

Informe Final

PROYECTO: DOCUMENTOS TÉCNICOS BASE PARA LA
NORMALIZACIÓN DE ESTRUCTURAS Y CONSTRUCCIÓN CON
MADERA

FONDO INDUSTRIAL PR Nº: 3823/013

Autores:

**Vanesa Baño, Laura Moya, Hugo O´Neill, Andrea Cardoso, Matías Cagno,
Gonzalo Cetrangolo, Leandro Domenech**

ISBN: 978-9974-0-1344-5



TABLA DE CONTENIDOS

Prefacio.....	iv
Resumen ejecutivo.....	vi
<u>Informe 1.</u> Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera. Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional.....	I
<u>Informe 2.</u> Análisis de la metodología de ensayo y los requerimientos de la normativa europea de caracterización estructural de madera.....	II
<u>Informe 3.</u> Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de <i>Pinus elliotii</i> / <i>P. taeda</i> de procedencia uruguaya.....	III
<u>Informe 4.</u> Cálculo estructural con madera: propuesta de Anexo Nacional al Eurocódigo 5	IV

PREFACIO

Dentro de las metas aprobadas por el Consejo Sectorial Tripartito Forestal-Madera se encuentra la incorporación de 100.000 m³ de productos de madera en la construcción de viviendas de madera, en la industria de la construcción en general, y en la fabricación de muebles (MIEM, 2012¹). Para alcanzar esta meta y promover el uso intensivo de madera y productos de ingeniería de madera con fines estructurales en arquitectura e ingeniería civil, se requiere entre otros, contar con materiales caracterizados y con especificaciones técnicas, y con un conjunto de normas que establezcan estándares calidad de los productos, desde la fabricación hasta su empleo. Estos factores junto con la formación de recursos humanos y una estrategia de comunicación que eduque al usuario final en las ventajas de consumir productos de madera de calidad estructural, constituyen la base indispensable para el desarrollo de tecnologías que agregan valor a las maderas nacionales y consecuentemente al desarrollo total de la cadena forestal-maderera.

En Uruguay existe un número reducido de normas para madera y productos forestales, pero ninguna que establezca pautas para el diseño, construcción y cálculo de estructuras de madera (tanto en edificación como en puentes). La generación de una norma 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. Si bien a nivel internacional existen diversos cuerpos normativos referidos al tema, la creación de normas nacionales adquiere importancia relevante pues contempla las características de los materiales producidos y disponibles en el mercado local, e integra las miradas de todas las partes involucradas.

La ausencia de un cuerpo normativo que respalde técnicamente a profesionales y usuarios en el empleo de la madera estructural ha motivado el diseño y la ejecución del Proyecto *Documentos técnicos base para la normalización de estructuras y construcción con madera*, por parte de 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. El proyecto contó además, con el asesoramiento de expertos internacionales y nacionales quienes interactuando en talleres de trabajo con el equipo LATU-FING-ORT transmitieron sus experiencias y abordaron los aspectos relevantes del proceso de elaboración de una norma de cálculo estructural de madera: desde la revisión de los insumos necesarios para su redacción, hasta el diseño de estrategias tendientes a generar consensos entre los actores involucrados en su aprobación. Adicionalmente, los expertos compartieron sus experiencias con técnicos y empresarios del sector de la construcción, del sector forestal-maderero y de la academia, a través del dictado de una serie de conferencias públicas. El presente documento constituye el informe final del Proyecto, y recoge el conjunto de información analizada y generada durante su ejecución.

Contar con un cuerpo normativo coherente y consistente para madera estructural que abarque desde la fabricación y caracterización de los materiales hasta las reglas de diseño, brindará el respaldo técnico para que profesionales y usuarios adopten los productos de madera y su tecnología de construcción. A la vez, contribuirá al desarrollo del sector

¹ MIEM. 2012. Plan Sectorial. Forestal-Madera. *En Planes Industriales Fase II.*
https://gp.gub.uy/sites/default/files/documentos/planes_industriales_-_fase_i_-_nov_2012-parte_2.pdf.
(último acceso: noviembre 2015)

industrial forestal-maderero ya que permitirá sistematizar procedimientos y otorgar confiabilidad a todos los interesados.

El equipo LATU-FING-ORT agradece a la Dirección Nacional de Industrias del MIEM la oportunidad de haber podido cooperar técnicamente y desarrollar este Proyecto. Con el presente documento se espera contribuir con información básica y sugerencias, para la toma de decisiones y orientar a las instituciones encargadas de generar normas y promulgar reglamentos, en el camino a seguir en relación a la normativa nacional para madera estructural.

Montevideo, diciembre de 2015

Vanesa Baño

Laura Moya

Hugo O'Neill

Profesionales y técnicos participantes

La Dirección del proyecto estuvo a cargo de:

Dra. Ing. Vanesa Baño, Dra. Arq. Laura Moya y Per. Agr. Hugo O'Neill.

Integrantes del equipo investigador LATU-FING-ORT:

Ing. Agr. Andrea Cardoso

Ing. Qco. Matías Cagno

MSc. Ing. Civil Gonzalo Cetrangolo

Ing. Civil Leandro Domenech

Consultores internacionales:

Dr. Arq. Francisco Arriaga (España)

Dr. Ing. Civil Carlito Calil Jr (Brasil)

Dr. Ing. Civil Juan Carlos Piter (Argentina)

Ing. Civil Mario Wagner (Chile)

Colaboradores nacionales:

Dr. Ing. Agr. Andrés Dieste (Instituto de Química, Facultad de Ingeniería, UR)

MSc. Ing. Civil Sebastián Dieste (Instituto de Estructuras y Transporte, Facultad de Ingeniería, UR)

MSc. Ing. Civil Pablo Paéz (Instituto de Estructuras y Transporte, Facultad de Ingeniería, UR)

Ing. Civil Martín Reina (Sociedad de Ingenieros Estructurales del Uruguay)

RESUMEN EJECUTIVO

El Proyecto *Documentos técnicos base para la normalización de estructuras y construcción con madera* fue desarrollado entre junio de 2014 y julio 2015. Las actividades del proyecto fueron complementadas con dos instancias de difusión abiertas al público, en la primera, se abordó el estado del arte de la normativa estructural con madera, y en la segunda, se presentaron los resultados del Proyecto. El documento presenta los resultados del Proyecto y está estructurado en cuatro informes de acuerdo a los siguientes cometidos: i) revisar el estado del arte de la normativa de cálculo estructural en madera a nivel internacional y proponer el camino a seguir en Uruguay (Informe 1); ii) generar insumos para una norma de cálculo de madera a partir del análisis de una base de datos actualizada de madera aserrada de pinos uruguayos (Informe 2 e Informe 3); iii) proponer los parámetros que deberían incluirse en un Anexo nacional, y las líneas de investigación para el desarrollo de un cuerpo normativo consistente para la madera estructural en Uruguay (Informe 4). La síntesis de los cuatro informes se presenta a continuación.

Informe 1- Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera. Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional.

El proceso de diseño de una estructura implica contar con las especificaciones técnicas de los materiales a utilizar, definir las cargas y la combinación de cargas imprescindibles para el diseño, y acordar un nivel aceptable de seguridad que sea de fácil y consistente aplicación por los calculistas. Estos aspectos tendrán diferente tratamiento e interpretación dependiendo del método de cálculo estructural que se emplee, tensiones admisibles o estados límite. Por tanto, una vez que el método de cálculo esté seleccionado, el cuerpo normativo debe desarrollarse en tres áreas básicas: la primera, que incluye los ensayos para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la madera; la segunda, 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 la normativa previamente elegida.

Una norma de cálculo estructural para un determinado material es complementada con las especificaciones técnicas correspondientes a ese material. En general, en los países que cuentan con normas/reglamentos de cálculo de estructuras de madera, estas especificaciones para las maderas nacionales se encuentran tabuladas en **Anexos nacionales** o Suplementos (del documento principal). Adicionalmente, las normas de cálculo de madera, se complementan con un conjunto de **Normas de acompañamiento** nacional, que incluyen entre otros, reglas de clasificación visual de madera, normas de fabricación y control de madera laminada encolada, procedimiento para la obtención de los valores característicos, etc.

Situación normativa en Uruguay

En Uruguay no existe un cuerpo normativo sobre madera estructural que abarque desde la caracterización y especificaciones de fabricación de productos y componentes, hasta el diseño, cálculo y ejecución de obras. Por esta razón el método de cálculo es seleccionado por el calculista en base a su experiencia personal, quien al enfrentarse con los vacíos normativos nacionales, especialmente aquellos relacionados con las propiedades estructurales de las maderas uruguayas, se ve forzado a adoptar valores tabulados en

normas extranjeras y a recurrir a estrategias de análisis que le permitan lidiar con las incertidumbres del material nacional.

La generación de normas técnicas 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 y son de aplicación voluntaria a menos que alguna disposición reglamentaria o contractual las haga de obligado cumplimiento. El cuerpo de normas UNIT para materiales y proyectos de edificios y estructuras es incompleto, inconsistente, y en general está desactualizado. En el caso del hormigón armado existe una norma de cálculo estructural, basada en el método de los estados límite; en relación a la madera, existe un número reducido de normas UNIT que en su mayoría refieren a nomenclaturas, definiciones y metodologías de ensayos, pero al igual que en el caso del acero, no existe norma de cálculo estructural.

Especificaciones técnicas de la madera aserrada

Los valores de las propiedades estructurales de las maderas uruguayas no se encuentran tabulados en ningún documento oficial, si bien existen publicaciones e investigaciones sobre el tema. En el caso de la madera aserrada de pinos (*Pinus elliottii* y *P. taeda*) que se produce y comercializa actualmente en el país, las principales propiedades físicas y mecánicas (flexión, compresión y tracción paralela, densidad) y la correspondiente asignación a una clase resistente del sistema europeo, se encuentran publicadas en <http://www.scielo.cl/pdf/maderas/v17n3/aop5315.pdf>.

Se trata de información de carácter limitado debido al tamaño de la muestra analizada pero que puede ser considerada como insumo inicial para un **Anexo nacional**. Por otra parte, los valores de las propiedades estructurales se suelen asociar con una clasificación visual y/o mecánica de la madera. En el **Informe 3** del presente documento, se describen los criterios visuales de clasificación por resistencia para madera de pinos uruguayos, que pueden ser considerados como base para la redacción de una **Norma de acompañamiento de clasificación visual para madera de pino nacional**.

Especificaciones técnicas de la madera laminada encolada

La madera laminada encolada que se produce y comercializa en el país se realiza sin ningún marco normativo que regule su fabricación, ni su calidad física y estructural. Si bien la técnica del laminado encolado no es nueva en el país (introducida en la década de los noventa) y al menos tres empresas están dedicadas a su producción, la madera laminada encolada que se vuelca al mercado no cumple con los requerimientos técnicos de un material estructural. Al no existir normas UNIT y tampoco reglamentaciones de cumplimiento obligatorio, los fabricantes producen madera laminada encolada siguiendo criterios propios, basados en su experiencia y según sus requerimientos productivos, y no de acuerdo a las normativas internacionales para productos estructurales. El proyecto “Estudio de las propiedades estructurales de vigas de madera laminada encolada de *Eucalyptus grandis* producidas en Uruguay para su asignación a clases resistentes” actualmente en curso y que viene siendo ejecutado por el equipo LATU-FING-ORT, fue diseñado con el fin de caracterizar la producción de las tres empresas más importantes que a nivel nacional fabrican y vuelcan al mercado madera laminada encolada. Uno de los objetivos del proyecto es lograr que la madera laminada encolada de estas empresas cumpla con los requisitos técnicos de un material estructural, proponiendo para ello mejoras en los procesos productivos. Se espera que los resultados de ese proyecto provean información técnica que sirva como insumo para un **Anexo nacional** (con valores de las propiedades estructurales de la madera laminada encolada), y como base para la generación de **Normas de acompañamiento** (de fabricación y control, de clasificación de tablas, etc).

Propuesta para generar un cuerpo normativo para madera estructural en Uruguay

Con el objetivo 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 realizó una serie de jornadas técnicas (Montevideo, 1- 4/9/14) estructuradas como talleres de trabajo en los que participaron el equipo de investigación y expertos de la comunidad internacional y nacional. Los talleres de trabajo concluyeron con las siguientes recomendaciones:

- **Adoptar el cuerpo normativo europeo** por su consistencia y coherencia; éste incluye especificaciones técnicas de fabricación de materiales, metodología de ensayos, interpretación y análisis de resultados, reglas de diseño, etc. Esta opción resulta práctica y de ser 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.
- **Generar normas UNIT de acompañamiento nacional** que en su etapa inicial, incluya:
 - Norma de Clasificación visual estructural y propiedades mecánicas de madera aserrada de pinos cultivados en Uruguay (*Pinus elliottii* 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 elliottii* y *P. taeda*). Requisitos de fabricación y propiedades mecánicas
 - Norma de Madera laminada encolada de eucalipto (*Eucalyptus grandis*). Clasificación visual de tablas por resistencia.
 - Norma de Madera laminada encolada de pinos (*Pinus elliottii* y *P. taeda*). Clasificación visual de tablas por resistencia.

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.

- **Redactar Anexos nacionales al Eurocódigo 5 para el cálculo estructural con madera en edificación, correspondientes a:**
 - 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.
- **Desarrollar documentos de aplicación nacional**, y actividades de apoyo al proyectista:
 - Manuales con ejemplos resueltos.
 - Actividades de difusión.
 - Cursos de actualización.
- **Generar información mediante proyectos de investigación para establecer:**
 - 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, etc.

Informe 2- Análisis de la metodología de ensayo y los requerimientos de la normativa europea de caracterización estructural de madera

El Informe 2, estudia la base de datos del Proyecto “Caracterización estructural de madera aserrada de pinos (*Pinus elliotii* y *P. taeda*) asociada a grados estructurales” recientemente finalizado y correspondiente a la producción actual de madera en Uruguay, con el fin de generar insumos para un **Anexo nacional**. El Informe presenta el análisis de la metodología empleada para obtener los valores de carga y flecha (deformación debida a flexión), y su concordancia con el cuerpo normativo europeo de caracterización de madera estructural. En el mismo se establecen coeficientes de corrección que se aplican en aquellos casos en que se observaron discrepancias. Los aspectos analizados incluyeron:

- Diferencia entre la medición de la flecha en el eje o en el canto de la viga con respecto a los apoyos de la viga sobre el canto.
- Relación entre la medición de la flecha con un extensómetro en una cara, o como valor medio del obtenido con dos extensómetros, ubicados cada uno en cada cara de la viga.
- Influencia de la elección de los tramos lineales del diagrama carga-deformación en la determinación del módulo de elasticidad.
- Análisis de las opciones de cálculo del módulo de elasticidad medio de la muestra.

Propuestas y recomendaciones del Informe 2

A efectos de ajustar la base de datos del proyecto “Caracterización estructural de madera aserrada de pinos (*Pinus elliotii* y *P. taeda*) asociada a grados estructurales” a los requisitos de la normativa europea, se propone:

- Aceptar dos formas de medición de la flecha para la determinación del módulo de elasticidad global: colocando un extensómetro en el canto inferior de la viga, o dos en el eje neutro, cada uno sobre cada cara de la viga.
- Aceptar solamente el valor medio del módulo de elasticidad pero no el característico, y asumir el error en la varianza, ya que los datos analizados corresponden al módulo de elasticidad obtenido a partir de mediciones con un único extensómetro ubicado en el eje neutro de la pieza y en una única cara.
- Aplicar coeficientes de corrección a los valores del módulo de elasticidad de aquellas probetas que no cuentan con registro en el tramo $0,2F_{m\acute{a}x}$ y $0,3F_{m\acute{a}x}$ del diagrama carga-deformación. Estos coeficientes se aplican solamente a las muestras del proyecto de referencia.
- Calcular el módulo de elasticidad medio de la muestra a partir del módulo de elasticidad local, considerando que el valor del módulo transversal es igual al módulo de elasticidad local sobre 16.

Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliotii/taeda* de procedencia uruguaya

El Informe 3 presenta una propuesta de calidad visual para la madera de pinos uruguayos con el fin de generar insumos para la discusión de una **Norma de acompañamiento nacional de clasificación visual de madera aserrada de pinos**. Para ello, la base de datos del Proyecto “Caracterización estructural de madera aserrada de pinos (*Pinus elliotii* y *P. taeda*) asociada a grados estructurales”, fue analizada de acuerdo a los lineamientos del cuerpo normativo europeo: las muestras de madera fueron asignadas a una calidad visual, estimados sus valores característicos, y en base a estos valores se propusieron criterios y forma de medición de singularidades, asignación a una calidad visual y su relación con las clases resistentes de la normativa europea.

Propuestas y recomendaciones del Informe 3

A partir del análisis de la base de datos del proyecto “Caracterización estructural de madera aserrada de pinos (*Pinus elliotii* y *P. taeda*) asociada a grados estructurales”, se propone:

- Los criterios de clasificación visual por resistencia para vigas de pino de procedencia uruguaya.
- El conjunto de singularidades para la propuesta de clasificación visual, incluyendo:
 - diámetro de nudo de cara y de canto
 - presencia de médula
 - desviación de la fibra
 - bolsas de resina y entrecasco
 - deformaciones
 - fendas
- Asignar las vigas de pino uruguayo a una calidad visual definida como “EC7”, que se corresponde con los valores de propiedades físicas (densidad característica) y mecánicas (resistencia característica y rigidez media, de flexión) de la clase resistente C14 de la norma europea EN 338.

Recomendaciones para futuros trabajos a partir de los Informes 2 y 3

- Realizar los ensayos físicos y mecánicos de las vigas de acuerdo a la normativa europea (EN 408) para obtener los valores característicos (EN 384) y asignar una clase resistente (EN 338), para evitar estimar coeficientes correctores y ajustar los valores a los establecidos en cuerpo normativo europeo.
- Ampliar la base de datos para la madera aserrada de pinos, con el fin de lograr mayor representatividad en la caracterización, en relación a su procedencia, dimensiones y calidad. Además se sugiere considerar y tener representada la edad de los árboles, ya que se vuelca al mercado en forma indiscriminada piezas provenientes de madera adulta (25 años o más) y provenientes de madera juvenil (15 años).
- En trabajos futuros, se sugiere incluir en **la clasificación visual de vigas de pino la medición del espesor del anillo de crecimiento**. Sería importante investigar si existe relación entre dicho espesor y el módulo de elasticidad, con el fin de identificar una variable visual predictora de la rigidez, la cual ha sido una de las limitantes de la calidad estructural de la madera en el proyecto de referencia.

Informe 4. Cálculo estructural con madera: propuesta de Anexo Nacional al Eurocódigo 5

Como se mencionó en el Informe 1, el equipo de investigación LATU-FING-ORT concluyó que para Uruguay, es recomendable adoptar las reglas de diseño y cálculo estructural del Eurocódigo 5, y realizar las modificaciones pertinentes para adaptarlo a las especificidades de la madera nacional.

El Informe 4, describe la organización y el alcance de la norma europea de cálculo estructural con madera, para la parte de edificación del Eurocódigo 5 (Parte 1 y 2), explica los documentos anexos, y propone los ítems denominados “Parámetros de Determinación Nacional” que suelen ser redactados atendiendo a las condiciones geográficas, climáticas y niveles de protección, a nivel nacional, regional o local. Estos parámetros, que propone sean publicados en el Anexo Nacional son los valores, clases o métodos alternativos que permiten escoger el nivel de seguridad requerido para Uruguay. En el Informe 4 no se analiza el Anexo Nacional relativo al proyecto de puentes de madera. Se entiende de suma relevancia que, a medida que se investigue en la materia, se agreguen las recomendaciones nacionales.

Propuestas y recomendaciones del Informe 4

Dada la inexistencia de una norma UNIT que establezca las reglas de diseño estructural en madera, se propone: i) adoptar el *Eurocódigo 5- Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para la edificación*, y el *Eurocódigo 5- Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-2: Reglas generales. Proyectos de estructuras sometidas al fuego*; y ii) redactar un **Anexo Nacional** complementario que contenga los parámetros de determinación nacional descritos en el Informe 4, y que se realicen las respectivas modificaciones pertinentes.

Para el Eurocódigo 5- parte 1-1, se propone:

- Los parámetros de determinación nacional, que el Eurocódigo 5- parte 1-1 permite modificar en función de la opción nacional y que se detallan a continuación:
 - Asignación de las cargas a las clases de duración de la carga.
 - Asignación de las estructuras a las clases de servicio.
 - Propuesta de coeficientes parciales de seguridad para las propiedades de la madera de Uruguay.
 - Ecuación recomendada para el cálculo de las vigas a dos aguas, vigas curvas y curvas a dos aguas.
 - Valores límite de las deformaciones.
 - Recomendaciones con respecto a las uniones y a la consideración de tendencia a la hienda de las especies de madera uruguaya.
 - Método de cálculo recomendado para los diafragmas de muro.
 - Factores de modificación de arriostramiento para vigas y sistemas de celosía.
 - Limitaciones de curvatura y desviaciones máximas para sistemas de cerchas con uniones de placas dentadas.
- El seguimiento de los Anexos Informativos presentados como Anexos en el Eurocódigo 5- parte 1-1.
- Incluir la siguiente información complementaria no contradictoria al Eurocódigo 5- parte 1-1:

- Normas uruguayas de aplicación y conversión de la velocidad característica del viento de la norma uruguaya UNIT 50 a la velocidad básica del viento definida en la parte relativa al viento del Eurocódigo 1.
- Combinaciones de acciones para las estructuras de madera para los estados límite últimos y estados límite de servicio.
- Definiciones para el cálculo de flechas de vigas de madera
- Definiciones para el cálculo de desplazamientos horizontales

Para el Eurocódigo 5- parte 1-2, se recomienda considerar:

- Los parámetros de determinación nacional que se detallan a continuación:
 - Valores recomendados de temperatura máxima alcanzada para la función de separación en exposición al fuego paramétrico.
 - Un valor de 1,00 para el coeficiente parcial de las propiedades del material en situación de incendio.
 - Un valor de 0,6 para el coeficiente de reducción para las combinaciones de acciones, excepto para las zonas de almacenamiento donde se tomará un valor de 0,7.
 - Los dos métodos admitidos para la determinación de las propiedades de la sección transversal: el método de la sección reducida y el método de las propiedades reducidas.
- La siguiente información complementaria no contradictoria al Eurocódigo 5-parte 1-2:
 - Diferencia entre la reacción al fuego y la resistencia al fuego
 - Resistencia al fuego de los elementos principales de la estructura
 - Valores de cálculo de las velocidades de carbonización de la madera
 - Combinación de acciones en situación de incendio y valor de cálculo de las resistencias
- Generar investigación con el fin de completar el Anexo Nacional uruguayo, para determinar:
 - Coeficientes de aplastamiento de las maderas uruguayas para el cálculo de uniones.
 - Velocidad de carbonización de las especies de maderas uruguayas
 - Propiedades físicas y mecánicas de la madera aserrada de las especies que faltan y de los productos de ingeniería de la madera uruguaya y presentar los valores característicos en el marco de una norma UNIT.

Conclusiones

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. El desarrollo y 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 (sector industrial forestal maderero, industria de la construcción, institutos de investigación, academia, asociaciones de profesionales y de técnicos, etc). Los pasos para el establecimiento de las normas para madera involucrarán no solo el trabajo dentro de un comité UNIT, sino el que aporten las instituciones y laboratorios que realizan investigación científica y que generan las especificaciones técnicas de los productos de madera. Finalmente, es sumamente importante que el cuerpo normativo para madera estructural se desarrolle en forma

coordinada con las normativas para otros materiales estructurales, teniendo en consideración las bases de cálculo, las normas de acciones, las normas de ensayos, etc, y de acuerdo a los avances de la normativa internacional.

Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera. Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional

PROYECTO: DOCUMENTOS TÉCNICOS BASE PARA LA NORMALIZACIÓN DE ESTRUCTURAS Y CONSTRUCCIÓN CON MADERA

TABLA DE CONTENIDOS

0. Resumen.....	I-1
1. Introducción.....	I-2
2. Diseño estructural en madera. Estado del arte.....	I-9
2.1. Estados Unidos.....	I-9
2.2. Argentina.....	I-14
2.3. Chile.....	I-18
2.4. Europa.....	I-21
2.5. España.....	I-28
2.6. Brasil.....	I-28
3. Evaluación de la situación en Uruguay.....	I-34
3.1. Sector forestal y maderero.....	I-34
3.2. Propuesta de plan para el desarrollo de la tecnología de construcción con madera...I-35	
3.3. Normativa en Uruguay.....	I-35
3.4. Caracterización de madera y productos de ingeniería de madera.....	I-38
4. Hacia la generación de un cuerpo normativo para la madera estructural en Uruguay.....	I-41
4.1. Talleres con expertos en normas de cálculo estructural.....	I-41
4.2. Conclusiones y recomendaciones.....	I-41
5. Bibliografía.....	I-44
Anexos.....	I-50
A1. Conferencias sobre normativa de estructuras de madera.....	I-50
A2. Detalle de la agenda de los talleres de trabajo.....	I-53

0. RESUMEN

El presente informe 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.

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 coexisten 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 límites, 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.

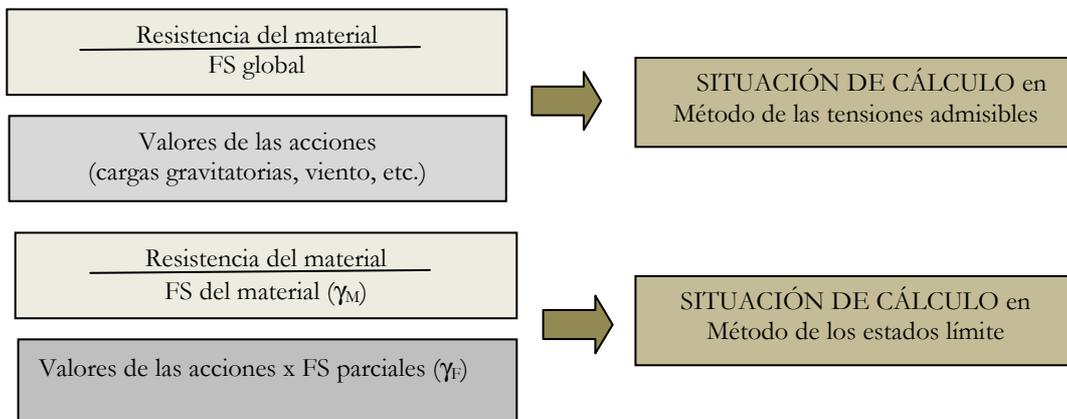


Figura 1.1. Situación de cálculo en el método de las tensiones admisibles y en el de los estados límite (adaptado de Arriaga, 1998)

**Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional**

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.

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 fibra	99	2,33	1,40	95	1,645	1,90	2,10
Compresión ⊥ fibra	97,5	1,96	1,20	95	1,645	1,67	1,67
Cortante 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

² ASTM D 245

Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional

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.

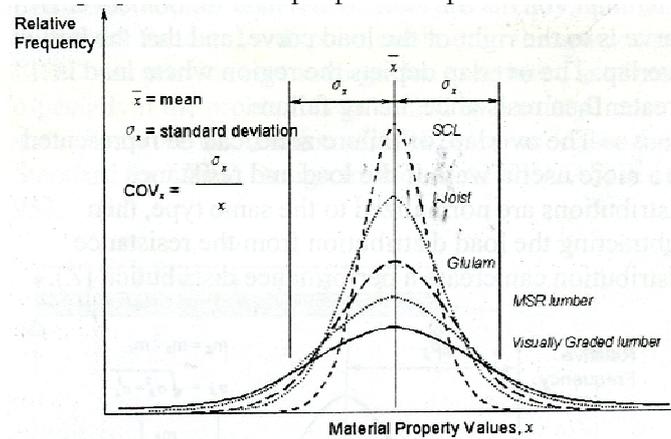


Figura 1.2. Representación de la variabilidad de una propiedad estructural para varios productos de madera (Adaptado de Taylor, 2001)

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 partir de la década de 1970 (Jessom, 1971; Madsen, 1975, 1978) e incluidos en códigos y normativas norteamericanas (CSA, 1975; ASTM, 1979).

Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera. Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional

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 límite.

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 (Fuente: Wagner, 2015); 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.

Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional

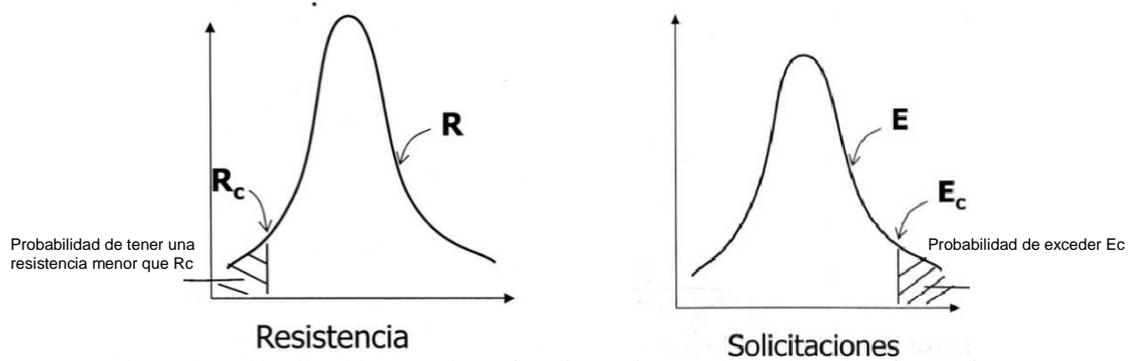


Figura 1.4. Distribución gaussiana de valores de a) resistencias y b) efectos de cargas

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.

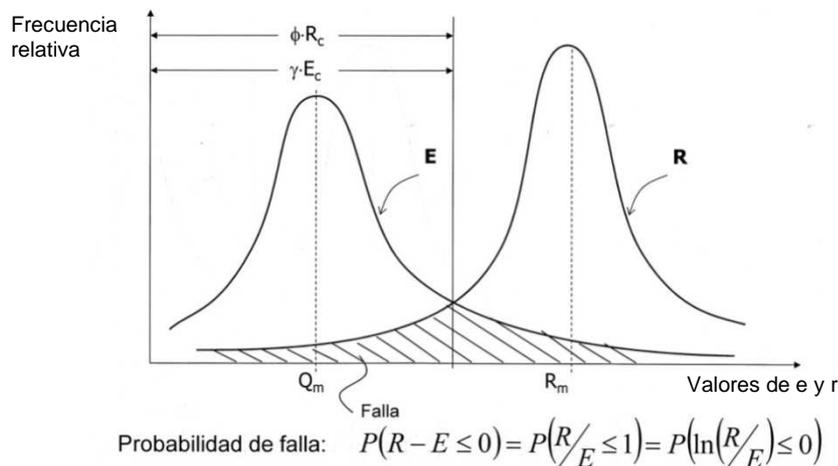


Figura 1.5. Representación conjunta de las curvas de distribución del efecto de las cargas (E) y resistencias (R) (extraído de Herrera, 2007)

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).

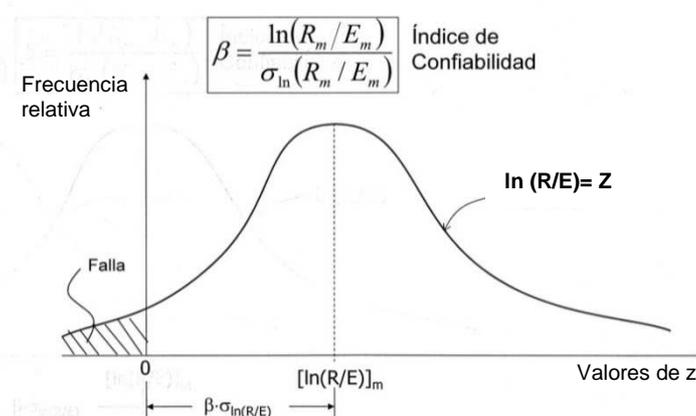


Figura 1.6. Distribución de desempeño (extraído de Herrera, 2007)

Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional

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 ente 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:

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

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

R...resistencia nominal (o resistencia de diseño), usualmente

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

┌ β ─┐

corresponde

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.

Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional

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 factoradas (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
$F_{c\perp}' = F_{c\perp}$	-	-	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.

Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional

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 tablas en el Suplemento “Design values for wood construction” de la NDS (AF&PA, 2005). Estas tablas 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	T 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 _d (psi)	F _c (psi)	F _{c⊥} (psi)	F _c (psi)	E (psi)	E _{min} (psi)
Selecto	2"x4"	2050	1200	175	565	1800	1600000	580000
Nº1		1450	875	175	565	1650	1500000	550000
Nº2		1300	775	175	565	1650	1400000	510000
Nº3 y pie derecho		750	450	175	565	950	1200000	440000
Selecto	5"-6" de ancho	1850	1100	175	565	1700	1600000	580000
Nº1		1300	750	175	565	1550	1500000	550000
Nº2		1150	675	175	565	1550	1400000	510000
Nº3 y pie derecho		675	400	175	565	875	1200000	440000
Selecto	8" de ancho	1750	1000	175	565	1600	1600000	580000
Nº1		1200	700	175	565	1450	1500000	550000
Nº2		1050	625	175	565	1450	1400000	510000
Nº3 y pie derecho		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 tablas, 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). Estas tablas 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.

Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional

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 _∥ (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 esta 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 en 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, espaciamiento 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 espaciamiento reducido, etc.

iii) incorporaciones de interés

Deformaciones

- Cálculo de las deformaciones diferidas

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

Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional

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>	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 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 :

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

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_L (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

Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera. Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional

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

Hasta avanzado el siglo XX Chile ignoró la madera como material estructural. En 1977 se publica 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 significativo 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 publica en 1991, y cuenta con la participación del INFOR y las Facultadas de Ingeniería Civil e Ingeniería Forestal de la U de Chile. La norma compila contenidos de la norma alemana DIN 1052 (1967), la estadounidense NDS for Wood Construction (1986) y resultados de investigaciones locales desarrolladas en las décadas de 1970 y 1980. Interesa destacar la participación de la industria maderera que por primera vez se compromete con el emprendimiento y aporta 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 se publican 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) incluye los grados mecánicos de Pinos radiata y actualiza 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.

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

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

K_Hfactor de modificación por contenido de humedad

K_Dfactor de modificación por duración de la carga

K_Hfactor de modificación por contenido de humedad

K_Cfactor de modificación por trabajo conjunto

K_{hf}factor de modificación por altura

$K_{\lambda v}$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 tablas independientes: i) una tabla 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) otra tabla 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.

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

**Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional**

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. 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	Compresión paralela a la fibra	Tracción paralela a la fibra	Compresión perpendicular a la fibra	Cizalle		
	F_b (MPa)	$F_{c }$ (MPa)	$F_{t }$ (MPa)	$F_{c\perp}$ (MPa)	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 basa 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.

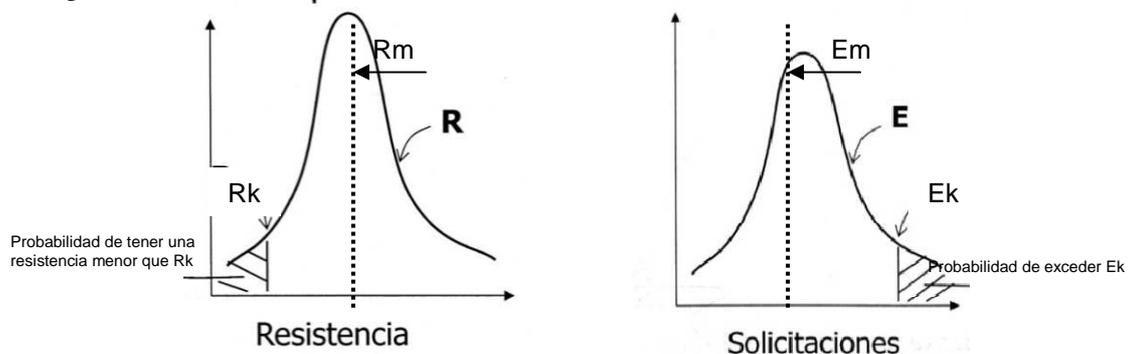


Figura 2.4.1. Distribución gaussiana de valores de a) resistencias y b) efectos de cargas

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:

Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional

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 prescrito 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:

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

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

Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional

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:

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

- 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:

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

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 (2000) 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_F . 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.

Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional

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 supone 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, wl cual es excedido el 5 por ciento del tiempo
- valor cuasi-permanente el cual se relaciona con valor medio del tiempo

Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional

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 sólo 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):

$$X_d = k_{mod} \times \frac{X_k}{\gamma_M} \tag{4.4.11}$$

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

**Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional**

- 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 prEN 338 (2012) 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 prEN 338 (2012) distingue 12 clases resistentes de madera aserrada de coníferas (C), 14 de madera aserrada de

Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional

frondosas (D), y 11 de tablas de madera de coníferas (I). *Por ejemplo, una clase resistente C14 se corresponde a un elemento de madera de conífera con una resistencia característica a flexión de 14 N/mm².* A efectos ilustrativos, la Tabla 4.4.3 muestra las clases resistentes para madera de coníferas.

Tabla 4.4.3. Clases resistentes para madera aserrada de coníferas y álamos (adaptado de EN 388, 2010)

Propiedad	Símbolo	Clase resistente de madera aserrada de coníferas y álamos								
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35
Flexión*	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35
Tracción *	$f_{t0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21
Compresión *	$f_{c0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25
MOE (valor medio)*	$E_{0, medio}$	7.000	8.000	9.000	9.500	10.000	11.000	11.500	12.000	13.000
MOE (5to. Percentil)*	$E_{0,05}$	4.700	5.400	6.000	6.400	6.700	7.400	7.700	8.000	8.700
Densidad (valor medio)*	ρ_{medio}	350	370	380	390	410	420	450	460	480
Densidad (5to percentil)*	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400

* Valores en N/mm²

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 coníferas y álamos de configuración homogénea.

Tabla 4.4.4. Clases resistentes para madera laminada encolada, configuración homogénea EN 338 (EN, 2010)

Propiedad	Símbolo	Clase resistente de madera laminada encolada							
		GL 20h	GL 22h	GL 24h	GL 26h	GL 28h	GL 30h	GL 32h	
Resistencia a flexión	$f_{m,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32	
Resistencia a tracción	$f_{t0,g,k}$	16	17,6	19,2	20,8	22,3	24	25,6	
Resistencia a compresión	$f_{c30,g,k}$	0,5							
	$f_{c0,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32	
Resistencia a esfuerzo cortante (cortadura y torsión)	$f_{c30,g,k}$	2,5							
	$f_{t,g,k}$	3,5							
Resistencia al cortante de rodadura	$f_{r,g,k}$	1,2							
Módulo de elasticidad	$E_{0,glulam}$	8 400	10 500	11 500	12 100	12 600	13 600	14 200	
	$E_{0,05}$	7 000	8 800	9 600	10 100	10 500	11 300	11 800	
	$E_{90,glulam}$	300							
	$E_{90,05}$	250							
Módulo de elasticidad transversal	G_{glulam}	650							
	$G_{g,05}$	540							
Módulo de cortante de rodadura	$G_{r,glulam}$	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.

UNE-EN 1995-1-2:2011. Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas al fuego.

UNE-EN 1995-2:2010. Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 2: Puentes.

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) desplaza al método de las tensiones admisibles por el de los estados límite, utilizando para ello 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

Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional

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 prescrito 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

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

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

**Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional**

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

Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional

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:

$$k_{mod} = k_{mod1} \times k_{mod2} \times k_{mod3} \quad (2.6.10)$$

Los coeficientes k_{mod1} para madera aserrada, madera laminada, contrachapados y madera reconstituida se indican en la Tabla 2.6.3.

Tabla 2.6.3 Valores de k_{mod1} . 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_{mod2} 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_{mod2} . 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_{mod3} 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_{mod3} 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.

Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional

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/m³)
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/m³)
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

**Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional**

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

**Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional**

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)

Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera. Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional

- 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

Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional

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	Nº rep	$E_{m,g}^3$ [MPa]	$E_{m,l}^3$ [MPa]	f_m^3 [MPa]	f_{mk}^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

**Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional**

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	Nº rep	f_{b0}^3 [MPa]	$f_{b0,k}^4$ [MPa]	Nº 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 (*Pinus elliottii* y *P. taeda*) uruguayos, que se recogen en el Informe 3 (DNI, 2015). ***Estos criterios junto con el Informe 3 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, porque 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 apta para uso 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 tres 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 realizó una serie de jornadas técnicas (Montevideo, 1- 4/9/14) estructuradas como talleres de trabajo en los que participaron el equipo de investigación 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

Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera. Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional

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

**Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional**

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 elliottii* 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 elliottii* 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

ABNT (1997). NBR 7190. Projeto de estruturas de madeira. Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT, Río de Janeiro

ABNT (2010). NBR 7190. Projeto de estruturas de madeira. Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT, Río de Janeiro

ACI 318 (1977). Building code requirements for structural concrete. American Concrete Institute.

AISC 360 (1986). Specification for structural steel building. American Institute of Steel Construction.

AF&PA-NDS (2005). National Design Specification (NDS) for Wood Construction. American Forest & Paper Association. Washington DC.

ANSI/ASCE 7-10 (2010). Minimum Design Loads for Building and Other Structures. American Society of Civil Engineers.

ftp://ftp.consrv.ca.gov/pub/oil/SB4DEIR/docs/GEO_ASCE_2010.pdf. Último acceso: 20/06/2015

Arriaga, F. (1985). Consideraciones sobre las normas para el cálculo de estructuras de madera. Boletín de la Sociedad española de cerámica y vidrio.

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. 719 pp.

Arriaga, F. ; Blasco, R. (2007). Estructuras de madera (Jornadas de introducción).

http://arquitectosdecadiz.com/uploads/Actividades_Agenda_Mensual/documentacion_es_estructuras_madera.pdf. Último acceso: 20/05/2015

ASTM (1979). Annual book of ASTM standards. Philadelphia, PA. American Society for Testing and Materials.

ASTM D 143-09 (2011). Standard test methods for small clear specimens of timber. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

ASTM D 198-09 (2011). Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

ASTM D 245-06 (2011). Standard Practice for establishing structural grades and related allowable properties for visually graded lumber. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

**Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional**

ASTM D 1990-07 (2011). Standard Practice for establishing allowable properties for visually graded lumber from in-grade tests of full-size specimens. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA

ASTM D 2555-06 (2011). Standard practice for establishing clear wood strength values. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

ASTM D 4761-05 (2011). Standard test methods for mechanical properties of lumber and wood-base structural material. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

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. ISSN 1688-7506.

<https://www.ort.edu.uy/farq/pdf/documentodeinvestigacion4.pdf>

Baño, V.; Moya, L. (2015). Tecnología de la construcción con madera en Uruguay. Estado del arte y perspectivas. II CBCTEM. Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira. Belo Horizonte, Brasil. Caderno de Resumos, ISBN: 2447-102X

Breyer, D.E.; Fridley, K.J.; Cobeen, K.E.; Pollock, D.G. (2007). Design of wood structures. ASD/LRFD. 6th Ed. McGraw-Hill, New York.

BS 5268. British Standard. Part 3. British Standards Institution, London.

Calil Jr, C. (2008). South America timber structures code. Proceedings of the 51st International Convention of Society of Wood Science and Technology. November 10-12, 2008 Concepción, Chile

Canadian Wood Council (1975). Determination of allowable stresses for Canadian lumber in Canada. CSA-086

CTE-DB-SE-M (2009). Código Técnico de la Edificación. Documento Básico. Seguridad Estructural: Madera. Ministerio de Fomento, Madrid

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

EN 338 (2010). Structural timber-strength classes. Comité Europeo de Normalización. CEN, Bruselas.

prEN 338 (2012). Structural timber-strength classes. Comité Europeo de Normalización. CEN, Bruselas.

Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional

EN 1990 (2003). Eurocódigo 0- Bases de cálculo de estructuras. Comité Europeo de Normalización CEN, Bruselas.

EN 1991 (2004). Eurocódigo 1-Bases de proyecto y acciones sobre las estructuras. Comité Europeo de Normalización CEN, Bruselas.

EN 1995-1-1 (2006/A2:2015). Eurocódigo 5-Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para la edificación. Comité Europeo de Normalización CEN, Bruselas

EN 1995-1-2 (2011). Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-2: Reglas generales. Proyectos de estructuras sometidas al fuego. Comité Europeo de Normalización CEN, Bruselas

EN 1995-2 (2010). Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 2: Puentes. Comité Europeo de Normalización CEN, Bruselas

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

Fondo Industrial (2015). Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliottii*/taeda. Informe 3. Proyecto “Documentos técnicos base para la normalización de estructuras y construcción con madera”. Dirección Nacional de Industrias. Ministerio de Industria, Energía y Minería. 41 pp

Fondo María Viñas (2009). Proyecto “Caracterización estructural de madera aserrada de pinos (*P. elliottii* y *P. taeda*) asociada a grados estructurales”. Agencia Nacional de Investigación e Innovación. PR FMV 2009_1_2772

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”. Agencia Nacional de Investigación e Innovación. FSA_1_2013_1_12897

Herrera, R (2007). Métodos de diseño. Alacero. <http://> Último acceso: 15/07/2015

INN (1988). NCh 1970/1. Maderas. Parte 1. Especies latifoliadas – Clasificación visual para uso estructural. Especificaciones de los grados de calidad. Instituto Nacional de Normalización INN, Santiago

INN (1988). NCh 1970/2. Maderas. Parte 2. Especies coníferas. Clasificación visual para uso estructural. Especificaciones de los grados de calidad. Instituto Nacional de Normalización INN, Santiago

INN (1986). NCh 1989. Maderas. Agrupamiento de especies madereras según su resistencia. Procedimiento. Instituto Nacional de Normalización INN, Santiago

INN (1986). NCh 1990. Madera. Tensiones admisibles para madera estructural. Instituto Nacional de Normalización INN, Santiago

**Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional**

INN (1989). NCh 2148. Madera laminada encolada estructural. Requisitos e inspección. Instituto Nacional de Normalización INN, Santiago

INN (1991). NCh 2150. Madera laminada encolada. Clasificación mecánica y visual de madera aserrada de pino radiata. Instituto Nacional de Normalización INN, Santiago

INN (1991). NCh 2165. Tensiones admisibles para la madera laminada encolada estructural de pino radiata. Instituto Nacional de Normalización INN, Santiago

INN (2006). NCh 1198. Madera. Construcciones en madera. Cálculo. Instituto Nacional de Normalización INN, Santiago

INN (2005). NCh 1207. Pino radiata. Clasificación visual para uso estructural. Especificaciones de los grados de calidad. Instituto Nacional de Normalización INN, Santiago

INN (2005). NCh 1207. Pino radiata. Clasificación visual para uso estructural. Especificaciones de los grados de calidad. Instituto Nacional de Normalización INN, Santiago

INTI (2013). CIRSOC 601. Reglamento argentino de estructuras de Madera. Instituto Nacional de Tecnología Industrial INTI, Buenos Aires

Jessom, A. (1971). The bending strength in structural sizes of lumber. Canadian Forestry Service, Publication N° 1305, Dept. of the Environment

Jiménez Montoya, P.; García Meseguer, A.; Morán Cabré, F.; Arroyo Portero, J.C. (2010). Hormigón armado. 15a Ed. Gustavo Gili, Barcelona. 630 pp

Larsen, H.J. (1995). Limit state design and safety format - In Timber Engineering STEP 1, pp. A2/1-A2/8. Centrum Hout, The Netherlands

Kam-Biron, M. (2012). National Design Specification for Wood Construction. American Wood Council. 2012 webinar

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 Prod J. 28(4): 42-50

Madsen, B. (1992). Structural behaviour of timber. Timber Engineering Ltd. 437 pp

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

**Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional**

MIEM (2012). Plan Sectorial Forestal-Madera. Ministerio de Industria, Energía y Minería http://www.planes industriales_fase i-nov2012-parte2.pdf.(último acceso: noviembre 2015)

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 Prod J* 63(3-4): 128-137

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

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, Uruguay

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, Uruguay

MTOP (2006). Memoria constructiva general para edificios públicos. Dirección Nacional de Arquitectura. Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Montevideo, Uruguay

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. 42 pp

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. 47 pp

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. 48 pp

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

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

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

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

**Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional**

Pérez Favaro, A., de Castro, R. ; Ohta, S. (2000). Ensayos de propiedades mecánicas de Pinus taeda por seis métodos no destructivos. Informe de Investigación N° 1, LATU-JICA, Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo

Pérez del Castillo, A.; Venturino, A. (2003). Resumen de propiedades mecánicas de Eucalyptus grandis, Pinus elliotii y Pinus taeda de distintas zonas del Uruguay. Informe de Investigación N°14. LATU

Pérez del Castillo, A.; Venturino, A. (2003). Inspección visual de tablas de tamaño real de Eucalyptus grandis, Pinus elliotii y Pinus taeda de diferentes sitios del Uruguay. Informe de Investigación N°15. LATU

Piter, J.C. (2014). El Reglamento CIRSOC 601(2013). Conferencias sobre normativa de estructuras de madera. Facultad de Arquitectura, Universidad ORT Uruguay. Montevideo, 01/09/2014.

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. <http://www.awc.org/pdf/codes-standards/publications/archives/lrfd/AWC-DesigningWithLRFD-0107.pdf>. Último acceso: 18/06/2015

Sexsmith, R.G.; Fox, S.P. (1978). Limit states design Concepts for timber engineering. Forest Prod. J. 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 Sci Technol (2009) 43:259–278

Wagner, M. (2014). Norma chilena NCh 1198. Construcciones en Madera - Cálculo. Conferencias sobre normativa de estructuras de madera. Facultad de Arquitectura, Universidad ORT Uruguay. Montevideo, 01/09/2014.

http://fa.ort.edu.uy/innovaportal/file/20928/1/conferencia_4-chile.pdf

Wagner, M. (2015). Comunicación personal

WoodWorks. Wood Products Council.

<http://www.woodworks.org/wp-content/uploads/2013-02-webinar-MKB-NDS1.pdf>

ANEXOS

A1. Conferencias sobre normativa de estructuras de madera

En el marco del proyecto “Documentos técnicos base para la normalización de estructuras y construcciones con madera”, el lunes 1/9/14 entre las 8 y 13 h se realizó una Jornada técnica y de difusión sobre normativa de estructuras de madera en el Auditorio de la Universidad ORT Uruguay. En la misma se dictaron cinco conferencias a cargo de expertos locales y del exterior. A continuación se describe el perfil de los invitados y el enlace de las respectivas conferencias:

Dr. Juan Carlos Piter (Argentina). Graduado en Ingeniería en construcciones por la Universidad Tecnológica Nacional (1977), Magister en Ingeniería en Calidad por la Universidad Tecnológica Nacional (2000) y Doctor en Ingeniería por la Universidad Nacional de La Plata (2003). Actualmente es Profesor titular en la Facultad Regional de Concepción del Uruguay de la Universidad Tecnológica Nacional donde dicta cursos de grado y de posgrado, dirige de tesis de posgrado y de proyectos finales de grado. Es el Director del Grupo de Estudios de Madera (GEMA), Argentina, que realiza investigaciones orientadas a la normalización y optimización del uso estructural de maderas de la región. Se desempeña como Coordinador de la Comisión permanente de estructuras de madera de INTI-CIRSOC, y fue el responsable y conductor del proceso de redacción y revisión del primer Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601. Es miembro de la Comisión de Madera Estructural en el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), desde 2005. Es miembro de la Comisión permanente para el Estudio de las Estructuras de Acero DE INTI, desde 1991. Cuenta con vasta experiencia en el ejercicio de la profesión en el ámbito no académico, realizando proyectos, cálculos estructurales y construcción de edificaciones. Su producción científica incluye más de veinticinco trabajos publicado en revistas arbitradas. Es coautor de más de cuarenta trabajos presentados y publicados en eventos científicos y tecnológicos. Es autor principal del “Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601. Reglamento nacional de diseño estructural” y del “Manual de aplicación de los criterios de diseño adoptados por el Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601”.

Título de la conferencia: El Reglamento CIRSOC 601(2013). Disponible en:

http://fa.ort.edu.uy/innovaportal/v/20924/8/fa.ort.front/normativa_de_estructuras_de_madera_-_presentaciones.html

Dr. Carlito Calil Junior (Brasil). Graduado en Ingeniería civil por la Escuela de Ingeniería de Piracicaba (1975), Máster en Ingeniería de Estructuras por la Universidad de São Paulo (1978) y Doctor en Ingeniería Industrial por la Universidad Politécnica de Catalunya (1982). Realizó pos-doctorado en la Universidad de Karlsruhe, Alemania y en el Laboratorio de Productos Forestales de Madison, Estados Unidos. Actualmente es Profesor Titular en la Escuela de Ingeniería de São Carlos de la Universidad de São Paulo. Tiene vasta experiencia en el área de Ingeniería civil estructural, especialmente en: silos, puentes de madera, estructuras de madera y pretensadas. Ha participado en la elaboración de norma brasileñas, especialmente en normas de madera, silos, acciones, viento y puentes. Es Director del Laboratorio de Maderas y de Estructuras de Madera (LaMEM), Coordinador de la Comisión de Estudios CE 02:126.10 de la Asociación Brasileña de Normas Técnicas ABNT y Presidente del Instituto Brasileño de Madera y de Estructuras de Madera. Es representante de Brasil en la International Association of Wood

**Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional**

Products Societies (IAWPS) Japón, en la International Association for Bridge and Structural Engineering EEUU y en la Comissão Ibero-Latinoamericano da madeira na construção.

Título de la conferencia: Norma NBR 7189/97 y PNBR 7190. Disponible en:

http://fa.ort.edu.uy/innovaportal/v/20924/8/fa.ort.front/normativa_de_estructuras_de_madera_-_presentaciones.html

Ing. Mario Wagner Muñoz (Chile). Graduado en Ingeniería civil por la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile (1974). Su actividad profesional abarca la investigación, docencia y ejercicio profesional. Entre los años 1972 a 1987 se desempeñó como investigador en el Dpto. de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Evaluador de proyectos de Investigación presentados en convocatorias del Fondo de Tecnología, FONTEC. Integrante del Comité Editorial de la “Revista de Construcción” publicada por el Dpto. de Construcción de la Escuela de Ingeniería de la Universidad Católica. Actualmente se desempeña como docente de la Universidad de Chile, y docente del curso “Diseño y cálculo de estructuras de madera” en el Magister en Diseño y Construcción en Madera de la Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño de la Universidad del Bío-Bío, Chile. Además ha dictado cursos y conferencias en varias universidades chilenas, y universidades extranjeras entre ellas, la Universidad Pontificia Bolivariana de Colombia, la Universidad de la República de Uruguay, Universidad de Ciencias Aplicadas Neubrandenburg de la ex RFA, profesor invitado en los cursos Holzbau I, II y III, etc. Ha dirigido más de 30 memorias de titulación de la carrera de Ingeniería Civil, así como tesis de maestría.

Ha publicado varios Informes técnicos y Publicaciones docentes, destacándose: i) Proyecto de definición y caracterización mecánica de grados estructurales para madera aserrada de pino radiata; ii) Clasificación de la madera estructural de pino radiata; iii) Normativa chilena relativa al cálculo de construcciones de madera laminada encolada; iv) El método aditivo de componentes para el cálculo y verificación de resistencia al fuego de entramados de paredes, pisos y techos; etc. Cuenta con una veintena de publicaciones sobre madera y productos de madera en revistas técnicas y boletines de difusión. Es coautor del Manual de Interpretación de la Norma Japonesa para la fabricación de madera laminada estructural del Instituto Forestal, y del Informe Técnico Ejemplos de cálculo estructural en madera, del Instituto Forestal. Ha desarrollado las Tablas de predimensionado de componentes estructurales del Manual de Ingeniería y Construcción en Madera de la empresa Arauco.

Cuenta con vasta experiencia en el ejercicio de la profesión en el ámbito no académico, habiendo sido Gerente de Proyectos de la Corporación Chilena de la Madera (1987-1992), y de la empresa TRADEMA de madera laminada encolada (1992-1998), y Consultor de la Fundación Chile, entre otros. Desde 1999 a la fecha se desempeña como Gerente técnico de la empresa INGE-WAG Servicios de Ingeniería. Desde el año 1983 integra el comité de normalización “Maderas” del Instituto Nacional de Normalización, donde ha participado, entre otros, en la redacción de la Norma NCh1198- 2006 Construcciones en madera. Cálculo.

Título de la conferencia: Norma chilena NCh 1198. Disponible en:

http://fa.ort.edu.uy/innovaportal/v/20924/8/fa.ort.front/normativa_de_estructuras_de_madera_-_presentaciones.html

Dr. Francisco Arriaga (España). Arquitecto (1982) y Dr. en Arquitectura (1987). Actualmente es Catedrático y Profesor de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de

**Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional**

Montes de la Universidad Politécnica de Madrid, donde dicta las asignaturas “Cálculo de estructuras I” y “Cálculo de estructuras II”. Tiene vasta experiencia en el área de estructuras de madera. Su experiencia incluye el ejercicio profesional en varias empresas, destacándose su trabajo en la Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho (AITIM) entre los años 1988 y 2001. Entre los años 1994 y 2008 se ha desempeñado como investigador principal en varios proyectos de investigación, es coautor de 17 artículos publicados en revistas científicas del JCR, ha presentado 40 trabajos en Congresos científicos. Es coautor de 17 libros. Actualmente es Investigador principal del Grupo de Investigación “Construcción con Madera”. Cuenta con amplia experiencia docente en España y en el exterior: imparte los cursos “Cálculo de estructuras I” y “Cálculo de estructuras II” en la U Politécnica de Madrid, y el curso “Diseño y cálculo de estructuras de madera” en el Magister en Diseño y Construcción en Madera de la Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño de la Universidad del Bío-Bío, Chile. Ha dirigido más de 60 Proyectos fin de carrera y varias tesis de doctorado.

Se desempeña como Secretario de los Subcomité 6 Estructuras de Madera del CTN 56 de Madera y Corcho de AENOR, y Subcomité 5 Estructuras de Madera del CTN 140 Eurocódigos de AENOR. Es delegado español en el CEN TC 124 Timber Structures con participación en Grupos de Trabajo 2 y 3. Delegado español en el CEN TC 250 Eurocodes en el SC 5 Timber Structures. Fue Miembro del Comité de Gestión de la Cost Action E5 “Timber frame building systems” (1996-2000). Participó en redes para Proyectos Alfa, financiados por la CE, sobre i) la tecnología de puentes de madera, (2002-2003) y ii) sistemas constructivos en madera para viviendas de bajo costo (2005-2006).

Título de la conferencia: Normativa de cálculo de estructuras de madera en España (Eurocódigo 5- CTE). Disponible en:

http://fa.ort.edu.uy/innovaportal/v/20924/8/fa.ort.front/normativa_de_estructuras_de_madera_-_presentaciones.html

Ing. Martín Reina (Uruguay). Graduado en Ingeniería Civil opción Estructural por la Universidad de la República en el año 2007. A partir del año 2008 y hasta agosto de este año, se desempeñó como docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, en el curso de grado Hormigón Pretensado y Mampostería Estructural. Desde 2013 es socio/director de RDA Ingeniería, empresa especializada en el desarrollo de proyectos de cálculo de estructuras de arquitectura e ingeniería civil. Cuenta con vasta experiencia en el ejercicio de la profesión en el ámbito no académico, tanto nacional como internacional. Desde el año 2013 es el Presidente de la Sociedad de Ingenieros Estructurales (SIE) de la Asociación de Ingenieros del Uruguay. La Comisión Directiva de la SIE ha declarado el tema de normativa estructural como uno de los fundamentales a tratar en el corriente año debido a su importancia para el ejercicio de la profesión y las falencias que existen al respecto. Conociendo este interés, y la vocación de la SIE de crear ámbitos de difusión y discusión que colaboren a concientizar a colegas y a la sociedad en su conjunto sobre la necesidad de atender este tema, es que hemos invitado al Ing. Martín Reina a disertar sobre el estado del arte de la normativa estructural en Uruguay.

Título de la conferencia: Estado del arte de la normativa para cálculo estructural en Uruguay. Disponible en:

http://fa.ort.edu.uy/innovaportal/v/20924/8/fa.ort.front/normativa_de_estructuras_de_madera_-_presentaciones.html

A2. Detalle de la agenda de los talleres de trabajo

2.1. Jornada 1- Estado del arte en Uruguay (lunes 1/9/14- 14 a 18 h)

La primera jornada se focalizó en presentar a los expertos invitados el estado de avance en relación al conocimiento de las propiedades estructurales de las maderas cultivadas en Uruguay, y de los productos de ingeniería de madera, insumos básicos para la norma de cálculo de estructuras. Tres presentaciones a cargo del equipo investigador:

- “Caracterización estructural de madera aserrada de pinos asociadas a grados estructurales”- Síntesis de resultados del Proyecto Fondo María Viñas ejecutado por ORT y LATU entre 2011 y 2013, sobre madera proveniente de plantaciones de 25 años de Paysandú y de 15 años de San José.

Ponente: Laura Moya

- Resultados de propiedades de flexión, tracción y compresión paralela a la fibra de vigas 2” x 6”. Asignación a grados visuales estructurales de acuerdo a las normas Chilena y europea.
 - Resultados de propiedades físicas y mecánicas de cuerpos de prueba de pequeñas dimensiones y libres de defectos.
- “Avances en Uruguay. Caracterización de pinos y eucaliptos. Clasificación visual”- Resumen de resultados de proyectos realizados por LATU en asociación con varias instituciones desde mediados de la década del 90 hasta la actualidad, sobre muestreos de pinos y eucaliptos de las principales regiones de concentración de plantaciones.

Ponente: Andrea Cardoso

- Resultados de propiedades de flexión y densidad de vigas 2”x 6” extraídas de árboles de: *Pinus elliottii* de 43 años de San José, y de 24 años de Río Negro y Rivera; *P.taeda* de 12 años de Paysandú y Tacuarembó, de 17 años de Rivera, y de 24 años de Río Negro y Rivera.
 - Resultados de propiedades de flexión y densidad de vigas 2”x 6” extraídas de árboles de *Eucalyptus grandis* de 9 años de Paysandú, de 9, 12, 16 y 18 años de Rivera, de 18 años de Río Negro y Tacuarembó, y de 26 años de Durazno.
 - Adicionalmente se presentaron resultados de estudios de factibilidad del uso de maderas de pinos y eucalipto provenientes de raleos comerciales para la producción de madera microlaminada (LVL) y madera laminada y encolada.
- “Vigas de madera laminada encolada en Uruguay”- Resultados de estudios realizados por el Instituto de Estructuras y Transporte de la Facultad de Ingeniería UdelaR sobre vigas de madera laminada encolada de *Eucalyptus grandis*.

Ponente: Vanesa Baño

- Resultados de ensayos de control de calidad estructural y estimación de propiedades mecánicas de vigas de madera laminada encolada fabricadas con madera de *Eucalyptus grandis* y adhesivos PVA o EPI.
- Estudio de fallo de vigas de madera laminada encolada fabricadas con madera de pino impregnado CCA y adhesivo de resorcinol, tras 10 años de puesta en servicio.

2.2. Jornada 2- Madera aserrada estructural. Caracterización y clasificación por resistencia (martes 2/9/14- 9 a 13 h)

Contenidos:

- Presentación de las normas
- Criterios de caracterización y soporte estadístico
- Peculiaridades de las especies
- Singularidades que más penalizó la calidad
-
- Propiedad mecánica más desfavorable
- Clasificación visual en estado seco/húmedo

2.2.1. Coníferas

2.2.1.1. Argentina- Métodos de clasificación visual por resistencia

Ponente: Juan Carlos Piter

Filosofía de cálculo: Método de las tensiones admisibles- ASD (NDS for wood construction)

Normas

- IRAM 9662-3 (2006)- Madera laminada encolada estructural. Clasificación de las tablas por resistencia. Parte 3: Tablas de pino taeda y ellioti (Pinus taeda y elliotii)
 - La norma establece dos clases de resistencia: Clase 1 y Clase 2, identificando a la madera de mayor resistencia con la Clase 1.
 - Principales parámetros con influencia sobre las propiedades mecánicas:
 - Médula
 - Nudosidad
 - Anillos de crecimiento
 - Limitaciones adicionales
 - Medición de los parámetros (en madera con $CH \leq 16\%$)
 - En general y en particular la nudosidad
 - Análisis de la precisión del método de medición de la nudosidad en tablas sin y con médula
 - Antecedentes de normas (ASTM D245-93, DIN 4074-1)
 - Consenso con los empresarios
 - Valores característicos de las propiedades mecánicas y densidad para cada clase de resistencia
En el Anexo B de la norma se detallan los valores de las propiedades mecánicas y la densidad para c/u de las dos clases de resistencia, establecidos a partir de i) propiedades de flexión (resistencia y rigidez) de cuerpos de prueba de tamaño estructural, y ii) densidad.
- IRAM 9670 (2002)- Madera aserrada de pino resinoso del noreste- Actualmente se realizan estudios para su revisión (no se aplica en la actualidad)

2.2.1.2. Brasil- Métodos de clasificación visual y mecánica

Ponente: Carlito Calil Junior

Filosofía de cálculo: Método de los estados límite

Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional

Normas

- 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
 - La caracterización completa se realiza sobre cuerpos de prueba de pequeñas dimensiones y libre de defectos, mediante ensayos de:
 - Densidad
 - Humedad
 - Compresión paralela a la fibra
 - Compresión normal a la fibra
 - Tracción paralela a la fibra
 - Tracción normal a la fibra
 - Cizalle
 - Aplastamiento
 - Flexión
 - Dureza

- NBR 7190 (1997)- Projeto de estruturas de madeira
 - Las Tablas 8 y 9 de la Norma NBR 7190 describen las Clases de resistencia para coníferas y frondosas, establecidas a partir de i) propiedades de compresión paralela a la fibra (resistencia y rigidez) de cuerpos de prueba de pequeñas dimensiones y libre de defectos, y ii) densidad aparente.

Métodos de clasificación no destructivos

La clasificación mecánica está en función del tipo de equipamiento utilizado, y los valores de referencia obtenidos serán utilizados en el proyecto, particularmente en la adopción del coeficiente $k_{mod,3}$. Los valores de los coeficientes de modificación para las coníferas son inferiores a los de las frondosas a efectos de considerar el riesgo por la presencia de nudos no detectados en la inspección visual.

- Mecánica por tensiones (MSR)
- Vibración transversal
- Ultrasonidos
- Flexión estática con pesas

2.2.1.3. Chile- Métodos de clasificación visual y mecánica

Ponente: Mario Wagner

- Clasificación visual. NCh 1207 para pino radiata-Método de la razón de área nudosa.

2.2.1.4. España- Métodos de clasificación visual y mecánica

Ponente: Vanesa Baño

2.2.2. Frondosas

2.2.2.1. Argentina- Métodos de clasificación visual por resistencia

Normas

- IRAM 9662-2 (2006)- Tablas de *E. grandis* de la Mesopotamia para madera laminada encolada estructural (Madera aserrada en general con igual método)
 - Principales parámetros con influencia sobre las propiedades mecánicas:
 - Médula
 - Nudosidad
 - Limitaciones adicionales
 - Medición de los parámetros
 - En general y en particular la nudosidad
 - Antecedentes de normas (ASTM D245, DIN 4074-1, AS 2082)
 - Consenso con los empresarios
 - Base estadística
 - Proceso de diseño y comprobación del método
 - Verificación de la seguridad para el diseño
 - Estudios actuales para ampliar a otras secciones el método del álamo-
oportunidades para tesis

2.3. Jornada 3- Madera laminada encolada estructural. Fabricación y ensayos (martes 2/9/14- 14 a 18 h)

Ponentes: Juan C Piter, Carlito Calil Jr, Mario Wagner, Vanesa Baño

- Presentación de normas de caracterización, fabricación y ensayos (p/ país)
- Criterios de caracterización y soporte estadístico
- Problemas para definir los requisitos de fabricación
- Tipos de adhesivos utilizados: línea de cola y finger
- Ensayos iniciales tipo y ensayos de control de calidad

2.4. Jornada 4- Normativa de cálculo estructural con madera. Criterios adoptados (miércoles 3/9/14- 9 a 13 h)

Ponentes: Juan C Piter, Carlito Calil Jr, Mario Wagner, Vanesa Baño

- Presentación del contenido de normas de cálculo (p/ país)
- Valores de diseño para las distintas especies y formatos de madera

2.5. Jornada 5a- Acciones, límites de deformaciones y fuego

(miércoles 3/9/14- 14 a 18 h)

Ponentes: Juan C Piter, Carlito Calil Jr, Mario Wagner, Sebastián Dieste, Pablo Páez, Vanesa Baño

- Presentación de normativa de acciones (p/ país)

**Informe 1. Análisis de normas y reglamentos de cálculo de estructuras de madera.
Revisión del estado del arte a nivel regional e internacional**

- Combinaciones de las acciones
- Relación entre norma de acciones de viento en Uruguay y normativa de cálculo internacionales
- Métodos de cálculo para determinar las deformaciones
- Límites de deformación (p/ país)
- Cálculo/medición de vibraciones naturales e inducidas por el tránsito humano (breve descripción del abordaje de cada normativa)
- Método de cálculo de la resistencia al fuego
- Tiempo exigido de resistencia al fuego (p/país)

2.7. Jornada 6- Análisis de la normativa internacional y propuesta para Uruguay

(jueves 4/9/14- 9 a 13 h)

- Resumen y evaluación de las jornadas 1-5
- Propuesta para Uruguay. Recomendaciones y sugerencias

Informe 2. Análisis de la metodología de ensayo y los requerimientos de la normativa europea de caracterización estructural de madera

PROYECTO: DOCUMENTOS TÉCNICOS BASE PARA LA NORMALIZACIÓN DE ESTRUCTURAS Y CONSTRUCCIÓN CON MADERA

TABLA DE CONTENIDOS

0. Introducción	II-3
1. Normativa de referencia.....	II-6
2. Diferencia entre medición de la flecha en el eje y en el canto inferior.....	II-6
3. Diferencia entre utilizar uno o dos extensómetros.....	II-7
4. Tramos del diagrama carga-deformación para estimación del módulo de elasticidad.....	II-9
5. Cálculo del módulo de elasticidad medio de la muestra	II-10
6. Conclusiones.....	II-13
7. Anexo.....	II-15

0. Introducción

En el marco del proyecto *Documentos técnicos base para la normalización de estructuras y construcción con madera* se decidió entre otros, proponer: i) adoptar el Eurocódigo 5 para el cálculo estructural, y ii) seguir el cuerpo normativo europeo para caracterizar y determinar propiedades estructurales de maderas uruguayas, incluyendo metodologías de ensayo, procesamiento de datos, etc. A efectos de incorporar información actualizada y tener una plataforma de trabajo, se decidió utilizar la base de datos del proyecto Fondo María Viñas¹, recientemente finalizado, sobre caracterización de madera de pinos de uruguayos. El objetivo del presente informe es comparar el método de ensayo de flexión utilizado en dicho proyecto, con el método de ensayo de flexión de la norma europea EN 408, y de encontrarse discrepancias proponer coeficientes de ajuste para que esa base de datos cumpla con las exigencias normativas europeas. En particular, se analiza el método empleado para estimar la relación entre carga y flecha, y relacionarla con la normativa europea de caracterización de madera estructural para la obtención de los valores característicos de las propiedades mecánicas, así como establecer los coeficientes de corrección aplicables, en caso de ser necesario. Para ello se estudian los siguientes puntos:

1. Diferencia entre la medición de la flecha en el eje de la cara (o altura, h) o en el canto (o espesor, b) de la viga con respecto a los apoyos de la viga sobre el canto.
2. Relación entre la medición de la flecha con un extensómetro en una cara o como valor medio del obtenido a partir de dos extensómetros, uno en cada cara de la viga.
3. Influencia de la elección de los tramos lineales del diagrama carga-deformación en la determinación del módulo de elasticidad.
4. Análisis de las opciones de cálculo del módulo de elasticidad medio de la muestra.

Las vigas analizadas tienen una sección estándar aproximada de $b=50$ mm y $h=145$ mm, que puede variar ligeramente entre viga y viga, y una longitud de 2800 mm.

Las características del ensayo de flexión de cuatro puntos definido en la norma europea EN 408 y las correspondientes medidas empleadas en los ensayos experimentales de las vigas, se presentan en la Fig 1.

¹ Fondo María Viñas: "Caracterización estructural de madera aserrada de pinos asociada a grados estructurales" (PR FMV 2009_1_2772)

Informe 2. Análisis de la metodología de ensayo y los requerimientos de la normativa europea de caracterización estructural de madera

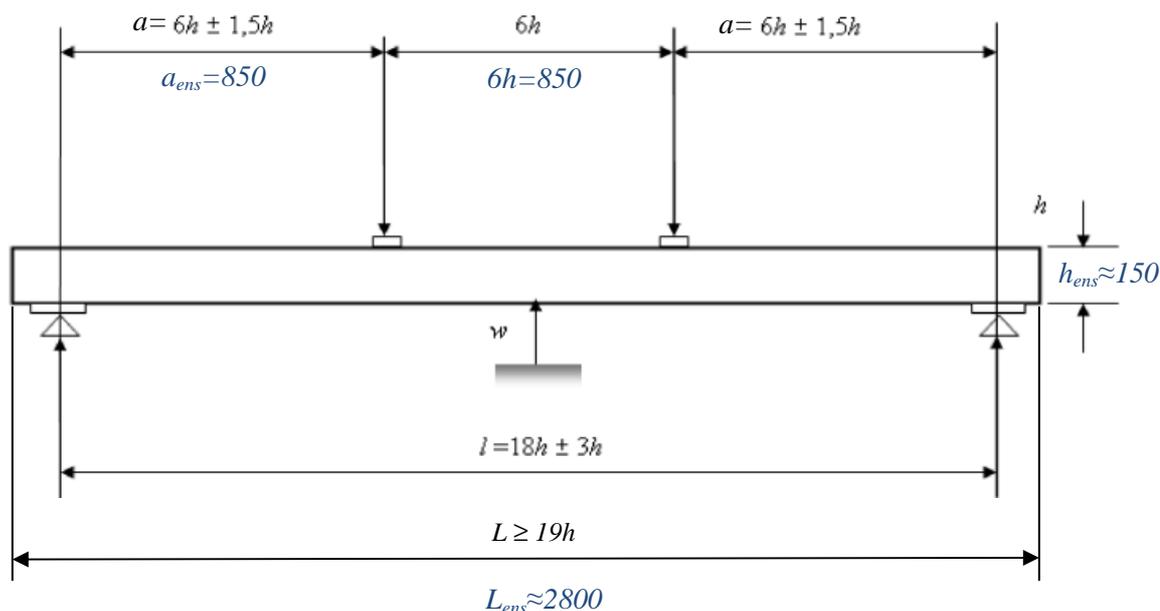


Figura 1. Dispositivo de ensayo y distancias para la medición del módulo de elasticidad global en flexión (EN 408) y distancias de ensayo (x_{ens})

La Tabla 1 presenta las variables consideradas en el ensayo experimental y los requerimientos de la norma EN 408, siendo:

L, la longitud total de la viga ensayada (mm)

l, la luz entre ejes de apoyos de la viga ensayada (mm)

a, la distancia entre el punto de carga y el apoyo más próximo (mm)

v, la velocidad de avance de la celda de carga (mm/s)

Tabla 1. Variables de ensayo y requisitos de la norma EN 408 para un canto medio $h \approx 147$ mm

Para $h \approx 147$ mm	Valores de ensayo	Requerimientos de norma	Cumplimiento requerimientos EN 408
L (mm)	2800	≥ 2793	SI
l (mm)	2550	(2250-3150)	SI
a (mm)	850	(662-1102)	SI
6h (mm)	850	882	NO
v (mm/s)	0.33	$< 0,45$	SI
t_{medio} (s)	≈ 245	300 ± 120	SI
Acondicionamiento ⁽¹⁾	NO	$(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ y $(65 \pm 5)\%$	NO
Masa constante	NO	Masa de 2 pesadas sucesivas en $6h \leq 0,1\%$ de diferencia	NO

⁽¹⁾ Las probetas pueden almacenarse en el área de ensayo hasta 24h siempre que se apilen adecuadamente y se envuelvan con un film estanco al vapor de agua.

Informe 2. Análisis de la metodología de ensayo y los requerimientos de la normativa europea de caracterización estructural de madera

Para la determinación del contenido de humedad de la probeta y de la densidad se debe de seguir, además de la norma anterior, la EN 13183-1 (UNE EN, 2002). Esta última establece las características de la probeta a ensayar y los métodos de determinación del contenido de humedad según los requisitos de la Tabla 2. Los ensayos de determinación del contenido de humedad y de densidad de las vigas analizadas se realizaron de acuerdo a las normas americanas ASTM D4442-método A (ASTM, 2011) y ASTM 2395-método A (ASTM, 2011), respectivamente.

Tabla 2. Variables de ensayo de las probetas y requisitos de la norma EN 408 y EN 13183-1.

Probetas para determinación del CH(%)	Valores de ensayo	Requerimientos de norma	Cumplimiento requerimientos EN
L (mm)	≈25	≥20	OK
Posición rebanada		Próxima a zona rotura	OK
Tiempo entre rotura y pesado de la rebanada (s)	De 2 a 24 horas	≤2h y con rebanadas guardadas en contenedor estanco	NO
T ^a de secado (°C)	103±2	103±2	OK
Masa constante	Masa de 2 pesadas sucesivas en 4h min y diferencia ≤ 0,1%.	Masa de 2 pesadas sucesivas en 2h ≤ 0,1% de diferencia	OK

Dado que el contenido de humedad influye significativamente en las propiedades mecánicas, así como afecta a las correcciones por contenido de humedad, es de suma importancia tener un valor de contenido de humedad preciso y acorde a las exigencias de la normativa.

1. Normativa de referencia

ASTM D 2395-07 (2011). Standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA

ASTM D 4442-07 (2011). Standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-based materials. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA

UNE EN 384 (2010). Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. Asociación Española de normalización y certificación AENOR, Madrid

PrEN 384 (2014). Structural timber. Determination of characteristic values of mechanical properties and density. Comité Europeo de Normalización CEN, Bruselas

UNE EN 408 (2011+A1:2012). Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, Madrid

UNE EN 13183-1 (2002). Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, Madrid

2. Diferencia entre medición de la flecha en el eje y en el canto inferior

Para evaluar la diferencia entre medir la flecha en el eje de la viga y en el canto inferior con respecto a los apoyos de la viga, se generaron un modelo teórico simplificado y dos modelos de elementos finitos (FEM), uno con SAP2000 y otro con ANSYS, considerando el comportamiento no lineal y ortótropo de la madera.

Los resultados de los modelos indicaron que para las dimensiones de las vigas ensayadas, no existe prácticamente diferencia entre colocar dos extensómetros en el eje (uno de cada lado) o colocar uno en el centro del canto inferior de la viga. La Tabla 2 muestra las diferencias (flecha canto vs flecha eje) en el modelo ANSYS para una viga modelo de dimensiones 43x142x3000 mm, con las siguientes propiedades: módulo de elasticidad longitudinal paralelo a la fibra ($E_{//}$) de 9803 MPa, módulo de elasticidad a tracción ($E_{t,0}$) de 10762 MPa, módulo de elasticidad a compresión ($E_{c,0}$) de 8970 MPa, módulo de elasticidad transversal (G) de 613 MPa y densidad de 525 Kg/m³, que alcanza el límite elástico a una carga de 10,5 kN.

Tabla 2. Diferencia entre la flecha en el eje y la flecha en el canto para una viga tipo en tramo elástico para un modelo FEM de un ensayo de flexión de cuatro puntos

Carga (kN)	Flecha canto (mm)	Flecha eje (mm)	Diferencia (mm)
0,4	1,5944	1,5945	0,0001
4	13,8317	13,8324	0,0007
6	20,6294	20,6304	0,0010
8	27,4271	27,4284	0,0013
9	30,8259	30,8274	0,0015
10	33,9607	33,9623	0,0016

Informe 2. Análisis de la metodología de ensayo y los requerimientos de la normativa europea de caracterización estructural de madera

La última actualización de la norma EN 408:2010+A1:2012 (UNE EN, 2012) en su apartado 10.2, admite la medición de la flecha en el canto de la viga, tanto en el traccionado como en el comprimido, así como también en el eje de la viga siempre que la medición se realice en ambas caras de la pieza.

En síntesis, a falta de datos experimentales obtenidos de acuerdo a la normativa europea, se realizó un análisis mediante FEM, donde se obtuvieron diferencias menores al 0,005% entre las mediciones de la flecha en el canto y en el eje de la viga. Aunque lo óptimo sería un análisis experimental, la baja diferencia observada en FEM permite concluir que no es necesario aplicar coeficientes correctores para ajustar las mediciones en el eje neutro de la viga con respecto a su canto.

3. Diferencia entre utilizar un extensómetro o dos extensómetros (uno en cada cara)

La norma EN 408 (UNE EN, 2012) especifica el requisito de obtener el valor medio de las mediciones de flecha realizadas en ambas caras de la probeta, cuando éstas se miden en el eje neutro de la pieza (apartado 10.2). El requisito de disponer un extensómetro en cada cara se debe a que la sección transversal de la viga puede sufrir un pequeño giro, de manera que en una cara la flecha sea mayor que en la otra y donde la media garantiza que se compensan las mediciones de ambas.

En una intención de estimar la diferencia entre medir con uno o dos extensómetros, y asumiendo las mediciones en cada una de las caras como variables independientes, se realiza el siguiente razonamiento estadístico.

3.1. Planteo de las variables

Sea A una variable aleatoria que toma como posibles valores los resultados de ensayar las vigas utilizando dos extensómetros. Por otra parte, sea B una variable aleatoria que toma como posibles valores los resultados de ensayar las vigas con un único extensómetro. La variable B puede escribirse como la variable A más la variable C , representando esta última la diferencia o el error entre medir con un sólo extensómetro en relación a medir con dos.

A su vez, la variable aleatoria C puede escribirse como la variable X por la variable Y , las cuales representan el valor absoluto de la diferencia y el signo, respectivamente. La variable Y , que representa el signo del error cometido al utilizar un único extensómetro, tiene como significado físico el lado en el que se colocó el comparador, puesto que en un determinado suceso, si se hubiera puesto del otro lado, la variable habría tomado el valor opuesto.

Resumiendo:

$$\left. \begin{array}{l} B = A + C \\ C = X \cdot Y \end{array} \right\} \Rightarrow B = A + X \cdot Y$$

Interesa comparar el valor esperado y la varianza de las variables A y B para analizar la aplicación de un solo extensómetro.

3.2. Valor esperado

La esperanza de la variable B se calcula a partir de:

$$E(B) = E(A + X \cdot Y) = E(A) + E(X \cdot Y)$$

Como las variables X e Y son independientes (Y depende únicamente del lado en que se coloca el extensómetro):

$$E(B) = E(A) + E(X) \cdot E(Y)$$

La variable Y toma valores 1 y -1 con la misma probabilidad. Entonces:

$$E(Y) = 0 \Rightarrow E(B) = E(A)$$

El valor esperado de las variables A y B es el mismo.

3.3. Varianza

La varianza de la variable B se calcula a partir de:

$$V(B) = V(A + X \cdot Y) = V(A) + V(X \cdot Y) + 2 \cdot Cov(A, X \cdot Y)$$

La covarianza entre dos variables está dada por:

$$Cov(A, X \cdot Y) = E[(A - E(A)) \cdot (X \cdot Y - E(X \cdot Y))]$$

$$E(X \cdot Y) = E(X) \cdot E(Y) = 0 \Rightarrow Cov(A, X \cdot Y) = E[(A - E(A)) \cdot X \cdot Y]$$

Entonces, la ecuación se simplifica de la siguiente manera:

$$Cov(A, X \cdot Y) = E[A \cdot X \cdot Y + E(A) \cdot X \cdot Y] = E(A \cdot X \cdot Y) + E(A) \cdot E(X \cdot Y)$$

$$E(X \cdot Y) = E(X) \cdot E(Y) = 0 \Rightarrow Cov(A, X \cdot Y) = E(A \cdot X \cdot Y)$$

$$E(A \cdot X \cdot Y) = E(A \cdot X) \cdot E(Y) = 0 \Rightarrow Cov(A, X \cdot Y) = 0$$

Retomando la ecuación original, se llega a:

$$V(B) = V(A) + V(X \cdot Y) = V(A) + V(C)$$

La varianza de medir con un único extensómetro está dada por la suma de la varianza al medir con dos extensómetros y la varianza de la diferencia entre medir con uno y dos extensómetros.

3.4. Comentarios finales

Debido a que la viga puede sufrir giros durante el ensayo, la media de la medición de las deformaciones en ambas caras permite reducir los errores de medición al realizarlo en una única cara.

Desde el punto de vista probabilístico, realizando un número infinito de ensayos y midiendo con un único extensómetro en una cara, el valor medio de la flecha sería el mismo que midiendo con un extensómetro en cada cara. Al tener un número limitado de datos, no es posible asumir que el valor medio de medir en una única cara sea correcto.

Informe 2. Análisis de la metodología de ensayo y los requerimientos de la normativa europea de caracterización estructural de madera

La diferencia entre usar uno o dos extensómetros está en la mayor varianza que se obtiene al utilizar uno sólo, dada por la suma de la varianza al medir con dos extensómetros y la varianza de la diferencia entre medir con uno y dos extensómetros.

Además, el valor característico se ve afectado por la varianza, por tanto tampoco se puede asumir como válido el valor característico del módulo de elasticidad.

Para saber si la varianza de la diferencia entre medir con uno y dos extensómetros $[V(C)]$ es significativa ó no en relación a la varianza al medir con dos extensómetros $[V(A)]$ se requeriría de una gran cantidad de datos de ensayos (fijada por el Comité Europeo de Normalización) y los resultados serían válidos únicamente para el muestreo y la especie en particular.

Por otra parte, la norma europea exige la utilización de dos comparadores y permite la utilización de uno sólo en el caso que la flecha se mida en el centro del canto inferior.

En función de estos últimos dos comentarios, se recomienda que en futuras investigaciones los ensayos se realicen utilizando dos extensómetros y se considere el promedio de las medidas.

4. Tramos del diagrama carga-deformación para estimación del módulo de elasticidad

La norma EN 408 (UNE EN, 2012) establece que el tramo del gráfico carga-deformación que debe utilizarse para el análisis de regresión es el comprendido entre $0,1 F_{máx,est}$ y $0,4 F_{máx, est}$, siendo $F_{máx,est}$ la carga máxima estimada obtenida de los resultados de ensayos de un mínimo de 10 probetas de la misma especie, tamaño y calidad. Dicha norma especifica buscar el tramo más largo en ese intervalo de carga que dé un coeficiente de correlación de 0,99 o mejor, incluyendo al menos el tramo comprendido entre $0,2 F_{máx,est}$ y $0,3 F_{máx,est}$ para calcular el módulo de elasticidad global.

Los datos de ensayo de las vigas no siempre incluyeron los tramos comprendidos entre los valores indicados en EN 408, por tanto, a continuación se analiza la influencia de tomar tramos diferentes a los indicados en la norma y se proponen coeficientes correctores en el caso de no cumplir con este requisito.

El registro de datos para las vigas ensayadas corresponde a las deformaciones para cargas de 1 a 5 kN, en escalones de 1 kN. A partir de esto, cuando las cargas de rotura fueron menores a 5,0 kN, incluso el menor escalón de carga resulta mayor al 20% de la carga de rotura. A su vez, cuando las cargas de rotura fueron mayores a 16,7 kN, el mayor escalón de carga resulta menor al 30% de la carga de rotura. Esto explica por qué en la mayoría de los casos no es posible satisfacer el requisito de utilizar al menos la pendiente en el rango del 20 y 30% de la carga de rotura para el cálculo del módulo de elasticidad.

A efectos de no eliminar datos que no cumplen con estar en el rango de 5,0 -16,7 kN, se realizó el siguiente análisis: i) para las vigas que rompieron a valores de cargas menores de 5,0 kN, se calculó la pendiente entre 1 y 2 kN y ésta fue utilizada para obtener el valor del módulo

Informe 2. Análisis de la metodología de ensayo y los requerimientos de la normativa europea de caracterización estructural de madera

de elasticidad; ii) para las vigas que rompieron a valores de carga mayores de 16,7 kN (vigas con mayor resistencia de la media), se calculó la pendiente entre el 10 y 20% ó entre el 5 y 15% (dependiendo de lo que fuera posible) y se aplicaron coeficientes correctores para evitar rechazar las vigas con mejores propiedades mecánicas, tal y como exige la EN 408 (UNE EN, 2012).

La justificación del primer punto es que, debido a que la madera tiene un comportamiento elastoplástico en flexión, la pendiente entre la carga y la deformación para valores de carga mayores al intervalo comprendido entre el 20 y 30% es teóricamente menor a la calculada entre el 20 y 30%. De esta forma, considerar esa pendiente y no aplicar coeficientes correctores es estar del lado de la seguridad.

El razonamiento anterior también justifica que al utilizar valores menores al intervalo comprendido entre el 20 y 30% del valor de la carga de rotura, el valor de la pendiente entre la carga y la deformación es teóricamente mayor a la calculada entre el 20 y 30%. No puede seguirse un razonamiento similar al del párrafo anterior puesto que no se estaría del lado de la seguridad, por lo que se adoptaron coeficientes correctores que penalizan la pendiente obtenida, aunque esta decisión estaría fuera de los requerimientos exigidos en la norma EN 408 (UNE EN, 2012).

Los coeficientes se obtuvieron de la siguiente manera: en las vigas en las cuales se tienen los valores de carga entre el 20 y 30% y entre el 10 y 20% se calculó la diferencia entre el cálculo de la pendiente carga-deformación para ambos rangos. Lo mismo se hizo entre el 5 y el 15% y el 10 y 20%. De esta manera se obtuvieron dos coeficientes correctores (Tabla 3), que se aplicaron en las vigas que rompieron a cargas mayores a 16,7 kN. Estos coeficientes son válidos sólo para la muestra estudiada en el presente trabajo.

Por tanto, a efectos de corregir el tramo del diagrama carga-deformación, para calcular el módulo de elasticidad de la muestra estudiada, se aplicarán los coeficientes correctores presentados en la Tabla 3.

Tabla 3. Coeficientes correctores para el cálculo del módulo de elasticidad utilizando pendientes de tramos diferentes a los establecidos en EN 408

Tramos	Coficiente corrector utilizado
Pasar de intervalo (10-20%) al (20-30%)	0,9882
Pasar del intervalo (5-15%) al (10-20%)	0,9950

5. Cálculo del módulo de elasticidad medio de la muestra

De acuerdo a EN 408:2010+A1:2012 (UNE EN, 2012), el módulo de elasticidad se calcula de acuerdo a:

$$E_{m,g} = \frac{3aL^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \cdot \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gb} \right)}$$

Informe 2. Análisis de la metodología de ensayo y los requerimientos de la normativa europea de caracterización estructural de madera

Esta ecuación se obtiene al despejar el módulo de elasticidad local a partir las ecuaciones de viga de la teoría de Timoshenko², que considera el efecto de la fuerza cortante en la deformación. La deducción de la ecuación a partir de la teoría de viga de Timoshenko se presenta en el **Anexo** al informe.

A partir de los anterior, si en la ecuación se ingresa un valor de G , ya sea el módulo de elasticidad local dividido por 16 (EN 384, 2010) o, como permite la norma EN 408:2010+A1:2012, 650 MPa, se llega al valor del módulo de elasticidad local; mientras que si se asume G como infinito, como también permite la misma norma, se desprecia el efecto de deformación por cortante, obteniéndose así el módulo de elasticidad global.

El módulo de elasticidad de la muestra, según el apartado 5.3.2 de la norma EN 384 (UNE EN, 2010), se obtiene a partir de:

$$\bar{E} = \frac{\sum_i E_i}{n} \cdot 1,3 - 2,69, \text{ expresado en GPa.}$$

Este valor es interpretado por la bibliografía como el módulo de elasticidad local (libre de cortante) medio de la muestra corregido partiendo del módulo de elasticidad del valor medio del módulo de la muestra. La norma no especifica a qué valor medio se refiere, pero se entiende que se trata del módulo de elasticidad global, sin eliminar el efecto del cortante.

Tal como indica el *Documento de aclaraciones en la caracterización estructural de madera aserrada* la citada ecuación no tiene una justificación clara conocida y entra en conflicto con la primera ecuación presentada, de la norma EN 408. A su vez, el documento especifica la no aplicación de la ecuación de la EN 384 en el caso de que el módulo de elasticidad de la muestra esté ya libre de cortante (módulo local o módulo global habiendo introducido el efecto de cortante, según EN 408). Esto también es recogido como nota a pie de página en el apartado 10.3 de la última versión de la norma EN 408:2010+A1 (UNE EN, 2012).

De acuerdo a lo explicado, se abren tres posibilidades para la obtención del módulo de elasticidad local de la muestra:

- 1) Utilizar la ecuación de la EN 408 para obtener el módulo de elasticidad global, considerando como infinito el módulo de elasticidad transversal (G) y posteriormente calcular el módulo de elasticidad local a partir de la ecuación de la EN 384.
- 2) Calcular el módulo de elasticidad local directamente a partir de la EN 408, asumiendo que el módulo de elasticidad transversal (G) vale 650 MPa, tal y como propone la propia norma.
- 3) Despejar el módulo de elasticidad local a partir de la ecuación de la EN 408 y de la ecuación del apartado 6.2.7. de la EN 384 que considera que el módulo de elasticidad transversal (G) es igual al módulo de elasticidad local sobre 16.

De estas opciones, las primeras dos se enmarcan dentro de lo que la EN 408 permite, mientras que la última no aparece como una opción de esta norma. Por otro lado, la primera opción implica la aplicación de una ecuación cuestionada que, para valores del módulo de elasticidad global menores a 8,97 GPa da como resultado valores de módulo de elasticidad local menores

² Stephen Timoshenko. 1983. Resistencia de materiales.

Informe 2. Análisis de la metodología de ensayo y los requerimientos de la normativa europea de caracterización estructural de madera

a los de módulo de elasticidad global, resultado que carece de sentido desde el punto de vista físico y porque penaliza los valores de módulo de elasticidad obtenidos.

En la gráfica de la Fig 2 se muestra el resultado de calcular módulo de elasticidad local en función del módulo de elasticidad global para las tres opciones presentadas. La primera opción está representada en azul, la segunda en rojo y la tercera en amarillo. Es claro que la alternativa de considerar G como infinito para posteriormente calcular el módulo de elasticidad local a partir de la ecuación de la EN 384 penaliza demasiado para el rango de módulos de elasticidad obtenidos en los ensayos.

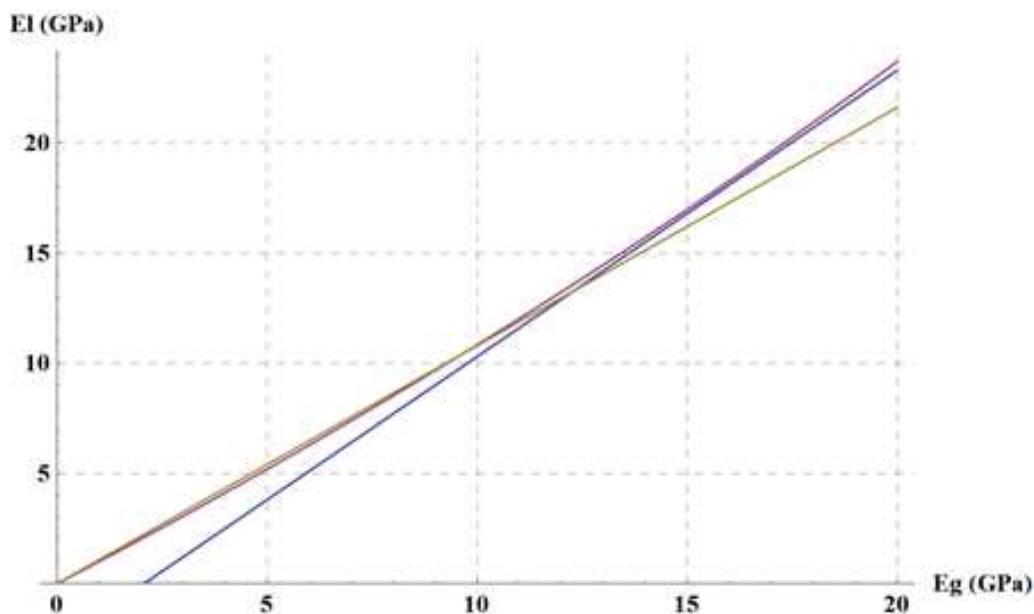


Figura 2. Módulo de elasticidad local en función del módulo de elasticidad global para las tres opciones. En azul la 1), en rojo la 2), y en amarillo la 3).

Por lo tanto, la opción tomada para el cálculo de las muestras estudiadas en el presente trabajo y en base a las observaciones anteriores, es la tercera: introducir un valor de $G=E_1/16$.

6. Conclusiones

Los resultados de los cuatro puntos analizados en este informe fueron discutidos en una reunión interna³ del equipo LATU-FING-ORT a la cual asistieron: H. O'Neill, A. Cardoso y M. Cagno, del Dpto. de Proyectos Forestales del LATU; L. Moya de Facultad de Arquitectura Universidad ORT Uruguay; y L. Domenech y V. Baño del IET, Facultad de Ingeniería Universidad de la República.

A partir de los resultados y para el avance del proyecto *Documentos técnicos base para la normalización de estructuras y construcción con madera*, se acordaron las bases metodológicas del ensayo de flexión de cuatro puntos en vigas de madera, para futuras investigaciones, y se tomaron las siguientes decisiones:

1. Aceptar dos formas de medición de la flecha para la determinación del módulo de elasticidad global: a) colocando un extensómetro en el canto inferior de la viga, ó b) colocando dos extensómetros en el eje neutro de la viga, uno a cada lado de la cara, y tomando el promedio de ambas medidas.
2. Para las muestras estudiadas se utilizarán los datos de módulo de elasticidad obtenidos a partir de la medición con un único extensómetro en el eje neutro de la pieza, en una única cara, asumiendo el error cometido en la varianza de los resultados y tomando únicamente como aceptable el valor medio del módulo de elasticidad, pero no el valor característico. Para futuros estudios, los ensayos experimentales se realizarán como se explica en el punto 1 de las conclusiones y en base a la norma EN 408.
3. Dado que para las muestras estudiadas en este trabajo no fue posible obtener en todas las probetas los tramos comprendidos entre $0,2F_{max}$ y $0,3F_{max}$ en el diagrama carga-deformación, se propusieron unos coeficientes correctores de tramo para calcular el módulo de elasticidad. Los coeficientes propuestos son válidos únicamente para las muestras ensayadas que no cumplen con los requisitos de la norma europea EN 408. En futuros trabajos de investigación, las vigas se clasificarán visualmente previamente ser ensayadas, y se irá corrigiendo el tiempo de medición de la flecha en el tramo elástico en función de la carga de rotura esperada. Para estimar la carga máxima de rotura, para cada lote de madera clasificada, se deberán realizar varios ensayos de prueba de vigas hasta la rotura.
4. Para calcular el módulo de elasticidad medio de la muestra se propusieron tres opciones, basadas en las normas EN 408 y EN 384, presentadas en el apartado 4 del presente informe. Se concluyó que, para las muestras estudiadas se aplicará la opción 3 que introduce un valor de $G=E_i/16$ en el cálculo del módulo de elasticidad local y evita la utilización de la ecuación correctora del módulo de elasticidad global de la EN 384, cumpliendo así con los requerimientos del cuerpo normativo europeo. Para futuras investigaciones de esta u otra especie se estudiará la opción que mejor se ajuste para el cálculo del valor medio del módulo de elasticidad de la muestra.

³ LATU, Montevideo 26 de febrero de 2015.

Informe 2. Análisis de la metodología de ensayo y los requerimientos de la normativa europea de caracterización estructural de madera

5. Las vigas analizadas no habían sido acondicionadas en cámara previamente a los ensayos, tal como exige la norma EN 408: 20 ± 2 °C de temperatura y $65\pm 5\%$ de humedad relativa del aire. Este requisito no es posible cumplirlo, ya que a la fecha (diciembre 2015) no hay disponible en Uruguay una cámara de acondicionado con estas características para vigas de tamaño estructural.

Anexo. Deducción de la ecuación del módulo de elasticidad según la teoría de viga de Timoshenko

Cuando se considera el efecto de la fuerza cortante en la deformación de la viga, se produce una deformación adicional como consecuencia del deslizamiento relativo de las secciones adyacentes. Este efecto es introducido por Timoshenko en la ecuación de la viga:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{1}{EI_z} \left(M + \frac{\alpha EI_z}{AG} \cdot q \right)$$

siendo:

- y la flecha vertical para cada coordenada x .
- E el módulo de elasticidad lineal del material.
- G el módulo de elasticidad transversal del material.
- A el área de la sección constante.
- I_z la inercia según el eje perpendicular a x e y .
- q la carga distribuida aplicada.
- M el momento flector que produce la carga q .
- α un coeficiente por el que hay que multiplicar la tensión rasante media para obtener la tensión rasante en el centro de gravedad, que para una sección rectangular vale 6/5.

Esta ecuación puede emplearse para determinar las deformaciones en aquellos casos en los que deba considerarse el efecto de la fuerza cortante. El primer sumando considera la deformación por flexión mientras que el segundo la deformación por cortante. Cuando no se tiene en cuenta la deformación por cortante se elimina el segundo sumando quedando la ecuación de viga tradicional, representada por:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI_z}$$

Aplicando la primera ecuación a la configuración geométrica del ensayo a cuatro puntos, resulta que la flecha máxima en la sección central de la viga es:

$$y = y_E + y_G = \frac{Pa}{24E_l I_z \cdot (3L^2 - 4a^2)} + \frac{6}{5} \cdot \frac{Pa}{AG}$$

siendo:

- y_E la flecha debida a la flexión.
- y_G la flecha debida al cortante.
- E_l el módulo de elasticidad lineal local.
- P la carga aplicada en cada uno de los dos puntos de aplicación.
- a es la distancia entre los puntos de apoyo y cada una de las cargas.
- L es la luz entre puntos de apoyo.

Por otra parte, la flecha máxima en la sección central puede despejarse de la segunda ecuación, utilizando el módulo de elasticidad global de la viga, resultando:

Informe 2. Análisis de la metodología de ensayo y los requerimientos de la normativa europea de caracterización estructural de madera

$$y = \frac{Pa}{24E_g I_z \cdot (3L^2 - 4a^2)}$$

Siendo E_g el módulo de elasticidad lineal global de la viga.

Igualando las últimas dos ecuaciones y despejando la inercia (I_z) y el área (A) en función de las dimensiones de la sección rectangular, puede despejarse el módulo de elasticidad local (E_l) en función del módulo de elasticidad global (E_g):

$$E_l = \frac{5(3L^2 - 4a^2)}{15L^2 - 20a^2 - 12h \cdot \frac{E_g}{G}} \cdot E_g$$

siendo:

- b el canto de la sección rectangular.
- h la altura de la sección rectangular.

A su vez, puede despejarse una ecuación que no contenga el módulo de elasticidad global como variable. La misma es mostrada a continuación:

$$E_l = \frac{3aL^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(\frac{y}{P} - \frac{6a}{5Gb h} \right)}$$

Se aprecia que queda como parámetro la pendiente entre la flecha y la carga aplicada. Por este motivo, se plantea una manera alternativa de expresar la pendiente que no afecta la igualdad de la ecuación. A su vez, se introduce la variable de la fuerza total aplicada (F) en lugar de la carga aplicada en cada uno de los puntos (P). Entonces:

$$y = w_2 - w_1$$
$$P = \frac{F_2 - F_1}{2}$$

Sustituyendo las ecuaciones anteriores, el módulo de elasticidad local coincide con la ecuación de la norma EN 408:

$$E_l = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \cdot \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gb h} \right)}$$

Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliotii/taeda* de procedencia uruguaya

PROYECTO: DOCUMENTOS TÉCNICOS BASE PARA LA NORMALIZACIÓN DE ESTRUCTURAS Y CONSTRUCCIÓN CON MADERA

TABLA DE CONTENIDOS

0. Introducción	III-3
1. Normativa de referencia	III-3
2. Materiales y métodos.....	III-5
2.1. Material ensayado.....	III-5
2.2. Metodología de ensayo y procesamiento de datos.....	III-5
3. Clasificación visual.....	III-7
3.1. Antecedentes en Uruguay y revisión de normas internacionales de clasificación visual	III-7
3.2. Medición de las singularidades.....	III-8
3.3. Metodología de análisis de los parámetros visuales y asignación a una calidad visual	III-12
3.4. Propuesta de calidad visual y límites de las singularidades.....	III-14
4. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y de la densidad	III-16
4.1. Módulo de elasticidad.....	III-16
4.2. Resistencia a flexión.....	III-17
4.3. Densidad.....	III-18
5. Valores característicos y asignación de clase resistente.....	III-19
6. Conclusiones y recomendaciones.....	III-18
6.1. Conclusiones.....	III-19
6.2. Recomendaciones para futuros trabajos.....	III-21
Anexo A	III-22
Anexo B.....	III-26

0. Introducción

Este documento presenta una propuesta de caracterización mecánica y clasificación visual para madera aserrada de pinos (*Pinus elliottii/taeda*) de procedencia uruguaya, de acuerdo a los lineamientos de la normativa europea. Estos lineamientos están recogidos en un conjunto de tres normas consecutivas del Comité Europeo de Normalización (CEN), que son aplicadas en el siguiente orden: i) EN 408, establece métodos para determinar las propiedades mecánicas, contenido de humedad (CH) y densidad, de cuerpos de prueba de tamaño estructural; ii) EN 384, especifica el método para determinar los valores característicos de las propiedades mecánicas y densidad, y provee reglas de selección de material, análisis y ajuste de valores de ensayo de acuerdo a geometrías o condiciones climáticas diferentes a las de referencia; y iii) EN 338, define un sistema de clases resistentes a partir de los valores característicos de resistencia y rigidez y los valores de densidad. La aplicación de este conjunto de normas, permite que una población específica pueda 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), son iguales o mayores que los valores de la clase deseada.

El presente trabajo focalizó el análisis en la base de datos del proyecto Fondo María Viñas¹, recientemente finalizado, sobre caracterización de madera de pinos uruguayos, de acuerdo a los lineamientos del cuerpo normativo europeo. Los ensayos realizados en el marco del mencionado proyecto siguieron otra normativa distinta de la europea, por lo cual parte del análisis consistió en verificar cuáles de los parámetros incluidos en la base de datos eran comparables o equivalentes a los utilizados en la normativa europea. En aquellos casos en que se detectaron desviaciones de las normas de referencia, las discrepancias fueron registradas y, cuando fue posible, ajustadas para cumplir con los requisitos normativos. A partir de este análisis se proponen los criterios de medición de singularidades para vigas de madera de pino uruguayo, la asignación de calidades visuales y su relación con las clases resistentes de acuerdo a la normativa europea.

1. Normativa de referencia

ASTM D198-09 (2011). Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA

ASTM D2395-07 (2011). Standard test methods for specific gravity of wood and wood based-materials. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA

ASTM D2915-10 (2011). Standard practice for sampling and data-analysis for structural wood and wood-based panels. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA

INN (2006). NCh 1198. Madera – Construcciones en madera – Cálculo. Instituto Nacional de Normalización INN, Santiago

¹ Fondo María Viñas: “Caracterización estructural de madera aserrada de pinos asociada a grados estructurales” (PR FMV 2009_1_2772)

Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliottii*/*P. taeda* de procedencia uruguaya

INN (2005). NCh 1207. Pino radiata – Clasificación visual para uso estructural – Especificaciones de los grados de calidad. Instituto Nacional de Normalización INN, Santiago

IRAM 9662-1 (2005). Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 1: Tablas de pino Paraná (*Araucaria angustifolia*). Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires

IRAM 9662-2 (2005). Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 2: Tablas de eucalipto (*Eucalyptus grandis*). Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires

IRAM 9662-3 (2005). Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 3: Tablas de pino taeda y elliotti (*Pinus taeda* y *elliottii*). Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires

UNE EN 338 (2010). Madera estructural. Clases resistentes. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, Madrid

PrEN 338 (2012). Structural timber. Strength classes. Comité Europeo de Normalización EN, Bruselas

UNE EN 384 (2010). Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, Madrid

PrEN 384 (2014). Structural timber. Determination of characteristic values of mechanical properties and density. Comité Europeo de Normalización EN, Bruselas

UNE EN 408:2011+A1 (2012). Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, Madrid

UNE EN 1912:2012/AC(2013). Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, Madrid

prEN 1912:2015. Structural timber. Strength classes. Assignment of visual grades and species. Comité Europeo de Normalización EN, Bruselas

UNE EN 13183-1/AC (2004). Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, Madrid

UNE EN 14081-1:2006+A1 (2011). Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 1: Requisitos generales. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, Madrid

prEN 14081-1 (2013). Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section. Part 1: General requirements. Comité Europeo de Normalización EN, Bruselas

UNE 56544 (2011). Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, Madrid

UNE 56546 (2013). Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de frondosas. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, Madrid

2. Materiales y métodos

2.1. Material ensayado

La base de datos corresponde a 261 piezas de madera aserrada de especies mezcladas de pino procedente de dos plantaciones comerciales de Uruguay: la primera situada en el litoral, con árboles de 25 años y de diámetros a altura de pecho (DAP) de 450 mm (promedio), y la segunda localizada en el suroeste, con árboles de 15 años y de DAP de 300 mm (promedio). La composición de especies en ambas plantaciones fue similar: 90% de *Pinus elliotti* y 10% de *Pinus taeda*. El diseño experimental del proyecto consideró evaluar vigas con una única sección transversal.

Todas las piezas analizadas presentaron dimensiones medias de su sección transversal de 49x147 mm y una longitud de 3300 mm tal y como se detalla en la Tabla 1.

En base a los requisitos de la norma EN 384 (UNE EN, 2010), para el análisis de datos y cálculo de valores característicos, se consideraron dos muestras independientes.

Tabla 1. Número de piezas ensayadas por procedencia, tamaño y edad

Nº de muestra	Procedencia	Sección media (mm)	Edad	Nº probetas
1	Litoral	49x146	25 años	115
2	Suroeste	49x148	15 años	146
Total				261

Concordancia con los requisitos de EN 384

La norma EN 384 (UNE EN, 2010) establece que las muestras deben tomarse de la población de madera clasificada visual o mecánicamente. Cada muestra debe ser representativa de la población y debe representar: la procedencia de la madera, las dimensiones y la calidad, e incluir además cualquier otra variación conocida que influya en las propiedades mecánicas (zona de crecimiento, aserradero, tamaño del árbol o método de transformación). Cada muestra debe provenir de una única procedencia y contener un mínimo de 40 probetas, teniendo en cuenta que los valores característicos para las muestras pequeñas o poco numerosas serán penalizados.

2.2. Metodología de ensayo y procesamiento de datos

Se recopiló información sobre la metodología de ensayos y el procesamiento de datos de flexión, densidad y contenido de humedad de las probetas descritas anteriormente. Éstos se basaron en las normas ASTM D198-09 (ASTM, 2011), ASTM D2395-07 (ASTM, 2011) y ASTM D2915-10 (ASTM, 2011).

2.2.1. Concordancia con los requisitos de EN 338, EN 384, EN 408 y EN 13183-1

Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliottii*/*P. taeda* de procedencia uruguaya

La metodología utilizada en los ensayos a flexión difiere ligeramente de la norma de referencia EN 408 en la que se basa la EN 384 para la obtención de los valores característicos y la EN 338 para la asignación de clases resistentes.

A partir de estas diferencias, se consideró necesario realizar ajustes mediante la aplicación de coeficientes de corrección a los resultados experimentales, tal y como se explica en el Informe 2 “Análisis de la metodología de ensayo y los requerimientos de la normativa europea de caracterización estructural de madera”, y que son resumidos en la Tabla 2.

Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliottii*/*P. taeda* de procedencia uruguaya

Tabla 2. Resumen de las asunciones y correcciones aplicadas a los resultados de ensayos a efectos de cumplir con los requerimientos de la normativa europea

	Norma de referencia	Descripción de las diferencias con respecto a la norma de referencia y coeficientes de corrección aplicados
Diferencias	EN 408	<ol style="list-style-type: none"> Se constató una leve discrepancia en la configuración del ensayo de flexión: la distancia entre los puntos de aplicación de la carga (af) difirió ligeramente de la exigencia normativa: 850 mm versus 882 mm respectivamente (este último corresponde a 6h, siendo h el valor medio del canto e igual a 147 mm). La flecha global fue medida con un único extensómetro ubicado en el eje de la pieza en una de las caras, en lugar de i) ser medida en ambas caras y su valor medio calculado, ó, ii) ser medida en el canto de la pieza, tal como se establece en EN 408. La metodología de ensayo empleada permitió determinar el valor medio del módulo de elasticidad, pero no el valor característico ya que propició un valor de varianza mayor al que podría obtenerse a partir de mediciones en ambas caras.
	EN 13183-1	El tiempo transcurrido entre la rotura de la viga y el pesado de la rebanada para determinar el contenido de humedad (CH) excedió las 2 horas exigidas por norma, por lo que las correcciones por CH usualmente recomendadas para determinar los valores característicos podrían no reflejar exactamente la realidad.
Correcciones aplicadas	EN 384 EN 408	<ol style="list-style-type: none"> El valor característico de la resistencia a flexión fue corregido dividiendo dicho valor por $k_t=1,00017$ según EN 384, para cumplir con la exigencia normativa de $af=6h$. La metodología empleada no contempló el registro de datos para el trazado del gráfico carga/deformación en los tramos comprendidos entre el 20% y el 30% de la carga de rotura, para cada una de las probetas, tal y como se indica en la norma. Con el propósito de no eliminar datos para el análisis posterior, los valores de módulo de elasticidad fueron corregidos con los siguientes coeficientes: <ul style="list-style-type: none"> - coef.=0,9882 para pasar del intervalo 10-20% al 20-30%; - coef.=0,9950 para pasar del intervalo 5-15% al 10-20%.
NOTA		Para el cálculo del módulo de elasticidad global se consideró un valor $G=E_t/16$, en lugar de: i) $G=\infty$ y la consiguiente corrección según EN 384; o ii) utilizar el valor genérico de $G=650$ MPa, tal y como contempla la norma EN 408.

3. Clasificación visual

3.1. Antecedentes en Uruguay y revisión de normas internacionales de clasificación visual

En el proyecto Fondo María Viñas¹ (2009), las piezas de madera aserrada fueron clasificadas de acuerdo a la norma chilena de clasificación visual para pino radiata NCh 1207 (INN, 2005). En ese trabajo se encontró que la mayoría de las piezas estudiadas no cumplió con los requisitos estructurales de NCh 1198 (INN, 2006). Este hallazgo sugiere que si bien los parámetros de clasificación visual para la madera de pinos uruguayos podrían ser similares a los de la correspondiente chilena, u acaso complementarse con otros, los límites admisibles de grados estructurales deberían ser definidos en función de las características particulares de la madera de pinos (*Pinus elliottii* y *P. taeda*) producida en Uruguay.

Con el objetivo de contribuir a establecer las bases para una norma de clasificación visual de pinos uruguayos, la base de datos del proyecto fue analizada y empleada para generar los límites máximos admisibles para las singularidades de la madera nacional; estos límites fueron comparados con los establecidos en UNE 56544 (UNE EN, 2011), IRAM 9662-1 (IRAM, 2005) e IRAM 9662-3 (IRAM, 2005) para madera de coníferas.

Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliotii*/*P. taeda* de procedencia uruguaya

En el Anexo A se recoge un resumen de las singularidades y su método de medición en diferentes normas internacionales, así como los límites aceptados para cada calidad visual en función de la especie, de la sección transversal y del país de procedencia.

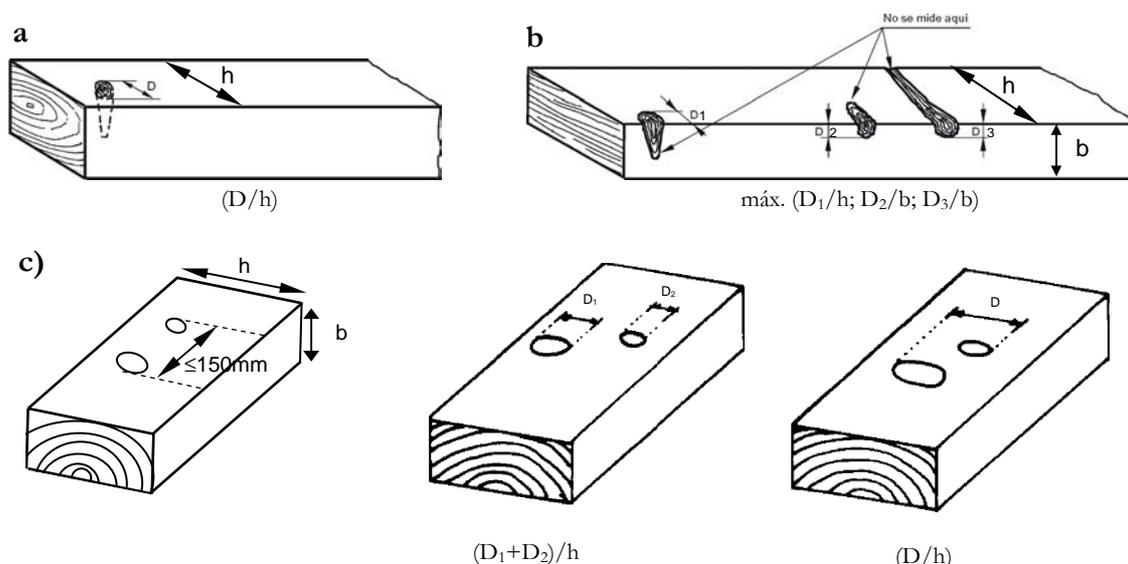
3.2. Medición de las singularidades

La medición de las singularidades se realizó en “estado seco” (CS o DG-Dry Graded), esto es a contenidos de humedad inferiores o iguales al 20%. En el momento de la clasificación visual se estimó para cada viga, el CH con xilohigrómetro, se tomaron datos del peso, con una balanza de precisión (Kern ILB120 KD y Metter Toledo HAWK), y de las dimensiones reales promediando dos mediciones a lo largo de la pieza. Las dimensiones nominales se obtuvieron ajustándolas al 20% de CH. El volumen y el peso se utilizaron para determinar la densidad global de cada pieza. La definición y la forma de medición de las singularidades estudiadas se detallan a continuación:

1. Nudos

Son el resultado de una rama incluida en la pieza de madera, cuyo aspecto y propiedades difieren a las del tejido leñoso circundante. Se localizan en cara, canto o arista de una pieza.

1.1. Nudos de cara y de canto: Los diámetros de los nudos se midieron perpendicularmente al eje longitudinal de la viga, tanto en la cara como en el canto. Los nudos con diámetros menores a 10 mm se despreciaron excepto que fueran pasantes. Los nudos en la cara se calcularon como el cociente entre el diámetro del nudo y el ancho de la pieza (D/h), y los presentes en el canto como el cociente entre el diámetro del nudo y el espesor (D/b) de la pieza, Fig 1.



1.2. Nudos de arista: Son aquellos que se manifiestan en la cara y en el canto, Figura 1b. Se evaluaron en aquella superficie que los cortó más perpendicularmente. En caso de duda se tomó la relación más desfavorable entre D_1/b , y D_2/h .

1.3. Nudos agrupados: Si bien en este trabajo los nudos no fueron evaluados como “agrupados”, resulta pertinente incluir en ese apartado, alguna definición, Figura 1c. EN 56.455 establece como nudos agrupados aquellos que se manifiestan sobre una cara o sobre un canto y cuya distancia entre ejes de nudos según la dirección longitudinal de la viga sea menor o igual a 150 mm o menor o igual al ancho de la pieza (h) cuando ésta sea menor a 150 mm. Cuando se presentasen, se medirían como la suma de nudos independientes, si estos no se solapan en la dirección perpendicular a la fibra, o como un único nudo si estos se solapasen.

2. Médula

Es el tejido inactivo en el árbol adulto, situado generalmente en el interior del primer anillo de crecimiento, con propiedades mecánicas inferiores a las del leño que lo circunda. Generalmente la presencia de médula se relaciona con la existencia de madera juvenil. Se midió presencia o ausencia de médula en las vigas de madera. En caso de haber sido detectada su presencia, se registró su posición en relación al ancho de la viga: centrada (esto es ubicada en los dos cuartos centrales del ancho de la pieza) o descentrada (en alguno de los cuartos exteriores).

3. Fendas o fisuras

Toda separación de las fibras según la dirección longitudinal que generalmente fueron provocadas por el proceso de secado de la pieza de madera o por daños previos sobre el árbol, tales como durante su derribo, heladas, rayos, etc, Fig 2.

3.1. Rajadura o fenda pasante: Es la separación de los elementos constitutivos de la madera en su dirección longitudinal, tal como la fisura, pero que se propaga a través de la sección de la viga y se manifiesta en dos caras o cantos de la pieza. Para cada rajadura, se midió la longitud total, esto es en las dos caras o cantos adyacentes; en caso de detectarse más de una rajadura, se computó la longitud total como la suma de todas ellas.

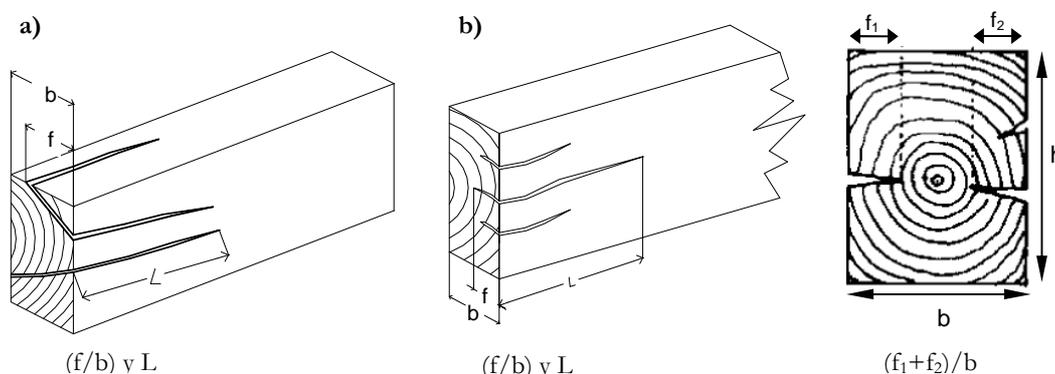


Fig 2. Fisuras o fendas: a) pasante o rajadura; b) no pasante o grieta (adaptado de IRAM 9662-2 Y UNE 56544)

3.2. Grieta o fenda no pasante: Separación de los elementos leñosos de la madera que no alcanza a afectar dos caras de una pieza aserrada, o dos puntos opuestos de la superficie de

Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliotii*/*P. taeda* de procedencia uruguaya

una pieza de sección transversal aproximadamente circular. Son fisuras que se observan solamente en una de las caras o cantos. Se midió la longitud de aquellas grietas que presentaron profundidades mayores a 1cm; en caso de observarse más de una grieta, se computó la longitud total, como la suma de todas ellas.

4. Desviación o inclinación de la fibra

Se considera la desviación general de la fibra, sin incluir la desviación local alrededor de los nudos. Se midió como la desviación media con respecto al eje longitudinal de la pieza. De ser posible se medirá sobre 1 m de longitud ($x=1m$), Fig 3-a.

5. Ancho de los anillos de crecimiento

El ancho de los anillos de crecimiento está asociado a la velocidad de crecimiento del árbol, y generalmente, anillos con mayores anchos se ubican cerca de la médula y son asociados con la presencia de madera juvenil. La madera juvenil suele provocar niveles de deformación inaceptables por lo que algunas normas (UNE 56544, 2011) establecen que esta medición se realice únicamente en estado húmedo, y limitan el ancho del anillo para evitar la ocurrencia de deformaciones excesivas durante el proceso de secado. El ancho máximo del anillo de crecimiento se suele determinar como la relación entre la longitud de una recta trazada perpendicularmente a los anillos de crecimiento y el número de anillos presentes. Dado que esta medición se utiliza para determinar presencia de madera juvenil, se suelen medir los 5 primeros anillos más cercanos a la médula, Fig 3-b.

La base de datos no contó con registro de espesores de anillos de crecimiento, por tanto este parámetro no fue considerado inicialmente en la propuesta de clasificación visual.

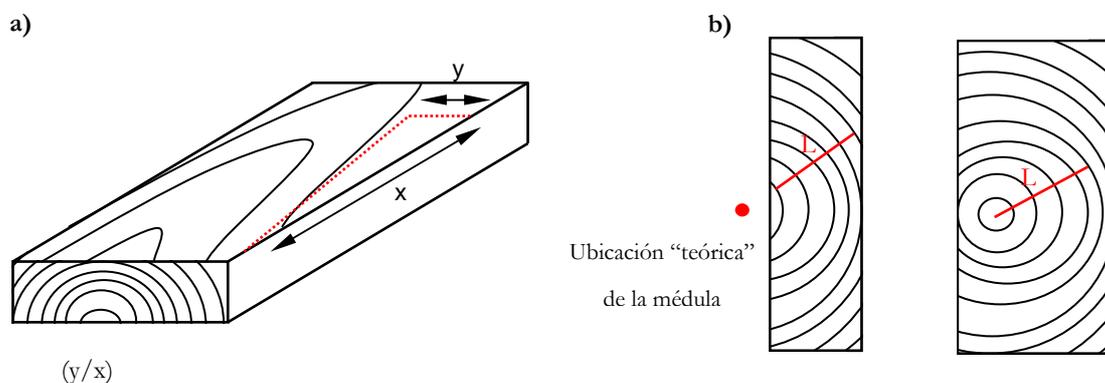


Fig 3. a) Inclinación de la fibra; b) anchura de los anillos de crecimiento

6. Deformaciones de las piezas

Como se mencionó anteriormente, las deformaciones suelen originarse durante el proceso de secado y generalmente están relacionadas con la presencia de madera juvenil. Tipos y forma de medición de las deformaciones son detallados en la Fig 4.

6.1. Arqueadura, combado o curvatura de cara: Deformación máxima observada en la cara de la pieza con respecto a su eje longitudinal. Se registró, la mayor deformación en una longitud de 2,0 m con respecto al eje longitudinal de la pieza, de modo que los límites de deformaciones establecidos pudieran ser comparables con otras normativas internacionales.

6.2. Encorvadura, encorvado o curvatura de canto: Deformación máxima observada en el canto de la pieza con respecto a su eje longitudinal. Se registró la mayor deformación en una longitud de 2,0 m con respecto al eje longitudinal de la pieza.

6.3. Torcedura o alabeo: Deformación máxima de la superficie sobre una longitud de 2,0 m medida desde el extremo de la pieza

6.4. Acanaladura o abarquillado: Deformación máxima medida sobre el ancho (h) de la pieza, y expresada como mm por cada 25 mm del ancho de la pieza.

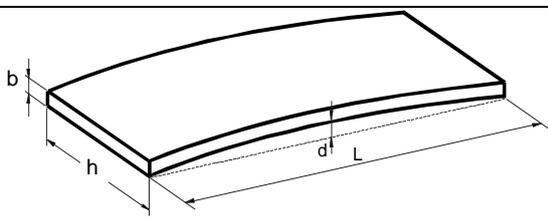
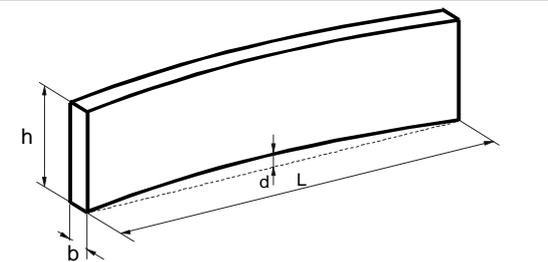
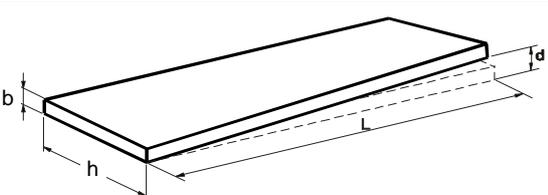
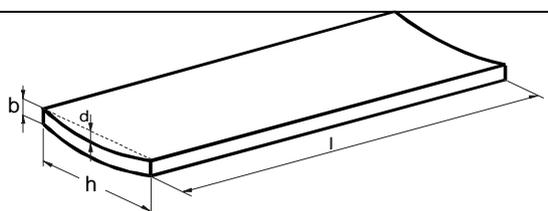
Deformaciones	Medición	Evaluación
Arqueadura o curvatura de cara		Deformación mayor (d) en un largo (L) de 2,0 m con respecto al eje longitudinal (d/L). Para piezas con L<2,0m: L=longitud viga
Encorvadura o curvatura de canto		Deformación mayor (d) en un largo (L) de 2,0 m con respecto al eje longitudinal (d/L). Para piezas con L<2,0m: L=longitud viga
Torcedura o alabeo		Se mide como la deformación máxima (d) de la superficie sobre un largo (L) de 2,0 m desde el extremo la pieza (d/L)
Acanaladura o abarquillado		Se mide como la deformación máxima (d) sobre el ancho (h) de la pieza

Fig 4. Tipos y medición de las deformaciones

7. Gema o arista faltante

Es la superficie redondeada original del tronco del árbol, presente en una arista de la pieza o viga, producto de la forma de corte de las piezas en el aserradero. De existir más de una arista

Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliottii*/*P. taeda* de procedencia uruguaya

faltante, se consideró aquella cuyo ancho (x) y espesor (y) determinó el mayor valor de “g”, Fig 5.

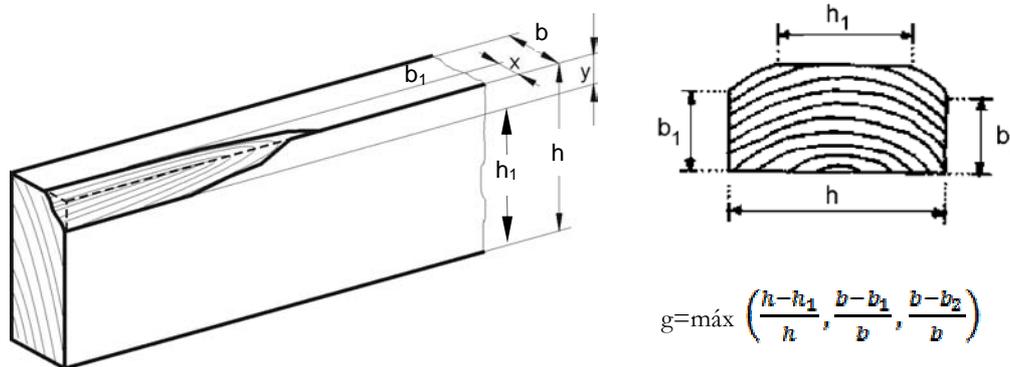


Figura 5. Arista faltante o gema

8. Madera de reacción

La madera de reacción en coníferas se denomina “madera de compresión”; es originada por tensiones “de reacción” que se producen cuando un árbol inclinado, probablemente por efecto del viento, intenta recuperar su posición vertical. Es de difícil evaluación visual, no obstante se suele detectar por la excentricidad de la médula con respecto al eje longitudinal del árbol, por la presencia de anillos de crecimiento muy anchos, cambio de color del tejido leñoso y densidad muy elevada. En caso de detectarse su presencia, se mide las dimensiones (longitud y ancho) del rectángulo donde se inscribe la madera de compresión en la sección transversal de la viga (en las testas), y se expresa como la relación entre la superficie del rectángulo y la superficie de la sección transversal.

En las vigas evaluadas en este trabajo no se observó madera de compresión, por tanto esta singularidad no fue considerada para la propuesta de calidad visual.

9. Bolsas o bolsillos de resina, entrecasco y corteza

Se midió la longitud y el ancho de los bolsillos de resina en la dirección paralela al eje de la pieza. La corteza se midió de manera similar a la de arista faltante.

10. Alteraciones biológicas

10.1. Hongos: En este trabajo no se observó la presencia de hongos cromógenos superficiales tales como la denominada “mancha azul” y tampoco pudrición.

10.2. Insectos: Se evaluó la presencia de galerías de insectos en la madera.

3.3. Metodología de análisis de los parámetros visuales y asignación a una calidad visual

Los parámetros visuales fueron analizados estadísticamente utilizando una computadora y el software MATLAB (Mathworks, 2012), de acuerdo al siguiente procedimiento:

Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliottii*/*P. taeda* de procedencia uruguaya

- 1) Se realizó un análisis preliminar para definir cuáles de los parámetros identificados en la clasificación visual tenían mayor incidencia en los valores de módulo de elasticidad medio, resistencia característica y densidad característica; y de esta manera poder establecer los límites de aceptación de dichos parámetros.
- 2) Se desarrolló un script (una función en el entorno Matlab) para calcular el módulo de elasticidad medio, la resistencia característica y la densidad característica a partir de los datos de los ensayos y de los límites de aceptación definidos.
- 3) Se desarrolló otro script (archivo de procesamiento de órdenes), para evaluar distintas combinaciones de límites de aceptación de parámetros y devolver, para cada combinación, los valores de módulo de elasticidad medio, resistencia característica y densidad característica, junto a la cantidad de rechazos.
- 4) Se eligió la combinación de límites cuyo resultado devolvió la menor cantidad de rechazos.

El análisis preliminar permitió reducir el número de parámetros a considerar en el análisis posterior, ya que se pudo establecer cuáles fueron las singularidades de mayor incidencia en las propiedades de interés de las muestras (módulo de elasticidad medio, resistencia característica y densidad característica).

El script se utilizó para analizar la base de datos de las mediciones y los ensayos, y permitió clasificar cada viga en función de los límites ingresados. Si una viga presentó alguna singularidad mayor al límite aceptable, ésta fue excluida del análisis posterior. Luego de seleccionadas las vigas, el script calculó el módulo de elasticidad medio, la resistencia característica y la densidad característica para cada viga, de acuerdo a lo establecido en EN 408 (UNE EN, 2012) y en EN 384 (UNE EN, 2010), procedimiento que se sintetiza en el capítulo 4. A partir de los resultados anteriores, y con el conjunto de límites aceptables de singularidades, el script permitió asignar una clase resistente a las piezas estudiadas.

Se escribió otro programa que considera todas las combinaciones *razonables* de límites, entendiéndose por razonable todo conjunto de límites de singularidades que podría usarse como propuesta de calidad visual (por ejemplo, que el combado sea un número natural o que el nudo de cara o de canto sea una fracción sencilla). Para cada conjunto se registraron los límites de las singularidades, el módulo de elasticidad medio, la resistencia característica, la densidad característica y la clase resistente asociada. Así, se obtuvo una matriz con más de 2.000.000 de filas correspondientes a combinaciones distintas de estos límites. En la Fig 6 se presenta un diagrama de flujo del proceso.

De estas combinaciones se eligieron las alternativas que daban como resultado la clasificación C14 (no se obtuvo ningún conjunto de límites de singularidades que diera una clase resistente mayor). Entre estas combinaciones se eligieron aquellas con menor porcentaje de rechazo y, entre estas últimas, se tomó el conjunto de límites de singularidades que es presentado en el próximo capítulo.

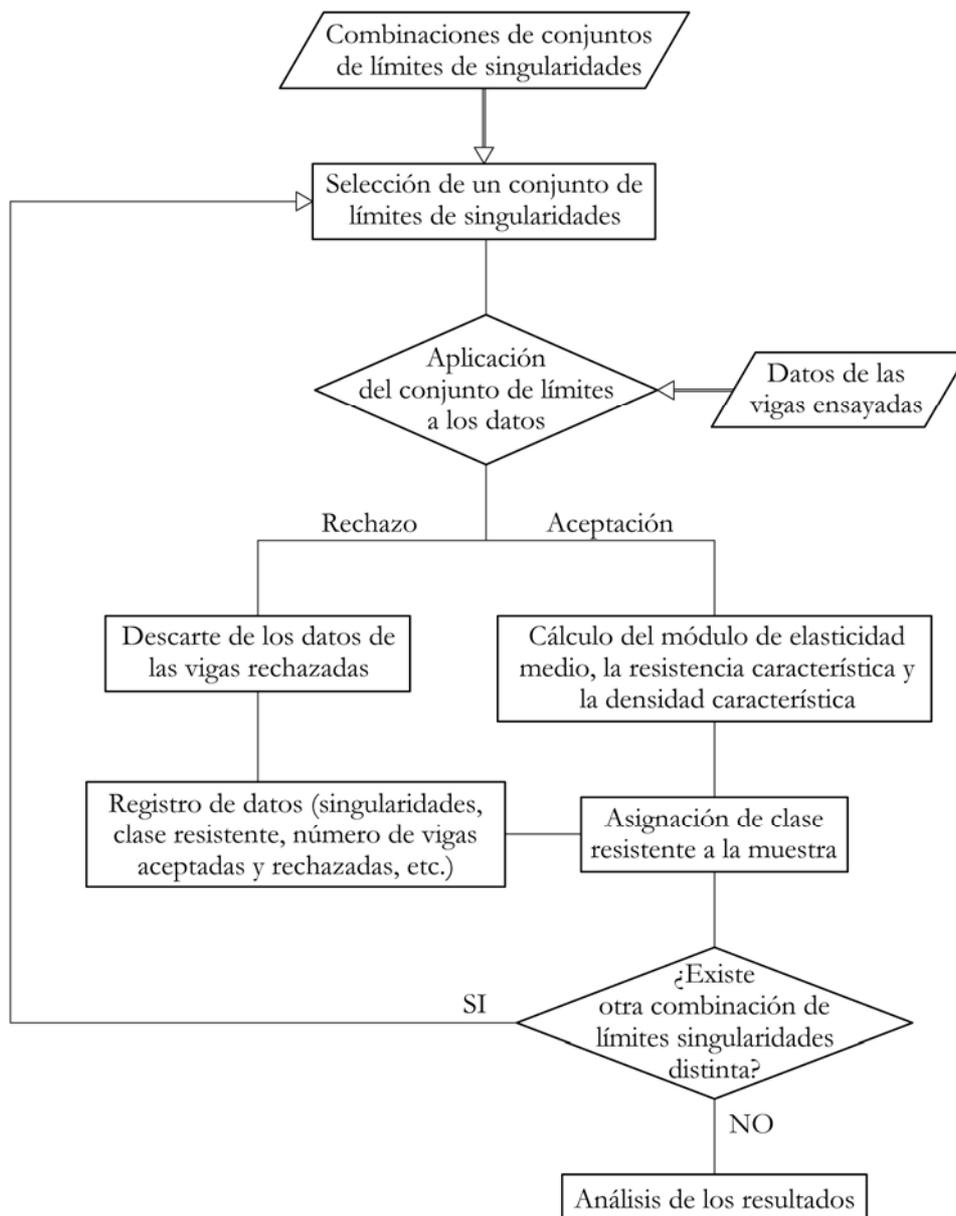


Figura 6. Diagrama de flujo del script.

3.4. Propuesta de calidad visual y límites de las singularidades

La Tabla 3 presenta la propuesta de especificaciones para la clasificación visual de piezas de sección rectangular media (49 x 147 mm) de madera de *Pinus elliotii*/*P. taeda* de procedencia uruguaya en base a las dos muestras analizadas en el presente informe. Esta Tabla no especifica límites de fendas de secado y tampoco galerías de insectos, parámetros visuales no registrados en las vigas estudiadas.

Con el fin de completar las especificaciones de clasificación, la Tabla 4 incluye los límites de los parámetros no registrados, a partir de IRAM 9662-1 (IRAM, 2005) e IRAM 9662-2 (IRAM, 2005).

Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliottii*/*P. taeda* de procedencia uruguaya

Tabla 3. Especificaciones para la clasificación visual de piezas de sección rectangular de *P. elliottii*/*P. taeda* de sección media 49x147 mm en base a las singularidades medidas en Uruguay

CRITERIOS DE CALIDAD	CALIDAD VISUAL EC7
Diámetro de los nudos (d) sobre la cara (h)	$d \leq 2/5 h$
Diámetro de los nudos (d) sobre el canto (b)	$d \leq 2/5 b$
Presencia de médula	Permitida
Dirección de las fibras	Desviación menor que 1:6
Anchura máxima de los anillos de crecimiento	-
Fendas de secado pasantes / Rajaduras	-
Fendas de secado no pasantes / Grietas	-
Fendas/Fisuras de rayo, heladura o abatimiento	No permitidas
Bolsas de resina y entrecasco	$\leq 2 h$
Madera de reacción: compresión	-
Alteraciones biológicas:	
- Azulado	Permitido
- Hongos de pudrición	No permitido
- Galerías de insectos	-
Deformaciones:	
- Curvatura de cara, combado o arqueadura	$\leq 12 \text{ mm}$
- Curvatura de canto o encorvadura	$\leq 9 \text{ mm}$
- Alabeo o torcedura	$\leq 1,5 \text{ mm}$
- Abarquillado o acanaladura	-
- Arista faltante	$\leq 1/5h$

Tabla 4. Especificaciones para la clasificación visual de piezas de sección rectangular de *P. elliottii*/*P. taeda* de dimensiones 49x147 mm

CRITERIOS DE CALIDAD	CALIDAD VISUAL EC7
Diámetro de los nudos (d) sobre la cara (h)	$d \leq 2/5 h$
Diámetro de los nudos (d) sobre el canto (b)	$d \leq 2/5 b$
Presencia de médula	Permitida
Dirección de las fibras	Desviación menor que 1:6
Anchura máxima de los anillos de crecimiento	-
Fendas de secado pasantes / Rajaduras	$\leq 1,0 \text{ m} \text{ ó } \leq (1/4)l$
Fendas de secado no pasantes / Grietas	$\leq 1,5 \text{ m} \text{ ó } \leq (1/2)l$
Fendas/Fisuras de rayo, heladura o abatimiento	No permitidas
Bolsas de resina y entrecasco	$\leq 2 h$
Madera de reacción: compresión	-
Alteraciones biológicas:	
- Azulado	Permitido
- Hongos de pudrición	No permitido
- Galerías de insectos	Diámetro de los orificios $< 2 \text{ mm}$
Deformaciones:	
- Curvatura de cara, combado o arqueadura	$\leq 12 \text{ mm}$
- Curvatura de canto o encorvadura	$\leq 9 \text{ mm}$
- Alabeo o torcedura	$\leq 1,5 \text{ mm}$
- Abarquillado o acanaladura	-
-Arista faltante	$\leq 1/5 h$

Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliottii*/*P. taeda* de procedencia uruguaya

De acuerdo a las reglas de clasificación visual presentadas en la Tabla 4, las piezas pertenecientes a las dos muestras y para la sección definida, fueron clasificadas como madera estructural de *P. elliottii*/*P. taeda* con una calidad visual “**EC7**”. La Tabla 5 muestra el número de piezas clasificadas y el porcentaje de rechazo.

Tabla 5. Número de piezas clasificadas, rechazadas y porcentaje de rechazo en función de la procedencia y sección

Muestra	Procedencia	Edad (años)	Sección (mm)	Longitud (mm)	Clasificadas EC7	Rechazadas	% de rechazo
1	Litoral	25	49x146	2800	58	57	49,6
2	Suroeste	15	49x148	2800	42	104	71,2
Total	-	-	49x147	2800	100	161	61,7

La distribución de las muestras por tamaño de nudo en la sección crítica y deformaciones, así como del resto de singularidades, se detallan en el Anexo B.

4. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y de la densidad

Los ensayos de flexión en cuatro puntos fueron realizados según lo indicado en el apartado 2.2. del presente informe y los valores característicos de las propiedades mecánicas fueron calculados de acuerdo a EN 384 (UNE EN, 2010). Los valores característicos fueron calculados para las piezas clasificadas como EC7 de acuerdo con las especificaciones definidas en el apartado 3.4.

Para la determinación de las propiedades estructurales, se consideraron dos muestras independientes, de dos procedencias diferentes, cada una de edades diferentes, y ambas con la misma sección transversal (49x147 mm). Para estas muestras se calculó el valor medio del módulo de elasticidad (E) y el 5° percentil de los valores de resistencia a flexión (f_m) y de densidad (ρ), según los requerimientos de la norma EN 408 (UNE EN, 2012) y EN 384 (UNE EN, 2010), con los ajustes y asunciones descritos en el apartado 2.2.

4.1. Módulo de elasticidad

Las piezas no ensayadas a las condiciones de referencia, pero con un rango de contenido de humedad entre el 10% y el 18%, fueron ajustadas a un contenido de humedad del 12%. No se detectaron piezas con contenidos de humedad mayores al 18%. Para el cálculo del valor medio del módulo de elasticidad de la muestra, se consideró el valor del módulo de elasticidad global incluyendo el efecto de corte, considerando el valor de G igual a $E_{m,g}/16$ (EN 384), tal y como se define en la ecuación 2 (EN 408).

$$E_{m,g} = \frac{3aL^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gb h} \right)} \quad \text{Ecuación 2}$$

donde,

Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliotii*/P. taeda de procedencia uruguaya

- a es la distancia entre el punto de carga y el apoyo más próximo en un ensayo de flexión.
- L es la luz libre en el ensayo de flexión.
- b es la anchura de la sección transversal.
- h es la altura de la sección.
- G es el módulo de elasticidad transversal, calculado según $E_{m,g}/16$.
- $F_2 - F_1$ es el incremento de carga sobre la línea de regresión, entre el 20% y el 30% de la carga de rotura.
- $w_2 - w_1$ es el incremento de deformación correspondiente a $F_2 - F_1$.

Según esta consideración, no fue necesario realizar el cálculo del valor simple medio del módulo de elasticidad (\bar{E}), definido en la norma EN 384, que incluiría un ajuste al módulo de elasticidad puro o libre de corte.

El valor característico $E_{0,mean}$ fue calculado conforme a la ecuación 3.

$$E_{0,mean} = \frac{\sum \bar{E}_j n_j}{\sum n_j} \quad \text{Ecuación 3}$$

donde,

n_j es el número de probetas por muestra j

\bar{E}_j es el valor medio del módulo de elasticidad para la muestra j (N/mm^2)

4.2. Resistencia a flexión

La resistencia a flexión fue calculada según la ecuación 4 (EN 408).

$$f_m = \frac{3 F_R a}{b h^2} \quad \text{Ecuación 4}$$

donde,

F_R es la carga total de rotura (N)

a es la distancia entre el apoyo y el punto de carga más cercano (mm)

b y h son la base o espesor y el canto o altura, respectivamente.

El 5° percentil de la resistencia a flexión de cada muestra fue calculado ordenando todos los valores de ensayo en orden ascendente. El valor del 5° percentil se tomó como el valor de ensayo para el cual el 5% de los valores fueron menores o iguales. Si no se podía obtener el valor exacto de ensayo, se interpoló entre los dos valores adyacentes.

El 5° percentil de la resistencia a flexión fue ajustado a un canto de 150 mm, dividiendo el valor por el resultado de la ecuación 5 y el valor medio del 5° percentil fue calculado de acuerdo a la ecuación 6.

$$k_h = \left(\frac{150}{h} \right)^{0,2} \quad \text{Ecuación 5}$$

Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliotii*/P. taeda de procedencia uruguaya

$$f_{05} = \frac{\sum f_{05j} n_j}{\sum n_j} \quad \text{Ecuación 6}$$

donde,

n_j es el número de probetas en la muestra j

f_{05j} es el valor del 5° percentil de la resistencia a flexión en la muestra j

Si la media \bar{f}_{05} era superior a 1,2 veces el menor de los valores corregidos de f_{05} , se tomó el valor medio \bar{f}_{05} igual a 1,2 veces el menor de los valores de f_{05} . El valor característico de la resistencia a flexión $f_{m,k}$ fue calculado a partir de la ecuación 7.

$$f_{m,k} = \bar{f}_{05} k_s k_v \quad \text{Ecuación 7}$$

donde,

$k_s=0,83$ (coeficiente corrector en función del número de muestras y del tamaño de la muestra; EN 384:2010)

$k_v=1$ (coeficiente corrector en función de la clasificación visual de la madera; EN 384, 2010)

En base a estas correcciones, se pudo observar que un número de muestras pequeño (en este caso 2) penaliza de forma importante el valor característico de la resistencia a flexión.

4.3. Densidad

Los valores de densidad fueron calculados a partir de una rebanada de la sección de la viga, obtenida de la zona más cercana posible a la rotura y libre de singularidades. En el caso de que el contenido de humedad fuese más alto del 12%, la densidad se disminuyó un 0,5% por cada 1% de diferencia en el contenido de humedad. Si el contenido de humedad era menor al 12%, la densidad se incrementó un 0,5% por cada 1% de diferencia en el contenido de humedad (EN 384). Los valores característicos se calcularon de acuerdo a la ecuación 8.

$$\rho_k = \frac{\sum \rho_{05j} n_j}{\sum n_j} \quad \text{Ecuación 8}$$

donde,

n_j es el número de probetas en la muestra j

ρ_{05j} es el 5° percentil de la densidad en la muestra j

La Tabla 6 presenta los valores característicos, y detalla los coeficientes de corrección aplicados, de la resistencia a flexión, el módulo de elasticidad y la densidad.

Tabla 6. Valores característicos de resistencia a flexión, módulo de elasticidad y densidad

Especie	Procedencia	Clasificación visual	n	h (mm)	b (mm)	H (%)	f_{05max} (N/mm ²)	COV (%)	f_{05} (N/mm ²)	Factor de ajuste	f_{05} ajustado (N/mm ²)	f_{05k} (N/mm ²)	E (kN/mm ²)	Factor de ajuste	Razón	$E_{0,05max}$ (kN/mm ²)	ρ_{05} (Kg/m ³)	Factor de ajuste	Razón	ρ_k (Kg/m ³)
<i>P. elliotii</i>	Litoral	E7	58	146	49	11,9	46,4	37,2	19,4	1,011	19,6		7,84	1,001	CH		368	1,001	CH	
<i>P. taeda</i>	Suroeste	E7	42	148	49	11,2	30,0	30,7	14,7	1,012	14,9		5,99	1,008	CH		321	1,004	CH	
												Promedio				Promedio				Promedio
												14,63				7,04				348

5. Valores característicos y asignación de clase resistente (de acuerdo a prEN 338, 2012)

La Tabla 7 presenta los valores característicos (medios y 5° percentil) de las propiedades de resistencia a flexión, módulo de elasticidad y densidad. La Tabla 8 recoge los tres valores mínimos necesarios para la asignación de la clase resistente a la madera clasificada visualmente como EC7.

Tabla 7. Valores característicos de las propiedades mecánicas de la madera estructural de *Pinus elliottii*/*taeda* de sección 50x147mm

Propiedad	Valor característico
Resistencia característica a flexión ($f_{m,k}$)	14,63 N/mm ²
Módulo de elasticidad medio paralelo a la fibra ($E_{0,mean}$)	7,04 kN/mm ²
5° percentil del módulo de elasticidad paralelo a la fibra ($E_{0,k}$)	No se obtuvieron resultados
Densidad media (ρ_{mean})	426 kg/m ³
5° percentil de la densidad (ρ_k)	348 kg/m ³

Tabla 8. Asignación de clase resistente en función de los valores característicos de módulo de elasticidad, resistencia a flexión y densidad obtenidos de ensayos de vigas a flexión colocadas de canto

Especie	Propiedades			Clase resistente
<i>Pinus elliottii</i> / <i>taeda</i> 50x150 mm	Módulo de elasticidad medio paralelo a la fibra (kN/mm ²)	$E_{0,mean}$	7,04	C14
	5° percentil de la resistencia a flexión (N/mm ²)	$f_{m,k}$	14,63	
	5° percentil de la densidad (kg/m ³)	ρ_k	348	

6. Conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos

6.1. Conclusiones

1. Muestras estudiadas. El presente estudio analizó los datos experimentales de ensayos de flexión de vigas de madera de *Pinus elliottii*/*taeda* provenientes de dos plantaciones comerciales, correspondientes a árboles de 25 años del litoral y de 15 años del suroeste, de Uruguay, respectivamente.

2. Definición de la calidad visual y asignación a una clase resistente. Las muestras fueron analizadas según la normativa europea, asignadas a una calidad visual, y a partir de esta asignación, estimados sus valores característicos. En base a estos valores característicos, se propusieron criterios de clasificación visual para asignar las vigas de madera de pino de procedencia uruguaya a una calidad visual, definida en este trabajo como “EC7”, que se

Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliottii*/P. taeda de procedencia uruguaya

correspondió, para las muestras analizadas, con la clase resistente C14 de la norma EN 338. Los criterios propuestos se resumieron en una Tabla de clasificación.

3. Singularidades medidas. Las singularidades medidas y analizadas para la propuesta de la clasificación visual fueron las siguientes: diámetro de nudo de cara y de canto, presencia de médula, desviación de la fibra, bolsas de resina y entrecasco y deformaciones. Las fendas fueron medidas, pero no se obtuvieron datos suficientes para establecer un límite en base a los resultados obtenidos. En este informe se presenta además la forma de medición de cada singularidad, incluidas aquellas que no fueron consideradas en el presente trabajo.

4. Singularidades que definen la calidad visual. El diámetro de nudo y las deformaciones fueron las dos singularidades que limitaron la calidad visual de las muestras analizadas.

5. Relación entre espesor de anillo de crecimiento y deformación de la madera. En algunas normas de clasificación visual se considera el espesor del anillo de crecimiento sólo cuando la madera se clasifica en húmero con el fin de relacionarlo con los niveles de deformación que puede alcanzar la viga cuando se realice el secado. Cabe destacar que las deformaciones inducidas por el secado generalmente son más dramáticas en piezas de madera juvenil donde el espesor de anillo suele ser mayor que en la madera adulta, comparadas con las que se producen en piezas de madera adulta. Dado que en las probetas analizadas no fue registrado el espesor de anillo, el parámetro de deformación pasó a ser decisivo en la asignación de la calidad visual de la madera de pino de procedencia uruguaya.

6. Relación entre presencia de médula y cantidad de nudos. La presencia de médula en una pieza de madera aserrada induce a suponer la existencia de madera juvenil en la misma, y por tanto, a esperar valores de módulo de elasticidad inferiores a los que podrían encontrarse en piezas libre de médula. Vale señalar que en las dos muestras estudiadas un porcentaje importante de las piezas presentaron médula, habiendo alcanzado aproximadamente el 100% en el caso de la muestra 2 (15 años). Por tanto, si se considera la presencia de médula como un parámetro excluyente en la clasificación visual, una gran cantidad de piezas son rechazadas. Por otro lado, el análisis de límites de cada singularidad, los valores característicos obtenidos y el porcentaje aceptable de rechazo, sugieren que se admita la presencia de médula en las vigas provenientes de cualquiera de las dos muestras estudiadas. Adicionalmente, se observó una relación entre presencia de médula y cantidad y tamaño de nudos: la existencia de médula se pudo asociar con la presencia de nudos de diámetros mayores a los encontrados en piezas sin médula, nudos éstos que limitaron la calidad de la pieza. Esta relación podría explicarse por el efecto que ejerce la poda en el crecimiento del árbol, ya que los nudos suelen manifestarse en las piezas extraídas del centro del tronco del árbol, donde también está presente la médula.

7. Porcentaje de rechazo. Esta propuesta resultó de considerar dos muestras de dos regiones y edades diferentes, incluyendo árboles jóvenes (15 años) con propiedades mecánicas bajas. Según esta clasificación se obtuvo que un 62% de las probetas fueron consideradas como rechazo, a falta de nuevas muestras a ensayar, que podrían modificar tanto los porcentajes de rechazo como alguno de los criterios de clasificación visual.

6.2. Recomendaciones para futuros trabajos

1. Realizar los ensayos físicos y mecánicos de las vigas de acuerdo a la normativa europea (EN 408) para obtener los valores característicos (EN 384) y asignar una clase resistente (EN 338), sin necesidad de estimar coeficientes correctores, para ajustar los valores a los establecidos en cuerpo normativo europeo.

2. Dado que la muestra debe ser representativa de la población y debe representar la procedencia de la madera, las dimensiones y la calidad, se recomienda:

- Aumentar el número de muestras y el número de probetas por muestra, para evitar aplicar coeficientes de corrección que penalicen los valores característicos de la resistencia a flexión de las vigas.
- Ampliar las procedencias a diferentes regiones de Uruguay
- Incluir diferentes secciones de cada procedencia, variando tanto altura (h) como ancho (b). Se plantea la posibilidad de diferenciar entre madera de pequeña escuadría ($b \leq 70\text{mm}$) y de gran escuadría ($b > 70\text{mm}$).
- Tener representadas las dos edades por cada procedencia a efectos de considerar la edad de los árboles en la caracterización.

3. Medir el espesor del anillo de crecimiento en las vigas que se analicen en futuros trabajos. Determinar si existe relación entre dicho espesor y el módulo de elasticidad, con el fin de identificar una variable visual predictora de esta propiedad estructural, la cual en este estudio ha sido una de las limitantes de la calidad de la madera.

Anexo A

RESUMEN DE LOS LÍMITES ADMISIBLES DE LAS SINGULARIDADES EN LA ASIGNACIÓN DE UNA CALIDAD VISUAL ESTRUCTURAL PARA DIFERENTES NORMATIVAS INTERNACIONALES

Tabla A1. Clasificación visual estructural de la madera de coníferas de procedencia española de acuerdo a UNE 56544 (UNE, 2011) y su asignación a clases resistentes según EN 1912 (EN, 2012)

NORMA	UNE 56544 (2011)											
	Coníferas españolas											
NOTAS: 0: no se considera; S/L:sin límite; NP:no permitido; P: permitido	ME-1 PEQUEÑA ESCUADRÍA: b≤70mm			ME-2 PEQUEÑA ESCUADRÍA: b≤70mm				MEG b>70mm				
CRITERIOS DE CALIDAD	PS	PN	PP	PR	PS	PN	PP	PR	PS	PN	PP	PR
Diámetro (d) de nudo sobre la cara (h):	d≤1/5 h				d≤1/2 h				d≤2/3 h			
Diámetro (d) de nudo sobre el canto (b):	d≤1/2 b y d≤30 mm				d≤2/3 b				d≤2/3 b			
Anchura máxima del anillo de crecimiento (mm) cuando se comercializa en húmed:	≤4	≤5	≤8	≤10	S/L				S/L			
Profundidad (f, en mm) de fendas de secado pasantes (clasif. en seco-CH20%):	f≤2/5 b				f≤3/5 b				f≤3/5 b			
Resto de fendas de secado	≤2/5 b				≤3/5 b				≤3/5 b			
Fendas de rayo, heladura y abatimiento:	NP				NP				NP			
Acebolladuras:	NP				NP				NP			
Longitud (mm) bolsas resina y entrecasco	L≤1,5 h				L≤1,5 h				L≤1,5 h			
Madera de reacción: compresión	≤1/5 sección o superf. Externa				≤2/5 sección o superf. Externa				≤2/5 sección o superf. ext.			
Desviación de la fibra	≤1:10 (10%)				≤1:6 (16,7%)				≤1:6(16,7%)			
Longitud de gemas o daños mecánicos	≤1/4 L				≤1/3 L				≤1/3 L			
Dimensión relativa gemas (g)	g≤1/4				g≤1/3				g≤1/3			
Presencia de médula	P(en seco) y NP(en húmedo)				P				P			
Madera juvenil	0				0				0			
Corazón quebradizo	0				0				0			
Alteraciones biológicas: azulado o manchas por hongos	P				P				P			
Muérdago	NP				NP				NP			
Pudrición	NP				NP				NP			
Galerías insectos xilófagos inactivos (diámetro)	NP				NP				NP			
Coloraciones	0				0				0			
Deformaciones máximas:												
Curvatura de cara-bow (long.2m)	≤10mm				≤20mm				≤20mm(CR<C18) y ≤10(CR>C18)			
Curvatura de canto-spring (long.2m)	≤8mm				≤12mm				≤12mm(CR<C18) y ≤8(CR>C18)			
Alabeo-twist (long.2m y por cada 25 mm de h)	≤1mm				≤2mm				≤2mm(CR<C18) y ≤1(CR>C18)			
Abarquillado-cup:	S/L				S/L				S/L			
Densidad	0				0				0			
CLASES RESISTENTES (EN 1912:2012)	C27	C30	C24	C24	C18	C18	C18	C18	C18	C18	C18	C22
NOTA: Nomenclatura de especies: PS (<i>Pinus sylvestris</i>); PN (<i>Pinus nigra</i>); PP (<i>Pinus pinaster</i>); PR (<i>Pinus radiata</i>)												

Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliottii*/P. taeda de procedencia uruguaya

Tabla A2. Clasificación visual estructural de la madera de frondosas de procedencia española de acuerdo a UNE 56546 (UNE, 2013) y de frondosas tropicales prEN 16737 (EN, 2014) y su asignación a clases resistentes según EN 1912 (EN, 2012)

NORMA	UNE 56546 (2013)		prEN 16737 (2014) Tropical hardwoods
	Frondosas españolas		
NOTAS: 0: no se considera; S/L:sin límite: NP:no permitido; P: permitido			
CRITERIOS DE CALIDAD	MEF b≤60 mm y h≤200 mm <i>Eucalyptus globulus</i>	b≤70 mm <i>Castanea sativa</i>	MEF-G b>70mm <i>Castanea sativa</i>
			STH Todas las del Anexo A
Diámetro (d) de nudo sobre la cara (h):	d≤1/3 h	d≤1/2 h	d≤1/2 h
Diámetro (d) de nudo sobre el canto (b):	d≤1/2 b	d≤2/3 b	d≤2/3 b
Anchura máxima del anillo de crecimiento (mm) cuando se comercializa en húmed:	0	S/L	S/L
Profundidad (f, en mm) de fendas de secado pasantes (clasif. en seco-CH20%):	L≤ h	L≤2 h	L≤2 h
Resto de fendas de secado	f≤1/2 b	f≤1/2 b	f≤1/2 b
Fendas de rayo, heladura y abatimiento:	NP	NP	NP
Acebolladuras:	NP	r _{max} <b/3 y ε<b/6	r _{max} <b/3 y ε<b/6
Longitud (mm) bolsas resina y entrecasco	0	0	0
Madera de reacción: compresión	≤1/5 sección o superf. Externa	≤1/5 sección o superf. Ext.	NP
Desviación de la fibra	≤1:10 (10%)	≤1:6(16,7%)	0
Longitud de gemas o daños mecánicos	≤1/4 L	≤1/2 L	S/L
Dimensión relativa gemas (g)	g≤1/4	g≤1/4	g≤2/3
Presencia de médula	NP	P	P
Madera juvenil			P si b y h son ≥ 200mm
Corazón quebradizo			NP
Alteraciones biológicas: azulado o manchas por hongos	0	0	0
Muérdago	0	0	0
Pudrición	NP	NP	NP
Galerías insectos xilófagos inactivos (diámetro)	≤2mm	≤2mm	≤2mm
Coloraciones	0	sí rojiza/atabacado	sí rojiza/atabacado
Deformaciones máximas:			
Curvatura de cara-bow (long.2m)	≤10mm	≤20mm	≤10mm
Curvatura de canto-spring (long.2m)	≤8mm	≤12mm	≤8mm
Alabeo-twist (long.2m y por cada 25 mm de h)	≤1mm	≤2mm	≤1mm
Abarquillado-cup:	≤1/25 h	S/L	S/L
Densidad	0	0	0
CLASES RESISTENTES (EN 1912, 2012)	D40	- todavía sin incluir	- todavía sin incluir

Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliottii*/P. taeda de procedencia uruguaya

Tabla A3. Clasificación visual estructural de la madera de coníferas de procedencia argentina (IRAM 9662-3 (IRAM, 2005) y 9662-1 (IRAM, 2005) y su asignación a clases resistentes según estimaciones de acuerdo EN 338 (UNE EN, 2010)

NORMA	IRAM 9662-3 (2005) <i>P. taeda/P.elliottii</i> Argentina		IRAM 9662-1 (2005) <i>Araucaria angustifolia</i> Argentina	
	CLASE 1	CLASE 2	CLASE 1	CLASE 2
NOTAS: 0: no se considera; S/L:sin límite: NP:no permitido; P: permitido				
CRITERIOS DE CALIDAD				
Diámetro (d) de nudo sobre la cara (h):	≤1/3	≤2/3	≤1/3	≤2/3
Diámetro (d) de nudo sobre el canto (b):	≤1/3	≤2/3	≤1/3	≤2/3
Anchura máxima del anillo de crecimiento (mm) cuando se comercializa en húmed:	<10mm	<15mm	0	0
Profundidad (f, en mm) de fendas de secado pasantes (clasif. en seco-CH20%):	≤1m y ≤1/2L ≤1,5m y	≤1m y ≤1/2L ≤1,5m y	P en extremos: L<h	≤1m y ≤1/4L. En extr:L<2h
Resto de fendas de secado	≤1/2L	≤1/2L	≤1m y ≤1/4L	≤1,5m y ≤1/2L
Fendas de rayo, heladura y abatimiento:	0	0	0	0
Acebolladuras:	0	0	0	0
Longitud (mm) bolsas resina y entrecasco	se limitan por analogía a otra característica similar		se limitan por analogía a otra característica similar	
Madera de reacción: compresión	≤2/5	≤3/5	≤1/5	≤3/5
Desviación de la fibra	≤1:9	≤1:7	≤1:12	≤1:7
Longitud de gemas o daños mecánicos	S/L		S/L	
Dimensión relativa gemas (g)	g≤1/3		g≤1/4	g≤1/3
Presencia de médula	NP	P	NP	
Madera juvenil	0	0	0	0
Corazón quebradizo	0	0	0	0
Alteraciones biológicas: azulado o manchas por hongos	P (Hongos cromógenos)		P (Hongos cromógenos)	
Muérdago	0	0	0	0
Pudrición	NP		NP	
Galerías insectos xilófagos inactivos (diámetro)	≤2mm		≤2mm	
Coloraciones	0	0	0	0
Deformaciones máximas:				
Curvatura de cara-bow (long.2m)	<12mm		<8mm	<12mm
Curvatura de canto-spring (long.2m)	<12mm		<8mm	<12mm
Alabeo-twist (long.2m y por cada 25 mm de h)	<2mm		<1mm	<2mm
Abarquillado-cup:	S/L		S/L	
Densidad	0		NP si el valor es excepcionalmente bajo	
CLASES RESISTENTES (EN 1912, 2012)	C18	No estructural	C30	C14
Valores característicos de ensayo:	CR estimada s/ EN 338	CR estimada s/ EN 338	CR estimada s/ EN 338	CR estimada s/ EN 338
<i>Resistencia a flexión (fm,k)</i>	18	11	30	14
<i>Resistencia a tracción (ft,0,k)</i>	11	7	18	8
<i>Módulo de elasticidad (Em)</i>	12000	7000	17000	11500
<i>Densidad (ρk)</i>	420	390	460	400

Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliottii*/P. taeda de procedencia uruguaya

Tabla A4. Clasificación visual estructural de la madera de *E. grandis* de procedencia argentina según IRAM 9662-2 (IRAM, 2005) y su asignación a clases resistentes según estimaciones de acuerdo a la norma EN 338 (EN, 2010)

NORMA	IRAM 9662-2 (2005)	
	<i>Eucalyptus grandis</i> Argentina	
NOTAS: 0: no se considera; S/L:sin límite; NP:no permitido; P: permitido	CLASE 1	CLASE 2
CRITERIOS DE CALIDAD		
Diámetro (d) de nudo sobre la cara (h):	≤1/3	≤2/3
Diámetro (d) de nudo sobre el canto (b):	≤1/3	≤2/3
Anchura máxima del anillo de crecimiento (mm) cuando se comercializa en húmed:	0	0
Profundidad (f, en mm) de fendas de secado pasantes (clasif. en seco-CH20%):	P en extremos: L<h ≤1m y ≤1/4L	
Resto de fendas de secado		
Fendas de rayo, heladura y abatimiento:	0	0
Acebolladuras:	0	0
Longitud (mm) bolsas resina y entrecasco	se limitan por analogía a otra característica similar	
Madera de reacción: compresión	≤1/5	
Desviación de la fibra	≤1:12	≤1:9
Longitud de gemas o daños mecánicos	S/L	
Dimensión relativa gemas (g)	g≤1/4	
Presencia de médula	NP	
Madera juvenil	0	0
Corazón quebradizo	0	0
Alteraciones biológicas: azulado o manchas por hongos	P (Hongos cromógenos)	
Muérdago	0	0
Pudrición	NP	
Galerías insectos xilófagos inactivos (diámetro)	≤2mm	
Coloraciones	0	0
Deformaciones máximas:		
Curvatura de cara-bow (long.2m)	<8mm	
Curvatura de canto-spring (long.2m)	<8mm	
Alabeo-twist (long.2m y por cada 25 mm de h)	<1mm	
Abarquillado-cup:	S/L	
Densidad	NP si el valor es excepcionalmente bajo	
CLASES RESISTENTES (EN 1912, 2012)	C30	C14
Valores característicos de ensayo:	CR estimada s/ EN	CR estimada s/ EN
	338	338
<i>Resistencia a flexión (fm,k)</i>	30	24
<i>Resistencia a tracción (ft,0,k)</i>	18	14
<i>Módulo de elasticidad (Em)</i>	14000	12500
<i>Densidad (ρk)</i>	430	430

NOTA: Las normas IRAM 9662-1 e IRAM 9662-3 fueron diseñadas solamente para tablas flexionadas de plano. La IRAM 9662-2 abarca todas las secciones estructurales.

Anexo B

DISTRIBUCIONES DE MUESTRAS DE NUDOS, ALABEOS Y DENSIDAD

Distribución de todas las vigas ensayadas

Gráfico B1. Histograma de frecuencia de combado para el muestreo de procedencia del Litoral.

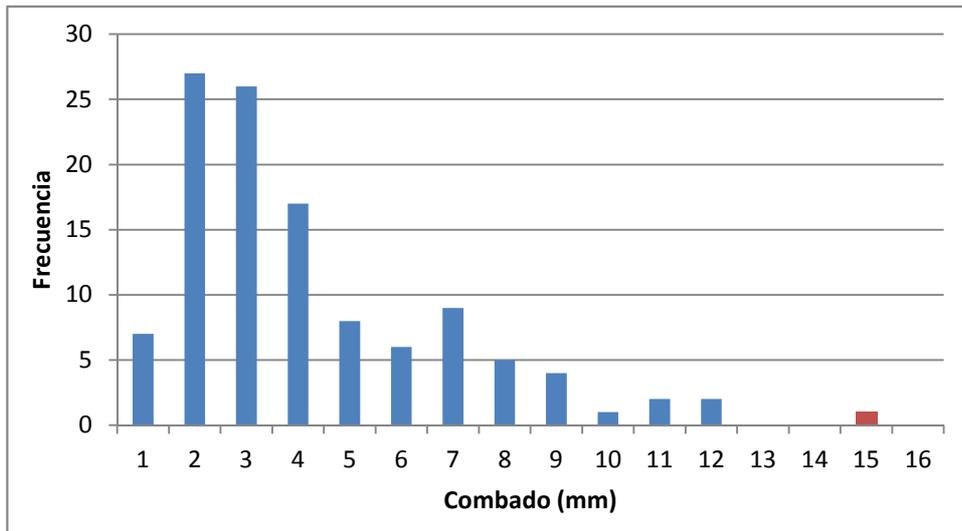
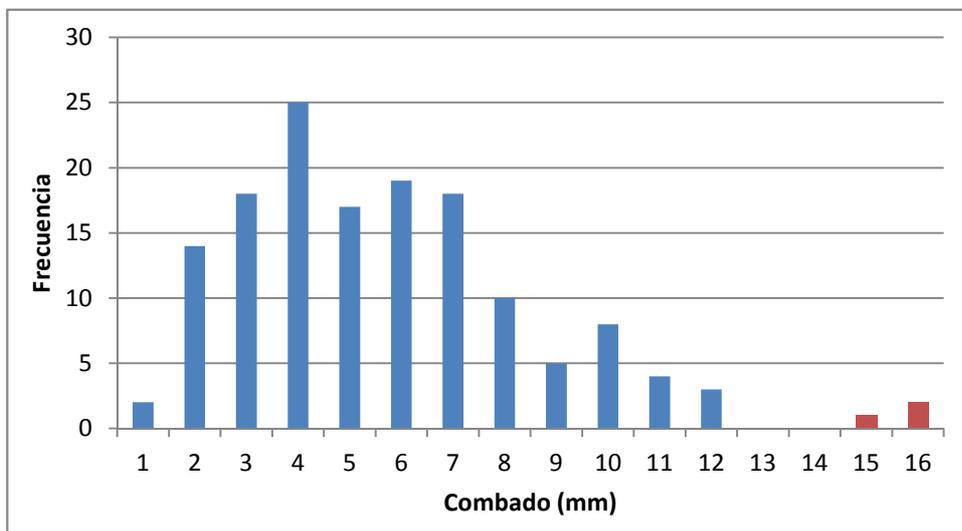


Gráfico B2. Histograma de frecuencia de combado para el muestreo de procedencia del Suroeste.



Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliotii*/P. taeda de procedencia uruguaya

Gráfico B3. Histograma de frecuencia de combado para los dos muestreos combinados.

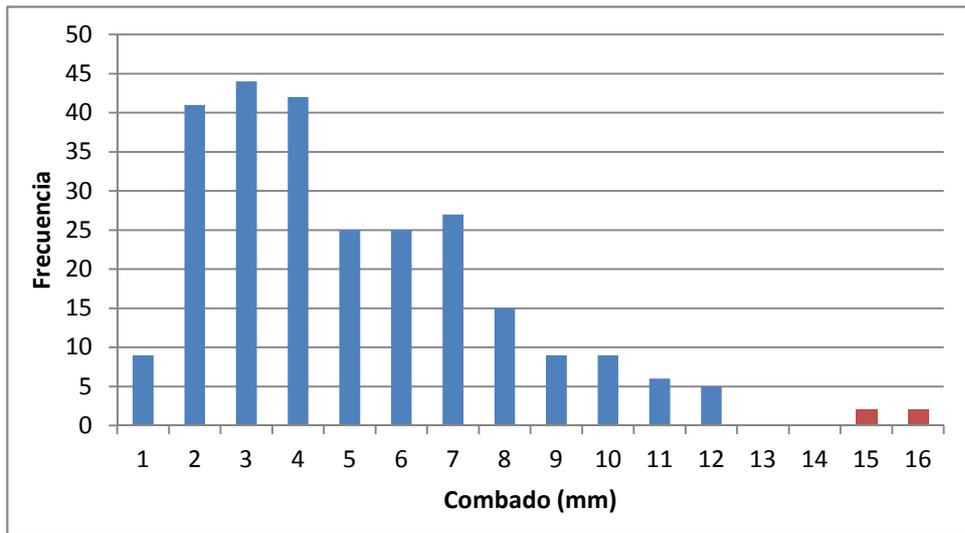


Gráfico B4. Histograma de frecuencia de encorvado para el muestreo de procedencia del Litoral.

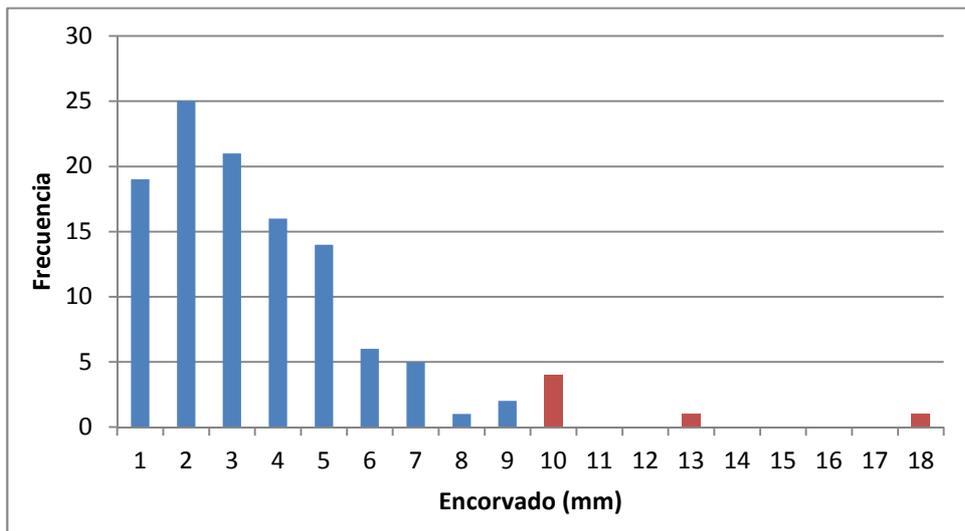
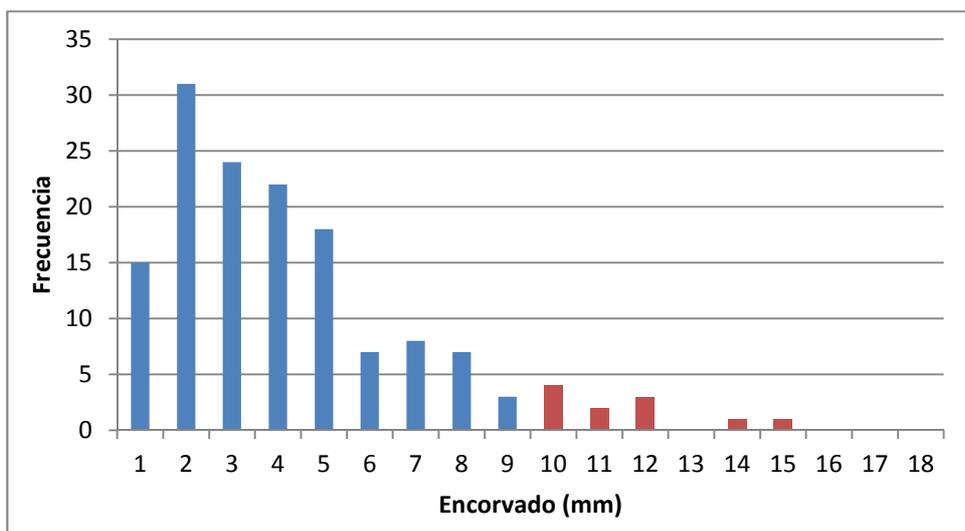


Gráfico B5. Histograma de frecuencia de encorvado para el muestreo de procedencia del Suroeste.



Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliotii*/*P. taeda* de procedencia uruguaya

Gráfico B6. Histograma de frecuencia de encorvado para los dos muestreos combinados.

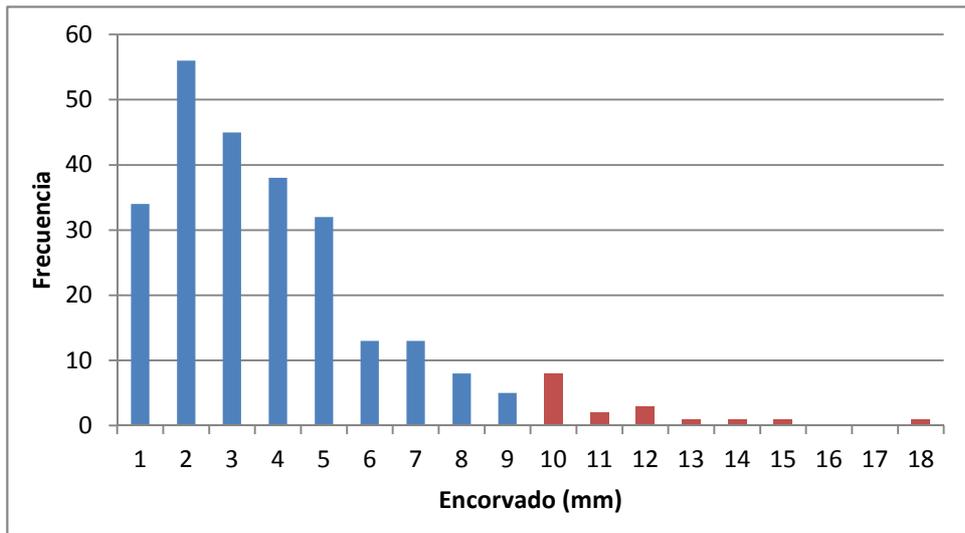


Gráfico B7. Histograma de frecuencia de torcedura para el muestreo de procedencia del Litoral.

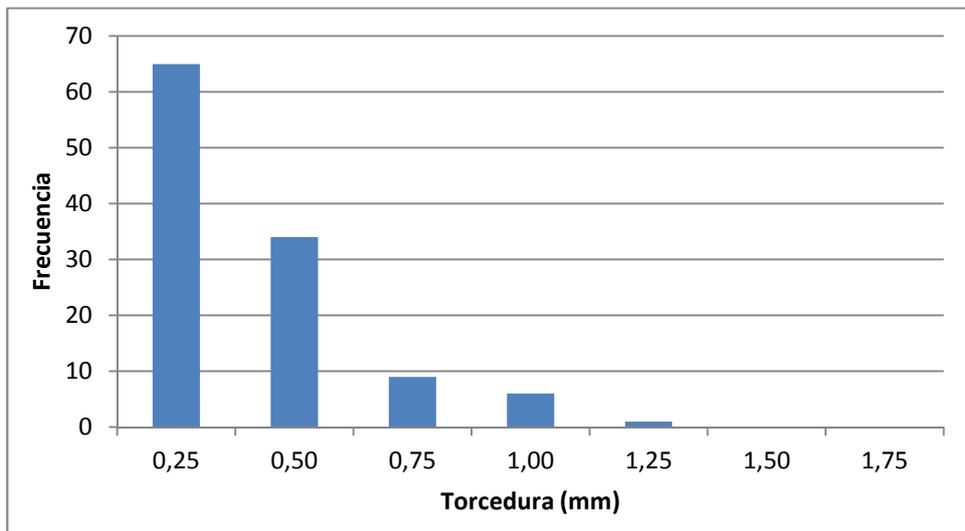
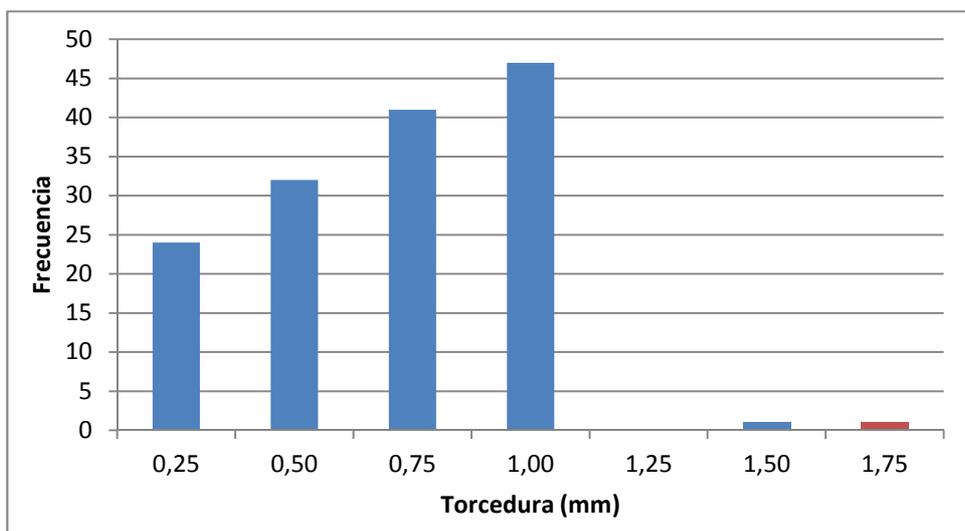


Gráfico B8. Histograma de frecuencia de torcedura para el muestreo de procedencia del Suroeste.



Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliottii*/*P. taeda* de procedencia uruguaya

Gráfico B9. Histograma de frecuencia de torcedura para los dos muestreos combinados.

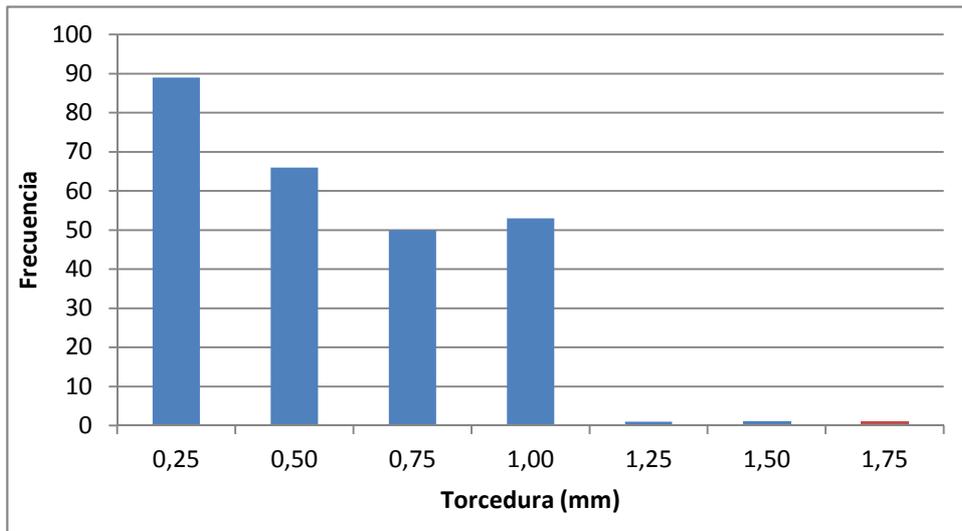


Gráfico B10. Histograma de frecuencia de arista faltante para el muestreo de procedencia del Litoral.

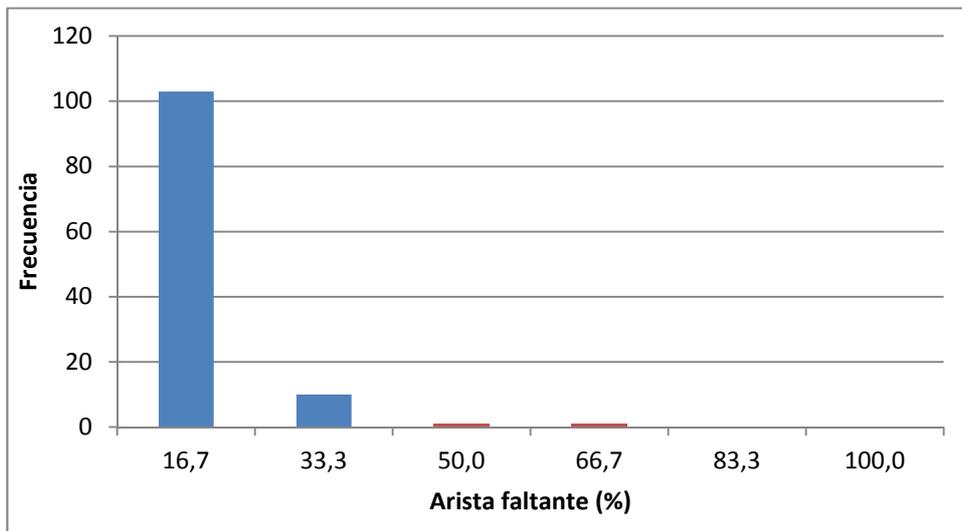
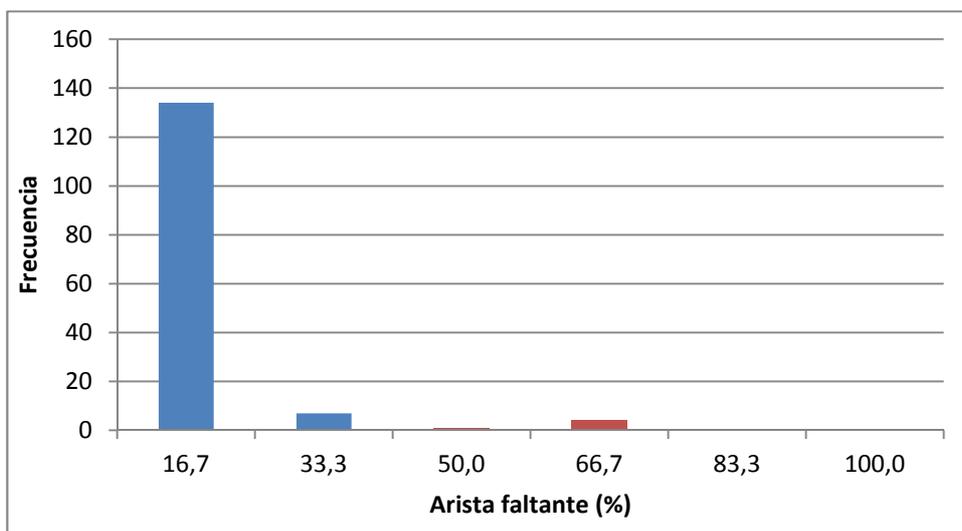


Gráfico B11. Histograma de frecuencia de arista faltante para el muestreo de procedencia del Suroeste.



Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliottii*/P. taeda de procedencia uruguaya

Gráfico B12. Histograma de frecuencia de arista faltante para los dos muestreos combinados.

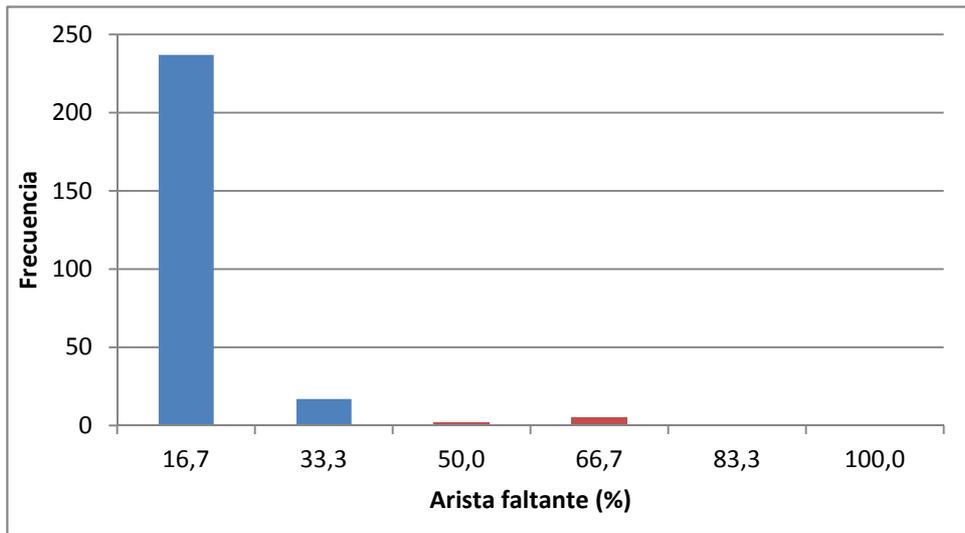


Gráfico B13. Histograma de frecuencia de nudo cara para el muestreo de procedencia del Litoral.

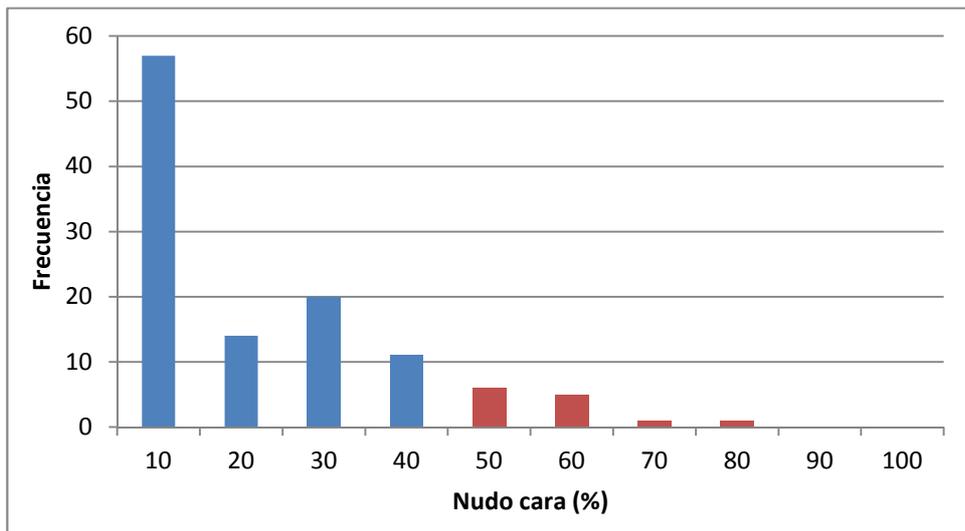
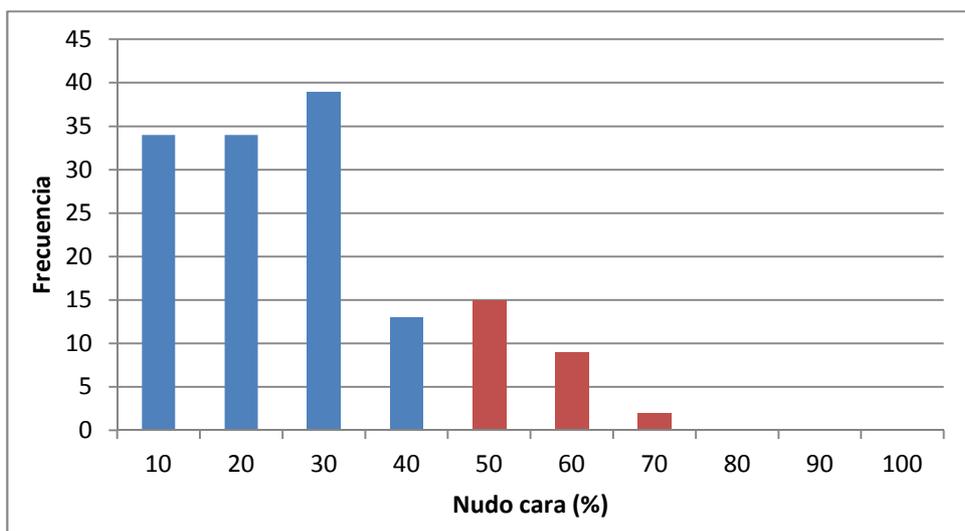


Gráfico B14. Histograma de frecuencia de nudo cara para el muestreo de procedencia del Suroeste.



Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliotii*/*P. taeda* de procedencia uruguaya

Gráfico B15. Histograma de frecuencia de nudo cara para los dos muestreos combinados.

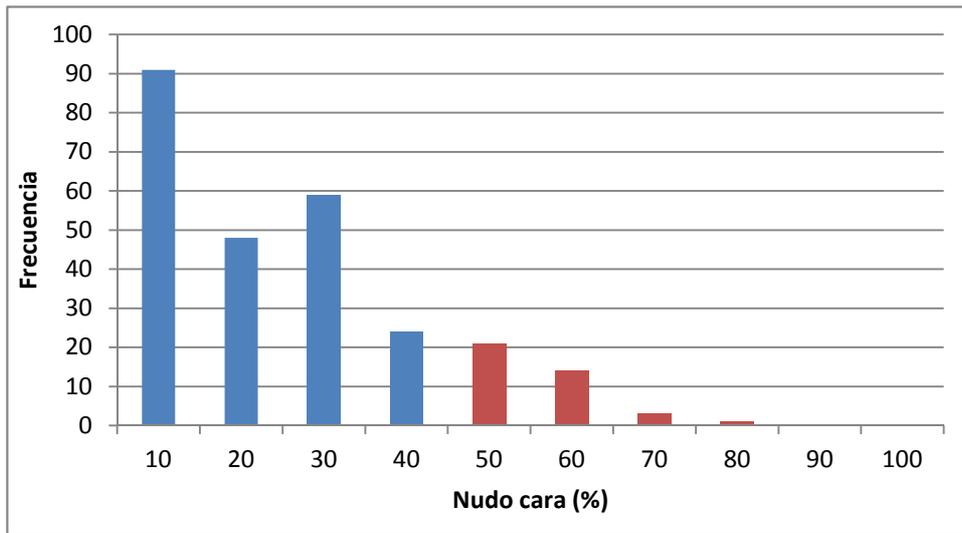


Gráfico B16. Histograma de frecuencia de nudo canto para el muestreo de procedencia del Litoral.

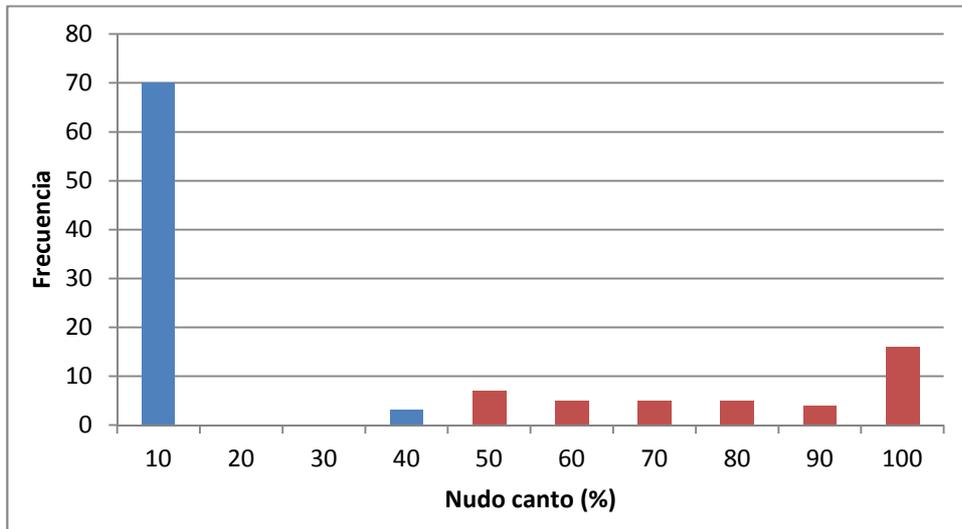
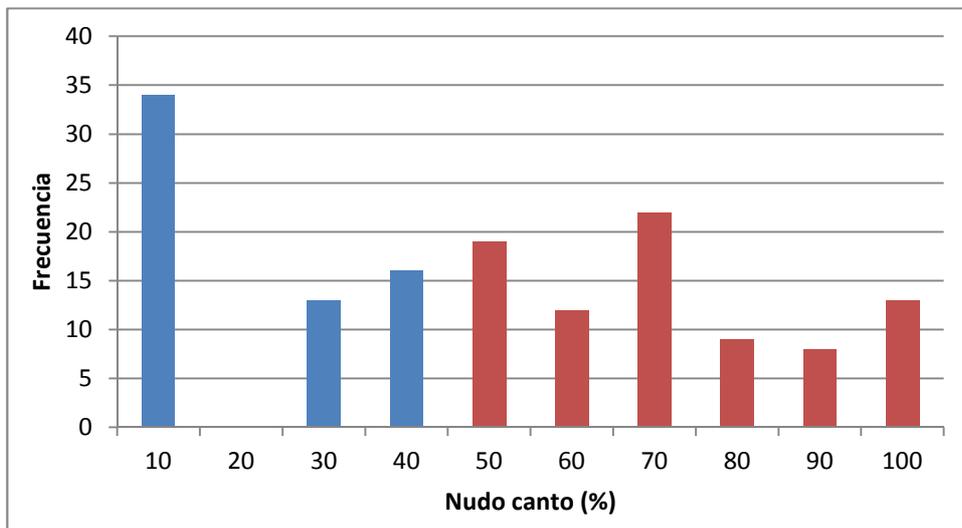
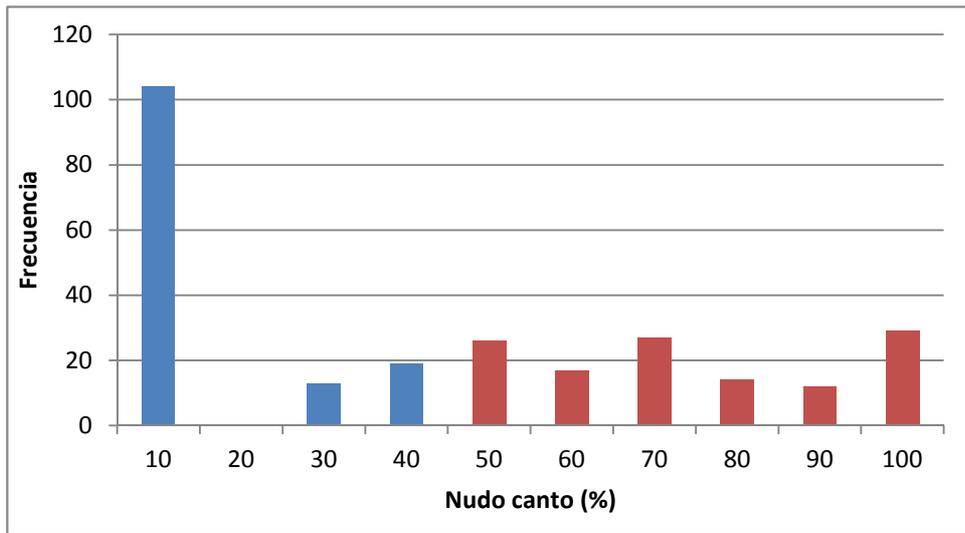


Gráfico B17. Histograma de frecuencia de nudo canto para el muestreo de procedencia del Suroeste.



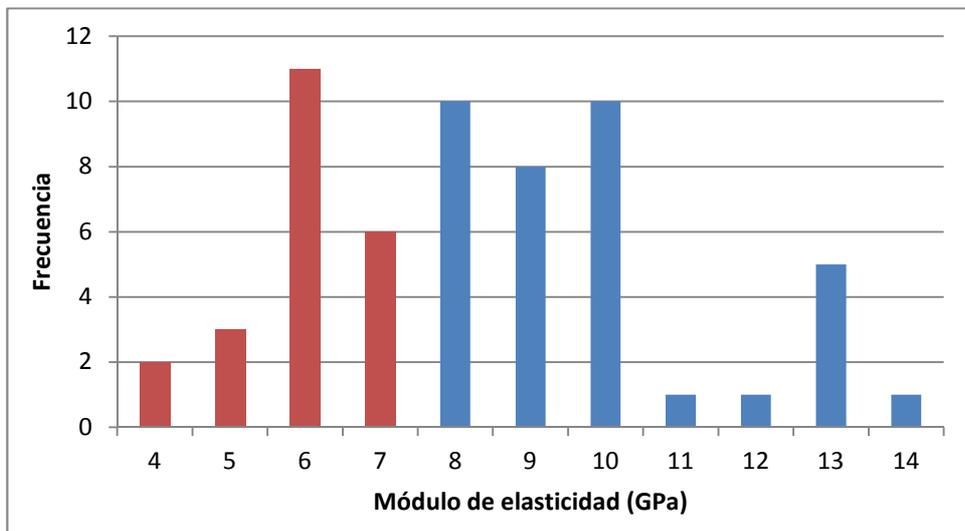
Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliottii*/P. taeda de procedencia uruguaya

Gráfico B18. Histograma de frecuencia de nudo canto para los dos muestreos combinados.



Distribución de las vigas clasificadas

Gráfico B19. Histograma de módulo de elasticidad para el muestreo del Litoral clasificado.



Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliottii*/*P. taeda* de procedencia uruguaya

Gráfico B20. Histograma de módulo de elasticidad para el muestreo del Suroeste clasificado.

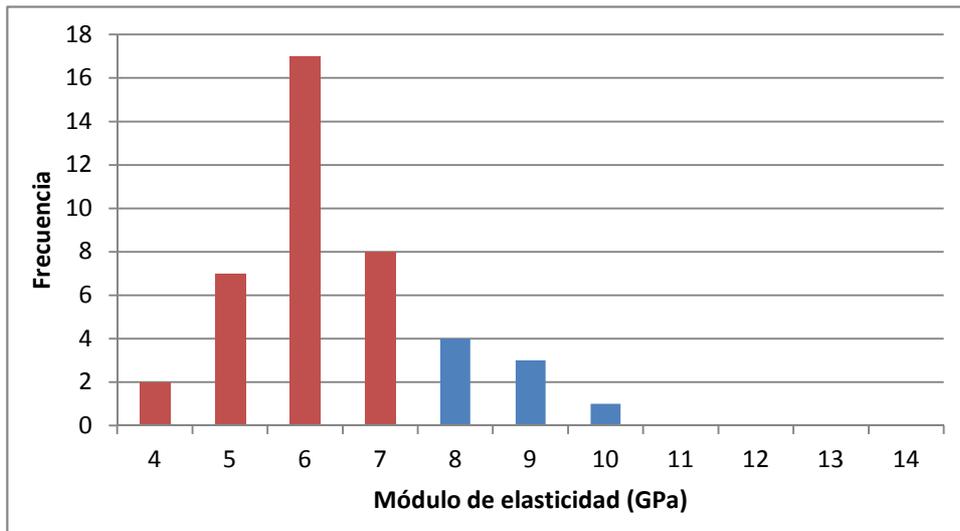


Gráfico B21. Histograma de módulo de elasticidad para todas las vigas clasificadas.

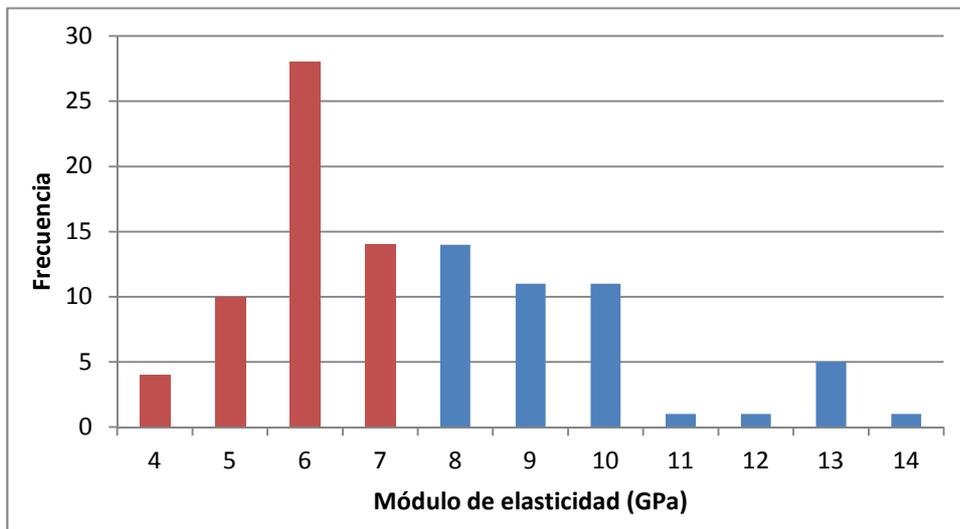
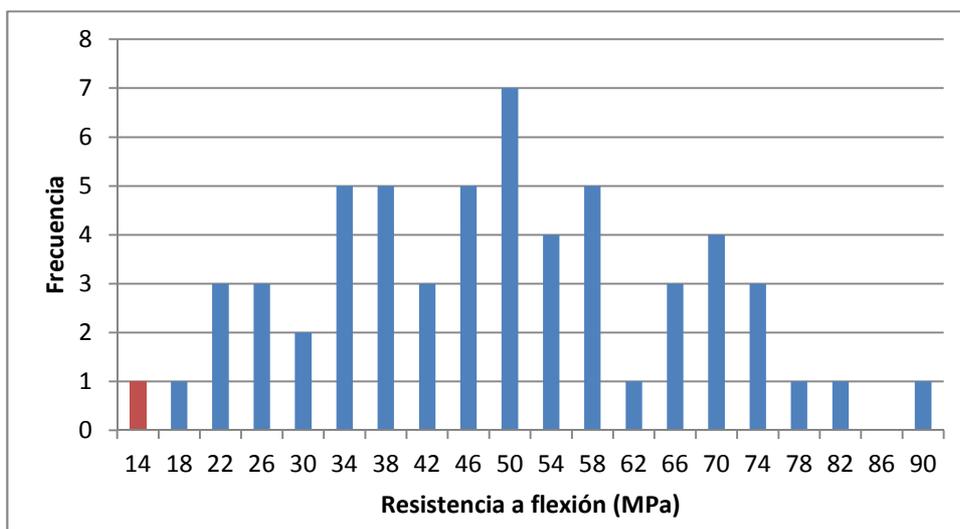


Gráfico B22. Histograma de resistencia a flexión para el muestreo del Litoral clasificado.



Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliotii*/*P. taeda* de procedencia uruguaya

Gráfico B23. Histograma de resistencia a flexión para el muestreo del Suroeste clasificado.

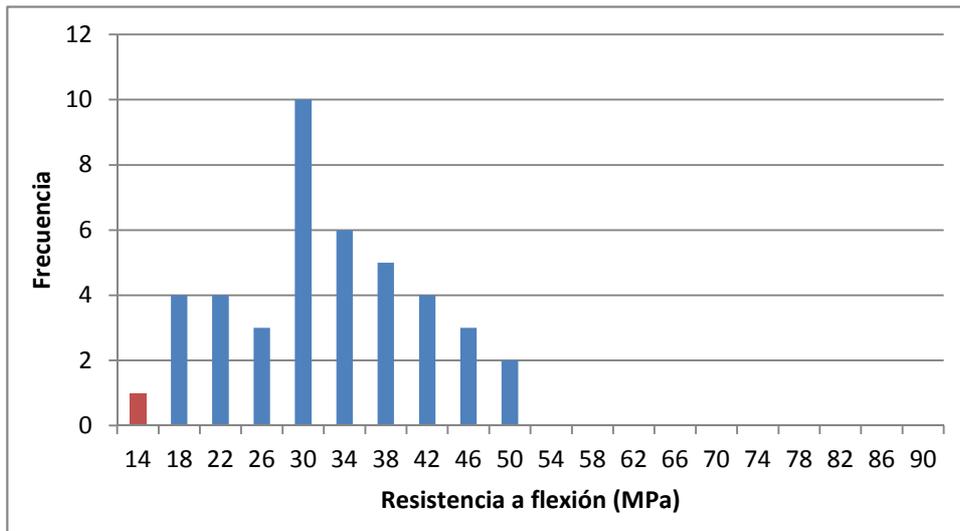


Gráfico B24. Histograma de resistencia a flexión para todas las vigas clasificadas.

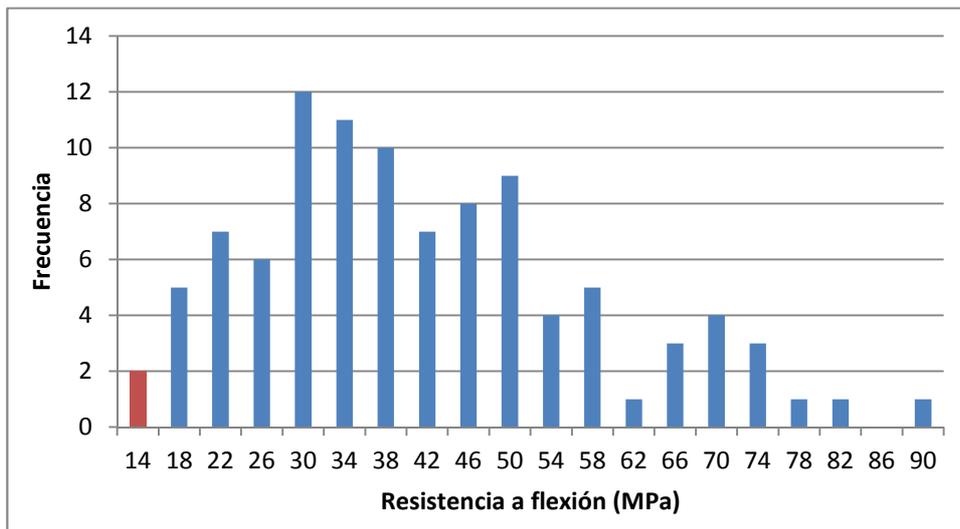
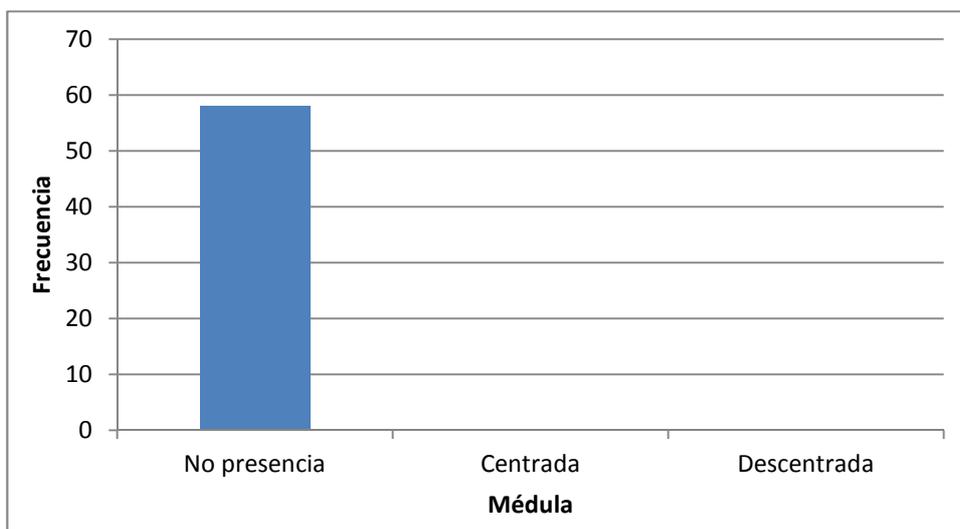


Gráfico B25. Histograma de presencia de médula para el muestreo del Litoral clasificado.



Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliottii*/*P. taeda* de procedencia uruguaya

Gráfico B26. Histograma de presencia de médula para el muestreo del Suroeste clasificado.

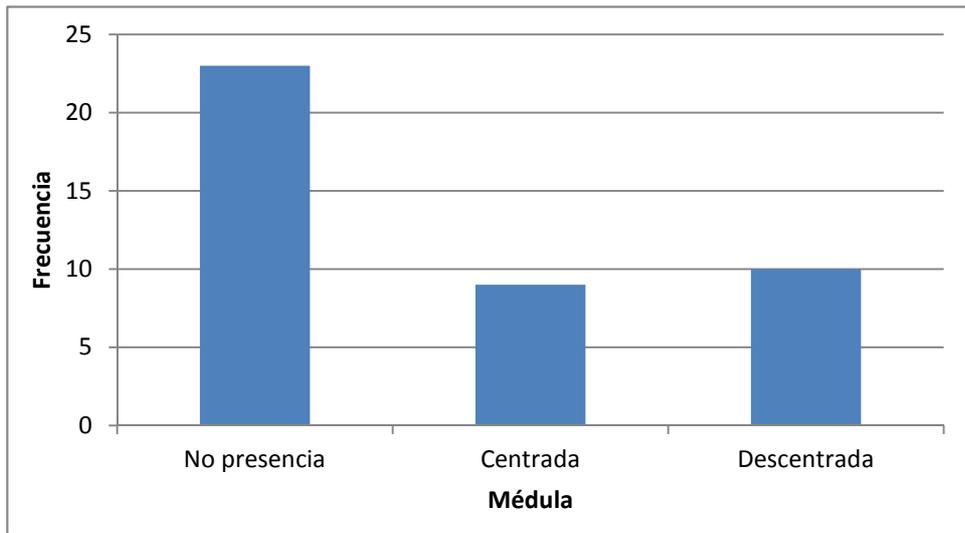


Gráfico B27. Histograma de presencia de médula para todas las vigas clasificadas.

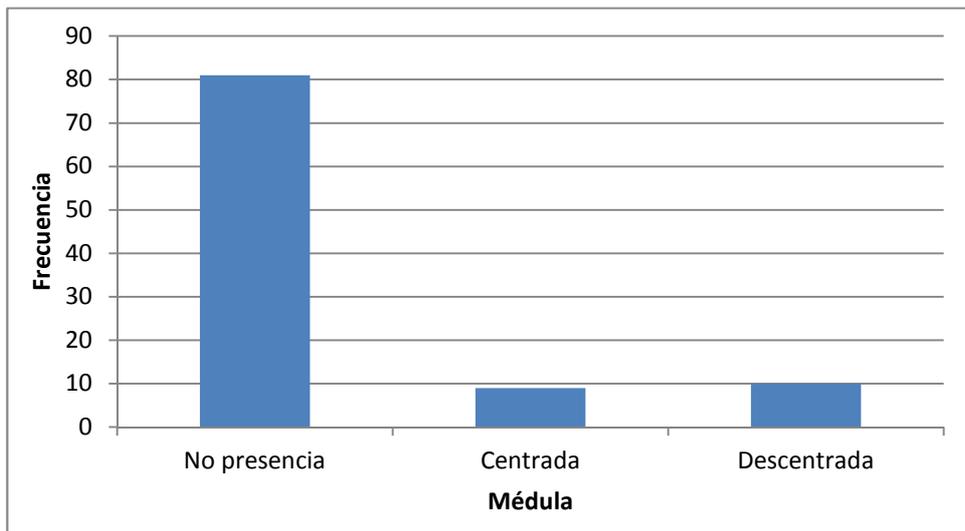
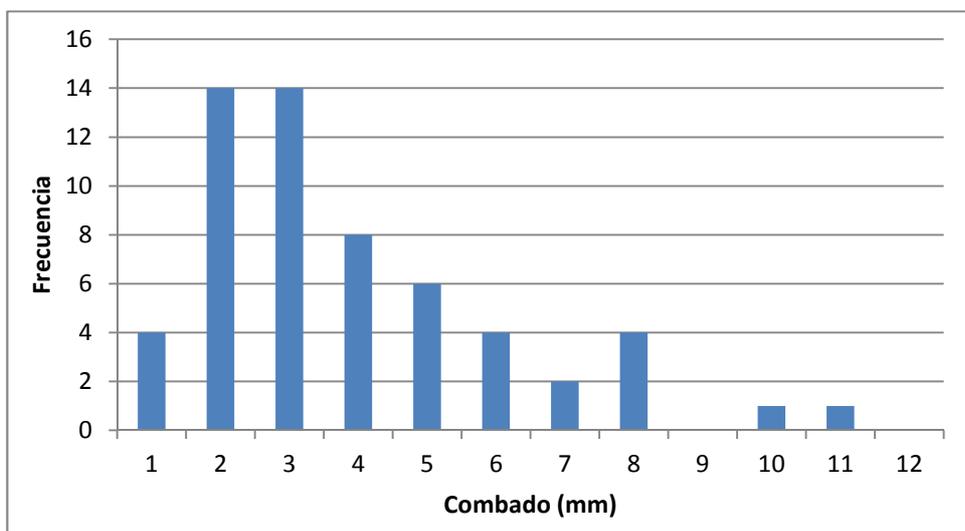


Gráfico B28. Histograma de combado para el muestreo del Litoral clasificado.



Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliottii*/*P. taeda* de procedencia uruguaya

Gráfico B29. Histograma de combado para el muestreo del Suroeste clasificado.

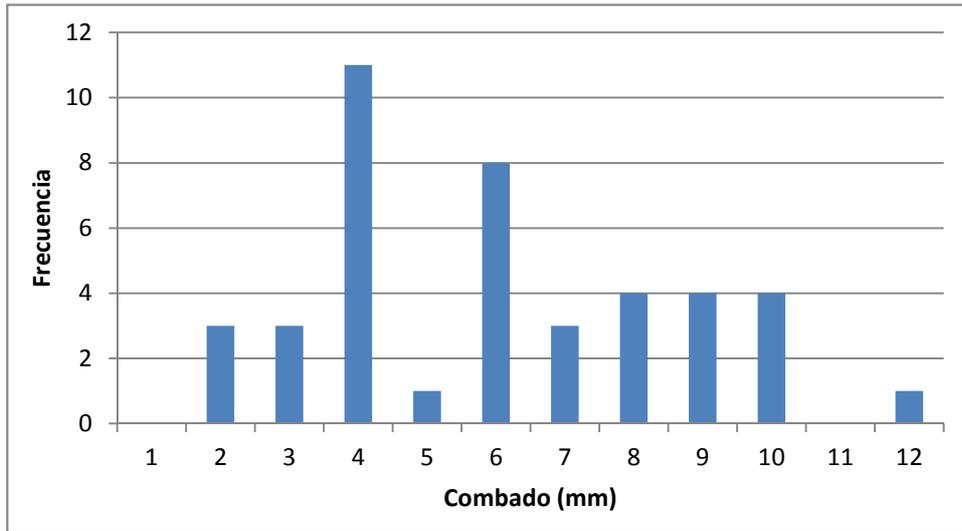


Gráfico B30. Histograma de combado para todas las vigas clasificadas.

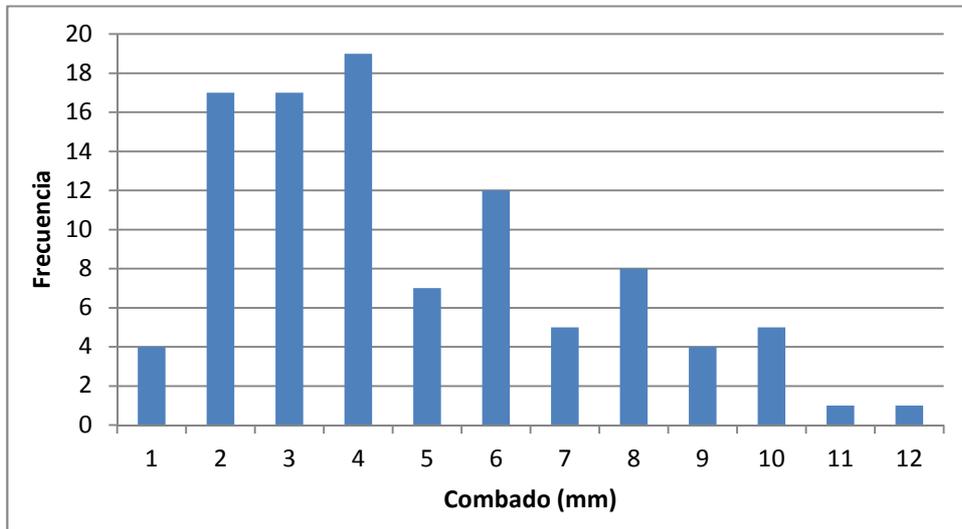
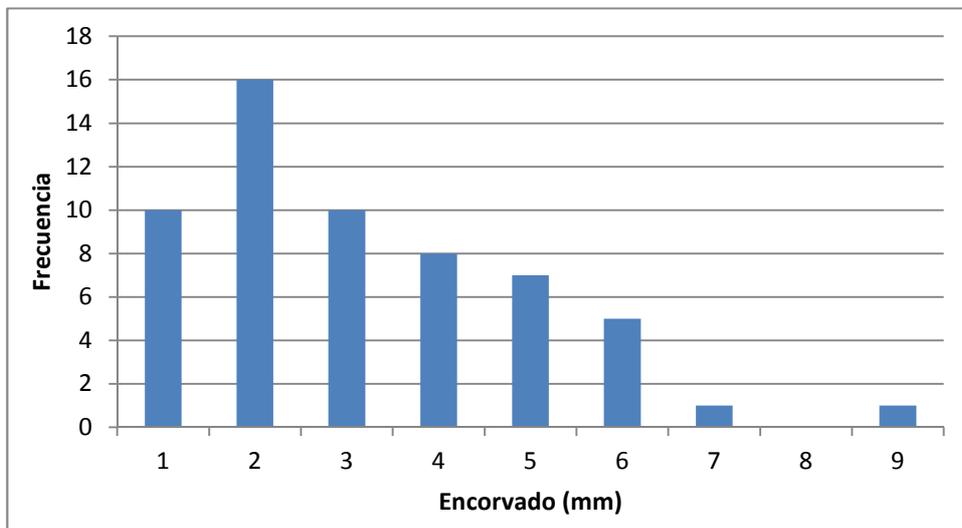


Gráfico B31. Histograma de encorvado para el muestreo del Litoral clasificado.



Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliottii*/P. taeda de procedencia uruguaya

Gráfico B32. Histograma de encorvado para el muestreo del Suroeste clasificado.

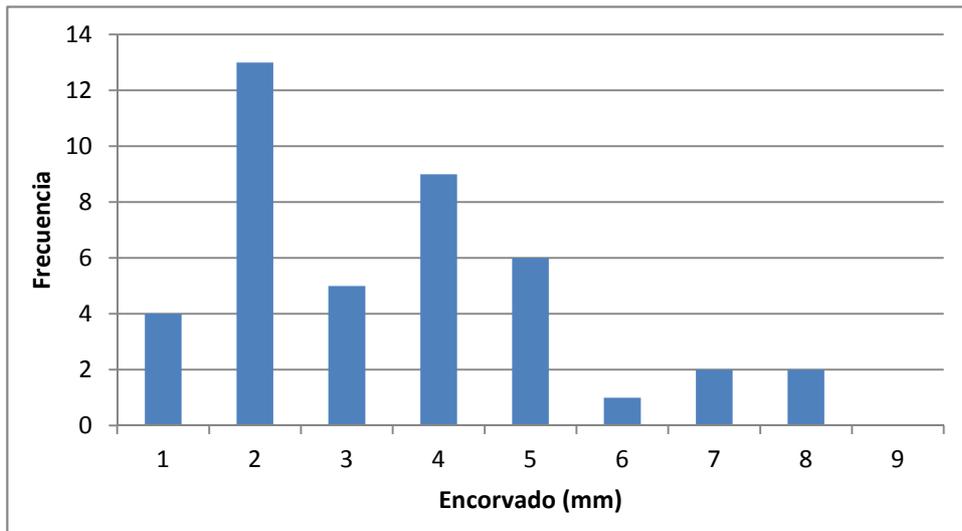


Gráfico B33. Histograma de encorvado para todas las vigas clasificadas.

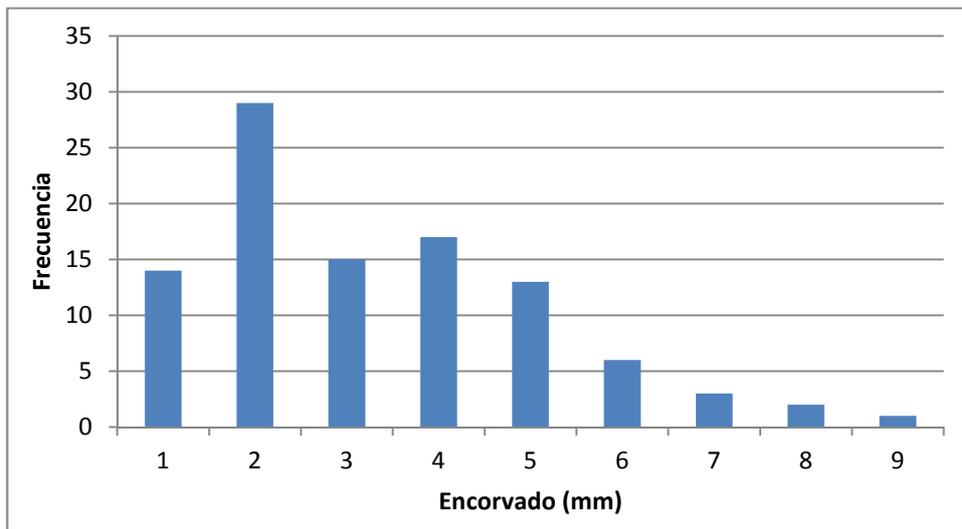
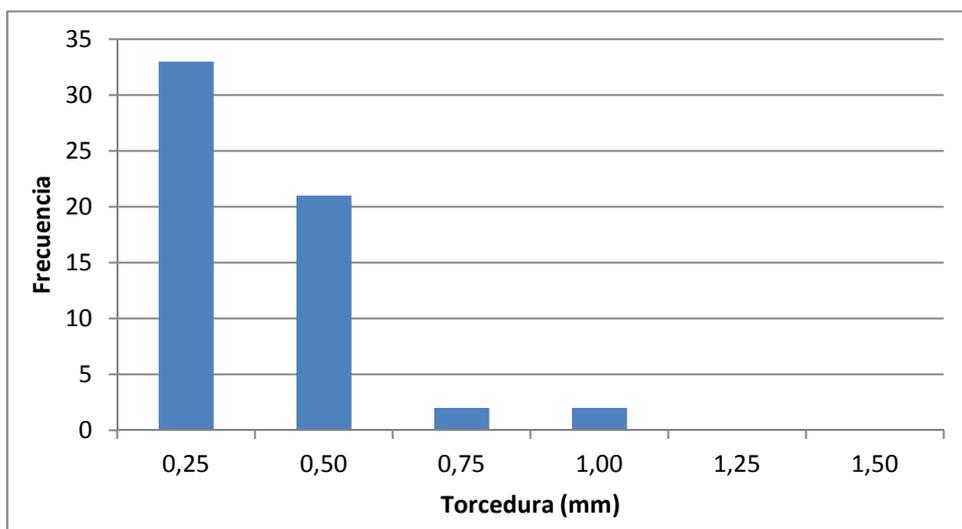


Gráfico B34. Histograma de torcedura para el muestreo del Litoral clasificado.



Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliottii*/*P. taeda* de procedencia uruguaya

Gráfico B35. Histograma de torcedura para el muestreo del Suroeste clasificado.

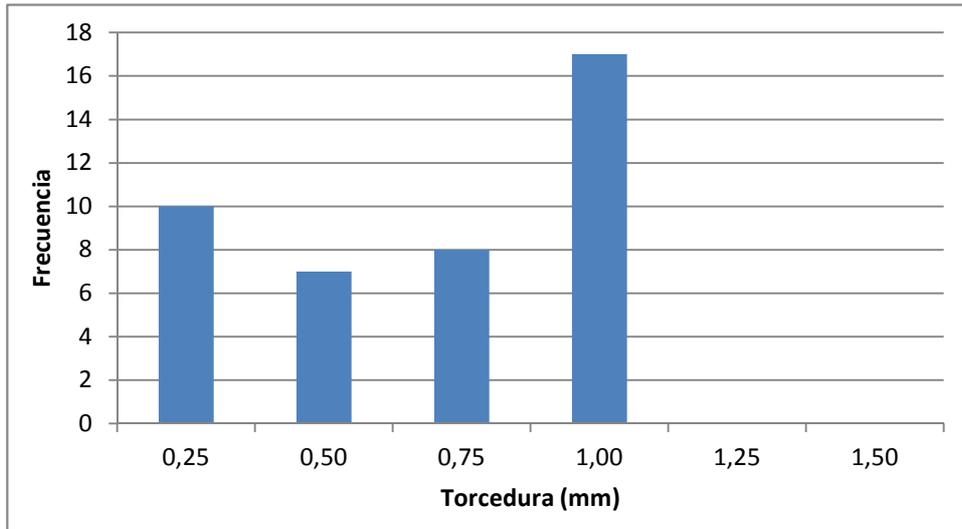


Gráfico B36. Histograma de torcedura para todas las vigas clasificadas.

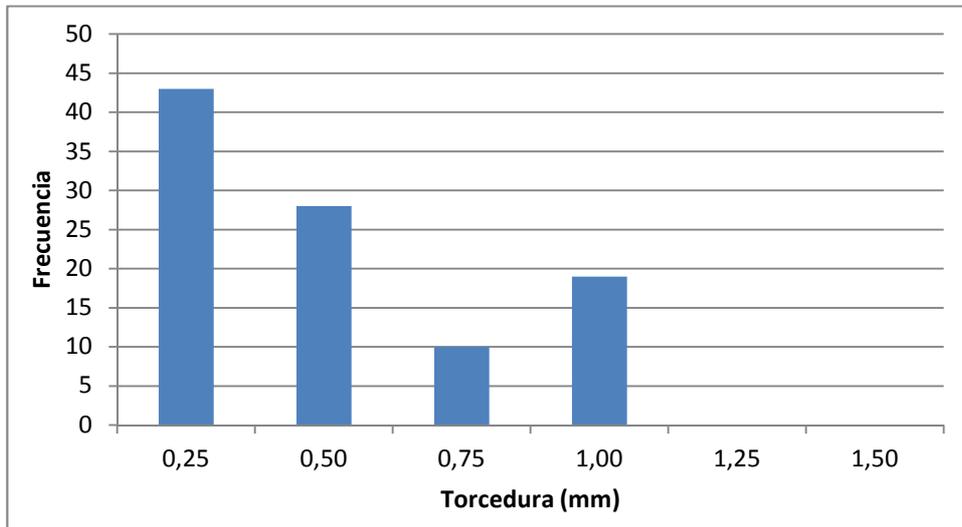
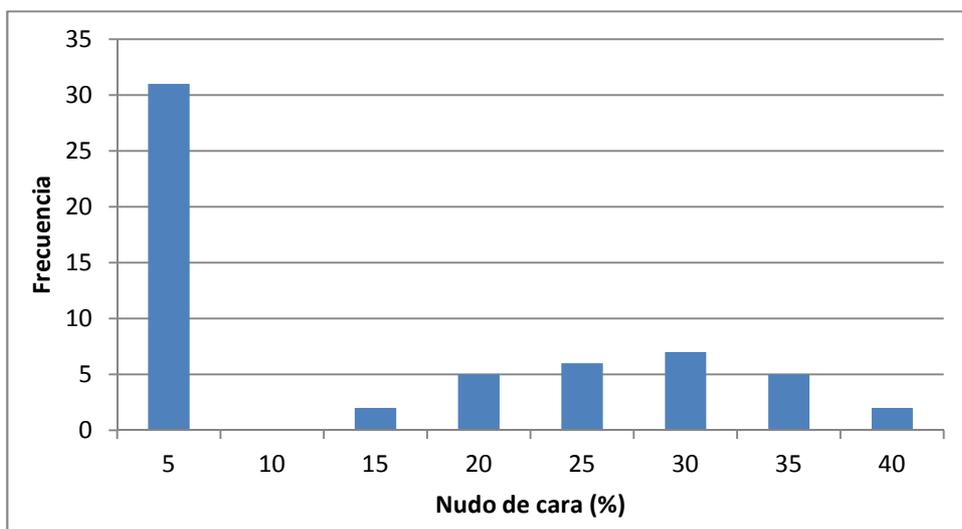


Gráfico B37. Histograma de nudo de cara para el muestreo del Litoral clasificado.



Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliottii*/*P. taeda* de procedencia uruguaya

Gráfico B38. Histograma de nudo de cara para el muestreo del Suroeste clasificado.

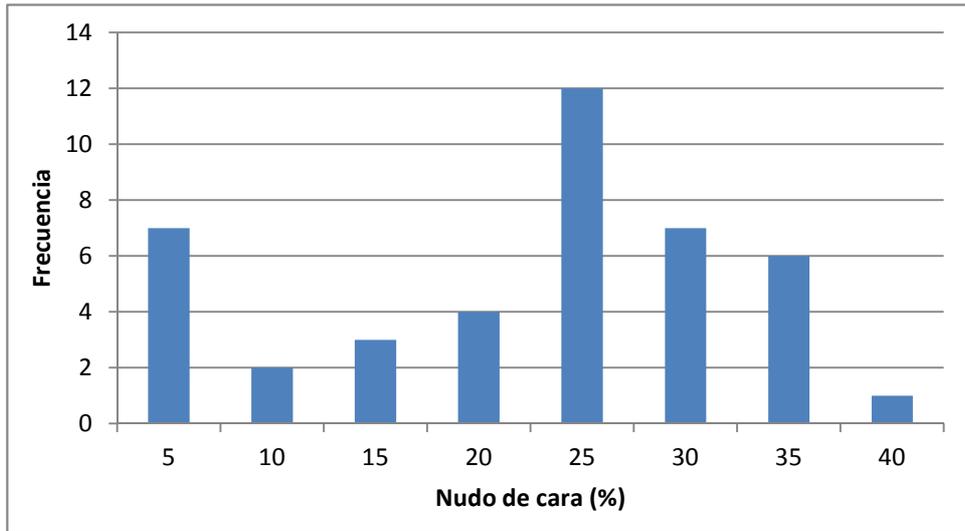


Gráfico B39. Histograma de nudo de cara para todas las vigas clasificadas.

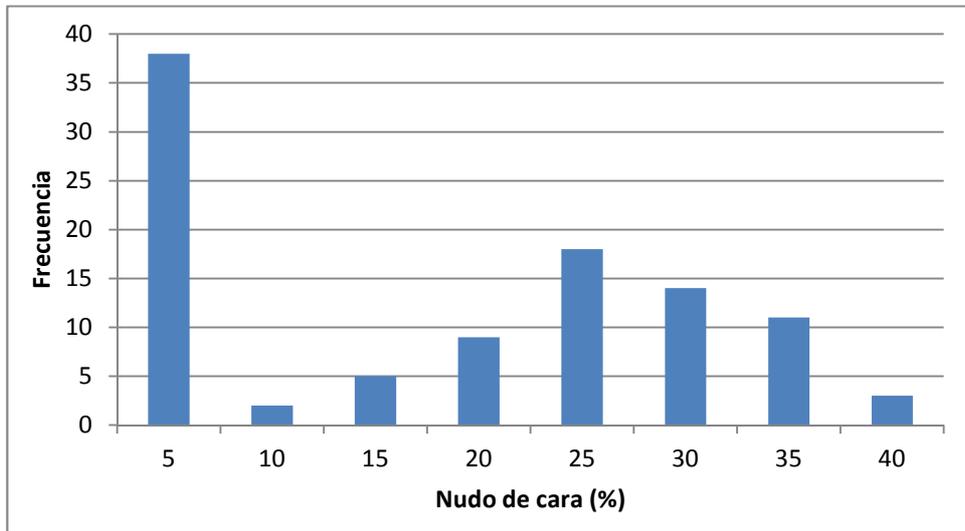
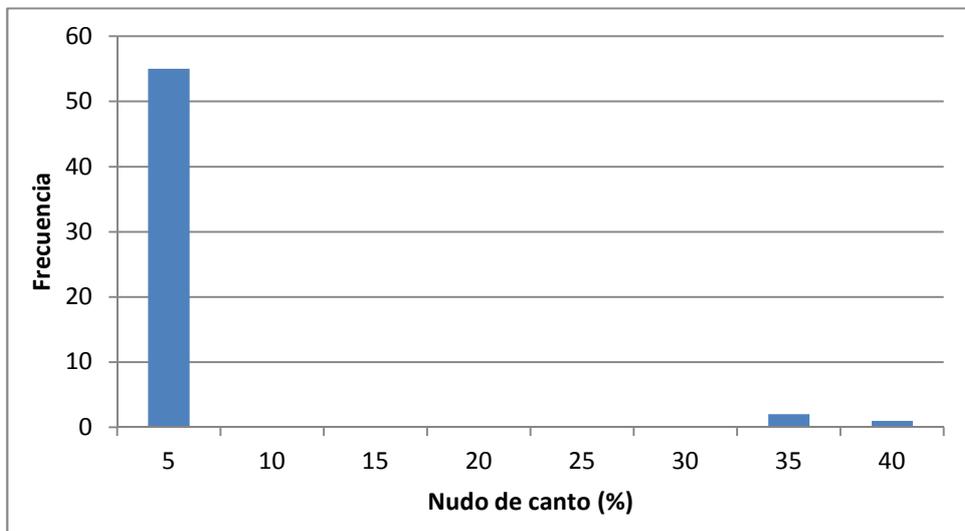


Gráfico B40. Histograma de nudo de canto para el muestreo del Litoral clasificado.



Informe 3. Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *Pinus elliottii*/P. taeda de procedencia uruguaya

Gráfico B41. Histograma de nudo de canto para el muestreo del Suroeste clasificado.

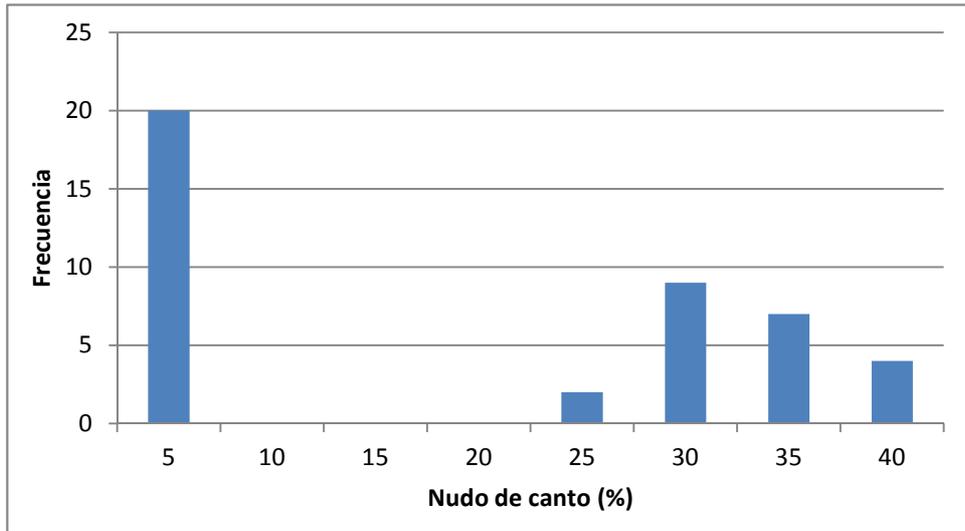
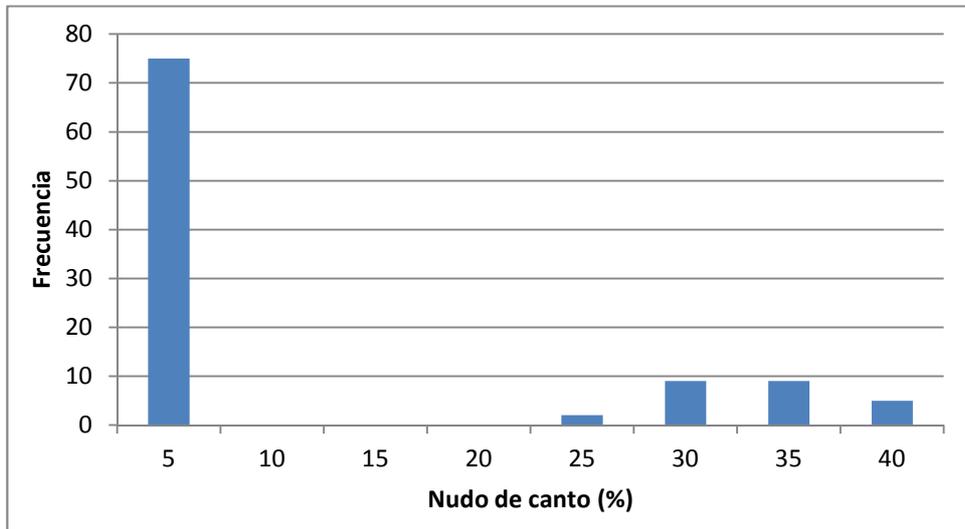


Gráfico B42. Histograma de nudo de canto para todas las vigas clasificadas.



Informe 4. Cálculo estructural con madera: propuesta de Anexo Nacional al Eurocódigo 5

PROYECTO: DOCUMENTOS TÉCNICOS BASE PARA LA NORMALIZACIÓN DE ESTRUCTURAS Y CONSTRUCCIÓN CON MADERA

TABLA DE CONTENIDOS

0. Introducción	IV-3
1. Normativa de referencia	IV-4
2. Propuesta de Anexo Nacional a la EN 1995-1-1:2006+A1:2008	IV-5
2.1. Objeto y ámbito de aplicación.....	IV-5
2.2. Parámetros de determinación nacional.....	IV-5
2.3. Decisión sobre la aplicación de los Anexos Informativos.....	IV-10
2.4. Información complementaria no contradictoria	IV-11
2.4.1. Normas uruguayas de aplicación.....	IV-11
2.4.3. Definiciones para el cálculo de flechas de vigas.....	IV-16
2.4.4. Definiciones para el cálculo de desplazamientos horizontales	IV-16
2.4.5. Valores límite para las vibraciones.....	IV-17
3. Propuesta de Anexo Nacional al Eurocódigo 5 - Parte 1-2. AN/UNE-EN 1995-1-2:2004/AC: 2011	IV-20
3.1. Objeto y ámbito de aplicación.....	IV-20
3.2. Parámetros de determinación nacional (NDP)	IV-21
3.3. Decisión sobre la aplicación de los Anexos Informativos.....	IV-22
3.4. Información complementaria no contradictoria (NCCI).....	IV-22
3.4.1. Diferencia entre reacción al fuego y resistencia al fuego.....	IV-22
3.4.2. Resistencia al fuego de los elementos principales de la estructura.....	IV-22
3.4.3. Valores de cálculo de las velocidades de carbonización de la madera.....	IV-23
3.4.4. Combinación de acciones en situación de incendio y valor de cálculo de las resistencias	IV-24
4. Conclusiones	IV-25
5. Bibliografía	IV-26

0. Introducción

Las normas europeas de cálculo estructural con madera EN 1995-1-1 “Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para la edificación” y EN 1995-1-2 “Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-2: Reglas generales. Proyectos de estructuras sometidas al fuego” han sido elaboradas por el Comité Técnico CEN/TC 250, responsable de todos los Eurocódigos Estructurales. Según el Reglamento Interior de CEN/CENELEC, los organismos de normalización obligados a utilizar dichas normas son los pertenecientes a los siguientes países: Alemania, Austria, Bélgica, Chipre, Dinamarca, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Islandia, Italia, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Malta, Noruega, Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Suecia y Suiza.

Tras las reuniones mantenidas al inicio del presente proyecto *Documentos técnicos base para la normalización de estructuras y construcción con madera*, se concluyó que se seguirían las reglas de cálculo estructural del Eurocódigo 5, con las modificaciones pertinentes para adaptarlo al uso de la madera procedente de Uruguay. Los temas tratados en dichas reuniones, así como las conclusiones, están recogidos en el Informe 1, resultado del proyecto.

Existen anexos nacionales de aplicación de los Eurocódigos. Éstos incluyen el texto completo del Eurocódigo tal y como lo publique el CEN, pudiendo estar precedido por una portada y un preámbulo nacional y terminado en el **Anexo Nacional**. En Uruguay no existe una norma UNIT-EN 1995, por lo que en este informe se toma como referencia directamente la norma europea EN 1995.

El Anexo Nacional contendrá la información sobre los parámetros que queden abiertos en los Eurocódigos para la elección de una opción nacional, denominados parámetros de determinación nacional, a ser empleados en el proyecto de edificación e ingeniería civil construido en el país correspondiente. Para la EN 1995-1-1, dichos parámetros aparecen en los siguientes apartados (tomado de EN 1995-1-1):

- 2.3.1.2(2)P *Asignación de las cargas a las clases de duración de la carga*
- 2.3.1.3(1)P *Asignación de estructuras a las clases de servicio*
- 2.4.1.(1)P *Coefficientes parciales de las propiedades del material*
- 6.4.3(8) *Vigas a dos aguas, vigas curvas y curvas a dos aguas*
- 7.2.(2) *Valores límite para las deformaciones*
- 7.3.3(2) *Valores límite para las vibraciones*
- 8.3.1.2(4) *Uniones clavadas entre madera y madera: Reglas para clavos en la testa*
- 8.3.1.2(7) *Uniones clavadas entre madera y madera: Especies sensibles a la bienda*
- 9.2.4.1(7) *Método de cálculo para los diafragmas de muros*
- 9.2.5.3(1) *Factores de modificación de arriostramiento para vigas o sistemas de celosía*
- 10.9.2(3) *Montaje de cerchas con uniones mediante placas metálicas dentadas: Máxima combadura*
- 10.9.2(4) *Montaje de cerchas con uniones mediante placas metálicas dentadas: Máxima desviación*

La norma nacional que implemente la Norma Europea EN 1995-1-2 debería tener un Anexo Nacional que contenga los parámetros de determinación nacional y que, para dicha norma, aparecen en los siguientes apartados (tomado de EN 1995-1-2):

- 2.1.3(2) *Temperatura máxima alcanzada para la función de separación en exposición al fuego paramétrico*
- 2.3(1)P *Coefficiente parcial de las propiedades del material*
- 2.3(2)P *Coefficiente parcial de las propiedades del material*
- 2.4.2(3) *Coefficiente de reducción para las combinaciones de acciones*
- 4.2.1(1) *Método para determinar las propiedades de la sección transversal*

Es, por lo tanto, objetivo del presente informe analizar apartado por apartado los parámetros de determinación nacional para Uruguay para la parte de edificación del Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 y EN 1995-1-2) y proponer valores en el caso de tener información suficiente. Cuando no se disponga de información suficiente para establecer dichos parámetros, se propondrá el uso de los propuestos en el Eurocódigo 5 o se reflejará la necesidad de investigación en los temas específicos a nivel nacional para poder determinarlos.

En este documento no se analiza el Anexo Nacional al EN 1995-2 relativo al proyecto de puentes de madera. Se entiende de suma relevancia que, a medida que se investigue en la materia, se agreguen las recomendaciones nacionales.

El presente documento constituye un primer acercamiento que sirva de base para la elaboración de un Anexo Nacional con la participación de todas organizaciones e instituciones correspondientes, y no se plantea establecer una versión final y definitiva de un Anexo Nacional a las Normas Europeas.

1. Normativa de referencia

La normativa de referencia para el cálculo de estructuras de madera está constituida por las siguientes tres normas, comentadas anteriormente:

EN 1995-1-1 *Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para la edificación (2004+AC:2006+A1:2008+A2:2014)*

EN 1995-1-2 *Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-2: Reglas generales. Proyectos de estructuras sometidas al fuego (2004:+AC:2009)*

EN 1995-2 *Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 2: Puentes (2004)*

Adicionalmente, este conjunto de normas incorporan disposiciones de otras publicaciones, particularmente Normas ISO y Normas Europeas. Dichas referencias se citan en los lugares apropiados del texto de las normas y se relacionan en los capítulos 1.2 de cada una de las normas citadas.

Este cuerpo de normas particulares podrá sustituirse por normas de carácter local o regional a medida que se redacten o se revisen las existentes. Es de suma importancia que se mantenga la coherencia entre las distintas normas que se utilicen.

En la actualidad se entiende conveniente que se consideren los siguientes documentos para el cálculo de estructuras de madera en el Uruguay:

UNIT 33 *Cargas a utilizar en el proyecto de edificios (1991)*

UNIT 50 *Acción del viento sobre construcciones (1984)*

En el punto 2.4.1 se desarrolla la aplicación de las normas UNIT 33:1991 y UNIT 50:1984 para el diseño y cálculo de estructuras de madera.

2. Propuesta de Anexo Nacional a EN 1995-1-1:2004+AC:2006+A1:2008+A2:2014

2.1. Objeto y ámbito de aplicación

La propuesta de Anexo Nacional propone definir las condiciones de aplicación en Uruguay de la norma europea EN 1995-1-1 (2004) y, en caso de no contar con información suficiente, dejar planteadas las tareas de investigación necesarias para definir las.

En el apartado 2.2 se proponen los valores de los parámetros de determinación nacional (NDP, del inglés *Nationally Determined Parameters*) de aplicación a edificación y se presentan aquellos cuya futura determinación, mediante campañas de investigación, se entienden importantes. Los artículos de la EN 1995-1-1 y EN 1995-1-2 que contienen parámetros de determinación nacional son los indicados en el capítulo introductorio.

Posteriormente, en el apartado 2.3 se plantea la conveniencia de que los Anexos informativos de EN 1995-1-1 se conviertan en normativos, mantengan su carácter informativo o no sean de aplicación en Uruguay.

La propuesta de Anexo Nacional contiene además información complementaria no contradictoria (NCCI, del inglés *Non-Contradictory Complementary Information*), cuyo objeto es facilitar la aplicación de la norma europea en Uruguay. Tienen carácter de información complementaria no contradictoria:

- Los párrafos en cursiva del apartado 2.2.
- Todo el apartado 2.4.
- Los documentos cuya referencia está recogida en el apartado 2.4.

2.2. Parámetros de determinación nacional

Se presenta a continuación la propuesta de los parámetros de determinación nacional (NDP) de aplicación a edificación de la norma EN 1995-1-1.

Capítulo 2: Bases de proyecto

2.3.1.2(2)P: Asignación de las cargas a las clases de duración de la carga

En relación a los ejemplos de asignación de duración de la carga, se sugiere la utilización de la Tabla presentada en el apdo. 2.3.1.2 de EN 1995-1-1. Dicha Tabla se basa en el Anexo Nacional de España, Tabla 1. Las categorías de carga son coincidentes con la EN 1991-1 (2003), que clasifica las sobrecargas de uso en categorías.

Tabla 1 – Ejemplo de asignación de duración de la carga

<u>Clase de duración de la carga</u>	<u>Ejemplos de carga</u>
Permanente	Peso propio, cargas permanentes (materiales de cubierta, cerramientos, terminaciones, revestimientos, tabiquería, pavimentos, instalaciones fijas), almacenamiento (categoría E).
Larga	Apuntalamientos de construcciones o terrenos, cargas en estructuras provisionales no itinerantes.
Media	Sobrecarga de uso en zonas de actividades domésticas y residenciales (categoría A), de oficinas (categoría B), de pública concurrencia (categoría C), comerciales (categoría D), de tráfico y estacionamiento de vehículos ligeros y medios (categorías F y G) y cubiertas accesibles con ocupación de a las categorías A a D (categoría I), encofrados.
Corta	Viento. Sobrecarga de uso en cubiertas no accesibles excepto para su mantenimiento normal y reparación (categoría H), zonas de escaleras, descansillos y rampas en categorías A y B.
Instantánea	Cargas accidentales tales como de impacto o explosión.

2.3.1.3(1)P: Asignación de estructuras a las clases de servicio

El sistema de clases de servicio tiene como función la asignación de los valores de resistencia y el cálculo de las deformaciones bajo condiciones ambientales determinadas, definidas principalmente en función del contenido de humedad ambiental del lugar donde se ubica la estructura. La Tabla 2 define las diferentes clases de servicio a las cuales se asignarían diferentes tipos de construcción y se basa en lo descrito en el Anexo Nacional de España.

Tabla 2 – Ejemplos de asignación a las clases de servicio

<u>Clase de servicio</u>	<u>Tipo de construcción</u>
2	Estructura de una cubierta cuyo espacio bajo techo solo es accesible para mantenimiento y no tiene calefacción. Por ejemplo: almacenes y buhardillas.
1	Estructura de una cubierta cuyo espacio bajo techo es habitable, está aislado térmicamente y suele contar con calefacción.
2	Estructura de piscinas climatizadas.
1	Forjados o entrepisos intermedios entre espacios habitables.
2	Forjados o entrepisos de planta baja sobre local o espacio sin calefacción. Por ejemplo: garajes sin calefacción y cámaras sanitarias bajo forjado de planta.
1	Muros entramados interiores (situados dentro de la construcción).
1	Muros entramados de cerramiento de la construcción con revestimiento con la estructura en el interior del espacio aislado térmicamente.
2	Muros entramados de cerramiento de la construcción con revestimiento con la estructura al exterior del espacio aislado térmicamente.

Tabla 2 (cont.) – Ejemplos de asignación a las clases de servicio

<u>Clase de servicio</u>	<u>Tipo de construcción</u>
2	Uso al exterior cuando la pieza está protegida de la caída directa del agua. Por ejemplo: cobertizos sin paredes.
3	Uso al exterior totalmente expuesto. Por ejemplo: pérgolas sin cubierta, puentes y andamios con la estructura expuesta directamente al agua de la lluvia).
3	Uso como encofrado de elementos de hormigón en masa, armado y pretensado.

2.4.1(1)P: Coeficientes parciales para las propiedades del material

La EN 1995-1-1 en su apartado 2.4.1, presenta los coeficientes de seguridad recomendados para las propiedades del material y las resistencias. Dado que en Uruguay la madera no se encuentra certificada estructuralmente, se sugiere utilizar para el cálculo estructural los coeficientes de seguridad para las propiedades del material y de las resistencias de la Tabla 3, definida expresamente para el presente documento.

Tabla 3 – Propuesta de coeficientes parciales (γ_m) para las propiedades del material y las resistencias para Uruguay

	<u>Control de calidad del material</u>	<u>Control de calidad de la ejecución</u>	<u>Valor del coeficiente de seguridad</u>
Combinaciones fundamentales	Normal	Normal	1,60
		Intenso	1,45
	Intenso	Normal	1,45
		Intenso	1,30
Combinaciones accidentales	Normal	-	1,10
	Intenso	-	1,00

Puede considerarse que el control de calidad del material es intenso cuando la madera o los productos de la madera se encuentren certificados por un organismo reconocido. Cuando la madera sea clasificada para su uso estructural y el proceso de fabricación cumpla con las normas europeas correspondientes pero las piezas no estén certificadas, deberá considerarse un nivel de control de calidad del material normal. Esto supone que, si la madera no está certificada tendría una penalización de $1,3/1,6=0,81$, lo que equivale a pasar, por ejemplo, de una clase resistente C18 a C14, ó de C24 a C20. De todos modos, aunque la madera no esté certificada, deberán conocerse los valores de sus propiedades mecánicas y las reglas de clasificación de la madera.

En general, la elección del nivel de control de calidad de la ejecución estará a cargo del proyectista, que deberá basar su decisión en función de aspectos tales como la entidad de la obra, la complejidad estructural y la repercusión económica o social que los eventuales fallos de la estructura puedan ocasionar. Desde un punto de vista estrictamente técnico, se recomienda que se realice un control de calidad de la ejecución intenso, restringiendo el nivel

de control normal a obras temporales o de pequeña importancia, tales como entrepisos de pequeñas luces o viviendas de entramado ligero de uno o dos pisos.

Los coeficientes propuestos fueron obtenidos a partir del Anexo 3 de EN 1990 (2002), considerando los resultados de los ensayos de pinos de procedencia uruguaya presentados en el Informe 3¹ del proyecto *Documentos técnicos base para la normalización de estructuras y construcción con madera*. Se recomienda actualizar la información de dicho Informe y por consiguiente los coeficientes aquí propuestos, a medida que se disponga de más información en base a resultados de un mayor número de muestras analizadas.

Capítulo 6: Estados límite últimos

6.4.3(8)P: Vigas a dos aguas, vigas curvas y curvas a dos aguas

El Eurocódigo 5 propone dos ecuaciones para el cálculo del valor mayor de la tensión de tracción perpendicular a la fibra debida al momento flector, y en la propuesta del Anexo Nacional Uruguayo se recomienda adoptar la ecuación 6.54 de la EN 1995-1-1 por estar del lado de la seguridad (Ecuación 1):

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \cdot \frac{6 M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2} \quad (1)$$

Capítulo 7: Estados límite de servicio

7.2(2): Valores límite para las deformaciones

Como alternativa a los valores límite para las deformaciones propuestos en la EN 1995-1-1 podrán utilizarse los valores límite de flechas indicados en la Tabla 4, que define diferentes valores límite de flecha en base a tres criterios: a) la integridad de los elementos constructivos, b) el confort de los usuarios y c) la apariencia de la obra.

Los mismos se basan en el Anexo Nacional de España (AN/UNE-EN 1995-1-1, 2014), que a su vez fueron obtenidas del Código Técnico de la Edificación en su Documento Básico de Seguridad Estructural: Madera (CTE-DB-SE: M, 2009). Las definiciones de las deformaciones en vigas se encuentran en el apartado 2.4.3 del presente documento.

Tabla 4 – Valores límite de flecha en vigas

Criterio		Limitación	
Integridad de elementos constructivos	Elementos frágiles	$w_{act} \leq l/500$	
	Elementos ordinarios	$w_{act} \leq l/400$	
	Resto de los casos	Con cielo raso o falso techo de yeso o escayola	$w_{act} \leq l/300$
		Sin cielo raso o falso techo de yeso o escayola	$w_{act} \leq l/200$
Confort de los	Entrepiso y vigas de pisos	$w_{inst} \leq l/350$	

¹ Informe 3- Caracterización mecánica a partir de ensayos existentes y propuesta de calidad visual de la madera de *P. elliotii/taeda* de procedencia uruguaya

usuarios	
Apariencia de la obra	$w_{net,fin} \leq l/300$
Nota: w_{act} es la flecha activa, w_{inst} es la flecha instantánea de las cargas variables y $w_{net,fin}$ es la flecha neta final o flecha a largo plazo (ver apartado 2.4.3)	

Se recomienda además la limitación del desplazamiento horizontal del edificio de acuerdo a lo indicado en la Tabla 5, obtenidos del Anexo nacional de España (AN/UNE-EN 1995-1-1, 2014), que a su vez fueron obtenidas del Código Técnico de la Edificación en su Documento Básico de Seguridad Estructural: Madera (CTE-DB-SE: M, 2009). Las definiciones de los desplazamientos horizontales se pueden consultar en el punto 2.4.4 del presente documento.

Tabla 5 – Valores límite de desplazamiento horizontal

Criterio	Limitación
Integridad de los elementos constructivos	$u_{act} \leq h_t/500$
	$u_{act} \leq h_p/250$
Apariencia de la obra	$u_{t,fin} \leq h_t/250$
	$u_{p,fin} \leq h_p/250$
NOTA: u_{act} es el desplome activo, $u_{t,fin}$ es el desplome final o a largo plazo de la altura total del edificio y $u_{p,fin}$ es el desplome final o a largo plazo de una planta del edificio (ver apartado 2.4.4). Siendo además h_t la altura total del edificio y h_p la altura de la planta considerada.	

7.3.3(2): Valores límite para las vibraciones

Para la comprobación de los forjados con uso residencial se sugiere el seguimiento de los lineamientos descritos en el punto 2.4.5 del presente documento.

Capítulo 8: Uniones

8.3.1.2(4): Uniones clavadas madera-madera: reglas para clavos en la testa

Se recomienda adoptar la regla de aplicación recomendada en el párrafo 8.3.1.2(3): “Los clavos colocados en la testa no deberían considerarse con capacidad de transmitir cargas laterales”.

8.3.1.2(7): Uniones clavadas madera-madera: especies sensibles a hienda

En relación a este punto, se acepta la recomendación del punto 8.3.1.2(7) del Eurocódigo 5.

No se dispone de información suficiente para afirmar que las especies de *Pinus taeda*, *Pinus elliotii* y *Eucalyptus grandis* procedentes de Uruguay son sensibles a la hienda.

Si bien en principio se supone que pueden serlo, se recomienda investigar en el tema. Hasta tanto no se dispongan de resultados, se sugiere considerar que las especies anteriores presentan sensibilidad a la hienda.

Capítulo 9: Componentes y sistemas

9.2.4.1(7): Método de cálculo para los diafragmas de muro

Se entiende conveniente que se acepten los métodos A y B de la norma EN 1995-1-1, pero se recomienda el empleo del método A, aplicable a los diafragmas de muros donde la pieza vertical en el extremo está directamente conectada a la construcción inferior.

9.2.5.3(1): Factores de modificación de arriostramiento para vigas o sistemas de celosía

Los valores de los factores de modificación de arriostramiento k_p , $k_{f,1}$, $k_{f,2}$ y $k_{f,3}$ dependen de la influencia de factores tales como la calidad de la mano de obra, la luz, entre otros.

A falta de datos propios para Uruguay, se recomienda que se adopten los valores propuestos en la norma EN 1995-1-1, los cuales se recogen como subrayados en la tabla 9.2 de dicho documento.

Capítulo 10: Detalles constructivos y control

10.9.2(3): Montaje de cerchas con uniones mediante placas metálicas dentadas: máxima combadura

Debería limitarse la curvatura máxima en cualquier pieza de la cercha después de su montaje y la EN 1995-1-1 propone valores de curvatura máxima ($a_{bow,perm}$) que varían entre 10 y 50 mm. Se recomienda que se adopte el valor recomendado en el AN/UNE-EN 1995-1-1 (2014) de curvatura máximo permitido: $a_{bow,perm} = 10$ mm.

10.9.2(4): Montaje de cerchas con uniones mediante placas metálicas dentadas: máxima desviación

Debería limitarse la desviación máxima (a_{dev}) de una cercha respecto a la vertical después del montaje y la EN 1995-1-1 propone valores de máxima desviación de la vertical ($a_{dev,perm}$) que varían entre 10 y 50 mm. Se recomienda adoptar el criterio del Anexo español (AN/UNE-EN 1995-1-1, 2014), que limita el máximo desplome de una cercha después del montaje al valor presentado en la ecuación 2.

$$a_{dev,perm} = 10 + 5 \cdot (H - 1) \quad (2)$$

Siendo $a_{dev,perm}$ el máximo desplome expresado en mm y H la altura (diferencia de cota entre apoyos y punto más alto) expresada en m.

2.3. Decisión sobre la aplicación de los Anexos Informativos

El Eurocódigo 5 en su parte 1-1 (EN 1995-1-1) presenta una serie de Anexos de carácter informativo y en el presente apartado se explicita su recomendación de seguimiento.

Anexo A: Fallo de cortante en bloque y por desgarro en uniones acero-madera con varios elementos de fijación tipo clavija

Se recomienda que el Anexo A mantenga el carácter informativo para la aplicación de la norma EN 1995-1-1.

Anexo B: Vigas con uniones mecánicas

Se recomienda que el Anexo B mantenga el carácter informativo para la aplicación de la norma EN 1995-1-1.

Anexo C: Columnas compuestas

Se recomienda que el Anexo C mantenga el carácter informativo para la aplicación de la norma EN 1995-1-1.

Anexo D: Bibliografía

Se recomienda que el Anexo D mantenga el carácter informativo para la aplicación de la norma EN 1995-1-1.

2.4. Información complementaria no contradictoria

2.4.1. Normas uruguayas de aplicación

La norma uruguaya UNIT 33 (1991) de cargas a utilizar en el proyecto de edificios podrá utilizarse como alternativa al Eurocódigo 1 de Acciones en las Estructuras relacionadas con los pesos propios y sobrecargas en los edificios (EN 1991-1-1: 2002/AC: 2010) cuando se quiera determinar las cargas a utilizar en el proyecto de edificios.

En relación a la norma uruguaya UNIT 50 (1984) de acciones del viento sobre las construcciones, se recomienda su uso para determinar la velocidad característica del viento en función de la zona geográfica de la construcción. Una vez determinada la velocidad característica del viento, se puede seguir uno de los dos métodos indicados a continuación:

- 1) Convertir la velocidad característica del viento definida en la UNIT 50 (1984) en la velocidad básica del viento definida en EN 1991-1-4: 2007/AC: 2010 de forma de utilizar esta norma para determinar las acciones del viento sobre la estructura.
- 2) Utilizar la UNIT 50 (1984) para determinar las acciones del viento sobre la estructura.

Se sugiere la aplicación del método 1) puesto que de esta manera se mantiene la mayor coherencia entre la determinación de acciones y el cálculo de las solicitaciones. Para la conversión de la velocidad característica del viento definida en la UNIT 50 en la velocidad básica definida en la EN 1991-1-4 puede utilizarse la Ecuación 3 (Páez y Morquio, 2014).

$$v_b = 0,858 \cdot 0,676 \cdot 1,149 \cdot v_k = 0,667 \cdot v_k \quad (3)$$

Siendo:

- v_k la velocidad característica del viento definida en la UNIT 50:1984.
- v_b la velocidad básica del viento definida en la EN 1991-1-4:2007.

La Ecuación 3 considera las diferencias entre las definiciones de las velocidades de viento v_k (UNIT 50) y v_b (EN 1991-1-4). Estas son: la rugosidad del terreno en la cual está definida la velocidad del viento, el intervalo de muestreo utilizado y el período de retorno.

El factor 0,858 corresponde a la conversión de la rugosidad del terreno. Para ello se acepta que la categoría de exposición I de la UNIT 50 es equivalente con la categoría de exposición I de la EN 1991-1-4.

El factor 0,676 corresponde a la conversión entre el intervalo de muestreo de 3 s, utilizado por la UNIT 50, a uno de 10 min, utilizado por la EN 1991-1-4. Dicho valor es obtenido a partir de un análisis espectral de la velocidad del viento. Un mayor detalle sobre este punto puede verse en el artículo de Páez y Morquio (2014).

Finalmente, el factor 1,149 corresponde al ajuste del período de retorno de 20 a 50 años utilizando los lineamientos de la norma UNIT 50, es decir, aceptando una distribución de probabilidad de tipo Frechet. En la actualidad existe una aceptación a nivel mundial de que los vientos extremos se ajustan de manera más adecuada a una distribución de tipo Gumbel. Sin embargo, se recomienda la distribución de tipo Frechet para la conversión de velocidad y utilización de la EN 1991-1-4 debido a que de esta forma las velocidades convertidas se ajustan mejor a las velocidades características que utilizan Brasil y Argentina.

2.4.2. Acciones y combinaciones de acciones

Con el fin de facilitar la configuración de las combinaciones de acciones para las estructuras de madera, se incluye, como información adicional no contradictoria al Eurocódigo 5 en su parte 1-1, un apartado que resume dichas combinaciones. Dicha información está basada en los Eurocódigos 0, 1 y 5.

Clasificación de las acciones

Las acciones se pueden clasificar por su variación en el tiempo, según los siguientes grupos:

Acciones permanentes (G): son aquellas que actúan en todo momento. Por ejemplo, dentro de este grupo se engloba el peso propio de las estructuras, los materiales de cubierta, los cerramientos, las terminaciones y los revestimientos, la tabiquería, los pavimentos y las instalaciones fijas. Además se incluye el peso propio y empuje del terreno, o las acciones indirectas causadas por asientos diferenciales.

Acciones variables (Q): son aquellas cuyo valor varía frecuentemente a lo largo del tiempo. Por ejemplo, dentro de este grupo se incluyen las sobrecargas en los edificios originadas por su ocupación (personas, muebles, vehículos, máquinas, etc.) así como las acciones climáticas (viento, variación de temperatura, etc.) y las acciones debidas al proceso constructivo.

Acciones accidentales (A): son aquellas cuya probabilidad de actuación a lo largo de la vida útil es pequeña. Por ejemplo, en este grupo se comprenden las explosiones, los impactos de vehículos o las acciones de incendio.

Valores característicos y representativos de las acciones

El valor característico, F_k , de una acción es su valor representativo principal. Su definición varía dependiendo de si se trata de acciones permanentes o acciones variables.

En el caso de las acciones permanentes, se define el valor característico, G_k , como el valor medio siempre que la variabilidad de G pueda considerarse pequeña. Esta situación es la más frecuente y se verifica siempre que las normas establezcan un único valor de G_k .

En el caso de las acciones variables, se define el valor característico, Q_k , como un valor superior con una probabilidad prevista de no ser superado o un valor inferior con una probabilidad prevista de ser alcanzado, durante un período específico de referencia.

Usualmente, debido a la baja variabilidad, ocurre que el valor representativo de las acciones permanentes es el valor característico definido. Para las acciones variables pueden emplearse los siguientes valores representativos:

Informe 4. Cálculo estructural con madera: propuesta de Anexo Nacional al Eurocódigo 5

- Valor característico (Q_k): corresponde al valor representativo de la acción cuando no está acompañada de otras acciones variables.
- Valor de combinación: representado como un producto $\psi_0 \cdot Q_k$, corresponde al valor representativo de las acciones variables que actúan simultáneamente con otra acción variable considerada como determinante. Se emplea en la verificación de los estados límite últimos y los estados límite de servicio irreversibles.
- Valor frecuente de una acción variable: representado como un producto $\psi_1 \cdot Q_k$, corresponde al valor representativo de la acción variable que solo es sobrepasado durante períodos de corta duración en la vida útil de la estructura, por ejemplo el 1% en el caso de edificios. Se emplea en la verificación de los estados límite últimos que comprendan acciones accidentales y para la verificación de los estados límite últimos de servicio reversibles.
- Valor casi-permanente de una acción variable: representado como un producto $\psi_2 \cdot Q_k$, corresponde al valor representativo de la acción variable que es sobrepasado durante una gran parte de la vida útil de la estructura por ejemplo el 50% en el caso de edificios. Se emplea en la verificación de estados límite últimos que incluyan acciones accidentales, para la verificación de estados límite de servicio reversibles y para el cálculo de efectos a largo plazo.

En la Tabla 6 se presentan los coeficientes de simultaneidad ψ_0 , ψ_1 , ψ_2 para edificios, a partir de la Tabla A.1.1 del Anexo A de EN 1990:2002/AC: 2010.

Tabla 6 – Valores de los coeficientes de simultaneidad para edificios (EN 1990:2002)

Acción	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecarga en edificios según categoría (EN 1995-1-1)			
Categoría A: zonas residenciales, domésticas	0,7	0,5	0,3
Categoría B: zonas de oficinas	0,7	0,5	0,3
Categoría C: zonas de reunión	0,7	0,7	0,6
Categoría D: zonas comerciales	0,7	0,7	0,6
Categoría E: zonas de almacenamiento	1,0	0,9	0,8
Categoría F: zona de tráfico, peso del vehículo menor a 30 kN	0,7	0,7	0,6
Categoría G: zona de tráfico, peso del vehículo entre 30 kN y 160 kN	0,7	0,5	0,3
Categoría H: cubiertas	0	0	0
Viento	0,6	0,2	0
Temperatura (no la debida a incendio)	0,6	0,5	0

Valores de cálculo de las acciones

Se define como valor de cálculo, F_d , de una acción, F , como el producto del valor representativo por un coeficiente parcial de seguridad, según la Ecuación 4, obtenida del apartado 6.3.1. de la EN 1990 (2002/AC: 2010).

$$F_d = \gamma_F \cdot F_{rep} = \gamma_F \cdot \psi \cdot F_k \quad (4)$$

Siendo:

- F_k : el valor característico de la acción.
- F_{rep} : el valor representativo de la acción correspondiente.
- γ_f : es el coeficiente parcial de seguridad de la acción.
- ψ : es 1 o ψ_0, ψ_1 o ψ_2 .

Los valores de los coeficientes parciales de seguridad varían de acuerdo a los estados límite a comprobar y dependiendo de si el efecto de la carga es favorable o desfavorable. Los coeficientes parciales de seguridad recomendados para la evaluación de la estabilidad, los estados límite últimos y los estados límite de servicio se indican en la tabla 7, tomada del Código Técnico de la Edificación en su Documento Básico de Seguridad Estructural (CTE-DB-SE, 2009) y de la EN 1990.

Tabla 7 – Valores de los coeficientes de seguridad aplicables a las acciones (CTE-DB-SE, 2009; EN 1990:2002/AC: 2010)

Comprobación	Tipo de acción	Efecto desfavorable	Efecto favorable
Estabilidad	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	$\gamma_G = 1,10$	$\gamma_G = 0,90$
	Empuje del terreno	$\gamma_G = 1,35$	$\gamma_G = 0,80$
	Presión del agua	$\gamma_G = 1,05$	$\gamma_G = 0,95$
	Variable	$\gamma_Q = 1,50$	$\gamma_Q = 0,00$
Estados límite últimos – Situaciones persistentes o transitorias	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	$\gamma_G = 1,35$	$\gamma_G = 0,80$
	Empuje del terreno	$\gamma_G = 1,35$	$\gamma_G = 0,70$
	Presión del agua	$\gamma_G = 1,20$	$\gamma_G = 0,90$
	Variable	$\gamma_Q = 1,50$	$\gamma_Q = 0,00$
	Accidental	$\gamma_a = 1,00$	$\gamma_a = 0,00$
Estados límite últimos – Situaciones accidentales	Permanente	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_G = 0,80$
	Variable	$\gamma_Q = 1,00$	$\gamma_Q = 0,00$
	Accidental	$\gamma_a = 1,00$	$\gamma_a = 1,00$
Estados límite de servicio	Permanente	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_G = 1,00$
	Variable	$\gamma_Q = 1,00$	$\gamma_Q = 0,00$

Situaciones de cálculo

Las expresiones recomendadas para las combinaciones de acciones en los estados límite últimos son las indicadas a continuación, tomadas del CTE-DB-SE (2009):

- En situaciones de cálculo persistentes y transitorias (Ecuación 5):

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G_j} \cdot G_{kj} + \gamma_{Q_{k1}} \cdot Q_{k1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q_i} \cdot \psi_{0i} \cdot Q_{ki} \quad (5)$$

- En situaciones de cálculo extraordinarias, en las que la acción accidental sea la sísmica (Ecuación 6):

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + A_d + \sum_{i \geq 1} \psi_{2i} \cdot Q_{ki} \quad (6)$$

- En situaciones de cálculo extraordinarias, en las que la acción accidental sea un impacto o incendio (Ecuación 7):

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + A_d + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \sum_{i > 1} \psi_{2i} \cdot Q_{ki} \quad (7)$$

Para los estados límite de servicio, se establecen tres tipos de combinaciones de acciones, caracterizadas por distintas frecuencias de ocurrencia o distintos tipos de actuación. Los tipos de combinaciones son los indicados a continuación:

- Combinaciones características o poco probables (Ecuación 8):

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + Q_{k1} + \sum_{i > 1} \psi_{0i} \cdot Q_{ki} \quad (8)$$

- Combinaciones frecuentes (Ecuación 9):

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \sum_{i > 1} \psi_{2i} \cdot Q_{ki} \quad (9)$$

- Combinaciones casi-permanentes (Ecuación 10):

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2i} \cdot Q_{ki} \quad (10)$$

En las Ecuaciones 5 a 10, representan:

- G_{kj} : valor característico de la acción permanente.
- Q_{k1} : valor característico de una de las acciones variables (la acción variable determinante en la situación de dimensionado contemplada).
- Q_{ki} : valor característico de acción variable (acción variable i, concomitante con la acción determinante en la situación de dimensionado contemplada).
- A_d : valor de cálculo de la acción accidental.
- ψ_{0i} : coeficiente para el valor de combinación de la acción variable i (tabla 6).
- ψ_{11} : coeficiente para el valor frecuente de la acción variable fundamental (tabla 6).
- ψ_{2i} : coeficiente para el valor casi-permanente de la acción variable i (tabla 6).
- γ_{G_j} : coeficiente parcial de seguridad para la acción permanente (tabla 7).
- γ_{Q_1} : coeficiente parcial de seguridad para la acción variable determinante (tabla 7).

- γ_{Q_i} : coeficiente parcial de seguridad para la acción variable concomitante i (tabla 7).
- " + ": implica "ser combinado con".
- Σ : implica "el efecto combinado de".

2.4.3. Definiciones para el cálculo de flechas de vigas

En este punto se definen los términos para el cálculo de flechas, viguetas y elementos de cubierta. Las definiciones fueron extraídas del Anexo Nacional de España (AN/UNE-EN 1995-1-1, 2014).

- w_G : flecha instantánea debida a las cargas permanentes.
- $w_{Q,1}$: flecha instantánea debida a una carga variable. Esta carga deberá rotarse con las restantes cargas variables para determinar la situación más desfavorable.
- $w_{Q,i}$: flecha instantánea debida a las restantes cargas variables, con $i > 1$.
- $k_{def} \cdot w_G$: flecha diferida debida a las cargas permanentes.
- $\psi_{2,j} \cdot w_{Q,j}$: parte casi permanente de una carga variable.
- $k_{def} \cdot \psi_{2,j} \cdot w_{Q,j}$: flecha diferida debida a una carga variable (se calcula a partir de la parte casi permanente de la carga variable).
- w_C : contraflecha de ejecución (cuando la viga o estructura se fabrica dotada de una deformación contraria a la que tendrá bajo carga). Normalmente suele darse una contraflecha del orden de 1,35 a 1,45 veces la flecha instantánea debida a las cargas permanentes (w_G).

w_{act} : flecha activa, igual a la instantánea de las cargas variables más la diferida de las permanentes y variables (Ecuación 11). Se considera el efecto de una de las cargas variables con su valor característico y las restantes reducidas por sus correspondientes coeficientes de combinación $\psi_{0,i}$. La primera carga deberá rotarse con las restantes cargas variables para determinar la situación más desfavorable.

$$w_{act} = k_{def} \cdot w_G + w_{Q,1} + \sum_{i>1} \psi_{0,i} \cdot w_{Q,i} + \sum_{i \geq 1} k_{def} \cdot \psi_{0,i} \cdot \psi_{2,i} \cdot w_{Q,i} \quad (11)$$

w_{inst} : flecha instantánea de las cargas variables (Ecuación 12). Se considera el efecto de una de las cargas variables con su valor característico y las restantes reducidas por sus correspondientes coeficientes de combinación $\psi_{0,i}$. La primera carga deberá rotarse con las restantes cargas variables para determinar la situación más desfavorable.

$$w_{inst} = w_{Q,1} + \sum_{i>1} \psi_{0,i} \cdot w_{Q,i} \quad (12)$$

$w_{net,fin}$: flecha neta final o flecha a largo plazo (Ecuación 13). Es igual a la flecha instantánea y diferida de las cargas permanentes y de las cargas variables, descontando en su caso la contraflecha. En este caso las cargas variables se toman con su valor casi permanente.

$$w_{net,fin} = w_G \cdot (1 + k_{def}) + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot w_{Q,i} \cdot (1 + k_{def}) - w_C \quad (13)$$

2.4.4. Definiciones para el cálculo de desplazamientos horizontales

En este punto se definen los términos para el cálculo de desplazamientos horizontales de la estructura. Las definiciones fueron extraídas del Anexo Nacional de España.

u_{act} : desplome activo, igual al desplazamiento instantáneo debido a las cargas variables más la diferida de las permanentes y variables (Ecuación 14). Se considera el efecto de una de las cargas variables con su valor característico y las restantes reducidas por sus correspondientes coeficientes de combinación $\psi_{0,i}$. La primera carga deberá rotarse con las restantes cargas variables para determinar la situación más desfavorable.

$$u_{act} = k_{def} \cdot u_G + u_{Q,1} + \sum_{i>1} \psi_{0,i} \cdot u_{Q,i} + \sum_{i \geq 1} k_{def} \cdot \psi_{0,i} \cdot \psi_{2,i} \cdot u_{Q,i} \quad (14)$$

$u_{t,fin}$: desplome final o a largo plazo de la altura total del edificio debido al desplazamiento instantáneo y diferido de las cargas permanentes y las cargas variables (Ecuación 15). En este caso, las cargas variables se toman con su valor casi permanente.

$$u_{t,fin} = u_G \cdot (1 + k_{def}) + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot u_{Q,i} \cdot (1 + k_{def}) \quad (15)$$

$u_{p,fin}$: desplome final o a largo plazo de una planta del edificio debido al desplazamiento instantáneo y diferido de las cargas permanentes y las cargas variables (Ecuación 16). En este caso, las cargas variables se toman con su valor casi permanente.

$$u_{t,fin} = u_G \cdot (1 + k_{def}) + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot u_{Q,i} \cdot (1 + k_{def}) \quad (16)$$

2.4.5. Valores límite para las vibraciones

El procedimiento para la verificación del estado límite de vibraciones es extraído del Anexo Nacional de España (AN/UNE-EN 1995-1-1, 2014). Éste se basa y amplía la información de la EN 1995-1-1.

En el caso de forjados con uso residencial con una frecuencia fundamental mayor que 8Hz ($f_1 > 8$ Hz) deben cumplirse los siguientes requisitos (Ecuaciones 17 y 20):

a) Rigidez

$$\frac{w}{F} \leq a \text{ mm/kN} \quad (17)$$

Donde:

w es el desplazamiento vertical máximo instantáneo causado por una fuerza estática concentrada, F aplicada en cualquier punto del forjado, teniendo en cuenta la distribución de la carga.

El valor de w/F puede obtenerse a partir de la expresión de la flecha de una viga bi apoyada con carga puntual, F , en el centro del vano, incluyendo algunos factores de ajuste, de acuerdo a lo indicado en la Ecuación 18.

$$\frac{w}{F} = k_{dist} \cdot k_{fv} \cdot \frac{l_{eq}^3}{48 \cdot (EI)_{vig}} \quad (18)$$

Donde:

k_{dist} es un factor que tiene en cuenta que parte de la carga se distribuye a las viguetas adyacentes, y que por tanto mejora el comportamiento del forjado. Su valor se define en la Ecuación 19.

$$k_{dist} = \max \left\{ k_{strut} \cdot \left[0,38 - 0,08 \cdot \ln \left(\frac{14 \cdot (EI)_b}{s^4} \right) \right], 0,30 \right\} \quad (19)$$

Siendo:

- k_{strut} : es un coeficiente que depende del arriostramiento transversal. Es igual a 0,97 solo en el caso de viguetas de madera maciza que tienen una rigidez transversal garantizada por una o varias líneas de aspas de arriostramiento, o codales con un canto de al menos el 75% del canto de las viguetas, además del efecto producido por el tablero de cerramiento superior o el falso techo; en otros casos es igual a 1,00.
- $(EI)_b$: es la rigidez del forjado en la dirección perpendicular a la dirección de las viguetas por metro de anchura, en $N \cdot mm^2/m$. Este valor se calculará utilizando el valor medio del módulo de elasticidad del tablero de cerramiento superior despreciando el efecto de las discontinuidades de las juntas entre las piezas que forman el tablero de cerramiento. Cuando los falsos techos de tableros de cartón yeso estén fijados directamente a la cara inferior de las viguetas, la rigidez a flexión del tablero de cartón yeso puede añadirse. Se puede suponer que el módulo de elasticidad del cartón yeso es de $2000 N/mm^2$. En el caso de viguetas de celosía que se encuentren unidas con un elemento continuo transversal asegurado a todas las viguetas dentro de la zona central del vano con longitud igual a $0,1 \cdot l$, la rigidez $(EI)_b$ puede incrementarse añadiendo la rigidez a flexión del elemento transversal (en N/mm^2) dividida por la luz l (en metros).
- s es la separación entre ejes de viguetas en mm.

k_{fv} : es el factor de amplificación de la flecha por efecto de la deformación debida al cortante. En el caso de viguetas de madera maciza y de viguetas en doble T con alma delgada encolada o de viguetas con alma de celosía con uniones mecánicas, puede tomarse de los casos indicados a continuación.

- 1,05 para viguetas de madera maciza biapoyadas.
- 1,10 para viguetas de madera maciza continuas.
- 1,15 para viguetas con sección en doble T con alma delgada encolada y biapoyadas.
- 1,30 para viguetas con sección en doble T con alma delgada encolada y continuas.
- 1,30 para viguetas con alma de celosía con uniones mecánicas y biapoyadas.
- 1,45 para viguetas con alma de celosía con uniones mecánicas y continuas.

l_{eq} : luz equivalente de las viguetas (mm).

- Para viguetas biapoyadas se tomará igual a la luz de cálculo, l .
- Para viguetas de vano extremo de vigas continuas se tomará $0,90 \cdot l$.
- Para viguetas de vanos internos de vigas continuas se tomará $0,85 \cdot l$.

$(EI)_{vig}$: es la rigidez a flexión de una vigueta en $N \cdot mm^2$, calculada utilizando el valor medio del módulo de elasticidad de la vigueta.

a : es un valor expresado en mm/kN, que se define en la Fig 1.

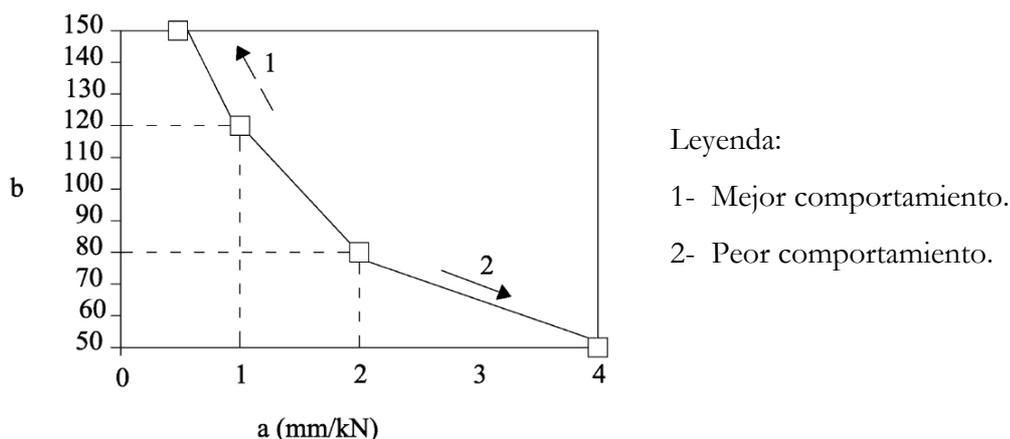


Figura 1 – Rango recomendado en la EN 1995-1-1 de los valores de a y b y de la relación entre sí.

b) Velocidad de vibración

$$v \leq b(f_1 \cdot \zeta^{-1}) \quad (20)$$

Donde:

v : es la respuesta de la velocidad al impulso unitario, es decir, el valor máximo inicial de la velocidad vertical de vibración del forjado (en m/s) provocado por un impulso unitario ideal (1Ns) aplicado en el punto del forjado en el que se obtenga la máxima respuesta. Pueden despreciarse las componentes por encima de los 40 Hz.

b : es un valor que se obtiene de la figura A.1, donde se encuentra ligado a valor de a .

f_1 : es la frecuencia fundamental del forjado, en Hz;

ζ : es el coeficiente de amortiguamiento modal. Para los forjados de entramado ligero habituales se propone adoptar para el valor del coeficiente de amortiguamiento modal, $\zeta = 0,02$.

El rango de los valores límite recomendados de a y b viene dada en la Figura 1. La relación entre ambos puede expresarse de la forma siguiente:

- Si $a \leq 1$: $b = 180 - 60 \cdot a$
- Si $1 \leq a \leq 2$: $b = 160 - 40 \cdot a$
- Si $2 \leq a \leq 4$: $b = 110 - 15 \cdot a$

Los cálculos anteriores deberían realizarse bajo la hipótesis de que el forjado se encuentra descargado, es decir, sólo bajo la masa correspondiente al peso propio del forjado y a otras acciones permanentes.

En el caso de forjados de planta rectangular con unas dimensiones $l \times b$, simplemente apoyado a lo largo de los cuatro bordes y con vigas de madera con una luz l , la frecuencia fundamental f_1 puede calcularse aproximadamente mediante la Ecuación 21.

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \quad (21)$$

Siendo:

- m : es la masa por unidad de superficie en kg/m^2 . Corresponde a las cargas permanentes sin incluir la carga de tabiquería.
- l : es la luz del forjado, en m.
- $(EI)_l$: es la rigidez a flexión del forjado respecto a un eje perpendicular a la dirección de las vigas, en $\text{N} \cdot \text{m}^2/\text{m}$. Normalmente corresponde a la rigidez a flexión de las viguetas.

Únicamente, en el caso de forjados contruidos o fabricados como elementos mixtos (tablero de cerramiento encolado adecuadamente, o capa colaborante de hormigón) se tomará la rigidez del conjunto.

En el caso de un forjado de planta rectangular con dimensiones $b \times l$, simplemente apoyado a lo largo de los cuatro bordes, el valor de v puede, como una aproximación, calcularse mediante la Ecuación 22.

$$v = \frac{4 \cdot (0,4 + 0,6 \cdot n_{40})}{mbl + 200} \quad (22)$$

Siendo:

- v : es la respuesta de la velocidad frente a un impulso unitario, en $\text{m}/(\text{N s}^2)$.
- n_{40} : es el número de modos de primer orden con frecuencias naturales de hasta 40 Hz.
- b : es el ancho del forjado, en m.
- m : es la masa, en kg/m^2 .
- l : es la luz del forjado, en m.

El valor de n_{40} puede calcularse mediante la Ecuación 23.

$$n_{40} = \left[\left(\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right) \cdot \left(\frac{b}{l} \right)^4 \cdot \frac{(EI)_l}{(EI)_b} \right]^{0,25} \quad (23)$$

Donde $(EI)_b$ es la rigidez a flexión de placa equivalente, en $\text{N} \cdot \text{m}^2/\text{m}$, del forjado respecto a un eje paralelo a las vigas, $(EI)_l$ es la rigidez a flexión equivalente del forjado respecto a un eje perpendicular a las viguetas, en $\text{N} \cdot \text{m}^2/\text{m}$, donde $(EI)_b < (EI)_l$.

3. Propuesta de Anexo Nacional al Eurocódigo 5 - Parte 1-2. AN/UNE-EN 1995-1-2:2004/AC: 2011

3.1. Objeto y ámbito de aplicación

La propuesta de Anexo Nacional uruguayo pretende definir las condiciones de aplicación en Uruguay de la norma europea EN 1995-1-2:2004/AC: 2011 y, en caso de no contar con información suficiente, dejar planteadas las tareas de investigación necesarias para definir las. Dicha norma debe ser tratada en conjunto con las norma EN 1995-1-1. Contempla

únicamente los métodos pasivos de protección frente al fuego y se aplica a estructuras de edificación que, sometidas a un incendio, deben cumplir las funciones de evitar el colapso prematuro y de limitar la propagación del fuego.

La norma EN 1995-1-2 describe los principios, requisitos y reglas para el dimensionamiento estructural de edificios expuestos al fuego, incluyendo requisitos de seguridad, de procedimiento de cálculo y de ayudas al dimensionamiento.

El Eurocódigo 5 referente a fuego trata la protección pasiva contra los incendios dimensionando las estructuras para que tengan la capacidad portante suficiente para evacuar una edificación en un tiempo determinado así como limitar, cuando proceda, la propagación del fuego. Dicho documento no incluye requisitos complementarios referentes a instalación de rociadores, condiciones de ocupación y sectorización del edificio ni el uso de aislamiento y materiales de revestimiento aceptados, siendo éstos objeto de la autoridad competente.

Dicha norma plantea distintos procedimientos de cálculo en función de reglas prescriptivas de las acciones térmicas dadas por el fuego nominal o en función del código basado en prestaciones de las acciones térmicas basadas en parámetros físicos.

En el apartado 3.2 se proponen los valores de los Parámetros de determinación nacional en Uruguay (NDP) de aplicación a edificación, que la norma EN 1995-1-2 deja abiertos para ser establecidos a nivel nacional. Además, se presentan aquellos cuya futura determinación, mediante campañas de investigación, se entienden importantes.

La propuesta de Anexo Nacional contiene además información complementaria no contradictoria (NCCI), cuyo objeto es facilitar la aplicación de la Norma Europea en Uruguay. Tiene carácter de información complementaria no contradictoria todo el apartado 3.3.

Además, se presentan en el apartado 3.3.2. los valores de tiempo de resistencia de la estructura frente al fuego, antes del colapso, para diferentes tipos de edificación.

3.2. Parámetros de determinación nacional (NDP)

Los parámetros de determinación nacional contemplados en el presente documento coinciden con los del Anexo Nacional español a la norma EN 1995-1-2 (AN/UNE-EN 1995-1-2, 2014) y se presentan a continuación.

Capítulo 2: Bases de proyecto

2.1.3(2) *Temperatura máxima alcanzada para la función de separación en exposición al fuego paramétrico*

Se adoptan los valores recomendados: $\Delta\Theta_1=200\text{K}$ y $\Delta\Theta_2=240\text{K}$

2.3(1)P *Coefficiente parcial de las propiedades del material*

Se adopta el valor recomendado $\gamma_{M,fi}=1,0$

2.3(2)P *Coefficiente parcial de las propiedades del material*

Se adopta el valor recomendado $\gamma_{M,fi}=1,0$

2.4.2(3) *Coefficiente de reducción para las combinaciones de acciones*

Se adopta el valor recomendado del coeficiente de reducción $\eta_{fi}=0,6$, excepto para las zonas de almacenamiento (zona E según EN 1990:2002) que se adopta $\eta_{fi}=0,7$.

Capítulo 4. Procedimientos de cálculo para la resistencia mecánica

4.2.1(1) *Método para determinar las propiedades de la sección transversal*

Se admite el empleo de los métodos del apartado 4.2.2 (método de la sección transversal reducida) y del apartado 4.2.3 (método de las propiedades reducidas).

3.3. Decisión sobre la aplicación de los Anexos Informativos

El Eurocódigo 5 en su parte 1-2 (EN 1995-1-2) presenta una serie de Anexos de carácter informativo y en el presente apartado se explicita su recomendación de seguimiento.

3.4. Información complementaria no contradictoria (NCCI)

3.4.1. Diferencia entre reacción al fuego y resistencia al fuego

Cabe diferenciar entre el concepto de reacción al fuego, cuyo estudio no es objeto de la norma EN 1995-1-2 ni del presente documento, y la resistencia al fuego.

La reacción al fuego se produce en la fase inicial de desarrollo de un incendio y se define como el índice de la capacidad del material para favorecer el desarrollo del incendio. La norma EN 13501-1:2007/A1:2010 establece las clases de reacción al fuego (A₁, A₂, B, C, D, E y F), que están relacionados con el índice de inflamabilidad del material y su contribución al fuego.

La resistencia al fuego tiene lugar en la segunda fase, la de continuidad del incendio, y establece el tiempo durante el cual el elemento constructivo es capaz de seguir cumpliendo su función en una situación de incendio. La resistencia al fuego se puede dar en términos de resistencia mecánica (R) con función portante, de aislamiento (I) con función de separación, o de integridad (E) con función portante y de separación. La norma EN 1995-1-2 y el presente documento hacen referencia únicamente a la resistencia mecánica en situación de incendio (R) en términos de capacidad de un elemento de soportar la exposición al fuego durante un tiempo “t” (10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240 ó 360 min) sin pérdida de su estabilidad estructural.

3.4.2. Resistencia al fuego de los elementos principales de la estructura

A falta de una normativa local que establezca el tiempo que deben resistir los elementos principales de una estructura antes del colapso por causa de un incendio, se toman los valores de tiempo en función del uso de la edificación planteados en el Código Técnico de la Edificación-Documento Básico-Seguridad en caso de Incendio (CTE-DB-SI, 2009) de España.

Se considera que la resistencia al fuego de un elemento estructural principal de una edificación (incluidos forjados, vigas y soportes) es suficiente si se alcanza la clase R de tiempo de resistencia al fuego de la estructura antes del colapso recogida en las Tablas 8 y 9.

Tabla 8 – Tiempo de resistencia al fuego de los elementos estructurales para diferentes usos (CTE-DB-SI, 2009)

Uso del sector de incendio considerado ⁽¹⁾	Plantas de sótano	Plantas sobre rasante - Altura de evacuación del edificio (h)		
		$h \leq 15$ m	$15 \text{ m} < h \leq 28$ m	$h > 28$ m
Vivienda unifamiliar ⁽²⁾	R30	R30	-	-
Residencial vivienda, residencial público, docente, administrativo	R120	R60	R90	R120
Comercial, pública concurrencia, hospitalario	R120 ⁽³⁾	R90	R120	R180
Aparcamiento (edificio de uso exclusivo o situado sobre otro uso)	R90			
Aparcamiento (situado bajo un uso distinto)	R120 ⁽⁴⁾			
(1) La <i>resistencia al fuego</i> suficiente R de los elementos estructurales de un suelo que separa <i>sectores de incendio</i> es función del uso del sector inferior. Los elementos estructurales de suelos que no delimitan un <i>sector de incendios</i> , sino que están conectados en él, deben tener al menos la <i>resistencia a fuego</i> suficiente R que se exija al uso de dicho sector.				
(2) En viviendas unifamiliares agrupadas o adosadas, los elementos que formen parte de la estructura común tendrán la <i>resistencia al fuego</i> exigible a edificios de uso <i>Residencial vivienda</i> .				
(3) R180 si la <i>altura de evacuación</i> excede de 28 m.				
(4) R180 cuando se trate de <i>aparcamientos robotizados</i> .				

Tabla 9 – Tiempo de resistencia al fuego de los elementos estructurales en zonas de riesgo especial integradas en los edificios⁽¹⁾ (CTE-DB-SI, 2009)

Riesgo especial bajo	R90
Riesgo especial medio	R120
Riesgo especial alto	R180
(1) No será inferior al de la estructura portante de la planta del edificio excepto cuando la zona se encuentre bajo una cubierta no prevista para evacuación y cuyo fallo no suponga riesgo para la estabilidad de otras plantas ni para la compartimentación contra incendios, en cuyo caso puede ser R 30. La <i>resistencia al fuego</i> suficiente R de los elementos estructurales de un suelo de una zona de riesgo especial es función del uso del espacio existente bajo dicho suelo.	

Se recogen un par de excepciones a los tiempos de resistencia al fuego requeridos en dichas tablas y que se recogen a continuación:

a) CUBIERTAS LIGERAS (carga permanente debida únicamente al cerramiento sea $\leq 1\text{kN/m}^2$) NO PREVISTAS PARA EVACUACIÓN Y CON ALTURA EXTERIOR $< 28\text{m}$: se admitirá una resistencia al fuego R30 cuando su fallo no pueda ocasionar daños graves a los edificios o establecimientos próximos ni comprometer la estabilidad de otras plantas inferiores o la compartimentación de los sectores de incendio.

b) ESCALERA O PASILLO PROTEGIDO: se exigirá una resistencia al fuego a los elementos estructurales que la conforman de, como mínimo, R30. En el caso de escaleras especialmente protegidas no se exige resistencia al fuego a los elementos estructurales.

3.4.3. Valores de cálculo de las velocidades de carbonización de la madera

A falta de estudios concretos sobre las especies que se utilizan principalmente en Uruguay (*Pinus taeda/elliottii* y *Eucalyptus grandis*) en cuanto a la velocidad de carbonización de la madera aserrada y de los diferentes productos de ingeniería de la madera, se toman por válidos los presentados en el apartado 3.4.2 de la EN 1995-1-2:2004, Tabla 10.

Para la selección de dichos valores se considera que tanto la madera maciza como la madera laminada encolada de *P. taeda* tiene una densidad característica (ρ_k) $\geq 290 \text{ kg/m}^3$ y que, tanto la madera maciza como la MLE de *E. grandis* tiene una densidad característica (ρ_k) de 430 kg/m^3 , por lo que procedería realizar una interpolación lineal entre los valores de velocidad de carbonización indicados en la tabla.

Tabla 10 – Valores de cálculo de la velocidad de carbonización β_0 y β_n de la madera aserrada y madera laminada encolada

		β_0 (mm/min)	β_n (mm/min)
CONÍFERAS Y HAYA	MLE con $\rho_k \geq 290 \text{ Kg/m}^3$	0,65	0,7
	Madera maciza con $\rho_k \geq 290 \text{ Kg/m}^3$	0,65	0,8
FRONDOSAS	Madera maciza o MLE de frondosas con $\rho_k = 290 \text{ Kg/m}^3$	0,65	0,7
	Madera maciza o MLE de frondosas con $\rho_k \geq 450 \text{ Kg/m}^3$	0,50	0,55
NOTAS: β_0 es la velocidad de carbonización para la carbonización unidimensional bajo una situación de exposición al fuego normalizado y β_n es el valor de cálculo de la velocidad de carbonización ficticia, que incorpora el redondeo de las aristas			

3.3.4. Combinación de acciones en situación de incendio y valor de cálculo de las resistencias

Las combinaciones de acciones para la situación de incendio se toman de la Ecuación 7 del presente documento, que establece las combinaciones de acciones para situaciones accidentales.

El valor de cálculo de la resistencia mecánica se obtiene a partir de la Ecuación 24.

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} (f_{20} / \gamma_{M,fi}) \quad (24)$$

donde,

$f_{d,fi}$ es el valor de cálculo de la resistencia en caso de incendio

f_{20} es el percentil 20% de una propiedad resistente a temperatura normal y se obtiene a partir de la ecuación (2.4.) de la norma EN 1995-1-2.

$k_{mod,fi}$ es el factor de modificación en caso de incendio y se considera que toma un valor de 1,00

$\gamma_{M,fi}$ es el coeficiente parcial de la madera en caso de incendio y toma un valor de 1,00.

4. Conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos

El presente documento no pretende establecer una versión final y definitiva de un Anexo Nacional a la normativa europea, sino constituir un primer acercamiento que sirva de base para su discusión. Se considera imprescindible que la redacción de ese Anexo se realice en el ámbito de un comité técnico en el que participen no sólo profesionales de la madera estructural, sino también expertos en otros materiales estructurales, ya que varios de los coeficientes utilizados y límites establecidos en este Informe, son comunes a dichos materiales.

4.1. Conclusiones

1. En las reuniones mantenidas al inicio del proyecto *Documentos técnicos base para la normalización de estructuras y construcción con madera* se decidió entre otros, proponer: i) adoptar la reglas de diseño del Eurocódigo 5 con las modificaciones pertinentes para adaptarlo al uso de la madera procedencia uruguaya; y ii) plantear el contenido del Anexo Nacional uruguayo al Eurocódigo 5 en sus partes 1-1 y 1-2: EN 1995-1-1, relativas a las reglas generales y reglas para la edificación, y EN 1995-1-2, relativas a los proyectos de estructuras de madera sometidas a fuego. No se incluye en esta propuesta un Anexo Nacional al Eurocódigo 5- parte 2, relativa a puentes de madera.

2. En la propuesta de Anexo Nacional a EN 1995-1-1, se incluyen los siguientes parámetros de determinación nacional : 1) asignación de las cargas a las clases de duración de la carga; 2) asignación de las estructuras a las clases de servicio; 3) coeficientes parciales de seguridad para las propiedades de la madera de Uruguay; 4) la ecuación recomendada para el cálculo de vigas a dos aguas, vigas curvas y curvas a dos aguas; 5) los valores límite de las deformaciones; 6) recomendaciones con respecto a las uniones y a la consideración de tendencia a la hienda de las especies de madera uruguaya; 7) el método de cálculo recomendado para los diafragmas de muro; 8) factores de modificación de arriostamiento para vigas y sistemas de celosía; y 9) limitaciones de curvatura y desviaciones máximas para sistemas de cerchas con uniones de placas dentadas.

3. Los coeficientes parciales para las propiedades del material fueron obtenidos a partir de lo propuesto en el Anexo 3 de EN 1990 (2002), considerando los resultados de los ensayos de *Pinus elliottii/taeda* de procedencia uruguaya. Dichos coeficientes deberán ser revisados a medida que se disponga de más información de las propiedades de la madera uruguaya en base a los resultados de un mayor número de muestras analizadas.

4. Se recomienda el seguimiento de los Anexos Informativos de EN 1995-1-1.

5. En el presente documento, se incluye la siguiente información complementaria no contradictoria a EN 1995-1-1:

- normas uruguayas de aplicación y conversión de la velocidad característica del viento de la norma uruguaya UNIT 50 a la velocidad básica del viento definida en la parte relativa al viento del Eurocódigo 1;
- combinaciones de acciones para las estructuras de madera para los estados límite últimos y estados límite de servicio;
- definiciones para el cálculo de flechas de vigas de madera;

- definiciones para el cálculo de desplazamientos horizontales.

6. En la propuesta de Anexo Nacional a EN 1995-1-2, se incluyen los siguientes parámetros de determinación nacional : 1) valores recomendados de temperatura máxima alcanzada para la función de separación en exposición al fuego paramétrico; 2) recomendación de tomar un valor de 1,00 para el coeficiente parcial de las propiedades del material en situación de incendio; 3) tomar un valor recomendado de 0,6 para el coeficiente de reducción para las combinaciones de acciones, excepto para la zonas de almacenamiento donde se tomará un valor de 0,7; y 4) se proponen los dos métodos admitidos para la determinación de las propiedades de la sección transversal: el método de la sección reducida y el método de las propiedades reducidas, aunque se recomienda el uso del primero.

7. Se incluye en el presente documento la siguiente información complementaria no contradictoria a EN 1995-1-2:

- diferencia entre la reacción al fuego y la resistencia al fuego;
- resistencia al fuego de los elementos principales de la estructura;
- valores de cálculo de las velocidades de carbonización de la madera;
- combinación de acciones en situación de incendio y valor de cálculo de las resistencias.

4.2. Recomendaciones para futuros trabajos

Con el fin de completar y mejorar el Anexo Nacional uruguayo, se requiere investigación en:

- determinación del aplastamiento de la madera uruguaya para el cálculo de uniones;
- definición de la velocidad de carbonización de las especies uruguayas;
- propiedades físicas y mecánicas de la madera aserrada y de los productos de ingeniería de la madera uruguaya y presentación de los valores característicos en el marco de una norma UNIT.

5. Bibliografía

AN/UNE-EN 1995-1-1 (2014). Anejo Nacional de España al Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para la edificación. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, Madrid

AN/UNE-EN 1995-1-2 (2014). Anejo Nacional de España al Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-2: Reglas generales. Proyectos de estructuras sometidas al fuego. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, Madrid

CTE-DB-SE-M (2009). Código Técnico de la Edificación. Documento Básico. Seguridad Estructural: Madera. Ministerio de Fomento, Madrid

EN 1990 (2002/AC: 2010). Eurocódigos. Bases de Cálculo de estructuras. Comité Europeo de Normalización CEN, Bruselas

EN 1991-1-1 (2002/AC:2010). Eurocódigo 1. Acciones en estructuras. Parte 1-1: Acciones generales. Pesos específicos, pesos propios y sobrecargas de uso en edificios. Comité Europeo de Normalización CEN, Bruselas

EN 1991-1-4 (2007/AC:2010). Eurocódigo 1. Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones de viento. Comité Europeo de Normalización CEN, Bruselas

EN 1995-1-1 (2006/A2:2015). Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para la edificación. Comité Europeo de Normalización CEN, Bruselas

EN 1995-1-2 (2004/AC 2011). Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-2: Reglas generales. Proyectos de estructuras sometidas al fuego. Comité Europeo de Normalización CEN, Bruselas

EN 1995-2 (2010). Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 2: Puentes. Comité Europeo de Normalización CEN, Bruselas

EN 13501-1 (2007/A1:2010). Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos de ensayos de reacción al fuego. Comité Europeo de Normalización CEN, Bruselas

Páez, P.; Morquio, A. (2014). Estudio comparativo entre normas de los parámetros que caracterizan el viento. Memorias de las XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Montevideo, Uruguay.

UNIT 33 (1991). Cargas a utilizar en el proyecto de edificios. Instituto Uruguayo de Normas Técnicas UNIT, Montevideo

UNIT 50 (1984). Acción del viento sobre construcciones. Instituto Uruguayo de Normas Técnicas UNIT, Montevideo