencia a la flexión (N/mm ²)	
	Valor experimental	IRAM 9660-1
1	23	20
2	22	18

Se observa que los valores experimentales correspondientes a la resistencia a flexión superan a los expuestos en la norma en un 13 % para la clase 1 y en un 18 % para la clase 2.

Tabla 26: Valores de módulo de elasticidad global.

Grado	Módulo de elasticidad global (N/mm ²)	
	Valor experimental	IRAM 9660-1
1	10.493	10.500
2	9.811	9.500

Para el caso del módulo de elasticidad global, la clase 1 coincide prácticamente con el valor presentado por norma y en el caso de la clase 2 es superado en un 3 %. Los resultados expuestos en las tablas 25 y 26 nos dan la pauta de que la confección de las vigas fue realizada correctamente.

5. RESOLUCIÓN DE UN ELEMENTO ESTRUCTURAL

5.1 Miembro curvo sometido a flexión y compresión longitudinal:

En este punto se abordará el cálculo de una pieza curva ejecutada con madera laminada del clon en estudio, siguiendo el apartado de ejemplos presentado por el CIRSOC 601. Dicha pieza compone la cercha de una nave metálica de 15 x 35 m.

La nave industrial propuesta constituyó el trabajo final de la cátedra "Construcciones Metálicas y de Madera" dictada en la Universidad Nacional Facultad Regional Venado Tuerto.

Los esfuerzos para dimensionar la pieza se obtuvieron empleando el software de simulación numérica SAP 2000 16, en el cuál se modeló la estructura completa.

Los parámetros de módulo de elasticidad y resistencia a la flexión utilizados para el dimensionamiento de la pieza se corresponden con los determinados en el presente trabajo.

Datos:

- Miembro curvo que constituye la mitad de un pórtico triarticulado construido con madera laminada encolada estructural de Álamo Australiano 129/60 (Populus deltoides), grado de resistencia 1 de acuerdo con la norma IRAM 9660-1 (2006).
- El espesor de las láminas empleadas (t) responde a la siguiente ecuación:

$$t \leq \frac{r}{250} \left(1 + \frac{f_{M,k}}{80} \right)$$

Donde:

t: espesor en mm

r: radio de curvatura en mm

$f_{m,k}$: 23,8 N/mm² (según norma IRAM 9661 (2006)- Álamo Grado 1)

$$t \leq \frac{2780}{250} \left(1 + \frac{23,8}{80} \right) = 14,43$$

Entonces se adopta: t = 14 mm

El cual satisface el límite superior establecido para la relación t / R en la norma IRAM 9660-1 (2006), siendo R el radio de curvatura (ver Figura 36).

- Dimensiones de la sección transversal: $d_1 = 300$ mm y $d_2 = 800$ mm (la mayor dimensión, lograda con 58 láminas de 14 mm de espesor, es la contenida en el plano del pórtico).
- Las secciones transversales del miembro curvo se encuentran impedidas de rotar y de desplazarse lateralmente en toda su longitud, en razón de que arriostramientos transversales se lo impiden. Un esquema general puede apreciarse en la Figura 36.

A través de un análisis estático simplificado (de primer orden), basado en un comportamiento lineal y considerando el equilibrio del sistema estático indeformado, se obtuvieron los diagramas de los esfuerzos.

En este caso particular es de interés verificar la acción conjunta del momento flector (M) y del esfuerzo normal (N) en la sección transversal ubicada en la mitad de la longitud curva del miembro.

Condición de servicio: estructura colocada en estado seco en ambiente interior.

P= 34 kN

M= 88,87 kN.m

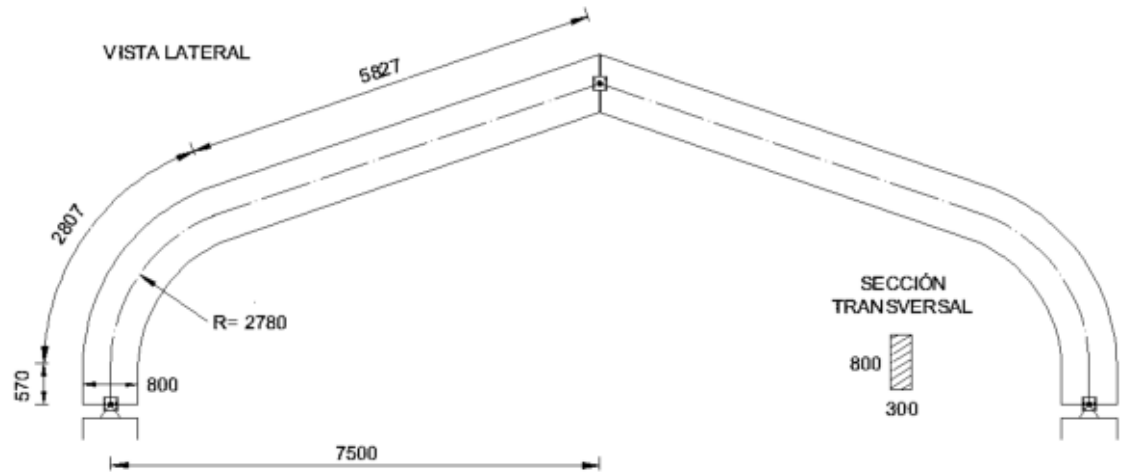


Figura 36: Esquema del elemento estructural calculado.

Verificación de la capacidad portante del miembro curvo sometido a flexión y compresión longitudinal (artículo 3.5.2.)

Por tratarse de un miembro estructural sometido a una combinación de esfuerzos de flexión originados por una carga transversal y a esfuerzos de compresión paralela a la dirección de las fibras, debe ser:

$$\left(\frac{f_c}{F'_c}\right)^2 + \frac{f_{b1}}{F'_{b1}[1 - (f_c/F_{cE1})]} + \frac{f_{b2}}{F'_{b2}[1 - (f_c/F_{cE2}) - (f_{b1}/F_{bE})^2]} \leq 1 \quad (Exp. 3.5.2 - 1)$$

Como el soporte está sometido a flexión solamente respecto del eje de mayor momento de inercia, la expresión anterior se reduce a:

$$\left(\frac{f_c}{F'_c}\right)^2 + \frac{f_{b1}}{F'_{b1}[1 - (f_c/F_{cE1})]} \leq 1$$

Debiendo verificarse que:

$$f_c < F_{cE1} = \frac{0,822E'_{min}}{(l_{e1}/d_1)^2}$$

$$A = 300 \text{ mm} \times 800 \text{ mm} = 240000 \text{ mm}^2$$

$$f_c = P / A = 34000 \text{ N} / 240000 \text{ mm}^2 = 0,142 \text{ N} / \text{mm}^2$$

$$E'_{min} = E_{min} \times CM \times Ct \text{ (Tabla 5.3-1)}$$

$$E_{min} = 2894 \text{ N} / \text{mm}^2$$

$$CM \times Ct = 1 \text{ (debido a la condición de servicio en clima interior, artículo 5.3.)}$$

$$E'_{min} = 2894 \text{ N} / \text{mm}^2 \times 1 \times 1 = 2894 \text{ N} / \text{mm}^2$$

Para el diseño se ha empleado el método simplificado, considerando el equilibrio de la estructura indeformada (ver los datos y el artículo 9.4.). Con el fin de determinar la longitud efectiva de pandeo (l_{e1}) del miembro estructural en el plano del pórtico, el mismo puede ser interpretado como un arco triarticulado. En consecuencia, puede considerarse con suficiente aproximación que $l_{e1} \approx 1,25 l$ donde l es la longitud del miembro analizado.

$$l = 9,92 \text{ m}$$

$$l_{e1} = 1,25 \times 9,92 \text{ m} = 12,4 \text{ m}$$

$$d_1 = d = 800 \text{ mm}$$

$$l_{e1} / d_1 = 15,5$$

$$f_c < F_{cE1} = \frac{0,822 \times 2894}{(15,5)^2} = 9,9 \rightarrow 0,142 \text{ N/mm}^2 < 9,9 \text{ N/mm}^2 \text{ (VERIFICA)}$$

$$f_{b1} = (1 + 0,35 d / R + 0,6 d^2 / R^2) \frac{6M}{bd^2}$$

$$R = 2780 \text{ mm}$$

$$f_{b1} = (1 + 0,35 \times 800 / 2780 + 0,6 \times (800)^2 / (2780)^2) \frac{6 \times (88870000 \text{ Nmm})}{280 \times (800)^2 \text{ mm}^3}$$

$$f_{b1} = 1,15 \times 2,98 \text{ N/mm}^2 = 3,42 \text{ N/mm}^2$$

Comentario: el momento flector actuante tiene signo negativo y por lo tanto tiende a aumentar la curvatura. Consecuentemente, las mayores tensiones originadas por la flexión, que por efecto de la curvatura aparecen en el borde interior cóncavo, son de compresión.

Su valor ($f_{b1} = 3,42 \text{ N/mm}^2$), es un 15 % superior al que existiría en el mismo borde si el miembro estructural no fuese curvo, ya que en ese caso sería igual a $2,98 \text{ N/mm}^2$ como surge del análisis de la expresión 5.1-5 y del cálculo antes desarrollado.

$$F'_c = F_c \times C_D \times C_M \times C_t \times C_P \text{ (Tabla 5.3 - 1)}$$
$$F_c = 7,2 \text{ N/mm}^2 \text{ (Tabla 25)}$$

El valor de resistencia a flexión se afectó de un coeficiente de seguridad de "2" y de un coeficiente por duración de carga de "1,6", según prescripciones de la norma CIRSOC 601.

$$C_D = C_M = C_t = 1$$

Comentario: como el miembro estructural se encuentra arriostrado transversalmente en toda su longitud, lo que impide el giro y el desplazamiento lateral de sus secciones transversales, el pandeo será analizado solamente en el plano del pórtico o sea respecto del eje de mayor momento de inercia.

Para el cálculo de C_P corresponde la aplicación de las disposiciones referidas a un miembro simple (artículo 3.3.1.).

Se adopta un valor de $C_P = 0,67$.

$$F'_c = 7,2 \text{ N/mm}^2 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 0,67 = 4,82 \text{ N/mm}^2$$
$$F'_{b1} = F_b \times C_D \times C_M \times C_t \times C_L \times C_V \times C_c \times C_T \text{ (Tabla 5.3 - 1)}$$
$$F_b = 7,2 \text{ N/mm}^2$$
$$C_L = 1 \text{ (por existir un arriostramiento continuo que evita el pandeo lateral producido por la flexión. Artículos 5.3 y 3.2.1)}$$

$$C_V = \left(\frac{600}{d}\right)^{0,1} \left(\frac{150}{b}\right)^{0,05} = \left(\frac{600}{800}\right)^{0,1} \left(\frac{150}{300}\right)^{0,05} = 0,94 \leq 1,1$$

$$C_c = 1 - 2000 (t/R)^2 = 0,95$$

$C_r = 1$ (porque no existe la posibilidad de que se produzca una distribución lateral de cargas. Artículo 5.3)

$$F'_{b1} = 7,2 \text{ N/mm}^2 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 0,94 \times 0,95 \times 1 = 6,43 \text{ N/mm}^2$$

Reemplazando en la Exp. 3.5.2.1 se obtiene:

$$\left(\frac{0,142}{4,82}\right)^2 + \frac{3,42}{6,43[1 - (0,142/9,9)]} = 0,54 \leq 1$$

Y se verifica lo requerido.

Verificación de las tensiones radiales originadas por el momento flector (artículo 5.1)

Considerando que la acción del momento flector tiende a aumentar la curvatura (momento flector negativo), se debe verificar:

$$f_r \leq F'_{c\perp} \text{ (Exp. 5.1 - 4)}$$

según la expresión 5.1-1 es:

$$f_r = \frac{3M}{2Rbd} = \frac{3 \times 88870000}{2 \times 2780 \times 300 \times 800} = 0,19 \text{ N/mm}^2$$

siendo:

$$F'_{c\perp} = F_{c\perp} \times C_D \times C_M \times C_t \text{ (Tabla 5.3 - 1)}$$

$$F_{c\perp} = 1,0 \text{ N/mm}^2 \text{ (Tabla S. 2.1.1 - 1)}$$

$$C_D = C_M = C_t = 1$$

$$F'_{c\perp} = 1,0 \text{ N/mm}^2 \times 1 \times 1 \times 1 = 1,0 \text{ N/mm}^2 > f_r = 0,19 \text{ N/mm}^2$$

Y se verifica lo requerido.

6. CONCLUSIONES

Los valores expuestos por el Suplemento 1 del CIRSOC 601 para la resistencia a flexión y módulo de elasticidad de tablas aserradas son inferiores que los obtenidos experimentalmente. Si consideramos la clase 1, esta diferencia se da en un 23 % para el valor de resistencia a flexión y un 3 % para el módulo de elasticidad. Se puede afirmar que el reglamento nos coloca del lado de la seguridad. Se debe destacar que existe una diferencia del orden del 9 % para el valor de la densidad.

Los valores de resistencia a flexión característicos para tablas y vigas no difieren entre sí en más de un 15 % y el módulo de elasticidad medio no difiere en más de un 6 %; por lo que las tablas y vigas aserradas pueden estudiarse juntas. Se pueden extender los valores presentados en el Suplemento 1 del Reglamento CIRSOC 601 para tablas de Populus deltoides a vigas del clon Populus deltoides Australiano 129/60 cultivado en el Delta del Río Paraná.

Las propiedades resistentes y de rigidez para tablas de Populus deltoides Australiano 129/60 cultivado en el Delta del Río Paraná son superiores a las del Pinus taeda y elliotii. Respecto al Eucalyptus Grandis el valor de resistencia a flexión es levemente mayor para ambas clases, pero el módulo de elasticidad resulta inferior. En comparación con la Araucaria angustifolia, todos los valores de las propiedades resistentes resultan inferiores.

Se confirma la influencia de la nudosidad y la presencia de médula en la resistencia a flexión de los elementos estructurales ejecutados con madera de Populus deltoides Australiano 129/60 y la eficacia del sistema de clasificación visual propuesto en la norma IRAM 9662/4.

La influencia de la nudosidad y la presencia de médula en el módulo de elasticidad de los elementos estructurales ejecutados con madera de Populus deltoides Australiano 129/60 resulta menos significativa que para la resistencia a flexión.

Los valores de inclinación de las fibras no superaron el máximo permitido por la Norma IRAM 9662/4, por lo que todas las piezas cumplieron ese requisito.

El espesor medio de anillo de crecimiento no presenta una relación estadísticamente significativa con la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad.

El módulo de elasticidad global presenta valores en un 3 a 4 % inferiores a los del módulo de elasticidad local en vigas aserradas y en un 3 % para vigas laminadas encoladas.

Los valores de las propiedades resistentes obtenidas mediante la clasificación visual permiten insertar a la madera aserrada de la especie estudiada en las clases C22 y C20 del sistema internacional adoptado por la Norma UNE-EN 338:2010.

Los valores experimentales correspondientes a la resistencia a flexión en vigas laminadas encoladas superan a los expuestos en la Norma IRAM 9660-1 en un 13 % para la clase 1 y en un 18 % para la clase 2. Para el caso del módulo de elasticidad global, la clase 1 coincide prácticamente con el valor presentado por norma y en el caso de la clase 2 es superado en un 3 %.

Mediante la resolución de un elemento estructural siguiendo las prescripciones del apartado de ejemplos del CIRSOC 601, se verifica la posibilidad de utilizar piezas de madera industrializada en estructuras civiles.

7. AGRADECIMIENTOS

A los Ingenieros Alfredo A. Guillaumet, Roberto D. Manavella y Cecilia Filippetti por su generosidad, compromiso e incentivo constante durante mi etapa de formación ingenieril y en el campo de la investigación.

A los alumnos y graduados del Grupo GIDEC (Grupo de Investigación y Desarrollo de Estructuras Civiles) de la Facultad Regional Venado Tuerto de la Universidad Tecnológica por su invaluable colaboración durante el ensayo de los elementos estructurales.

Al Ingeniero Miguel Tortoriello, al Técnico Luis Seewald y alumnos de la Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires por su inestimable colaboración en el ensayo de una serie de tablas.

A la Empresa Wood SA por el constante apoyo a las tareas del grupo confeccionando los elementos laminados.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Castro G. 2006. Usos actuales y posibilidades futuras de la madera de álamo. Jornadas de Salicáceas 2006.

Denzler J.K. and Glos P. (2008) Size effects in bending. 41th Meeting, International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W18 –Timber Structures, CIB-W18, Paper 41-6-4, St. Andrews, Canada.

Glos P. 1995a Lectura A6 Solid Timber. Strength Grading. Timber Engineering Step 1. First Edition, Centrum Hout, The Netherlands.

Hoffmeyer P. (1995) Wood as a building material. In Timber Engineering STEP 1, pp. A4/1- A4/21. Centrum Hout, The Netherlands.

UNE-EN 338:2010. Agencia Española de Normalización y Certificación. (2010). Madera estructural. Clases resistentes. Madrid.

UNE-EN 384:2010. Agencia Española de Normalización y Certificación. (2010). Determinación de los valores característicos de las propiedades y la densidad. Madrid.

UNE- EN 408:2011. Agencia Española de Normalización y Certificación. (2011). Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. Madrid.

UNE- EN 1194:1999. Agencia Española de Normalización y Certificación. (1999). Estructuras de madera. Madera laminada encolada. Clases resistentes y determinación de los valores característicos. Madrid.

CIRSOC 601(2015). Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad en Obras Civiles. Reglamento Argentino de Estructuras de Madera. Buenos Aires.

IRAM 9660-1. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2005). Madera laminada encolada estructural. Parte 1: Clases de resistencia y requisitos de fabricación y de control.

Buenos Aires.

IRAM 9662-4 (esquema). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2014). Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por Resistencia. Parte 4 – Tablas de álamo

‘australiano 129/60’ y ‘Stoneville 67’ (Populus deltoides). Buenos Aires.

IRAM 9661. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2013). Madera laminada encolada estructural. Requisitos de los empalmes por unión dentada. Buenos Aires.

IRAM 9663. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2013). Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas. Buenos Aires.

IRAM 45055. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2002). Adhesivos para estructuras de madera bajo carga. Adhesivo de policondensación de tipos fenólicos, aminoplásticos y de otros tipos. Clasificación y requisitos de comportamiento. Buenos Aires.

ISO 3130 (1975). International Organization for Standardization (E.) Wood - Determination of moisture content for physical and mechanical tests.

ISO 3131 (1975). International Organization for Standardization (E). Wood - Determination of density for physical and mechanical tests.

Artículo “Eficacia estructural y energética de la madera como material de construcción”- 1º Congreso sobre Forjados- Francisco Arriaga (Octubre 1995). Barcelona.

Trabajo “Especies provenientes de bosques implantados en Argentina caracterizadas para uso estructural”- XIV EBRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira- Alfredo A. Guillaumet (Abril 2014). Brasil.

Tabla A

FECHA	N°
1. P.F. 2	1
2. P.F. 3	1
3. P.F. 4	1
4. P.F. 5	1
5. P.F. 6	1
6. P.F. 7	1
7. P.F. 8	1
8. P.F. 9	1
9. P.F. 10	1
10. P.F. 11	1
11. P.F. 12	1
12. P.F. 13	1
13. P.F. 14	1
14. P.F. 15	1
15. P.F. 16	1
16. P.F. 17	1
17. P.F. 18	1
18. P.F. 19	1
19. P.F. 20	1
20. P.F. 21	2
21. P.F. 22	2
22. P.F. 23	2
23. P.F. 24	2
24. P.F. 25	2
25. P.F. 26	2
26. P.F. 27	2
27. P.F. 28	2
28. P.F. 29	2
29. P.F. 30	2
30. P.F. 31	2
31. P.F. 32	2
32. P.F. 33	2
33. P.F. 34	2
34. P.F. 35	2
35. P.F. 36	2
36. P.F. 37	2
37. P.F. 38	2
38. P.F. 39	2
39. P.F. 40	2
40. P.F. 41	2
41. P.F. 42	2
42. P.F. 43	2
43. P.F. 44	2
44. P.F. 45	2
45. P.F. 46	2
46. P.F. 47	2
47. P.F. 48	2
48. P.F. 49	2
49. P.F. 50	2
50. P.F. 51	2
51. P.F. 52	2
52. P.F. 53	2
53. P.F. 54	2
54. P.F. 55	2
55. P.F. 56	2
56. P.F. 57	2
57. P.F. 58	2
58. P.F. 59	2
59. P.F. 60	2
60. P.F. 61	2
61. P.F. 62	2
62. P.F. 63	2
63. P.F. 64	2
64. P.F. 65	2
65. P.F. 66	2
66. P.F. 67	2
67. P.F. 68	2
68. P.F. 69	2
69. P.F. 70	2
70. P.F. 71	2
71. P.F. 72	2
72. P.F. 73	2
73. P.F. 74	2
74. P.F. 75	2
75. P.F. 76	2
76. P.F. 77	2
77. P.F. 78	2
78. P.F. 79	2
79. P.F. 80	2
80. P.F. 81	2
81. P.F. 82	2
82. P.F. 83	2
83. P.F. 84	2
84. P.F. 85	2
85. P.F. 86	2
86. P.F. 87	2
87. P.F. 88	2
88. P.F. 89	2
89. P.F. 90	2
90. P.F. 91	2
91. P.F. 92	2
92. P.F. 93	2
93. P.F. 94	2
94. P.F. 95	2
95. P.F. 96	2
96. P.F. 97	2
97. P.F. 98	2
98. P.F. 99	2
99. P.F. 100	2

SERIE 1		SERIE 2		SERIE 3		SERIE 4		SERIE 5		SERIE 6		SERIE 7		SERIE 8		SERIE 9		SERIE 10		SERIE 11		SERIE 12		SERIE 13		SERIE 14		SERIE 15		SERIE 16		SERIE 17		SERIE 18		SERIE 19		SERIE 20		SERIE 21		SERIE 22		SERIE 23		SERIE 24		SERIE 25		SERIE 26		SERIE 27		SERIE 28		SERIE 29		SERIE 30		SERIE 31		SERIE 32		SERIE 33		SERIE 34		SERIE 35		SERIE 36		SERIE 37		SERIE 38		SERIE 39		SERIE 40		SERIE 41		SERIE 42		SERIE 43		SERIE 44		SERIE 45		SERIE 46		SERIE 47		SERIE 48		SERIE 49		SERIE 50		SERIE 51		SERIE 52		SERIE 53		SERIE 54		SERIE 55		SERIE 56		SERIE 57		SERIE 58		SERIE 59		SERIE 60		SERIE 61		SERIE 62		SERIE 63		SERIE 64		SERIE 65		SERIE 66		SERIE 67		SERIE 68		SERIE 69		SERIE 70		SERIE 71		SERIE 72		SERIE 73		SERIE 74		SERIE 75		SERIE 76		SERIE 77		SERIE 78		SERIE 79		SERIE 80		SERIE 81		SERIE 82		SERIE 83		SERIE 84		SERIE 85		SERIE 86		SERIE 87		SERIE 88		SERIE 89		SERIE 90		SERIE 91		SERIE 92		SERIE 93		SERIE 94		SERIE 95		SERIE 96		SERIE 97		SERIE 98		SERIE 99		SERIE 100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
252	0.51	254	0.53	256	0.55	258	0.57	260	0.59	262	0.61	264	0.63	266	0.65	268	0.67	270	0.69	272	0.71	274	0.73	276	0.75	278	0.77	280	0.79	282	0.81	284	0.83	286	0.85	288	0.87	290	0.89	292	0.91	294	0.93	296	0.95	298	0.97	300	0.99	302	1.01	304	1.03	306	1.05	308	1.07	310	1.09	312	1.11	314	1.13	316	1.15	318	1.17	320	1.19	322	1.21	324	1.23	326	1.25	328	1.27	330	1.29	332	1.31	334	1.33	336	1.35	338	1.37	340	1.39	342	1.41	344	1.43	346	1.45	348	1.47	350	1.49	352	1.51	354	1.53	356	1.55	358	1.57	360	1.59	362	1.61	364	1.63	366	1.65	368	1.67	370	1.69	372	1.71	374	1.73	376	1.75	378	1.77	380	1.79	382	1.81	384	1.83	386	1.85	388	1.87	390	1.89	392	1.91	394	1.93	396	1.95	398	1.97	400	1.99	402	2.01	404	2.03	406	2.05	408	2.07	410	2.09	412	2.11	414	2.13	416	2.15	418	2.17	420	2.19	422	2.21	424	2.23	426	2.25	428	2.27	430	2.29	432	2.31	434	2.33	436	2.35	438	2.37	440	2.39	442	2.41	444	2.43	446	2.45	448	2.47	450	2.49	452	2.51	454	2.53	456	2.55	458	2.57	460	2.59	462	2.61	464	2.63	466	2.65	468	2.67	470	2.69	472	2.71	474	2.73	476	2.75	478	2.77	480	2.79	482	2.81	484	2.83	486	2.85	488	2.87	490	2.89	492	2.91	494	2.93	496	2.95	498	2.97	500	2.99	502	3.01	504	3.03	506	3.05	508	3.07	510	3.09	512	3.11	514	3.13	516	3.15	518	3.17	520	3.19	522	3.21	524	3.23	526	3.25	528	3.27	530	3.29	532	3.31	534	3.33	536	3.35	538	3.37	540	3.39	542	3.41	544	3.43	546	3.45	548	3.47	550	3.49	552	3.51	554	3.53	556	3.55	558	3.57	560	3.59	562	3.61	564	3.63	566	3.65	568	3.67	570	3.69	572	3.71	574	3.73	576	3.75	578	3.77	580	3.79	582	3.81	584	3.83	586	3.85	588	3.87	590	3.89	592	3.91	594	3.93	596	3.95	598	3.97	600	3.99	602	4.01	604	4.03	606	4.05	608	4.07	610	4.09	612	4.11	614	4.13	616	4.15	618	4.17	620	4.19	622	4.21	624	4.23	626	4.25	628	4.27	630	4.29	632	4.31	634	4.33	636	4.35	638	4.37	640	4.39	642	4.41	644	4.43	646	4.45	648	4.47	650	4.49	652	4.51	654	4.53	656	4.55	658	4.57	660	4.59	662	4.61	664	4.63	666	4.65	668	4.67	670	4.69	672	4.71	674	4.73	676	4.75	678	4.77	680	4.79	682	4.81	684	4.83	686	4.85	688	4.87	690	4.89	692	4.91	694	4.93	696	4.95	698	4.97	700	4.99	702	5.01	704	5.03	706	5.05	708	5.07	710	5.09	712	5.11	714	5.13	716	5.15	718	5.17	720	5.19	722	5.21	724	5.23	726	5.25	728	5.27	730	5.29	732	5.31	734	5.33	736	5.35	738	5.37	740	5.39	742	5.41	744	5.43	746	5.45	748	5.47	750	5.49	752	5.51	754	5.53	756	5.55	758	5.57	760	5.59	762	5.61	764	5.63	766	5.65	768	5.67	770	5.69	772	5.71	774	5.73	776	5.75	778	5.77	780	5.79	782	5.81	784	5.83	786	5.85	788	5.87	790	5.89	792	5.91	794	5.93	796	5.95	798	5.97	800	5.99	802	6.01	804	6.03	806	6.05	808	6.07	810	6.09	812	6.11	814	6.13	816	6.15	818	6.17	820	6.19	822	6.21	824	6.23	826	6.25	828	6.27	830	6.29	832	6.31	834	6.33	836	6.35	838	6.37	840	6.39	842	6.41	844	6.43	846	6.45	848	6.47	850	6.49	852	6.51	854	6.53	856	6.55	858	6.57	860	6.59	862	6.61	864	6.63	866	6.65	868	6.67	870	6.69	872	6.71	874	6.73	876	6.75	878	6.77	880	6.79	882	6.81	884	6.83	886	6.85	888	6.87	890	6.89	892	6.91	894	6.93	896	6.95	898	6.97	900	6.99	902	7.01	904	7.03	906	7.05	908	7.07	910	7.09	912	7.11	914	7.13	916	7.15	918	7.17	920	7.19	922	7.21	924	7.23	926	7.25	928	7.27	930	7.29	932	7.31	934	7.33	936	7.35	938	7.37	940	7.39	942	7.41	944	7.43	946	7.45	948	7.47	950	7.49	952	7.51	954	7.53	956	7.55	958	7.57	960	7.59	962	7.61	964	7.63	966	7.65	968	7.67	970	7.69	972	7.71	974	7.73	976	7.75	978	7.77	980	7.79	982	7.81	984	7.83	986	7.85	988	7.87	990	7.89	992	7.91	994	7.93	996	7.95	998	7.97	1000	7.99	1002	8.01	1004	8.03	1006	8.05	1008	8.07	1010	8.09	1012	8.11	1014	8.13	1016	8.15	1018	8.17	1020	8.19	1022	8.21	1024	8.23	1026	8.25	1028	8.27	1030	8.29	1032	8.31	1034	8.33	1036	8.35	1038	8.37	1040	8.39	1042	8.41	1044	8.43	1046	8.45	1048	8.47	1050	8.49	1052	8.51	1054	8.53	1056	8.55	1058	8.57	1060	8.59	1062	8.61	1064	8.63	1066	8.65	1068	8.67	1070	8.69	1072	8.71	1074	8.73	1076	8.75	1078	8.77	1080	8.79	1082	8.81	1084	8.83	1086	8.85	1088	8.87	1090	8.89	1092	8.91	1094	8.93	1096	8.95	1098	8.97	1100	8.99	1102	9.01	1104	9.03	1106	9.05	1108	9.07	1110	9.09	1112	9.11	1114	9.13	1116	9.15	1118	9.17	1120	9.19	1122	9.21	1124	9.23	1126	9.25	1128	9.27	1130	9.29	1132	9.31	1134	9.33	1136	9.35	1138	9.37	1140	9.39	1142	9.41	1144	9.43	1146	9.45	1148	9.47	1150	9.49	1152	9.51	1154	9.53	1156	9.55	1158	9.57	1160	9.59	1162	9.61	1164	9.63	1166	9.65	1168	9.67	1170	9.69	1172	9.71	1174	9.73	1176	9.75	1178	9.77	1180	9.79	1182	9.81	1184	9.83	1186	9.85	1188	9.87	1190	9.89	1192	9.91	1194	9.93	1196	9.95	1198	9.97	1200	9.99	1202	10.01	1204	10.03	1206	10.05	1208	10.07	1210	10.09	1212	10.11	1214	10.13	1216

VIGAS

VIGAS	TABLAS DATOS DE ENSAYO Y OBTENCIONES BÁSICAS - DATOS DE ENSAYO OBT										OBSERVACIONES
	Nº	FECHA	LONGITUD	1. EJE	2. EJE	3. EJE	4. EJE	5. EJE	6. EJE	7. EJE	
1	PAL1	607	1173	2146	3010	3974	5038	6102	7166	8230	Poco de agua biológico
2	PAL2	608	1174	2147	3011	3975	5039	6103	7167	8231	Almagra Biológico
3	PAL3	609	1175	2148	3012	3976	5040	6104	7168	8232	Almagra Biológico en Cuba
4	PAL4	610	1176	2149	3013	3977	5041	6105	7169	8233	Almagra Biológico en Cuba
5	PAL5	611	1177	2150	3014	3978	5042	6106	7170	8234	Almagra Biológico en Cuba
6	PAL6	612	1178	2151	3015	3979	5043	6107	7171	8235	Almagra Biológico en Cuba
7	PAL7	613	1179	2152	3016	3980	5044	6108	7172	8236	Almagra Biológico en Cuba
8	PAL8	614	1180	2153	3017	3981	5045	6109	7173	8237	Almagra Biológico en Cuba
9	PAL9	615	1181	2154	3018	3982	5046	6110	7174	8238	Almagra Biológico en Cuba
10	PAL10	616	1182	2155	3019	3983	5047	6111	7175	8239	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
11	PAL11	617	1183	2156	3020	3984	5048	6112	7176	8240	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
12	PAL12	618	1184	2157	3021	3985	5049	6113	7177	8241	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
13	PAL13	619	1185	2158	3022	3986	5050	6114	7178	8242	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
14	PAL14	620	1186	2159	3023	3987	5051	6115	7179	8243	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
15	PAL15	621	1187	2160	3024	3988	5052	6116	7180	8244	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
16	PAL16	622	1188	2161	3025	3989	5053	6117	7181	8245	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
17	PAL17	623	1189	2162	3026	3990	5054	6118	7182	8246	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
18	PAL18	624	1190	2163	3027	3991	5055	6119	7183	8247	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
19	PAL19	625	1191	2164	3028	3992	5056	6120	7184	8248	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
20	PAL20	626	1192	2165	3029	3993	5057	6121	7185	8249	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
21	PAL21	627	1193	2166	3030	3994	5058	6122	7186	8250	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
22	PAL22	628	1194	2167	3031	3995	5059	6123	7187	8251	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
23	PAL23	629	1195	2168	3032	3996	5060	6124	7188	8252	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
24	PAL24	630	1196	2169	3033	3997	5061	6125	7189	8253	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
25	PAL25	631	1197	2170	3034	3998	5062	6126	7190	8254	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
26	PAL26	632	1198	2171	3035	3999	5063	6127	7191	8255	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
27	PAL27	633	1199	2172	3036	4000	5064	6128	7192	8256	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
28	PAL28	634	1200	2173	3037	4001	5065	6129	7193	8257	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
29	PAL29	635	1201	2174	3038	4002	5066	6130	7194	8258	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
30	PAL30	636	1202	2175	3039	4003	5067	6131	7195	8259	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
31	PAL31	637	1203	2176	3040	4004	5068	6132	7196	8260	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
32	PAL32	638	1204	2177	3041	4005	5069	6133	7197	8261	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
33	PAL33	639	1205	2178	3042	4006	5070	6134	7198	8262	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
34	PAL34	640	1206	2179	3043	4007	5071	6135	7199	8263	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
35	PAL35	641	1207	2180	3044	4008	5072	6136	7200	8264	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
36	PAL36	642	1208	2181	3045	4009	5073	6137	7201	8265	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
37	PAL37	643	1209	2182	3046	4010	5074	6138	7202	8266	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
38	PAL38	644	1210	2183	3047	4011	5075	6139	7203	8267	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
39	PAL39	645	1211	2184	3048	4012	5076	6140	7204	8268	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
40	PAL40	646	1212	2185	3049	4013	5077	6141	7205	8269	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
41	PAL41	647	1213	2186	3050	4014	5078	6142	7206	8270	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
42	PAL42	648	1214	2187	3051	4015	5079	6143	7207	8271	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
43	PAL43	649	1215	2188	3052	4016	5080	6144	7208	8272	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
44	PAL44	650	1216	2189	3053	4017	5081	6145	7209	8273	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
45	PAL45	651	1217	2190	3054	4018	5082	6146	7210	8274	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
46	PAL46	652	1218	2191	3055	4019	5083	6147	7211	8275	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
47	PAL47	653	1219	2192	3056	4020	5084	6148	7212	8276	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
48	PAL48	654	1220	2193	3057	4021	5085	6149	7213	8277	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
49	PAL49	655	1221	2194	3058	4022	5086	6150	7214	8278	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
50	PAL50	656	1222	2195	3059	4023	5087	6151	7215	8279	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
51	PAL51	657	1223	2196	3060	4024	5088	6152	7216	8280	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
52	PAL52	658	1224	2197	3061	4025	5089	6153	7217	8281	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
53	PAL53	659	1225	2198	3062	4026	5090	6154	7218	8282	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
54	PAL54	660	1226	2199	3063	4027	5091	6155	7219	8283	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
55	PAL55	661	1227	2200	3064	4028	5092	6156	7220	8284	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
56	PAL56	662	1228	2201	3065	4029	5093	6157	7221	8285	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
57	PAL57	663	1229	2202	3066	4030	5094	6158	7222	8286	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
58	PAL58	664	1230	2203	3067	4031	5095	6159	7223	8287	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
59	PAL59	665	1231	2204	3068	4032	5096	6160	7224	8288	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
60	PAL60	666	1232	2205	3069	4033	5097	6161	7225	8289	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
61	PAL61	667	1233	2206	3070	4034	5098	6162	7226	8290	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
62	PAL62	668	1234	2207	3071	4035	5099	6163	7227	8291	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
63	PAL63	669	1235	2208	3072	4036	5100	6164	7228	8292	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
64	PAL64	670	1236	2209	3073	4037	5101	6165	7229	8293	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
65	PAL65	671	1237	2210	3074	4038	5102	6166	7230	8294	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
66	PAL66	672	1238	2211	3075	4039	5103	6167	7231	8295	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
67	PAL67	673	1239	2212	3076	4040	5104	6168	7232	8296	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
68	PAL68	674	1240	2213	3077	4041	5105	6169	7233	8297	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
69	PAL69	675	1241	2214	3078	4042	5106	6170	7234	8298	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
70	PAL70	676	1242	2215	3079	4043	5107	6171	7235	8299	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
71	PAL71	677	1243	2216	3080	4044	5108	6172	7236	8300	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
72	PAL72	678	1244	2217	3081	4045	5109	6173	7237	8301	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
73	PAL73	679	1245	2218	3082	4046	5110	6174	7238	8302	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
74	PAL74	680	1246	2219	3083	4047	5111	6175	7239	8303	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
75	PAL75	681	1247	2220	3084	4048	5112	6176	7240	8304	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
76	PAL76	682	1248	2221	3085	4049	5113	6177	7241	8305	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
77	PAL77	683	1249	2222	3086	4050	5114	6178	7242	8306	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
78	PAL78	684	1250	2223	3087	4051	5115	6179	7243	8307	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
79	PAL79	685	1251	2224	3088	4052	5116	6180	7244	8308	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
80	PAL80	686	1252	2225	3089	4053	5117	6181	7245	8309	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
81	PAL81	687	1253	2226	3090	4054	5118	6182	7246	8310	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
82	PAL82	688	1254	2227	3091	4055	5119	6183	7247	8311	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
83	PAL83	689	1255	2228	3092	4056	5120	6184	7248	8312	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
84	PAL84	690	1256	2229	3093	4057	5121	6185	7249	8313	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
85	PAL85	691	1257	2230	3094	4058	5122	6186	7250	8314	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
86	PAL86	692	1258	2231	3095	4059	5123	6187	7251	8315	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
87	PAL87	693	1259	2232	3096	4060	5124	6188	7252	8316	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
88	PAL88	694	1260	2233	3097	4061	5125	6189	7253	8317	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
89	PAL89	695	1261	2234	3098	4062	5126	6190	7254	8318	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
90	PAL90	696	1262	2235	3099	4063	5127	6191	7255	8319	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
91	PAL91	697	1263	2236	3100	4064	5128	6192	7256	8320	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
92	PAL92	698	1264	2237	3101	4065	5129	6193	7257	8321	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
93	PAL93	699	1265	2238	3102	4066	5130	6194	7258	8322	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
94	PAL94	700	1266	2239	3103	4067	5131	6195	7259	8323	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
95	PAL95	701	1267	2240	3104	4068	5132	6196	7260	8324	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
96	PAL96	702	1268	2241	3105	4069	5133	6197	7261	8325	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
97	PAL97	703	1269	2242	3106	4070	5134	6198	7262	8326	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
98	PAL98	704	1270	2243	3107	4071	5135	6199	7263	8327	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
99	PAL99	705	1271	2244	3108	4072	5136	6200	7264	8328	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca
100	PAL100	706	1272	2245	3109	4073	5137	6201	7265	8329	Almagra Biológico Enroca Medio y E. Enroca

TABLA	TABLAS DATOS DE ENSAYO Y OBTENCIONES BÁSICAS - DATOS DE ENSAYO OBT										OBSERVACIONES
	Nº	FECHA	LONGITUD	1. EJE	2. EJE	3. EJE					

NOMENCLATURA DE MATERIALES		CANTIDAD		VALOR		UNIDAD		OBSERVACIONES	
ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

...
-----	-----	-----	-----

...
-----	-----	-----	-----

...
-----	-----	-----	-----

...
-----	-----	-----	-----

...
-----	-----	-----	-----

...
-----	-----	-----	-----

TOTAL

