



Hacia la normalización de estructuras de madera en Uruguay.

Estado del arte y propuesta para generar un cuerpo normativo para madera estructural.

Moya Silva, Laura
Universidad ORT Uruguay

Baño Gómez, Vanesa
Universidad de la República

Diciembre 2016

Abstract,

Este documento fue elaborado con el objetivo de brindar información que facilite la toma de decisiones a la hora de redactar los documentos técnicos necesarios para la conformación de un cuerpo normativo para madera estructural en Uruguay. La metodología incluyó: i) revisar el estado del arte en los países referentes en el desarrollo de códigos de estructuras de madera, y en los países de la región; ii) discutir con expertos de la comunidad internacional sobre sus experiencias y los motivos que incidieron en la elección del formato de cálculo de estructuras de madera en sus respectivos países; y iii) establecer recomendaciones para la generación de un paquete normativo nacional que acompañe a la norma de cálculo estructural. Los resultados de este trabajo permiten concluir que sería pertinente para Uruguay considerar la adopción del cuerpo normativo europeo, en particular el *Proyecto de estructuras de madera, Eurocódigo 5*. De esta forma los esfuerzos podrían concentrarse en la redacción de anexos nacionales, con información técnica referente a la madera y productos de ingeniería de madera de procedencia uruguaya, y en la redacción de manuales con ejemplos prácticos y documentos técnicos que difundan el conocimiento y permitan adoptar la tecnología de construcción con madera.

Palabras clave: normalización, estructuras de madera, Uruguay

Documento de Investigación, N°5, diciembre 2016. Universidad ORT Uruguay. Facultad de Arquitectura. ISSN 1688-7506

TABLA DE CONTENIDOS

0. Justificación.....	3
1. Introducción.....	4
2. Diseño estructural en madera. Estado del arte.....	12
2.1. Estados Unidos.....	12
2.2. Argentina.....	17
2.3. Chile.....	21
2.4. Europa.....	24
2.5. España.....	32
2.6. Brasil.....	32
3. Evaluación de la situación en Uruguay.....	38
3.1. Sector forestal y maderero.....	38
3.2. Propuesta de plan para el desarrollo de la tecnología de construcción con madera.....	39
3.3. Normativa en Uruguay.....	39
3.4. Caracterización de madera y productos de ingeniería de madera.....	42
4. Hacia la generación de un cuerpo normativo para la madera estructural en Uruguay.....	46
4.1. Talleres con expertos en normas de cálculo estructural.....	46
4.2. Conclusiones y recomendaciones.....	46
5. Bibliografía.....	49

JUSTIFICACION

Este documento fue elaborado con el objetivo de brindar información que facilite la toma de decisiones a la hora de redactar los documentos técnicos necesarios para la conformación de un cuerpo normativo para madera estructural en Uruguay. La metodología empleada incluyó: i) la revisión del estado del arte en los países referentes en el desarrollo de códigos de estructuras de madera, y en los países de la región; ii) la discusión con expertos de la comunidad internacional sobre sus experiencias y los motivos que incidieron en la elección del formato de cálculo de estructuras de madera en sus respectivos países; y iii) el establecimiento de una serie de recomendaciones y pasos a seguir hacia la generación de un paquete normativo nacional que acompañe a la norma de cálculo estructural. Para ello se realizaron talleres de discusión en los que participaron el equipo de investigación y expertos de la comunidad internacional y nacional invitados especialmente para esta actividad. Adicionalmente, con el fin de difundir el estado del arte de la normativa de cálculo estructural en madera, se realizó una jornada de difusión abierta al público en la que expertos invitados dictaron una serie de conferencias técnicas.

Los resultados de este trabajo permiten concluir que sería pertinente para Uruguay considerar la adopción del cuerpo normativo europeo, en particular el *Proyecto de estructuras de madera, Eurocódigo 5*. Esta opción resulta práctica y si fuera adoptada, permitiría ahorrar mucho del trabajo necesario para generar una normativa de características similares, a la vez que facilitaría contar con las actualizaciones periódicas devenidas de los avances del conocimiento y de la tecnología. De esta forma los esfuerzos podrían concentrarse en la redacción de anexos nacionales, con información técnica referente a la madera y productos de ingeniería de madera de procedencia uruguaya, así como en la redacción de manuales con ejemplos prácticos y documentos técnicos que difundan el conocimiento y permitan adoptar la tecnología de construcción con madera.

Este trabajo se enmarca en el Proyecto *Documentos técnicos base para la normalización de estructuras y construcción con madera*, ejecutado por un equipo interinstitucional conformado por técnicos y profesionales del Departamento de Proyectos forestales del Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), del Instituto de Estructuras y Transporte de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (FING), y de la Facultad de Arquitectura de la Universidad ORT Uruguay (ORT). Para la ejecución del proyecto se contó con la financiación del Fondo Industrial de la Dirección Nacional de Industrias, del Ministerio de Industria, Energía y Minería.

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de diseño de una estructura se encuentra normalizado e involucra básicamente tres aspectos: i) caracterización de las propiedades resistentes y elásticas de los materiales (acero, madera, hormigón, albañilería, etc); ii) definición de las cargas y la combinación de cargas imprescindible para el diseño; y iii) definición o acuerdo de un nivel aceptable de seguridad, que sea de fácil y consistente aplicación por los calculistas. Estos aspectos tendrán diferente tratamiento e interpretación dependiendo de la filosofía de cálculo estructural que se emplee, tensiones admisibles o estados límite. A nivel internacional co-existen ambos enfoques, si bien la tendencia es hacia el remplazo del primero por el segundo.

La evolución de los métodos de cálculo de estructuras para los principales materiales estructurales ha sido similar en la mayoría de los países que cuentan con cuerpos normativos consistentes y coherentes. Ejemplo de ello es el camino seguido en Estados Unidos, donde el método de las tensiones admisibles conocido por su acrónimo ASD (Allowable Stress Design) ha sido progresivamente sustituido por el método de los estados límite, comúnmente denominado LRFD (Load and Resistance Factor Design) y que fuera introducido en la década de 1970 para hormigón armado (ACI 318), en 1986 para estructuras de acero (AISC 360) y en 2005 para construcciones de madera (NDS for Wood Construction). Tanto en el caso del acero como en el de la madera, las ediciones más recientes contemplan ambos enfoques. En Argentina el reglamento CIRSOC 601 (INTI, 2013) y en Chile la norma NCh 1198 (INN, 2006) emplean en la actualidad el método de las tensiones admisibles mientras que en Europa y Brasil, las normas de cálculo de estructuras de madera Eurocódigo 5 (EN, 2006 y 2007) y NBR 7190 (ABTN, 1997 y 2010) respectivamente, adoptan el método de los estados límite.

El propósito que subyace en el diseño estructural es asegurar que la probabilidad de falla de una estructura sea “aceptablemente baja”, o por el contrario, la probabilidad de supervivencia sea “suficientemente alta”. La seguridad estructural es garantizada en forma diferente, según sea la filosofía de cálculo adoptada; en síntesis, en el método de las tensiones admisibles se adopta un factor de seguridad único (FS global) que es aplicado a las propiedades del material, mientras que en el método de los estados límite se utiliza una serie de factores de seguridad parciales (FS parciales) que varían para los distintos tipos de acciones, y factores de seguridad que se aplican a las resistencias del material. La Fig 1.1 esquematiza la situación de cálculo para cada uno de los métodos.

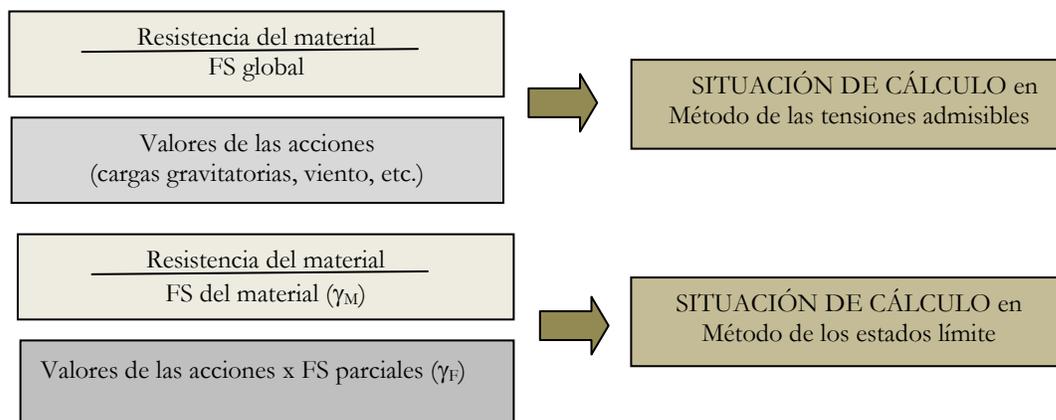


Figura 1.1. Situación de cálculo en el método de las tensiones admisibles y en el de los estados límite (adaptado de Arriaga, 1998)

En Uruguay no existe un cuerpo normativo sobre madera para uso estructural que abarque desde la caracterización de la madera y especificaciones de fabricación de productos y componentes, hasta el diseño cálculo y ejecución de obras, razón por la cual, el método de cálculo es seleccionado por el calculista en base a su experiencia. La mayoría de las veces, el calculista de estructuras al enfrentarse con los vacíos normativos nacionales, especialmente aquellos relacionados con las propiedades estructurales de las maderas de procedencia uruguaya, se ve forzado a adoptar valores de propiedades tabulados en normas extranjeras y a recurrir a estrategias de análisis que le permitan lidiar con las incertidumbres del material nacional. La aplicación exitosa de códigos o normas de cálculo estructural sólo puede lograrse si en forma permanente se realizan investigaciones sobre el material y su empleo, que respalden la efectividad de las reglas de diseño.

1.1. Caracterización de las propiedades estructurales de la madera

Las reglas de diseño, independientemente de la filosofía de cálculo que se emplee, deben proveer una adecuada confiabilidad para la estructura y sus componentes durante la vida útil para la cual fue prevista, por lo cual resulta imprescindible conocer las propiedades mecánicas y físicas del material a utilizar.

El método de las tensiones admisibles, originariamente en el caso de la madera, está basado en valores de tensiones, denominadas “tensiones básicas”, determinados a partir de ensayos sobre cuerpos de prueba de tamaño pequeño y libre de defectos. Los resultados de los ensayos son posteriormente modificados por una serie de factores (asociados a incertidumbres debido al tamaño de las piezas, errores de cálculo, sobrecargas accidentales, etc) a efectos de convertirlos en valores que contemplen las características reales de las piezas de madera de tamaño comercial. La tensión básica se determina de acuerdo a (Arriaga, 1985):

$$F_b = \frac{\bar{X} - k_p \times SD}{k_r} \quad (1.1)$$

donde

F_b ... tensión básica

\bar{X} ... tensión media

k_p ... coeficiente de probabilidad

k_r ... coeficiente de reducción

SD ... desviación estándar

Tabla 1.1. Coeficientes de reducción aplicables a la tensión básica (A partir de Arriaga, 1985)

Solicitud	Normas inglesas ¹			Normas norteamericanas ²			
	Probabilidad (%)	k_p	k_r	Probabilidad (%)	k_p	coníferas k_r	latifoliadas k_r
Flexión	99	2,33	2,25	95	1,645	2,10	2,30
Compresión II fibra	99	2,33	1,40	95	1,645	1,90	2,10
Compresión β fibra	97,5	1,96	1,20	95	1,645	1,67	1,67
Cortante II fibra	99	2,33	2,25	95	1,645	2,10	2,30
Módulo elasticidad medio	---	---	1,00	---	---	0,94	0,94

¹ BS 5268

El numerador $(\bar{X} - k_p \times SD)$ de la ec. (1.1) es comúnmente conocido como “valor característico”.

Valores característicos de las propiedades estructurales de la madera

Dado que los materiales y en particular la madera presentan gran variabilidad en sus propiedades resulta necesario seleccionar un valor estadístico de los datos disponibles de ensayos. La Fig 1.2 representa la variabilidad de una propiedad estructural (por ej. resistencia de flexión) para una serie de productos de madera, graficados a efectos ilustrativos, para un mismo valor medio de esa propiedad. El gráfico relaciona la frecuencia de ocurrencia relativa de los valores de la propiedad a partir de los resultados de ensayos.

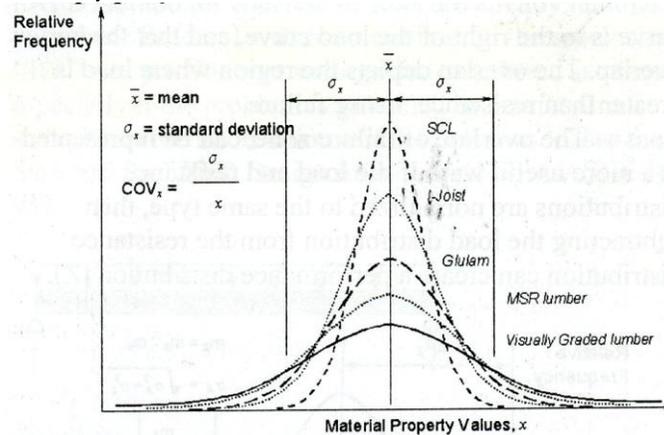


Figura 1.2. Representación de la variabilidad de una propiedad estructural para varios productos de madera (Adaptado de Taylor, 2001)

Para producir el conjunto de datos necesarios para graficar las curvas se realizan ensayos sobre esos productos siguiendo procedimientos normalizados. Cada curva -el gráfico muestra distribuciones normales pero otros tipos de distribución también son posibles- puede ser descrita por sus medidas estadísticas, esto es, media (\bar{x}) y desviación estándar (SD). El área debajo de la curva de distribución normal es igual a 1, que significa que la probabilidad de ocurrencia es igual a 100 por ciento. A modo de ejemplo, es posible determinar el porcentaje de piezas de madera que caerán en o por encima de un valor particular de una propiedad. También es posible determinar la cantidad de desviaciones estándar (la distancia) que ese valor está de la media. En la mayoría de los casos, el valor característico de una propiedad corresponde al límite inferior del test estadístico tal que el 5to percentil es el valor en el cual no más del 5 por ciento de las piezas o probetas de una muestra presentan un valor inferior a dicho límite. En otras palabras, el 95 por ciento de las piezas de una muestra sobrepasan el valor del 5to percentil o valor característico de la propiedad. La metodología de selección de las probetas y el tamaño de la muestra son relevantes en el nivel de confianza del valor característico de las resistencias del material.

En el método de los estados límite, es usual que las propiedades de la madera que serán utilizadas para el cálculo estructural hayan sido determinadas a partir de ensayos realizados sobre cuerpos de prueba de tamaño estructural. Estos procedimientos comenzaron a ser aplicados sistemáticamente a la madera en Norteamérica, fundamentalmente a partir de la década de 1970 (Jessom, 1971; Madsen, 1975, 1978) e incluidos en códigos y normativas norteamericanas (CSA, 1975; ASTM, 1979).

Al analizar los métodos tradicionalmente utilizados para derivar las propiedades de la madera (tensiones), Madsen (1978) señaló algunas desventajas de la filosofía de ensayos en probetas de tamaño pequeño frente a la de ensayos en piezas de tamaño estructural; entre ellas: i) la incidencia del volumen en el comportamiento frágil de una pieza de madera (esto es, el incremento del volumen de una pieza tensionada, conlleva la reducción de su resistencia mecánica); y ii) la aplicación de un factor de seguridad global que incluye la duración de la carga, la ocurrencia de sobrecargas, etc (p ej. 2,1 para solicitaciones de flexión, establecido en ASTM D245), y un factor de seguridad efectivo igual a 1,3, menor que el valor usualmente considerado (1,6-1,7) para otros materiales. Además, la presencia de singularidades en piezas de tamaño estructural tales como nudos, desviación de la fibra, etc. pueden inducir a que el modo de falla difiera al de una probeta libre de defectos, y que la rotura se produzca antes de lo previsto. A modo de ejemplo, en una pieza de madera sometida a flexión y con un nudo en la zona traccionada, la rotura de la pieza suele ocurrir por tracción, y antes de alcanzar el límite elástico en la zona comprimida (Argüelles et al, 2000; Baño et al, 2012).

Los procedimientos de ensayo sobre probetas libre de defectos fueron utilizados hasta la década de los 70, cuando los métodos de cálculo de estructuras de madera seguían el formato de las tensiones admisibles del material. Esta tensión admisible o resistencia se obtenía a partir del 5to. percentil de la distribución normal de la resistencia, al que se aplicaban una serie de factores de ajustes por duración de la carga, humedad, altura de la sección, calidad, y coeficientes de seguridad global (Arriaga et al, 2007). Madsen (1975) demostró que la distribución estadística de la resistencia de 240 piezas de tamaño estructural (38 x 140 x 3660 mm) de madera de Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*), se alejaba de la distribución normal, y propuso una distribución no simétrica Weibull, más precisa. El procedimiento sugerido por Madsen está en concordancia con el método de los estados límites.

Si bien la tendencia mundial es hacia la caracterización en piezas de tamaño estructural, los métodos de ensayo en probetas pequeñas y libres de defectos permiten estimar algunas propiedades mecánicas de difícil determinación en tamaños mayores, tales como las generadas en algunas formas de conexión de piezas estructurales (p.ej. en embarbillados). La Fig 1.3 muestra dos configuraciones del ensayo de flexión.



Figura 1.3. Ensayo en cuerpos de prueba: a) libre de defectos y de tamaño pequeño; y b) de tamaño estructural (Fuente: O'Neill et al, 2002)

1.2. Seguridad estructural

Seguridad es una exigencia clave en la mayoría de códigos y reglamentos de cálculo de estructuras que se basa en principios racionales de riesgo y teorías probabilísticas, y que está sujeta al criterio de los profesionales responsables de la redacción de las normas. Por esta razón es usual encontrar discrepancias entre códigos, relacionadas con las cargas de diseño y su combinación, con los coeficientes de ponderación de cargas, etc., que inciden en la eficiencia del diseño estructural. La seguridad tendrá un tratamiento distinto dependiendo de la filosofía de cálculo adoptada. Pese a estas diferencias, el propósito que subyace en el diseño estructural es asegurar que la probabilidad de falla de una estructura o componente estructural sea “aceptablemente baja”, o por el contrario, la probabilidad de supervivencia sea “suficientemente alta”. Desde el punto de vista estadístico, la seguridad puede ser evaluada en términos medibles de probabilidad.

1.2.1. Seguridad en el método de tensiones admisibles

En el diseño por tensiones admisibles la falla del componente estructural se produce cuando las tensiones originadas por las solicitaciones (momento flector, cortante, axil, etc.) son mayores que las tensiones admisibles; el valor de la tensión admisible, generalmente se obtiene dividiendo el valor de la resistencia característica por un factor de seguridad mayor que 1. En este enfoque la probabilidad de falla está asociada al valor característico, usualmente el 5to percentil, de las resistencias del material. En forma simbólica, en el diseño de elementos estructurales se debe verificar que:

$$E \leq \frac{R}{FS} = R_{adm} \quad (1.2)$$

donde

E.....efecto causado por la combinación nominal de cargas

R.....resistencia nominal (o tensión de diseño), usualmente corresponde al valor característico de la resistencia de la propiedad de interés

FS..... factor de seguridad

R_{adm} ... tensión admisible

1.2.2. Seguridad en el método de estados límite

En el enfoque de los estados límite los requisitos de seguridad estructural están relacionados con estados claramente definidos, denominados “estados límite”, más allá de los cuales la estructura no satisface criterios de desempeño específicos. Se distinguen dos grupos de estados límite: i) los estados límite últimos (ELU), que son aquellos en que se agota la resistencia o capacidad de carga de la estructura o de sus componentes, e incluyen rotura de secciones críticas, inestabilidad global, pandeo y fatiga; y ii) los estados límite de servicio (ELS), que afectan el correcto funcionamiento de la estructura bajo condiciones normales de servicio sin perjudicar su capacidad para soportar cargas, e incluyen deformación excesiva, fisuración y vibración.

Taylor (2001) explica el problema de la seguridad estructural desde la perspectiva del LRDF a través del análisis de una serie de gráficos. Las Fig 1.4.a y 1.4.b representan las curvas de distribución de las resistencias (R) y del efecto de las cargas (E), respectivamente para una muestra determinada.

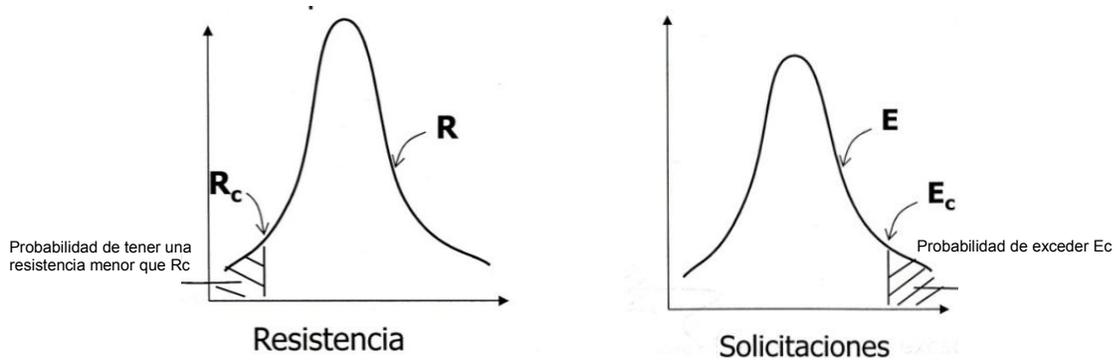


Figura 1.4. Distribución gaussiana de valores de a) resistencias y b) efectos de cargas

Estos dos gráficos pueden ser representados en uno, como muestra la Fig 1.5 Cada una de las curvas tiene su propia descripción estadística (media y desviación estándar), y pueden tener o no el mismo tipo de distribución. Ambas curvas se superponen parcialmente, y la parte superpuesta representa la zona donde se produce la falla, esto es la región donde el efecto de las cargas es mayor que la resistencia.

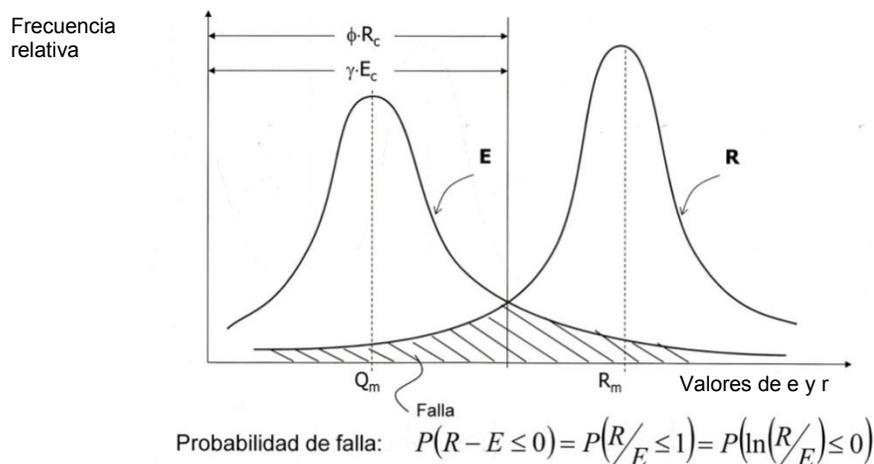


Figura 1.5. Representación conjunta de las curvas de distribución del efecto de las cargas (E) y resistencias (R) (extraído de Herrera, 2007)

La zona superpuesta o región de falla puede ser representada alternativamente, y en forma más útil para el análisis, como se muestra en la Fig 1.6. Si las curvas de efecto de carga y resistencia son normalizadas al mismo tipo, y la curva E es sustraída de la curva R, es posible obtener la curva de desempeño (Z).

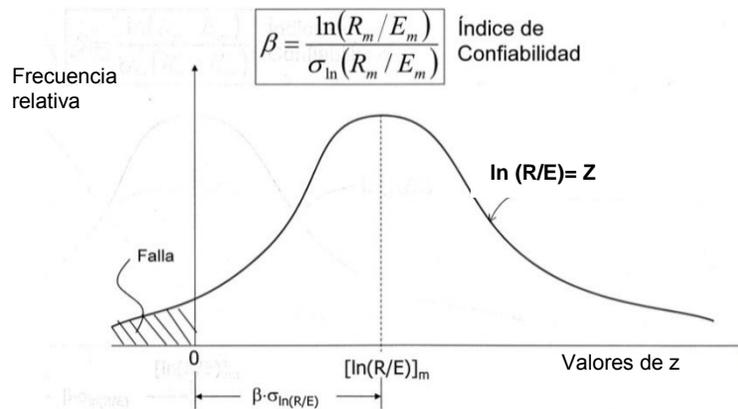


Figura 1.6. Distribución de desempeño (extraído de Herrera, 2007)

El área debajo de la curva Z que cae en la región donde los valores de la propiedad son menores que cero representa la probabilidad de falla de la estructura. Esto permite obtener una medida de la probabilidad de falla, que puede ser descrita en términos de la cantidad de desviaciones estándar desde la media de la distribución. La letra griega beta (β), conocida como “índice de confiabilidad”, es usada para describir este múltiplo y está directamente vinculada a la probabilidad de falla: para valores elevados de β , la probabilidad de falla es muy baja y viceversa. En diseño estructural, varios materiales tienen valores de β entre 2,6 y 2,9, valores que son acordados por consenso en comités de redacción de códigos con el fin de obtener un balance entre seguridad y economía. Sin embargo, en el proceso de diseño, β es invisible, y en su lugar existen otros dos factores vinculados con β , el factor de resistencia ϕ y el factor de carga γ .

En síntesis, en LRFD se aplican por separado i) factores de carga a las combinaciones de cargas aplicadas a la estructura (γ) y ii) factores de resistencia a las resistencias nominales del material (ϕ), para asegurar que la probabilidad de alcanzar un estado límite sea aceptablemente “baja”. Estos factores reflejan las incertidumbres del análisis, diseño, cargas, propiedades del material y fabricación, y las consecuencias de las fallas. En forma simbólica, en el diseño de elementos estructurales se debe verificar que:

$$\sum_{i=1}^n \gamma \times E \leq \phi \times R \quad (1.3)$$

$\left[\begin{array}{c} \beta \end{array} \right]$

donde

E...efecto producido por cada carga en una combinación de carga

R...resistencia nominal (o resistencia de diseño), usualmente corresponde al valor característico de la resistencia de la propiedad de interés

γ ...factor de carga para cada carga en una combinación de carga dada

ϕ ...factor de resistencia

Con γ fijo por prescripción, ϕ varía dependiendo del material y del tipo de sollicitación (flexión, compresión, etc). Valores más bajos de ϕ indican mayor variabilidad del material en el respectivo modo.

1.3. Método de los estados límite versus método de las tensiones admisibles

El método de los estados límite presenta una serie de ventajas sobre el de las tensiones admisibles. Entre las más importantes destacan (Sexsmith et al, 1978):

- La racionalidad del método y su estructura permiten introducir rápidamente cambios en los factores de cargas y de resistencias de forma independiente y de acuerdo a los avances de investigación.
- La independencia entre el formato de las reglas de diseño y los tipos de acciones estructurales posibilita el desarrollo de un cuerpo normativo común para todos los materiales, que permite además compatibilizar diseños con distintos materiales, y evitar inconsistencias que puedan resultar en diseños poco seguros.
- La mejora consistente en el nivel de seguridad resulta en una mayor eficiencia de la capacidad de la estructura y permite una comparación justa entre materiales y sistemas, aspectos ambos que pueden reducir costos.
- La mejora en el nivel probabilístico de información y determinación más realista del comportamiento estructural permite un balance óptimo entre seguridad y costos. Los redactores de códigos y los calculistas cuentan con mediciones más realistas de la seguridad, lo que permite desarrollar y mejorar la intuición en el proceso de diseño.

2. DISEÑO ESTRUCTURAL EN MADERA. ESTADO DEL ARTE

2.1. Estados Unidos

Como se mencionó en el Capítulo 1, en Estados Unidos co-existen los dos enfoques de cálculo para estructuras de madera, el método de las tensiones admisibles, Allowable Stress Design (ASD) y el de los estados límite, Load and Resistance Factor Design (LRFD). Ambos métodos fueron publicados por primera vez en forma conjunta en la versión bi formato de la NDS del año 2005 (AF&PA, 2005), y plantea que independientemente del formato de cálculo, en el diseño de elementos estructurales se debe verificar:

$$f \leq F' \quad (2.1.1)$$

donde

f....resistencia requerida

F'...resistencia provista

El proceso de diseño se realiza de forma diferente dependiendo del método de cálculo.

En ASD

$$F' = F \times C_D \times [\text{factores de ajuste comunes en ASD y LRFD aplicables a cada caso}] \quad (2.1.2)$$

F'...resistencia admisible ajustada a las condiciones del proyecto

F... valor de diseño de referencia del material con un coeficiente de seguridad incorporado y para una duración de carga igual a 10 años (denominada “carga normal”)

C_D...factor de duración de la carga (igual a 1 para cargas de 10 años)

Tabla 2.1.1. Factores de duración de carga para madera aserrada. Método ASD.
Adaptado de NDS (AF&AP, 2005)

Carga de diseño	Duración	C _D
Cargas muertas (D)	Permanente	0,90
Cargas vivas (L)	10 años	1,00
Nieve (S)	2 meses	1,15
Carga de montaje/construcción (C)	7 días	1,25
Viento/Sismo (W/E)	10 minutos	1,60
Impacto (I)	Impacto	2,00

En LRFD

$$F' = F \times K_F \times \phi \times \lambda \times [\text{factores de ajuste comunes en ASD y LRFD aplicables al caso}] \quad (2.1.3)$$

K_F ...factor de conversión de formato: elimina el coeficiente de seguridad aplicado a la resistencia del material y la influencia de una duración de carga igual a 10 años.

ϕ ... factor de resistencia: varía en función del tipo de elemento (componente/unión) y del tipo de sollicitación (define la seguridad conjuntamente con los factores aplicados a las cargas)

λ ... factor de efecto del tiempo: depende de la duración del escenario de cargas factoreadas (vale 1 para un escenario de cargas de 10 min de duración)

Los factores de resistencia para las propiedades de la madera y conexiones se muestran en la Tabla 2.1.2. Valores bajos de ϕ indican gran variabilidad del material en el respectivo modo.

Tabla 2.1.2. Factores ϕ de resistencia para madera. Método LRFD. Adaptado de NDS (AF&AP, 2005)

Modo	ϕ
Flexión	0,85
Tracción	0,80
Compresión	0,90
Compresión \perp	0,90
Corte	0,75
Conexiones	0,65

Para ambos métodos (ASD y LRFD), la Tabla 2.1.3 sintetiza la aplicación de los factores de ajuste para madera aserrada.

Tabla 2.1.3. Factores de ajuste para madera aserrada. Adaptado de NDS (AF&AP, 2005)

	ASD sólo	ADS y LRFD											LRFD sólo		
	Factor de duración de carga	Factor de condición de servicio	Factor de temperatura	Factor de estabilidad lateral de las vigas	Factor de tamaño	Factor de uso de cara	Factor de incisión	Factor de distribución lateral de cargas	Factor de estabilidad de elemento comprimido	Factor de rigidez de pandeo	Factor de aplastamiento	Factor de conversión de formato	Factor de resistencia	Factor efecto del tiempo	
$F_b' = F_b$	x	C_D	C_M	C_t	C_L	C_F	C_{fu}	C_i	C_r	-	-	-	K_F	ϕ_b	λ
$F_t' = F_t$	x	C_D	C_M	C_t	-	C_F	-	C_i	-	-	-	-	K_F	ϕ_t	λ
$F_v' = F_v$	x	C_D	C_M	C_t	-	-	-	C_i	-	-	-	-	K_F	ϕ_v	λ
$F_{cb}' = F_{cb}$	x	-	C_M	C_t	-	-	-	C_i	-	-	-	C_b	K_F	ϕ_c	λ
$F_c' = F_c$	x	C_D	C_M	C_t	-	C_F	-	C_i	-	C_p	-	-	K_F	ϕ_c	λ
$E' = E$	x	-	C_M	C_t	-	-	-	C_i	-	-	-	-	-	-	-
$E_{min}' = E_{min}$	x	-	C_M	C_t	-	-	-	C_i	-	-	C_T	-	K_F	ϕ_s	-

F valor de diseño de referencia, siendo: F_b =flexión, F_t =tracción paralela a las fibras, F_v =corte, $F_{c\perp}$ =compresión perpendicular a la fibra, F_c =compresión paralela a la fibra, E =módulo de elasticidad en flexión, E_{\min} =módulo de elasticidad en flexión (valor mínimo).

2.1.1. Acciones

En el método ASD el efecto de las acciones es considerado a partir de la evaluación de las combinaciones de cargas que producen el efecto más desfavorable para la estructura o para el componente estructural. Estos componentes son diseñados de manera que su resistencia admisible sea mayor o igual que el efecto de las cargas nominales en las combinaciones de la Tabla 2.1.4 (ANSI/ASCE 7-10, 2010).

Tabla 2.1.4. Combinaciones fundamentales de cargas para ASD (ANSI/ASCE 7-10, 2010)

Combinación de cargas
D
D+L
D+(L _r o S o R)
D+0,75L+0,75(L _r o S o R)
D+(0,6W o 0,7E)
D+0,75L+0,75(0,6W)+0,75(L _r o S o R)
D+0,75L+0,75(0,7E)+0,75S
0,6D+0,6W
0,6D+0,7E

D=cargas muertas, L=cargas vivas móviles, L_r=cargas vivas de techo, S=nieve, R=lluvia, W=viento, E=sismo

En el método LRFD los efectos de las cargas son considerados mediante los factores λ asociados con las combinaciones de cargas establecidas en NDS (AF&PA, 2005) y que son consistentes con ANSI/ASCE 7-10 (2010). Los valores λ son reproducidos en la Tabla 2.1.5.

Tabla 2.1.5. Combinación de cargas y factores λ para madera. Método LRFD. Adaptado de NDS (AF&PA, 2005)

Combinación de cargas	Duración	λ
1,4 (D+F)	Permanente	0,6
1,2 (D+F)+1,6(H)+0,5(Lr o S o R)	Permanente	0,6
1,2 (D+F)+1,6(L+H)+0,5(Lr o S o R)		0,7 cuando L es de acopio 0,8 cuando L es de ocupación 1,25 cuando L es de impacto
1,2 D+1,6(Lr o S o R)+(L o 0,8W)	Largo plazo	0,8
1,2 D+1,6W+L+0,5(Lr o S o R)	10 min	1,0
1,2D+1,0E+L+0,2 S	10 min	1,0
0,9D+1,6W+1,6H	10 min	1,0
0,9D+1,0E+1,6H	10 min	1,0

D=cargas muertas, F=cargas debido a fluidos, H=cargas debido a presión del suelo, L=cargas vivas móviles, Lr=cargas vivas de techo, S=nieve, R=lluvia, W=viento, E=sismo

2.1.2. Propiedades del material

En EEUU las propiedades de diseño para madera clasificada visualmente publicadas en el Suplemento “Design values for wood construction” de la NDS (AF&PA, 2005) están basadas en dos grupos diferentes de normas de la American Society for Testing and Materials (ASTM). Según Breyer et al. (2007):

i) Procedimientos de ensayo para cuerpos de prueba de pequeñas dimensiones y libres de defectos: ASTM D 2555 y ASTM D 245. Los valores de resistencia de la madera libre de defectos se determinan ensayando probetas de dimensiones pequeñas, de grano derecho y de una determinada especie, de acuerdo a ASTM D143. El valor unitario de la resistencia (tensión) de una pieza de dimensiones pequeñas libre de defectos es significativamente mayor que el valor unitario de la resistencia de una pieza de tamaño de uso. Una vez determinada la tensión (básica) de la madera, los efectos de las características naturales que son permitidos en los diferentes grados de las piezas de tamaño estructural son considerados multiplicando los valores de la madera libre de defectos por un factor de reducción conocido como “razón de resistencia”.

ii) Procedimientos de ensayo “en el grado” para cuerpos de prueba de tamaño estructural: ASTM D 1990. Estos procedimientos sugeridos por primera vez por Madsen (1975 y 1978), fueron desarrollados en un proyecto colaborativo entre la industria maderera estadounidense y el Forest Products Laboratory (FPL) de Madison, Wisconsin. El propósito del proyecto fue ensayar piezas de madera aserrada de tamaño estructural que habían sido previamente clasificadas en la forma habitual para las distintas especies, y como el nombre lo indica "en grado", las piezas ensayadas fueron representativas de la madera aserrada disponible en el mercado. Aproximadamente 73.000 piezas de tamaño estructural fueron ensayadas en flexión, tracción y compresión paralela a la fibra de acuerdo con la norma ASTM D 198 y ASTM D 4761. Se desarrollaron también relaciones entre propiedades mecánicas y el contenido de humedad, grado, y tamaño.

2.1.2.1. Valores de diseño de referencia para madera aserrada

Los valores de las propiedades de diseño de la madera aserrada de EEUU-Canadá están tabulados en una serie de cuadros en el Suplemento “Design values for wood construction” de la NDS (AF&PA, 2005). Estos cuadros incluyen varias especies o combinación de especies, tanto para madera aserrada clasificada visualmente como para madera clasificada mecánicamente. A efectos informativos, se incluye en este informe la Tabla 2.1.6 con las propiedades de diseño de referencia para madera aserrada de pino del sur clasificada visualmente.

Tabla 2.1.6. Propiedades de diseño de referencia* para madera aserrada de pino del sur, especies mezcladas (Adaptado de NDS, 2005)

Grado	Dimensiones	Tensión de Flexión	Tracción paralela a la fibra	Corte paralelo a la fibra	Compresión perpendicular a la fibra	Compresión paralela a la fibra	Módulo de elasticidad	Módulo de elasticidad mínimo
		F _b (psi)	F _t (psi)	F _c (psi)	F _{c⊥} (psi)	F _c (psi)	E (psi)	E _{min} (psi)
Selecto Nº1 Nº2 Nº3 y pie derecho	2"x4"	2050	1200	175	565	1800	1600000	580000
		1450	875	175	565	1650	1500000	550000
		1300	775	175	565	1650	1400000	510000
		750	450	175	565	950	1200000	440000
Selecto Nº1 Nº2 Nº3 y pie derecho	5"-6" de ancho	1850	1100	175	565	1700	1600000	580000
		1300	750	175	565	1550	1500000	550000
		1150	675	175	565	1550	1400000	510000
		675	400	175	565	875	1200000	440000
Selecto Nº1 Nº2 Nº3 y pie derecho	8" de ancho	1750	1000	175	565	1600	1600000	580000
		1200	700	175	565	1450	1500000	550000
		1050	625	175	565	1450	1400000	510000
		625	375	175	565	850	1200000	440000

*Valores en libras por pulgadas al cuadrado (psi). 1psi=0,006895 N/mm²

2.1.2.2. Valores de diseño de referencia para madera laminada encolada

Los valores de diseño de las propiedades de la madera laminada encolada para coníferas de EEUU-Canadá están indicados en dos conjuntos de cuadros, uno para elementos sometidos principalmente a esfuerzos de flexión, y otro para elementos sometidos principalmente a esfuerzos axiales, en el Suplemento “Design values for wood construction” de la NDS (AF&PA, 2005). Estos cuadros incluyen valores de referencia para piezas de madera laminada de configuración homogénea y combinada.

Las propiedades resistentes de la madera laminada encolada se encuentran agrupadas en clases de resistencia, siendo cada clase designada por el valor de resistencia de referencia de flexión, y el valor medio del módulo de elasticidad en flexión. Por ejemplo, una pieza de madera laminada encolada clasificada “16F-1.3E”, indica que se trata de una viga (sometida a flexión) que tiene 1600 psi de resistencia de flexión, y 1.3 x10⁶ psi de módulo de elasticidad. A efectos ilustrativos, la Tabla 2.1.7

muestra las propiedades de diseño de referencia para madera laminada encolada de coníferas de EEUU-Canadá.

Tabla 2.1.7. Propiedades de diseño de referencia para madera laminada encolada de coníferas Adaptado de NDS (AF&PA, 2005)

Clase resistente	Flexión en el eje x-x						Flexión en el eje y-y						Miembros cargados axialmente			Sujeciones
	Zona traccionada- Flexión positiva	Zona comprimida- Flexión negativa	Compresión perpendicular a la fibra	Corte paralelo a la fibra	Módulo de elasticidad	Módulo de elasticidad para estabilidad de pilares y vigas	Extreme fiber en flexión	Compresión perpendicular a la fibra	Corte paralelo a la fibra	Módulo de elasticidad	Módulo de elasticidad para estabilidad de pilares y vigas	Tracción paralela a la fibra	Compresión paralela a la fibra	Módulo de elasticidad	Gravedad específica	
	F _{bx} ⁺ (psi)	F _{bx} ⁻ (psi)	F _{c⊥x} (psi)	F _{vx} (psi)	E _x (psi)	E _{x min} (psi)	F _{by} (psi)	F _{c⊥y} (psi)	F _{vy} (psi)	E _y (10 ⁶ psi)	E _{ymin} (10 ⁶ psi)	F _t (psi)	F _c (psi)	E _{axial} (10 ⁶ psi)	G	
16F-1.3E	1600	925	315	195	1.3	0.67	800	315	170	1.1	0.57	675	925	1.2	0.42	
20F-1.5E	2000	1100	425	210	1.5	0.78	800	315	185	1.2	0.62	725	925	1.3	0.42	
24F-1.7E	2400	1450	500	210	1.7	0.88	1050	315	185	1.3	0.67	775	1000	1.4	0.42	
24F-1.8E	2400	1450	650	265	1.8	0.93	1450	560	230	1.6	0.83	1100	1600	1.7	0.50	
26F-1.9E	2600	1950	650	265	1.9	0.98	1600	560	230	1.6	0.83	1150	1600	1.7	0.50	
28F-2.1E SP	2800	2300	740	300	2.1	1.09	1600	650	260	1.7	0.88	1250	1750	1.7	0.55	
30F-2.1E SP	3000	2400	740	300	2.1	1.09	1750	650	260	1.7	0.88	1250	1750	1.7	0.55	

2.2. Argentina

El “Reglamento argentino de estructuras de madera” CIRSOC 601 (IRAM, 2013) en su primera versión sigue el enfoque de las tensiones admisibles y adopta como base la NDS 2005. Está prevista la incorporación en un futuro próximo el método LRFD, con lo cual el reglamento se presentará en bi-formato ASD y LRFD. El procedimiento general adoptado por el CIRSOC 601 para el cálculo (se corresponde con el ASD del NDS 2005):

$$f \leq F' \quad (2.2.1)$$

donde

f....resistencia requerida

F'...resistencia provista, siendo F'=F x factores de ajuste aplicables al caso

A efectos ilustrativos, la Tabla 2.2.1 presenta los factores de ajuste de la madera aserrada.

Tabla 2.2.1. Factores de ajuste aplicables para madera aserrada. Extraído de CIRSOC 601 (IRAM, 2013)

Tensiones y módulo de elasticidad	Factores de ajuste aplicables							
F _b '=F _b x	C _D	C _M	C _t	C _L	C _F	C _r	-	-
F _t '= F _t x	C _D	C _M	C _t	-	C _F	-	-	-
F _v '=F _v x	C _D	C _M	C _t	-	-	-	-	-
F _c '=F _c x	C _D	C _M	C _t	-	-	-	-	-
F _c '=F _c x	C _D	C _M	C _t	-	-	-	C _P	-
E'=E x	-	C _M	C _t	-	-	-	-	-
E' _{0.05} =E _{0.05} x	-	C _M	C _t	-	-	-	-	-
E' _{min} =E _{min} x	-	C _M	C _t	-	-	-	-	-

Organización del CIRSOC 601

En la primera versión (en ASD) el reglamento se organiza en nueve capítulos que proveen las reglas de diseño, y cuatro suplementos con los valores de diseño de referencia.

En relación a la NDS 2005, se realizaron cambios en: i) la organización y ii) las reglas de origen, e iii) incorporaciones de interés (Piter, 2014).

i) organización: se generaron apéndices y comentarios condensados en los capítulos (por razones de simplificación); se redujo la cantidad de capítulos y se modificó el ordenamiento de temas (por razones de sencillez y cultura); se redactaron capítulos que están consolidados totalmente, o parcialmente debido a la falta de antecedentes en el país.

Suplemento 1: Valores de diseño de referencia para madera aserrada

- Valores basados en propiedades determinadas empíricamente para clases resistentes de combinaciones especie (grupo de especies/procedencia) cultivadas en el país.
- Normas IRAM que respaldan los métodos de clasificación y proveen los valores característicos de las propiedades fundamentales (las restantes se derivan siguiendo el criterio europeo salvo que existan determinaciones).
- Apéndices del Suplemento que proveen el método de clasificación por resistencia cuando el mismo no está normado por IRAM.
- Conversión de los valores característicos a los de diseño considerando condiciones de referencia adoptadas en las reglas.

Suplemento 2: Valores de diseño para madera laminada encolada estructural

- Valores basados en propiedades determinadas empíricamente para las especies incluidas en la norma IRAM 9660-1 (IRAM, 2006).

Suplemento 3: Valores de diseño para miembros estructurales de sección circular

- Postes de Eucalyptus grandis ensayados en voladizo (estado verde), la carencia de datos de postes de otras especies, la carencia de datos de secciones de menor tamaño y en estado seco.

Suplemento 4: Valores de diseño para uniones mecánicas

- Valores de la tensión de aplastamiento en función de la densidad, según el criterio de la NDS (2005).
- Su comparación con los resultados obtenidos empíricamente para algunas especies cultivada sen el país.
- El proceso y las dificultades de comprobar la tensión de aplastamiento para todas las especies cultivadas.

ii) reglas de origen: solamente en aquellos casos indispensables, y debido a razones generales como bibliografía de apoyo:

- modificaciones: en la dimensiones de referencia de los materiales, espaciamento de uniones, etc.;
- incorporaciones: columnas compuestas unidas con celosías y separadores, vibraciones inducidas en pisos, mayor énfasis en el control de las deformaciones, etc;
- supresiones: columnas compuestas unidas con anillos, disminución de la capacidad portante de elementos de fijación con espaciamento reducido, etc.

iii) incorporaciones de interés

Deformaciones

- Cálculo de las deformaciones diferidas

$$\Delta_r = K_{cr} \Delta_{i(LD)} + \Delta_{i(CD)} \quad (2.2.2)$$

donde K_{cr} es el factor de deformación dependiente del tiempo, y sus valores cuentan con respaldo de resultados experimentales:

Elemento estructural	K _{cr}		
	1,5	2,0	3,0
Vigas de madera aserrada, madera laminada encolada, prefabricadas cargadas <u>en estado seco</u> y cuya condición de servicio se corresponda al <u>estado seco</u>			
Vigas de madera aserrada, madera laminada encolada, prefabricadas cargadas <u>en estado seco</u> y cuya condición de servicio en obra se corresponda al <u>estado húmedo</u>	X		
Paneles estructurales utilizados en una condición de servicio correspondiente al <u>estado seco</u>		X	
Vigas de madera aserrada o de sección transversal circular, cargadas <u>en estado verde</u> y que se secan bajo carga			X

- Limitación de las deformaciones

Se establecen dos limitaciones: a) deformación instantánea originada por las cargas variables y b) deformación final neta originada por la totalidad de cargas

Control de las vibraciones inducidas por el tránsito humano

Se establece y valida experimentalmente en entresijos, la ecuación para calcular la frecuencia natural de vibración f_0 , que debe ser mayor que 8Hz :

$$f_0 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{E'}{m_{ua}}} > 8 \text{ Hz} \quad (2.2.3)$$

donde

l ...luz de cálculo (en m)

E' ...módulo de elasticidad ajustado (en N/m²)

I ...momento de inercia de la sección transversal de los elementos resistentes existentes en una franja de entre piso con ancho igual a 1 m (en m⁴/m=m³)

m_{ua} ...la masa del entresijo por unidad de área (kg/m²=Ns²/m³)

2.2.1. Acciones

Reglamentos y normas de acompañamiento (nacionales)

- CIRSOC 101 (2005). Reglamento argentino de cargas permanentes y sobrecargas mínimas de diseño para edificios y otras estructuras
- CIRSOC 102 (2005). Reglamento argentino de la acción del viento sobre las construcciones
- CIRSOC 104 (1997). Reglamento argentino de la acción de la nieve y del hielo sobre las construcciones

- CIRSOC 105 (1982). Superposición de acciones. (Combinación de estados de carga)

La determinación de la combinación crítica teniendo en cuenta la duración de las cargas, está indicada en el cuerpo del reglamento CIRSOC 601 (2013) y está basada en el reglamento argentino para estructuras de acero CIRSOC 301 (2005). Se aplica el criterio adoptado en el artículo 1.4 para analizar las combinaciones de cargas, teniendo en cuenta a su vez la incidencia del factor de duración de la carga (CD).

2.2.2. Propiedades del material

A efectos informativos, se incluye en este informe la Tabla 2.2.2 con los valores característicos de las propiedades mecánicas para madera de pino taeda y elliottii cultivado en el noreste argentino.

Tabla 2.2.2. Valores característicos de las propiedades mecánicas y densidad para cada clase de resistencia de madera de pino. Extraído de IRAM 9662-3 (IRAM, 2006)

Clase de resistencia	Resistencia a la flexión ⁽¹⁾ (N/mm ²)	Resistencia a la tracción ⁽²⁾ (N/mm ²)	Módulo de elasticidad ⁽³⁾ (N/mm ²)	Densidad ⁽⁴⁾ (kg/m ³)
1	18,0	11,0	12 000	420
2	11,0	7,0	7 000	390

(1) Valor característico (5%) calculado para una altura de referencia de 150 mm de acuerdo con la norma UNE EN 384:2004 – Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.

(2) Valor característico (5%) calculado para un ancho de referencia de 150 mm de acuerdo con la UNE EN 384:2004.

(3) Valor característico medio calculado para un contenido de humedad de referencia de 12 % de acuerdo con la UNE EN 384:2004.

(4) Valor característico (5%) calculado para un contenido de humedad de referencia de 12 % conforme a la norma UNE EN 384:2004.

Los valores de las tensiones de referencia, detallados en la Tabla 2.2.3, se obtienen mediante la ecuación:

$$F_x = \frac{f_{x,k}}{(CS \times CD)} \quad (2.2.4)$$

donde:

$f_{x,k}$tensión característica de Tabla 2.2.2

CS.....coeficiente de seguridad CS=2

CD....coeficiente de duración de carga CD=1,6

El valor del módulo de elasticidad de diseño de referencia se obtiene al multiplicar el valor medio de la Tabla 2.2.2 por 0,86.

Tabla 2.2.3. Valores de diseño de referencia para tablas de pino taeda y elliottii clasificadas por resistencia conforme a IRAM 9662-3 (IRAM, 2006). Extraído de CIRSOC 601 (IRAM, 2013)

Clase de resistencia	Fb ⁽¹⁾ (N/mm ²)	Ft (N/mm ²)	Fv (N/mm ²)	Fc⊥ (N/mm ²)	Fc (N/mm ²)	E (N/mm ²)	E _{0,05} (N/mm ²)	E _{min} (N/mm ²)
1	5,6	3,4	0,60	0,90	5,6	10.300	6.900	4.400
2	3,4	2,2	0,40	0,80	4,6	6.000	4.000	2.600
(1) Flexión de plano								

Normas de acompañamiento (nacionales)

IRAM 9660-1 (2006). Madera laminada encolada estructural. Parte 1: Clases de resistencia y requisitos de fabricación y control

IRAM 9660-2 (2006). Madera laminada encolada estructural. Parte 2: Métodos de ensayo. Clasificación visual de las tablas por resistencia

IRAM 9661 (2006). Madera laminada encolada estructural. Requisitos de los empalmes por unión dentada

IRAM 9662-1 (2006). Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 1: Tablas de pino Paraná (*Araucaria angustifolia*)

IRAM 9662-2 (2006). Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 2: Tablas de eucalipto (*Eucalyptus grandis*)

IRAM 9662-3 (2006). Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 3: Tablas de pino taeda y elliotti (*Pinus taeda* y *elliottii*)

2.3. Chile

En Chile la madera como material estructural fue ignorada hasta mediados del siglo XX. En 1977 se publicó la primera norma de diseño de estructuras de madera, NCh 1198, basada en el British Standard Code of Practice CP 112 (1967) y en resultados de proyectos de investigación aplicada desarrollados por el Instituto Forestal (INFOR). Si bien la norma abarcó los principales campos de aplicación de la madera en construcción, no tuvo impacto en el medio debido principalmente a la falta de disponibilidad de los productos de madera estructural citados en dicho documento (Wagner, 2014).

La segunda versión de la norma NCh 1198 se publicó en 1991, y contó con la participación del INFOR y de las Facultadas de Ingeniería Civil e Ingeniería Forestal de la U de Chile. La norma compiló contenidos de la alemana DIN 1052 (1967), la estadounidense NDS for Wood Construction (1986) y resultados de investigaciones locales desarrolladas entre 1970 y 1989. Interesa destacar la participación de la industria maderera que por primera vez se comprometió con el emprendimiento y aportó la caracterización mecánica de tres grados visuales de madera estructural de pino radiata y la norma de clasificación visual de los grados NCh 1207 (INN, 2005). Simultáneamente y sobre la base de una investigación del INFOR fueron publicadas normas relacionadas con la clasificación visual por resistencia de madera aserrada para la totalidad de las especies de madera potencialmente comerciables en el país y los correspondientes criterios de derivación de propiedades mecánicas admisibles a través de un conjunto de tres normas: NCh 1970 partes 1 y 2 (INN, 1988), NCh 1989 (INN, 1986) y NCh 1990 (INN, 1986). Otro aporte importante del INFOR a fines de 1989 y comienzos de 1990 fue la elaboración de un conjunto de normas relacionadas con la fabricación, control de calidad y derivación de tensiones admisibles de madera laminada encolada de pino radiata, NCh 2148 (INN, 1989), NCh 2150 (INN, 1991) y NCh 2165 (INN, 1991) basadas en la correspondiente normativa estadounidense y la puesta en marcha de una planta piloto de fabricación del producto.

La tercera versión de la norma NCh 1198 (INN, 2006), incluyó los grados mecánicos de pino radiata y actualizó aspectos tales como el modelo de fluencia en uniones. Actualmente está a punto de publicarse la cuarta redacción, que incluirá una nueva gama de grados estructurales mecánicos de alta capacidad resistente y aprovechar para incorporar especificaciones para el diseño de uniones con conectores dentados (Wagner, 2014)

La norma de cálculo de estructuras de madera de Chile “Madera- Construcciones en madera- Cálculo” NCh 1198 (INN, 2006) sigue el enfoque de las tensiones admisibles, y plantea que en el diseño de un elemento estructural, se debe verificar que:

$$f = \frac{S}{A} \leq F_{dis} = F * \Pi_j K_j \quad (2.3.1)$$

donde

S...solicitud producida por una combinación de cargas

A...propiedad “resistente” de la sección transversal de la pieza

f...tensión de trabajo

F_{dis}...tensión de diseño

F.....tensión admisible, referida a un contenido de humedad de 12%, a una duración de carga de 10 años, y a las dimensiones de la probeta de ensayo

K_j...factor de modificación

A efectos ilustrativos, se presenta la derivación de la tensión de diseño de flexión para una viga de madera aserrada.

$$i) \text{ en la zona flexo-traccionada: } F_{ft,dis} = F_f \times K_H \times K_D \times K_C \times K_{hf} \quad (2.3.2)$$

$$ii) \text{ en la zona flexo-comprimida: } F_{fv,dis} = F_f \times K_H \times K_D \times K_C \times K_{\lambda v} \quad (2.3.3)$$

donde

F_{ft,dis}...tensión de diseño en flexión en el borde traccionado

F_{fv,dis}...tensión de diseño en flexión el borde considerando efectos de inestabilidad por vuelco

F_f.....tensión admisible en flexión

K_H.....factor de modificación por contenido de humedad

K_D.....factor de modificación por duración de la carga

K_H.....factor de modificación por contenido de humedad

K_C.....factor de modificación por trabajo conjunto

K_{hf}.....factor de modificación por altura

K_{λv}.....factor de modificación por volcamiento

2.3.1. Acciones

Normas de acompañamiento (nacionales)

NCh 3171 (2010). Diseño estructural. Combinaciones de acciones y cargas

NCh 432 (1971). Diseño estructural. Cargas de viento

NCh 1537 (1986). Diseño estructural. Cargas permanentes y sobrecargas de uso

2.3.2. Propiedades del material

En Chile la experiencia en la determinación de las propiedades de la madera y los productos de ingeniería de madera es similar a la estadounidense. La NCh 1198 (2006) presenta los valores de tensiones admisibles y módulo de elasticidad para madera aserrada en dos cuadros independientes: i) un cuadro con valores para todas las especies excepto el pino radiata, donde las propiedades corresponden a valores determinados en ensayos de cuerpos de prueba de pequeñas dimensiones y libres de defectos; y ii) otro cuadro con valores para el pino radiata, determinados en ensayos de cuerpos de prueba de tamaño estructural.

La tensión admisible resulta de dividir el valor característico de la resistencia del material por un coeficiente de seguridad único para cada propiedad y mayor que 1. A modo de ejemplo, la norma ASTM D 1990-07 establece coeficientes de ajuste o seguridad (n) que incluyen una corrección por duración de carga de 10 años y un factor de seguridad de 2,1 para flexión y tracción paralela a la fibra, y 1,9 para compresión paralela a la fibra.

$$F = \frac{F_k}{n} \quad (2.3.4)$$

donde:

F...tensión admisible

F_k...resistencia característica, usualmente corresponde al 5to. percentil de la propiedad de interés

n...coeficiente equivalente al k_r de la norma ASTM D 245 (ver Tabla 1.1)

A efectos informativos, se incluye en este informe la Tabla 2.3.1 con las tensiones admisibles y módulo de elasticidad para madera aserrada de pino radiata clasificada visualmente y mecánicamente.

Tabla 2.3.1. Tensiones admisibles y módulo de elasticidad* para madera aserrada de pino radiata. Adaptado de NCh 1198 (INN, 2006)

Grado estructural	Tensiones admisibles de					Módulo de elasticidad en flexión E (MPa)	Índice de aplastamiento en compresión normal E _{cn,h} (MPa/mm)
	Tensión de Flexión F _b (MPa)	Compresión paralela a la fibra F _c (MPa)	Tracción paralela a la fibra F _t (MPa)	Compresión perpendicular a la fibra F _{c⊥} (MPa)	Cizalle F _{cz} (MPa)		
a) Visuales							
GS	11,0	8,5	6,0	2,5	1,1	10500	5,65
G1	7,5	7,5	5,0	2,5	1,1	10000	
G1 y mejor	9,5	7,8	5,5	2,5	1,1	10100	
G2	5,4	6,5	4,0	2,5	1,1	8900	
b) Mecánicos							
C24	9,3	8,0	4,7	2,5	1,1	10200	5,65
C16	5,2	7,5	3,5	2,5	1,1	7900	

*Valores correspondientes a 12% de contenido de humedad

Normas de acompañamiento (nacionales)

NCh 1198 (2006). Madera. Construcciones en madera. Cálculo

NCh 1207 (2005). Pino radiata. Clasificación visual para uso estructural. Especificaciones de los grados de calidad

NCh 1970/1 (1988). Maderas. Parte 1: Especies latifoliadas. Clasificación visual para uso estructural. Especificaciones de los grados de calidad

NCh 1970/2 (1988). Maderas. Parte 2: Especies coníferas. Clasificación visual para uso estructural. Especificaciones de los grados de calidad

NCh 1989 (1986). Maderas. Agrupamiento de especies madereras según su resistencia. Procedimiento

NCh 1990 (1986). Madera. Tensiones admisibles para madera estructural.

NCh 2148 (1989). Madera laminada encolada. Requisitos e inspección

NCh 2150 (1991). Madera laminada encolada. Clasificación visual y mecánica de madera aserrada de pino radiata

NCh 2165 (1991). Madera laminada encolada. Tensiones admisibles para la madera laminada encolada estructural de pino radiata

2.4. Europa

En Europa las reglas de diseño de estructuras están recogidas en un conjunto de documentos denominado “Eurocódigos” que permite calcular edificios y obras civiles en base a estándares comunes entre todos los países de la Unión Europea. Los Eurocódigos están estructurados en orden jerárquico, y son encabezados por el Eurocódigo 0- Bases de cálculo de estructuras, EN 1990 (EN, 2003), y por el Eurocódigo 1- Acciones en las estructuras, EN 1991 (EN, 2004) compuesto de ocho partes. Ambos documentos son complementados con una serie de Eurocódigos que especifican los métodos particulares de diseño para cada material estructural, esto es, madera estructural, acero, hormigón armado, etc. El Eurocódigo para el diseño de estructuras de madera es EN 1995 que se compone de tres partes: EN 1995-1-1(EN, 2006 y 2015), EN 1995-1-2 (EN, 2011) y EN 1995-2 (EN, 2010).

Los Eurocódigos están basados en la filosofía de los estados límite; la verificación de la seguridad estructural se fundamenta en el método de los coeficientes parciales, en el cual las acciones, las propiedades del material y los datos geométricos son los principales parámetros. Normalmente estos parámetros son variables estocásticas con distribuciones como las indicadas en la Fig 2.4.1 para los efectos de las acciones (E) y las resistencias (R). Las distribuciones tienen valores medios E_m y R_m y tienen asignados valores característicos E_k y R_k definidos como percentiles de la distribución. En general, para las acciones se emplean percentiles superiores, aunque en algunos casos, un valor menor puede ser más apropiado, ej, efectos de succión de viento. Para las resistencias, generalmente

se recurre a percentiles bajos o a valores medios; y muy excepcionalmente a valores correspondientes a percentiles altos.

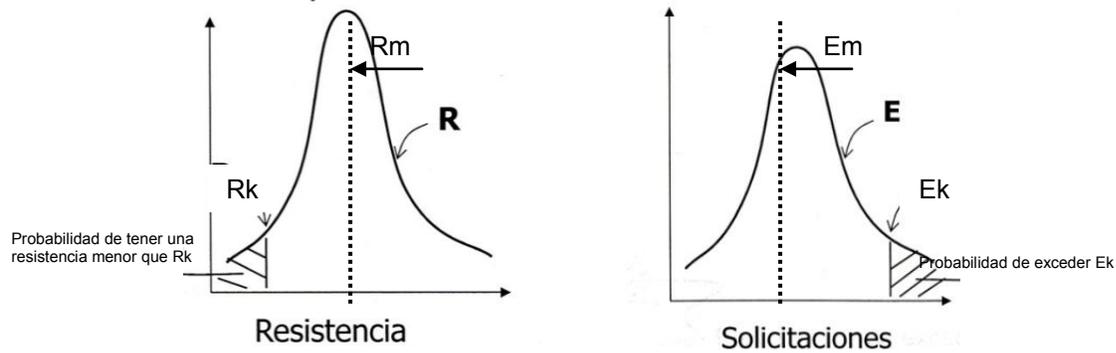


Figura 2.4.1. Distribución gaussiana de valores de a) resistencias y b) efectos de cargas

En todas las situaciones relevantes de diseño, se debe verificar que los estados límite no sean alcanzados, cuando los valores de diseño para acciones, propiedades del material y datos geométricos son usados en los modelos de diseño. En particular, se debe verificar que (Larsen, 1995):

- el efecto de las acciones no exceda la resistencia de diseño en el ELU, y que
- el efecto de las acciones de diseño no exceda el criterio de desempeño para el ELS

En forma simbólica:

para el ELU correspondiente a la rotura de una sección, elemento o conexión, se debe verificar que:

$$E_d \leq R_d \quad (2.4.1)$$

para ELU relacionado con el equilibrio estático, o equilibrio global de la estructura se deberá verificar que:

$$E_{d,dst} \leq E_{d,stb} \quad (2.4.2)$$

para ELS se deberá verificar que:

$$E_c \leq C_d \quad (2.4.3)$$

donde

- E_d valor de cálculo de los efectos de las acciones
- R_d valor de cálculo de la resistencia correspondiente
- $E_{d,dst}$...valor de cálculo del efecto de las acciones desestabilizadoras
- $E_{d,stb}$ valor de cálculo del efecto de las acciones estabilizadoras
- C_d valor fijo prescripto por norma

2.4.1. Acciones

Según su variación en el tiempo, las acciones pueden clasificarse como permanentes, variables (Q) o accidentales (A). Las acciones permanentes (G) son aquellas que actúan en todo momento y son constantes en magnitud y posición, tales como el peso propio de la estructura, cargas muertas, etc. Las acciones variables (Q) varían frecuentemente respecto a su valor medio, como por ejemplo cargas de uso, tráfico, viento, nieve, temperatura, etc. Finalmente, las acciones accidentales (A) son aquellas que si bien tienen gran importancia, tienen baja probabilidad de ocurrencia durante la vida útil de la estructura, tales como impactos, explosiones, tornados, etc. Los efectos sísmicos pueden considerarse dentro de este tipo, pero reciben un tratamiento diferenciado en las hipótesis de carga (Jiménez Montoya et al, 2010).

Las acciones de diseño pueden diferir para los distintos estados límite, y se determinan como se describe a continuación (Larsen, 1995):

i) Se identifican las posibles combinaciones de cargas compatibles, set de deformaciones e imperfecciones. Una combinación identifica la posición, magnitud y dirección de una acción.

ii) Se combinan las acciones de acuerdo a:

$$\sum \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,i} Q_{k,i} + \sum \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2.4.4)$$

donde γ son los factores parciales (de carga) para la acción considerada, considerando: la posibilidad de desviaciones desfavorables de las cargas, la posibilidad de inexactitudes en la modelación de las acciones, e incertidumbres en los efectos de las acciones. Valores de los factores de carga se recogen en la Tabla 2.

iii) Los efectos de las acciones(S), por ejemplo, fuerzas internas y momentos, tensiones, desplazamientos y elongaciones- son determinados a partir de los valores de diseño de las acciones, de los datos geométricos y de las propiedades del material (R).

$$S_d = S(F_{d,1}, F_{d,2}, \dots, a_{d,1}, a_{d,2}, \dots, R_d, \dots) \quad (2.4.5)$$

El método simplificado permite que en vez de emplear la ecuación (2.4.4) se usa la más adversa de las siguientes combinaciones:

- Para estados límite con una única acción variable:

$$\sum \gamma_{G,j} G_{k,j} + 1,5 Q_{k,i} \quad (2.4.6)$$

- Para otros casos:

$$\sum \gamma_{G,j} G_{k,j} + 1,35 \sum Q_{k,i} \quad (2.4.7)$$

En el Eurocódigo 5 la combinación de acciones para el ELS es:

$$\sum G_{k,j} + Q_{k,i} + \sum \psi_{1,i} Q_{k,i} \quad (2.4.8)$$

2.4.1.1. Valores característicos de las acciones

El valor característico F_k de una acción F cualquiera sea su tipo, se define como aquel que presenta una probabilidad de 0,05 de ser sobrepasado durante la vida de servicio prevista para la estructura. En general, los valores característicos de las acciones se definen en la normativa nacional. Para las cargas permanentes los valores característicos (G_k) corresponden a los valores medios del peso. En las acciones variables, el valor característico se determina con un criterio probabilístico.

2.4.1.2. Valores representativos de las acciones

A continuación se reproduce la explicación de Jiménez Montoya et al (2010) sobre los valores representativos de las acciones. En general, en una estructura pueden actuar además de las cargas permanentes, varias cargas variables (Q), y es extremadamente improbable que todas ellas actúen simultáneamente con su valor característico. Cuando una de las cargas variables actúa con su valor característico Q_k (en cuyo caso tal acción es denominada *acción determinante*) lo razonable es suponer que las restantes acciones variables que la acompañan (a las que se denomina *acciones de acompañamiento*) actuarán con valores menores del característico, y es bajo esta combinación de acciones como debe calcularse cada hipótesis de carga.

Con el fin de determinar qué valores deben tomarse en cada caso para las acciones de acompañamiento, se introduce el concepto de *valor representativo de una acción*, indicado con el subíndice r), significa aquel valor de la acción que se utiliza en la comprobación de los estados límite previo a la introducción del coeficiente γ_r . Este valor dependerá para una misma acción, de la combinación específica de cargas analizada en cada momento. En general, los valores representativos de las diversas acciones están establecidos en los códigos o reglamentos modernos de acciones. Todos ellos se obtienen multiplicando el valor característico por el factor de simultaneidad (Ψ) que es igual o menor que la unidad.

En general, para las acciones permanentes (G) y para las accidentales (A), el valor representativo es el valor característico ($G_r = G_k$ y $A_r = A_k$).

Sin embargo, para las acciones variables (Q), se deben considerar diferentes valores representativos, dependiendo de la combinación de acciones que se considere en cada hipótesis de cálculo. Tales valores son:

- Valor característico, Q_k , que se utiliza cuando la acción variable actúa aisladamente o, en el caso de que actúen dos o más acciones variables, cuando se trata de la acción determinante (esto es, la que se suponer sea la más importante en cada caso).

- Valor de combinación, $Q_{ro} = \Psi_0 \cdot Q_k$, menor que el anterior, que se utiliza para las acciones variables que actúan en combinación con la acción dominante. Se emplea en la verificación de los ELU y en ELS irreversibles.

- Valor frecuente, $Q_{r1} = \Psi_1 \cdot Q_k$, menor que el anterior, se define como el valor de la acción variable que resulta sobrepasado con frecuencia, pero en períodos de corta duración a lo largo de la vida útil de la estructura. Se utiliza para la verificación de los ELU que comprenden acciones accidentales y para la verificación en los ELS reversibles.

- Valor cuasi-permanente, $Q_{r2} = \Psi_2 \cdot Q_k$, menor que todos, es aquel que resulta sobrepasado durante una parte considerable de la vida útil de la estructura, por ej. el 50% del tiempo. Se utiliza para la verificación de los ELU que comprenden acciones accidentales, para la verificación en los ELS reversibles, y para el cálculo de efectos de largo plazo.

2.4.1.3. Valores de cálculo de las acciones

El valor de cálculo F_d una acción F se expresa como (EC-0):

$$F_d = \gamma_F \times F_{rep} \quad (2.4.9)$$

con

$$F_{rep} = \psi \times F_k \quad (2.4.10)$$

donde

γ_F : coeficiente parcial de seguridad para la acción, que tiene en cuenta la posibilidad de desviaciones desfavorables de la acción con respecto a los valores representativos; siendo el valor 1,35 para cargas permanentes, y 1,50 para acciones variables; en la combinación de acciones este último valor se reduce ligeramente en función de la simultaneidad de las acciones.

F_k : valor característico de la acción, que en las cargas permanentes corresponde al valor medio, y en las cargas variables se adopta un criterio probabilístico o un valor especificado establecido generalmente en una norma nacional.

F_{rep} : valor representativo de la acción correspondiente

Ψ : coeficiente de simultaneidad; siendo el valor igual a 1 o Ψ_0 , Ψ_1 o Ψ_2

Para acciones variables (Q), se debe considerar otros valores representativos tales como:

- valor de combinación:
- valor frecuente, el cual es excedido el 5 por ciento del tiempo
- valor cuasi-permanente el cual se relaciona con valor medio del tiempo

Combinación de acciones

Los coeficientes parciales de seguridad pueden quedar reducidos en función de la simultaneidad de las acciones. A modo de ejemplo se presenta la Tabla 4.4.1, donde se indican las combinaciones fundamentales y coeficientes parciales de seguridad simplificados.

Tabla 4.4.1. Combinaciones fundamentales de acciones y coeficientes parciales de seguridad simplificados (γ_F). Extraído de Argüelles et al (2000)

	Permanente: γ_G	sobrecarga uso: γ_Q	nieve: γ_Q	viento: γ_Q
1 sola acción variable	1,35 (1,00)	1,50 (1,00)	0	0
	1,35 (1,00)	0	1,50 (0)	0
	1,35 (1,00)	0	0	1,50 (0)
2 o más acciones variables	1,35 (1,00)	1,35 (0)	1,35 (0)	1,35 (0)
(): los valores entre paréntesis corresponden a situaciones en la que el efecto de la carga es favorable; por ejemplo el efecto de succión del viento, equilibrio estático o por variación de la resistencia de cálculo al variar k_{mod}				

4.4.2. Propiedades del material

En el sistema europeo, la clasificación estructural de madera aserrada se realiza de acuerdo a un conjunto de tres normas consecutivas del Comité Europeo de Normalización (CEN), aplicadas en el siguiente orden (Steiger et al, 2009):

- i) En primer término, se realizan ensayos para determinar las propiedades mecánicas, contenido de humedad (CH) y densidad, de cuerpos de prueba de tamaño estructural de acuerdo a la norma EN 408.
- ii) A continuación, se derivan los valores característicos de las propiedades mecánicas y de la densidad a partir de resultados de ensayos, siguiendo los lineamientos de la norma EN 384. Esta norma establece reglas de selección de material, análisis y ajuste de valores de ensayo de acuerdo a geometrías o condiciones climáticas diferentes a las de referencia publicadas en EN 408.
- iii) Finalmente, la madera es clasificada de acuerdo a EN 338. Una población específica puede ser asignada a cierta clase resistente si el valor característico de su densidad y de su resistencia de flexión (ambos son 5tos. percentiles), así como el módulo de elasticidad (valor medio, usualmente derivado del ensayo de flexión), es igual o mayor que los valores de la clase deseada. Otras propiedades mecánicas necesarias para el diseño de estructuras de madera son derivadas a partir de estos valores básicos mediante relaciones empíricas.

4.4.2.1. Valor de cálculo de una propiedad del material

El valor de cálculo de una propiedad resistente se obtiene a partir de (EC-5):

$$X_d = k_{mod} \times \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (4.4.11)$$

donde

X_k : valor característico de la propiedad, generalmente corresponde al 5to percentil de la distribución estadística de los resultados de ensayos

γ_M : coeficiente parcial de seguridad para el material, que adquiere diferentes valores.

para ELU

- combinaciones fundamentales: 1,3

- combinaciones accidentales: 1,0

para ELS: 1,0

k_{mod} : coeficiente de modificación que está en función de las combinaciones de cargas y del contenido de humedad. Estos coeficientes para madera aserrada, laminada y tablero contrachapado se indican en la Tabla 2.

Tabla 4.4.2. Valores de k_{mod} para madera maciza, laminada y tablero contrachapado. Adaptado de Argüelles et al (2000)

Clase de duración de la carga	Clase de servicio		
	1 – interior	2 – semi exterior	3 - exterior
Permanente (> 10 años)	0,60	0,60	0,50
Larga duración (6 meses a 10 años)	0,70	0,70	0,55
Media duración (1 semana a 6 meses)	0,80	0,80	0,65
Corta duración (<1 semana)	0,90	0,90	0,70
Instantánea (segundos)	1,10	1,10	0,90

Si una combinación de hipótesis consiste en varias acciones pertenecientes a diferentes clases de duración de

la carga, el factor k_{mod} puede elegirse como el correspondiente a la acción de más corta duración. Por ejemplo, para la combinación del peso muerto más carga de corta duración K_{mod} corresponderá a la carga d corta duración

4.4.3. Sistemas de clases resistentes

En Europa existen los “sistemas de clases resistentes”, esto es un sistema de categorización que presenta un conjunto ordenado de propiedades de diseño. En estos sistemas una “clase resistente” agrupa la madera, o la madera laminada encolada, a partir de valores de resistencia mecánica, de módulo elástico y densidad. Estas clases resistentes tienen por objetivo estandarizar las propiedades de las maderas, y orientar la elección del material para elaboración de proyectos de estructuras. Contar con un sistema de este tipo, simplifica mucho el trabajo del proyectista de estructuras, ya que a efectos del diseño estructural, es suficiente que el calculista especifique la clase resistente requerida; por ejemplo, una pieza de madera aserrada clasificada “C14”, tiene una resistencia característica de flexión de 14 N/mm².

4.4.3.1. Clases de resistencia para madera aserrada

La norma europea EN 338 (2016) considera tres grupos de clases resistentes para madera aserrada denominados con las letras “C” o “D” según se trate de madera de coníferas o de frondosas (del inglés “deciduous”) cuyas propiedades mecánicas fueron obtenidas mediante ensayos de flexión, y con la letra “T” para madera de coníferas cuyas propiedades mecánicas fueron obtenidas a partir de ensayos de tracción. Este último grupo concentra únicamente las clases resistentes de las tablas de madera que, luego de ser asignadas a una determinada clase “T”, configurarán la madera laminada encolada. Las letras van acompañadas de un valor numérico que se corresponde con el valor característico de la resistencia de flexión o de tracción, respectivamente. La norma EN 338 (2016) distingue 12 clases resistentes de madera de coníferas en base a ensayos de flexión de canto (C), y 18 de de madera de coníferas en base a ensayos de tracción (T), y 14 de madera de frondosas en base a ensayos de flexión de canto (D). *Por ejemplo, la clase resistente C14 se corresponde a un elemento de madera de conífera con una resistencia característica de flexión de 14 N/mm².*

A efectos ilustrativos, la Tabla 4.4.3 muestra las clases resistentes para madera de coníferas y para éstas reproduce algunas propiedades.

Tabla 4.4.3. Clases resistentes para madera coníferas basadas en ensayos de flexión de canto. Adaptado de EN 388 (2016)

	Clase	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Propiedades de resistencia [N/mm²]													
Flexión	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Propiedades de rigidez [kN/mm²]													
Módulo elasticidad medio en flexión	$E_{m,0,mean}$	7,0	8,0	9,0	9,5	10,0	11,0	11,5	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0
Módulo elasticidad característico flexión	$E_{m,0,k}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,1	10,7
Densidad [kg/m³]													
Densidad característica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	360	380	390	400	410	430
Densidad media	ρ_{mean}	350	370	380	400	410	420	430	460	470	480	490	520

4.4.3.2. Clases de resistencia para madera laminada encolada

Análogamente, la EN 14080 (2013) establece dos grupos de clases resistentes para la madera laminada encolada (MLE) denominados con las letras “GL” (del inglés *Glulam*), seguidas de un valor numérico que se corresponde con la resistencia a flexión de la viga de MLE y las letras “h” de homogénea o “c” de combinada que refieren a la configuración de la sección transversal de la pieza de MLE. Se considera que la pieza de MLE es homogénea si todas las láminas que la conforman son de una misma clase resistente y combinada si las láminas externas tienen una clase resistente mayor que las láminas internas. EN 14080 (2013) distingue 7 clases resistentes de MLE homogénea y 7 clases resistentes de MLE combinada. *Por ejemplo, una clase resistente GL20h se corresponde a un elemento de madera laminada encolada con una resistencia característica a flexión de 20 N/mm² fabricada en su totalidad con tablas de madera aserrada de una misma clase resistente (probablemente C16).*

A efectos ilustrativos, la Tabla 4.4.4 muestra las clases resistentes para madera laminada encolada de configuración homogénea.

Tabla 4.4.4. Propiedades características de resistencia y rigidez en N/mm², y densidad en kg/m³ para madera laminada encolada homogénea. Adaptado de EN 14080 (2013)

Propiedad	Símbolo	GL20h	GL22h	GL24h	GL26h	GL28h	GL30h	GL32h
Flexión	$f_{m,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Tracción	$f_{t,0,g,k}$	16	17,6	19,2	20,8	22,3	24	25,6
	$f_{t,90,g,k}$	0,5						
Compresión	$f_{c,0,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
	$f_{c,90,g,k}$	2,5						
Esfuerzo cortante (cortadura y torsión)	$f_{v,g,k}$	3,5						
Cortante de rodadura	$f_{r,g,k}$	1,2						
Módulo elasticidad	$E_{0,g,mean}$	8 400	10 500	11 500	12 100	12 600	13 600	14 200
	$E_{0,g,05}$	7 000	8 800	9 600	10 100	10 500	11 300	11 800
	$E_{90,g,mean}$	300						
	$E_{90,g,05}$	250						
Módulo elasticidad transversal	$G_{r,mean}$	650						
	$G_{g,05}$	540						
Módulo de cortante de rodadura	$G_{r,g,mean}$	65						
	$G_{r,g,05}$	54						
Densidad	$\rho_{g,k}$	340	370	385	405	425	430	440
	$\rho_{g,mean}$	370	410	420	445	460	480	490

2.5. España

En España, el documento que regula la edificación es el Código Técnico de Edificación (CTE-SE-M, 2009) de aplicación obligatoria. Brinda el marco normativo que establece las exigencias básicas que deben cumplir los edificios en relación con requisitos de seguridad y habitabilidad definidos en la Ley de Ordenación de la Edificación de 1999.

El CTE está estructurado en una serie de Documentos Básicos, de los cuales interesa destacar en este informe, el grupo de los Documentos Básicos de Seguridad Estructural (DB SE) comprendido por:

- DB SE-AE: Acciones en la edificación
- DB SE-A: Estructuras de acero
- DB SE-F: Estructuras de fábrica
- DB SE-M: Estructuras de madera
- DB SE-C: Cimentaciones

y el DB SI: Seguridad en caso de incendio

Por otro lado, la adopción del sistema de Eurocódigos es opcional y la única alternativa en el caso de diseño de puentes, pues el CTE es de aplicación únicamente a edificación. El Eurocódigo 5 en su parte 1-1 (UNE EN 1995-1-1:2006/A2:2015) detalla los requisitos generales para el diseño y cálculo de estructuras de madera; en su parte 1-2 (UNE EN 1995-1-2:2011) especifica el diseño de estructuras de madera en caso de incendio y, en su parte 2 (UNE EN 1995-2:2010), el diseño de puentes. Existen, además, los denominados Anexos Nacionales al Eurocódigo 5, que fijan las opciones para España de los coeficientes y demás valores que quedan abiertos a elección nacional en el Eurocódigo. A continuación se citan las versiones españolas del Eurocódigo 5, así como los Anexos Nacionales.

- UNE EN 1995-1-1:2006/A2:2015. Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. AENOR, Madrid
- UNE-EN 1995-1-2:2011. Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas al fuego. AENOR, Madrid
- UNE-EN 1995-2:2010. Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 2: Puentes. AENOR, Madrid
- Anexo Nacional al Eurocódigo 5 - Parte 1-1. AN/UNE-EN 1995-1-1:2015. En trámite a ser publicado por AENOR
- Anexo Nacional al Eurocódigo 5 - Parte 1-2. AN/UNE-EN 1995-1-2:2011. En trámite a ser publicado por AENOR
- Anexo Nacional al Eurocódigo 5 - Parte 2. AN/UNE-EN 1995-2:2010. En trámite a ser publicado por AENOR

2.6. Brasil

La norma de cálculo de estructuras de madera de Brasil “Projeto de estruturas de madeira” NBR 7190 (1951) tuvo su primera versión en tensiones admisibles. La NBR 7190 (ABNT, 1997) desplazó al método de las tensiones admisibles por el de los estados límite, y para ello utilizó un coeficiente de calibración que convierte los valores medios de las propiedades resistentes tabulados en la versión anterior, de 1982, a valores característicos de efecto de cargas y resistencias. La NBR 7190 (ABNT, 1997) contiene además de las reglas de diseño, una serie de anexos que incluye entre otros, los

métodos para la determinación de las propiedades de la madera y para determinación de las conexiones mecánicas, recomendaciones sobre la durabilidad de la madera, y aclaraciones sobre la filosofía de calibración de esta norma. Actualmente la PNBR 7190 (ABNT, 2014) está siendo revisada para próxima publicación (Calil Jr, 2008, 2014). El objetivo general de la norma es fijar las condiciones que deben seguir el diseño, construcción, y control de las estructuras de madera, incluyendo puentes, edificios, techos y decks.

Según la NBR 7190 (ABNT, 2010), el diseño en

ELU se expresa como:

$$S_d \leq R_d \quad (2.6.1)$$

donde

S_d ...efecto producido por las cargas factoradas

R_d ...resistencia factorada de cálculo

ELS se expresa como:

$$S_{d.serv} \leq S_{lim} \quad (2.6.2)$$

donde

$S_{d.serv}$...efecto producido por las cargas

S_{lim} ...valor fijo prescripto por norma

2.6.1. Acciones

Combinación de acciones

La NBR 7190 (ABNT, 2010) presenta combinaciones de acciones últimas normales para construcciones corrientes.

Para ELU pueden ser consideradas las siguientes combinaciones, correspondientes a cargas de larga duración.

Primera combinación: fuerza vertical y sus efectos dinámicos como acción variable principal

$$F_d = \sum \gamma_{Gi} \times G_{ik} + \gamma_Q (Q_k + \psi_{ov} \times W_k) \quad (2.6.3)$$

Segunda combinación: viento como acción variable principal

$$F_d = \sum \gamma_{Gi} \times G_{ik} + \gamma_Q (0,75 \times Q_k + \psi_{oQ} \times Q_k) \quad (2.6.4)$$

Para piezas metálicas, incluyendo los elementos de conexión

$$F_d = \sum \gamma_{Gi} \times G_{ik} + \gamma_Q (W_k + \psi_{oQ} \times Q_k) \quad (2.6.5)$$

donde

G...cargas permanentes

Q...cargas accidentales verticales de uso directo en la construcción

W...fuerzas debidas al viento

γ ...coeficientes de ponderación de acciones

Ψ ...factores de combinación y de utilización

Tabla 2.6.1. Combinaciones últimas de acciones y coeficientes parciales de seguridad de acciones. Adaptado de NBR 7190 (ABNT, 2010)

Combinaciones	permanente: γ_G	sobrecarga variable: γ_Q
Normales	1,3 (1,0)	1,4
Especiales o de construcción	1,2 (1,0)	1,2
Excepcionales	1,1 (1,0)	1,0
(): los valores entre paréntesis corresponden a situaciones en la que el efecto de la carga es favorable		

Tabla 2.6.2. Factores de combinación y de utilización. Adaptado de NBR 7190 (ABNT, 2010)

Acciones en estructuras corrientes	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Variaciones uniformes de temperatura en relación a la media anual local	0,6	0,5	0,3
Presión dinámica de viento	0,5	0,2	0
Cargas accidentales en edificios	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Locales en los que no hay predominancia de pesos de equipamientos fijos, ni elevada concentración de personas	0,4	0,3	0,2
Locales donde hay predominancia de equipos fijos o de elevada concentración de personas	0,7	0,6	0,4
Bibliotecas, archivos, oficinas y garajes	0,8	0,7	0,5
Cargas móviles y sus efectos dinámicos	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Puentes peatonales	0,4	0,3	0,2
Puentes carreteros	0,6	0,4	0,2
Puentes ferroviarios	0,8	0,6	0,4

Para ELS las combinaciones de cargas a considerar deben ser

Combinaciones de larga duración

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \sum_{j=1}^n \psi_{2j} \times F_{Qj,k} \quad (2.6.6)$$

Combinaciones de mediana duración

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \psi_1 \times F_{Q1,k} + \sum_{j=1}^n \psi_{2j} \times F_{Qj,k} \quad (2.6.7)$$

Combinaciones de corta duración

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + F_{Q1,k} + \sum_{j=1}^n \psi_{1j} \times F_{Qj,k} \quad (2.6.8)$$

Normas de acompañamiento (nacionales)

ABNT NBR 6120 (1980). Cargas para o cálculo de estruturas de edificacoes. Procedimento

ABNT NBR 6123 (1988). Forcas devidas ao vento em edificacoes. Procedimento

ABNT NBR 7188 (1982). Carga movel em ponte rodoviaria e passarela de pedestres. Procedimento

ABNT NBR 7189 (1983). Cargas moveis para projeto estrutural de obras ferroviarias. Procedimento
ABNT NBR 8681 (2004). Acoes e seguranca nas estruturas. Procedimento

2.6.2. Propiedades del material

2.6.2.1. Caracterización de las propiedades de la madera

La caracterización completa de las propiedades resistentes y elásticas de la madera se realiza fundamentalmente en cuerpos de prueba de pequeñas dimensiones y libre de defectos. La NBR 7190 (ABNT, 2010) permite simplificar la caracterización de maderas de especies conocidas a partir de ensayos de compresión paralela a la fibra. Las resistencias características del resto de las propiedades (flexión, tracción paralela, compresión normal, corte, etc) se derivan a partir del valor característico de compresión paralela. La NBR 7190 (ABNT, 2010) ha eliminado todos los anexos de la versión anterior, NBR 7190 (ABNT, 1997), y en particular el que contenía los métodos de ensayos, refiriendo en su lugar a las normas de ensayos de acompañamiento. Estas normas incluyen los métodos para determinar las propiedades de la madera laminada encolada.

Normas de acompañamiento (nacionales)

ABNT/CCE-126- PN 02:126.10-0001-1. Madeiras. Método de ensaio de classificacao visual

- Aplicable para coníferas y frondosas
- Reglas de clasificación visual basadas en la norma ASTM D245-93.
 - Una clase visual es descrita por el nivel de su calidad visual, seguida por su densidad (ej. S1-ND)
 - Define cuatro clases estructurales: SE, S1, S2 y S3; y dos clases de densidad: D y ND.

ABNT/CCE-126- PN 02:126.10-0001-2. Madeiras. Método de ensaio de caracterizacao de corpos de prova isentos de defeitos

ABNT/CCE-126- PN 02:126.10-0001-3. Madeiras. Método de ensaio de caracterización de pecas estruturais de madeira

ABNT/CCE-126- PN 02:126.10-0001-4. Madeiras. Método de ensaio para determinacao de resistencias de ligacoes mecanicas das estruturas de madeira

ABNT/CCE-126- PN 02:126.10-0001-5. Madeiras. Método de ensaio de elementos estruturais de madeira laminada colada

2.6.2.2. Valor de cálculo de la madera

El valor o resistencia de cálculo (R_d) de una propiedad resistente de la madera se obtiene a partir de:

$$R_d = k_{\text{mod}} \times \frac{X_k}{\gamma_w} \quad (2.6.9)$$

donde

R_k ...valor característico de la propiedad, generalmente corresponde al 5to percentil de la distribución estadística de los resultados de ensayos

γ_w ...coeficiente parcial de seguridad para el material, que adquiere diferentes valores.

para ELU

- para compresión paralela y perpendicular a la fibra: $\gamma_{wc}=1,4$
- para tracción paralela a la fibra: $\gamma_{wt}=1,8$
- para cortante: $\gamma_{wv}= 1,8$

para ELS: 1,0

k_{mod} ... coeficiente de modificación que está en función de las combinaciones de cargas y del contenido de humedad y del eventual empleo de madera de segunda calidad; su valor se determina como:

$$k_{mod} = k_{mod\ 1} \times k_{mod\ 2} \times k_{mod\ 3} \quad (2.6.10)$$

Los coeficientes $k_{mod\ 1}$ para madera aserrada, madera laminada, contrachapados y madera reconstituida se indican en la Tabla 2.6.3.

Tabla 2.6.3 Valores de $k_{mod\ 1}$. NBR 7190 (ABNT, 1997)

Clase de duración de la carga	Madera aserrada, madera laminada, contrachapado	Madera reconstituida
Permanente (mayor a 10 años)	0,60	0,30
Larga duración (6 meses a 10 años)	0,70	0,45
Media duración (1 semana a 6 meses)	0,80	0,65
Corta duración (menor a 1 semana)	0,90	0,90
Instantánea (segundos)	1,10	1,10

Los coeficientes $k_{mod\ 2}$ consideran el contenido de humedad y el tipo de material empleado, según se indica en la Tabla 2.6.4.

Tabla 2.6.4. Valores de $k_{mod\ 2}$. NBR 7190 (ABTN, 1997)

Clase de humedad	Madera aserrada, madera laminada, contrachapado	Madera reconstituida
(1)* y (2)*	1,0	1,0
(3)* y (4)*	0,8	0,9

* refiere a:

- (1) madera con humedad de equilibrio de 12%, y humedad relativa del ambiente menor a 65%
- (2) madera con humedad de equilibrio de 15%, y humedad relativa del ambiente entre 65 y 75%
- (3) madera con humedad de equilibrio de 18%, y humedad relativa del ambiente entre 75 y 85%
- (4) madera con humedad de equilibrio mayor a 25%, y humedad relativa del ambiente mayor a 85%

Los coeficientes $k_{mod\ 3}$ tienen en cuenta la calidad estructural de la madera aserrada, para madera de segunda calidad (clasificada visualmente, o sin clasificar en el caso de frondosas), y para madera de primera calidad (exenta de defectos, clasificada visual y mecánicamente).

En el caso de madera aserrada de coníferas, no se permite emplear madera sin clasificar. En Los coeficientes $k_{mod\ 3}$ para frondosas y coníferas están establecidos en la NBR 7190 (ABTN, 2010); para madera aserrada de coníferas se indican en la Tabla 2.6.5.

Tabla 2.6.5. Valores de k_{mod3} para madera aserrada de coníferas. NBR 7190 (ABTN, 2010)

Clase resistente	Sólo visual	Visual y mecánica
Densas (D)		
SE-D	0,70	0,90
S1-D	0,60	0,80
S2-D	0,50	0,70
S3-D	0,40	0,60
No Densas (ND)		
SE-ND	0,60	0,80
S1-ND	0,50	0,70
S2-ND	0,40	0,60
S3-ND	0,30	0,50

2.6.3. Clases de resistencia para madera aserrada

La NBR 7190 (ABTN, 2010) establece ocho clases de resistencia para madera aserrada, tres para coníferas y cinco para frondosas, definidas a partir de ensayos de i) compresión paralela a la fibra sobre cuerpos de prueba de pequeñas dimensiones y libre de defectos, y ii) densidad aparente. Una clase resistente queda definida por el valor de la resistencia característica de compresión paralela, tal como se indica en las Tablas 2.6.6.a y 2.6.6.b.

Tabla 2.6.6.a. Clases de resistencia de madera de coníferas. NBR 7190 (ABTN, 2010)

Clase	f_{c0k}^* (MPa)	f_{vk}^* (MPa)	$E_{c0,m}^*$ (MPa)	$\rho_{aparente}^*$ (kg/m ³)
C20	20	4	3.500	500
C25	25	5	8.500	550
C30	30	6	14.500	600

*Valores referidos a 12% de contenido de humedad.

Tabla 2.6.6.b. Clases de resistencia de madera de frondosas. NBR 7190 (ABTN, 2010)

Clase	f_{c0k}^* (MPa)	f_{vk}^* (MPa)	$E_{c0,m}^*$ (MPa)	$\rho_{aparente}^*$ (kg/m ³)
D20	20	4	9.500	650
D30	30	5	14.500	800
D40	40	6	19.500	950
D60	60	8	24.500	1000

*Valores referidos a 12% de contenido de humedad.

3. EVALUACIÓN DE LA SITUACIÓN EN URUGUAY

3.1. Sector forestal y maderero

El sector forestal uruguayo ha tenido un incremento significativo en los últimos treinta años como consecuencia de la política gubernamental para promover las plantaciones forestales. En los ochenta, estimaciones de la Dirección General Forestal de Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (MGAP) indicaban la existencia de entre 400.000 y 600.000 ha ocupadas por especies nativas de árboles de pequeño diámetro (15-20 cm) de escaso uso industrial, aproximadamente 120.000 a 137.000 ha de pinos y eucaliptos, y 70.000 ha de otras especies exóticas (MGAP, 2005). En la actualidad las plantaciones forestales cubren aproximadamente un millón de ha, y corresponden a especies exóticas de rápido crecimiento, fundamentalmente pinos (*Pinus*) y eucaliptos (*Eucalyptus*) (MGAP, 2010). El principal uso industrial de las especies de eucalipto es la producción de pulpa de celulosa, mientras que el de la madera de pino y parte de la de eucalipto (*E. grandis*) es la transformación mecánica (Dieste, 2012). Dentro de los productos de la transformación mecánica destacan los rollizos (de *E. grandis*), los tableros contrachapados (de *E. grandis* y *Pinus*) y la madera laminada encolada (de *E. grandis*), quedando 1,7 millones de m³ de trozas de pino (principalmente *P. elliotii* y *P. taeda*) y 0,4 millones de m³ de eucalipto (principalmente *E. grandis*) sin destino actual (Dieste, 2014).

En respuesta a esta disponibilidad del recurso forestal, el Consejo Sectorial Tripartito Forestal Madera, fijó dentro de sus metas la incorporación de 100.000 m³ de productos de madera en la construcción de viviendas, en la industria de la construcción en general, y en la fabricación de muebles (MIEM, 2012). Para alcanzar este objetivo y promover el uso intensivo de productos de madera con fines estructurales se requiere entre otros, contar con materiales caracterizados y con especificaciones técnicas, y con un conjunto de normas que establezcan estándares de calidad de los productos, desde la fabricación hasta su empleo. Estos factores junto con la formación de recursos humanos y una estrategia de comunicación destinada a educar al usuario final en el consumo de productos de madera constituyen la base indispensable para el desarrollo de tecnologías que agreguen valor a las maderas nacionales y consecuentemente al desarrollo total de la cadena forestal-madera.

En el Informe final del “Proyecto Regional de Alternativas para la Inversión Forestal” (MGAP OEA, 1996) además de indicar lineamientos para el mejor aprovechamiento del recurso forestal disponible, su factibilidad para la producción de madera aserrada y el agregado de valor, se subraya la necesidad de crear un sistema nacional de normalización para productos de madera, y la elaboración de códigos y normas de cálculo y de construcción. En ese documento se detalla una serie de tareas que constituyen insumos imprescindibles para la generación de una norma de cálculo estructural de madera, y que se recogen a continuación: i) determinación de las propiedades físicas y mecánicas de especies, (tal vez discriminadas en dos grupos etarios); ii) determinación de los contenidos de humedad de equilibrio para las principales especies y las variaciones climáticas regionales; iii) asignación de grupos de resistencia para cada especie en condición estacionada y tomando en cuenta el contenido de humedad de equilibrio; y iv) establecimiento de reglas de clasificación visual por resistencia. Parte de estas tareas se vienen desarrollando desde el año 1996 y han dado lugar a informes técnicos, artículos científicos, artículos de divulgación, etc., generados por distintas instituciones (Departamento de Proyectos forestales del LATU, Facultades de Agronomía, de Arquitectura y de Ingeniería de la Universidad de la República, Facultad de Arquitectura de la Universidad ORT Uruguay, Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, etc).

3.2. Propuesta de plan para el desarrollo de la tecnología de construcción con madera

La planificación hacia el desarrollo de una tecnología de construcción con madera sugiere la necesidad de diseñar un plan que incluya una serie de tareas consistentes y coherentes entre sí.

La Fig 3.1 estructurada en tres partes, presenta: i) los potenciales usos de la madera estructural en Uruguay en tres grandes áreas y establece los sistemas constructivos que se podrían emplear para cada uso (entramado ligero, sistema poste y viga, paneles de madera contralaminada, otros tipos de paneles estructurales y soluciones con arcos y celosías o reticulados); ii) la normativa necesaria para el desarrollo de la tecnología; e iii) identifica una serie de productos de madera estructural con posibilidad de uso en Uruguay.



(*) algunos temas en los que se está trabajando o se dispone de información de investigaciones previas
 (x) productos estructurales aún no caracterizados y que requieren de investigación

Figura 3.1. Plan para el desarrollo de la tecnología de construcción con madera en Uruguay (Baño y Moya, 2015)

Para poder diseñar y construir con estos sistemas constructivos y utilizando los productos detallados, es necesario definir el sistema de cálculo a emplear y, en base a ello, el cuerpo normativo se debe desarrollar en tres áreas básicas: la primera es la que rige los ensayos para la determinación de las propiedades físicas, mecánicas y químicas de la madera; la segunda es la que especifica cómo caracterizar la madera aserrada para obtener los valores característicos de las propiedades mecánicas y relacionar dichos valores con una clasificación visual y/o mecánica de la madera; y por último la norma de cálculo estructural para el dimensionado de los elementos constructivos en base a los valores obtenidos siguiendo el cuerpo normativo anteriormente definido.

3.3. Normativa en Uruguay

La generación de normas técnicas en Uruguay se realiza a través de comités especializados en el ámbito del Instituto Uruguayo de Normalización Técnica (UNIT), donde participan representantes de las empresas privadas y estatales, academia, institutos de investigación, etc. Las normas son aprobadas por consenso entre las partes interesadas, y son de aplicación voluntaria a menos que alguna

disposición reglamentaria o contractual las haga de obligado cumplimiento, y están disponibles al público.

Actualmente existe un número reducido de normas UNIT relacionadas con materiales de construcción y proyectos de edificios y estructuras. En el caso de la madera y productos forestales, la mayoría de las normas refieren a nomenclaturas, definiciones (glosarios) y metodologías de ensayos; no existe norma de diseño, construcción y cálculo estructural para madera.

A continuación una breve síntesis de las normas y documentos técnicos relacionados con el diseño y cálculo de estructuras de madera.

3.3.1 Acciones

UNIT 50 (1984). Acciones de viento sobre las construcciones. 3ª ed.

- Establece los procedimientos para determinar los esfuerzos de viento sobre las construcciones.
- Los aspectos aerológicos de la norma refieren a datos recopilados por la Dirección General de Meteorología del Uruguay hasta el año 1982, mientras que los aspectos aerodinámicos (coeficiente de presión y de forma) se basan en la norma francesa NV 1978 a la que se le han realizado pequeñas modificaciones.
- Los estados límites últimos y de servicio definidos se superponen con otras normativas.
- La norma no considera efectos dinámicos y/o aeroelásticos, y no contempla el diseño de puentes y torres de alta tensión.

UNIT 33 (1991). Cargas a utilizar en el proyecto de edificios. 2ª ed.

- Define las cargas permanentes y variables a considerar en las edificaciones.
- No contempla acciones térmicas: valores medios estacionales y gradientes térmicos.
- No contempla acciones accidentales: cargas de camiones de bomberos, impactos, incendio, etc.
- No contempla acciones permanentes por empuje de suelos.

3.3.2. Cálculo de estructuras

IE4-50 (1950). Proyectos de estructuras de madera para edificios

- Documento desarrollado por el Instituto de Estática de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (no es una norma UNIT).
- La filosofía de cálculo se basa en el diseño por tensiones admisibles.
- Se trata de un documento muy breve, que contiene un apartado de cargas, otro sobre tensiones admisibles y uno principal con disposiciones sobre proyecto. En el apéndice se incluye entre otros, un cuadro con valores de las tensiones admisibles básicas de las principales propiedades mecánicas y elásticas para ocho especies de maderas. Vale subrayar que dichos valores no están actualizados, y no son representativos de las maderas que actualmente se comercializan en el país.

3.3.3. Normas de ensayos para productos de madera

UNIT 223-1 (2007). Contenido de humedad en la madera. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa

UNIT 223-2 (2007). Contenido de humedad de la madera. Parte 2: Estimación por el método de resistencia eléctrica

UNIT 223-3 (2007). Contenido de humedad de la madera. Parte 3: Estimación por el método capacitivo

UNIT 237 (2008). Determinación de la densidad aparente en maderas

UNIT 362 (2006). Maderas: Acondicionamiento de las maderas destinadas a los ensayos físicos y mecánicos

UNIT 363 (2008). Madera. Determinación de la contracción

UNIT 364 (2008). Madera. Determinación de la dureza estática

UNIT 1137 (2007). Método de ensayo para la determinación de los módulos de elasticidad y rotura en ensayo de flexión estática en maderas

UNIT 1179 (2009). Madera. Determinación del máximo esfuerzo de cizallamiento perpendicular al grano

UNIT-ISO 3129 (1975) (adopt. 2009) (equiv. ISO 3129:1975 MOD.) Madera. Métodos de muestreo y requisitos generales para ensayos físicos y mecánicos

UNIT-ISO 3132 (1975) (adopt. 2008). Madera. Determinación de la resistencia a la compresión perpendicular al grano

UNIT-ISO 3347(1976) (adopt. 2008) (equiv. ISO 3347:1976). Madera. Determinación del máximo esfuerzo de cizallamiento paralelo al grano

UNIT-ISO 9427:2003 (adopt. 2009) (equiv. ISO 9427:2003). Tableos derivados de la madera. Determinación de la densidad

UNIT-ISO 16979:2003 (adopt. 2009). Tableros derivados de la madera. Determinación del contenido de humedad

3.3.4. Otros documentos, ordenanzas y reglamentos relacionados con la construcción de edificios y puentes

Ordenanza Departamental de Construcción (propia de cada Departamento de la República)

- De aplicación obligatoria.
- En contadas excepciones, las ordenanzas contemplan la construcción de estructuras de madera. Tales son los casos de Rivera, donde la ordenanza tiene una sección específica para viviendas de madera, y Montevideo, en donde el Digesto municipal contempla la

construcción de viviendas con sistemas constructivos no tradicionales, incluyendo los de madera.

- De aplicación obligatoria.

Memoria constructiva general para edificios públicos (2006)

- Elaborada por la Dirección Nacional de Arquitectura del Ministerio de Transporte y Obras Públicas.
- Documento de aplicación obligatoria para la producción de edificios públicos.
- De aplicación voluntaria para la ejecución de proyectos de carácter privado pero, que es considerado como documento de referencia en caso de pleitos judiciales.
- Compuesta por un documento interpretativo y nueve capítulos, incluyendo un breve apartado sobre madera.

Pliego de condiciones de la DNV para la construcción de puentes y carreteras (1989) y Especificaciones técnicas complementarias y/o modificativas del Pliego de condiciones para la construcción de puentes y carreteras de la DNV (2003).

- Elaborados por la Dirección Nacional de Vialidad del Ministerio de Transporte y Obras Públicas, tiene una revisión
- Documentos de aplicación obligatoria para la producción de puentes.

Pliego de condiciones técnicas para la madera estructural en la edificación Uruguay (2015)

- Documento elaborado por el Instituto de Estructuras y Transporte de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República y la Facultad de Arquitectura de la Universidad ORT Uruguay
- Establece los requisitos que deben cumplir los productos de madera para ser utilizados con fines estructurales en arquitectura e ingeniería civil en Uruguay
- Adicionalmente, brinda información técnica que facilita a profesionales y técnicos la prescripción, selección y control de la calidad estructural de los elementos de madera.

En síntesis, el cuerpo de normas UNIT para materiales y proyectos de construcción es incompleto, inconsistente, y en general está desactualizado. En relación a las normas de cálculo de estructuras, vale subrayar que coexisten distintas normas con diferentes formatos de cálculo: la de hormigón armado en estados límites, y las de madera y acero en tensiones admisibles, lo cual impide compatibilizar diseños con distintos materiales, y genera inconsistencias que pueden resultar en diseños poco seguros. Por otro lado, si bien existen reglamentaciones y documentos que regulan algunos aspectos de los proyectos y ejecución de obras de arquitectura e ingeniería civil, no existe un Código de construcción en el país.

3.4. Caracterización de madera y productos de ingeniería de madera

En la actualidad no existen normas que indiquen los valores las propiedades físicas y mecánicas de la madera de procedencia local para su uso en construcción, aunque existen publicaciones y documentos de investigación sobre el tema.

Como antecedentes de caracterización de madera, destacan los trabajos pioneros realizados por el Dpto. de Proyectos forestales del LATU en el marco de los Grupos Técnicos de Madera Aserrada de Pino GT3 y de Eucalipto GT2, y que dieran lugar a los Informes para pinos N° 1, 2, 3 y 7 (O'Neill

et al, 2002, 2003, 2004, y 2008), y para eucaliptos N° 4, 5 y 6 (O’Neill et al, 2004, 2008). Varias notas técnicas (O’Neill et al, 2003, O’Neill, 2004) e informes de investigación de la Serie Forestales reportan resultados complementarios sobre estimación de propiedades de flexión de tablas de madera mediante ensayos no destructivos (Pérez Favaro et al, 2000), y sobre el cumplimiento con los requisitos de la norma japonesa para madera estructural en el caso de piezas de madera aserrada de pino (Pérez del Castillo, 2001). Existen también antecedentes sobre clasificación de madera de pinos y eucaliptos nacionales en base a normativa chilena y australiana respectivamente (Pérez del Castillo et al, 2003).

En cuanto a antecedentes sobre madera laminada, vale mencionar el proyecto realizado por el Dpto. de Proyectos Forestales del LATU financiado por el Programa de Desarrollo Tecnológico del MEC, y que diera lugar a la publicación “Alternativas para dar valor agregado a la madera nacional proveniente de árboles de raleos comerciales. Vigas laminadas y madera microlaminada” (O’Neill et al, 2009). El estudio demostró que las maderas provenientes de árboles de raleos comerciales pueden ser empleadas para fabricar productos de ingeniería de madera, valorizando y permitiendo un mejor aprovechamiento del recurso forestal.

Cabe destacar que estos trabajos con información relevante, fueron realizados con objetivos diferentes a los requeridos para generar insumos de una norma de cálculo estructural. En la mayoría de los casos la madera analizada provino de árboles seleccionados y posteriormente procesados (aserrados) en laboratorio; y no correspondió a piezas de calidad comercial disponibles en el mercado. Las metodologías de ensayo, procesamiento de datos, etc, fueron realizados de acuerdo a varios cuerpos normativos (ASTM, EN, NCh, JAS, SA), y no siguiendo los lineamientos de un único sistema de normas como es lo habitual en un proceso diseñado para generar un paquete consistente de información que incluya desde la caracterización hasta la asignación a clases resistentes.

3.4.1. Propiedades de la madera aserrada de pino

Los valores (característicos y medios) de las propiedades físicas y mecánicas de la madera aserrada de pino que se produce y comercializa en Uruguay vienen siendo determinados a partir de dos proyectos de investigación complementarios, que analizan muestras representativas de la producción y que provienen del litoral (FMV, 2009) y del norte (DNI, 2013) del país. Parte de los resultados están publicados y refieren a las principales propiedades estructurales (flexión, compresión y tracción paralela, densidad) y la correspondiente asignación a clase resistente o grado estructural (Moya et al, 2015); y a propiedades complementarias determinadas en cuerpos de prueba libre de defectos y de pequeñas dimensiones (Moya et al, 2013). Las Tablas 3.1 y 3.2 resumen los valores medios y característicos de las propiedades mecánicas y de la densidad de piezas de madera de pino proveniente de plantaciones de 25 y 15 años, del litoral y del sureste del país, respectivamente.

Tabla 3.1. Propiedades de flexión y densidad¹ de cuerpos de prueba de tamaño estructural de *Pinus elliottii* y *P. taeda* (extraído de Moya et al, 2015)

Muestreo ²	Grado	N° rep	$E_{m,g}$ ³ [MPa]	$E_{m,t}$ ³ [MPa]	f_m ³ [MPa]	$f_{m,k}$ ⁴ [MPa]	ρ ³ [kg/m ³]	ρ_k ⁴ [kg/m ³]
M1	E7	55	7489	7852	47	24	470	410
	E5	47	5822	6107	28	13	419	341
M2	E5	105	5158	5414	27	15	373	320
	R	44	4681	4915	20	6	361	320

Tabla 3.2. Propiedades de compresión y tracción paralela a la fibra¹ de cuerpos de prueba de tamaño estructural de *Pinus elliottii* y *P. taeda* (extraído de Moya et al, 2015)

Muestreo ²	Grado	N° rep	f_{o0} ³ [MPa]	$f_{o0,k}$ ⁴ [MPa]	N° rep	f_{b0} ³ [MPa]	$f_{b0,k}$ ⁴ [MPa]
M1	E7	91	26	20	89	33	14
	E5	58	22	13	66	12	6
M2	E5	75	21	16	83	15	8
	R	46	17	11	34	9	4

¹Referidos al 12% de CH

²M1 y M2: muestreos constituidos por madera de árboles de 25 años del litoral, y de 15 años del suroeste respectivamente

³Valores medios

⁴Valores característicos

Los resultados de la madera de pino nacional clasificada visualmente como EC7 y descritos en las Tablas 3.1 y 3.2 según los criterios de calidad de la norma chilena NCh 1207 (2005), permiten correlacionarla con la clase resistente C14 de la norma europea EN 338 (2012). ***Esta información, si bien de carácter limitado por el tamaño de la muestra, puede ser considerada como insumo inicial para un Anexo nacional (con información de propiedades estructurales de maderas nacionales) a la norma de cálculo de estructuras de madera.***

3.4.2. Reglas de clasificación visual por resistencia para madera aserrada de pinos

A partir del análisis y los resultados de los proyectos antes mencionados (FMV, 2009 y DNI, 2013) se definieron criterios visuales de clasificación por resistencia para madera de pinos uruguayos que se recogen en el Informe de Baño et al (2016). ***Estos criterios pueden ser considerados como un documento base para la discusión de una norma de clasificación visual para madera de pino nacional.***

3.4.3. Propiedades de la madera laminada encolada

La madera laminada encolada que se produce y comercializa en Uruguay no es estructural, ya que no cumple con los requisitos de fabricación y control de calidad mínimos exigidos en las normativas internacionales. Al no existir normas UNIT, y tampoco reglamentaciones de cumplimiento obligatorio que regulen la calidad de la producción de madera laminada encolada, al día de hoy ninguna empresa local fabrica productos de calidad estructural. Es frecuente encontrar vigas con adhesivos no estructurales, o fabricadas con bloques de madera de longitudes menores a las establecidas en las normas internacionales, etc. Los productos que se vuelcan en el mercado no cuentan con las especificaciones técnicas indispensables para la elaboración de proyectos de arquitectura e ingeniería civil.

El proyecto Innovagro (2014) actualmente en curso, fue diseñado con el fin de caracterizar la producción de las empresas más importantes a nivel nacional que fabrican y vuelcan al mercado madera laminada encolada. El objetivo del proyecto incluye determinar las propiedades físicas y mecánicas de vigas de madera laminada encolada de *Eucalyptus grandis* y su asignación a grados estructurales a partir de muestras representativas del material que se produce actualmente y con la tecnología disponible en el mercado. ***Se espera que los resultados de este proyecto provean información técnica que sirva como insumo para un Anexo nacional (con información de propiedades estructurales de madera laminada encolada de E. grandis) a la norma de cálculo de estructuras de madera.***

4. HACIA LA GENERACIÓN DE UN CUERPO NORMATIVO PARA LA MADERA ESTRUCTURAL EN URUGUAY

4.1. Talleres con expertos en normas de cálculo estructural

Con el objetivo de recibir sugerencias, comparar experiencias de Argentina, Brasil, Chile y España y discutir los motivos que incidieron en la elección del formato de cálculo en cada país, se realizaron una serie de jornadas técnicas (Montevideo, 1- 4/9/14) estructuradas como talleres de trabajo en los que participaron el equipo de investigación del Proyecto *Documentos técnicos base para la normalización de estructuras y construcción con madera*, y expertos de la comunidad internacional y nacional. Se abordaron los aspectos más relevantes del proceso de elaboración de una norma de cálculo de estructuras de madera, tanto en la revisión de los insumos necesarios para su redacción, como en el diseño de estrategias tendientes a generar consensos entre los actores involucrados en su aprobación.

Como invitados internacionales se contó con la presencia del Dr. Ing. Juan Carlos Piter, coordinador el “Reglamento Argentino de Estructuras de Madera” (CIRSOC 601), del Dr. Ing. Carlito Calil Jr., participante de la redacción “Proyecto de Estructuras de Madera” en Brasil (NBR 7190), del Ing. Mario Wagner, participante de la elaboración de la norma “Madera. Construcciones en madera. Cálculo” (NCh 1198) y, a través de videoconferencia, con la participación del Dr. Arq. Francisco Arriaga, participante de la redacción del Documento Básico “Seguridad Estructural: Madera” del “Código Técnico de la Edificación de España” (CTE-SE-M), que también presentó la norma europea EN 1995 “Proyecto de Estructuras de Madera” (Eurocódigo 5). Adicionalmente, la Dra. Ing. Vanesa Baño, presentó y discutió los aspectos más relevantes del Eurocódigo 5.

Entre los invitados locales se contó con la participación del MSc. Ing. Pablo Páez quien discutió aspectos de la norma UNIT 50-84 “Acción del viento sobre construcciones”, y la contribución del Dr. Ing. Agr. Andrés Dieste que aportó su visión del sector forestal- maderero uruguayo.

Los temas abordados incluyeron:

- Caracterización de la madera estructural y clasificación visual de la madera aserrada. Revisión de la información disponible en Uruguay
- Requisitos de fabricación y control de calidad de la madera laminada encolada
- Límites de deformación de los elementos de madera, cálculo estructural de la madera en situación de incendio y análisis de vibraciones.
- Análisis de la norma de viento UNIT 50-84 y los ajustes necesarios para ser consistente con el cuerpo normativo europeo
- Normativa de cálculo estructural en los diferentes países

Los talleres de trabajo concluyeron con una serie de recomendaciones sobre el método de cálculo a proponer para Uruguay y sobre los documentos y/o normas a generar como insumos indispensables para una norma de cálculo estructural en madera.

4.2. Conclusiones y recomendaciones

Considerando que la generación de un cuerpo normativo nacional es una tarea de gran magnitud parece razonable planificar su redacción y promulgación en etapas, de acuerdo a la información con que se vaya contando. Una estrategia de redacción progresiva para generar un conjunto integral de normas técnicas parece adecuada a la situación actual. Vale subrayar que el desarrollo y el posterior

éxito en la adopción de las normas nacionales depende en gran medida de que UNIT trabaje en forma colaborativa y tratando de generar consensos con todas las partes involucradas; esto es, el sector industrial forestal maderero, los institutos de investigación, y eventualmente, los consumidores (ingenieros, arquitectos, constructores, carpinteros, etc.

Los pasos para el establecimiento de normas para la madera estructural involucrarán no solo el trabajo dentro de un comité UNIT, sino el que aporte la diversidad de instituciones y laboratorios involucrados en la investigación científica que genere las especificaciones de las propiedades físicas y mecánicas de los productos de madera.

4.2.1. Consideraciones para el desarrollo de cuerpo normativo para la madera estructural

- Coordinar con
 - otros materiales estructurales (notación, enseñanza)
 - normas de acciones y bases de cálculo
 - normas de ensayos y de clasificación
- Tener en cuenta la normativa internacional
- Generar documentos nacionales de aplicación (DNA)
 - de apoyo al proyectista (ej. manuales con ejemplos resueltos)
 - con simplificaciones
 - con desarrollos específicos

Es imprescindible generar consensos para el afianzamiento de una norma.

4.2.2. Adopción de un cuerpo normativo existente

Sería pertinente para Uruguay considerar la adopción del cuerpo normativo europeo (EN), porque es un cuerpo consistente y coherente, que incluye especificaciones técnicas de fabricación de materiales, metodología de ensayos, interpretación y análisis de resultados, reglas de diseño, etc. Esta opción resulta práctica y si fuera adoptada, permitiría ahorrar mucho del trabajo necesario para generar una normativa de características similares, a la vez que facilitaría contar con las actualizaciones periódicas devenidas de los avances del conocimiento y de la tecnología. De esta forma los esfuerzos podrían concentrarse en la redacción de Anexos nacionales, con información técnica referente a la madera y productos de ingeniería de madera de procedencia uruguaya, así como en la redacción de manuales con ejemplos prácticos y documentos técnicos que difundan el conocimiento y permitan adoptar la tecnología de construcción con madera.

En particular se sugiere adoptar las siguientes normas EN:

- EN 1995-1-1 (2006). Eurocódigo 5- Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1. Reglas generales y reglas para la edificación
- EN 1995-1-2 (2011). Eurocódigo 5- Proyecto de estructuras de madera. Partes 1-2. Reglas generales. Proyectos de estructuras sometidas al fuego
- EN 14080 (2014). Madera laminada encolada y madera maciza encolada. Requisitos
- EN 338 (2012). Madera estructural. Clases resistentes
- y en general todas las normas de ensayos, determinación de valores característicos, etc

4.2.3. Generación de normas nacionales

Se sugiere desarrollar un cuerpo normativo nacional de acompañamiento que incluya en su etapa inicial, las siguientes normas UNIT:

- Norma de Clasificación visual estructural y propiedades mecánicas de madera aserrada de pinos cultivados en Uruguay (*Pinus elliotii* y *P. taeda*)
- Norma de Clasificación visual estructural y propiedades mecánicas de madera aserrada de eucaliptos cultivados en Uruguay (*Eucalyptus grandis*)
- Norma de Madera laminada encolada de eucalipto (*Eucalyptus grandis*). Requisitos de fabricación y propiedades mecánicas
- Norma de Madera laminada encolada de pinos (*Pinus elliotii* y *P. taeda*). Requisitos de fabricación y propiedades mecánicas

En la medida que se vaya avanzando en la caracterización y generando información a partir de resultados de investigaciones sobre productos de madera se podrán ir redactando las normas correspondientes.

4.2.4. Redacción de Anexos nacionales del Eurocódigo 5

Se sugiere redactar los siguientes anexos nacionales:

- EN 1995-1. Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1. Reglas generales
- EN 1995-1. Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 2. Fuego

4.2.5. Desarrollo de documentos y actividades de apoyo al proyectista

- Manuales con ejemplos resueltos
- Actividades de difusión
- Cursos de actualización

4.2.6. Generación de información mediante de proyectos de investigación para establecer, entre otros:

- coeficientes de seguridad aplicables a los diferentes productos estructurales de madera
- límites de deformación para estructuras de madera en Uruguay
- límites de resistencia al fuego para estructuras de madera en Uruguay
- tipos de uniones utilizables en madera
- coeficientes de seguridad y ecuaciones de cálculo aplicables a uniones en madera

BIBLIOGRAFÍA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (1997). NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Río de Janeiro: ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (2010). NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Río de Janeiro: ABNT.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1977). ACI 318: Building code requirements for structural concrete. Michigan: ACI.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION – AISC (1986). AISC 360: Specification for structural steel building. Chicago: AISC.

AMERICAN FOREST & PAPER ASSOCIATION - AF&PA (2005). National Design Specification (NDS) for Wood Construction. Washington, DC: AF & PA.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS - ASCE (2010). ANSI/ASCE 7-10: Minimum design loads for building and other structures. Recuperado 22 de diciembre de 2016, desde <http://residentialengineeringgroup.com/teg.pdf>

ARRIAGA, F. (1985). Consideraciones sobre las normas para el cálculo de estructuras de madera. Boletín de la Sociedad española de cerámica y vidrio. Recuperado el 18 de junio de 2015, desde http://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_1288_17164.pdf Último acceso: 18/06/2015

ARRIAGA, F. (1998). Cálculo de estructuras de madera. Apuntes de clase. Diplomado en diseño y cálculo de estructuras de madera. Universidad del Bío-Bío: Concepción

ARGÜELLES, R. ; ARRIAGA, F. & MARTÍNEZ, J. J. (2000). *Estructuras de madera: diseño y cálculo*. 2da. Ed. Aitim: Madrid.

ARRIAGA, F. & BLASCO, R. (2007). Estructuras de madera (Jornadas de introducción). Recuperado desde: http://arquitectosdecadiz.com/uploads/Actividades_Agenda_Mensual/documentacion_estructuras_madera.pdf. Último acceso: 20/05/2015

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM (1979). Annual book of ASTM standards. Philadelphia, PA: ASTM.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM (2011). ASTM D 143-09: Standard test methods for small clear specimens of timber. West Conshohocken, PA: ASTM.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM (2011). ASTM D 198-09: Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. West Conshohocken, PA: ASTM.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM (2011). ASTM D 245-06: Standard Practice for establishing structural grades and related allowable properties for visually graded lumber. West Conshohocken, PA: ASTM.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM (2011). ASTM D 1990-07: Standard Practice for establishing allowable properties for visually graded lumber from in-grade tests of full-size specimens. West Conshohocken, PA: ASTM.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM (2011). ASTM D 2555-06: Standard practice for establishing clear wood strength values. West Conshohocken, PA: ASTM.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM (2011). ASTM D 4761-05: Standard test methods for mechanical properties of lumber and wood-base structural material. West Conshohocken, PA: ASTM.

BAÑO, V.; ARGÜELLES, R.; REGUEIRA, R. & GUAITA, M. (2012). Determination of the stress-strain curve in specimens of Scots Pine for numerical simulation of clear wood. *Materiales de Construcción*, 62(306), 269-284.

BAÑO, V. & MOYA, L. (2015). *Pliego de condiciones técnicas para la madera estructural en la edificación en Uruguay*. (Documento de Trabajo n° 4). Montevideo: Universidad ORT Uruguay.

BAÑO, V. & MOYA, L. (setiembre, 2015). *Tecnología de la construcción con madera en Uruguay: estado del arte y perspectivas*. Artículo presentado en II CBCTEM - Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira. Caderno de Resumos, Belo Horizonte, Brasil.

BAÑO, V. et. al. (2015). Documentos técnicos base para la normalización de estructuras y construcción con madera. Recuperado desde:
https://www.fing.edu.uy/sites/default/files/2016/25086/1.%20Ba%C3%B1o%20et%20al.2015-PrFI-3823-013_InformeFinal.pdf

BREYER, D. E.; FRIDLEY, K. J.; COBEEN, K. E. & POLLOCK, D. G. (2007). *Design of wood structures*. 6th McGraw-Hill: New York.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION – BSI (2006). BS 5268-3: Structural use of timber – part 3: code of practice for trussed rafter roofs. London: BSI.

CALIL JR, C. (noviembre, 2008). *South America timber structures code*. Artículo presentado en 51st International Convention of Society of Wood Science and Technology. Concepción, Chile.

CANADIAN WOOD COUNCIL (1975). Determination of allowable stresses for Canadian lumber in Canada. CSA-086, citado en Madsen, B. 1975 Moisture content-strength relationship for lumber subjected to bending. *Can. J.Civil Eng.* 2(4):466-473.

MINISTERIO DE FOMENTO, GOBIERNO DE ESPAÑA. (2009). CTE-DB-SE-M: Código Técnico de la Edificación. Documento Básico. Seguridad Estructural: madera. Madrid: Ministerio de Fomento.

DIESTE, A. (2012). Programa de promoción de exportaciones de productos de madera. Informe 1. Dirección Nacional de Industrias. Ministerio de Industrias, Energía y Minería. Consejo Sectorial Forestal-Madera. Uruguay

DIESTE, A. (2014). Plan de inversiones en maquinaria y equipos. Informe 3. Dirección Nacional de Industrias. Ministerio de Industria, Energía y Minería. Consejo Sectorial Forestal-Madera. Uruguay

COMITE EUROPEO DE NORMALIZACION – CEN (2016). EN 338: Structural timber-strength classes. Bruselas: CEN.

COMITE EUROPEO DE NORMALIZACION – CEN (2003). EN 1990: Eurocódigo 0- Bases de cálculo de estructuras. Bruselas: CEN.

COMITE EUROPEO DE NORMALIZACION – CEN (2004). EN 1991: Eurocódigo 1-Bases de proyecto y acciones sobre las estructuras. Bruselas: CEN.

COMITE EUROPEO DE NORMALIZACION – CEN (2006/A2:2015) EN 1995-1-1: Eurocódigo 5-Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para la edificación. Bruselas: CEN.

COMITE EUROPEO DE NORMALIZACION – CEN (2011). EN 1995-1-2: Eurocódigo 5 - Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-2: Reglas generales. Proyectos de estructuras sometidas al fuego. Bruselas: CEN.

COMITE EUROPEO DE NORMALIZACION – CEN (2010). EN 1995-2: Eurocódigo 5 - Proyecto de estructuras de madera. Parte 2: Puentes. Bruselas: CEN.

COMITE EUROPEO DE NORMALIZACION – CEN (2013). EN 14080: Estructuras de Madera - Madera laminada encolada y madera maciza encolada. Requisitos. Bruselas: CEN.

FONDO INDUSTRIAL (2013). Proyecto “Evaluación de madera de pino por clasificación visual para uso estructural”. Dirección Nacional de Industrias. Ministerio de Industria, Energía y Minería. Montevideo: MIEM.

FONDO MARÍA VIÑAS (2009). Proyecto “Caracterización estructural de madera aserrada de pinos (*P. elliotii* y *P. taeda*) asociada a grados estructurales”. Montevideo: ANII.

FONDO INNOVAGRO (2014). Proyecto “Estudio de las propiedades estructurales de vigas de madera laminada encolada de *Eucalyptus grandis* producida en Uruguay para su asignación a clases resistentes”. Montevideo: ANII.

HERRERA, R (2007). Métodos de diseño. Alacero. Recuperado el 15 de julio de 2015, desde <http://es.slideshare.net/Roger199207/3-metodos-dedisenio-50778214>.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN - INN (1988). NCh 1970/1: Maderas - Parte 1. Especies latifoliadas – Clasificación visual para uso estructural. Especificaciones de los grados de calidad. Santiago de Chile: INN.

INSITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN - INN (1988). NCh 1970/2: Maderas - Parte 2. Especies coníferas. Clasificación visual para uso estructural. Especificaciones de los grados de calidad. Santiago de Chile: INN.

INSITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN - INN (1986). NCh 1989. Maderas. Agrupamiento de especies madereras según su resistencia. Procedimiento. Santiago de Chile: INN.

INSITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN - INN (1986). NCh 1990: Madera. Tensiones admisibles para madera estructural. Santiago de Chile: INN.

INSITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN - INN (1989). NCh 2148: Madera laminada encolada estructural. Requisitos e inspección. Santiago de Chile: INN.

INSITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN - INN (1991). NCh 2150: Madera laminada encolada. Clasificación mecánica y visual de madera aserrada de pino radiata. Santiago de Chile: INN.

INSITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN - INN (1991). NCh 2165: Tensiones admisibles para la madera laminada encolada estructural de pino radiata. Santiago de Chile: INN.

INSITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN - INN (2006). NCh 1198: Madera. Construcciones en madera. Cálculo. Santiago de Chile: INN.

INSITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN - INN (2005). NCh 1207. Pino radiata. Clasificación visual para uso estructural. Especificaciones de los grados de calidad. Santiago de Chile: INN.

INSITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN - INN (2005). NCh 1207. Pino radiata. Clasificación visual para uso estructural. Especificaciones de los grados de calidad. Santiago de Chile: INN.

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA INDUSTRIAL - INTI (2013). CIRSOC 601: Reglamento argentino de estructuras de madera. Buenos Aires: INTI.

JESSOME, A. (1971). *The bending strength in structural sizes of lumber*. Canadian Forestry Service. Ottawa, Canada: Dept. of the Environment

JIMÉNEZ MONTOYA, P.; GARCÍA MESEGUER, A.; MORÁN CABRÉ, F. & ARROYO PORTERO, J. C. (2010). *Hormigón armado*. 15a Ed. Barcelona: Gustavo Gili.

KAM-BIRON, M. (2012). *National Design Specification for Wood Construction* [Presentación Power Point]. Recuperado desde American Wood Council website <http://www.woodworks.org/wp-content/uploads/2013-02-webinar-MKB-NDS1.pdf>

LARSEN, H. J. (1995). *Limit state design and safety format* - In Timber Engineering STEP 1. Centrum Hout: The Netherlands

MADSEN, B. (1975). Strength values for wood and limit states design. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2(3), 270-279

MADSEN, B. (1978). In-grade testing [to derive allowable stresses for lumber]--problem analysis. *Forest Products Journal*, 28(4), 42-50.

- MADSEN, B. (1992). *Structural behaviour of timber*. Reston, Virginia: Amer Society of Civil Engineers.
- MGAP OEA (1996). Uruguay: Alternativas para la Transformación Industrial del Recurso Forestal. Proyecto Regional de Alternativas para la Inversión Forestal. Fase I, y Fase II. <https://www.oas.org/DSD/publications/Unit/oea19s/oea19s.pdf>
- MGAP (2010). Monitoreo de los recursos forestales. Inventario forestal nacional. Resumen de resultados. Dirección General Forestal, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca
- MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y MINERÍA - MIEM (2012). Plan Sectorial Forestal-Madera. Ministerio de Industria, Energía y Minería. Recuperado desde http://www.miem.gub.uy/documents/10192/6346385/planes_industriales_-_fase_i_-_nov_2012-parte_2.pdf
- MOYA, L.; CARDOSO, A.; CAGNO, M. & O'NEILL, H. (2015). Caracterización estructural de Madera aserrada de pinos cultivados en Uruguay. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 17(3), 597-612
- MOYA, L.; LAGUARDA, M. F.; CAGNO, M.; CARDOSO, A.; GATTO, F. & O'NEILL, H. (2013). Physical and mechanical properties of loblolly and slash pine wood from Uruguayan plantations. *Forest Products Journal*, 63(3-4), 128-137
- MTOP (1989). Pliego de condiciones de la Dirección Nacional de Vialidad para la construcción de puentes y carreteras. Dirección Nacional de Vialidad, Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Montevideo: MTOP.
- MTOP (2003). Especificaciones técnicas complementarias y/o modificativas del Pliego de condiciones para la construcción de puentes y carreteras de la DNV. Dirección Nacional de Vialidad, Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Montevideo: MTOP.
- MTOP (2006). Memoria constructiva general para edificios públicos. Dirección Nacional de Arquitectura, Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Montevideo: MTOP.
- O'NEILL, H. (2004). Estimación de la calidad de la madera producida en el Uruguay para uso estructural y su evaluación en servicio por métodos no destructivos. Nota técnica. Laboratorio Tecnológico del Uruguay. Montevideo: LATU.
- O'NEILL, H. & QUAGLIOTTI, S. (2009). Alternativas para dar valor agregado a la madera nacional proveniente de árboles de raleos comerciales. Vigas laminadas (glulam) y madera microlaminada (LVL). Informe de Investigación. Laboratorio Tecnológico del Uruguay. Montevideo: LATU.
- O'NEILL, H. & TARIGO, F. (2008). Propiedades mecánicas de *Pinus elliottii* Eng. del norte de Uruguay. Informe N°7. Grupo Técnico de Madera Aserrada de Pino GT3. Laboratorio Tecnológico del Uruguay. Montevideo: LATU.

O'NEILL, H; TARIGO, F. & IRAOLA, P. (2004). Propiedades mecánicas de *Pinus taeda* L. del norte de Uruguay. Informe N°3. Grupo Técnico de Madera Aserrada de Pino GT3. Laboratorio Tecnológico del Uruguay. Montevideo: LATU.

O'NEILL, H; TARIGO, F. & IRAOLA, P. (2004). Propiedades mecánicas de *Eucalyptus grandis* H. del norte de Uruguay. Informe N°4. Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto GT2. Laboratorio Tecnológico del Uruguay. Montevideo: LATU.

O'NEILL, H; TARIGO, F. & TAMBAUER, C. (2003). Propiedades mecánicas de *Pinus taeda* L. del litoral de Uruguay. Informe N°2. Grupo Técnico de Madera Aserrada de Pino GT3. Laboratorio Tecnológico del Uruguay. Montevideo: LATU.

O'NEILL, H; TARIGO, F. & TAMBAUER, C. (2002). Propiedades mecánicas de *Pinus elliottii* Eng. del litoral de Uruguay. Informe N°1. Grupo Técnico de Madera Aserrada de Pino GT3. Laboratorio Tecnológico del Uruguay. Montevideo: LATU.

PÉREZ DEL CASTILLO, A. & VENTURINO, A. (2003). *Resumen de propiedades mecánicas de Eucalyptus grandis, Pinus elliottii y Pinus taeda de distintas zonas del Uruguay.* (LATU Documento de Investigación n°14). Montevideo: LATU

PÉREZ DEL CASTILLO, A. & VENTURINO, A. (2003). *Inspección visual de tablas de tamaño real de Eucalyptus grandis, Pinus elliottii y Pinus taeda de diferentes sitios del Uruguay.* (LATU Documento de Investigación n°15). Montevideo: LATU

PÉREZ FAVARO, A.; DE CASTRO, R. & OHTA, S. (2000). *Ensayos de propiedades mecánicas de Pinus taeda por seis métodos no destructivos.* (LATU-JICA Documento de Investigación n° 1). Montevideo: LATU.

PITER, J. C. (setiembre, 2014). *El Reglamento CIRSOC 601(2013).* Artículo presentado en Conferencias sobre normativa de estructuras de madera. Facultad de Arquitectura, Universidad ORT Uruguay. Montevideo, Recuperado desde: http://fa.ort.edu.uy/innovaportal/file/20926/1/conferencia_2-_argentina.pdf

TAYLOR, R. J. (2001). *Designing with LRFD for Wood.* American Wood Council. Recuperado el 18, de junio de 2015 desde: <http://www.awc.org/pdf/codes-standards/publications/archives/lrfd/AWC-DesigningWithLRFD-0107.pdf>

SEXSMITH, R. G. & FOX, S. P. (1978). Limit states design Concepts for timber engineering. *Forest Products Journal*, 28(5), 49-54

STEIGER, R. & ARNOLD, M. (2009). Strength grading of Norway spruce structural timber: revisiting property relationships used in EN 338 classification system. *Wood Science & Technology*, vol. 43, 259-278

WAGNER, M. (setiembre, 2014). *Norma chilena NCh 1198: Construcciones en Madera - Cálculo.* Artículo presentado en Conferencias sobre normativa de estructuras de madera. Facultad de Arquitectura, Universidad ORT Uruguay, Montevideo. Recuperado desde http://fa.ort.edu.uy/innovaportal/file/20928/1/conferencia_4-_chile.pdf