



CONCEPTOS  
AVANZADOS

# DEL DISEÑO ESTRUCTURAL CON MADERA

PARTE I: UNIONES, REFUERZOS, ELEMENTOS  
COMPUESTOS Y DISEÑO ANTISÍSMICO

PABLO GUINDOS



EDICIONES UC

# CONCEPTOS AVANZADOS DEL DISEÑO ESTRUCTURAL CON MADERA

## PARTE I

---

### UNIONES, REFUERZOS, ELEMENTOS COMPUESTOS Y DISEÑO ANTISÍSMICO

EDICIONES UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
Vicerrectoría de Comunicaciones  
Av. Libertador Bernardo O'Higgins 390, Santiago, Chile

editorialedicionesuc@uc.cl  
www.ediciones.uc.cl

## CONCEPTOS AVANZADOS DEL DISEÑO ESTRUCTURAL CON MADERA

**Parte I: Uniones, Refuerzos, Elementos Compuestos  
y Diseño Antisísmico**  
Pablo Guindos B.

© Inscripción N° 309.676  
Derechos reservados  
Octubre 2019  
ISBN N° 978-956-14-2461-6

Dibujos: Francisca Evans Zaldívar y Marcela Pasten Espinosa  
Diseño de portada: Francisco López Urquieta  
Fotografía de portada: Edificio Mjøstårnet de 18 pisos en Noruega,  
cortesía de Moelven

Diseño: Francisca Galilea  
Impresor: Imprenta Salesianos S.A.

CIP-Pontificia Universidad Católica de Chile  
Guindos Bretones, Pablo, autor.  
Conceptos avanzados del diseño estructural con madera / Pablo  
Guindos; ilustraciones de Francisca Evans y Marcela Pasten.  
Contenido: Volumen 1. Uniones, refuerzos, elementos compuestos y  
diseño antisísmico – Volumen 2. CLT, modelación numérica, diseño  
anti-incendios y ayudas al cálculo.

1. Construcciones de madera – Chile.
  2. Ingeniería estructural.
  3. Estructuras de madera.
  4. Propiedades de la madera.
- I. t.
- II. Evans, Francisca, ilustrador.
- III. Pasten Espinosa, Marcela Eleonora, ilustrador.
- 2019 721.04470983 DCC23 RDA



# CONCEPTOS AVANZADOS DEL DISEÑO ESTRUCTURAL CON MADERA

## PARTE I

---

### UNIONES, REFUERZOS, ELEMENTOS COMPUESTOS Y DISEÑO ANTISÍSMICO

PABLO GUINDOS



EDICIONES UC





*Dedicado a Gael*



# CONTENIDO

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>PRÓLOGO</b> .....                                                                                     | 15 |
| <b>PREFACIO</b> .....                                                                                    | 17 |
| <b>¿CÓMO LEER ESTE LIBRO?</b> .....                                                                      | 21 |
| <b>1. DISEÑO ESTRUCTURAL Y CARACTERIZACIÓN DE UNIONES</b> .....                                          | 23 |
| 1.1    Introducción .....                                                                                | 23 |
| 1.2    Parte I: metodología global de diseño y cálculo analítico .....                                   | 24 |
| 1.2.1    Paralelismo de los conectores elásticos .....                                                   | 24 |
| 1.2.2    Rigidez de la unión .....                                                                       | 25 |
| 1.2.3    No-homogeneidad en la distribución de fuerzas por<br>distribución inherente del corte .....     | 29 |
| 1.2.4    Verificación de la capacidad resistente de una unión .....                                      | 30 |
| 1.2.5    Efecto el ángulo fuerza-fibra .....                                                             | 38 |
| 1.2.6    Comparación analítica de capacidades NCh11<br>98-NDS-EC5 .....                                  | 38 |
| 1.2.7    Resistencia al aplastamiento, resistencia axial y<br>momento plástico según EC5 y NCh1198 ..... | 46 |
| 1.2.8    Factor de modificación de la capacidad de carga .....                                           | 50 |
| 1.2.9    Distribución de fuerzas elásticas .....                                                         | 53 |
| 1.2.10    Distribución inelástica de carga en cada conector .....                                        | 61 |
| 1.2.11    Verificación de la madera de unión .....                                                       | 63 |
| 1.2.12    Verificación de la tracción perpendicular en la madera<br>de unión .....                       | 72 |
| 1.2.13    Uniones con múltiples planos de cortadura .....                                                | 78 |
| 1.2.14    Uniones de cortadura doble asimétricas .....                                                   | 84 |
| 1.2.15    Excentricidad inherente en uniones N <sup>+</sup> .....                                        | 84 |
| 1.2.16    Excentricidad inducida .....                                                                   | 87 |
| 1.2.17    Concepto de sobredistancia en la compresión normal u<br>oblicua en uniones .....               | 90 |
| 1.2.18    Espesor mínimo para fluencia plástica .....                                                    | 94 |

|           |                                                                                                       |     |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1.2.19    | Ayudas al diseño general de uniones laterales . . . . .                                               | 102 |
| 1.3       | Parte II: Especificaciones para los distintos tipos de uniones . . . . .                              | 105 |
| 1.3.1     | Especificaciones para uniones con pernos . . . . .                                                    | 105 |
| 1.3.2     | Especificaciones para uniones con pasadores . . . . .                                                 | 107 |
| 1.3.3     | Especificaciones para uniones con tirafondos . . . . .                                                | 109 |
| 1.3.4     | Especificaciones para uniones con tornillos . . . . .                                                 | 109 |
| 1.3.5     | Especificaciones para uniones con clavos . . . . .                                                    | 110 |
| 1.3.6     | Especificaciones para uniones de superficie . . . . .                                                 | 113 |
| 1.3.6.1   | Conectores de precisión rectangulares . . . . .                                                       | 113 |
| 1.3.6.2   | Conectores de anillo . . . . .                                                                        | 115 |
| 1.3.6.3   | Conectores dentados . . . . .                                                                         | 116 |
| 1.3.6.4   | Placas clavo o placas dentadas . . . . .                                                              | 119 |
| 1.3.7     | Especificaciones para uniones tradicionales . . . . .                                                 | 124 |
| 1.3.7.1   | Uniones a tope . . . . .                                                                              | 125 |
| 1.3.7.2   | Embarbillados . . . . .                                                                               | 125 |
| 1.3.7.3   | Uniones de caja y espiga . . . . .                                                                    | 130 |
| 1.3.7.4   | Uniones en cola de milano . . . . .                                                                   | 132 |
| 1.3.7.5   | Uniones con pasadores (tacos) de madera . . . . .                                                     | 133 |
| 1.3.8     | Especificaciones para uniones encoladas . . . . .                                                     | 134 |
| 1.3.8.1   | Uniones encoladas madera-madera . . . . .                                                             | 135 |
| 1.3.8.2   | Compatibilidad higrotérmica . . . . .                                                                 | 143 |
| 1.3.8.3   | Uniones híbridas encoladas . . . . .                                                                  | 144 |
| 1.3.8.3.1 | Uniones con barras encoladas . . . . .                                                                | 146 |
| 1.3.8.3.2 | Uniones con elementos tipo placa . . . . .                                                            | 153 |
| 1.3.9     | Representación gráfica miembros y uniones según<br>NCh1198 . . . . .                                  | 153 |
| 1.4       | Parte III: Caracterización experimental de uniones . . . . .                                          | 153 |
| 1.4.1     | Introducción . . . . .                                                                                | 153 |
| 1.4.2     | Caracterización monotónica de uniones y ensambles . . . . .                                           | 154 |
| 1.4.2.1   | Caracterización de una curva monotónica . . . . .                                                     | 155 |
| 1.4.2.2   | Ejemplos de curvas F- $\delta$ para distintos tipos<br>de uniones . . . . .                           | 157 |
| 1.4.2.3   | Métodos de ensayo monotónico para la<br>caracterización de uniones y ensambles de<br>madera . . . . . | 160 |
| 1.4.3     | Ensayo cíclico de uniones y ensambles . . . . .                                                       | 161 |
| 1.4.3.1   | Caracterización de una curva cíclica . . . . .                                                        | 163 |
| 1.4.3.2   | Ejemplos de curvas histeréticas para distintos<br>tipos de uniones de madera . . . . .                | 176 |
| 1.4.3.3   | Métodos de ensayo cíclico . . . . .                                                                   | 177 |
| 1.5       | Lecturas adicionales . . . . .                                                                        | 180 |

|                                                                                                 |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>2. DISEÑO ESTRUCTURAL DE REFUERZOS</b>                                                       | <b>181</b> |
| 2.1.1    Introducción                                                                           | 181        |
| 2.1.2    Tipos de refuerzos                                                                     | 182        |
| 2.1.3    Refuerzo de tracciones perpendiculares para rebajes en zona de apoyo                   | 186        |
| 2.1.4    Refuerzos para vigas con perforaciones                                                 | 190        |
| 2.1.5    Refuerzos de tracción perpendicular en zona de cumbrera                                | 193        |
| 2.1.6    Refuerzos de compresión normal en zonas de apoyo                                       | 196        |
| 2.1.7    Refuerzos para incrementar la capacidad o/y ductilidad en uniones                      | 204        |
| 2.1.7.1    Tableros de alta resistencia                                                         | 204        |
| 2.1.7.2    Tornillos autoperforantes                                                            | 210        |
| 2.1.8    Refuerzos para incrementar la capacidad, rigidez o/y ductilidad de miembros en flexión | 212        |
| 2.1.9    Refuerzos para incrementar la capacidad al cortante en zonas de apoyo                  | 220        |
| 2.1.10    Refuerzos para incrementar la rigidez de diafragmas                                   | 225        |
| 2.2    Lecturas adicionales                                                                     | 229        |
| <b>3. DISEÑO DE ELEMENTOS COMPUESTOS</b>                                                        | <b>231</b> |
| 3.1    Introducción                                                                             | 231        |
| 3.2    Elementos compuestos de interfaz rígida                                                  | 231        |
| 3.2.1    Verificación de elementos en I y cajón                                                 | 237        |
| 3.2.2    Verificación de paneles de cubierta tensionada                                         | 248        |
| 3.3    Verificación de elementos compuestos de interfaz semi-rígida                             | 253        |
| 3.3.1    Método gamma $\gamma$                                                                  | 256        |
| 3.3.2    Generalización para vigas en cajón y vigas en I con alma atravesando las alas          | 262        |
| 3.3.3    Generalización para columnas con axil centrado                                         | 262        |
| 3.3.4    Generalización para vigas en celosía                                                   | 265        |
| 3.4    Losas compuestas de madera-hormigón                                                      | 268        |
| 3.5    Columnas compuestas separadas                                                            | 279        |
| 3.6    Columnas dobles, triples y múltiples                                                     | 283        |
| 3.7    Lecturas adicionales                                                                     | 287        |
| <b>4. CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE PÓRTICOS</b>                                            | <b>289</b> |
| 4.1    Fundamentos del cálculo                                                                  | 289        |
| 4.2    Uniones rígidas y semi-rígidas de pórticos                                               | 290        |
| 4.3    Longitudes efectivas de pandeo habituales en pórticos y otras estructuras comunes        | 293        |
| 4.4    Lecturas adicionales                                                                     | 303        |

|                                                                                                                        |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>5. ESTABILIDAD LATERAL Y DISEÑO SISMORRESISTENTE . . . . .</b>                                                      | <b>305</b> |
| 5.1 Introducción . . . . .                                                                                             | 305        |
| 5.1.1 Consideraciones preliminares . . . . .                                                                           | 307        |
| 5.1.2 Estructuración del capítulo . . . . .                                                                            | 310        |
| 5.2 Acciones sísmicas esenciales . . . . .                                                                             | 312        |
| 5.2.1 Corte basal ( $Q_0$ ) . . . . .                                                                                  | 312        |
| 5.2.2 Fuerza sísmica de piso en muros según análisis de la<br>fuerza estática equivalente ( $F_k$ o $F_x$ ) . . . . .  | 317        |
| 5.2.3 Fuerza sísmica de piso en muros ( $F_k$ o $F_x$ ) según el<br>análisis modal espectral . . . . .                 | 318        |
| 5.2.4 Fuerza sísmica de piso en diafragmas ( $F_{px}$ ) . . . . .                                                      | 321        |
| 5.2.5 Fuerza sísmica de componentes ( $F_p$ ) . . . . .                                                                | 324        |
| 5.2.6 Fuerza sísmica de miembros especiales ( $F_m$ ) . . . . .                                                        | 324        |
| 5.3 Dimensionado analítico de diafragmas regulares . . . . .                                                           | 326        |
| 5.3.1 Consideraciones acerca de diafragmas rígidos y flexibles . . . . .                                               | 328        |
| 5.3.2 Predimensionado de vigas y viguetas . . . . .                                                                    | 331        |
| 5.3.3 Predimensionado de tableros según carga perpendicular<br>al plano (gravitacional y presión del viento) . . . . . | 332        |
| 5.3.4 Predimensionado del tablero . . . . .                                                                            | 334        |
| 5.3.5 Distribución de la carga en el diafragma . . . . .                                                               | 347        |
| 5.3.6 Dimensionamiento del clavado y el tablero según carga<br>lateral . . . . .                                       | 352        |
| 5.3.7 Dimensionamiento de cuerdas . . . . .                                                                            | 362        |
| 5.3.8 Dimensionamiento de colectores . . . . .                                                                         | 366        |
| 5.3.9 Flexibilidad y rigidez equivalente en diafragmas<br>regulares . . . . .                                          | 368        |
| 5.3.10 Verificación de vigas y viguetas considerando carga<br>gravitacional y lateral . . . . .                        | 375        |
| 5.4 Dimensionamiento de muros . . . . .                                                                                | 375        |
| 5.4.1 Espesor del tablero según carga de viento perpendicular . . . . .                                                | 376        |
| 5.4.2 Distribución de carga lateral en muros . . . . .                                                                 | 377        |
| 5.4.3 Clavado y espesor según carga lateral . . . . .                                                                  | 378        |
| 5.4.4 Estrategias generales de diseño de muros de entramado<br>ligero . . . . .                                        | 382        |
| 5.4.4.1 Método del muro segmentado . . . . .                                                                           | 382        |
| 5.4.4.2 Muros diseñados para transmitir fuerza<br>alrededor de las aperturas . . . . .                                 | 386        |
| 5.4.4.3 Método del muro perforado . . . . .                                                                            | 393        |
| 5.4.5 Diseño de pies derechos (cuerdas) y soleras según<br>tensiones verticales . . . . .                              | 397        |
| 5.4.5.1 Pies derechos de borde traccionados . . . . .                                                                  | 398        |
| 5.4.5.2 Pies derechos de borde comprimidos . . . . .                                                                   | 398        |

|          |                                                                                                       |     |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.4.5.3  | Aplastamiento perpendicular en solera . . . . .                                                       | 399 |
| 5.4.5.4  | Dimensionamiento de pies derechos según<br>carga perpendicular al plano . . . . .                     | 400 |
| 5.4.6    | Dimensionamiento de colectores y cabezales . . . . .                                                  | 400 |
| 5.4.7    | Flexibilidad y rigidez de muros de corte . . . . .                                                    | 401 |
| 5.5      | Notas para el diseño de fundaciones en relación al volcamiento . . .                                  | 405 |
| 5.6      | Ingeniería de detalle de anclajes del SRCL . . . . .                                                  | 406 |
| 5.6.1    | Anclajes de muros . . . . .                                                                           | 407 |
| 5.6.2    | Anclajes del diafragma . . . . .                                                                      | 415 |
| 5.7      | Introducción al diseño con irregularidades . . . . .                                                  | 418 |
| 5.8      | Consideraciones acerca del efecto de la carga axial en muros<br>de corte . . . . .                    | 425 |
| 5.9      | SRCL de barras y sistemas de estabilidad (diseño de<br>arriostramientos) . . . . .                    | 426 |
| 5.10     | Efectos P-delta en la acción sísmica . . . . .                                                        | 432 |
| 5.11     | Métodos de análisis sísmico . . . . .                                                                 | 436 |
| 5.11.1   | Método elástico y estático de la fuerza equivalente . . . . .                                         | 436 |
| 5.11.2   | Análisis modal espectral . . . . .                                                                    | 438 |
| 5.11.3   | Método elástico y dinámico de tiempo historia . . . . .                                               | 439 |
| 5.11.4   | Método no-lineal estático (pushover estático) y diseño<br>por capacidad . . . . .                     | 440 |
| 5.11.4.1 | Método de la capacidad y demanda espectral . . . . .                                                  | 441 |
| 5.11.4.2 | Diseño por capacidad . . . . .                                                                        | 444 |
| 5.11.4.3 | Filosofía de ductilidad de las uniones . . . . .                                                      | 444 |
| 5.11.4.4 | Especificaciones para el diseño sísmico de<br>estructuras con marcos resistentes al momento . . . . . | 451 |
| 5.11.4.5 | Diseño sísmico de estructuras de marcos<br>arriostrados . . . . .                                     | 454 |
| 5.11.4.6 | Diseño sísmico de estructuras de<br>marco-plataforma . . . . .                                        | 455 |
| 5.11.4.7 | Diseño sísmico de estructuras de CLT . . . . .                                                        | 455 |
| 5.11.4.8 | Diseño sísmico de estructuras con núcleos u<br>otro tipo de estructuras duales . . . . .              | 456 |
| 5.11.5   | Método de análisis tiempo historia no-lineal . . . . .                                                | 457 |
| 5.12     | Introducción a la aplicación de tecnologías de protección sísmica . .                                 | 458 |
| 5.13     | Lecturas adicionales . . . . .                                                                        | 461 |





## PRÓLOGO

La construcción de mejores ciudades conlleva a la necesidad constante de buscar nuevos elementos y materiales que contribuyan a mejorar la calidad de vida de las personas. Así es como desde hace unos años el uso de la madera se alzó como una alternativa en la construcción de viviendas sociales, con variados atributos que las hacen soluciones más sustentables e innovadoras.

La relación entre Chile y el desarrollo en el uso de la madera está viviendo una época atractiva que invita a hacerle seguimiento para potenciar su inclusión en la industria. Somos uno de los diez países productores más importantes a nivel internacional y se trata del segundo sector exportador a nivel nacional y el primero basado en fuentes renovables.

Claro que para trazarse nuevos desafíos lo primero es avanzar en productividad, industrialización e innovación y así cumplir con un compromiso tan clave como necesario: duplicar su uso en la construcción de viviendas al año 2035.

En el Ministerio de Vivienda y Urbanismo hemos avanzado en hacer alianzas colaborativas con representantes del mundo académico, sectorial e interinstitucional, que nos han permitido impulsar varias iniciativas para que la madera se convierta en una alternativa competitiva en el mercado, potenciando su versatilidad para generar soluciones sustentables, innovadoras, y con alto nivel de prefabricación, apuntando a la productividad y al potencial de crecimiento del sector.

Por cierto, para garantizar el éxito y potenciar el uso avanzado de la madera en la construcción en Chile, es indispensable el esfuerzo conjunto y coordinado de todos los actores, a través de una cooperación público-privada. Lo logrado hasta ahora es fruto de un trabajo del Estado con el sector privado, con las entidades gremiales, los académicos y profesionales del área, para avanzar sostenidamente y garantizar impactos positivos en la calidad de vida de las familias, en términos del estándar y la durabilidad de las construcciones que habitan.

Estamos conscientes de que aún queda camino por recorrer frente a este tema, pero nos motiva hacer de Chile un referente a nivel mundial. Por eso, valoro el significativo aporte de esta publicación, que establece una base tecnológica sólida que permite abordar las construcciones en madera con mayor eficiencia, calidad y modernidad.

Cristián Monckeberg Bruner  
Ministro de Vivienda y Urbanismo

## PREFACIO

Este libro conforma la segunda parte de una trilogía, en la cual se profundiza acerca del diseño estructural con madera. En concreto, partiendo de la base del primer libro introductorio “*Fundamentos del diseño y la construcción con madera*”, este tomo se focaliza en el diseño y cálculo avanzado de uniones, refuerzos, elementos compuestos, pórticos y edificios construidos con el sistema liviano de marco-plataforma con énfasis en su diseño anti-sísmico. El tercer libro de la trilogía, titulado “*Conceptos avanzados del diseño estructural con madera. Parte II*”, presenta un formato similar al de este libro, y complementa los contenidos del mismo. En dicha parte, se exponen conceptos avanzados acerca del diseño estructural con CLT, la modelación numérica de estructuras y componentes, la protección anti-incendios y una compilación de tablas y otros elementos de ayuda al cálculo.

El objetivo de este libro es servir como un manual de diseño y cálculo para ingenieros y diseñadores con el fin de facilitar el diseño estructural con madera y aproximarlos, en la medida de lo posible, al diseño estructural con hormigón armado y acero. Así pues, la mayoría de conceptos estructurales del diseño con madera son recogidos entre la segunda y tercera parte de esta trilogía. Sin embargo, especial énfasis se ha proporcionado a la ingeniería de detalle y el diseño y cálculo de edificios de mediana altura.

Tal como se expone a lo largo de este y el siguiente tomo, existen diversos vacíos normativos en una parte no menor de los conceptos aquí discutidos. Es por ello, que gran parte de la exposición intercala la normativa nacional chilena, con normativa europea y norteamericana. Dicha exposición normativa presentada en un “formato internacional”, junto con el énfasis que se ha pretendido otorgar a aspectos aún no estandarizados, se espera que pudiese ser también de relevancia para investigadores y desarrolladores.

Las razones específicas que me llevaron a escribir este libro podrían ser vistas como las mismas que estimularon la edición del primer tomo, pero más agudizadas: una cantidad significativa de avances estructurales han surgido en las últimas dos décadas,

y los conceptos de diseño estructural avanzado con madera raramente han sido discutidos en textos de lengua castellana. Sin embargo, la segunda y tercera parte de esta trilogía responde a una necesidad mucho más profunda. Curiosamente en varios países de Ibero-Latinoamérica sucede que la madera ha sido tradicionalmente impartida en escuelas de arquitectura, construcción e ingeniería forestal, pero en muchos casos ha adquirido una presencia menor en la ingeniería civil. Esto en parte es debido a que, en muchos países, las construcciones con madera han sido relegadas a viviendas de bajo standing económico o/y baja complejidad estructural, las cuales a menudo han sido diseñadas con prescripciones constructivas más que con principios ingenieriles. Si bien por muchos años esto ha podido bastar en algunas aplicaciones tales como segundas viviendas unifamiliares, ha retrasado considerablemente el desarrollo estructural y normativo que ahora resulta ser una barrera para extender el uso de la madera hacia aplicaciones más complejas tales como en edificios. Por todo ello, se considera especialmente necesario disponer de un texto para tal fin.

Por supuesto la motivación global sigue siendo impulsada por la firme convicción de que construir una parte razonable de obras e infraestructura con madera ofrece múltiples ventajas que no deberían obviarse en estos tiempos. Principalmente construir con madera genera, en mi opinión, un entorno más sostenible desde el punto de vista ecológico, pero también la posibilidad de lograr un beneficio socioeconómico que se destaque por repercutir en un espectro muy amplio de la sociedad, llegando hasta las poblaciones rurales. Dichos potenciales beneficios deberían ser especialmente relevantes en Ibero-Latinoamérica, debido no solo a sus tendencias de poblaciones urbanas y su moderada/baja tasa de construcción con madera, sino también debido al carácter forestal de muchos de sus países, los cuales por cierto tienen una capacidad de renovación forestal envidiable en comparación a otros lugares del mundo.

En el recorrido que ha supuesto la edición de estos libros, quisiera agradecer primeramente a los autores que han colaborado conmigo en la escritura de multitud de capítulos y anexos, lo que incluye a Vanesa Baño, Laura Moya, Juan Carlos Píter, Rocío Ramos, Minia Rodríguez, Mauricio González, Peter Dechent, Jairo Montañó y Sebastián Berwart, como también mis estudiantes Raúl Araya, Felipe Arriagada y Sebastián Zisis. En esta labor quisiera también destacar el enorme trabajo de excelente calidad, y la interminable paciencia de las arquitectas y dibujantes Francisca Evans, Francisca González y Marcela Pasten. Sin todos estos profesionales esta obra no hubiese sido posible en extensión, ni mucho menos en calidad y rigurosidad. También quisiera agradecer el trabajo de los autores precedentes en la materia por su invaluable conocimiento e inspiración. Por supuesto agradezco a mi familia, Minia, Björn, Gael, mis hermanos y mis padres por su comprensión, ánimo y cariño. También quisiera agradecer el apoyo y disposición de Juan José Ugarte, Mario Ubilla, Alexander Opazo y José Luis Almazán, y por supuesto la

inmejorable labor en la revisión y mejora por parte de Gonzalo Hernández, Mario Wagner, Felipe Victorero, José Luis Salvatierra, Jairo Montaña, Hernán Santa María y Franco Benedetti. Quisiera expresar especial agradecimiento en esta labor de revisión a Minia Rodríguez e Ignacio González quienes con su enorme generosidad revisaron una gran parte de los contenidos de la extensa trilogía. Finalmente quisiera agradecer a la Escuela de Ingeniería UC y a Ediciones UC por su excepcional apoyo en la publicación simultánea de esta trilogía, y muy especialmente al Centro de Innovación en Madera CIM-UC CORMA y su Directorio por su contagiosa motivación y apoyo continuado.



## ¿CÓMO LEER ESTE LIBRO?

La lectura de este libro puede realizarse por capítulos independientes, sin embargo, se recomienda leer el libro secuencialmente. En especial, en el primer capítulo de uniones se introducen multitud de aspectos esenciales que son la base de muchos conceptos discutidos posteriormente. Sin lugar a dudas, en todo caso el lector de este libro debería estar completamente familiarizado con la base del primer libro introductorio “*Fundamentos del diseño y la construcción con madera*”, en especial en lo relativo a los capítulos que abordan la base de cálculo lo que se corresponde desde el Capítulo 6 hasta el Capítulo 11. El lector debe prestar especial atención a que en este libro se referencia muy a menudo la normativa europea y norteamericana. Así es que, aunque toda la base de cálculo del primer libro es necesaria, la asimilación del Capítulo 7 del primer libro —en donde se presentan las principales características del método de cálculo en Chile, Europa y Norteamérica— es absolutamente imprescindible.

Este libro no incluye ningún anexo, ni tampoco se proporciona prácticamente ninguna tabla de ayuda al cálculo o al dimensionado. Esto es debido a que las ayudas al cálculo se han concentrado al final del tercer libro de la trilogía, titulado “*Conceptos avanzados del diseño estructural con madera. Parte II*”. Dichas ayudas, no son ni mucho menos la única parte del tercer tomo que complementa al segundo; en el tercer libro también se incluye un capítulo específico de cómo modelar numéricamente las estructuras de madera que se discuten en este tomo, y también las principales estrategias y métodos de cálculo en lo relativo a la protección frente a incendios. Por todo ello, se recomienda complementar los contenidos de este libro con el tercer tomo.

Al igual que en el primer tomo, algunas partes de este libro hacen referencia directa a la principal normativa de diseño estructural con madera de Chile, la NCh1198, lo que se destaca con un **formato de letra diferente**. En concreto las tablas específicas de la normativa NCh1198:2010 se referencian como T seguido por el número de tabla, las páginas como PG seguidas por el número de página, las secciones se referencian directamente con los dígitos de la sección correspondiente como por ejemplo 6.8



y los anexos se referencian como A, seguido por la correspondiente letra del anexo al que se hace referencia.

La estructura del libro es la siguiente: en el Capítulo 1 se profundiza acerca del diseño estructural y la caracterización experimental de uniones; en el Capítulo 2 se presenta el estado actual del diseño de refuerzos estructurales para estructuras nuevas y también para estructuras existentes; el Capítulo 3 trata acerca del diseño de elementos compuestos y se incluye en este capítulo el diseño de losas mixtas de madera y hormigón; el Capítulo 4 es un breve capítulo en donde se presentan algunas particularidades acerca del diseño de pórticos; finalmente en el Capítulo 5 se presenta la metodología general para el diseño sismo-resistente con énfasis en edificios construidos con el sistema de marco plataforma. Un ejemplo de cálculo de edificio y un método de diseño simplificado de edificios son entregados en el tercer tomo. Debe notarse que el diseño de uniones, losas compuestas, y edificios de CLT por su carácter especial en cuanto a los métodos de cálculo, no se aborda en este libro sino que se presenta de forma integral en un Capítulo separado del tercer tomo.

## CAPÍTULO I

---

# DISEÑO ESTRUCTURAL Y CARACTERIZACIÓN DE UNIONES

### I.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo presenta las metodologías de diseño y cálculo de uniones. El capítulo se divide en 3 partes:

- i. La primera parte presenta la *metodología global de diseño y cálculo analítico* para todo tipo de uniones.
- ii. La segunda expone las *especificaciones* que son características de los distintos *tipos de uniones*.
- iii. La tercera parte presenta la *metodología experimental* empleada para apoyar el diseño de uniones. Dada la cantidad y complejidad de las uniones en la madera, y dado también que en ocasiones algunos modelos de cálculo pueden precisar el comportamiento inelástico de las mismas, la caracterización experimental de uniones resulta crucial para complementar la metodología analítica presentada en las partes I y II.

La presentación se expone bajo la premisa de que el lector se encuentra familiarizado con los conceptos básicos del diseño de uniones. En concreto este capítulo se construye sobre la base ya presentada en el Capítulo 9 del libro “*Fundamentos del diseño y la construcción con madera*”, en el cual se introducen conceptos básicos tales como las ecuaciones de modos de falla por corte lateral, tensión de aplastamiento, momento plástico del conector o efecto cuerda entre otros.

En esencia la exposición de este capítulo se realiza en favor de la norma chilena NCh1198, la cual a su vez se basa principalmente en la normativa norteamericana *National Design Specification for Wood Construction*, referida como *NDS*. No obstante, el capítulo tiene también una presencia muy importante de la norma europea, *EN 1995-1-1*, referida habitualmente como *Eurocódigo* o *EC5*, como también, en menor medida, otras normativas y métodos internacionales.

Importante es notar, de forma general en este libro ya no solo en este capítulo en particular, que muchos de los conceptos que se exponen no están o tan sólo están parcialmente normalizados en Chile, por lo que en ocasiones será necesario recurrir

a normativa internacional. En este respecto debe considerarse que la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción de Chile (OGUC, 2018) puntualiza el empleo de normativa internacional con los siguientes artículos:

- *Artículo 5.1.25:* los proyectos de cálculo estructural basados en normas extranjeras deben ser revisados por un revisor independiente.
- *Artículo 5.1.27:* los proyectos de cálculo donde se justifique que no hay normas nacionales en la materia se permite emplear normas extranjeras, aunque esto debe igualmente ser revisado por un revisor independiente según el artículo anterior.

Los cuales por supuesto permiten emplear los métodos aquí expuestos. Además, el capítulo se focaliza sobre todo en los conectores mecánicos por ser claramente los medios de unión más empleados, sin embargo, la metodología de diseño y cálculo de uniones tradicionales y encoladas también se presentará en la parte II.

Finalmente, el lector debe también notar que en este capítulo no se abordan las particularidades para el diseño de uniones con CLT, lo cual se detalla extensivamente en el Capítulo 1 del libro “*Conceptos avanzados del diseño estructural con madera. Parte II*”.

## 1.2 PARTE I: METODOLOGÍA GLOBAL DE DISEÑO Y CÁLCULO ANALÍTICO

### 1.2.1 *Paralelismo de los conectores elásticos*

Por lo general los conectores mecánicos de una unión de madera trabajan en el rango elástico como un conjunto de resortes en paralelo, ya que por lo general podemos asumir que experimentan la misma deformación. Esto implica que la rigidez equivalente ( $K$ ) es la suma de rigideces de cada conector ( $K_i$ )

$$K = \sum_{i=1}^n K_i$$

El desplazamiento —longitudinal, denotado en milímetros, o rotacional, expresado en radianes— es el mismo para todos los conectores

$$\delta = \delta_i$$

La fuerza que efectivamente está resistiendo la unión es la suma de las fuerzas internas de cada conector

$$F = \sum_{i=1}^n F_i$$

$$M = \sum_{i=1}^n M_i$$

La energía elástica acumulada, es la suma de las energías de cada conector

$$E = \sum_{i=1}^n E_i$$

Y el trabajo interno es la suma del producto de fuerzas por desplazamientos (o rotaciones), o lo que es lo mismo

$$W_i = \sum_{i=1}^n F_i \cdot \delta_i = \delta \cdot \sum_{i=1}^n F_i$$

$$W_i = \sum_{i=1}^n M_i \cdot \theta_i = \theta \cdot \sum_{i=1}^n M_i$$

### 1.2.2 Rigidez de la unión

La fuerza necesaria para producir una unidad de desplazamiento longitudinal en una unión como consecuencia de un esfuerzo cortante es referida como *rigidez traslacional* (usualmente  $N/mm$ , también referido como *módulo de corrimiento*, *módulo de corrimiento* o *slip modulus*), la fuerza necesaria para extraer o penetrar el conector de acuerdo a su dirección axial se denomina *rigidez axial* ( $N/mm$ ), mientras que el momento necesario para generar una unidad de giro se refiere comúnmente como la *rigidez rotacional* ( $Nmm/rad$ ). Al igual que la capacidad máxima, la rigidez de una unión puede determinarse mediante un ensayo experimental, no obstante, es también posible predecirla analíticamente sin más que sumar las rigideces de los conectores individuales que trabajan en paralelo

$$K = \sum_{i=1}^n K_i$$