

Ajuste de los factores de diseño en compresión axial para madera laminada encolada del álamo

Adjustment of axial compression design factors for Glued Laminated Timber of poplar

Lía Caren Meyer¹ <https://orcid.org/0000-0001-5187-1744>[♦]

Gamaliel López² <https://orcid.org/0000-0003-3418-0583>

Alfredo Anibal Guillaumet³ <https://orcid.org/0000-0001-9279-0019>

Ma. Alexandra Sosa-Zitto⁴ <https://orcid.org/0000-0001-5001-3879>

¹Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Venado Tuerto. Departamento de Ingeniería Civil. Grupo de Investigación y Desarrollo de Estructuras Civiles (GIDEC). Venado Tuerto, Argentina.

²Universidad de Valladolid. ETS de Arquitectura. Departamento de Construcciones Arquitectónicas. Valladolid, España.

³Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Venado Tuerto. Departamento de Ingeniería Civil. Grupo de Investigación y Desarrollo de Estructuras Civiles (GIDEC). Venado Tuerto, Argentina.

⁴Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Concepción del Uruguay. Departamento de Ingeniería Civil. Grupo de Estudio de Maderas (GEMA). Concepción del Uruguay, Argentina. alexandrasosazitto@gmail.com

[♦]Autor de correspondencia: lmeyer@frvt.utn.edu.ar

Resumen:

La compresión axial en elementos de madera laminada encolada (glulam) requiere de un dimensionamiento preciso que considere tanto las propiedades mecánicas del material como los efectos de esbeltez. En este contexto, los reglamentos vigentes presentan limitaciones al aplicar valores únicos para los factores de estabilidad (C_p) y de inestabilidad (K_c), sin contemplar las variaciones propias de cada especie ni los modos de falla por pandeo. El presente estudio aborda esta problemática mediante barras de madera laminada de *Populus deltoides*, con el objetivo de ajustar los parámetros “c” y “ β_c ” que intervienen en el cálculo de dichos factores. Se llevaron a cabo ensayos de compresión axial en un total de 320 probetas en el rango de esbeltez comprendido entre 30 a 100. A partir de los resultados experimentales de las tensiones de rotura del percentil 5 % y la resistencia a compresión paralela a las fibras, se determinaron los valores óptimos de los parámetros “c” y “ β_c ”. El reglamento argentino usa un único valor de $c=0,9$ para piezas de madera laminada encolada de aplicación práctica. Sin embargo, este valor evidencia la necesidad de ajustes para mejorar el dimensionamiento en elementos comprimidos, obteniendo un valor menor de “c”. Por otro lado, el criterio europeo con $\beta_c = 0,1$ tiende a sobrestimar las cargas de compresión. No obstante, el mayor valor de β_c determinado con el programa experimental, presentó una mejor correlación para todas las esbelteces, reduciendo las sobrestimaciones de las cargas a compresión. Los resultados confirman

que ajustar los parámetros “c” y “ βc ” mejora significativamente la precisión del dimensionado y optimizando el diseño en elementos comprimidos.

Palabras clave: Álamo, compresión axial, Glulam, madera laminada encolada, pandeo, *populus deltoides*, propiedades mecánicas de la madera.

Abstract:

Axial compression in glued laminated timber (glulam) elements requires precise dimensioning that consider both the mechanical properties of material and effects of slenderness. In this context, current regulations present limitations by applying single values for stability (C_P) and instability (K_c) factors, without considering the variations inherent to each species or the modes of buckling failure. This study addresses this issue using *Populus deltoides* glulam bars, with the aim of adjusting the parameters “c” and “ βc ” involved in the calculation of these factors. Axial compression tests were carried out on a total of 320 samples within slenderness range of 30 to 100. Based on the experimental results of the 5th percentile failure stresses and fiber-parallel compressive strength, the optimal values of parameters “c” and “ βc ” were determined. The Argentine regulation uses a single value of $c = 0,9$ for glulam members in practical application. However, this value highlights the need for adjustments to improve the dimensioning of compressed elements, resulting in a lower value of ‘c’. On the other hand, the European criterion with $\beta c = 0,1$ overestimates the compressive loads. However, the highest value of βc , as determined by the experimental program, showed a better correlation for all slenderness ratios, reducing the overestimates of compression loads. The results confirm that adjusting the parameters ‘c’ and ‘ βc ’ significantly improves the accuracy of dimensioning and optimizes the design of compressed elements.

Keywords: Poplar, axial compression, Glulam, glued laminated timber, structural buckling, *Populus deltoides*, mechanical properties of wood.

Recibido: 17.11.2024

Aceptado: 09.01.2026

Introducción

La inestabilidad del equilibrio en miembros de madera ha sido investigada por diversos autores a lo largo del tiempo. Desde los estudios pioneros de Newlin y Gahagan (1930) hasta las contribuciones de Johnston (1961), Zahn (1982), Blaß (1987), se ha demostrado con la teoría elemental que la capacidad de un elemento comprimido es función de la esbeltez. Como resultado, surgen los factores de estabilidad (C_P) o inestabilidad (K_c), que están influenciados por el módulo de elasticidad y por la tensión de rotura (resistencia) en compresión paralela a las fibras de la especie de madera a utilizar.

Desde la década de 1990, la evolución normativa ha actualizado las reglas de diseño, como se refleja en la National Design Specification (NDS), que reemplaza la parábola de la cuarta potencia por la fórmula de Ylinen (1956). Esta representa una interacción no lineal entre los dos modos de falla, aplastamiento y pandeo, a través de un parámetro “c” que determina el factor de estabilidad de miembros comprimidos (C_P) (Ecuación 1). Cuando “c” es igual a 1 indica una interacción mínima, es decir, que la falla es producida por aplastamiento y pandeo en una situación “ideal”. Sin embargo, el valor de “c” es siempre menor que 1 para todos los materiales reales, debido a una mayor interacción entre los modos de falla. Además, este parámetro no incluye ningún factor de seguridad y solo puede ajustarse a partir de datos empíricos.

Por otro lado, el Eurocódigo 5 (2016) se basa en el método de la longitud efectiva, que en líneas generales es similar al empleado en elementos de acero, donde la capacidad de compresión se reduce por el factor de inestabilidad (K_c), que aparece en la (Ecuación 4). Este factor (K_c) incluye valores fijos para la esbeltez relativa crítica $\lambda_{rel,0} = 0,30$ y para el factor de rectitud $\beta_c = 0,1$, determinados para maderas blandas por Blaß (1987).

A pesar de las diferencias en la configuración de las normativas mencionadas, es evidente que han sido establecidas a partir de modelos desarrollados originalmente para otros materiales y experimentos, y aplicadas sobre especies y procedencias específicas. Esta

situación plantea un problema técnico concreto donde los valores normativos actuales de los parámetros “ c ” y “ β_c ” no representa adecuadamente el comportamiento a compresión de especies locales como el álamo (*Populus deltoides*), generando sobredimensionamientos y discrepancias en el diseño estructural.

En este trabajo, se analiza el comportamiento mecánico de elementos de madera laminada encolada estructural, también conocida como Glulam, fabricados con láminas dispuestas en orientación paralela a las fibras, conforme a la norma IRAM 9660-1 (2015). Este tipo de producto se diferencia de otros sistemas de madera laminada como la madera contralaminada (CLT). El enfoque experimental justifica la relevancia de una base sólida para verificar la aplicabilidad de los parámetros normativos en especies locales.

El objetivo es determinar, mediante ensayos de compresión axial centrada, si los valores de “ c ” y “ β_c ” definidos en las normativas CIRSOC 601 (2016) y Eurocódigo 5 (2016) requieren ajustes para optimizar el diseño en elementos de madera laminada encolada de *Populus deltoides*.

Reglas de diseño

Reglamento CIRSOC 601

El reglamento establece un coeficiente denominado factor de estabilidad (C_p), que es utilizado para ajustar la capacidad a compresión de la pieza estructural, teniendo en cuenta

los efectos de la esbeltez. Los valores menores que 1 establecen una disminución de la carga admisible para mantener la estabilidad y se determina con la siguiente expresión (Ecuacion 1):

$$C_P = \frac{1 + \left(\frac{F_{cE}}{F_c^*} \right)}{2c} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{F_{cE}}{F_c^*} \right)}{2c} \right)^2 - \frac{F_{cE}}{F_c^*}} \quad (1)$$

F_{cE} : tensión crítica de Euler en miembros comprimidos, en MPa. (Ecuacion 2)

$$F_{cE} = \frac{0,822 E'_{\min}}{\left(\frac{l_e}{d} \right)^2} \quad (2)$$

E'_{\min} = módulo de elasticidad mínimo, en MPa.

l_e : longitud efectiva, en mm

d : lado menor, en mm

F_c^* : tensión de diseño de referencia en compresión paralela a las fibras de referencia multiplicada por todos los factores aplicables, menos C_P , en MPa.

c : coeficiente que depende si los miembros son de madera aserrada estructural, miembros estructurales de madera de sección circular o madera laminada encolada estructural; unidad adimensional.

La tensión crítica a compresión ($F'_{c;C601}$) queda definida como (Ecuacion 3):

$$F'_{c;C601} = F_c C_P \quad (3)$$

Eurocódigo 5

El criterio europeo utiliza el factor de inestabilidad (k_c) para considerar el fenómeno de pandeo, que tiene en cuenta la influencia de la esbeltez sobre la capacidad portante de la madera. Se determina con las siguientes ecuaciones (Ecuación 4, Ecuación 5 y Ecuación 6):

$$K_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} \quad (4)$$

$$k = 0,5 \left[1 + \beta_c (\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2 \right] \quad (5)$$

k : coeficiente de minoración, adimensional.

β_c : factor para piezas que cumplen los límites de rectitud para madera maciza, dependiendo si es madera laminada encolada o microlaminada, adimensional.

λ_{rel} : esbelteces relativas según las propiedades mecánicas correspondientes a la flexión respecto al eje de menor dimensión.

$$\lambda_{rel} = \sqrt{\frac{f_{c;0,k}}{\sigma_{crit}}} \quad (6)$$

$f_{c,0,k}$: resistencia característica de compresión paralela a las fibras, en MPa.

σ_{crit} : tensión crítica de pandeo de Euler, en MPa. Utiliza el valor del módulo de elasticidad paralelo a las fibras percentil 5 % ($E_{0,05}$);

La tensión de compresión crítica ($\sigma_{c,0,k}$) queda definida (Ecuación 7) de la siguiente manera:

$$\sigma_{c,0,k} = f_{c,0,k} K_c \quad (7)$$

Materiales y métodos

Materiales

En este trabajo se utilizó madera de los clones ‘Australiano 129/60’ y ‘Stoneville 67’ de la especie (*Populus deltoides*), cultivados en el Delta del río Paraná (Argentina). Esta especie, ha sido ampliamente estudiada. Presenta aptitud para uso estructural como madera maciza y madera laminada encolada, contando además con normativa de clasificación visual resistente (IRAM 9662-4, 2015).

Para este estudio se fabricaron elementos de madera laminada encolada con orientación paralela a las fibras, compuestos por tres láminas longitudinales unidas mediante

empalmes de uniones dentadas (finger joints), en conformidad con los requisitos establecidos en la norma IRAM 9660-1 (2015). Las tablas utilizadas fueron clasificadas visualmente como Clase 1 de acuerdo con la norma IRAM 9662-4 (2015). Para la unión de laminas se empleó adhesivo para estructuras de madera conforme a la norma IRAM 45055 (2022).

Se prepararon un total de 320 probetas, distribuidas en ocho escalones de esbeltez. Cada esbeltez incluye 40 probetas, compuesta con 20 muestras de cada clon. Todas las probetas fueron almacenadas en una cámara a una temperatura controlada de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y con humedad relativa ambiente de $65\% \pm 5\%$ hasta el momento del ensayo.

Ensayo de compresión centrada

Los ensayos se realizaron sobre probetas con longitudes comprendidas entre 520 mm y 1732 mm, abarcando el rango de esbeltez comprendido entre 30 y 100.

En la Tabla 1 se muestran los rangos de esbeltez, la longitud efectiva y la cantidad de probetas.

Tabla 1: Detalle de las probetas a ensayar.

| | | | | | | | | |
|-----------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|
| λ | 30 | 40 | 49 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| le (mm) | 520 | 693 | 846 | 1039 | 1212 | 1386 | 1559 | 1732 |
| n | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |

λ : Esbeltez; le: longitud efectiva; n: número de muestras

Los ensayos se llevaron a cabo mediante vínculos biarticulados, asegurando la verticalidad de las piezas mediante el uso de niveles láser. La carga se aplicó a una velocidad constante utilizando un equipo hidráulico. La medición de la carga de rotura se realizó con un dispositivo equipado con cuatro celdas de cargas compensadas, con una capacidad máxima de 200 kN. En la Figura 1, se muestra el dispositivo de ensayo, la probeta y los vínculos en los extremos (articulado-articulado).



Figura 1: Ensayo a compresión axial centrada.

Resultados y discusión

Tensiones de rotura a compresión centrada

Las tensiones de rotura obtenidas en los ensayos a compresión centrada para cada esbeltez se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2: Tensiones de rotura en MPa.

| λ | 30 | 40 | 49 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Mínimo | 28,06 | 24,18 | 19,94 | 15,25 | 12,80 | 10,94 | 9,26 | 7,63 |
| Medio | 32,04 | 30,15 | 22,90 | 18,12 | 15,30 | 12,78 | 10,80 | 9,19 |
| Máximo | 45,63 | 36,60 | 30,53 | 24,85 | 19,26 | 15,39 | 13,18 | 10,96 |
| Percentil 5 % | 28,28 | 24,48 | 20,01 | 15,65 | 13,45 | 11,05 | 9,35 | 7,70 |
| COV % | 12,72 | 12,09 | 11,84 | 11,79 | 12,08 | 10,16 | 11,47 | 10,74 |

λ : Esbeltez; COV: Coeficiente de variación

Los valores de la Tabla 2 reflejan la influencia de la esbeltez en la capacidad de carga a compresión como indica la teoría elemental de pandeo. Los coeficientes de variación para el rango de esbeltez entre 30 a 100 oscilan entre un 10 % y 12 %, mostrando una baja dispersión de los valores. Los valores del percentil 5 % se utilizarán para verificar los parámetros de las normativas.

Análisis de los factores de estabilidad o inestabilidad

En la Tabla 3, se presentan los valores del módulo de elasticidad determinados mediante ensayos a flexión (Meyer *et al.* 2020) y los valores de tensión de rotura y módulo de

elasticidad a compresión paralela a las fibras (Meyer *et al.* 2023), todos obtenidos de la misma población. Estos datos fueron ajustados para un contenido de humedad del 12 %.

Tabla 3: Datos experimentales en MPa.

| | | |
|---------------------|-------------|-------|
| Flexión | E_{min} | 8056 |
| Compresión paralela | $E_{0,05}$ | 9495 |
| | $F_{c0,05}$ | 36,39 |

E_{min} : Módulo de elasticidad mínimo; $E_{0,05}$: Módulo de elasticidad percentil 5 % $F_{c0,05}$: Tensión de rotura a compresión paralelas a las fibras percentil 5 %.

Los valores de las propiedades mecánicas obtenidos experimentalmente para la especie en estudio, presentados en la Tabla 3, resultan superiores a los valores de diseño de referencia publicados en el CIRSOC 601 (2016). Por lo tanto, resulta técnicamente apropiado incorporar dichos valores para ajustar los parámetros de estabilidad (C_P) e inestabilidad (K_c) según los criterios del CIRSOC 601 (2016) y el Eurocódigo 5 (2008), con el fin de garantizar resultados representativos y coherentes con el comportamiento real del material.

Parámetro “c”

De acuerdo con el reglamento del CIRSOC 601 (2016), en la Tabla 4 se muestran los valores del factor de estabilidad de miembros comprimidos (C_P) obtenidos utilizando la Ecuación 1, con el percentil 5 % de la tensión a rotura a compresión paralela a las fibras y con el módulo de elasticidad mínimo a flexión (Tabla 3). Se utilizaron valores de $c=0,9$

(valor fijado para madera laminada encolada) - 0,70 - 0,60 - 0,55, y se los ha comparado con el C_P experimental, que es la relación $f_R/F_{c0,05}$:

Tabla 4: Valores de “ C_P ”.

| λ | L_e (mm) | $(l_e/\pi d)\sqrt{12F_c/E}$ | F_{cE} | C_P $c=0,7$ | C_P $c=0,6$ | C_P $c=0,55$ | C_P $c=0,9$ | $f_R/F_{c0,05}$ |
|-----------|---------------|-----------------------------|----------|------------------|------------------|-------------------|------------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 30 | 520 | 0,64 | 88,29 | 0,86 (11%) | 0,83 (7%) | 0,81 (5%) | 0,94 (21%) | 0,78 |
| 40 | 693 | 0,86 | 49,67 | 0,74 (10%) | 0,70 (4%) | 0,69 (2%) | 0,86 (27%) | 0,67 |
| 49 | 846 | 1,04 | 33,31 | 0,62 (12%) | 0,59 (6%) | 0,57 (4%) | 0,72 (32%) | 0,55 |
| 60 | 1039 | 1,28 | 22,07 | 0,48 (11%) | 0,45 (6%) | 0,45 (4%) | 0,54 (26%) | 0,43 |
| 70 | 1212 | 1,50 | 16,22 | 0,38 (2%) | 0,36 (-2%) | 0,36 (2%) | 0,42 (13%) | 0,37 |
| 80 | 1386 | 1,71 | 12,42 | 0,30 (0%) | 0,29 (-4%) | 0,29 (-4%) | 0,33 (7%) | 0,30 |
| 90 | 1559 | 1,93 | 9,81 | 0,25 (-4%) | 0,24 (-7%) | 0,24 (-7%) | 0,26 (0%) | 0,26 |
| 100 | 1732 | 2,14 | 7,95 | 0,20 (-4%) | 0,20 (-6%) | 0,20 (-6%) | 0,21 (0%) | 0,21 |

λ : Esbeltez; L_e : Longitud efectiva; $(L_e/\pi d)\sqrt{12F_c/E}$: es la relación $\sqrt{F_c/F_{cE}}$; F_{cE} : Tensión crítica de Euler; C_P : Factor de estabilidad de miembros comprimidos; c : Coeficiente para MLE; f_R : Tensión de rotura experimental; $F_{c0,05}$: Tensión de compresión paralelas a las fibras percentil 5 %

Las cargas de rotura a compresión varían con relación al factor de estabilidad (C_P), como se muestra en la Tabla 4. Los resultados con $c = 0,9$ para esbelteces bajas ($\lambda < 70$), revela valores de C_P entre un 20 % y 32 % superiores respecto del C_P experimental ($f_R/F_{c0,05}$), lo que implica una sobrestimación de la carga de rotura a compresión. En las esbelteces altas ($\lambda = 80, 90, 100$) la diferencia se reduce significativamente (≤ 7 %) acercándose al comportamiento real. Los resultados con $c = 0,7$ presentan una diferencia promedio del

10 % respecto de los C_P experimentales en esbelteces bajas ($\lambda < 70$), con una tendencia a subestimar levemente la carga en esbelteces altas ($\lambda \geq 80$), (máximo -4 %). Valores de “c” ($c = 0,6$ y $0,55$) generan valores de C_P más conservadores en todo el rango de esbeltez, con diferencias menores del $\pm 7 \%$ y 5% respectivamente. Esto sugiere una mayor coherencia con los resultados experimentales

En la Figura 2, se muestran los valores de C_P (Tabla 4) en relación con $(L_e/\pi d)\sqrt{12F_c/E}$, obtenida de despejar $\sqrt{F_c/F_{cE}}$. Esta representación gráfica proporciona una visualización más clara de las variaciones del factor de estabilidad en función de la esbeltez, destacando la influencia de los diferentes valores de “c” y comparándolos con los valores experimentales ($f_R/F_{c0.05}$).

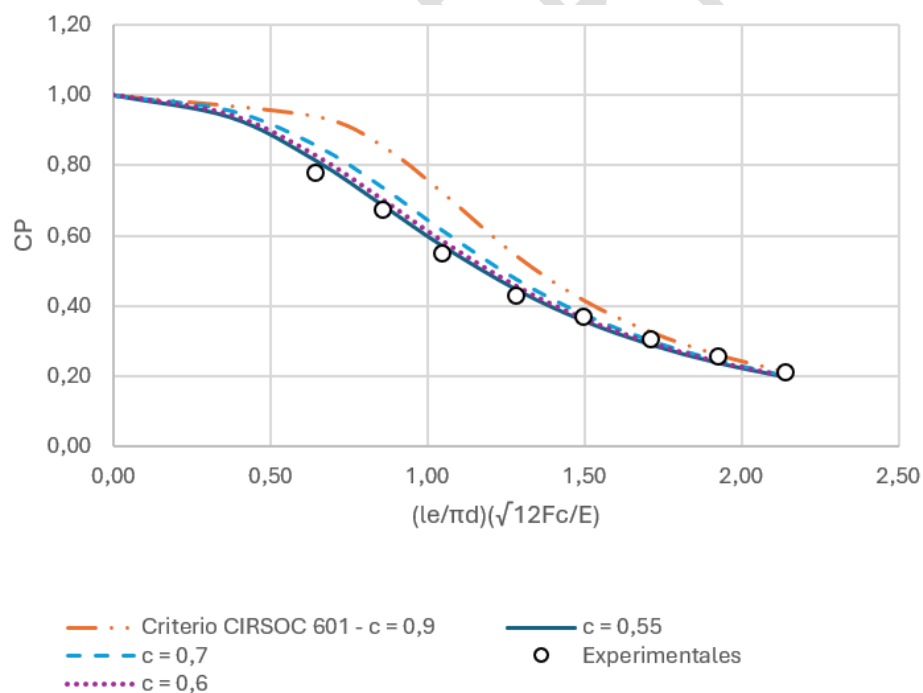


Figura 2: Valores de C_P para distintos “c”.

La elección del parámetro “c” impacta directamente en la estimación de la carga de rotura a compresión. Los valores altos (como $c = 0,9$) tienden a sobrestimar la capacidad en miembros de baja esbeltez, mientras que los valores más bajos ($c = 0,6 - 0,55$) ofrece una

aproximación más representativa del comportamiento observado en el rango de esbeltez analizado ($\lambda = 30$ a 100). Esta tendencia coincide con lo reportado por Zahn y Rammer (1995) que proponen valores de “c” menores para madera laminada encolada de Douglas fir (*Pseudotsuga menziesi* (Mirb.) Franco) ($c = 0,76$) y southern pine (*Pinus spp.*) ($c = 0,83$), en función de su comportamiento estructural.

El análisis realizado indica que, en piezas cortas, se producen sobrestimaciones en la carga de compresión cuando se emplean valores altos de “c”. Sin embargo, dado que el Reglamento utiliza un valor de “c” único y aplicable para todas las especies, las diferencias no ponen en riesgo la estructura y su utilización es práctica.

Parámetro “ β_c ”

El Eurocódigo 5 (2016), establece la determinación del factor de inestabilidad (K_c) a partir de la Ecuación 4. Se utilizó el percentil 5 % del módulo de elasticidad y de la tensión a compresión paralela a las fibras de la Tabla 3. Los valores de K_c se presentan en la Tabla 5, calculados para diferentes valores de $\beta_c = 0,1$ (valor fijado para madera laminada) – $0,25$ – $0,4$ y $0,5$. Estos resultados se compararon con $(f_R/F_{c0,05})$, que es la relación que determina los valores experimentales (K_c).

Tabla 5: Valores de “ K_c ”.

| λ | L_e (mm) | σ_{crit} ($E_{0,05}$) | K_c $\beta_c=0,25$ | K_c $\beta_c=0,4$ | K_c $\beta_c=0,5$ | K_c $\beta_c=0,1$ | $f_R/F_{c0,05}$ |
|-----------|---------------|-----------------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 30 | 520 | 104,07 | 0,90 (16%) | 0,86 (10%) | 0,83 (7%) | 0,96 (23%) | 0,78 |
| 40 | 693 | 58,54 | 0,80 (19%) | 0,74 (9%) | 0,70 (4%) | 0,90 (34%) | 0,67 |
| 49 | 846 | 39,26 | 0,69 (25%) | 0,62 (12%) | 0,58 (6%) | 0,80 (45%) | 0,57 |
| 60 | 1039 | 26,02 | 0,53 (24%) | 0,48 (12%) | 0,45 (5%) | 0,61 (43%) | 0,45 |
| 70 | 1212 | 19,11 | 0,42 (14%) | 0,38 (4%) | 0,36 (-2%) | 0,47 (28%) | 0,37 |
| 80 | 1386 | 14,63 | 0,34 (11%) | 0,31 (2%) | 0,29 (-3%) | 0,37 (22%) | 0,30 |
| 90 | 1559 | 11,56 | 0,27 (6%) | 0,25 (-1%) | 0,24 (-6%) | 0,30 (16%) | 0,26 |
| 100 | 1732 | 9,37 | 0,23 (7%) | 0,21 (0%) | 0,20 (-4%) | 0,24 (15%) | 0,21 |

λ : Esbeltez; L_e : Longitud efectiva; σ_{crit} : Tensión crítica de Euler con módulo de elasticidad percentil 5 %; K_c : Factor de inestabilidad de miembros comprimidos; β_c = Coeficiente para MLE f_R : Tensión de rotura experimental; $F_{c0,05}$: Tensión de compresión paralelas a las fibras percentil 5 %.

Los factores de inestabilidad calculados con $\beta_c = 0,1$, resultan ser superiores en todo el rango de esbeltez (Tabla 5). Las diferencias varían alcanzando un máximo del 42 % para esbelteces cortas y disminuyendo a un mínimo del 17 % para esbelteces altas, en comparación con los valores experimentales ($f_R/F_{c0,05}$). Al utilizar $\beta_c = 0,25$, las diferencias se reducen, oscilando entre el 16 % y el 22 % para las esbelteces cortas y alcanzando aproximadamente un 10 % para esbelteces largas ($\lambda = 80, 90$ y 100). Con $\beta_c = 0,4$ se observa una buena correlación con los valores experimentales, con diferencias que varían de 11 % ($\lambda = 30$) a un 2 % ($\lambda = 100$). Finalmente, con $\beta_c = 0,5$ los resultados se aproximan más a los valores experimentales con diferencias del 7 % en $\lambda = 30$ hasta que disminuye a un -3 % en $\lambda = 100$. Estas últimas con carga propuestas ligeramente menores a las experimentales.

Los valores de β_c comprendido entre 0,4 y 0,5 muestran una mayor estabilidad en todo el rango analizado y una mejor correspondencia con el comportamiento real de las piezas. Por lo tanto, puede considerarse como más representativo para el diseño estructural de elementos de madera laminada encolada del *Populus deltoides*, en los clones ‘Stoneville 67’ y ‘Austrialiano 129/60’, particularmente para reducir la incertidumbre en la estimación de la carga de rotura por inestabilidad.

En la Figura 3, la gráfica permite visualizar las variaciones del factor de inestabilidad (K_c) en función de la esbeltez. Los valores de (K_c) experimentales obtenidos de la relación ($f_R/F_{c0,05}$) se comparan con los determinados utilizando distintos valores de β_c , dentro del rango de esbeltez estudiado.

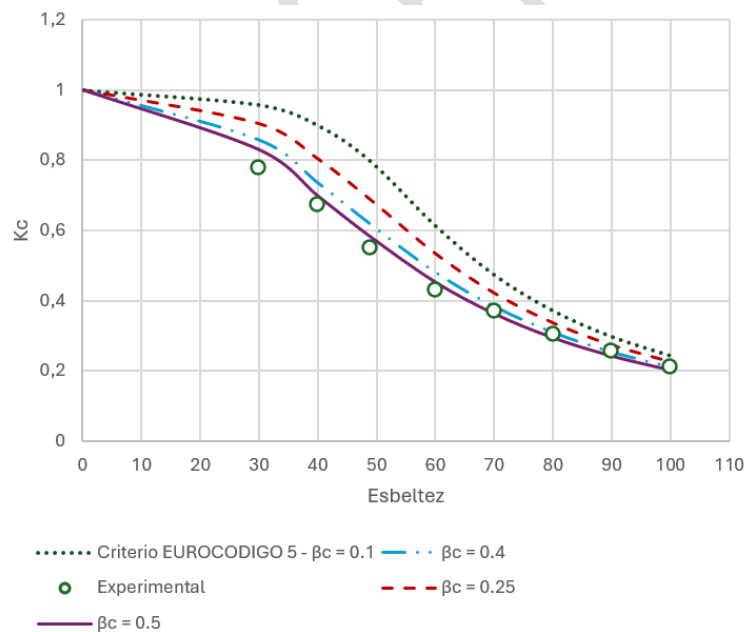


Figura 3: Valores de K_c para distintos β_c .

En la Figura 3, se observa que los valores de $\beta_c = 0,4 - 0,5$, muestran mejor ajuste con los valores experimentales para todas las esbelteces de 30 a 100. En contraste, $\beta_c = 0,1$ presenta

una notable sobrestimación de la resistencia a la compresión, coincidiendo con lo reportado por Ehrhart *et al.* (2020), donde los parámetros establecidos por el Eurocódigo 5 (20) pueden conducir a un sobredimensionado de hasta un 18 % en madera laminada de european beech (*Fagus sylvatica* L.) de procedencia europea.

El parámetro “c”, tradicionalmente utilizado en modelos de inestabilidad, presenta una formulación más directa pero menos flexible ante variaciones en la esbeltez, lo que puede generar desviaciones significativas respecto a los valores experimentales, especialmente en rangos extremos. En cambio, el parámetro “ β_c ” se ajusta con mayor precisión a la curva de inestabilidad, ofreciendo una mejor correlación con los resultados experimentales en todo el rango de esbeltez analizado. Si bien su aplicación requiere una calibración más cuidadosa, su capacidad para reducir las diferencias entre los valores teóricos y reales lo convierte en una alternativa más robusta y representativa para el diseño estructural. Para los elementos estructurales sometidos a compresión en todo el rango de esbelteces estudiado, el análisis revela un sobredimensionado significativamente mayor en comparación con el criterio establecido por el reglamento CIRSOC 601 (2016). En este contexto, ajustar el valor de β_c podría resultar una solución económica y técnica para optimizar el diseño estructural.

Conclusiones

Las normativas examinadas en este trabajo, basadas en diferentes modelos estadísticos y en consideraciones específicas sobre las propiedades mecánicas de la especie de madera,

dan lugar a variaciones significativas en el dimensionado de los elementos estructurales comprimidos. Los factores de estabilidad (C_P) o inestabilidad (K_c) están influenciados por los parámetros “ c ” y “ β_c ”, que condicionan la capacidad resistente a través del comportamiento de la curva de pandeo de acuerdo con los supuestos en las propiedades mecánicas y las imperfecciones del material.

En relación con el parámetro “ c ”, el valor convencional ($c = 0,9$) tiende a sobrestimar la capacidad resistente en elementos de baja esbeltez. En cambio, el valor de $c = 0,6$ mostró una mejor correlación con los resultados experimentales en el rango de 30 a 100, reduciendo la discrepancia entre la normativa y el comportamiento real. Este ajuste representa con mayor precisión los modos de falla por pandeo en madera laminada del *Populus deltoides* en los clones ‘Stoneville 67’ y ‘Australiano 129/60’, con un dimensionado más eficiente que evita sobredimensionamientos innecesarios.

Asimismo, al ajustar el parámetro $\beta_c = 0,4$, se logra una alta concordancia con los resultados experimentales y los modelos analíticos en todo el rango de esbeltez, describe con mayor fidelidad el comportamiento mecánico y contribuye a la optimización del diseño estructural.

Por último, los resultados obtenidos no solo validan el modelo propuesto frente a los criterios normativos vigentes, sino que también evidencian la necesidad de ajustar y actualizar las normas técnicas vigentes, incorporando parámetros de diseño que reflejen con mayor precisión el comportamiento real de la madera laminada encolada sometida a compresión axial. Estos hallazgos ofrecen una base sólida para el aprovechamiento estructural de las especies locales como el álamo (*Populus deltoides*), ampliando sus posibilidades de aplicación en proyectos de ingeniería civil y fortaleciendo la representatividad de los reglamentos en contextos regionales.

Contribución de los autores

L.M.: Conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, software, validación, visualización, redacción del borrador original, redacción: revisión y edición. G.L.: Supervisión, validación, redacción: revisión y edición. A.A.G.: Conceptualización, adquisición de fondos, investigación, administración de proyecto, recursos, supervisión, redacción: revisión y edición. M.A.S.Z.: Supervisión, validación, redacción: revisión y edición.

Declaración de intereses

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés.

Referencias:

- Blaß, H.J. 1987.** Design of timber columns. In: International Council for Building Research, Studies and Documentation - Working Commission W18A - Timber Structures (CIB-W18A/20-2-22). Paper 20-2-22. CIB: Dublin, Ireland.
https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB_DC29811.pdf
- Blaß, H.J. 1987.** Tragfähigkeit von Druckstäben aus Brettschichtholz unter Berücksichtigung streuender Einflussgrößen. Dissertation. University Fridericiana Karlsruhe. Karlsruhe, Germany.
- CIRSOC 601. 2016.** Reglamento de estructuras de madera. Disposiciones generales y requisitos para el diseño y la construcción de madera en edificaciones. CIRSOC 601. CIRSOC: Buenos Aires, Argentina.
<https://www.inti.gob.ar/assets/uploads/files/cirsoc/aprobados%20en%202016/CIRSOC601-completo.pdf>
- Ehrhart, T.; Steiger, R.; Palma, P.; Gehri, E.; Frangi, A. 2020.** Glulam columns made of European beech timber: compressive strength and stiffness parallel to the grain, buckling resistance and adaptation of the effective-length method according to Eurocode 5. *Materials and Structures* 53. e91. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01524-6>
- EUROCÓDIGO 5. 2016.** Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. EN 1995-1-1. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium.
- IRAM. 2022.** Adhesivos para estructuras de madera bajo carga. Adhesivo de policondensación de tipos fenólicos, aminoplásticos y de otros tipos. Clasificación y requisitos de comportamiento. IRAM 45055. IRAM: Buenos Aires, Argentina.

- IRAM. 2015.** Madera laminada encolada estructural. Parte 1: Clases de resistencia y requisitos de fabricación y control. IRAM 9660-1. IRAM: Buenos Aires, Argentina.
- IRAM. 2015.** Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de tablas por resistencia. Parte 4: Tablas de álamo “Australiano 129/60” y “Stoneville 67” (*Populus deltoides*). IRAM 9662-4. IRAM: Buenos Aires, Argentina.
- Johnston, B. 1961.** Behavior of an inelastic buckling model between the tangent modulus and Shanley loads. Industry Program of the College of Engineering. University of Michigan. Ann Arbor, USA.
<https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/5784/bac5478.0001.001.pdf>
- Meyer, L.; Guillaumet, A.; Sosa Zitto, M.; López, G. 2020.** Influencia del módulo de elasticidad en la determinación de tensiones admisibles en compresión para madera laminada encolada de *Populus deltoides*. In: XXVI Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural. Asociación de Ingeniería Estructural: Rosario, Argentina. Modalidad virtual. <https://ria.utn.edu.ar/server/api/core/bitstreams/6c1ae672-124f-455a-8bb0-c9412dfdacdf/content>
- Meyer, L.; López, G.; Guillaumet, A.; Manavella, R.; Sosa Zitto, M. 2023.** Resistencia a la compresión paralela en madera laminada encolada de álamo. *Revista de Tecnología y Ciencia* 47: 24-34. <https://doi.org/10.33414/rtyc.47.24-34.2023>
- Newlin, J.; Gahagan, J. 1930.** Tests of large timber columns and presentation of the Forest Products Laboratory column formula. Technical Bulletin No. 167. United States Department of Agriculture: Washington, DC, USA.
- Ylinen, A. 1956.** A method of determining the buckling stress and the required cross-sectional area for centrally loaded straight columns in elastic and inelastic range. *Publications of the International Association for Bridge and Structural Engineering* 16: 529-550.
- Zahn, J. 1982.** Strength of lumber under combined bending and compression. Research Paper FPL-RP-391. Forest Products Laboratory, United States Department of Agriculture: Madison, USA. <https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/fplrp/fplrp391.pdf>
- Zahn, J.; Rammer, D. 1995.** Design of glued laminated timber columns. *Journal of Structural Engineering* 121(12): 1789-1794. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1995\)121:12\(1789\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1995)121:12(1789))