

EVALUACIÓN DE LAS DEFORMACIONES DIFERIDAS EN PIEZAS ESTRUCTURALES DE PINO RESINOSO CULTIVADO EN EL NORDESTE DE ARGENTINA

CREEP EVALUATION IN STRUCTURAL TIMBER OF ARGENTINEAN RESINOUS PINE

Pamela Y. Fank ⁽¹⁾, Rocío Ramos ⁽²⁾, Pablo M. Stefani ⁽³⁾, Juan C. Piter ⁽⁴⁾ (P)

(1) Ing. Civil, Becaria doctoral CONICET, Depto. de Ing. Civil – Facultad Regional Concepción del Uruguay - Universidad Tecnológica Nacional, Concepción del Uruguay – Entre Ríos – Argentina.

(2) Ing. Civil, Investigadora, GEMA - Depto. de Ingeniería Civil - Facultad Regional Concepción del Uruguay - Universidad Tecnológica Nacional, Concepción del Uruguay – Entre Ríos – Argentina.

(3) Dr., Investigador, ECOMATERIALES-INTEMA-CONICET - Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional Mar del Plata, Mar del Plata – Buenos Aires – Argentina.

(4) Dr., Investigador, GEMA - Depto. de Ingeniería Civil - Facultad Regional Concepción del Uruguay - Universidad Tecnológica Nacional, Concepción del Uruguay – Entre Ríos – Argentina.

Dirección para contacto: pamela_fank@yahoo.com.ar; (P) Presentador

Código de identificación: T3-08

Resumen

En este trabajo se presentan y discuten los resultados obtenidos de un proyecto orientado a investigar la deformación diferida en vigas aserradas de pino resinoso cultivado en el nordeste de Argentina. El programa experimental involucró 14 vigas cargadas en estado seco en un ambiente cerrado, 7 de *Pinus taeda* e igual cantidad de *Pinus elliottii*, todas con sección transversal nominal de 45 mm x 100 mm y separación entre apoyos igual a 2,5 m. Cada viga fue sometida a una carga puntual de 641 N. Los resultados mostraron que la deformación relativa obtenida experimentalmente es congruente con el valor calculado aplicando el criterio del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera para vigas sometidas a cargas de larga duración y ubicadas en ambiente interior no ventilado. La comparación entre los resultados promedio de las vigas de *P. taeda* y de *P. elliottii* probó que la diferencia entre el comportamiento de ambas especies puede ignorarse para propósitos vinculados al diseño estructural. Considerando que la presencia de médula afecta significativamente el comportamiento mecánico de este material, se compararon las deformaciones de las piezas con médula y las libres de ella, obteniéndose diferencias sin relevancia para fines prácticos.

Palabras clave: *Pinus taeda*; *Pinus elliottii*; flexión estática

Abstract

This paper reports the results of an investigation regarding the analysis of deflections in sawn timber beams of resinous pine grown in the Northeast of Argentina. The empirical project enclosed 14 dried beams loaded in indoor climate, 7 pieces of Pinus taeda and the same amount of Pinus elliottii, all of them with nominal cross-section sizes of 45 mm x 100 mm and a span length of 2.5 m. On each beam, a concentrated-load of 641N was applied. The results showed that the relative deflections obtained experimentally are congruent to the value calculated by applying the Argentinean design rules for wood construction for beams subjected to long-term loading and located in indoor climate. The comparison between P. taeda and P. elliottii creep results proved that the difference between both species behavior could be ignored for structural design purposes. Taking into account that the presence of pith significantly affects the mechanical behavior of this material, the deflections for beams with pith and free of it were compared, whose results haveshown negligible differences for practical purposes.

Keywords: *Pinus taeda*; *Pinus elliottii*; static bending

1. INTRODUCCIÓN

La superficie de bosques cultivados en Argentina alcanza aproximadamente 1,12 millones de hectáreas de las cuales el 59 % está constituido por plantaciones de coníferas, el 25 % por eucaliptos, el 10 % por salicáceas y el 6 % restante por otras de menor entidad (FAO) ^[1]. La región de la Mesopotamia, integrada por las provincias de Misiones, Corrientes y Entre Ríos, contiene más de la mitad de las plantaciones implantadas de este país. Un análisis detallado de la distribución regional de los bosques de coníferas indica que el 83 % del total nacional se ubica en las provincias de Misiones y Corrientes. La primera reúne más del 50 % de dichas plantaciones -equivalente a unas 300.000 hectáreas- destacándose principalmente los pinos resinosos de las especies *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* (SIFIP) ^[2], las que proveen la mayor parte de la madera aserrada destinada a fines estructurales en el país.

Al abordar el diseño de una viga de madera se deben satisfacer dos requerimientos esenciales, uno referido a las condiciones de seguridad y otro a las de servicio. El primero se encuentra relacionado con la capacidad portante del elemento estructural y, el segundo, con el adecuado funcionamiento de éste durante la vida útil de la estructura, vinculándose directamente con la deformación que dicho elemento exhibe al ser sometido a cargas con diferente tiempo de duración (Coronel 1996^[3], Thelandersson 1995 ^[4]). La deformación final que experimenta el elemento estructural al cabo de un cierto período de tiempo se compone por una deformación elástica instantánea -vinculada con la rigidez de la madera- y por una deformación diferida que varía en función del tiempo. Ésta última es conocida como creep y se origina por diversos fenómenos que se dividen en dos categorías: los mecano-sortivos y los viscoelásticos (Nordström y Sandberg 1994)^[4].

El creep mecano-sortivo es aquel que se produce debido al cambio en el contenido de humedad del material mientras éste se encuentra sometido a una carga permanente (Nordström y Sandberg 1994) ^[5]. La madera, al ser un material higroscópico capaz de intercambiar humedad con el medio ambiente, es especialmente afectada por este fenómeno (Ranta-Maunus 1995) ^[6], produciéndose un aumento de la deformación con la desorción y una disminución de ésta con la absorción (Nordström y Sandberg 1994) ^[5]. Al analizar la deflexión en piezas de secciones transversales grandes, en general ésta no es afectada cuando el ciclo de humedad es corto (variaciones diarias o semanales del clima), sin embargo, adquiere gran importancia cuando el ciclo climático es anual, particularmente en presencia de excepcionales temporadas secas y húmedas consecutivas (Ranta-Maunus 1995) ^[6].

La deformación viscoelástica, por su parte, es aquella que se produce en una pieza debido a la permanencia de la carga y, tanto la intensidad de la ésta, como el contenido de humedad del material y, en menor proporción, la variación de la temperatura en el ambiente, son factores que afectan a dicha deformación (Coronel 1996) ^[3], Nordström y Sandberg 1994) ^[5]). Estudios experimentales han demostrado que a mayor nivel de tensión aplicada corresponde una mayor tasa de crecimiento del creep, alcanzando la falla en un período de tiempo menor. Para niveles de tensión menores al 35 % de la resistencia instantánea, la evolución de las deformaciones en función del tiempo se mantiene estable luego de experimentar un rápido crecimiento inicial (Andriamitantsoa 1995) ^[7]. En cuanto al segundo factor, informes sostienen que el valor del creep es mayor para piezas en estado verde respecto de piezas en estado seco (cuando el contenido de humedad en ésta es invariable) y, que el creep relativo -cociente entre la deformación final y la instantánea-, sin embargo, es prácticamente independiente del tenor de humedad de la madera (Nordström y Sandberg 1994) ^[5]. Respecto a la influencia de la temperatura, puede afirmarse que cuanto mayor es ésta, mayor es la deformación, pero en general su influencia puede despreciarse para temperaturas inferiores a 50 °C. No obstante, en las estructuras convencionales los límites

indicados para la tensión y la temperatura usualmente no suelen ser superados (Andriamitantsoa 1995)^[7].

Diversos proyectos experimentales (Ranta-Maunus 1995^[6], Gowda *et al.* 1996^[8], Shen y Gupta 1997^[9]) han abarcado el estudio de las deformaciones diferidas tanto para pequeñas probetas libres de defectos como para piezas en tamaño estructural. Los resultados pusieron en evidencia diferencias significativas en el comportamiento reológico para ambas categorías. Para piezas en tamaño estructural, el efecto de la inclinación de las fibras junto a la presencia de defectos (nudos, médula, entre otros) puede aumentar el creep. En cambio, en pequeñas probetas –libres de defectos– cobran importancia las variaciones en el contenido de humedad. Considerando que las deformaciones son mayores en dirección perpendicular a las fibras que en dirección paralela a las mismas, experimentalmente resulta más sencillo medir las deflexiones que las pequeñas deformaciones longitudinales que ocurren bajo compresión o tensión. Asimismo, para las condiciones de servicio en las estructuras convencionales resultan más relevantes las deformaciones en los elementos flexionados que en los sometidos a esfuerzo axial. Por estos motivos, la mayoría de las pruebas llevadas a cabo se han realizado en vigas sometidas a esfuerzos de flexión.

Teniendo en cuenta que el creep es normalmente considerado como un incremento en la deflexión de las vigas, las diferentes reglas de diseño de estructuras de madera (CIRSOC 601^[10], EN 1995-1-1^[11], NCh 1198^[12], NDS^[13]) proporcionan un factor para ser multiplicado a la deformación elástica instantánea y poder calcular así la deformación diferida de un modo sencillo (Ranta-Maunus 1995)^[5]. El reglamento Argentino de estructuras de madera CIRSOC 601^[10], en línea con el NDS^[13] de EEUU, adopta un factor de deformación dependiente del tiempo (Kcr), el cual varía en función del tipo de pieza y de su contenido de humedad, así como de las condiciones de servicio a la que la misma será expuesta. Este factor no considera la calidad de la pieza de madera puesto que la misma ya es contemplada en la determinación de la deformación instantánea. Adicionalmente, el CIRSOC 601^[10] establece valores límites –expresados en función de la longitud de la viga– que se deben verificar para el control de las deformaciones, los mismos varían con el destino de la estructura y con los requerimientos del proyecto.

Nordström y Sandberg (1994)^[5] sostienen que las propiedades de la madera contribuyen al fenómeno del creep particularmente por el carácter heterogéneo de este material que deriva de las características de su estructura interna. Por lo tanto, el estudio de las deformaciones adquiere fundamental importancia en aquellas especies de rápido crecimiento donde los árboles son cortados a temprana edad. Esto se debe a que, en general, dicha madera presenta una importante proporción de madera juvenil asociada a la médula del árbol, la que representa una zona débil y fácilmente degradable (Chan Martín *et al.* 2002)^[14]. La madera juvenil se caracteriza por poseer comportamiento mecánico y físico diferente al de la madera madura, brindando usualmente menores valores de resistencia y rigidez como consecuencia de la conformación que adquiere la capa intermedia S2 de la pared secundaria en la estructura celular (Hoffmeyer 1995)^[15], la que está asociada a una mayor inclinación de las micro fibrillas respecto de la madera normal (Cave y Walker 1994^[16], Donaldson 2008^[17], Yin *et al.* 2011^[18]). Este aspecto cobra importancia porque estudios demostraron que las propiedades reológicas de la madera se ven afectadas por el ángulo que presentan las microfibrillas, registrándose un incremento marcado de las deformaciones cuando el ángulo supera los 18 grados de inclinación. En cambio, para valores menores el creep resulta prácticamente independiente de dicha variable (Roszyk, 2010^[19], 2012^[20]).

En nuestro país, los recursos forestales cultivados de mayor importancia comercial para fines estructurales provienen de plantaciones de rápido crecimiento, siendo los más destacados el pino resinoso (*Pinus taeda* y *P. elliottii*) del nordeste junto al *Eucalyptus grandis* procedente de la Mesopotamia. En relación a las deformaciones diferidas, sólo se reportaron estudios sobre madera de *Eucalyptus grandis*, los cuales involucraron el análisis de piezas flexionadas bajo cargas de larga duración y ubicadas en ambiente interior sin climatización, abarcando tanto pequeñas probetas

libres de defectos (Calvo *et al.* 2002^[21]) como piezas en tamaño estructural en estado inicial seco (Piter *et al.* 2006^[22], 2007^[23]) y en estado inicial verde (Torrán *et al.* 2008^[24]). Al considerar el caso particular del pino resinoso se advierte que se han llevado a cabo algunos estudios sobre propiedades físicas y mecánicas (Fank *et al.* 2014^[25] ^[26], IRAM 9662-3^[27] y 9670^[28]), pero ninguno contempla las propiedades reológicas de dicho material. Teniendo en cuenta la importancia comercial de estas especies para fines estructurales y que las mismas se encuentran incluidas en los suplementos del CIRSOC 601^[10], resulta necesario constatar experimentalmente que el criterio adoptado por dicho reglamento para la consideración del creep sea aplicable para el pino resinoso del nordeste.

Este trabajo tiene como objetivo presentar y discutir los resultados de las deformaciones diferidas obtenidas experimentalmente a través del ensayo de vigas en estado seco de madera de pino resinoso (*P. taeda* y *P.elliottii*) cultivado en el nordeste de Argentina, solicitadas a flexión bajo carga de larga duración en condiciones de uso interior. Se analiza la influencia que ejerce la presencia de médula y se compara el comportamiento reológico entre ambas especies. Además, se contrastan los resultados experimentales con los calculados a través del criterio adoptado por la normativa argentina CIRSOC 601^[10] para la consideración del creep.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El material destinado a la investigación empírica estuvo compuesto por 14 piezas de madera aserrada estructural de pino resinoso (7 piezas de *Pinus taeda* y 7 piezas de *P. elliottii*) extraídas de árboles con origen certificado cultivados en la provincia de Misiones. Los de *P. taeda* fueron obtenidos de una plantación de 15 años de edad ubicada en el departamento Montecarlo y los de *P. elliottii* se extrajeron de una forestación de 29 años de edad localizada en el departamento Libertador General San Martín.

Para conformar la muestra destinada a este estudio fueron seleccionadas vigas de diversas calidades que resultaran representativas de la producción actual de madera aserrada de ambas especies, adoptándose una sección nominal de 45 x 100 (mm) por ser una de las más demandadas para fines estructurales en el país.

Una vez registradas las dimensiones reales de cada viga-promedio: 45,6 x 100,2 x 2600 mm- e inmediatamente antes de la disposición definitiva de éstas, se determinaron el contenido de humedad y la densidad de cada una. El primero se obtuvo como el promedio de 6 mediciones (extremos y centro en ambas caras anchas) realizadas con un xilohigrómetro de resistencia eléctrica marca HOLZMEISTER, modelo LG9. El segundo se calculó como la razón entre el peso del cuerpo -determinado con una balanza electrónica- y su volumen.

Para la realización de los ensayos a flexión bajo carga de larga duración las piezas fueron dispuestas en un recinto destinado especialmente para tal fin, situado dentro de las instalaciones de la Facultad Regional Concepción del Uruguay –UTN, reflejando las condiciones normales de uso en ambientes cerrados, sin climatización, para la región de la provincia de Entre Ríos. Como se puede observar en el esquema expuesto en la Figura 1, los cuerpos de prueba fueron sometidos a un ensayo de flexión con una separación entre apoyos igual a 2,50 m y una carga puntual constante de 641 N ubicada en el centro de la pieza, la cual fue aplicada por el término de un año y un mes (392 días).

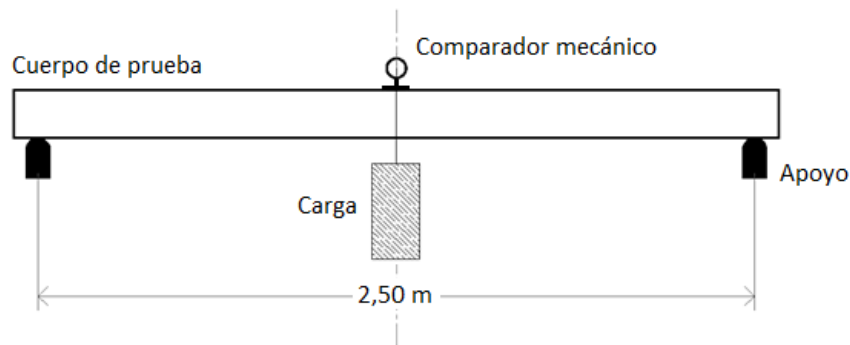


Figura 1. Esquema del dispositivo de carga

El nivel de la carga respondió a condiciones normales de uso en estructuras y fue establecido con el objetivo de lograr una deformación final -con relación a la separación entre apoyos- de 1/240, nivel admitido normalmente en estructuras destinadas para fines comerciales, recreacionales e institucionales (Tabla 3.2.3-1 CIRSOC 601) ^[10]. Como en el presente trabajo se estudiaron vigas de diferentes calidades, para la estimación de la carga aplicada se consideró un módulo de elasticidad en flexión igual 8000 N/mm², valor intermedio entre los establecidos para vigas aserradas de pino resinoso de ambas clases resistentes especificadas en la norma IRAM 9670^[28]. Por otra parte, teniendo en cuenta el esquema estático adoptado (Figura 1), el valor nominal de las cargas y las dimensiones de la sección transversal adoptada, los valores de tensión máximo esperados para cada pieza resultaron comprendidos entre 5,1 N/mm² y 5,3 N/mm², representando aproximadamente el 35 % del 5-percentil de la resistencia en flexión, valor obtenido experimentalmente sobre vigas de las mismas especies y con idénticas dimensiones que las utilizadas en este proyecto (Fank *et al.* 2014)^[26].

La deformación vertical o flecha (Δ) se determinó en el punto central de cada viga utilizando comparadores mecánicos marca Mitutoyo con precisión de 0,01 mm, como se puede apreciar en la Figura 2. La deformación instantánea (Δ_{inst}), ocurrida inicialmente debido a la aplicación de la carga, fue determinada luego de aproximadamente 5 minutos de su aplicación. El valor relativo de la deformación en función del tiempo fue obtenido realizando el cociente entre la deformación total a un tiempo dado y su correspondiente deformación instantánea (Δ/Δ_{inst}).



Figura 2. Medición de la deformación vertical

A mediados del mes de septiembre se dio inicio al ensayo, registrándose los valores de la deformación total -en función del tiempo- a diario durante 3 meses, luego cada dos días hasta completar los 6 meses y, posteriormente, con periodicidad de 2 veces por semana hasta alcanzar 392 días desde el inicio. Simultáneamente durante el transcurso del ensayo se registraron las

condiciones de humedad relativa y temperatura ambiente a través del empleo de un termo-higrómetro digital.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Las deformaciones instantáneas

La Tabla 1 exhibe los principales resultados obtenidos para las deformaciones registradas en el centro de las vigas inmediatamente después de colocadas las cargas (Δ_{inst}). Teniendo en cuenta que se implementó un esquema estático común para toda la muestra y que, tanto la carga como las dimensiones de la sección transversal de las vigas fueron adoptadas con los mismos valores nominales (ver Materiales y Métodos), estos resultados proveen información acerca de la rigidez de las piezas, tanto para la muestra total como en forma discriminada por especie y por calidad de madera. El valor medio de Δ_{inst} en el centro de las vigas para la muestra completa (6,99 mm) representa 1/358 de la luz de cálculo de las vigas (2500 mm), valor congruente con las reglas de diseño vigentes en el país (CIRSOC 2016) ^[10]. Este resultado junto al nivel tensional máximo aplicado, que representa aproximadamente el 35 % del 5-percentil de la resistencia a flexión del material (ver Materiales y Métodos), confirman que el ensayo llevado a cabo es representativo del comportamiento de una estructura real.

Tabla 1: Principales resultados de la deformación inicial (Δ_{inst}) en el centro de las vigas

	Todas (n = 14)	<i>Pinus taeda</i> (n = 7)	<i>Pinus elliottii</i> (n = 7)	Sin médula (n = 9)	Con médula (n = 5)
Mínimo (mm)	4,64	5,26	4,64	4,64	6,15
Medio (mm)	6,99	7,30	6,68	5,75	9,23
Máximo (mm)	14,74	14,74	10,37	7,12	14,74
COV (%)	38	46	30	14	37

La tabla anterior muestra un valor Δ_{inst} medio 9 % mayor –y consecuentemente un módulo de elasticidad medio un 9 % menor- en las vigas de *P. taeda* respecto a las de *P. elliottii*, lo que es consistente con la consideración de ambas especies como un grupo para su utilización estructural en el país (CIRSOC 2016^[10], IRAM 9670 ^[28] y 9662-3 ^[27]). Por su parte, los resultados exhiben un valor Δ_{inst} medio 61 % mayor en las vigas con presencia de médula que en las libres de ella, confirmando también para este caso que la presencia de esta característica afecta significativamente la rigidez del material en estudio, lo que está en línea con el criterio de clasificación por resistencia adoptado en nuestro país por la norma IRAM 9662-3^[27]. La sub-muestra que reúne las vigas de mejor calidad -sin médula- presenta una dispersión de los resultados (COV = 14 %) significativamente menor a las restantes, para las cuales el COV se encuentra entre 30 % y 46 %. Estos valores del COV indican también una alta variabilidad del módulo de elasticidad, la que puede ser explicada por el criterio de selección de las vigas, el cual se orientó en lograr una muestra representativa de la calidad general del material.

3.2 Las deformaciones diferidas

La evolución del valor medio de las deformaciones en el centro de las vigas puede apreciarse en la Figura 3, donde se advierte una tendencia general que es común a la muestra total y a las 4 sub-muestras. Luego de producida la deformación instantánea (Δ_{inst}), las curvas exhiben una pendiente ascendente que se manifiesta en forma muy pronunciada durante los 10 primeros días. Posteriormente el incremento es relativamente moderado y estable en un período que se extiende

aproximadamente hasta los 200 días. Entre los 200 y los 220 días se observa otro aumento muy pronunciado, que luego da lugar a una suave pendiente ascendente hasta los 300 días y continúa prácticamente sin exhibir incrementos hasta el final. La evolución de las deformaciones permiten observar claramente la influencia de los dos componentes que caracterizan a la parte diferida de la deformación (creep): i) el componente viscoelástico, que se manifiesta a través de un incremento progresivo pero cada vez menos acentuado de la deformación y, ii) el componente mecano-sortivo, que expresa una variación adicional de la deformación debido a los cambios cíclicos del contenido de humedad de la madera bajo carga (Honfi 2014^[29], Ranta-Maunus 1995^[6]). No obstante, en el caso investigado un análisis detallado de ambos componentes del creep escapa a los objetivos de este trabajo.

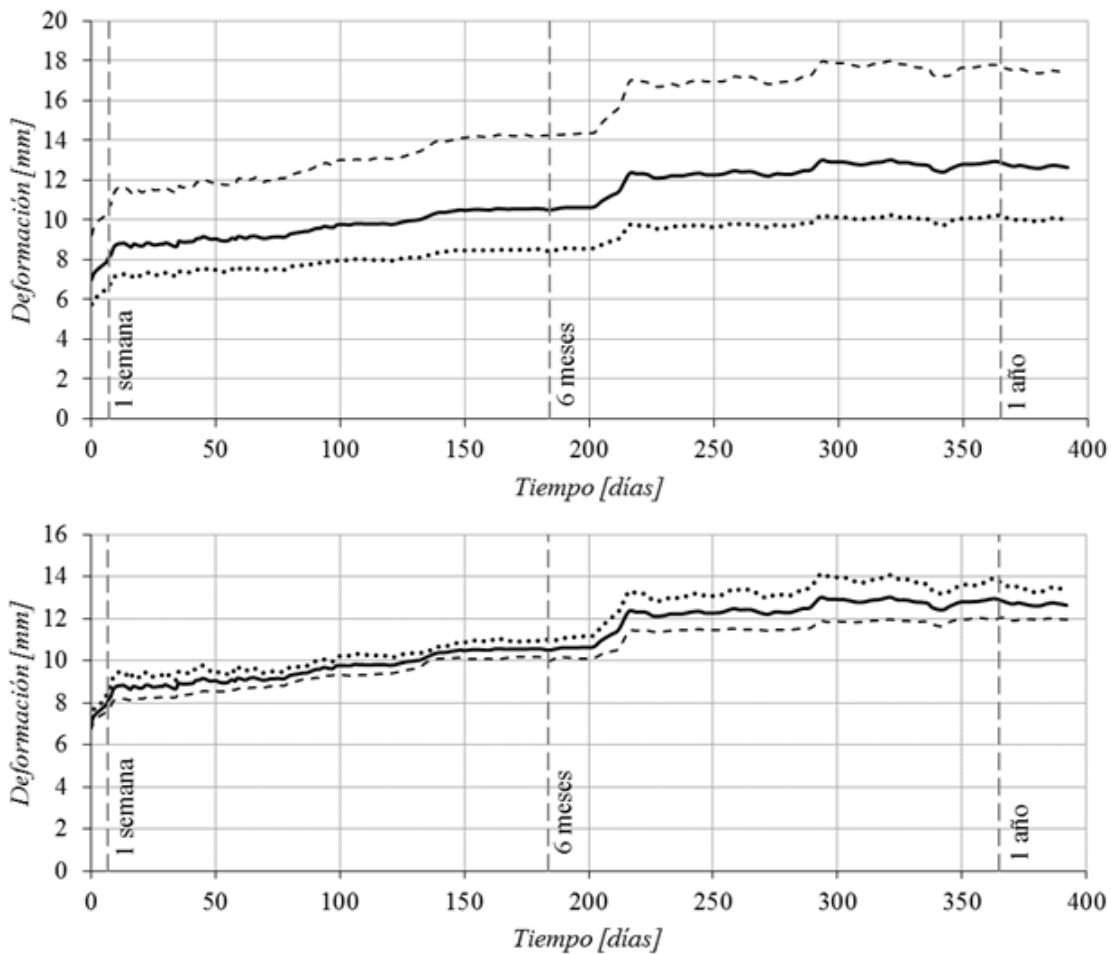


Figura 3: Evolución del valor medio de las deformaciones durante el ensayo. Arriba: sin médula (·····); con médula (- - -); total (—). Abajo: *P. taeda* (·····); *P. elliottii* (- - -); total (—)

Si bien la Figura3 permite apreciar que la tendencia general de las curvas fue común para la muestra total y para las 4 sub-muestras, también permite visualizar que durante todo el ensayo las deformaciones fueron sensiblemente mayores en las vigas de menor calidad (con médula) que en las de mayor calidad (libres de médula), y que esa diferencia fue sensiblemente menor en la comparación entre las dos especies. Luego de un año de aplicada la carga, el valor medio de la deformación alcanzó 17,69 mm para las vigas con médula y 10,17 mm para las libres de esa característica. Los correspondientes valores para el *P. taeda* y el *P. elliottii* fueron 13,67 mm y 12,03 mm respectivamente. Estos resultados mostraron que las diferencias porcentuales encontradas en las deformaciones instantáneas de las distintas sub-muestras (Tabla 1) se mantuvieron

relativamente estables a través del tiempo. Esto es congruente con el criterio generalmente adoptado por las reglas de diseño, las que determinan el valor de la deformación diferida como el producto de la deformación instantánea por un factor que es independiente de la especie y de la calidad de la madera (CIRSOC 601 ^[10], EN 1995-1-1 ^[11], NCh 1198 ^[12], NDS ^[13])

La Figura 4 exhibe la evolución de los valores medios de las deformaciones relativas (Δ/Δ_{inst}) y confirma, para las especies de rápido crecimiento investigadas, que el valor de las deformaciones diferidas puede expresarse con independencia de la especie y de la calidad de la madera. Al cabo de 6 meses y 1 año la relación Δ/Δ_{inst} correspondiente a la muestra completa alcanzó 1,49 y 1,79, respectivamente. Por su parte, luego de un año de ensayo las deformaciones relativas pertenecientes a las 4 sub-muestras alcanzaron valores medios de 1,80, 1,78, 1,85 y 1,75 para el *P. taeda*, el *P. elliotii*, las vigas con y sin presencia de médula, respectivamente. Tanto las diferencias exhibidas entre sub-muestras como en comparación con el de la muestra total (1,79) pueden despreciarse para propósitos prácticos vinculados al diseño estructural. Por otro lado, los valores medios indicados fueron acompañados por coeficientes de variación que oscilaron entre 12 % y 13 %, lo cual indica una reducida dispersión de los resultados obtenidos para las deformaciones relativas en comparación con la variabilidad encontrada para los correspondientes a la deformación instantánea (ver Tabla 1).

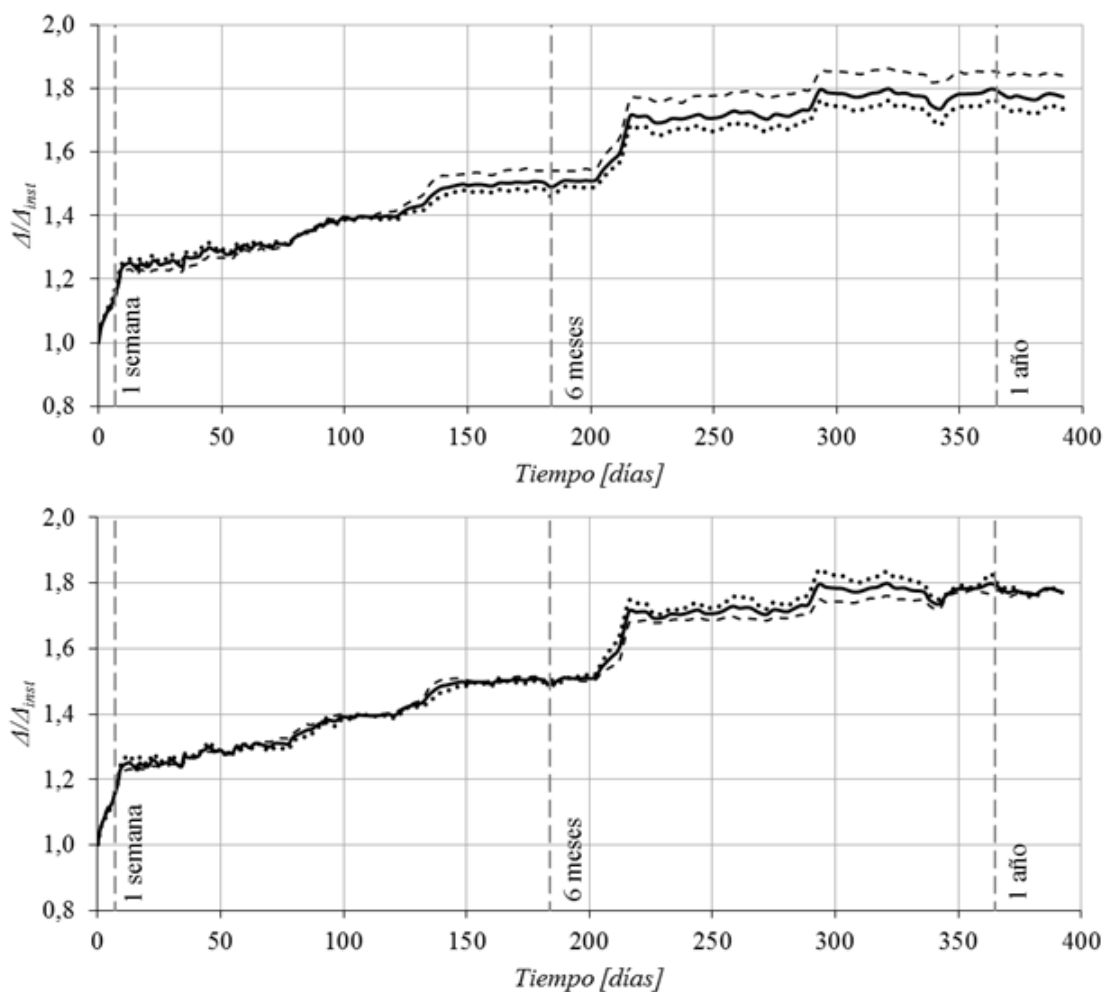


Figura 4: Valor medio de la deformación relativa (Δ/Δ_{inst}) en función del tiempo. Arriba: sin médula (·····); con médula (- - -); total (—). Abajo: *P. taeda* (·····); *P. elliotii* (- - -); total (—)

3.3 El criterio del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera

Si bien con particularidades, las expresiones provistas por las reglas de diseño para estimar la deformación luego de un determinado período de tiempo consideran como variables más importantes: i) la duración de la carga, ii) las variaciones en el contenido de humedad de la madera, es decir, su estado de servicio incluyendo el contenido de humedad inicial de la pieza.

El Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601^[10], en línea con el NDS^[13] de EEUU, considera que la deformación final (Δ) producida por una carga permanente o de larga duración (10 años) en un miembro estructural aserrado ubicado en un local adecuadamente ventilado, donde su contenido de humedad no supere en ningún caso el 19 %, puede estimarse multiplicando la deformación instantánea (Δ_{inst}) por el factor $K_{cr} = 1,5$. Si la condición de servicio corresponde a un ambiente no ventilado (húmedo), donde el contenido de humedad del miembro puede exceder el valor citado anteriormente, debe considerarse $K_{cr} = 2,0$.

Con el propósito de explicar la razón por la cual en esta investigación el valor medio de la deformación encontrada al cabo de un año para la muestra completa ($\Delta = 1,79 \Delta_{inst}$; Figura4) superó al previsto por las reglas para cargas de larga duración actuando en un ambiente adecuadamente ventilado ($\Delta = 1,5 \Delta_{inst}$), se efectuó un estudio detallado de los registros de temperatura y humedad en el local donde se llevó a cabo el ensayo y durante el período en que transcurrió el mismo. Dicho estudio mostró que la temperatura varió entre 11,7 °C y 30,2 °C y, que la humedad relativa lo hizo entre 41 % y 95 %. A la vez, el mismo reveló que durante los meses de diciembre, enero y febrero las temperaturas se mantuvieron elevadas en coincidencia con una reducida humedad ambiente y que, en cambio, en el período abril/julio se produjo la situación inversa. Además, los resultados de este análisis detallado mostraron que el contenido de humedad en la madera osciló entre el 8 % y el 22 %, este último porcentaje indicó una condición ambiental del local correspondiente a un clima húmedo según las reglas nacionales.

Respecto a la evolución de las deformaciones después del primer año, estudios previos (Gowda *et al.* 1996)^[8] probaron que el componente de creep obtenido luego de 6 meses recién es duplicado al cabo de 10 años. Tomando como base el valor medio experimental obtenido en este trabajo a los 6 meses ($\Delta/\Delta_{inst} = 1,49$; Figura 4) se deduce que el componente de creep correspondiente a ese lapso de tiempo fue igual a $0,49 \Delta_{inst}$. Duplicando este valor se llega a: $K_{cr} \text{ experimental} = 1 + 2 \times 0,49 = 1,98$, factor prácticamente coincidente con el adoptado por las reglas de diseño del país para una viga sometida a cargas de larga duración (10 años) ubicadas en un ambiente húmedo ($K_{cr} = 2,0$).

La comparación de los resultados experimentales con los obtenidos aplicando el criterio del CIRSOC 601^[10] confirmó que este último interpreta adecuadamente el comportamiento mecánico de la muestra investigada considerando las siguientes particularidades del material: i) las vigas fueron obtenidas de dos especies de rápido crecimiento, ii) en la madera juvenil presente en estas especies la capa S2 de la pared secundaria exhibe una mayor inclinación de las microfibrillas que en la madera normal (Cave y Walker 1994^[16], Donaldson 2008^[17], Yin *et al.* 2011^[18]) y, iii) la deformación relativa se incrementa cuando crece el ángulo entre el esfuerzo y la dirección de las fibras (Ranta-Maunus 1995)^[6].

El análisis también puso en evidencia la necesidad de que el proyectista estructural considere con un adecuado nivel de detalle tanto la duración de las cargas actuantes como la condición de servicio en el lugar donde se ubicará la estructura. No obstante, existen variables no consideradas explícitamente pero que pueden ejercer una importante influencia sobre la deformación final. Dentro de éstas se destacan: i) el nivel de las tensiones que actúan sobre el miembro estructural y, ii) el tamaño de la sección transversal de este último. En la muestra investigada las tensiones se ubicaron en un 35 % de la resistencia estimada (ver Materiales y Métodos), nivel que es habitual para una estructura en servicio y que garantiza un desarrollo estable del creep como lo contemplan las reglas de diseño. En cambio, un nivel de tensiones cercano al de la resistencia característica del

material hubiese producido una acentuada aceleración del creep conducente a una falla prematura (Andriamitantsoa 1995) [7]. Las dimensiones nominales adoptadas para las vigas de la muestra ensayada (45 mm x 100 mm) pueden considerarse de tamaño intermedio y habituales en estructuras de viviendas. No obstante, hay que considerar que el tamaño del miembro estructural influye sobre las variaciones en su contenido de humedad (en locales sin climatización) y consecuentemente sobre el valor de su deformación final. Este parámetro debe ser correctamente evaluado por el proyectista para evitar la aparición de deformaciones finales excesivas en piezas de dimensiones reducidas o el desarrollo de un diseño conservador en piezas de grandes dimensiones (Calvo *et al.* 2002^[21], Ranta-Maunus 1995 [6]).

4. CONCLUSIONES

Los resultados experimentales mostraron que luego de un año el valor medio de la deformación relativa (Δ/Δ_{inst}) alcanzó 1,79 para la muestra completa. Los valores correspondientes a las sub-muestras de *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* fueron 1,80 y 1,78, respectivamente, y los obtenidos para las sub-muestras conteniendo vigas con médula y libres de ella fueron 1,85 y 1,75, respectivamente. Las pequeñas diferencias encontradas en el comportamiento de las distintas sub-muestras pueden despreciarse para propósitos prácticos vinculados al diseño estructural y ratifican la validez, para el caso analizado, del criterio del Reglamento CIRSOC 601^[10] que estima el valor de la deformación diferida independientemente de la especie y de la calidad de la madera.

La proyección a 10 años del componente del creep determinado experimentalmente a los 6 meses -utilizando resultados de investigaciones previas- y su comparación con los resultados obtenidos aplicando las reglas de diseño del país, confirmó que éstas interpretan adecuadamente el comportamiento del material investigado cuando es sometido a cargas de larga duración. Estos resultados adquieren una significativa importancia teniendo en cuenta el creciente uso de madera estructural proveniente de especies de rápido crecimiento que contienen una proporción significativa de madera juvenil.

Además, este estudio puso en evidencia la necesidad de que el proyectista estructural examine detalladamente las características de los parámetros considerados explícitamente en el diseño, tales como la duración de las cargas actuantes y la condición de servicio en el lugar de emplazamiento de la estructura. Asimismo, del análisis emergió la conveniencia de que el proyectista tenga en cuenta aquellas variables no consideradas directamente por las reglas de diseño pero que son capaces de influir sobre la deformación final, tales como el tamaño del miembro estructural y el nivel de las tensiones actuantes.

REFERENCIAS

- [1] FAO. Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina al año 2020, Informe Nacional Argentina. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponible en <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/j1901s/j1901s00.pdf>. Acceso 28/06/2016.
- [2] SIFIP. Sistema de Información Foresto-Industrial Provincial. Inventario Forestal. Disponible en <http://extension.facfor.unam.edu.ar>. Acceso 30/01/2014.
- [3] Coronel, E., 'Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas. 2º parte: Fundamentos de las propiedades mecánicas de las maderas', Instituto de Tecnología de la Madera (Santiago del Estero, Argentina, 1996) 335 pp.
- [4] Thelandersson, S., 'Deformations in timber structures', Informationsdienst Holz, STEP 3 (Düsseldorf, Germany, 1995) pp. 11/1-11/16.
- [5] Nordström, J. y Sandberg, D., 'The rheology of wood – Considerations of the mechano-sorptive creep', Royal Institute of Technology (Stockholm, Sweden, 1994) 11 pp.
- [6] Ranta-Maunus, A., 'Creep and effects of moisture in timber', Informationsdienst Holz, STEP 3 (Düsseldorf, Germany, 1995) pp. 4/1-4/21.

- [7] Andriamitantsoa, L., 'Creep', Timber Engineering STEP 1 (Centrum Hout, The Netherlands, 1995) pp. A19/1-A19/5.
- [8] Gowda, C., Kortessmaa, M. y Ranta-Maunus, A., 'Long term creep tests on timber beams in heated and non-heated environments', VTT Publications 278 (1996) 35 pp.
- [9] Shen, Y. y Gupta, R., 'Evaluation of creep behavior of structural lumber in natural environment', Wood Engineering 47 (1) (1997) 89-96.
- [10] INTI CIRSOC 601, 'Reglamento Argentino de Estructuras de Madera', Instituto Nacional de Tecnología Industrial (Buenos Aires, Argentina, 2016).
- [11] EN 1995-1-1, 'Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings', European Committee for Standardisation (Brussels, 2005).
- [12] NCh 1198, 'Madera – Construcciones en madera – Cálculo', Instituto Nacional de Normalización INN (Santiago, Chile, 2007).
- [13] NDS, 'National Design Specification for Wood Construction', American Forest & Paper Association (Washington, EEUU, 2012).
- [14] Chan Martín, M., Araujo Molina, A. y Azueta García, M., 'Los defectos naturales en la madera aserrada'. Ingeniería Revista Académica 6(001) (2002) 29-38.
- [15] Hoffmeyer, P., 'Wood as a building material', Timber Engineering STEP 1 (Centrum Hout, The Netherlands, 1995) pp. A4/1-A4/21.
- [16] Cave, I. y Walker, J., 'Stiffness of wood in fast-grown plantation softwoods: the influence of microfibril angle', Forest Products Journal 44(5) (1994) 43-48.
- [17] Donaldson, L. 'Microfibril angle: measurement, variation and relationships – a review', IAWA Journal 29(4) (2008) 345–386.
- [18] Yin, Y, Bian, M., Song, K., Xiao, F. y Xiaomei, J., 'Influence of microfibril angle on within-tree variations in the mechanical properties of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*)', IAWA Journal 32(4) (2011) 431–442.
- [19] Roszyk, E., Moliński, W. y Jasińska, M., 'The effect of microfibril angle on hygromechanic creep of wood under tensile stress along the grains', Wood Research 55(3) (2010) 13-24.
- [20] Roszyk, E., Mania, P. y Moliński, W., 'The influence of microfibril angle on creep Scotch Pine wood under tensile stress along the grains', Wood Research 57(3) (2012) 347-358.
- [21] Calvo, C., Cotrina, A., Cuffré, A., Piter, J., Stefani, P. y Torrán, E., 'Deformaciones diferidas en probetas pequeñas y libres de defectos de *Eucalyptus grandis* de Argentina'. Maderas: Ciencia y Tecnología 4(2) (2002) 124-132.
- [22] Piter, J., Zerbino, R. y Blaß, H., 'Deflections in beams of Argentinean *Eucalyptus grandis* under long-term loading', Holz als Roh- und Werkstoff 64 (2006) 351-355.
- [23] Piter, J., Calvo, C., Cuffré, A., Rougier, V., Sosa Zitto, M. y Torrán, E., 'Creep in structural-sized beams of Argentinean *Eucalyptus grandis*', Maderas: Ciencia y Tecnología 9(2) (2007) 117–126.
- [24] Torrán, E., Sosa Zitto, A., Gonzalez, A. y Piter, J., 'Creep in beams of Argentinean *Eucalyptus grandis* loaded in unseasoned state', Holz Roh Werkst 66 (2008) 201–205.
- [25] Fank, P., Stefani, P. y Piter, J., 'Resistencia y rigidez de tablas destinadas a la fabricación de madera laminada encolada estructural. Análisis comparativo entre el pino resinoso (*Pinus taeda/elliottii*) y el álamo (*Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67')', IV Congreso Internacional de las Salicáceas en Argentina-Jornadas de Salicáceas 2014 (La Plata, Argentina, 2014) 8 pp.
- [26] Fank, P., Stefani, P. y Piter, J., 'Efecto de la altura en la resistencia a flexión en piezas de pino resinoso del noreste de Argentina', XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural (Montevideo, Uruguay, 2014) 13 pp.
- [27] IRAM 9662-3, 'Madera laminada encolada estructural, Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 3: Tablas de pino taeda y elliotti (*Pinus taeda y elliottii*)', Instituto Argentino de Normalización y Certificación (Buenos Aires, Argentina, 2015).
- [28] IRAM 9670, 'Madera estructural. Clasificación y requisitos. Clasificación en grados de resistencia para la madera aserrada de pinos resinosos del noreste argentino mediante una evaluación visual', Instituto Argentino de Normalización y Certificación (Buenos Aires, Argentina, 2002).
- [29] Honfi, D., 'Design for serviceability. A probabilistic approach', Tesis doctoral, LUND University, Division of Structural Engineering (Lund, Sweden, 2014) 124 pp.