

VIGAS DE PINO RESINOSO DEL NORESTE DE ARGENTINA BAJO CARGAS DE LARGA DURACION: DEFORMACIONES, RECUPERACION Y CRITERIOS DE DISEÑO

BEAMS OF RESINOUS PINE CULTIVATED IN THE NORTHEAST OF ARGENTINA UNDER LONG-TERM LOADS: DEFLECTIONS, RECOVERY AND DESIGN CRITERIA

*Pamela Yohana Fank*¹

<https://orcid.org/0000-0002-5515-773X>

*María del Rocío Ramos*¹

<https://orcid.org/0000-0003-2978-6804>

*Eduardo Antonio Torrán*¹

<https://orcid.org/0000-0003-4637-2566>

*María Alexandra Sosa-Zitto*¹

<https://orcid.org/0000-0001-5001-3879>

Juan Carlos Piter^{1,*}

<https://orcid.org/0000-0001-7473-7994>

RESUMEN

En este artículo se presentan y discuten los resultados de un proyecto orientado a investigar las deformaciones bajo carga de larga duración, y la recuperación luego de la descarga, en vigas de pino resinoso de rápido crecimiento (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*) cultivado en el noreste de Argentina. La investigación empírica se llevó a cabo en un local sin climatización con el propósito de incorporar fluctuaciones de la temperatura y la humedad relativa ambiente durante el período de carga, utilizando una muestra integrada por 14 vigas de muy variada calidad. Las deformaciones se registraron bajo carga constante durante 392 días y luego libres de carga durante un período de recuperación de 28 días. No obstante, las variaciones climáticas producidas, se encontró una destacada similitud entre el valor de la deformación inicial instantánea de cada viga y el de su recuperación instantánea luego de la descarga. Los resultados también probaron que, independientemente de la calidad de la madera, el desarrollo de las deformaciones diferidas se mantiene estable y las reglas de diseño resultan eficaces para calcular su valor si el nivel de tensión en la viga es inferior al 35 % de su resistencia instantánea.

Palabras clave: Deformaciones diferidas, normativa de cálculo, parámetros, *Pinus elliottii*, *Pinus taeda*.

¹Universidad Tecnológica Nacional, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Concepción del Uruguay, Grupo de Estudio de Maderas (GEMA), Concepción del Uruguay, Argentina.

*Autor para correspondencia: jc.piter@gmail.com; piterj@frcu.utn.edu.ar

Received: 02.01.2021 Accepted: 08.06.2021

ABSTRACT

This paper presents and discusses the results of a project aimed at investigating the deformations under long-term loading, and recovery after unloading, in beams of fast-growing resinous pine (*Pinus taeda* and *Pinus elliottii*) cultivated in the northeast of Argentina. A sample containing 14 beams exhibiting great variations in quality was tested in a room without air conditioning with the purpose of incorporating the fluctuations in temperature and relative humidity during the loading period. Deformations were recorded under constant loading through 392 days and then free of load during a recovery period of 28 days. Notwithstanding the climate variations, a remarkable similarity was found between the value of the initial instantaneous deformation of each beam and that of its instantaneous recovery after unloading. Results also proved that, regardless of the wood quality, creep remains stable and design rules are effective to calculate its value if the stress level in the beam is less than 35 % of its instantaneous strength.

Keywords: Creep, design rules, parameters, *Pinus elliottii*, *Pinus taeda*.

INTRODUCCIÓN

En Argentina, las especies de rápido crecimiento *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* cultivadas en el noreste del país son las principales proveedoras de madera estructural. Debido a su similar aspecto y la consecuente dificultad para diferenciarlas luego del aserrado, ambas son comercializadas bajo la denominación de pino resinoso. El Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601 (INTI CIRSOC 2016) también las considera en forma conjunta, es decir como madera estructural obtenida de un grupo de especies, puesto que no se han reportado diferencias significativas entre sus propiedades físico-mecánicas (Fank 2018). Es de destacar que similares resultados se han publicado a partir de investigaciones llevadas a cabo con las mismas especies cultivadas en otros países de la región, tales como Brasil y Uruguay (Moya *et al.* 2017, Santini *et al.* 2000).

Además de satisfacer criterios de seguridad, el diseño debe contemplar requisitos relacionados a las condiciones de servicio durante la vida útil de la estructura. Dentro de éstos se encuentra el control de las deformaciones, aspecto que frecuentemente define el dimensionamiento de las estructuras de madera debido a la importancia que adquieren las deformaciones diferidas (creep) (Thelandersson 1995). La deformación total que experimenta un miembro estructural de madera luego de un cierto período de tiempo incluye la deformación elástica instantánea, vinculada a su rigidez, y la deformación diferida integrada por los componentes viscoelástico y mecanosortivo (Honfi 2014, Nordström y Sandberg 1994). El componente viscoelástico está relacionado a la permanencia de la carga y al contenido de humedad de la pieza, pero el nivel de tensión originado por la carga en el miembro estructural y el valor de la temperatura también pueden afectarlo. Estudios experimentales han demostrado que para tensiones menores al 35 % de la resistencia instantánea el incremento de las deformaciones se mantiene estable luego de un rápido crecimiento inicial, y que la influencia de la temperatura puede despreciarse cuando es menor a 50 °C (Andriamitantoa 1995). El componente mecanosortivo se produce debido a los cambios cíclicos en el contenido de humedad del miembro cargado y, en consecuencia, su importancia crece en miembros de pequeñas dimensiones (si no hay protección superficial) expuestos a acentuados ciclos de variación de la temperatura y la humedad relativa ambiente (Ranta-Maunus 1995). Dado que en las estructuras convencionales los límites indicados para el nivel de tensión y la temperatura no suelen ser alcanzados, y que los cambios cíclicos del contenido de humedad dependen del tamaño del miembro estructural y de su condición de servicio en obra, la influencia de estas tres variables sobre la deformación diferida no es tenida en cuenta en forma explícita por las reglas de diseño sino que su evaluación queda librada al criterio del proyectista (AWC 2015, CEN 2016, INTI CIRSOC 2016).

La recuperación de un miembro estructural de madera después de la descarga manifiesta, de igual manera que su deformación bajo carga, una parte elástica instantánea y una diferida que también incluye los componentes viscoelástico y mecanosortivo (Honfi 2014). Se han reportado numerosos estudios que aportan información sobre este tema (Nordström y Sandberg 1994, Pope y Abdul-Wahab 2004, Roszyk *et al.* 2010). No obstante, este aspecto no es considerado en forma explícita por las reglas de diseño estructural pues el propósito de éstas es proveer criterios para estimar y limitar las deformaciones producidas por las cargas durante la vida útil de las estructuras (Thelandersson 1995).

En las especies de rápido crecimiento los árboles son cortados a temprana edad y su madera contiene una importante proporción de madera juvenil. Ésta exhibe una mayor inclinación de las micro-fibrillas de la pared celular que la madera madura, lo cual disminuye su resistencia y rigidez (Chan-Martín *et al.* 2002, Donaldson 2008, Yin *et al.* 2011) e influye sobre el desarrollo de las deformaciones diferidas (Roszyk *et al.* 2010, Roszyk

et al. 2012). En Argentina se han publicado estudios de las deformaciones diferidas en el *Eucalyptus grandis* de rápido crecimiento, llevados a cabo tanto sobre pequeñas probetas (Calvo *et al.* 2002) como sobre piezas de tamaño estructural en estado inicial seco (Piter *et al.* 2006, Piter *et al.* 2007) y en estado inicial verde (Torrán *et al.* 2008). Respecto de las especies que son objeto de este proyecto, se han reportado resultados preliminares que proveen valores medios de las deformaciones diferidas en forma discriminada para cada especie y para piezas con y sin médula (Fank *et al.* 2017, Fank 2018). No obstante, no se han publicado estudios exhaustivos sobre vigas de variada calidad que abarquen una fase de deformación bajo carga y una de recuperación luego de la descarga y que consideren la influencia de todas las singularidades correlacionadas con sus propiedades físico-mecánicas tales como nudos, médula y anillos de crecimiento (Fank 2018), así como el nivel de tensión respecto de su resistencia instantánea y las variaciones de la temperatura y humedad relativa ambiente.

El objetivo de este trabajo es presentar y discutir los resultados de un proyecto diseñado para investigar las deformaciones, y la recuperación luego de la descarga, en vigas de pino resinoso de rápido crecimiento del noreste de Argentina sometidas a cargas de larga duración en el interior de un local sin clima controlado. A su vez, conocer las variables con mayor influencia sobre las deformaciones y verificar la eficacia de las reglas de diseño vigentes en Argentina para estimar su valor.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material de ensayo estuvo compuesto por una muestra conteniendo 14 piezas de madera aserrada, 7 de *Pinus taeda* L. y otras 7 de *Pinus elliottii* Engelm., todas procedentes de forestaciones radicadas en la provincia de Misiones. Conforme al objetivo de este proyecto, las piezas se seleccionaron al azar de la producción representativa del amplio rango de calidades comercializado para la construcción, en estado seco y con sección transversal de dimensiones nominales 50,8 mm x 101,6 mm. Luego de trasladadas al Laboratorio de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Concepción del Uruguay de la Universidad Tecnológica Nacional, las piezas fueron cepilladas alcanzando sus dimensiones finales los siguientes valores medios: 45,6 mm (ancho), 100,2 mm (alto) x 2,6 m (largo). Después del cepillado se procedió a la identificación de cada pieza adoptando la letra E para las de *Pinus elliottii* y la letra T para las de *Pinus taeda*, seguidas en ambos casos por un número adoptado al azar entre 1 y 7. Posteriormente se determinó el contenido de humedad promediando en cada caso 6 mediciones (extremos y centro en ambas caras) efectuadas con un xilohigrómetro de resistencia eléctrica HOLZMEISTER LG9. Luego se trasladó la muestra completa al local destinado para realizar el ensayo de larga duración.

El ensayo de flexión de larga duración se llevó a cabo en un local cerrado, con ventilación natural (sin climatización). Inmediatamente después de trasladadas desde el laboratorio, las vigas se dispusieron de canto (flexión respecto del eje de mayor inercia) y con una carga actuando en el centro de un tramo simplemente apoyado de 2,5 m, como puede apreciarse en la Figura 1. El valor de la carga se determinó con el propósito de estudiar el comportamiento de las vigas en condiciones similares a las existentes en estructuras normales (viviendas, comercios, instituciones), donde la deformación instantánea y la deformación final suelen estar limitadas en el orden de 1/360 y 1/240 de la longitud (luz) de cálculo, respectivamente (INTI CIRSOC 2016). Considerando el procedimiento de selección del material, y la consecuente elevada heterogeneidad esperable para su calidad, se adoptó como referencia un valor medio del módulo de elasticidad igual a 8000 N/mm² (Fank 2018) y, disponiendo del esquema estático y del valor medio de las dimensiones de las vigas, se decidió aplicar una carga concentrada de 640 N en el centro de cada una de las 14 vigas.

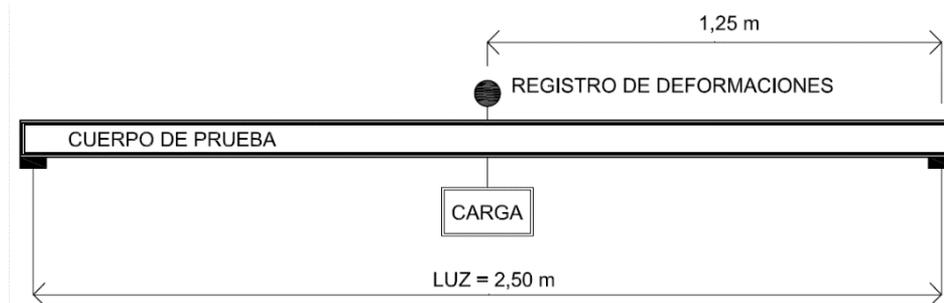


Figura 1: Disposición del ensayo de larga duración.

Las deformaciones verticales (δ) se midieron en el centro de cada viga por medio de comparadores marca Mitutoyo con capacidad de registrar 0,01 mm. La deformación inicial instantánea ($\delta = \delta_{inst}$) fue medida aproximadamente 5 minutos después de la aplicación de la carga y el registro de δ continuó durante un período de 420 días que incluyó una fase inicial de 392 días bajo carga y una fase de recuperación de 28 días luego de la descarga. El período mencionado excede el doble del lapso de tiempo (6 meses) en el cual las deformaciones diferidas (creep) manifiestan su mayor desarrollo según la experiencia internacional (Gowda *et al.* 1996, Ranta-Maunus y Korttesmaa 2000). A su vez asegura la inclusión de los ciclos anuales de variación de la temperatura y la humedad relativa ambiente, permitiendo, en consecuencia, estudiar la influencia que los cambios en el contenido de humedad de las vigas ejercen sobre sus deformaciones. Con este último propósito se registraron, por medio de un termo-higrómetro digital, los valores de la temperatura y la humedad relativa ambiente durante todo el ensayo.

Luego de finalizar el ensayo de larga duración las vigas se trasladaron nuevamente al Laboratorio de Ingeniería Civil donde se efectuó un relevamiento de las singularidades con mayor influencia sobre el comportamiento mecánico de las especies estudiadas, considerando para ese fin resultados de investigaciones previas (Fank 2018). La nudosidad se determinó según dos criterios que expresan el desplazamiento generado por el nudo (o grupo de nudos sin solapamientos) en la sección transversal de la viga: el criterio KAR (Knot Area Ratio) definido por el cociente entre el área de la proyección del nudo mayor cortado por una sección transversal y el área de ésta, y el criterio KAR150 determinado aplicando el concepto anterior a la mayor proyección de nudos existentes en una longitud de la pieza igual a 150 mm. La presencia de médula fue reconocida tanto en las superficies laterales como en los extremos de cada pieza. Los anillos de crecimiento fueron considerados registrando el espesor del mayor anillo ubicado sobre una recta radial, descartando los primeros 25 mm a partir de la médula. No se observaron, o fueron ignorados por presentar valores irrelevantes, defectos tales como desviación de las fibras, presencia de depósitos de resina, fisuras, arista faltante y ataques biológicos.

Finalizado el relevamiento y registro de las singulares, las vigas fueron ensayadas en flexión estática siguiendo el procedimiento de la norma europea EN 408:2010+A1:2012 (CEN 2012). Se determinó la tensión de rotura (f_{rot}) y el módulo de elasticidad (E) empleando una máquina de ensayos universales marca Shimadzu de accionamiento hidráulico con precisión igual al 1 % de la carga aplicada. Luego de la rotura se seleccionó un trozo libre de defectos conteniendo la sección transversal íntegra, el cual se utilizó para determinar la densidad (ρ) y el contenido de humedad conforme a las normas ISO 13061-1 (2014a) e ISO 13061-2 (2014b) respectivamente. Las dimensiones del trozo se midieron con un calibre capaz de registrar 0,01 mm, la masa se determinó con una balanza electrónica con precisión de 0,01 g, y el estado anhidro se alcanzó en estufa a una temperatura de $103 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El contenido de humedad inicial de las vigas mostró un valor medio de 10,1 % con un coeficiente de variación (en adelante COV) de 6 %, por lo cual puede descartarse una influencia desigual de esta variable sobre el comportamiento mecánico del material al comienzo del ensayo.

Las deformaciones y la recuperación

En la Figura 2a se exhiben las deformaciones determinadas en el centro de cada una de las 14 vigas y también el promedio de la muestra completa durante todo el desarrollo del ensayo de larga duración (420 días). En la misma se advierte la fase inicial (392 días), en la cual las deformaciones se produjeron bajo carga constante, y la fase final (28 días) donde las vigas experimentaron una recuperación luego de ser descargadas. Dada la destacada influencia que las condiciones ambientales ejercen sobre las deformaciones diferidas, en la Figura 2b se presentan los valores de la temperatura y la humedad relativa en el local donde se desarrolló la prueba.

La Figura 2a permite identificar las características de las deformaciones experimentadas por la muestra completa, para lo cual resulta de utilidad observar también la curva que expresa el promedio de las 14 vigas. A su vez, como las vigas E3, E6 y T4 exhiben comportamientos mecánicos con particularidades que no se observan en las restantes vigas, las curvas correspondientes se han individualizado con el propósito de facilitar el análisis. La viga E3 se destaca solamente por el elevado nivel de su deformación inicial pues luego su deformación diferida exhibe un incremento estable, en línea con el experimentado por las restantes vigas de la muestra, con la excepción de E6 y T4. La viga E6 se destaca por la magnitud y las variaciones cíclicas de la

parte diferida de su deformación. La viga T4 presenta los mayores valores tanto de la deformación instantánea como de la diferida, destacándose esta última también por sus importantes variaciones cíclicas. Un análisis orientado a conocer las causas del particular comportamiento de E3, E6 y T4 se presenta más adelante tomando como base información discriminada para las 14 vigas en relación a las deformaciones (Tabla 1) así como a la calidad y nivel de tensión durante el ensayo de larga duración (Tabla 2).

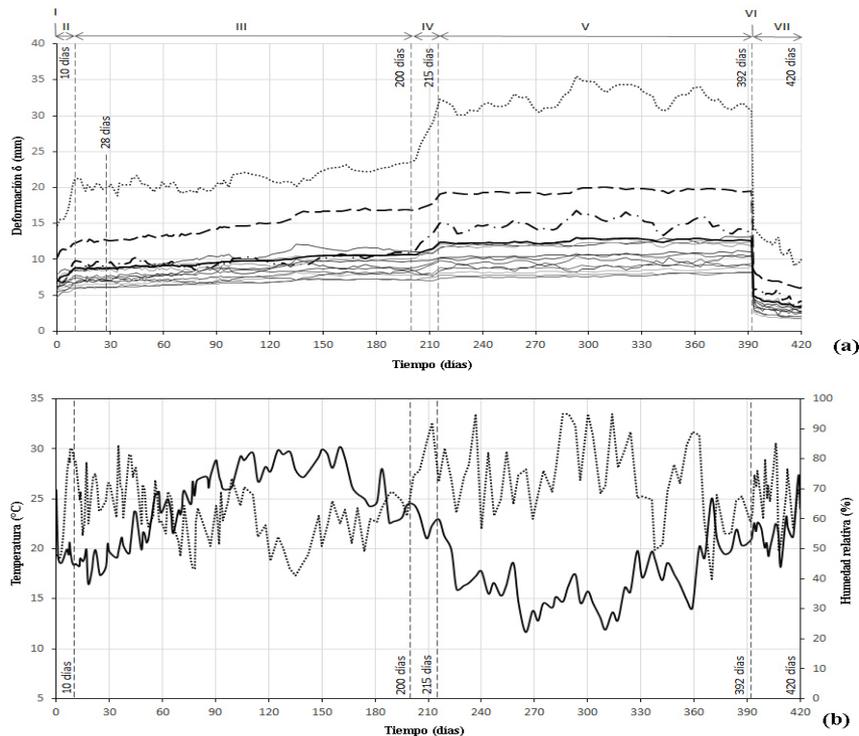


Figura 2: Deformaciones de las vigas y condiciones ambientales durante el ensayo de larga duración. (a): valores de la deformación en el centro de cada viga y valor medio de la muestra completa. (I, II, VII): períodos en el desarrollo de las deformaciones; (-----): viga E3; (-·-·-·): viga E6; (·····): viga T4; (—): promedio de las 14 vigas (b): registros de temperatura y humedad relativa en el local donde se realizó el ensayo. (—): temperatura; (·····): humedad relativa

En relación a las características de las deformaciones (δ) experimentadas por la muestra completa, se pueden diferenciar los siguientes 7 períodos: I) el primero corresponde a la deformación elástica instantánea ($\delta = \delta_{inst}$) II) en el segundo se adiciona la deformación diferida ($\delta = \delta_{inst} + \delta_{dif}$) manifestando un pronunciado incremento hasta aproximadamente los 10 días, III) el tercero exhibe un crecimiento moderado hasta alcanzar los 200 días, IV) a continuación, y hasta aproximadamente los 215 días, se observa nuevamente un marcado incremento, V) luego, hasta los 392 días, se advierte un ciclo de muy moderado crecimiento tendiendo a la estabilización, VI) al producirse la descarga se revela una importante recuperación elástica instantánea y, VII) hasta el final del ensayo (420 días) se advierte un proceso gradual de recuperación diferida. Desde el período II) al V) inclusive, las curvas permiten apreciar la influencia de los dos componentes que identifican la parte diferida de la deformación bajo carga constante: i) el componente viscoelástico, que se manifiesta en un incremento progresivo pero cada vez menos acentuado de la deformación y, ii) el componente mecanosortivo, que puede explicarse analizando conjuntamente las dos partes de la Figura 2, es prácticamente independiente del tiempo y expresa una variación adicional de la deformación debida a los cambios cíclicos del contenido de humedad de la madera (Honfi 2014, Ranta-Maunus 1995). El aumento acentuado que se manifiesta entre los 200 días y 215 días (período IV) constituye un claro ejemplo de la variación adicional de la deformación debida al componente mecanosortivo. En efecto, el incremento adicional de las deformaciones ocurrió durante un ciclo de evidente cambio del contenido de humedad en las vigas, producido por la combinación de una tendencia decreciente de la temperatura con una clara tendencia creciente de la humedad relativa que llegó a superar el 90% para luego continuar oscilando en ese nivel. Por otra parte, y en línea con la experiencia inter-

nacional (Honfi 2014), la influencia de ambos componentes (viscoelástico y mecanosortivo) también emerge con claridad de las curvas que representan la fase de recuperación diferida (período VII), en cuyo desarrollo se advierte la presencia de variaciones cíclicas.

La información discriminada para cada una de las vigas en la Tabla 1 complementa lo expresado en el párrafo anterior respecto del comportamiento de la muestra conjunta. A su vez permite avanzar en la interpretación del comportamiento de las 3 curvas (E3, E6 y T4) que exhiben rasgos distintivos en la Figura 2a.

Tabla 1: Principales resultados de la deformación y la recuperación en las vigas.

Viga ⁽¹⁾	Deformaciones bajo carga			Recuperaciones luego de la descarga		Relaciones		
	δ_{inst} (mm)	δ_{dif-28} (mm)	$\delta_{dif-392}$ (mm)	R_{inst} (mm)	$R_{dif-420}$ (mm)	R_{inst}/δ_{inst}	$R_{dif-420}/\delta_{dif-28}$	$\delta_{dif-392}/\delta_{inst}$
E1	4,64	1,38	3,46	5,24	1,06	1,13	0,77	0,75
E2	4,77	1,42	3,41	5,06	1,10	1,06	0,77	0,71
E3	10,37	2,28	9,11	10,27	3,15	0,99	1,38	0,88
E4	6,05	1,61	4,31	6,48	1,36	1,07	0,84	0,71
E5	7,84	0,82	5,38	8,02	2,39	1,02	2,91	0,69
E6	7,12	2,25	6,52	7,59	1,87	1,07	0,83	0,92
E7	5,99	1,18	4,61	5,74	2,18	0,96	1,85	0,77
T1	6,51	2,06	5,33	6,52	1,64	1,00	0,80	0,82
T2	5,69	0,84	3,14	5,90	1,20	1,04	1,43	0,55
T3	7,04	1,83	5,38	7,70	1,53	1,09	0,84	0,76
T4	14,74	5,32	15,94	15,20	5,43	1,03	1,02	1,08
T5	5,69	1,21	3,76	6,23	1,15	1,09	0,95	0,66
T6	5,26	1,76	3,84	5,55	0,97	1,06	0,55	0,73
T7	6,15	1,22	4,91	6,09	1,70	0,99	1,39	0,80
MED	6,99	1,80	5,65	7,26	1,91	1,04	1,17	0,77
COV	0,38	0,62	0,59	0,37	0,62	0,05	0,53	0,16

(1) E: vigas de *Pinus elliottii*; T: vigas de *Pinus taeda*; δ_{inst} : deformación elástica instantánea; δ_{dif-28} : deformación diferida al día 28; $\delta_{dif-392}$: deformación diferida al día 392; R_{inst} : recuperación elástica instantánea luego de la descarga; $R_{dif-420}$: recuperación diferida al día 420; MED: valor medio; COV: coeficiente de variación.

Las deformaciones instantáneas (δ_{inst}) evidencian una elevada variabilidad (COV = 0,38), correspondiendo a las vigas T4 (14,74 mm) y E3 (10,37 mm) los casos más apartados del valor medio. Considerando las condiciones en que se llevó a cabo el programa experimental (ver Materiales y Métodos), esta dispersión de resultados debe ser atribuida a la variación del módulo de elasticidad entre las vigas de distinta calidad que integraron la muestra (Tabla 2). Sin embargo, es interesante observar que la recuperación elástica instantánea (R_{inst}) presenta valores similares a los de δ_{inst} en cada una de las vigas, independientemente de su calidad. La información desplegada en la Tabla 1 revela que la relación R_{inst}/δ_{inst} oscila entre un mínimo de 0,96 y un máximo de 1,13, con un valor medio de 1,04 y una muy baja dispersión de valores (COV = 0,05) si se tiene en cuenta la natural variabilidad que caracteriza a este material. De ello emerge que la capacidad de recuperación elástica no se alteró significativamente a pesar de que: i) las vigas presentaron importantes diferencias en calidad (Tabla 2), ii) estuvieron cargadas durante 392 días en un ambiente con marcadas fluctuaciones de la temperatura y la humedad relativa y, iii) durante ese período se registraron algunos comportamientos particularmente diferenciados del generalizado por la magnitud y las variaciones cíclicas de la parte diferida de su deformación, tales como el de las vigas T4 y E6. Para la especie de rápido crecimiento que ocupa el segundo lugar de importancia en Argentina, el *Eucalyptus grandis*, Piter *et al.* (2007) reportan un mayor valor medio (1,17) y una superior dispersión de valores (COV = 0,22) del cociente entre la recuperación y la deformación instantánea que los obtenidos en este estudio.

Las deformaciones diferidas a los 28 días de colocada la carga (δ_{dif-28}) fueron incorporadas a la Tabla 1 con el fin de compararlas con las recuperaciones diferidas registradas en igual lapso de tiempo ($R_{dif-420}$), es decir luego de la descarga (392 días) y hasta el final del ensayo (420 días). El valor medio de la relación $R_{dif-420}/\delta_{dif-28}$ indica que la recuperación de la muestra completa tras los 28 días comprendidos en el período VII (Figura 2a) fue 17 % mayor que la deformación diferida producida a los 28 días de colocada la carga y exhibiendo una importante dispersión de valores (COV = 0,53). A su vez, la relación entre la deformación diferida en el momento

previo a la descarga y la deformación elástica instantánea ($\delta_{\text{dif-392}} / \delta_{\text{inst}}$) muestra un valor medio de 0,77 con un COV igual a 0,16 y valores particularmente elevados para T4 (1,08) y E6 (0,92). Dado que esta relación reviste importancia para propósitos prácticos vinculados al diseño estructural pues las reglas de diseño contemplan una evolución estable de la deformación diferida (AWC 2015, CEN 2016, INTI CIRSOC 2016), se realizó una estimación estadística de la dispersión para detectar la existencia de valores atípicos por exceso, es decir representativos del comportamiento de vigas cuya relativamente elevada deformación diferida respecto de la instantánea se debe a la influencia de variables particulares que no afectan al resto de las vigas. Para este fin se adoptó el método del rango intercuartílico (RIC) dado por la diferencia entre los cuartiles tercero (Q_3) y primero (Q_1), y que a partir de los valores presentados en la Tabla 3 resulta: $RIC = Q_3 - Q_1 = 0,82 - 0,71 = 0,11$. Para la viga T4 se obtiene: $1,08 > Q_3 + 1,5 RIC = 0,82 + 1,5 \times 0,11 = 0,99$ y su comportamiento debe considerarse atípico dentro de la muestra pues excede el límite superior adoptado en el método ($Q_3 + 1,5 RIC$). Por su parte, para la viga E6 se obtiene: $0,92 \approx Q_3 + RIC = 0,82 + 0,11 = 0,93$ lo cual indica que si bien su valor no puede definirse como atípico, alcanza un nivel destacado ($Q_3 + RIC$) y congruente con el particular comportamiento puesto en evidencia en la Figura 2a.

Con el propósito de explicar este particular comportamiento de las vigas E6 y T4 se evaluó en cada viga tanto la presencia de parámetros con influencia sobre el comportamiento mecánico como el valor de sus principales propiedades físico-mecánicas. Para ese fin se exhiben en la Tabla 2 los valores de las singularidades más importantes en las especies que componen el pino resinoso (Fank 2018), el nivel de tensión originado por la carga de larga duración, y las propiedades mecánicas y físicas determinadas a través del ensayo de flexión estática, realizado después de la prueba de larga duración descrito en Materiales y Métodos. La elevada variabilidad de la calidad de las vigas que constituyen la muestra queda reflejada en esta tabla tanto por la presencia y el valor de las singularidades como por el amplio rango de variación de la tensión de rotura (f_{rot}) y del módulo de elasticidad (E). El contenido de humedad determinado luego del ensayo de flexión estática mostró un promedio de 11,5 % con un COV = 0,03 por lo cual se puede descartar una influencia desigual de esta variable sobre los resultados de las propiedades mecánicas y la densidad.

Tabla 2: Singularidades, tensión originada por la carga de larga duración y propiedades físico-mecánicas de las vigas.

Viga	Singularidades ⁽¹⁾			$f_{\text{max-ELD}}$ (MPa)	Ensayo estático de flexión ⁽¹⁾			$f_{\text{max-ELD}}/f_{\text{rot}}$
	Nudosidad KAR/KAR150	Presencia de médula	Mayor anillo de crecimiento (mm)		f_{rot} (MPa)	E (MPa)	ρ (kg/m ³)	
E1	0,06 / 0,08	No	11,0	5,3	71,0	12208	543	0,07
E2	0,04 / 0,04	No	10,0	5,2	43,0	12207	538	0,12
E3	0,50 / 0,53	Si	14,0	5,2	26,8	5937	578	0,19
E4	0,00 / 0,00	No	10,5	5,2	58,2	9779	544	0,09
E5	0,34 / 0,34	Si	14,0	5,2	27,4	7825	521	0,19
E6	0,41 / 0,48	No	12,0	5,2	14,7	7420	526	0,36
E7	0,23 / 0,23	No	15,0	5,2	67,8	10574	556	0,08
T1	0,43 / 0,46	No	16,0	5,2	17,6	8745	571	0,29
T2	0,00 / 0,00	No	25,0	5,3	43,5	10735	474	0,12
T3	0,00 / 0,00	Si	19,0	5,1	20,9	9235	473	0,24
T4	0,32 / 0,36	Si	26,0	5,2	12,1	4271	409	0,43
T5	0,27 / 0,28	No	17,0	5,2	38,3	10108	472	0,14
T6	0,35 / 0,35	No	16,0	5,2	50,6	10252	608	0,10
T7	0,35 / 0,36	Si	12,0	5,2	35,2	10859	531	0,15

(1): descrito en Materiales y Métodos; $f_{\text{max-ELD}}$: máxima tensión de flexión durante el ensayo de larga duración; f_{rot} , E y ρ : tensión de rotura, módulo de elasticidad y densidad, respectivamente, obtenidos del ensayo de flexión estática llevado a cabo luego de finalizar la prueba de larga duración.

La Tabla 2, confirma que los menores valores del módulo de elasticidad (E) corresponden a las vigas T4 y E3, las cuales exhibieron las mayores deformaciones iniciales instantáneas como puede apreciarse en la Figura 2a y en la Tabla 1. A través de un análisis detallado de la información contenida en la Tabla 2 no fue posible encontrar una relación directa de la especie ni de las singularidades, ni tampoco de las propiedades físico-mecánicas, con el particular desarrollo de las deformaciones diferidas en E6 y T4. En cambio, ese análisis permitió comprobar que estas dos vigas comparten como característica distintiva su elevado nivel de tensión expresado a través de la relación $f_{\text{max-ELD}} / f_{\text{rot}}$. En efecto, la Tabla 2 muestra que la relación entre la tensión máxima originada por la carga de larga duración ($f_{\text{max-ELD}}$), que presentó una mínima variación entre las 14 vigas, y la tensión de rotura (f_{rot}), que mostró una elevada variabilidad, oscila en un amplio rango comprendido entre 0,07 y 0,43. Considerando que la experiencia internacional reporta que el desarrollo de las deformaciones diferidas (creep) se mantiene en un rango estabilizado si $f_{\text{max-ELD}} / f_{\text{rot}} < 0,35$ (Andriamitantsoa 1995), y que esa relación fue inferior a 0,30 en todas las vigas excepto en E6 y T4, la elevada magnitud y variación de las deformaciones diferidas registradas en E6, y aún en mayor medida en T4, pueden ser explicadas por un excesivo valor de $f_{\text{max-ELD}} / f_{\text{rot}}$, que en ellas alcanzó 0,36 y 0,43 respectivamente. Estos resultados son congruentes con los obtenidos aplicando el método del Rango Intercuartílico antes mencionado, que permitieron identificar como atípico el valor de $\delta_{\text{dif-392}} / \delta_{\text{inst}}$ (Tabla 1) correspondiente a T4 (1,08) y destacaron la importancia del alcanzado por E6 (0,92). A su vez, un análisis de regresión lineal simple entre $\delta_{\text{dif-392}} / \delta_{\text{inst}}$ (Tabla 1) y $f_{\text{max-ELD}} / f_{\text{rot}}$ (Tabla 2), mostró la existencia de una relación significativa entre esas variables con un coeficiente de correlación (R) de 0,774 y un nivel de confianza superior al 99 % ($p < 0,001$). Estos resultados confirman para el material investigado que el incremento de las deformaciones diferidas creció con el nivel de tensión y se mantuvo dentro de un rango previsible para $f_{\text{max-ELD}} / f_{\text{rot}} < 0,35$, en línea con la experiencia internacional (Andriamitantsoa 1995).

Las deformaciones y el diseño estructural

Los criterios de diseño de relieve internacional consideran que la deformación total (δ) después de un determinado lapso de tiempo puede estimarse en base a la deformación inicial instantánea (δ_{inst}). Si bien con diferencias en aspectos formales, las ecuaciones para el cálculo expresan la relación (deformación relativa) como un factor relacionado a la duración de la carga y al contenido de humedad de la pieza, siendo este último relevante tanto por su valor inicial como por sus posteriores variaciones en función de la condición de servicio de la estructura. Dada la importancia de conocer la evolución de $\delta / \delta_{\text{inst}}$ en el caso que nos ocupa, su valor se determinó en el centro de cada una de las 14 vigas y se exhibe en la Figura 3a para el periodo de actuación de la carga (392 días), ya que la recuperación luego de la descarga no es un aspecto usualmente considerado en el diseño estructural (AWC 2015, CEN 2016, INTI CIRSOC 2016). La influencia de las condiciones ambientales sobre las deformaciones relativas puede ser apreciada en este caso observando también la Figura 3b, en la cual se presentan los valores de la temperatura y la humedad relativa en el ambiente donde se desarrolló el ensayo.

En la Figura 3a pueden advertirse dos etapas que exhiben diferencias en la dispersión de valores de $\delta / \delta_{\text{inst}}$, aspecto que reviste importancia desde el punto de vista de la confiabilidad estructural. En la primera etapa, que se extiende aproximadamente hasta los 200 días, las 14 curvas exhiben un nivel de homogeneidad relativamente elevado. Luego aumenta moderadamente la dispersión en toda la muestra pero se destacan las vigas E6 y T4 por el elevado nivel y variaciones de $\delta / \delta_{\text{inst}}$, razón por la cual se decidió identificar sus respectivas curvas en la mencionada figura. A su vez, y con el fin de analizar en detalle las deformaciones relativas de todas las vigas tomando como referencia períodos de tiempo claramente definidos, sobre el eje horizontal se indican particularmente los 2 meses, 6 meses y 12 meses. Los resultados se presentan en la Tabla 3.

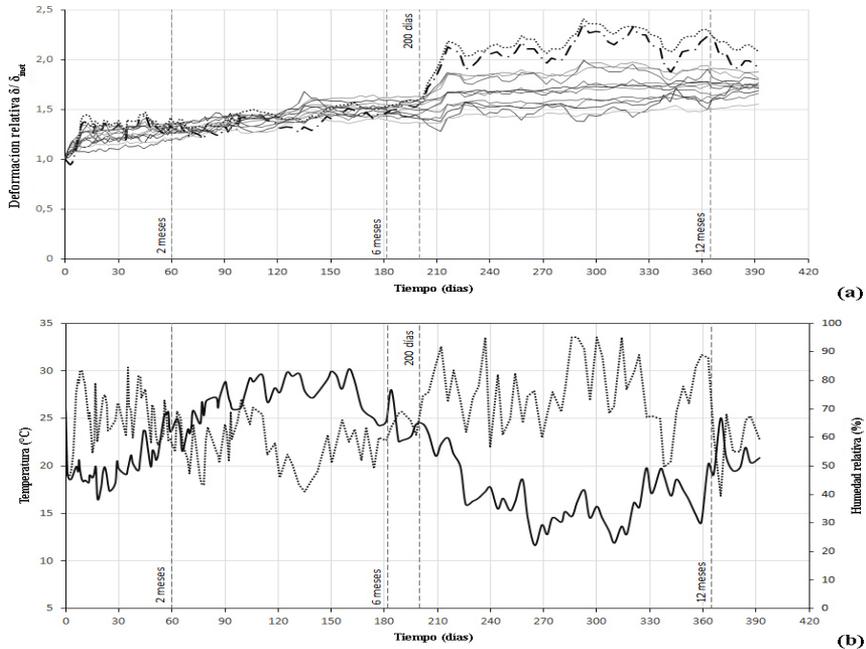


Figura 3: Deformaciones relativas (δ / δ_{inst}) de las vigas y condiciones ambientales hasta el momento de la descarga.

(a): valores de δ / δ_{inst} en el centro de cada viga. (— · — · —): viga E6, (·····): viga T4. (b): registros de temperatura y humedad relativa en el local donde se realizó el ensayo. (—): temperatura, (·····): humedad relativa.

La información de la Tabla 3 pone de manifiesto que el valor medio de δ / δ_{inst} crece un 30 % desde el momento inmediatamente posterior a la carga hasta los 2 meses (1,30) y después aumenta un 15 % hasta los 6 meses (1,50), pero en ambos casos con una relativamente baja variabilidad que queda expresada en un valor común de 0,04 para el COV. Luego, el valor medio crece un 19 % desde los 6 meses (1,50) hasta los 12 meses (1,79), pero en este caso acompañado de un pronunciado incremento de la variabilidad que se manifiesta en un valor de 0,12 para el COV. La Tabla 3 confirma que a los 12 meses el valor de δ / δ_{inst} que más se aparta del valor medio corresponde a las vigas E6 y T4 que, curiosamente, exhibieron la misma deformación relativa (2,23) en ese momento (Figura 3a). Un análisis detallado indica que si a los 12 meses se excluyen E6 y T4 el valor medio y el COV de las restantes 12 vigas se reducen a 1,72 y 0,07 respectivamente. Estos resultados confirman que el elevado nivel de tensión ($f_{max-ELD} / f_{rot}$) en E6 y T4 durante el ensayo (Tabla 2), que supera el valor de 0,35 que la experiencia internacional recomienda no alcanzar (Andriamitantoa 1995), se manifiesta claramente también en la deformación relativa.

Tabla 3: Deformaciones relativas (δ / δ_{inst}) correspondientes a distintos períodos de tiempo.

Viga	Determinadas experimentalmente			Extrapoladas ⁽¹⁾
	2 meses	6 meses	12 meses	10 años
E1	1,37	1,55	1,75	2,10
E2	1,35	1,52	1,64	2,04
E3	1,29	1,62	1,91	2,24
E4	1,30	1,45	1,72	1,90
E5	1,21	1,48	1,60	1,95
E6	1,28	1,46	2,23	1,92
E7	1,31	1,50	1,61	2,01
T1	1,31	1,51	1,90	2,03
T2	1,20	1,39	1,50	1,78
T3	1,31	1,49	1,76	1,99
T4	1,36	1,53	2,23	2,06
T5	1,27	1,43	1,61	1,87
T6	1,33	1,52	1,82	2,04
T7	1,26	1,59	1,77	2,19
MED	1,30	1,50	1,79	2,01
COV	0,04	0,04	0,12	0,06

(1): según el criterio reportado por Gowda et al. (1996) y Ranta-Maunus y Kortessmaa (2000).

Tomando como referencia los valores experimentales, resulta de interés verificar la eficacia de las reglas de diseño del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601 (INTI CIRSOC 2016) para estimar las deformaciones en el material que es objeto de este estudio. Este reglamento, en línea con el NDS de EEUU (AWC 2015), considera que la deformación total producida por una carga cuya duración acumulada durante la viga útil de la estructura es de 10 años, puede estimarse como $\delta = K_{cr} \cdot \delta_{inst}$, es decir multiplicando la deformación elástica instantánea por el factor de deformación K_{cr} . Para vigas aserradas como las ensayadas en este proyecto, que se cargaron con un contenido de humedad medio de 10,1 % (COV = 6 %), el valor de $K_{cr} = \delta / \delta_{inst}$ depende de su contenido de humedad en servicio (CH) siendo $K_{cr} = 1,5$ cuando el promedio anual de CH es inferior a 16 % y en ningún momento supera 19 % (estado seco). Cuando estos valores se exceden (estado húmedo) debe tomarse $K_{cr} = 2,0$ (INTI CIRSOC 2016). Con el propósito de conocer las variaciones del CH en la muestra durante el ensayo de larga duración y determinar en consecuencia el valor que corresponde asignar a K_{cr} , se realizó un estudio detallado de los valores de la temperatura y la humedad relativa graficados en la Figura 3b. Los resultados del estudio mostraron que en el lapso de tiempo comprendido entre los 200 y los 360 días, cuando un destacado descenso de la temperatura fue acompañado de un incremento sustancial de la humedad relativa ambiente, hubo períodos relativamente prolongados donde una temperatura promedio de 15 °C coexistió con un valor medio de 90 % en la humedad relativa, lo que evidentemente provocó que el CH de las vigas supere el 20 %. En consecuencia, y según el criterio de este Reglamento, las deformaciones (δ) esperables en este proyecto luego de 10 años se pueden estimar en función de la deformación instantánea aplicando el factor $K_{cr} = \delta / \delta_{inst} = 2,0$.

Si bien en este proyecto no se determinaron valores experimentales de δ en un período de 10 años, conforme a la experiencia internacional éstos se pueden obtener extrapolando los resultados obtenidos a los 6 meses (Gowda *et al.* 1996, Ranta-Maunus y Kortessmaa 2000). Según este criterio, el crecimiento de la deformación diferida ($\delta_{dif} = \delta - \delta_{inst}$) se ralentiza luego de los 6 meses y duplica su valor al cabo de 10 años, resultando $\delta_{10a} = \delta_{inst} + 2(\delta_{6m} - \delta_{inst})$. En consecuencia, a partir de los valores de las deformaciones relativas presentados en la Tabla 3 para 6 meses (δ / δ_{inst})_{6m}, se extrapolaron los correspondientes a 10 años como: $(\delta / \delta_{inst})_{10a} = 2(\delta / \delta_{inst})_{6m} - 1$ y los resultados se incluyeron en la última columna de la mencionada tabla. El valor medio de las 14 vigas (2,01) es prácticamente coincidente con el valor que surge de aplicar el criterio de las reglas de diseño de Argentina ($K_{cr} = \delta / \delta_{inst} = 2,0$). El valor del COV (0,06) indica una relativamente reducida dispersión de valores y por medio de la estimación estadística del rango intercuartílico (RIC), antes mencionada, se confirmó que los valores extremos de la muestra no pueden considerarse atípicos en este caso.

No obstante, la similitud entre el valor medio de δ / δ_{inst} extrapolado a 10 años (2,01) y el adoptado por las reglas de diseño de Argentina (2,0) debe ser considerada con prudencia porque la extrapolación a 10 años de los resultados se hizo a partir de los determinados experimentalmente a los 6 meses, período en el cual la muestra completa aún exhibía un desarrollo estable de la deformación diferida (creep) y en consecuencia de δ / δ_{inst} , como puede apreciarse en la Figura 3a y en la Tabla 3. Sin embargo, luego de los 200 días y en coincidencia con un período de marcado descenso de la temperatura e importante incremento de la humedad relativa ambiente, E6 y T4 experimentaron un destacado crecimiento de δ / δ_{inst} y de sus variaciones cíclicas, registrando a los 12 meses un valor de δ / δ_{inst} (2,23) que es superior al extrapolado a los 10 años para E6 (1,92) y T4 (2,06). En consecuencia, lo que los resultados en realidad prueban es que las reglas de diseño de Argentina expresan adecuadamente el comportamiento de las vigas cuyo nivel de tensión ($f_{max-ELD} / f_{rot}$) no alcanzó el límite recomendado por la experiencia internacional (0,35).

CONCLUSIONES

Las deformaciones (δ) bajo carga constante evolucionaron dentro de una fase estable con la excepción de las vigas cuyo nivel de tensión superó al 35 % de su resistencia instantánea ($f_{max-ELD} / f_{rot} > 0,35$). Tanto en las deformaciones bajo carga como en la recuperación luego de la descarga se pusieron de manifiesto los componentes viscoelástico y mecanosortivo así como la influencia sobre este último de las variaciones cíclicas de la temperatura y la humedad relativa ambiente.

La relación entre la recuperación y la deformación elástica instantánea (R_{inst} / δ_{inst}) mostró un valor medio de 1,04 con un COV igual a 0,05, lo cual prueba una muy reducida discrepancia entre vigas aunque éstas exhibieron amplias diferencias en calidad y fueron ensayadas en un ambiente con marcadas fluctuaciones de la temperatura y la humedad relativa. Por su parte, la relación entre la recuperación y la deformación diferida ($R_{dif-420} / \delta_{dif-28}$) registradas en igual lapso de tiempo mostró un mayor valor medio (1,17) y una muy superior dispersión de valores (COV = 0,53).

El análisis de los resultados permitió conocer los parámetros más relacionados con el comportamiento bajo cargas de larga duración del material investigado, el cual se caracteriza por su elevada presencia de madera juvenil. Se confirmó que, independientemente de su calidad, la estimación eficaz de su deformación requiere evaluar con precisión tanto variables explicitadas en las reglas de diseño como otras libradas al criterio del proyectista. Dentro de las primeras se encuentran la duración acumulada de la carga y el contenido de humedad del miembro estructural, tanto inicial como durante su vida útil. Dentro de las segundas se destaca el nivel de tensión respecto de su resistencia instantánea ($f_{max-ELD} / f_{rot}$), el cual, en línea con la experiencia internacional, debe ser inferior a 0,35.

REFERENCIAS

- AWC. 2015.** NDS: *National Design Specification for Wood Construction*. AWC. Leesburg: VA, EEUU. <https://awc.org/codes-standards/publications/nds-2015>
- Andriamitantsoa, L.D. 1995.** Creep. En: Blass, H.J. *Timber Engineering STEP 1: Basis of Design, Material Properties, Structural Components and Joints*. Centrum Hout: The Netherlands, pp. A19/1-A19/5.
- Calvo, C.F.; Cotrina, A.D.; Cuffré, A.G.; Piter, J.C.; Stefani, P.M.; Torrán, E.A. 2002.** Deformaciones diferidas en probetas pequeñas y libres de defectos de *Eucalyptus grandis* de Argentina. *Maderas-Cienc Tecnol* 4(2): 124-132. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2002000200002>
- Chan-Martín, M.H.; Araujo-Molina, O.; Azueta-García, M. 2002.** Los defectos naturales en la madera aserrada. *Ingeniería* 6(001): 29-38. <https://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen6/losdefectos.pdf>
- CEN. 2012.** UNE-EN 408:2011+A1:2012: Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. AENOR: Madrid, España. <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/une/?Tipo=N&c=N0049928>
- CEN. 2016.** UNE-EN 1995-1-1: Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. AENOR: Madrid, España. <https://www.en.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/UNE?c=N0056510>
- Donaldson, L. 2008.** Microfibril angle: measurement, variation and relationships – a review. *IAWA Journal* 29(4): 345-386. <http://dx.doi.org/10.1163/22941932-90000192>
- Fank, P.Y. 2018.** Caracterización físico-mecánica del pino resinoso (*Pinus taeda* y *Pinus elliotii*) cultivado en el nordeste argentino para uso estructural. Tesis Doctoral, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina. <http://hdl.handle.net/20.500.12272/3344>
- Fank, P.Y.; Ramos, M.R.; Stefani, P.M.; Piter, J.P. 2017.** Evaluación de las deformaciones diferidas en piezas estructurales de pino resinoso cultivado en el nordeste de Argentina. En Actas del II Congreso Latinoamericano de Estructuras de Madera y II Congreso Ibero-Latinoamericano de la Madera en la Construcción (CLEM+CIMAD 2017). 17-19 de mayo, 2017. Junín, Argentina. 11p. <https://clem-cimad2017.unnoba.edu.ar/papers/T3-08.pdf>
- Gowda, C.; Kortessmaa, M.; Ranta-Maunus, A. 1996.** Long term creep tests on timber beams in heated and non-heated environments. Publications 278. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus (VTT): Finland 35p. <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/publications/1996/P278.pdf>
- Honfi, D. 2014.** Design for serviceability - A probabilistic approach. Doctoral Dissertation, LUND University, Sweden. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.4732.1361>
- Instituto Nacional de Tecnología Industrial y Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles. 2016.** CIRSOC 601: Reglamento Argentino de Estructuras de Madera. INTI-CIRSOC: Buenos Aires, Argentina. <https://www.inti.gov.ar/areas/servicios-industriales/construcciones-e-infraestructura/cirsoc/reglamentos>
- ISO. 2014a.** ISO 13061-1: Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 1. Determination of moisture content for physical and mechanical tests. ISO: Switzerland. <https://www.iso.org/standard/60063.html>

ISO. 2014b. ISO 13061-2: Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 2. Determination of density for physical and mechanical tests. ISO: Switzerland. <https://www.iso.org/standard/60064.html>

Moya, L.; Domenech, L.; Cardoso, A.; O'Neill, H.; Baño, V. 2017. Proposal of visual strength grading rules for Uruguayan pine timber. *European Journal of Wood and Wood Products* 75: 1017-1019. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1208-5>

Nordström, J.; Sandberg, D. 1994. The rheology of wood – Considerations of the mechano-sorptive creep. Royal Institute of Technology: Stockholm, Sweden, 11p. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:540943/FULLTEXT01.pdf>

Piter, J.C.; Calvo, C.F.; Cuffré, A.G.; Rougier, V.C.; Sosa-Zitto, M.A.; Torrán, E.A. 2007. Creep in structural-sized beams of Argentinean *Eucalyptus grandis*. *Maderas-Cienc Tecnol* 9(2): 117-126. https://scielo.conicyt.cl/pdf/maderas/v9n2/art_02.pdf

Piter, J.C.; Zerbino, R.L.; Blaß, H.J. 2006. Deflections in beams of Argentinean *Eucalyptus grandis* under long-term loading. *Holz Roh Werkst* 64: 351-355. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00107-005-0085-5>

Pope, D.; Abdul-Wahab, H. 2004. Long term creep and creep recovery of timber beams. In Proceedings of the 8th World Conference on Timber Engineering (WCTE 2004). Lahti, Finland, June 14-17, 2004. 4p. http://support.sbcindustry.com/Archive/2004/jun/Paper_308.pdf?PHPSESSID=ju29kfh90oviu5o371pv47c-gf3

Ranta-Maunus, A. 1995. Creep and effects of moisture in timber. Informationsdienst Holz *STEP* 3. Arbeitsgemeinschaft Holz e. V: Duesseldorf, p. 4/1-4/21.

Ranta-Maunus, A.; Kortessmaa, M. 2000. Creep of timber during eight years in natural environments. In Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2000). July 31-August 3, 2000. Whistler, Canada, 6p. https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/jurelinkit/RTE_Ranta-Maunus3.pdf

Roszyk, E.; Mania, P.; Moliński, W. 2012. The influence of microfibril angle on creep Scotch pine wood under tensile stress along the grains. *Wood Res-Slovakia* 57(3): 347-358. <http://www.woodresearch.sk/wr/201203/01.pdf>

Roszyk, E.; Moliński, W.; Jasińska, M. 2010. The effect of microfibril angle on hygromechanic creep of wood under tensile stress along the grains. *Wood Res-Slovakia* 55(3): 13-24. <http://www.woodresearch.sk/wr/201203/01.pdf>

Santini, E.J.; Haselein, C.R.; Gatto, D.A. 2000. Análise comparativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira de três coníferas de florestas plantadas. *Ciênc Florest* 10(1): 85-93. <https://doi.org/10.5902/19805098397>

Thelandersson, S. 1995. Serviceability limit states - Deformations. En: Blass, H.J. *Timber Engineering STEP 1: Basis of Design, Material Properties, Structural Components and Joints*. Centrum Hout: The Netherlands, p. A17/1-A17/8.

Torrán, E.A.; Sosa-Zitto, M.A.; Gonzalez, A.A.; Piter, J.C. 2008. Creep in beams of Argentinean *Eucalyptus grandis* loaded in unseasoned state. *Holz Roh Werkst* 66:201-205. <https://doi.org/10.1007/s00107-007-0215-3>

Yin, Y.; Bian, M.; Song, K.; Xiao, F.; Xiaomei, J. 2011. Influence of microfibril angle on within-tree variations in the mechanical properties of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*). *LAWA Journal* 32(4): 431-442. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000069>