

## PROPIEDADES ESTRUCTURALES DE LA MADERA DE ARAUCARIA ANGUSTIFOLIA PROVENIENTE DE BOSQUES IMPLANTADOS

### STRUCTURAL PROPERTIES OF THE WOOD OF ARAUCARIA ANGUSTIFOLIA ORIGINATING OF IMPLANTED FORESTS

Alfredo A. Guillaumet (1) (A); María C. Filippetti (2); Roberto D. Manavella (3); Jacinto Diab (4)

(1) Ing. en Construcciones., Profesor Titular, GIDEC, Universidad Tecnológica Nacional. V. Tuerto. Argentina.

(2) Ing. en Construcciones, Profesor Adjunto, GIDEC, Universidad Tecnológica Nacional. V. Tuerto. Argentina.

(3) Ing. Civil, Profesor Titular, GIDEC, Universidad Tecnológica Nacional. V. Tuerto. Argentina.

(4) Dr. Phd. Ing. Mecánico, Profesor Titular, GIDEC, Universidad Tecnológica Nacional. V. Tuerto. Argentina.

Laprida 651, (2600) Venado Tuerto. Argentina. [aguillaumet@rec.utn.edu.ar](mailto:aguillaumet@rec.utn.edu.ar). (A) presentador.

#### Resumen

En Argentina se prioriza la formación de los estudiantes de ingeniería en el conocimiento de estructuras de acero y hormigón. La madera aparece postergada en este planteo, desconociendo que es una alternativa ventajosa en la construcción de estructuras para obras de infraestructura urbana como museos, centros culturales, teatros, gimnasios, puentes peatonales, etc.

La utilización de madera proveniente de bosques implantados y el desarrollo en la industria de vigas laminadas y tableros, suma un nuevo potencial a sus nobles cualidades como el aspecto estético, las buenas propiedades resistentes en relación a su peso, durabilidad, acústica e integración con el ambiente. Todo esto, compromete a los ingenieros estructuralistas a ampliar el conocimiento sobre el comportamiento mecánico de las distintas especies para optimizar sus aplicaciones.

Este trabajo presenta los resultados de las investigaciones desarrolladas en la Universidad Tecnológica Nacional FRVT de Argentina, sobre el comportamiento mecánico de la madera de *Araucaria angustifolia* procedente de bosques implantados en la Provincia de Misiones. Se especifican las pautas para su clasificación visual y comportamiento mecánico esperado por clase. La información se complementa con la resistencia al aplastamiento, el arrancamiento de clavos y tornillos y la durabilidad natural. Los ensayos se realizaron según Normas Europeas.

Los valores obtenidos muestran a la madera de *Araucaria angustifolia* como un material apto para su utilización en obras de infraestructura urbana con la ventaja de la compatibilidad y asimilación que tiene con el medio ambiente en su crecimiento, producción y disposición final.

*Palabras clave: madera estructural, Araucaria angustifolia, estructuras de madera, Pino Paraná*

#### Abstract

In Argentina the formation of the engineering students is prioritized in the knowledge of steel structures and concrete. The wood appears deferred in this outline, ignoring that it is an advantageous alternative in the construction of structures for works of urban infrastructure, as museums, cultural centers, theaters, gyms, pedestrian bridges, etc.

The wooden use coming from implanted forests and the development in the industry of laminate beams and boards, sum a new potential to their noble qualities like the aesthetic aspect, the good resistant properties in relation to their weight, durability, acoustics and integration with the environment. All this, commits to the engineers to enlarge the knowledge on the mechanical behavior of the different species to optimize their applications

This work presents the results of the investigations developed in the National Technological University FRVT of Argentina, about of the mechanical behavior of the wood of *Araucaria Angustifolia* coming from forests implanted in the Misiones County. The rules are specified for their visual classification and mechanical behavior waited by class. The information is supplemented with the resistance to the squashing, extraction of nails and screws and the natural durability. The rehearsals were carried out according to European Norms.

The obtained values show to the wood of *Araucaria Angustifolia* like a capable material for their use in works of urbane infrastructures, with the advantage of the compatibility and assimilation that it has with the environment in their growth, production and final disposition.

*Keywords: Structural wood, Araucaria angustifolia, wood structures, Parana Pine.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La utilización de la madera en la construcción data de muy antiguo y quedan para ser admiradas hoy grandes obras, por ejemplo la estructura del techo de la “Sala delle feste” - Valentino Castle - Torino, partes de la estructura central del techo del Teatro “Verdi” - Pisa, estructuras del puente del viaducto Paderno d’Adda - entre otras muchas.

Este material de origen orgánico, explotado históricamente de bosques naturales, posee características muy variables, sujetas no solo a la especie forestal sino también a la zona de cultivo, estado sanitario, humedad y presencia de defectos (nudos, médula, fisuras, etc..) . Se empleaba madera dura de alta densidad y buenas propiedades mecánicas y durabilidad. La protección de los bosques naturales genera actualmente una disminución en la disponibilidad y se orienta el consumo a madera proveniente de bosques implantados con especies de menor densidad y rápido crecimiento. Esta realidad nos presenta madera aserrada de pequeña escuadría, pero con su industrialización surgen a disposición de los profesionales de la construcción las vigas de madera laminada encolada y diferentes tipos de tableros que permiten diseños más audaces.

Las plantaciones programadas, con árboles modificados genéticamente y tratamiento silvicultural metódico, permiten obtener madera de buena calidad y propiedades mecánicas muy interesantes en relación a su densidad.

Argentina, con poca tradición en la construcción en madera, recién en los últimos años comenzó a redactar normas para clasificar el material y contar con información confiable sobre las propiedades mecánicas. Queda un largo camino por recorrer para alcanzar las especies más comercializadas. De la misma manera recién en el año 2011 se puso en discusión pública el primer Reglamento Argentino para Estructuras de Madera (CIRSOC 601).

La utilización de la madera para construir infraestructura urbana es una alternativa que debe ser tenida muy en cuenta. Existen numerosos ejemplos de edificios para la práctica de deportes, actividades culturales o recreacionales con imponentes estructuras de grandes luces integradas al medio, brindando a los usuarios una calidez que solo este material puede proveer. En la figura 1 se aprecia el empleo de la madera en Europa para obras de infraestructura deportiva y turística. En la figura 1a se aprecia un puente peatonal en Torquemada (España), en la figura 1b la estructura reticulada para un polideportivo en Madrid (España), en la figura 1c las vigas rectas para cubrir una piscina en Ibiza (Francia) y en la figura 1d la cubierta con vigas curvas para una cancha de tenis en Vitoria (España).



Figura 1. Obras de infraestructura ejecutadas con madera estructural

Como los profesionales de la construcción deben construir en forma confiable y económica, aprovechando al máximo las propiedades que cada material les brinda, este trabajo presenta las propiedades mecánicas de una especie nativa, pero con árboles provenientes de bosques implantados, y resume varios años de investigación experimental en la Facultad Regional Venado Tuerto de la Universidad Tecnológica Nacional de Argentina, considerando que de esta manera se contribuye a potenciar su utilización.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Materiales.

Todas las probetas corresponden a madera de *Araucaria angustifolia* (Pino Paraná) proveniente de bosques implantados en la Provincia de Misiones, Argentina y seleccionadas al azar.

La *Araucaria angustifolia* originariamente formó pinares en la provincia paranaense, que abarca parte del Brasil austro-oriental y en el distrito de las selvas mixtas del NE de Misiones. Se caracteriza por presentar forma aparasolada, las ramas se encuentran dispuestas en verticilios de 5 a 8 miembros en el cuarto superior del tronco, en posición horizontal con la extremidad encorvada hacia arriba. Esta disposición de las ramas genera la aparición de agrupamiento de nudos, que pueden disminuirse con un buen tratamiento silvícola (poda). Su rollizo tiene una longitud útil de 8 a 10 metros con un diámetro promedio de 0,40 metros. Su albura es de color blanco amarillento y su duramen es blanco ocráceo con vetas rosadas, la textura es homogénea y de mediana a fina, con brillo suave de grano derecho y sin olor.

### 2.2 Métodos de ensayos

#### 2.2.1. Resistencia a Flexión y Módulo de Elasticidad Longitudinal.

La Resistencia a la flexión (MOR) y el Módulo de Elasticidad (MOE) son las propiedades mecánicas que habitualmente condicionan el dimensionado de cubiertas. Para los ensayos se utilizó la Norma UNE EN 408 que provee la metodología para trabajar con probetas de dimensiones estructurales. La mencionada Norma establece que la longitud de las probetas utilizadas debe ser 19 veces la altura nominal de la sección, que las mismas deben estar simplemente apoyada con una luz igual a 18 veces el canto nominal, que la carga en flexión se debe aplicar sobre dos puntos simétricos a una distancia igual a  $6h$  ( $h$ : canto de la probeta). Se colocaron topes laterales en el centro y extremos de la probeta para evitar el vuelco o pandeo lateral, especialmente en las de mayor esbeltez. El tiempo de ensayo se registró hasta la rotura de la probeta, que en todos los casos ocurrió en  $(300 + 120)$  seg, de acuerdo a lo que establece la Norma. Como se determinó el módulo de elasticidad local (flexión pura) las deformaciones se midieron en el punto medio, sobre el eje neutro, en un segmento ubicado simétricamente y de longitud igual a  $5h$ . En la figura 2 se muestran los dispositivos para la medición de las deformaciones.



Figura 2. Dispositivo para medición de deformaciones

Previamente a los ensayos se realizó un detallado relevamiento de los defectos (nudosidad, presencia de médula, fisuras, arista faltante, combado, encorvado, torcedura, ataque biológico e inclinación de las fibras), para esta tarea se siguieron las prescripciones de la Norma UNE EN 1310. En la figura 3 se observan los agrupamientos de nudos que presentaban las vigas.



Figura 3. Agrupamiento de nudos

Para que los resultados sean comparables se realizaron las correcciones por humedad y dimensión del canto a los valores de referencia según las prescripciones de la Norma UNE EN 384 y también se ajustaron los valores por tamaño de la muestra de acuerdo a la misma Norma.

A partir del MOR y el MOE obtenidos experimentalmente se determinaron la resistencia a Tracción, Compresión y Esfuerzo Cortante en las direcciones paralela y perpendicular a la fibra y el Módulo de Elasticidad Medio perpendicular a la fibra y el Módulo de Elasticidad Transversal mediante las expresiones establecidas por la Norma UNE EN 384.

Se ensayaron 256 vigas de acuerdo al siguiente detalle:

- Muestra 1: 56 probetas de 2" x 3" x 2 metros de largo.
- Muestra 2: 50 probetas de 2" x 5" x 3,2 metros de largo.
- Muestra 3: 50 probetas de 2" x 4" x 2,5 metros de largo.
- Muestra 4: 50 probetas de 2" x 6" x 3,2 metros de largo.
- Muestra 5: 50 probetas de 3" x 6" x 3,2 metros de largo.

### 2.2.2 Resistencia al aplastamiento y capacidad portante de uniones tipo clavija

La determinación de la tensión de aplastamiento para perno rígido se realizó de acuerdo a las especificaciones de la Norma EN 383. Se ensayaron 54 juegos de probetas tanto para la determinación paralela a la fibra como para la perpendicular. Las probetas tenían 36 mm de espesor y se utilizó un perno de 12 mm de diámetro, estableciendo una relación de esbeltez de 3 (perno rígido), el resto de las dimensiones se ajustaron a las prescripciones de la Norma. También se ensayaron 54 juegos de probetas para cada dirección y para pernos de 5mm y 7 mm de diámetro y el mismo espesor de probeta, es decir que no podían considerarse como rígidos. Este ensayo se realizó siguiendo las prescripciones de la Norma EN 26891. En la figura 4 se muestran 2 probetas, una para cada dirección, después de ser ensayadas con el perno de 12 mm.



Figura 4. Probetas ensayadas con perno de 12 mm.

### 2.2.3. Resistencia a la extracción de clavos y tornillos

El procedimiento de ensayo se ajustó a lo indicado en la Norma IRAM 9592, que resulta similar al descrito por la Norma EN 1382, utilizando 25 probetas para la extracción de 6 tornillos, dos para la dirección radial, dos para la tangencial y dos para la axial y 25 probetas para extracción de 6 clavos dispuestos de igual manera.

Se emplearon clavos de acero con punta diamante de 50 mm de longitud y 2,5 mm de diámetro y tornillos de 3,35 mm de diámetro de caña, 2,80 mm de diámetro de núcleo y con una longitud de rosca de 68 mm. Las probetas con dimensiones de 150x50x50 mm, fueron cortadas y cepilladas en el laboratorio. La mayor dimensión de la probeta corresponde a la dirección paralela a la fibra, quedando las otras caras tangenciales y radiales. Previa a la colocación de los clavos, se realizó un pretaladrado de 2,25 mm de diámetro y 32 mm de profundidad; en el caso de los tornillos el diámetro de pretaladrado fue de 2,75 mm. En ambos casos fueron introducidos 32 mm en la probeta. La figura 5a presenta el dispositivo para la extracción de clavos y tornillos y en la figura 5b se ilustra la disposición de los elementos por cara.

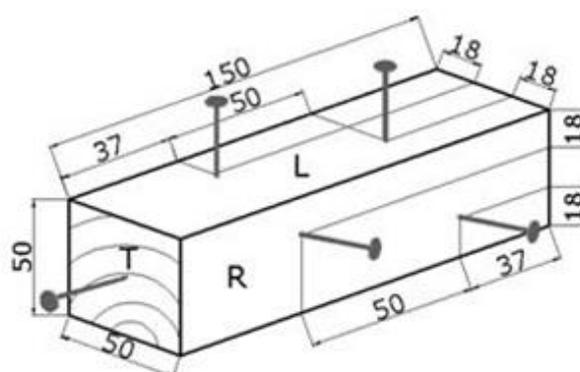


Figura 5. a) Dispositivo para la extracción, b) Disposición de los clavos y tornillos.

### 2.2.4. Durabilidad

Se determinó la durabilidad natural por evaluación en un campo de ensayo ubicado en el sur de la Provincia de Santa Fe (Argentina). Seleccionando 20 piquetes con distinta ubicación dentro de la troza y ante la imposibilidad de distinguir entre albura y duramen se tomaron piquetes de la zona central (madera juvenil), zona intermedia y zona exterior. Como piquetes de referencia se incluyen 5 estacas de *Fangus sylvatica* L. (Haya). Las dimensiones de los piquetes, la instalación del campo y la interpretación de los resultados se realizaron de acuerdo a las prescripciones de las normas EN 252, EN 350-1 y EN 350-2. Las estacas se implantaron durante el mes de octubre del año 2005 se revisaron anualmente asignándoles en cada oportunidad un grado de ataque. Las figuras 6a, 6b y 6c presentan los piquetes luego de ser extraídos del campo de ensayo y en la figura 6d se observa el campo de ensayo completo.



Figura 6. Ensayo en campo de estacas

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1. Resistencia a Flexión y Módulo de Elasticidad Longitudinal.

Cuando se determinan las propiedades mecánicas de la madera y se evalúan los resultados de los ensayos de la muestra completa surge una enorme dispersión de resultados y la determinación de la resistencia característica (percentil 5%) presenta valores muy bajos.

Con el objetivo de mejorar los valores se plantea la clasificación de la madera considerando los defectos que alteran las propiedades mecánicas. La presencia de nudos es una causa importante en la pérdida de resistencia al igual que la existencia de médula. Para establecer los límites entre clases se adoptan valores máximos que permitan obtener mejorías sensibles en los valores característicos y un importante porcentaje de piezas en las clases superiores. El gráfico de la figura 7 muestra la importancia de la clasificación visual y su impacto en los valores característicos y medios de la población total y de la misma separada en tres clases resistentes. El gráfico construido para tensiones muestra claramente como la curva de frecuencias de las probetas que califican para la clase 1 se desplaza hacia la derecha. El área delimitada por cada curva nos indica en número de probetas que clasifica en cada clase y podemos apreciar una interesante población en la clase 1, una gran población en la clase 2 y pocas probetas en la clase 3. Como la clase 3 es la que no tendría uso estructural observamos que el método de clasificación incluye a la mayoría de los elementos.

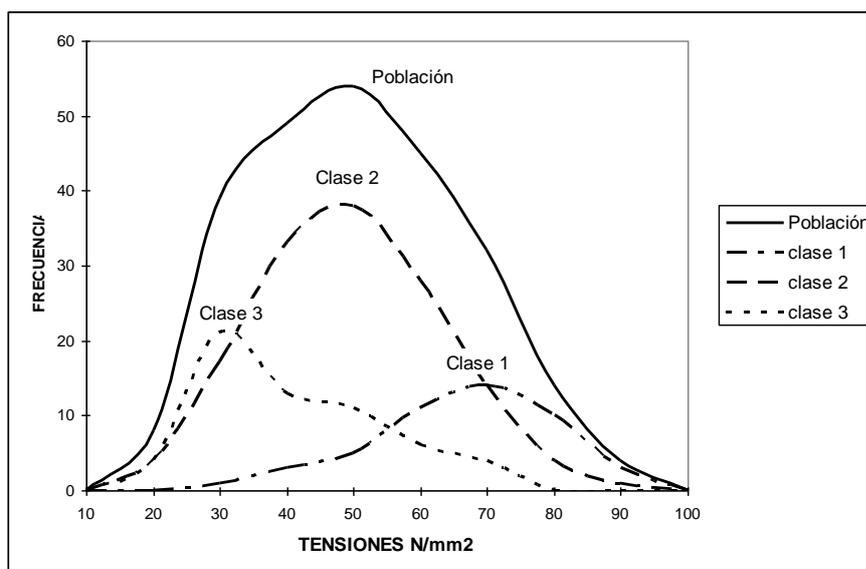


Figura 7. Gráfico de frecuencias de la resistencia a flexión.

Es numerosa la bibliografía que despliega información sobre el comportamiento de la nudosidad, destacando:

*“La presencia de nudos disminuye de forma notable la resistencia de la madera, sobre todo a los esfuerzos de tracción y flexión, haciendo el efecto que si de un agujero de la madera se tratara. La posición del nudo en la pieza también influye en pérdida de resistencia”* (Vignote Peña S. et al 2000)

*“Evaluar a los nudos como vacíos, para determinar los momentos de inercia, representa acertadamente el comportamiento observado en los ensayos realizados”* (Guillaumet et al 2008)

El comportamiento del nudo como vacío no solo genera la pérdida de sección y de inercia sino que como su distribución es aleatoria en la sección, en general no simétrica, produce un giro en los ejes principales de inercia y transforma en flexión oblicua la sollicitación de flexión recta que existe si se considera la sección completa.

Aplicando el método de los elementos finitos para determinar tensiones en vigas de madera aserrada y considerando a los nudos como vacíos se observaron resultados similares a los experimentales. “Con los resultados obtenidos numéricamente, se confirma que los valores propuestos en la clasificación visual resistente considerando sección bruta, son perfectamente compatibles con las tensiones reales alcanzadas considerando secciones netas, por lo que el método de clasificación resulta confiable y práctico para su utilización en el cálculo de estructuras” (Diab et al 2009).

La existencia de médula y madera juvenil conforman de igual manera un defecto que afecta la resistencia. “Se puede apreciar que el MOR (Módulo de resistencia a la flexión) de las probetas sin médula es un 33 % mayor que las que si la presentan, mientras que el MOE (Módulo de elasticidad) es un 12 % mayor y la densidad característica un 7 %. Esta evaluación permite asumir que la presencia de médula tiene un importante impacto en el MOR y que es un parámetro que debe ser tenido en cuenta al proponer una separación en clases resistentes.” (Guillaumet et al 2007).

La norma IRAM 9662-1 propone un método para clasificar tablas de *Araucaria angustifolia* destinadas a la fabricación de vigas laminadas encoladas. Aplica un criterio muy restrictivo, basado fundamentalmente en la durabilidad, no admitiendo médula en las dos clases propuestas y cobrando fundamental importancia la magnitud de la nudosidad. Los límites para fijar las clases se aprecian en la tabla 1.

Tabla 1. Pautas para la clasificación visual de tablas. IRAM 9662-1

Defecto		Unidad	Clase 1	Clase 2	Determinación
Médula		–	No se admite		5.1
Nudosidad		cm/cm	Menor o igual a 1/3	Menor o igual a 2/3	5.2
Dirección de las fibras		cm/cm	Desviación menor que 1:12	Desviación menor que 1:7.	5.3
Densidad		kg/m <sup>3</sup>	No se aceptan piezas con densidad excepcionalmente baja (ver valor característico en Anexo B)		5.4
Fisuras	No pasantes	m	El largo de las fisuras no pasantes no debe ser mayor que 1,0 m ni que 1/4 del largo de la pieza.	El largo de las fisuras no pasantes no debe ser mayor que 1,50 m ni que 1/2 del largo de la pieza.	5.5
	Pasantes	m	Las fisuras pasantes solo se permiten en los extremos y su largo no debe ser mayor que el ancho de la tabla.	El largo de las fisuras pasantes no debe ser mayor que 1,0 m ni que 1/4 de la longitud de la pieza. En los extremos, su largo no debe ser mayor que 2 veces el ancho de la tabla.	
Combado y encorvado		mm	Menor que 8	Menor que 12	5.6.1
Revirado		mm/mm	Menor que 1 mm por cada 25 mm de ancho.	Menor que 2 mm por cada 25 mm de ancho.	5.6.2
Abarquillado		–	Sin restricciones para el abarquillado		5.6.3
Arista faltante		mm/mm	Transversalmente menor que 1/4 de la cara o canto donde aparece. Sin restricciones para el largo	Transversalmente menor que 1/3 de la cara o canto donde aparece. Sin restricciones para el largo	5.7
Ataques biológicos		–	No se admiten zonas atacadas por hongos causantes de pudrición. Se admiten zonas atacadas por hongos cromógenos. Se admiten orificios causados por insectos con diámetro inferior a 2 mm		5.8
Madera de reacción		mm/mm	Menor o igual que 1/5.	Menor o igual que 3/5.	5.9
Otros		–	Daños mecánicos, depósitos de resina y otros defectos se limitan por analogía con alguna característica similar.		5.10

Con la clasificación realizada de acuerdo a los criterios expuestos las tablas de *Araucaria angustifolia* presentan los valores resistentes de la tabla 2

Tabla 2: Propiedades resistentes de las tablas. IRAM 9662-1

Clase de resistencia	Resistencia a la flexión <sup>(1)</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	Resistencia a la tracción <sup>(2)</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad <sup>(3)</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	Densidad <sup>(4)</sup> (kg/m <sup>3</sup> )
1	30,0	18,0	17 000	460
2	14,0	8,0	11 500	400

El criterio expuesto de no admitir médula en la clase 2, resulta muy restrictivo para vigas aserradas ya que por las escuadrías de las mismas y el tamaño de los árboles la médula aparece en un número importante de piezas. Resulta apropiado utilizar la tabla 3, propuesta en el trabajo “Clasificación visual resistente de la *Araucaria angustifolia* procedente de Eldorado, Misiones, Argentina” (Guillaumet et al 2007), para realizar la clasificación visual de las vigas aserradas de *Araucaria angustifolia*.

Tabla 3: Pautas para la clasificación visual de vigas aserradas

DEFECTOS ADMISIBLES	CLASE RESISTENTE		
	Clase 1	Clase 2	Clase 3
Médula	No se admite	Se admite	Se admite
Nudo o Grupo de Nudos (1)	Menor al 40%	Menor al 60%	Mayor al 60%
Longitud máxima de fisura que no atraviesan la pieza (2)	Se admiten fisuras con una profundidad menor al 50 % del grosor de la pieza		
	Se admite hasta 1 metro o 1/4 de la longitud de la pieza, lo que resulte menor		Se admite hasta 1,5 metro o 1/2 de la longitud de la pieza, lo que resulte menor
Longitud máxima de fisura que no atraviesan la pieza (2)	Solo se admiten en los extremos de la pieza y con una longitud menor a la anchura de la misma		Se admite hasta 1 metro o 1/4 de la longitud pieza, lo que resulte menor. En los extremos de la pieza se admiten con longitud menor a 2 veces la anchura de la pieza
Deformación previa de curvatura longitudinal de cara	10 mm / 2000 mm		20 mm / 2000 mm
Deformación previa de curvatura longitudinal de canto	8 mm / 2000 mm		12 mm / 2000 mm
Deformación previa de alabeo	1 mm / 25 mm de anchura		2 mm / 25 mm de anchura
Deformación previa de curvatura transversal	Sin restricciones		
Ataque activo de insecto	No se admite		
Arista faltante	No debe reducir la anchura ni el grosor a menos de 2/3 de su dimensión básica.		

(1) En porcentaje de la dimensión que ocupa en la cara donde se manifiesta

(2) Los límites establecidos se refieren a la suma de las fisuras que presenta la viga.

Clasificando de acuerdo a los criterios de la tabla 3 se obtienen, para las propiedades mecánicas, los valores expuestos en la tabla 4.

Tabla 4: propiedades mecánicas para las vigas aserradas

		CLASE 1	CLASE 2	CLASE 3
<b>PROPIEDADES RESISTENTES en N/mm<sup>2</sup></b>				
Flexión (1)	$f_{m,k}$	43,60	24,32	20,06
Tracción paralela (2)	$f_{t,0,k}$	26,16	14,59	12,04
Tracción perpendicular (2)	$f_{t,90,k}$	0,44	0,39	0,39
Compresión paralela (2)	$f_{c,0,k}$	27,34	21,02	19,28
Compresión perpendicular (2)	$f_{c,90,k}$	6,64	5,85	5,81
Cortante (2)	$f_{v,k}$	4,10	2,57	2,20
<b>PROPIEDADES DE RIGIDEZ en kN/mm<sup>2</sup></b>				
Módulo de Elasticidad paralelo medio (1)	$E_{0,medio}$	15,51	13,28	11,63
Módulo de Elasticidad paralelo 5º percentil (1)	$E_{0,05}$	10,39	8,89	7,79
Módulo de Elasticidad perpendicular medio (2)	$E_{90,medio}$	0,52	0,44	0,39
Módulo cortante medio (2)	$G_{medio}$	0,97	0,83	0,73
<b>DENSIDAD (Humedad 12%) en Kg/m<sup>3</sup></b>				
Densidad (1)	$\rho_k$	443	390	387
Densidad media (1)	$\rho_{medio}$	529	483	472
(1) Valores obtenidos directamente de los ensayos (2) Valores obtenidos de acuerdo a las prescripciones de la Norma UNE:EN 384:1995				
<b>CLASE RESISTENTE SEGUN UNE-EN 338:1995</b>		<b>C40</b>	<b>C24</b>	<b>C18</b>

Se debe aclarar que el trabajo experimental se realizó sobre 256 probetas de 5 escuadrías distintas, y consistió en ensayos a flexión de acuerdo a la Norma EN 408 determinando la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad local en flexión. El resto de los parámetros se determinaron aplicando las relaciones establecidas en la Norma EN 384.

Analizando las dos propuestas de clasificación se aprecia que la correspondiente a vigas aserradas resulta menos restrictiva, con mayores valores de resistencia a flexión y con un valor ligeramente inferior de módulo de elasticidad para la Clase 1. Es razonable mantener los dos criterios, el primero para tablas destinadas a la ejecución de vigas laminadas y el segundo para vigas aserradas.

### 3.2. Resistencia al aplastamiento y capacidad portante de las uniones tipo clavija

Es imprescindible para mantener la seguridad estructural realizar un correcto diseño de las uniones y considerar tensiones de aplastamiento confiables.

Para uniones con perno rígido de 12 mm se alcanzaron los valores de resistencia característica al aplastamiento presentados en la tabla 5 (Guillaumet et al 2010). En ella se transcriben, para igual diámetro y la misma gravedad específica anhidra, los valores propuestos por las National Design Specification for Wood Construction (NDS 2005), adoptados por el Proyecto de Reglamento Argentino de Estructuras de Madera (CIRSOC 601), actualmente en discusión pública. Como los ensayos se realizaron en 5 minutos, a los efectos de comparar con los valores de las NDS, se los divide por un factor de duración de la carga de 1,6 que de acuerdo a dicha norma ajusta sus valores de carga normal, 10 años, a una carga de 10 minutos.

Tabla 5. Resistencia al aplastamiento para pernos de 12 mm.

RESISTENCIA AL APLASTAMIENTO	$\gamma - 12\%$	$\gamma - 00\%$	$f_h 12 //$	$f_h 12 \perp$
	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
Experimental con clavija de 12 mm (10 minutos)	401,15	371,00	38,51	20,33
Experimental con clavija de 12 mm (10 años)			24,07	12,71
NDS 2005 para clavija de 12 mm		370,00	28,60	14,58

Se puede observar que los valores experimentales son inferiores a los propuestos por la Norma, con una diferencia de hasta un 19% para el perno de 12 mm.

Para analizar el comportamiento de los diámetros 5 mm. y 7 mm. se trabajó con la resistencia de la unión porque el comportamiento de los pernos no podía considerarse rígido de acuerdo a las prescripciones de la EN 383. Se comparó la carga experimental con la determinada considerando el modo de rotura y las tensiones de aplastamiento explicitadas en las National Design Specification for Wood Construction (NDS 2005). Los valores utilizados de tensión de aplastamiento de acuerdo a las NDS, para una gravedad específica anhidra de 0,37, se presentan en la tabla 6.

Tabla 6. Resistencia al aplastamiento según las NDS 2005

RESISTENCIA AL APLASTAMIENTO NDS 2005	$\gamma - 12\%$	$\gamma - 00\%$	$f_h //$	$f_h \perp$
	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
Para clavija de 12 mm	400,00	370,00	28,60	14,58
Para clavija de 7 mm		370,00	28,60	19,51
Para clavija de 5mm		370,00	18,30	18,30

En todos los casos para determinar la resistencia de la unión de se consideró el valor que surge de la aplicación de las especificaciones de las NDS 2005 antes de la aplicación del coeficiente de reducción Rd. Se observa que los valores calculados según las NDS 2005 son más altos que los experimentales, salvo para el perno de 5 mm en la dirección paralela a las fibras. Esta situación remarca que la tensión de aplastamiento en función de la gravedad específica anhidra debe considerarse como indicativa y utilizarse criteriosamente pero solo ante la falta de datos experimentales confiables. La tabla 7 presenta los valores obtenidos.

Tabla 7: Comparación entre los valores de resistencia experimentales y según las NDS

RESISTENCIA DE LA UNION	$\gamma - 00\%$	NDS 2005 (previo a la aplicación del coeficiente de reducción Rd)		EXPERIMENTAL (afectado por un coeficiente de 1,6 por duración de la carga)		RELACION NDS / EXP	
		Z //	Z $\perp$	Z //	Z $\perp$	//	$\perp$
	Kg/m <sup>3</sup>	N	N	N	N	N	N
Para clavija de 12 mm	370,00	12.355,00	6.298,00	10.398,13	5.488,75	1,19	1,15
Para clavija de 7 mm	370,00	7.207,00	4.916,00	6.080,00	4.327,50	1,19	1,14
Para clavija de 5mm	370,00	3.294,00	3.294,00	3.754,38	3.151,88	0,88	1,05

(1) Valores previos a la aplicación del coeficiente de reducción

El trabajo “Comportamiento de uniones tipo clavija con pernos deformables en madera de *Araucaria angustifolia*” (Guillaumet et al 2011) muestra una comparación entre los valores experimentales, los determinados por las NDS 2005 y el Eurocódigo 5, donde se aprecia la aplicación de las expresiones de ambos códigos.

### 3.3. Resistencia al arrancamiento de clavos y tornillos

En la tabla 8 se reproducen los valores de fuerza característica de arrancamiento obtenidos en el trabajo “Resistencia a la extracción de clavos y tornillos en madera de Pino Paraná” (Filipetti et al 2010).

Tabla 8. Valores de resistencia a la extracción de clavos y tornillos

Araucaria angustifolia			
Parámetro	Unidad	Clavos	Tornillos
Diámetro	mm	2,5	3,35
longitud insertada	mm	32	32
Fuerza arrancamiento	N	420	1520
Fuerza arrancamiento por unidad de penetración	N/mm	13,125	47,5

Si se compara estos valores con los obtenidos por Calvo et al (2002) para el Eucaliptus grandis de la Mesopotamia Argentina, se aprecia que el Pino Paraná presenta una fuerza de

arrancamiento similar tanto para clavos y tornillos, para el arrancamiento de tornillos en Pino eliotti - tadea se aprecian valores inferiores. Corresponde aclarar que los valores mencionados son para la dirección perpendicular a las fibras, en el caso que el proyectista desee colocar elementos sometidos a esfuerzo de extracción en la dirección paralela a las fibras deberá adoptar la tensión y coeficiente que considere seguros.

### 3.4. Durabilidad

Al proyectar una estructura se debe tener en cuenta la durabilidad de acuerdo al uso y el mantenimiento que se debe realizar para que sus características perduren a través del tiempo.

La norma EN 350-2 indica que la *Araucaria angustifolia* con origen en Brasil posee una durabilidad natural de grado 4-5, es decir no durable o poco durable, esta clasificación resulta una desventaja a la hora de optar por la especie en la construcción de estructuras, pero en el estudio realizado por Guillaumet et al (2009) mediante campo de estacas, la especie con origen en el Eldorado, Provincia de Misiones, Argentina, presentó una durabilidad clase 3 (medianamente durable). Esta diferencia implica la posibilidad de extender su utilización sin necesidad de tratamiento protector para clases de riesgo más exigentes. Los detalles de las clases de riesgo se las encuentra en las Normas EN 335-1 y EN 335-2. Se define como clase de riesgo 1 cuando la madera se encuentra bajo cubierta en ambiente seco, clase de riesgo 2 bajo cubierta en ambiente húmedo, clase de riesgo 3 expuesta sin contacto con el suelo, clase de riesgo 4 en contacto con el suelo o agua dulce y clase de riesgo 5 en contacto con agua salada.

Una vez tipificada la clase de riesgo, a través de las Normas EN 460 y la EN 599, se establece el uso de protectores y la prestación mínima de cada uno de ellos. En particular, para la acción de hongos xilófagos, y en las clases de riesgo 1 y 2 no habría necesidad de su aplicación, para la clase de riesgo 3 debe evaluarse la permeabilidad de la madera y para las clases de riesgo 4 y 5 debe utilizarse protectores. También tiene que analizarse la acción de coleópteros y termitas.

## 4. CONCLUSIONES

La *Araucaria angustifolia* procedente de bosques implantados en la Provincia de Misiones, Argentina, presenta características resistentes importantes en relación a su peso. Para ser utilizada como madera aserrada en pequeñas escuadrías es de suma importancia realizar la clasificación visual por los defectos que presenta. Para estructuras de grandes luces se emplea madera laminada encolada, donde no solo es relevante la clasificación visual de las tablas, sino también respetar las condiciones de fabricación y control de calidad.

Las uniones constituyen un punto crítico ya que pueden provocar desde importantes deformaciones no deseadas hasta el colapso de la estructura. Al seleccionar los valores de resistencia al aplastamiento, se deberían utilizar los que surgen de trabajos experimentales por especie y lugar de procedencia. Ante la falta de esta información pueden aplicarse los valores indicados por las NDS en función de la gravedad específica anhidra con las debidas precauciones, ya que en particular para esta especie nos conducen a un subdimensionamiento.

La durabilidad natural de esta madera permite realizar obras bajo cubierta sin una protección especial, lo que la hace apta para la mayoría de los edificios.

En síntesis los elementos estructurales de *Araucaria angustifolia*, tanto de madera aserrada como laminada encolada, son una alternativa a la hora de proyectar edificios para obras de infraestructura urbana.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Libros

Vignote Peña S. et al. (2000) Tecnología de la madera en la construcción arquitectónica. Editorial Mundi-Prensa. España.

#### Congresos y conferencias

- Calvo FC et al (2002). Resistencia a la extracción de clavos y tornillos en la madera de Eucalipto grandis y Pino elliotti/taeda de la Provincia de Entre Rios Argentina. VIII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira Uberlândia. Brasil
- Diab J. et al (2009). Simulación numérica del comportamiento estructural de vigas de *Araucaria angustifolia* (Pino paraná). XVIII congreso sobre métodos numéricos y sus aplicaciones ENIF 2009. Tandil. Argentina.
- Filippetti M.C. et al. (2010). Resistencia a la extracción de clavos y tornillos en madera de Pino Paraná. XIV Jornadas Forestales y Ambientales de Eldorado. Eldorado, Misiones, Argentina
- Guillaumet A.A. et al. (2007). Clasificación visual resistentes de la *Araucaria Angustifolia* procedente de Eldorado, Misiones, Argentina. III Congreso Iberoamericano de productos forestales. Buenos Aires. Argentina.
- Guillaumet A.A. et al. (2008). Relación entre la nudosidad y las características resistentes de la *Araucaria angustifolia* (Pino Paraná). XX Jornadas de Ingeniería Estructural. Buenos Aires. Argentina.
- Guillaumet A.A. et al. (2009). Durabilidad natural de la *Araucaria angustifolia* expuesta al clima de la Pampa Húmeda Argentina (Poster). XIII Congreso Forestal Mundial. Buenos Aires. Argentina.
- Guillaumet A.A. et al. (2010). Tensiones de aplastamiento en uniones tipo clavija en madera de *Araucaria angustifolia*. XXXIV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. San Juan. Argentina
- Guillaumet A.A. et al. (2011). Comportamiento de uniones tipo clavija con pernos deformables en madera de *Araucaria angustifolia*. 1er Congreso Ibero-Latinoamericano de la Madera en la Construcción. CIMAD 11. Coimbra. Portugal.

#### Códigos Normativos

- Agencia Española de Normalización y Certificación. (1993). Ensayo de campo para determinar la eficiencia relativa de un protector de madera en contacto con el suelo. EN 252-1:1991. Madrid.
- Agencia Española de Normalización y Certificación. (1993). ). Durabilidad de la madera y de sus materiales derivados. Definición de las clases de riesgo de ataque biológico. Parte 1. EN 335-1:1992. Madrid.
- Agencia Española de Normalización y Certificación. (1994). ). Durabilidad de la madera y de sus materiales derivados. Definición de las clases de riesgo de ataque biológico. Parte 2 EN 335-2:1992. Madrid.
- Agencia Española de Normalización y Certificación. (1998). Determinación de la resistencia al aplastamiento y módulo de aplastamiento para elementos de fijación tipo clavija. EN 383:1995. Madrid.
- Agencia Española de Normalización y Certificación. (2010). Determinación de los valores característicos de las propiedades y la densidad. EN 384:2010. Madrid.
- Agencia Española de Normalización y Certificación. (1995). Durabilidad de la madera y de los materiales derivados de la madera. Durabilidad natural de madera maciza. Parte 1. EN 350-1:1994. Madrid.
- Agencia Española de Normalización y Certificación. (1995). Durabilidad de la madera y de los materiales derivados de la madera. Durabilidad natural de madera maciza. Parte 2. EN 350-2:1994. Madrid.
- Agencia Española de Normalización y Certificación. (2004). Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. EN 408:2004. Madrid.
- Agencia Española de Normalización y Certificación. (1994). ). Durabilidad de la madera y de los materiales derivados de la madera. Durabilidad natural de la madera maciza. Guía de

especificaciones de durabilidad natural de la madera para su utilización según las clases de riesgo. EN 460:1994. Madrid.

Agencia Española de Normalización y Certificación. (1994). ). Durabilidad de la madera y de los materiales derivados de la madera. Prestaciones de los protectores de la madera determinadas mediante ensayos biológicos. Parte 1. Especificaciones para las distintas clase de riesgo. EN 599:1994. Madrid.

Agencia Española de Normalización y Certificación. (1997). Eurocódigo 5. Proyecto de Estructuras de Madera. UNE-ENV 1995. Madrid.

Agencia Española de Normalización y Certificación. (1997). Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de singularidades. EN 1310:1997. Madrid.

Agencia Española de Normalización y Certificación. (2000). Resistencia al arranque de los elementos de fijación en la madera. EN 1382:2000. Madrid.

American Forest & Paper Association. American Wood Council. (2005) National Design Specification for Wood Construction. Washington DC. USA

Comité Europeo de Normalización. (1991). Uniones realizadas con elementos de fijación mecánicos. EN 26891:1991. Bruselas.

Deutsches Institut Für Normung (2005) Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten. Teil 1-1: Allgemeines. Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1995-1-1:2004. Berlín

Deutsches Institut Für Normung. (2007). Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit und Bettungswerte für stiftförmige Verbindungsmittel. DIN EN 383:2007. Berlín.

European Comité for Standardization (2010). Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties. EN 408:2010. Brussels

Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad en Obras Civiles. (2011). Reglamento Argentino de Estructuras de Madera (en etapa de discusión pública). CIRSOC 601. Buenos Aires

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2005). Madera laminada encolada structural. Clasificación visual de las tablas por Resistencia. Parte 1: Tablas de pino Paraná (*Araucaria angustifolia*). IRAM 9662-1. Buenos Aires.