

ESTUDIO COMPARATIVO DE CÁLCULO DE ELEMENTOS Y UNIONES ESTRUCTURALES DE MADERA SEGÚN LA NORMA CHILENA Y EUROPEA

V. Pereira Salinas¹; M. González Retamal²; N. Maureira Carsalade³

RESUMEN

En el presente informe se realizó una comparación de los métodos analíticos para el cálculo de los elementos estructurales de madera aserrada, de la especie pino radiata, en relación a los grados estructurales C16 y C24 sometidos a flexión, compresión paralela y uniones según la norma chilena (NCh1198) y Eurocódigo 5 (UNE-EN 1995 1-1). Estas se basan en los métodos ASD (tensiones admisibles) y ELU (estados límites últimos) respectivamente; con el fin de cuantificar diferencias de secciones y materiales bajo similares condiciones de carga.

Para lograr dicho objetivo se desarrolló un análisis de un sistema de viga con respecto a la flexión (corte y deformación incluido). En cuanto a compresión paralela se realizó un análisis a un pie derecho de un muro estructural. Y en relación a las uniones se efectuó un análisis de uniones a cizalle doble con medio de unión del tipo perno.

Finalmente, la comparación entre estas dos normas hace ver que la metodología usada en el eurocodigo 5 en la mayoría de los análisis es menos conservadora que la normativa nacional.

PALABRAS CLAVES: Comparación método analítico, NCh1198, Eurocodigo 5

ABSTRACT

In this inform, there was made a comparison between the analytic methods for the calculate on structural elements of timber wood specifically the radiata pine species, in relation to the Chilean Norm (NCh1198) and the

Eurocode 5 (UNE-EN1995 1-1). These are based on the ASD methods (admissible tensions) and ELU (Last Limited States) respectively, in order that quantify differences between sections and materials under similar load conditions.

To achieve that aim it was developed a beam system analysis regarding to flexion (cut and deformation included). Respecting to the parallel compression it has been made an analysis to a right foot on a structural wall. In relation to the joints, it was made an analysis of unions to a double shear with half type of pintle junction.

Finally, the comparison amongst these two norms, carries out that the methodology used in the Eurocode 5 in most of the analysis is less conservative than the national norm.

KEYWORDS: Comparation of analytical method, NCh1198, Eurocódigo 5,

INTRODUCCIÓN

En actualidad la madera es uno de los materiales más sustentables, debido al poco requerimiento energético que se necesita para su fabricación en comparación al hormigón y al acero (APA-The Engineered Wood,2012). Esto sumado al crecimiento forestal del país lo hacen un material atractivo para la construcción. Es por lo anteriormente mencionado que en el año 1977 se publicó la primera versión de la NCh 1198. Dicha norma ha sido actualizada con el transcurso de los años siendo la última en el año 2014. No obstante, la normativa chilena se rige por el método de tensiones admisible, el cual para un correcto diseño debería asegurar que:

¹ Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE.

² Profesor Part-time, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE.

³ Profesor Auxiliar, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE.

$$f \leq F_{dis} = F \prod_j K_j \quad (1)$$

Donde f es la tensión de trabajo, F_{dis} es la tensión de diseño, F es la tensión admisible, en relación a un contenido de humedad del 12%, a una duración de carga de 10 años y a las dimensiones de la probeta de ensayo y K_j son los factores de modificación. Con respecto al método anteriormente mencionado se ha constatado que este no es muy eficiente en comparación al que emplea la normativa europea (UNE EN 1195) que para el diseño de elementos en madera utiliza los estados límites. Para la verificación de que la estructura tenga un buen diseño utiliza el estado límite último, el cual deberá soportar los efectos producidos por las cargas satisfaciendo la siguiente condición:

$$R_d > S_d \quad (2)$$

Donde R_d es el valor de cálculo de la respuesta estructural y S_d es el valor de cálculo de los efectos de las acciones. A partir de lo anterior se establece la gran diferencia entre ambas metodologías de diseño, ya que una de las diferencias entre las dos filosofías es la forma en que se manejan las relaciones entre las cargas aplicadas y las capacidades de los miembros. El método ASD asume la misma variabilidad en las cargas y pone todos los factores de seguridad en las tensiones admisibles del material, a diferencia del método de estados límite, el cual utiliza los valores de cálculo de las acciones aplicado el método de los coeficientes parciales. Este criterio se utiliza para manejar todas las incertidumbres en los efectos de las cargas, y propiedades del material. Esto hace que se asegure que la probabilidad de alcanzar un estado límite (Un estado límite es una situación, tal que de ser rebasada haría que la estructura dejara de ser apta para su uso y pasara a ser insegura para sus ocupantes) es aceptablemente

pequeña (Ling-En Hsiao et al. 1990). Dados los fundamentos anteriormente mencionados nace la necesidad de comparar ambas metodologías.

METODOLOGÍA

DISEÑO POR UNE EN-1995.

-Combinaciones de acciones estados límite último.

La UNE EN-1990 (Eurocódigo 0) establece que la verificación de los estados límite últimos se hace mediante el método de los coeficientes parciales.

Las situaciones de proyecto son un conjunto de condiciones físicas que representan las condiciones reales que tienen lugar durante cierto periodo de tiempo para las que el cálculo tiene que demostrar que los estados límites correspondientes no son superados. Es por esto que se deben clasificar como Persistente, Transitoria, Accidentales y Sísmicas. Las situaciones de proyecto persistente se refieren a situaciones que se da durante un periodo de tiempo del mismo orden que la vida útil del edificio. Las situaciones de proyecto transitorias se refieren a condiciones temporales aplicables a la estructura como por ejemplo durante su ejecución o reparación. Las accidentales son situaciones excepcionales aplicables a la estructura tales como incendio, impacto, etc. Y Sísmicas, que se refieren cuando la estructura se ve sometida a sismos.

Las acciones también deben clasificarse por su variación en el tiempo como Permanentes (G), Variables (Q) y Accidentales (A).

Además, se definen los estados límites a comprobar. En este caso solo se va a verificar el estado límite STR. Este se refiere al fallo interno de la estructura o elemento estructural donde es dominante la resistencia de los materiales de construcción. Y para comprobarlo se definen las siguientes combinaciones de acciones:

-Combinación de acciones para situaciones permanentes y transitorias (combinaciones fundamentales).

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (3)$$

Donde “+” significa “a combinar con”, \sum significa “el efecto combinado de”, $Q_{k,1}$ es la acción variable predominante, $Q_{k,i}$ las acciones variables de acompañamiento, $G_{k,j}$ las acciones permanentes, $\gamma_{G,j}, \gamma_{Q,1}, \gamma_{Q,i}$ son coeficientes parciales de las acciones y se definen en la siguiente tabla:

Tabla 1: Valores de coeficientes parciales para cálculo de acciones (STR/GEO) (Conjunto B)

Acciones permanente	Desfavorables	1,35
	Favorables	1
Acción variable predominante		1,5
Acción variable de acompañamiento		1,5

Fuente: UNE EN-1990:2002

Y $\psi_{0,i}$ son coeficientes de combinación de acciones definidos en UNE EN-1990:2002

-Combinaciones de acciones para estados límite de servicio.

La UNE EN-1990 establece que para la deformación instantánea u_{inst} debería calcularse para la combinación característica de las acciones, utilizando los valores medios de módulo de elasticidad:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (4)$$

y para la deformación final u_{fin} debería calcularse para la combinación casi permanente de las acciones.

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (5)$$

-Clases de duración de carga.

Según el Eurocódigo 5 se establecen clases de duración de cargas en correspondencia con las acciones actuantes, según la siguiente tabla:

Tabla 2: Clases de duración de cargas

Clase de duración de la carga	Orden de duración Acumulada de la carga Característica
Permanente	mas de 10 años
Larga	6 meses - 10 años
Media	1 semana - 6 meses
Corta	menos de una semana
Instantánea	

Fuente: UNE EN-1995

-Clases de servicios.

El Eurocódigo 5 establece que las estructuras deben asignarse a una de las clases de servicio definidas a continuación:

Clase 1: Se caracteriza por un contenido de humedad en los materiales correspondiente a una temperatura de 20°C y una humedad relativa del aire que no supere el 65% durante unas pocas semanas al año, el contenido de humedad medio en la mayoría de las coníferas no excede el 12%.
 Clase 2: Se caracteriza por un contenido de humedad en los materiales correspondiente a una temperatura de 20°C y una humedad relativa del aire que no supere el 85% durante unas pocas semanas al año, el contenido de humedad medio en la mayoría de las coníferas no excede el 20%.
 Clase 3: Se caracteriza por tener unas condiciones climáticas que conduzcan a contenidos de humedad mayores que en la clase de servicio 2.

-Valor de cálculo de una propiedad del material.

El valor de cálculo X_d de una propiedad resistente debe calcularse según la siguiente expresión:

$$X_d = k_{mod} \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (6)$$

Donde X_k es el valor característico de la propiedad resistente. Como este trabajo es una comparación entre las normas EN-1995 (Eurocódigo 5) y la NCh 1198, resulta de suma importancia ver que los únicos parámetros en los cuales podemos realizar una comparación son las piezas aserradas de pino radiata C16 y C24 ya que estos resultan de una clasificación mecánica en equipos certificados de acuerdo con las exigencias implícitas en la aplicación de EN 338, y que finalmente esta es la norma donde la madera es clasificada según su clase resistente. Los valores característicos según la EN 338 para cualquier propiedad y otras propiedades mecánicas necesarias para el diseño estructural se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3: Clases resistentes C16 y C24 Valores característicos

	C16	C24
Propiedades resistentes en N/mm^2		
Flexión	16	24
Tracción paralela	8,5	14,5
Tracción perpendicular	0,4	0,4
Compresión paralela	17	21
Compresión perpendicular	2,2	2,5
Cortante	3,2	4
Propiedades de rigidez en KN/mm^2		
Mod. Elasticidad paralelo medio	8	11
Mod. Elasticidad paralelo 5° percentil	5,4	7,4
Mod. Elasticidad perpendicular medio	0,27	0,37
Modulo cortante medio	0,5	0,69
Densidades en Kg/m^3		
Densidad característica	310	350
Densidad media	370	420

Fuente: Adaptado de EN-338:2003

γ_M es el coeficiente parcial de seguridad del material, el cual tiene un valor en estado limite ultimo de 1.3 cuando se trabaja con las combinaciones fundamentales y madera maciza. Y k_{mod} es un factor de modificación que tiene en cuenta el efecto de duración de carga y el contenido de humedad. Se muestran en la Tabla 4 los valores de k_{mod} específicamente para madera maciza.

Tabla 4: Valores de k_{mod}

Clase de servicio	Clase de duración de carga				
	Acción Permanente	Acción de larga duración	Acción media duración	Acción de corta duración	Acción instantánea
1	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
3	0,5	0,55	0,65	0,7	0,9

Fuente: UNE EN-1995

En el caso de una combinación de acciones formada por acciones que pertenecen a diferentes clases de duración de carga el valor k_{mod} debería tomarse de la acción que tenga una más corta duración.

-Otros factores de modificación.

Para piezas de madera maciza de sección rectangular con una densidad característica $\rho_k \leq 700 \text{ kg/m}^3$, los valores característicos $f_{m,k}$ y $f_{t,0,k}$, para flexión y tracción respectivamente, pueden incrementarse por un factor k_h definido como:

$$k_h = \min \left\{ \left(\frac{150}{h} \right)^{0.2} \quad h < 150 \text{ mm} \right. \quad (7)$$

$$\left. 1.3 \right.$$

Donde h es la altura de la sección para las piezas flectadas o la anchura para las piezas traccionadas, en mm.

Otro factor a tener en consideración es el de sistema de carga compartida, k_{sys} , el cual solo se aplicará cuando varias piezas similares separadas a distancias iguales, componentes o sistemas estructurales se encuentren unidas por

un sistema continuo de distribución de carga y este sea capaz de transferir las cargas de una pieza a otra, afectando las propiedades resistentes de las piezas y multiplicando por un $k_{sys} = 1.1$

-Flexión

Se debe cumplir que:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (8)$$

$$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (9)$$

Donde $\sigma_{m,y,d}$ y $\sigma_{m,z,d}$ son los valores de cálculo de las tensiones de flexión con respecto a los ejes principales de la sección, $f_{m,y,d}$ y $f_{m,z,d}$ son los valores de cálculo de la correspondiente resistencia a flexión y k_m es un factor de reducción igual a 0.7 para madera maciza con secciones rectangulares.

Además de lo anterior también se debe verificar la posible inestabilidad por vuelco lateral, en el caso de que exista un momento flector M_y respecto al eje fuerte y, las tensiones deberían cumplir la siguiente condición:

$$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} f_{m,d} \quad (10)$$

Donde k_{crit} es un factor que tiene en cuenta la reducción de la resistencia a flexión debido al vuelco lateral. Para calcular dicho factor primero se deberá calcular la esbeltez relativa para flexión con la siguiente expresión:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \quad (10)$$

Donde $\sigma_{m,crit}$ es la tensión crítica de flexión calculada de la siguiente forma:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0.78b^2}{hl_{ef}} E_{0.05} \quad (12)$$

Donde b y h son la anchura y altura respectivamente de la sección de la viga y l_{ef} es la longitud eficaz de la viga, que depende de las condiciones de apoyo y de la configuración de la carga, de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 5: Longitud eficaz expresada como una relación con la luz para una viga simplemente apoyada

Tipo de carga	l_{ef}/l
Momento constante	1
Carga uniformemente distribuida	0,9
Carga concentrada en el centro de la luz	0,8

Fuente: UNE EN-1995

Luego k_{crit} tomará los siguientes valores dependiendo de la esbeltez relativa.

$$k_{crit} = \begin{cases} 1, & \lambda_{rel,m} \leq 0.75 \\ 1.56 - 0.75\lambda_{rel,m}, & 0.75 < \lambda_{rel,m} \leq 1.4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2}, & 1.4 < \lambda_{rel,m} \end{cases} \quad (13)$$

El factor k_{crit} se le puede asignar el valor 1 en vigas en las que está impedido el desplazamiento lateral del borde comprimido en toda su longitud así como también está impedido el giro por torsión de los apoyos.

En el caso de una combinación de un momento flector M_y respecto al eje fuerte y un esfuerzo axial N_c , las tensiones deberían cumplir la siguiente condición:

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (14)$$



Donde $k_{c,z}$ se especifica en la parte de pandeo de columna.

-Cortante

Se debe cumplir que:

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (15)$$

Donde τ_d es el valor de cálculo de la tensión de cortante y $f_{v,d}$ es el valor de cálculo de la resistencia a cortante para la condición existente. Sin embargo, para la comprobación de cortante de piezas en flexión, debería tenerse en cuenta la influencia de las fendas utilizando una anchura eficaz de la pieza definida en la siguiente expresión:

$$b_{ef} = k_{cr} b \quad (16)$$

Donde b es la anchura de la sección correspondiente de la pieza y k_{cr} equivale a 0.67 para madera maciza.

-Compresión paralela a la fibra

Se debe cumplir que:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (17)$$

Donde $\sigma_{c,0,d}$ es el valor de cálculo de la tensión de compresión paralela a la fibra y $f_{c,0,d}$ es el valor de cálculo de la resistencia a compresión paralela a la fibra.

Las piezas de madera al no ser perfectamente rectas cabe la posibilidad de que sufran un fallo ante cargas que provocan tensiones de compresión muy inferiores a la resistencia del material al cual están hechas. Por eso la resistencia se penaliza mediante el factor k_c .

Lo primero es ver la esbeltez relativa de la pieza, la que se calcula mediante las siguientes expresiones en relación al eje de flexión:

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (18)$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (19)$$

Donde λ_y y $\lambda_{rel,y}$ son esbelteces mecánicas correspondientes a la flexión respecto al eje y (deformación en la dirección z), λ_z y $\lambda_{rel,z}$ son las esbelteces mecánicas correspondiente a la flexión respecto al eje z (deformación en la dirección y) y $E_{0,05}$ es el valor del quinto percentil del módulo de elasticidad paralelo a la fibra. λ_y y λ_z se determinará de la siguiente manera:

$$\lambda_i = \frac{L_{ef,i}}{r} \quad (20)$$

Donde i se refiere al eje donde se calcula, $L_{ef,i}$ es la longitud eficaz y r es el radio de giro.

Cuando $\lambda_{rel,y} \leq 0.3$ y $\lambda_{rel,z} \leq 0.3$ las tensiones deberán cumplir las expresiones de flexión y compresión combinadas y para el resto de los casos se deberá cumplir las siguientes condiciones:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (21)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (22)$$

Donde $k_{c,y}$ y $k_{c,z}$ se definen como:

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \quad (23)$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} \quad (24)$$

$$k_y = 0.5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,y} - 0.3) + \lambda_{rel,y}^2) \quad (25)$$

$$k_z = 0.5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,z} - 0.3) + \lambda_{rel,z}^2) \quad (26)$$

Donde β_c es igual 0.2 para madera maciza y k_m se define en el apartado de flexión.

-Deformaciones

La deformación instantánea se calculará por las fórmulas habituales de la teoría de estructuras y como una simplificación, la deformación final, u_{fin} podrá calcularse de la siguiente manera:

$$u_{fin} = u_{fin,G} + u_{fin,Q1} + u_{fin,Qi} \quad (27)$$

Dónde:

$$u_{fin,G} = u_{inst,G}(1 + k_{def}) \quad (28)$$

$$u_{fin,Q,1} = u_{inst,Q,1}(1 + \psi_{2,i}k_{def}) \quad (29)$$

$$u_{fin,Q,1} = u_{inst,Q,1}(1 + \psi_{2,i}k_{def}) \quad (30)$$

$$u_{fin,Q,i} = u_{inst,Q,i}(\psi_{0,i} + \psi_{2,i}k_{def}) \quad (31)$$

para acciones permanentes, G , variables predominantes, Q_1 y acciones variables de acompañamiento, Q_i , respectivamente. k_{def} es un factor que simplifica la deformación por fluencia e incrementa la deformación inicial en función de la clase de servicio, tabla que se muestra a continuación:

Tabla 6: Valores de k_{def} para madera maciza

material	Clase de servicio		
	1	2	3
madera maciza	0,6	0,8	2

Fuente: UNE EN-1995

-Límites para las deformaciones.

El Rango de los valores límites recomendados para las deformaciones de las vigas para una luz l se exponen en la siguiente tabla:

Tabla 7: Ejemplos de valores límites para las deformaciones de las vigas sobre dos apoyos

	W_{inst}	$W_{net,fin}$	W_{fin}
Vigas sobre dos apoyos	$l/300$ a $l/500$	$l/250$ a $l/350$	$l/150$ a $l/300$

Fuente: UNE EN-1995

Finalmente se debe comprobar que:

$$u_{inst} \leq W_{inst} \quad (32)$$

$$u_{fin} \leq W_{fin} \quad (33)$$

-Uniones

El valor característico para de la capacidad de carga para clavos, pernos, pasadores y tirafondos por plano de corte y medio de fijación $F_{v,Rk}$, debería tomarse como el mínimo de las siguientes expresiones:

-Para medios de fijación en cortadura simple:

$$f_{h,1,k}t_1d \quad (34)$$

$$f_{h,2,k}t_2d \quad (35)$$

$$\frac{f_{h,1,k}t_1d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (36)$$

$$1.05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (37)$$

$$1.15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (38)$$

-Para medio de fijación en cortadura doble:

$$f_{h,1,k} t_1 d \quad (39)$$

$$0.5 f_{h,2,k} t_2 d \quad (40)$$

$$1.05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (41)$$

$$1.15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (42)$$

Donde $f_{h,i,k}$ es el valor característico de la resistencia al aplastamiento en la pieza de madera i , d diámetro del medio de fijación, t_i depende del tipo de unión que para pernos y pasadores sería:

t_1 es el espesor de la pieza lateral y t_2 el espesor de la pieza central de la unión.

$M_{y,Rk}$ valor característico del momento plástico del medio de fijación, β es la relación entre las resistencias al aplastamiento de las piezas y se calculará como:

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \quad (43)$$

$F_{ax,Rk}$ es el valor característico de la capacidad de carga al arranque del medio de fijación el cual se calculará como el menor valor entre:

$$F_{ax,Rk} = \begin{cases} f_{ax,k} d t_{pen} \\ f_{head,k} d_h^2 \end{cases} \quad (44)$$

Donde $f_{head,k}$ es el valor característico de la resistencia al punzonamiento de la cabeza del clavo y se calculara como:

$$f_{head,k} = 70 \times 10^6 \rho_k^2 \quad (45)$$

Donde ρ_k es el valor característico de la densidad de la madera, $f_{ax,k}$ es el valor característico de la resistencia al arranque en la pieza de punta, pero el cálculo de la carga de extracción por arranque carece de sentido en la configuración de unión en cortadura doble, porque ambos extremos de la clavija están fijados con tuerca-arandela y, por lo tanto, solo están expuestos a hundimiento ⁴, d es el diámetro, t_{pen} longitud de penetración en la pieza de punta y d_h se considerara como el diámetro de la arandela utilizada⁵, que por recomendación del Eurocódigo debe ser como mínimo 3 veces el diámetro del perno. Como regla del Eurocódigo la contribución del efecto de sogas en la capacidad de carga de la unión no debe exceder el 25% de la capacidad de carga de acuerdo a la teoría de plastificación de Johansen.

⁴ Domínguez Lorenzo, Manuel. (2015) Estudio de uniones en estructuras de madera con uso de elementos clavijas (tesis doctoral) Universidad de Salamanca, Zamora

⁵ Domínguez Lorenzo, Manuel. (2015) Estudio de uniones en estructuras de madera con uso de elementos clavijas (tesis doctoral) Universidad de Salamanca, Zamora

-Resistencia al aplastamiento en la madera.

Según el Eurocódigo 5 la resistencia al aplastamiento $f_{h,k}$ depende del tipo de clavija y la clase resistente de la madera:

-Pernos y pasadores:

En pernos con diámetros de hasta 30 mm, el valor característico de la resistencia al aplastamiento en madera, con un ángulo α respecto a la dirección de la fibra se obtiene de la siguiente forma:

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (46)$$

Donde $f_{h,0,k}$ es el valor característico de la resistencia al aplastamiento paralelo a la fibra y se calcula de la siguiente manera:

$$f_{h,0,k} = 0.082(1 - 0.01d)\rho_k \quad (47)$$

k_{90} para coníferas sería igual a:

$$k_{90} = 1.35 + 0.015d \quad (48)$$

Y α es el ángulo formado entre la dirección de la carga y la fibra.

-Momento plástico de la clavija

Según el Eurocódigo 5 el momento plástico de cada tipo de clavija se calculará de la siguiente manera:

-Pernos y pasadores:

En pernos el valor característico del momento plástico deberá calcularse como:

$$M_{y,Rk} = 0.3f_{u,k}d^{2.6} \quad (49)$$

Donde $M_{y,Rk}$ es el valor característico del momento plástico, d diámetro del clavo y $f_{u,k}$ es el valor característico de la resistencia a la tracción

-Capacidad de carga

Una vez obtenido el valor característico $F_{v,Rk}$, para obtener el valor de cálculo $F_{v,d}$ se utilizará la siguiente fórmula:

$$F_{v,d} = k_{mod} \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_M} \quad (50)$$

Donde el factor k_{mod} se obtiene de igual manera que para los casos anteriores, γ_M sería igual a 1.3 para uniones. Ahora para comprobar la capacidad de la unión es necesario verificar si se cumple la siguiente fórmula:

$$F_d \leq nF_{v,d} \quad (51)$$

Donde F_d es el esfuerzo de cálculo al cual se solicita la unión, y n es el número de elementos de fijación.

DISEÑO POR NCH 1198

-Tensiones admisibles y módulos de elasticidad

La NCh 1198 especifica las tensiones admisibles y módulos de elasticidad para flexión con respecto a elementos solicitados con una duración de 10 años como se ve en la siguiente tabla en relación a los grados C16 y C24.

Tabla 8: Tensiones admisible y módulo de elasticidad para flexión

Grado estructural	Tensiones admisibles de:					Módulo de elasticidad en flexión E_f Mpa
	Flexión	Compresión paralela	Tracción paralela	Compresión normal	Cizalle	
	F_f Mpa	F_{cp} Mpa	F_{tp} Mpa	F_{cn} Mpa	F_{cz} Mpa	
C24	9,3	8	4,7	2,5	1,1	10200
C16	5,2	7,5	3,5	2,5	1,1	7900

Fuente: NCh 1198:2014

-Factores de modificación de uso general

-Factor de modificación por contenido de humedad (K_H).

Este factor solo se aplica en piezas de madera aserrada con espesores menores o iguales a 100 mm y que se construyen con un contenido de humedad (H_c) comprendido entre 12% y 20%.

$$K_H = (1 - \Delta H \Delta R) \quad (52)$$

Donde K_H es el factor de modificación por contenido de humedad, aplicable a las tensiones admisibles y módulo elástico definidos para una humedad del 12%, ΔH es la diferencia entre el valor del contenido de humedad de servicio y 12% y ΔR es la variación de la resistencia por cada 1% de la variación del contenido de humedad como se ve en la siguiente tabla:

Tabla 9: Variación de las propiedades resistentes para una variación del contenido de humedad del 1%

Tensión admisible o módulo de elasticidad	Variación de la resistencia para $\Delta H = 1\% \Delta R$
	pino radiata
Flexión	0,025
Compresión paralela	0,048
Tracción paralela	0,025
Cizalle	0,015
Módulo de elasticidad en flexión	0,017

Fuente: NCh 1198:2014

Y en el caso que las piezas de pino radiata estén en condición verde ($H \geq 20\%$) se deberán modificar las propiedades admisibles y módulo elástico en condición seca por los factores siguientes:

Tabla 10: Factor de modificación contenido de humedad para madera pino radiata condición verde

Tensión admisible o módulo de elasticidad	K_H
Flexión	0,75
Compresión paralela	0,52
Tracción paralela	0,75
Cizalle	0,85
Módulo de elasticidad en flexión	0,83

Fuente: NCh 1198:2014

-Factor de modificación por duración de carga

La NCh 1198 establece que según sea la duración de la carga que afecta la estructura, se aplicará el siguiente factor de modificación:

$$K_D = \frac{1.747}{t^{0.0464}} + 0.295 \quad (53)$$

Donde t es la duración de la carga en segundos. Por otra parte también se podrá utilizar la siguiente tabla con los valores predeterminados para K_D .

Tabla 11: Valores de K_D para diferentes tipos de cargas

Carga	Duración	K_D
Permanente	Mayor a 10 años	0,9
Sobrecarga de piso	10 años	1
Nieve	2 meses	1,15
Sobrecarga de techo	7 días	1,25
Viento o sismo	10 minutos	1,6
Impacto	2 segundos	2

Fuente: NCh 1198:2014

-Factor de modificación por trabajo conjunto en flexión.

La NCh 1198 especifica que para la tensión admisible de flexión para elementos estructurales que conforman un sistema que comparte la carga, consistente en tres o más elementos paralelos distanciados en no más de

610 mm y dispuestos de tal forma que en conjunto pueden soportar la carga aplicada, puede ser multiplicada por el factor de modificación $K_C=1.15$.

-Flexión

Para flexión uniaxial en vigas simples se deberá comprobar que:

$$f_f \leq F_{f,dis} \quad (54)$$

Donde f_f es la tensión de trabajo en la fibra extrema y $F_{f,dis}$ es la tensión de diseño en flexión. La tensión de diseño se calcula como el mínimo entre $F_{ft,dis}$ (tensión de diseño en la zona flexo-traccionada) y $F_{fv,dis}$ (tensión de diseño en flexión en la zona flexo-comprimida), las cuales se calculan como:

$$F_{ft,dis} = F_f K_H K_D K_C K_{hf} \quad (55)$$

$$F_{fv,dis} = F_f K_H K_D K_C K_{\lambda v} \quad (56)$$

Donde F_f es la tensión admisible a flexión, K_H, K_D, K_C son los factores de modificación antes mencionados, K_{hf} es el factor de modificación por altura, que para piezas de pino radiata, clasificadas mecánicamente como C16 o C24 de sección transversal con valores mayores que 90mm se calcula como:

$$K_{hf} = \left(\frac{90}{h}\right)^{1/5} \quad (57)$$

Donde h es la altura de la viga y $K_{\lambda v}$ es el factor de modificación por volcamiento, el cual cuando $h/b < 2$ o los elementos estructurales solicitados en flexión presentan apoyos laterales a lo largo de su luz pero $h/b < 2$, se acepta un $K_{\lambda v} = 1$, para otras situaciones $K_{\lambda v}$ se calcula en

función de la esbeltez de volcamiento λ_v , de acuerdo con la siguiente expresión:

$$K_{\lambda v} = \frac{1 + (F_{f,E}/F_{f,dis}^*)}{1.9} - \sqrt{\left[\frac{1 + F_{f,E}/F_{f,dis}^*}{1.9}\right]^2 - \frac{F_{f,E}/F_{f,dis}^*}{0.95}} \quad (58)$$

Donde $F_{f,dis}^*$ es la tensión admisible de flexión ponderada por todos los factores de modificación aplicables, salvo K_{hf} y $K_{\lambda v}$, $F_{f,E}$ se calculará con la siguiente expresión:

$$F_{f,E} = \frac{C_{fE} E_{dis}}{\lambda_v^2} \quad (59)$$

Con C_{fE} igual a 0.561 para madera aserrada clasificada mecánicamente (C16, C24), E_{dis} módulo de elasticidad en flexión de diseño calculado como:

$$E_{dis} = E K_H K_{hE} \quad (60)$$

Donde E es el módulo de elasticidad por tabla y K_H factor de modificación por contenido de humedad calculado para el módulo de elasticidad, K_{hE} es el factor de modificación por altura para elasticidad en pino radiata calculado de la siguiente manera:

$$K_{hE} = \left(\frac{h}{180}\right)^{1/4} \quad (61)$$

Aplicable solo a piezas con alturas menores a 180 mm. Y λ_v se calcula como:

$$\lambda_v = \sqrt{\frac{l_v h}{b}} \quad (62)$$

Donde l_v es la longitud efectiva de volcamiento calculada según la siguiente tabla:

Tabla 12: Longitud efectiva de volcamiento, l_v , de elementos flexionados para viga simplemente apoyada y carga uniformemente distribuida

Viga simplemente apoyada	Si $l_d/h < 7$	Si $l_d/h \geq 7$
Carga uniformemente distribuida	$2,06 l_d$	$1,63 l_d + 3 h$

Fuente: NCh 1198:2014

-Cizalle

La tensión de diseño de cizalle longitudinal se determina de la expresión:

$$F_{cz,dis} = F_{cz} K_H K_D K_r \quad (63)$$

Donde $F_{cz,dis}$ es la tensión de diseño de cizalle longitudinal, F_{cz} tensión admisible de cizalle longitudinal, K_H factor de modificación por contenido de humedad, K_D factor de modificación por duración de carga y K_r es el factor de modificación por rebaje.

-Compresión paralela a la fibra

Para determinar la tensión de diseño primero se evaluará si no se presentan problemas de inestabilidad lateral, por lo cual si $\lambda < 10$, la tensión de diseño se determinará de la siguiente manera:

$$F_{cp,dis} = F_{cp} K_H K_D \quad (64)$$

Donde $F_{cp,dis}$ es la tensión de diseño en compresión paralela, F_{cp} tensión admisible en compresión paralela, K_H factor de modificación por contenido de humedad, K_D es el factor de modificación por duración de carga. Ahora si $\lambda \geq 10$, se puede presentar problemas de inestabilidad lateral teniendo que calcular la tensión de diseño de la siguiente manera:

$$F_{cp,\lambda,dis} = F_{cp,dis} K_\lambda \quad (65)$$

Donde $F_{cp,\lambda,dis}$ es la tensión de diseño en compresión paralela considerando inestabilidad lateral y K_λ factor de modificación por esbeltez, el cual se calcula con la siguiente expresión:

$$K_\lambda = A - \sqrt{A^2 - B} \quad (66)$$

Dónde:

$$A = \frac{F_{cE}}{F_{cp,dis}} \left(1 + \frac{\lambda}{200} \right) + 1 \quad (67)$$

$$B = \frac{F_{cE}}{c F_{cp,dis}} \quad (68)$$

Donde c es el coeficiente de proporcionalidad que para el grado C16 es 0.8 y para el grado C24 es 0.85, F_{cE} se calcula como:

$$F_{cE} = \frac{3.6 E_{dis}}{\lambda^2} \quad (69)$$

Donde λ es la esbeltez reguladora del diseño y se calcula de igual manera que para el Eurocódigo. Cabe mencionar que λ no debe de exceder 170 o 200 para sistemas arriostrantes.

-Deformaciones

Para la determinación de la deformación total δ_{tot} se calcula mediante las formulas habituales de la teoría de estructuras, sin embargo, el módulo de elasticidad a utilizar será el siguiente:

$$E_{dis} = E_k K_H K_{hE} \quad (70)$$

Donde E_k es el módulo de elasticidad característico inherente al percentil 5% que se puede estimar como el 60% del módulo de elasticidad en flexión.

-Deformación por creep

Cuando las solicitaciones de naturaleza permanente g , excedan el 50% de la solicitación total q , la verificación de la flecha se debe incorporar la componente de deformación por creep. La deformación total de la pieza flexionada, incluyendo la deformación por creep se calculará con la siguiente expresión:

$$\delta_{tot} = \delta_e \left(1 + \rho \frac{g}{q} \right) \quad (71)$$

Donde δ_e es la deformación elástica instantánea determinada por la totalidad de las cargas que solicitan la pieza, g componente de carga de naturaleza permanente, q carga total de diseño y ρ es el factor por creep que se calcula según la expresión:

$$\rho = \frac{1}{k_\delta} - 1 \quad (72)$$

Donde k_δ para madera con contenido de humedad menor que 15% se debe considerar:

$$k_\delta = \frac{3}{2} - \frac{g}{q} \quad (73)$$

Y si es mayor o igual a 15%:

$$k_\delta = \frac{5}{3} - \frac{4g}{3q} \quad (74)$$

-Límites de deformaciones

Las deformaciones máximas admisibles de un elemento a flexión se fijan de acuerdo al tipo de estructura y las exigencias estéticas y

funcionales. La siguiente tabla muestra las deformaciones máximas admisibles que se pueden adoptar

Tabla 13: Deformaciones máximas admisibles en vigas de madera

Tipos de vigas	Deformaciones máximas admisibles considerando peso propio mas sobrecarga
1. Vigas de techo	
1.1 Construcciones industriales y agrícolas	L/200 ó L/400
1.2 oficinas y construcciones habitacionales	
1.2.1 Con cielo enyesado o similares	L/300
1.2.2 Sin cielo enyesado o similares	L/300
2. Vigas de piso	
2.1 Construcciones generales	L/300
2.2 pasarelas peatonales	L/400 ó L/1200

Fuente: NCh 1198:2014

-Uniones

La capacidad de carga admisible de un medio de unión en una unión a cizalle simple o doble según la NCh 1198 se calculará según las siguientes expresiones y corresponde al menor valor $P_{el,ad}$:

-Cizalle simple:

$$modo I_c: \frac{Dl_c R_{ap,c}}{FA} \quad (75)$$

$$modo I_l: \frac{Dl_l R_{ap,l}}{FA} \quad (76)$$

$$modo I: \frac{k_1 D l_l R_{ap,l}}{FA} \quad (77)$$

$$modo III_c: \frac{k_2 D l_c R_{ap,c}}{FA} \quad (78)$$

$$modo I: \frac{k_1 D l_l R_{ap,l}}{FA} \quad (79)$$

$$modo IV: \frac{D^2}{FA} \sqrt{\frac{2R_{ap,c} F_{ff}}{3(1 + R_e)}} \quad (80)$$

-cizalle doble:

$$\text{modo } I_c: \frac{Dl_c R_{ap,c}}{FA} \quad (81)$$

$$\text{modo } I_l: \frac{2Dl_l R_{ap,l}}{FA} \quad (82)$$

$$\text{modo } III_l: \frac{2k_3 D l_l R_{ap,c}}{FA} \quad (83)$$

$$\text{modo } IV: \frac{2D^2}{FA} \sqrt{\frac{2R_{ap,c} F_{ff}}{3(1 + R_e)}} \quad (84)$$

Con:

$$k_1 = \frac{\sqrt{R_e + 2R_e^2(1 + R_e + R_t^2) + R_t^2 R_e^3} - R_e(1 + R_t)}{1 + R_e} \quad (85)$$

$$k_2 = -1 + \sqrt{2(1 + R_e) + \frac{2F_{ff}(1 + 2R_e)D^2}{3R_{ap,c}l_c^2}} \quad (86)$$

$$k_3 = -1 + \sqrt{\frac{2(1 + R_e)}{R_e} + \frac{2F_{ff}(2 + R_e)D^2}{3R_{ap,c}l_l^2}} \quad (87)$$

$$R_e = \frac{R_{ap,c}}{R_{ap,l}} \quad (88)$$

$$R_t = \frac{l_c}{l_l} \quad (89)$$

Donde l_c es la longitud de apoyo del medio de unión en la pieza primaria, l_l longitud de apoyo del medio de unión en la pieza secundaria, $R_{ap,c}$ y $R_{ap,l}$ son la resistencia al aplastamiento del vástago en el madero principal y del madero secundario respectivamente, F_{ff} tensión de fluencia del acero, D diámetro del medio de

unión y FA es el factor de ajuste según la siguiente tabla:

Tabla 14 factores de ajuste

Diámetro medio de unión	Modo de fluencia	FA
$6,4 \text{ mm} \leq D \leq 25 \text{ mm}$	I_c, I_l	$4k_\alpha$
	II	$3,6k_\alpha$
$D < 6,4 \text{ mm}$	III _c , III _l , IV	$3,6k_\alpha$
	$I_c, I_l, II, III_c, III_l, IV$	k_d

con

$$k_\alpha = 1 + \frac{\alpha_{max}}{360^\circ}$$

α_{max} = máxima desangulación entre la dirección de la fuerza y de la fibra de cualquier pieza de unión

Fuente NCh 1198:2014

-Resistencia al aplastamiento.

La resistencia al aplastamiento nominal para todo tipo de unión mecánicas tales como tirafondo, pernos, pasadores de diámetro mayor o igual a 6.4 mm se determinará de la siguiente forma:

$$R_{ap,p} = 77.2(\rho_0/1000) \quad (90)$$

$$R_{ap,n} = \frac{212(\rho_0/1000)^{1.45}}{\sqrt{D}} \quad (91)$$

Donde $R_{ap,p}$ se utiliza para solicitaciones paralelas a la fibra, $R_{ap,n}$ se utilizara para solicitaciones en dirección normal a la fibra, D diámetro de la unión y ρ_0 densidad anhidra media de la especie forestal, la cual que para nuestro caso es de 450 kg/m^3 .

Ahora si la unión se solicita según un ángulo diferente respecto a la fibra, la resistencia al aplastamiento, $R_{ap,\theta}$, para la pieza se determinará aplicando la fórmula de Hankinson

$$R_{ap,\theta} = \frac{R_{ap,p}R_{ap,n}}{R_{ap,p}\text{sen}^2\theta + R_{ap,n}\text{cos}^2\theta} \quad (92)$$

Donde θ es el ángulo entre la dirección de la sollicitación y la dirección de la fibra.

La resistencia al aplastamiento nominal para clavos y tirafondo de diámetro menor a 6,4 mm se determinará, independiente de la desangulación entre la sollicitación y la dirección de la fibra, mediante la siguiente expresión:

$$R_{ap} = 115(\rho_0/1000)^{1.84} \quad (93)$$

-Tensión de fluencia

Como en la norma chilena no existe datos de la resistencia a la tracción de los medios de unión, se optó por ver la norma UNE-EN ISO 898-1, la cual entrega valores para la resistencia mínima a la tracción y límite elástico inferior para distintas calidades de acero. Es por esto que para la tensión en fluencia se ocupará el límite elástico inferior que se encuentra en dicha norma.

-Capacidad de diseño

La capacidad de diseño para un medio de unión está definida como:

$$P_{ed,dis} = P_{ed}K_D K_{UH} K_{UT} K_u \quad (94)$$

Donde $P_{ed,dis}$ es la capacidad de carga de diseño del medio de unión, K_D factor de modificación por duración de carga, K_{UH} factor de modificación por contenido de humedad, K_{UT} factor por trabajo temperatura y K_u es el factor de modificación por longitud de hilera

-Factor de modificación por duración de carga

Esta se calculará igual que los apartados anteriores

-Factor de modificación por contenido de humedad

Los valores admisibles se deben multiplicar por los factores de modificación K_{UH} señalados en la siguiente tabla:

Tabla 15 Factores de modificación por contenidos de humedad

medio de unión	condición de la madera		factor de modificación K_{UH}
	Durante la fabricación	en servicio	
pernos, tirafondos, pasadores y clavos	Extracción lateral		
	<=19%	<=19%	1
	>19%	<=19%	0,4
	cualquiera	>19%	0,7

Fuente NCh 1198:2014

Ahora para comprobar la capacidad de la unión es necesario ver si se cumple la siguiente formula:

$$F_d \leq nF_{ed,dis} \quad (95)$$

Donde F_d es el esfuerzo de cálculo al cual se solicita la unión, y n el número de elementos de fijación.

RESULTADOS

Se realizó un análisis para un envigado de piso a flexión, corte y deformación utilizando el método analítico del Eurocódigo 5 y la NCh 1198 el cual debe soportar una carga por peso propio de 70 Kg/m² y una sobrecarga de uso de 200 kg/m², típicas para un envigado de piso de una construcción habitacional. El espaciamiento entre vigas es de 406 mm, la luz entre apoyos es de 2.4 m y posee una placa estructural el cual restringe el volcamiento. Para lo anterior se consideró una variación de la escuadría de las vigas de madera maciza, la clase de servicio o humedad, según corresponda, y el grado estructural de la madera.

El análisis para la flexión con un 12% de humedad arrojó una diferencia porcentual promedio 51.14% y 26.76% entre el Eurocódigo 5 y la NCh 1198 para los grados estructurales C16 y C24 respectivamente.

Con respecto al análisis del 16% de humedad se obtuvo una diferencia porcentual promedio de

67.94% y 40.85% para los grados C16 y C24 respectivamente, lo mismo se obtuvo cuando se desarrolló el análisis de 20% de humedad, obteniéndose una diferencia porcentual de 63.74% y 37.33% para los grados C16 y C24 respectivamente siendo la NCh 1198 más restrictiva que el Eurocódigo 5 en todas las etapas del análisis. Lo anteriormente mencionado se debe principalmente a los valores característicos resistentes de la madera, ya que para el Eurocódigo se utiliza, en relación al grado C16 y C24, 16 N/mm^2 y 24 N/mm^2 respectivamente, no así en la NCh 1198 donde las tensiones admisible son estos valores característicos divididos por un factor de seguridad (5.2 N/mm^2 y 9.3 N/mm^2 para los grados C16 y C24 respectivamente). Por otra parte, también en menor medida, se debe al factor de modificación por altura, el cual al analizar las escuadrías se pudo constatar que la mayor diferencia entre estos factores es de un 0.2685 ($k_h=1$; $k_{hf} = 0.7314$) y la menor es de 0.1076 ($k_h=1.1076$; $k_{hf} = 1$).

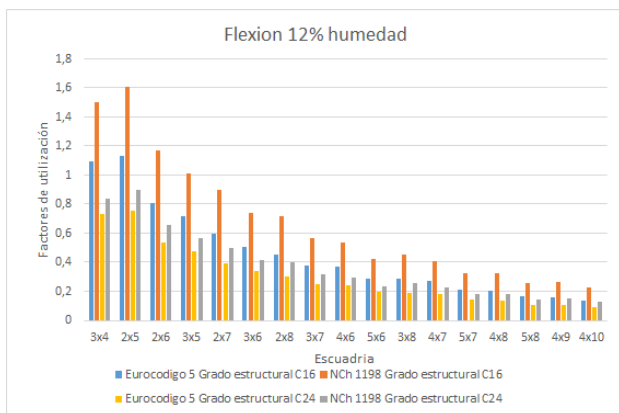


Figura 1: Gráfica valor de trabajo en flexión vs escuadría humedad 12%

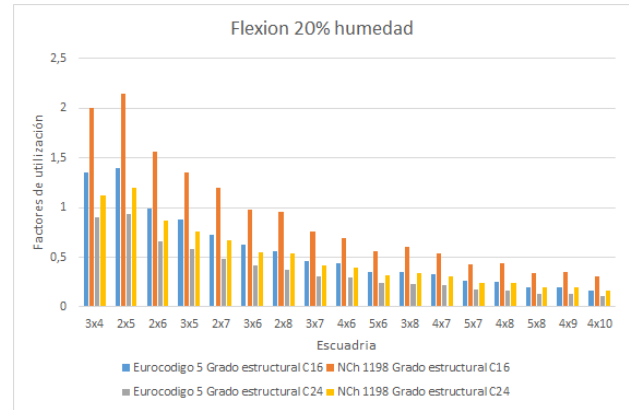


Figura 2: Gráfica valor de trabajo en flexión vs escuadría humedad 16%

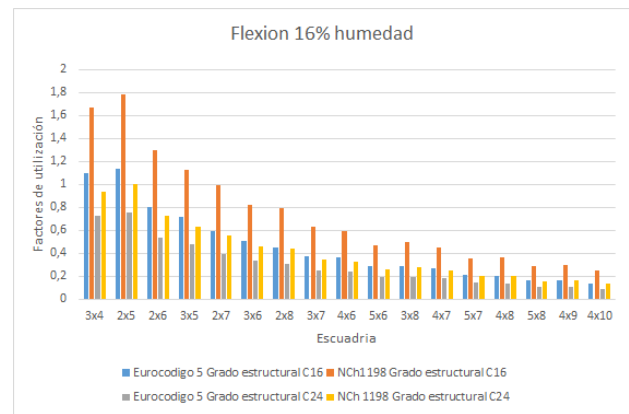


Figura 3: Gráfica valor de trabajo en flexión vs escuadría humedad 20%

Para corte o cizalle ocurre algo distinto, en relación al grado C16 las diferencias porcentuales son 10.74%, 4.09% y 15.85% para las humedades 12%, 16% y 20% respectivamente siendo el Eurocódigo 5 más restrictivo que la NCh 1198 y con respecto a los grados C24 las diferencias porcentuales son 12.87%, 20.07% y 7.89% para las humedades 12%, 16% y 20%.

La norma chilena es más conservadora cuando se utiliza el grado C24 dado la misma razón que para flexión, en cuanto a los valores característicos. No así para el grado C16 ya que el método analítico de diseño del Eurocódigo 5 penaliza el ancho de la viga bajando un 67% para tenerse en cuenta la influencia de las fendas que

en la NCh 1198 no se hace referencia, por lo cual para el análisis en los 3 casos de humedades para el grado C16.

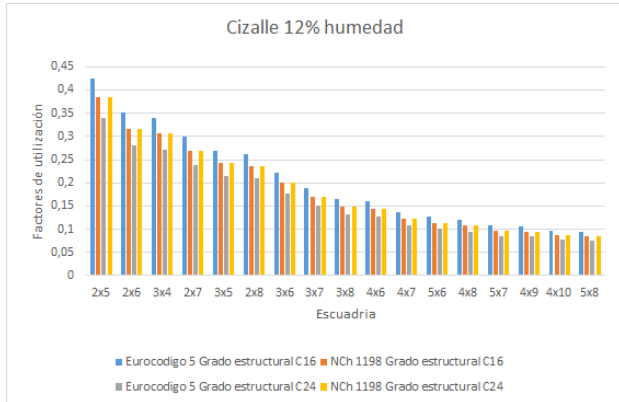


Figura 4: Gráfica valor de trabajo en cizalle vs escuadría humedad 12%

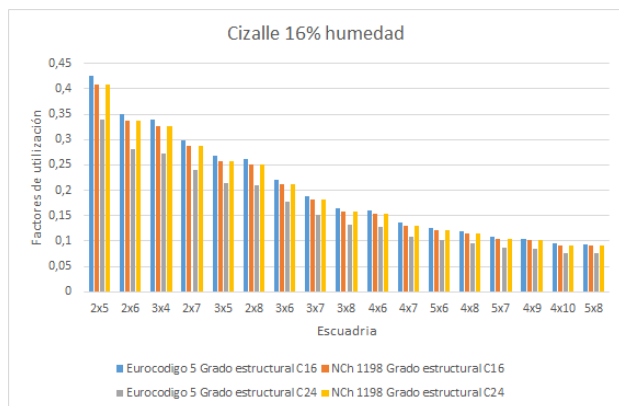


Figura 5: Gráfica valor de trabajo en cizalle vs escuadría humedad 16%

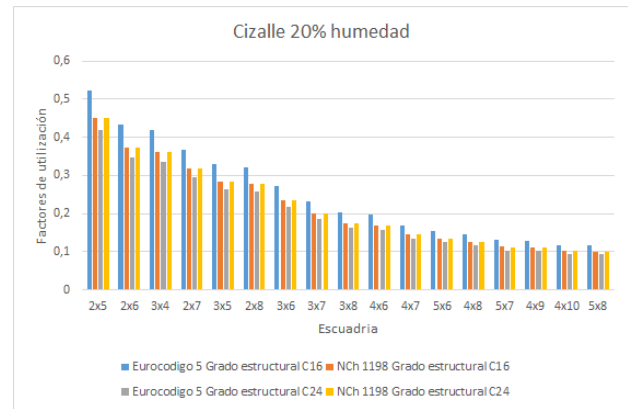


Figura 6: Gráfica valor de trabajo en cizalle vs escuadría humedad 20%

Para el análisis de deformaciones, en el caso de 12% de humedad la variación porcentual sería 88.33% y 76.84% para los grados C24 y C16 respectivamente, en el caso de un 16% de humedad es 102.07% y 36.31% y cuando la humedad es 20% la diferencia porcentual es 151.1% para el grado C24 y 135.75% para el grado C16 siendo la NCh 1198 es más conservadora ya que esta utiliza el módulo de elasticidad característico, no así el Eurocódigo 5 que utiliza el módulo de elasticidad medio el cual es mucho mayor que el característico. Por otra parte se desarrolló un análisis para poder tener en cuenta la deformación por fluencia y así poder comparar la deformación u_{fin} con las δ_{tot} añadiendo la deformación por flujo plástico señalado en la NCh 1198, por lo cual el peso propio se tuvo que aumentar a más del 50% de la carga total (210 kg/m²) dando como resultado para una humedad del 12% una diferencia porcentual de 35.84% y 27.56% para los grados C24 y C16 respectivamente, para el caso de 16% de humedad la diferencia porcentual es de 33.46% para el grado C24 y 25.32% para el grado C16. Pero cuando la humedad es del 20%, con respecto al grado C24 la diferencia porcentual es del 9.29%, sin embargo, cuando el grado estructural es C16 hay escuadrías donde la norma chilena es más restrictiva dando una diferencia porcentual promedio de 5.17% y el

Eurocódigo es más restrictivo, obteniéndose una diferencia porcentual promedio del 2.1% dado que los factores que se incorporan para predecir la deformación por fluencia tiene un valor de 1.00846 para la norma chilena y para el Eurocódigo son 3 y 1.6 para la carga permanente y variable respectiva, y al aumentar la inercia (para valores de altura mayor o igual 8”) la norma chilena pasa a ser menos restrictiva que el Eurocódigo 5.

También cabe destacar que la deformación es la que controla el diseño para las dos normas.

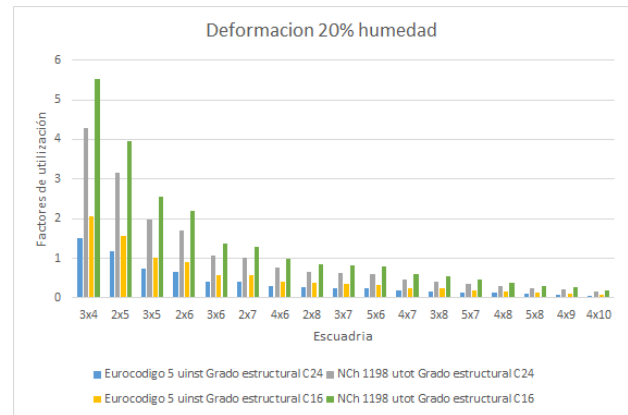


Figura 9: Gráfica valor de trabajo en deformación vs escudría humedad 20%

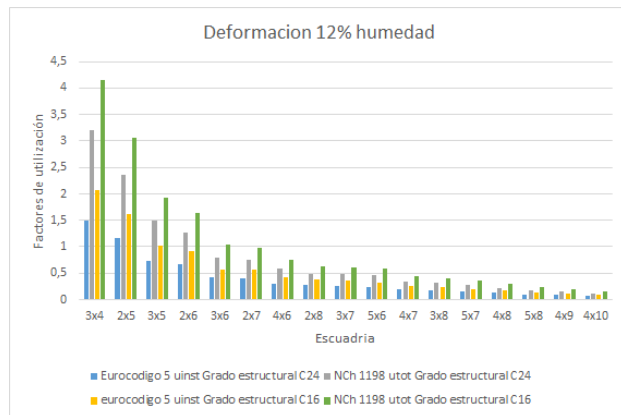


Figura 7: Gráfica valor de trabajo en deformación vs escudría humedad 12%

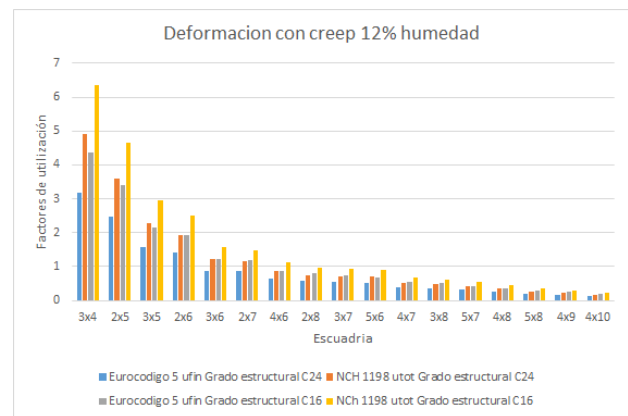


Figura 10: Gráfica valor de trabajo en deformación con creep vs escudría humedad 12%

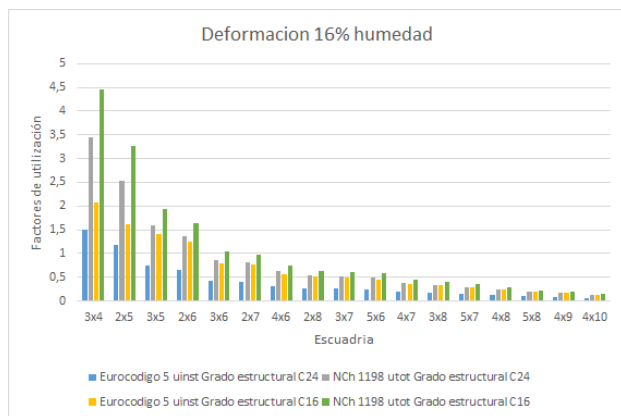


Figura 8: Gráfica valor de trabajo en deformación vs escudría humedad 16%

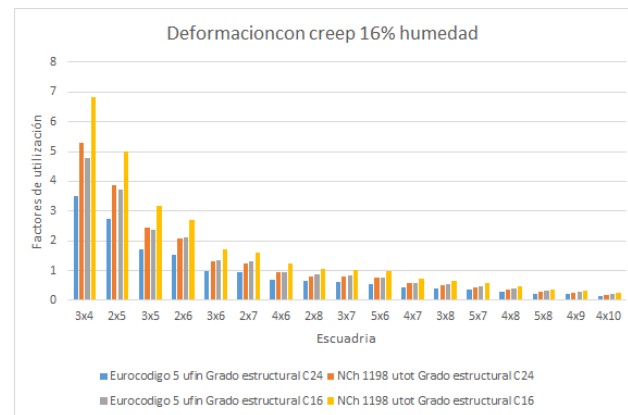


Figura 11: Gráfica valor de trabajo en deformación con creep vs escudría humedad 16%

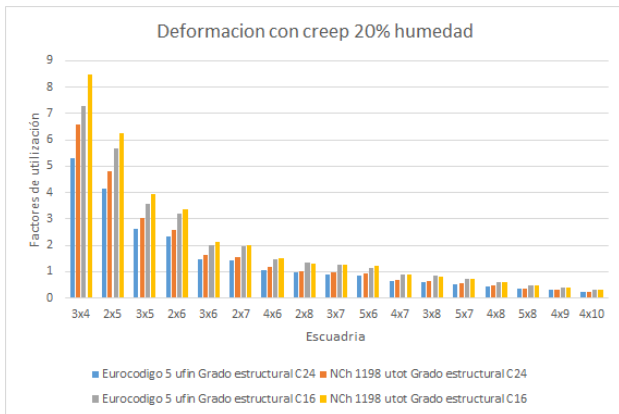


Figura 12: Gráfica valor de trabajo en deformación con creep vs escuadría humedad 20%

Con respecto a los elementos a compresión paralela a la fibra se realizó un análisis de un pie derecho de un muro estructural, el cual tiene un largo de 2.44m, el cual se encuentra simplemente apoyado en sus dos extremos y resiste cargas de peso propio de 280 kg y sobrecarga de techo de 200 kg. Cabe señalar que el revestimiento les brinda apoyo lateral completo a los pies derechos en el plano de la tabiquería. Para este análisis, al igual que el anterior, se consideró una variación de la escuadría de las vigas de madera maciza, la clase de servicio o humedad, según corresponda, y el grado estructural de la madera.

Cuando la humedad es del 12%, la diferencia porcentual promedio para el grado C16 es de 16,65% y para el grado C24 es del 28.65% dando como resultado que la normativa chilena es más conservadora que la normativa europea debido principalmente a los valores característicos resistentes de la madera, que para el Eurocódigo se utiliza en relación al grado C16 y C24, $17 N/mm^2$ y $21 N/mm^2$ respectivamente, no así en la NCh 1198 donde las tensiones admisible son estos valores característicos divididos por un factor de seguridad ($7.5 N/mm^2$ y $8 N/mm^2$ para los grados C16 y C24 respectivamente). Y también en menor medida por el factor de modificación por esbeltez.

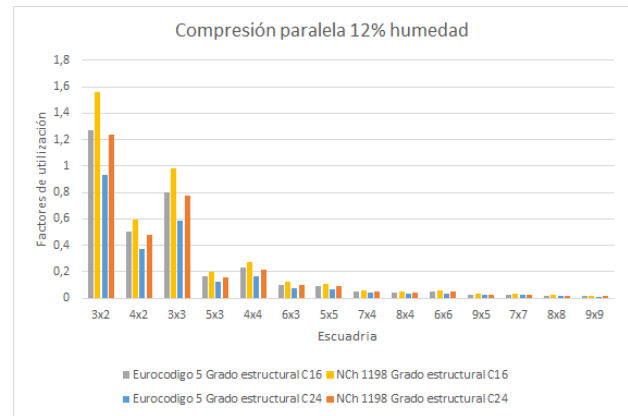


Figura 13: Gráfica valor de trabajo en compresión paralela a la fibra vs escuadría humedad 12%

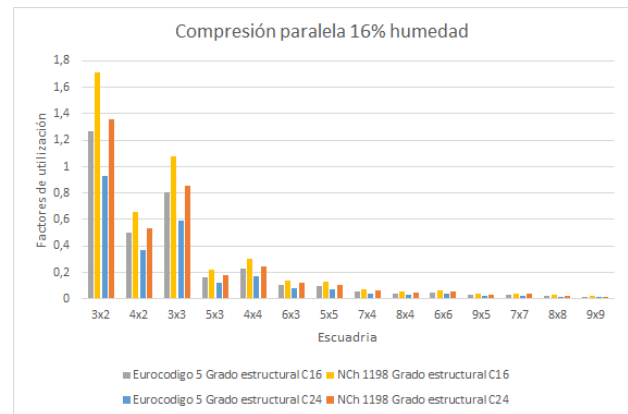


Figura 14: Gráfica valor de trabajo en compresión paralela a la fibra vs escuadría humedad 16%

Cuando la humedad es del 16% y 20% las diferencias porcentuales promedios son 34.34; 49.5; 20.97; 33.44 para los grados C16 y C24 respectivamente, siendo la NCh 1198 más restrictiva en todos los casos.

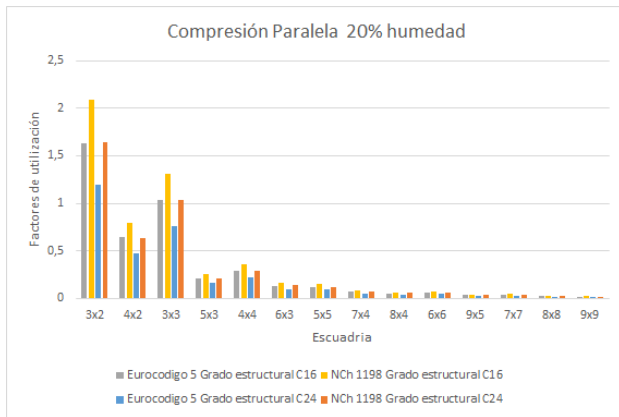


Figura 15: Gráfica valor de trabajo en compresión paralela a la fibra vs escuadría humedad 20%

Ahora en relación al estudio de uniones en cizalle doble se realizó un análisis para distintos diámetros de los pernos de la calidad 6.8 según la norma UNE-EN ISO 898-1 y distintos tipos de magnitud de carga para la combinación $D + L_r$ en la norma chilena y $1.35D + 1.5L_r$ en la norma europea, las cuales se agruparon como la variación porcentual promedio para las distintas cargas vs el número de perno a emplear (aumento del número de pernos de la norma chilena con respecto al Eurocodigo para las diferentes magnitudes de cargas). Este análisis se realizó para distintos tipos de escuadría de los maderos laterales y centrales, así como también para porcentaje de humedad inferior al 19% y mayor al 20%

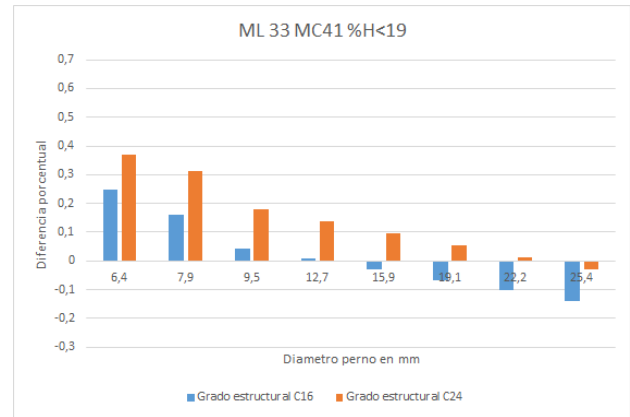


Figura 16: Gráfica diferencia porcentual promedio vs diámetro perno para unión con madero lateral 33 mm, madero central 41 mm y humedad menor al 19%.

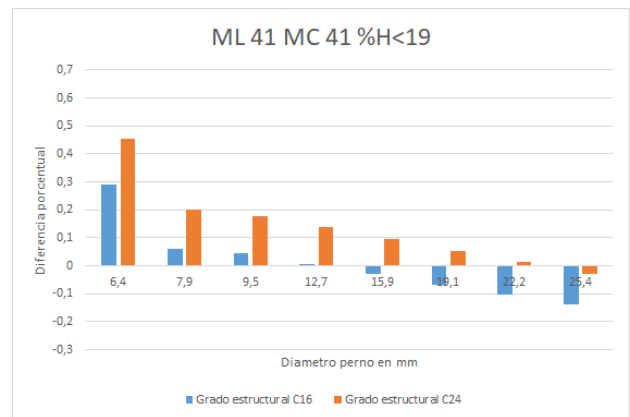


Figura 17: Gráfica diferencia porcentual promedio vs diámetro perno para unión con madero lateral 41 mm, madero central 41 mm y humedad menor al 19%.

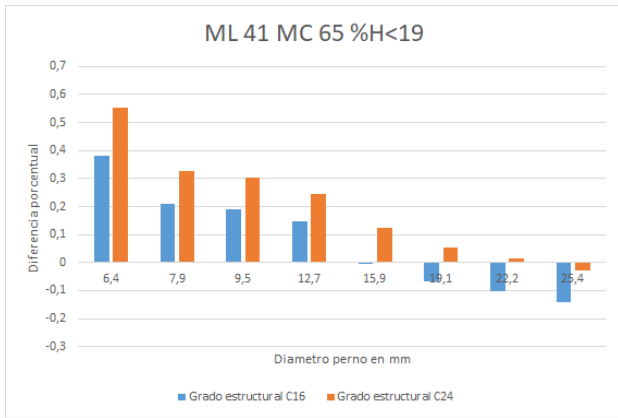


Figura 18: Gráfica diferencia porcentual promedio vs diámetro perno para unión con madero lateral 41 mm, madero central 65 mm y humedad menor al 19%.

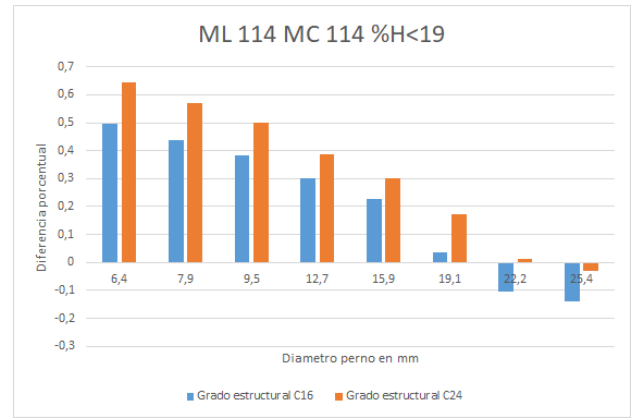


Figura 20: Gráfica diferencia porcentual promedio vs diámetro perno para unión con madero lateral 114 mm, madero central 114 mm y humedad menor al 19%.

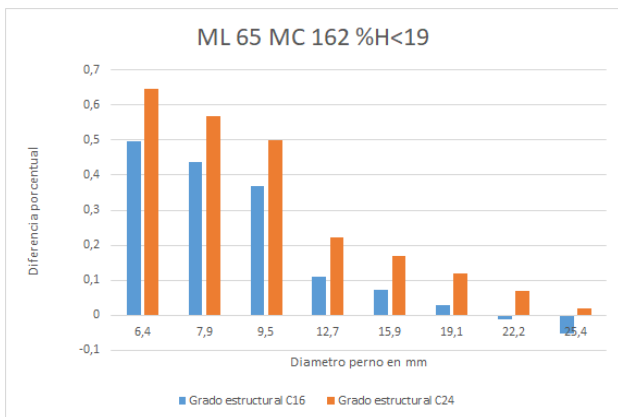


Figura 19: Gráfica diferencia porcentual promedio vs diámetro perno para unión con madero lateral 65 mm, madero central 162 mm y humedad menor al 19%.

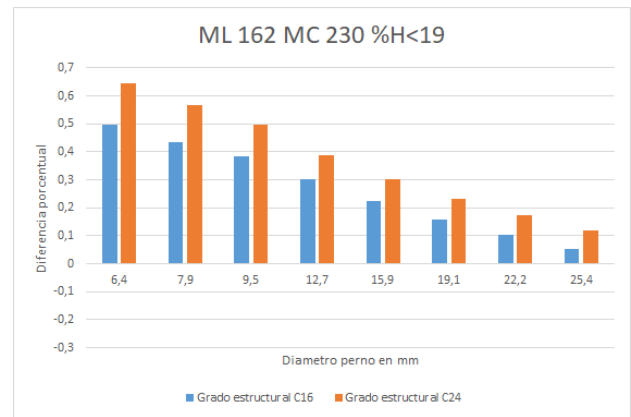


Figura 21: Gráfica diferencia porcentual promedio vs diámetro perno para unión con madero lateral 162 mm, madero central 230 mm y humedad menor al 19%.

Como se puede apreciar en los gráficos la norma europea es menos restrictiva en relación a la norma chilena cuando los diámetros de los pernos son pequeños, ya que el sujetor se flexiona dando como resultado que la unión esté controlada por los modos de fallos relacionados a la tensión de fluencia y momento plástico para la norma chilena y europea respectivamente y también en gran medida al incorporar el efecto de sogá, el cual le proporciona un valor de capacidad de carga de hasta un 25%. Pero

cuando aumenta el diámetro, el sujetor es más rígido, por consiguiente, los modos de fallo y fluencia para el Eurocodigo y la norma chilena respectivamente empiezan a depender más del aplastamiento de la madera, por lo cual la diferencia entre las dos normas empieza a decrecer, finalmente en los diámetros más grandes la norma europea es más restrictiva para las escuadrías más pequeñas y el grado estructural C16 (diferencia porcentual negativa). Esto se da principalmente a que en la norma europea utiliza la densidad característica para calcular la resistencia al aplastamiento en la madera, no así la norma chilena, que utiliza la densidad anhidra media para el cálculo de este. El segmento donde el Eurocódigo es más restrictivo podría disminuirse si es que se ocupara la densidad característica señalada en la NCh 1198, ya que el valor característico de la densidad de la madera para el pino radiata es de 370 kg/m^3 , superando el valor ocupado para el grado estructural C24 en la norma europea que es de 350 kg/m^3 .

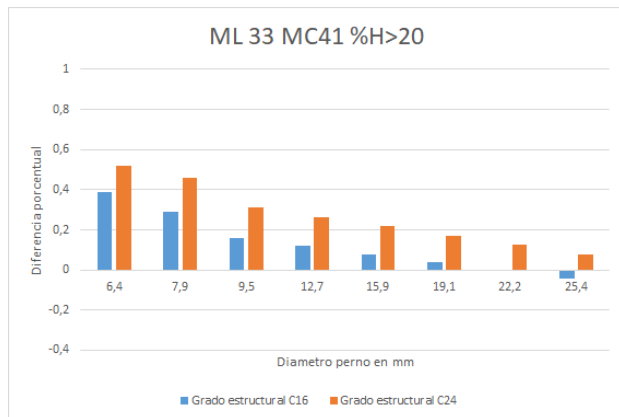


Figura 22: Gráfica diferencia porcentual promedio vs diámetro perno para unión con madero lateral 33 mm, madero central 41 mm y humedad mayor al 20%.

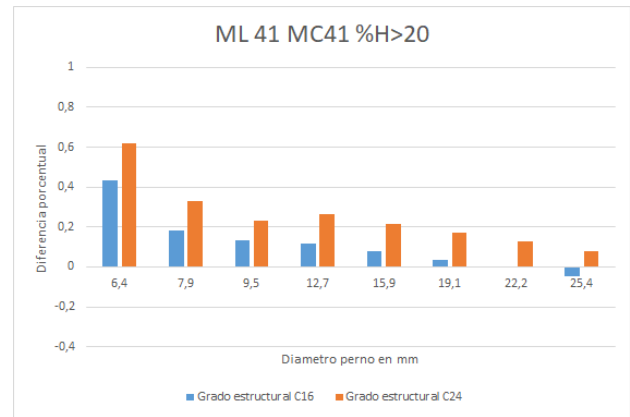


Figura 23: Gráfica diferencia porcentual promedio vs diámetro perno para unión con madero lateral 41 mm, madero central 41 mm y humedad mayor al 20%.

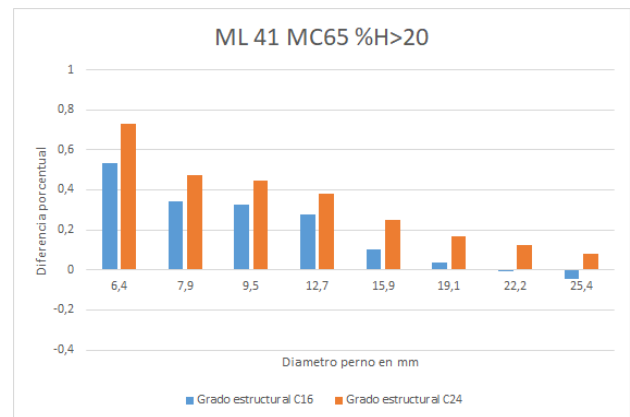


Figura 24: Gráfica diferencia porcentual promedio vs diámetro perno para unión con madero lateral 41 mm, madero central 65 mm y humedad mayor al 20%.

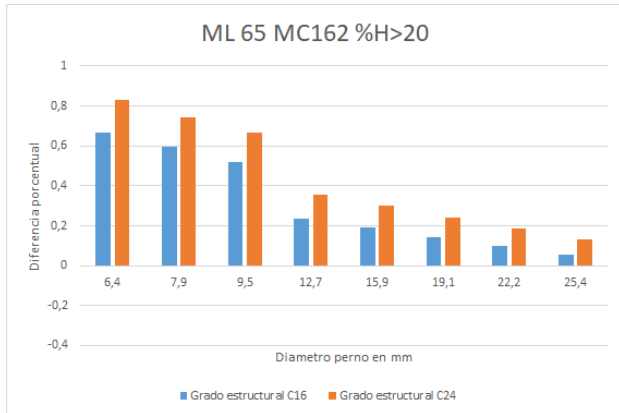


Figura 24: Gráfica diferencia porcentual promedio vs diámetro perno para unión con madero lateral 65 mm, madero central 162 mm y humedad mayor al 20%.

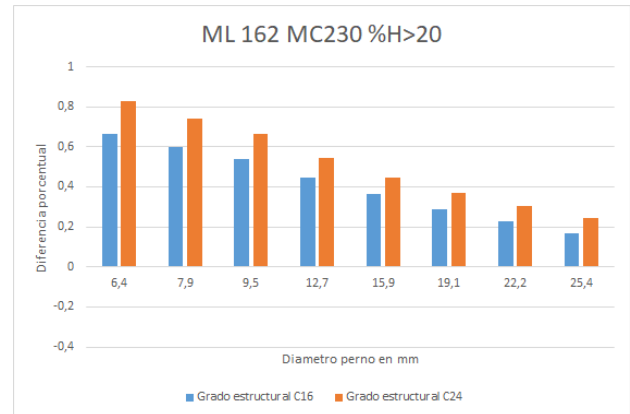


Figura 24: Gráfica diferencia porcentual promedio vs diámetro perno para unión con madero lateral 114 mm, madero central 114 mm y humedad mayor al 20%.

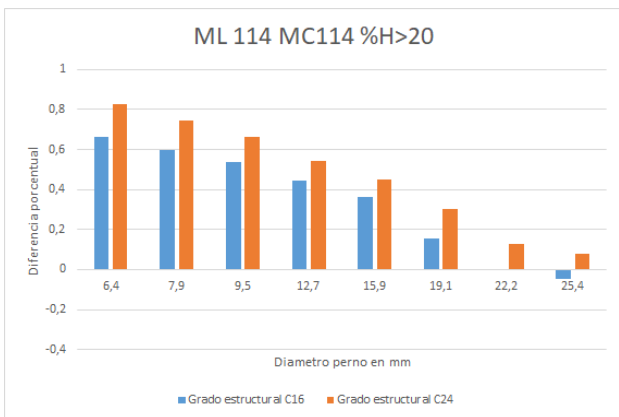


Figura 24: Gráfica diferencia porcentual promedio vs diámetro perno para unión con madero lateral 114 mm, madero central 114 mm y humedad mayor al 20%.

Y cuando la humedad es mayor al 20% ocurre algo similar al caso anterior sólo que las diferencias porcentuales aumentan dado que las capacidades de cargas para el Eurocódigo disminuyen un 20% y en la norma chilena decrece en un 30% por el factor k_{mod} y el factor de modificación de humedad respectivamente, y también en gran medida al valor característico de la densidad, que para el grado estructural C24 es 350 kg/m^3 .

CONCLUSIONES

-Con respecto al análisis en flexión la normativa chilena es más conservadora que la normativa europea. Esto se debe principalmente a los valores característicos resistentes de la madera. En menor medida, se debe al factor de modificación por altura.

-Para el análisis de cizalle la norma chilena es más conservadora cuando se utiliza el grado C24 dado la misma razón que para flexión, en cuanto a los valores característicos. No así para el grado C16 ya que el método analítico de diseño del Eurocódigo 5 penaliza el ancho de la viga para tenerse en cuenta la influencia de las fendas, por lo cual para el análisis en los 3 casos de

humedades para el grado C16 el Eurocódigo es más conservador que la NCh 1198.

-En relación al análisis de deformación la NCh 1198 es más conservadora ya que esta utiliza el módulo de elasticidad característico, no así el Eurocódigo 5 que utiliza el módulo de elasticidad medio el cual es mucho mayor. Pero cuando se realizó el análisis en las peores condiciones (incorporando deformación por fluencia, grado estructural C16, humedad 20% y para valores de altura mayor o igual 8”) la norma chilena pasa a ser menos restrictiva que el Eurocódigo 5.

-En el análisis de compresión paralela a la fibra se obtuvo que la normativa chilena es más conservadora que la normativa europea debido principalmente a los valores característicos resistentes de la madera y también en menor medida por el factor de modificación por esbeltez.

-Con respecto al análisis de uniones la norma chilena es más conservadora cuando los diámetros son más pequeños, dados por los modos de fallos en que la tensión de fluencia y el momento de fluencia son dominantes, y a medida que aumenta este, la diferencia porcentual empieza a decrecer llegando incluso en ciertas configuraciones de uniones a ser más restrictiva el Eurocódigo 5, ya que en los diámetros más grandes los modos de fallos son dominados por el aplastamiento en la madera.

REFERENCIAS

Arriaga Martitegui, F., Iñiguez González, G., Herrero, M., Argüelles Álvarez, R., Fernández Cabo, J. Diseño y cálculo de uniones en estructuras de madera, España: Maderia. Sociedad española de la madera

Arriaga Martitegui, F., (2007) Curso construcción en madeira. Uniones 3. [archivo Pdf]. Recuperado de <http://www.structurat.es/mediapool/78/784930/data/CLAVIJAS.pdf>

Baño, V., Moya, L., O’Neill, H., Cardoso, A., Cagno, M., Cetrangolo, G., Domenech, L. (2015) Proyecto: Documentos técnicos base para la normalización de estructuras y construcción con madera. En *ResearchGate*. DOI: 10.13140/RG.2.2.11549.31200

Basterra, L., (2007) Apuntes de construcción en madera. [archivo Pdf]. Recuperado de <http://www.contrafort.cat/bioconstruccio/apuntes-calculos-adera.pdf>

Comité Europeo de Normalización (CEN). (2003). Eurocódigos. Bases de cálculo de estructuras.

Comité Europeo de Normalización (CEN). (2015). Características mecánicas de los elementos de fijación de acero al carbono y de acero aleado. Parte 1: Pernos, tornillos y bulones con clases de calidad especificadas. Rosca de paso grueso y rosca de paso fino.

Comité Europeo de Normalización (CEN). (2016). Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación.

Comité Europeo de Normalización (CEN). (2017). Madera estructural. Clases resistentes.

Domínguez Lorenzo, Manuel. (2015) Estudio de uniones en estructuras de madera con uso de elementos clavijas (Tesis doctoral) Universidad de Salamanca, Zamora

Gálvez Gabarda, Barbara. (2011) Madera estructural. Tipología y cálculo de uniones (Proyecto final de carrera) Universidad Politécnica de Valencia, Valencia

González Retamal, M. (2017) Apuntes diseño de elementos simples de madera aserrada (NCh 1198). [archivo Pdf]. Curso “cálculo estructural en madera”, Concepción.

Instituto Nacional de Normalización (INN). (2014). NCh 1198, Madera - Construcciones en madera – Calculo.

Instituto Nacional de Normalización (INN). (2014). NCh 3171, Diseño estructural – Disposiciones generales y combinaciones de carga.

Joachim blaß, H., Sandhaas, C., (2017) Timber engineering. Principles of design. En *Scientific publishing*. DOI: 10.5445/KSP/1000069616.

Wagner, M., (2017) apuntes uniones NCh 1198. [archivo Pdf]. Curso “calculo estructural en madera”, Concepción.