



**CONCEPTOS  
AVANZADOS**

# **DEL DISEÑO ESTRUCTURAL CON MADERA**

**PARTE II: CLT, MODELACIÓN NUMÉRICA,  
DISEÑO ANTI-INCENDIOS Y AYUDAS AL CÁLCULO**

**PABLO GUINDOS**



**EDICIONES UC**

# **CONCEPTOS AVANZADOS DEL DISEÑO ESTRUCTURAL CON MADERA**

## **PARTE II**

---

**CLT, MODELACIÓN NUMÉRICA, DISEÑO ANTI-INCENDIOS  
Y AYUDAS AL CÁLCULO**

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

editorialedicionesuc@uc.cl  
[www.ediciones.uc.cl](http://www.ediciones.uc.cl)

**CONCEPTOS AVANZADOS DEL DISEÑO ESTRUCTURAL  
CON MADERA**

**Parte II: CLT, Modelación Numérica, Diseño Anti-incendios  
y Ayudas al Cálculo**  
Pablo Guindos B.

© Inscripción N° 309.675  
Derechos reservados  
Octubre 2019  
ISBN N° 978-956-14-2462-3

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 II**

**CLT, MODELACIÓN NUMÉRICA, DISEÑO ANTI-INCENDIOS  
Y AYUDAS AL CÁLCULO**

**PABLO GUINDOS**



EDICIONES UC



*Dedicado a Minia*



# CONTENIDO

<b>PRÓLOGO .....</b>	<b>17</b>
<b>PREFACIO .....</b>	<b>19</b>
<b>¿CÓMO LEER ESTE LIBRO? .....</b>	<b>23</b>
<b>1. DISEÑO ESTRUCTURAL CON CLT .....</b>	<b>25</b>
1.1    Introducción y base mecánica diferenciadora .....	25
1.1.1    Placa ortótropa gruesa .....	25
1.1.2    Capas perpendiculares sin contribución axial efectiva ..	26
1.1.3    Solicitaciones de rodadura en capas perpendiculares ..	28
1.2    Modelos de cálculo tipo viga .....	32
1.2.1    Valores seccionales .....	33
1.2.2    Modelo de viga flexible de Timoshenko .....	38
1.2.3    Aplicación del método $\gamma$ .....	44
1.2.4    Modelo de la analogía de corte ( <i>shear analogy</i> ) .....	51
1.2.5    Teoría de componentes ( <i>k-method</i> ) .....	57
1.3    Modelo de cálculo tipo placa; teoría de placas con contribución de corte de primer orden .....	61
1.3.1    Suposiciones fundamentales de la teoría de placas de Mindlin .....	62
1.3.2    Formulación de desplazamientos en la teoría de Mindlin ..	63
1.3.3    Deformaciones .....	64
1.3.4    Esfuerzos y tensiones en la placa .....	65
1.3.5    Matriz de rigidez del elemento .....	67
1.3.6    Rigidez de la membrana .....	69
1.3.7    Modelo de Schickhofer para reducción de rigidez de corte en el plano .....	70
1.3.8    Componentes de rigidez flexional y torsional .....	78
1.3.9    Factor de reducción de rigidez torsional .....	79
1.3.10    Componentes de rigidez de cortante transversal .....	81
1.3.11    Cálculo de tensiones en cada lámina .....	82
1.3.12    Verificaciones en cada lámina .....	84

1.4	Verificaciones analíticas de elementos estructurales . . . . .	86
1.4.1	Tracción paralela a la placa . . . . .	88
1.4.2	Tracción perpendicular a la placa . . . . .	91
1.4.3	Compresión paralela a la placa . . . . .	92
1.4.4	Compresión perpendicular a la placa . . . . .	97
1.4.5	Flexión fuera del plano . . . . .	99
1.4.6	Flexión en el plano . . . . .	100
1.4.7	Cortante perpendicular a la placa . . . . .	102
1.4.8	Cortante en el plano . . . . .	104
1.4.9	Combinación de esfuerzos . . . . .	105
1.4.10	Resumen de verificaciones analíticas en miembros de CLT . . . . .	107
1.5	Diseño de uniones . . . . .	109
1.5.1	Tipos de uniones . . . . .	109
1.5.2	Concepción de uniones lineales (líneas de unión) . . . . .	112
1.5.3	Influencia de los huecos ( <i>gaps</i> ) y ranuras de los tablones . . . . .	113
1.5.4	Concepción de desangulaciones 3D y simplificaciones en conectores inclinados . . . . .	113
1.5.5	Efecto refuerzo de lámina perpendicular e incremento de ductilidad local en conectores laterales insertados en caras . . . . .	118
1.5.6	Posibilidad de fallo por tracción perpendicular de conectores laterales en bordes solicitados fuera del plano . . . . .	119
1.5.7	Recomendaciones generales sobre el uso de conectores en el CLT según su disposición y el tipo de carga . . . . .	119
1.5.8	Procedimiento de diseño . . . . .	119
1.5.8.1	Capacidad de extracción axial . . . . .	122
1.5.8.2	Capacidad de aplastamiento lateral . . . . .	125
1.6	Consideraciones para el diseño de edificios . . . . .	128
1.6.1	Muros . . . . .	128
1.6.1.1	Principio mecánico de un muro desacoplado . . . . .	129
1.6.1.2	Predicción de capacidad lateral en muros de corte desacoplados . . . . .	130
1.6.1.3	Predicción de rigidez lateral en muros de corte desacoplados . . . . .	133
1.6.1.4	Rigidez de muros desacoplados con aperturas . . . . .	137
1.6.1.5	Verificación de muros . . . . .	137
1.6.1.5.1	Verificación de vuelco . . . . .	137
1.6.1.5.2	Verificación de corte en claves de corte . . . . .	141
1.6.1.5.3	Verificación de la deformación . . . . .	141
1.6.1.5.4	Otras verificaciones . . . . .	141

1.6.2	Losas . . . . .	142
1.6.2.1	Efecto de las aperturas en el análisis gravitacional . . . . .	142
1.6.2.2	Cortante perpendicular paralelo a la luz, $V_y$ , y descarga gravitacional sobre muros transversales . . . . .	144
1.6.2.3	Reparto biaxial de cargas concentradas y lineales . . . . .	146
1.6.2.4	Losas nervadas de CLT ( <i>rib slabs</i> ) . . . . .	150
1.6.2.5	Función de diafragma . . . . .	153
1.6.2.5.1	Esfuerzos en ULL debido a la carga lateral . . . . .	154
1.6.2.5.2	Estimación de rigidez . . . . .	159
1.6.3	Verificaciones y modelación de rigideces de las líneas de unión . . . . .	163
1.6.3.1	Unión cubierta-muro (UCM) . . . . .	163
1.6.3.2	Unión muro-losa-muro (UMLM) . . . . .	166
1.6.3.3	Unión muro-fundación (UMF) . . . . .	173
1.6.3.4	Unión losa-losa (ULL) . . . . .	176
1.6.3.5	Unión muro-muro (UMM) . . . . .	181
1.6.4	Notas sobre la estimación del periodo . . . . .	184
1.6.5	Reparto de cargas . . . . .	185
1.6.6	No linealidad de la relación rigidez-capacidad y ruptura de la simultaneidad en la cedencia . . . . .	186
1.6.7	Lecturas adicionales . . . . .	192
<b>2.</b>	<b>FUNDAMENTOS DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA DE ESTRUCTURAS DE MADERA . . . . .</b>	<b>195</b>
2.1	Introducción . . . . .	195
2.2	Contexto global de la modelación numérica en la madera . . . . .	196
2.2.1	Escalas de modelación . . . . .	196
2.2.2	Modelos de verificación y modelos de emulación . . . . .	198
2.2.3	Modelación elástica de la madera y productos derivados . . . . .	200
2.2.4	Principales no-linealidades materiales abordables en la modelación . . . . .	201
2.2.4.1	Modelación de la plasticidad . . . . .	202
2.2.4.2	Predicción del fallo . . . . .	204
2.2.4.3	Predicción del fallo en caso de concentración de tensiones . . . . .	206
2.2.4.4	Modelación post-fallo de tracción y cortante . . . . .	208
2.2.4.5	Modelación reológica y fatiga . . . . .	209
2.3	Algunas herramientas disponibles para modelar estructuras de madera . . . . .	213

2.4	Modelación de estructuras de madera . . . . .	219
2.4.1	Modelación de elementos tipo barra . . . . .	219
2.4.2	Modelación de tableros . . . . .	222
2.4.3	Modelación de elementos sólidos . . . . .	235
2.4.4	Modelación de uniones . . . . .	240
2.4.4.1	Modelación monotónica . . . . .	242
2.4.4.2	Modelación histerética . . . . .	251
2.4.5	Modelación muros . . . . .	255
2.4.5.1	Muros de entramado ligero . . . . .	255
2.4.5.2	Muros de CLT . . . . .	273
2.4.6	Modelación de diafragmas . . . . .	282
2.4.6.1	Diafragmas de entramado y CLT . . . . .	283
2.5	Lecturas adicionales . . . . .	293
<b>3.</b>	<b>FUNDAMENTOS DEL DISEÑO ANTI-INCENDIOS . . . . .</b>	<b>295</b>
3.1	Introducción . . . . .	295
3.1.1	Alcance . . . . .	296
3.1.2	Enfoque . . . . .	296
3.2	Contexto general de la ingeniería contra incendios . . . . .	297
3.2.1	Seguridad contra incendios . . . . .	297
3.2.2	Dinámica de incendios . . . . .	303
3.2.2.1	Proceso de desarrollo un incendio . . . . .	304
3.2.2.2	Energía y carga de combustible . . . . .	306
3.2.2.3	Tipos de incendios e incendios de diseño . . . . .	308
3.2.3	Transferencia de calor . . . . .	315
3.2.4	Severidad y resistencia al fuego . . . . .	320
3.3	Comportamiento al fuego de la madera . . . . .	324
3.3.1	Pirolisis y descomposición de la madera . . . . .	324
3.3.2	Perfiles de temperatura . . . . .	324
3.3.3	Propiedades termo-mecánicas a altas temperaturas . . . . .	326
3.3.3.1	Propiedades térmicas . . . . .	327
3.3.3.2	Propiedades mecánicas . . . . .	328
3.3.4	Velocidades de carbonización . . . . .	330
3.3.4.1	Velocidades de carbonización en elementos inicialmente protegidos . . . . .	335
3.3.4.2	Velocidades de carbonización en elementos de sección transversal de pequeñas dimensiones . .	338
3.3.4.3	Filosofía de protección de entramados ligeros y madera masiva . . . . .	338
3.3.4.4	Incendios en compartimentos con envolvente de madera y auto-extinción . . . . .	339
3.4	Ánálisis de integridad estructural en situación de incendio . . . . .	341
3.4.1	Diseño estructural en frío . . . . .	342

3.4.1.1	Solicitaciones en frío . . . . .	343
3.4.2	Diseño estructural en situación de incendio. . . . .	343
3.4.2.1	Solicitaciones en caso de incendio . . . . .	345
3.4.2.2	Propiedades de los materiales . . . . .	346
3.4.2.3	Reducción de propiedades mecánicas . . . . .	346
	3.4.2.3.1 Determinación del espesor de la <i>capa de resistencia nula</i> . . . . .	349
	3.4.2.3.2 Variabilidad de las propiedades materiales . . . . .	350
3.4.2.4	Procedimiento de diseño de elementos de madera aserrada y MLE . . . . .	351
3.4.2.5	Procedimiento de diseño de elementos de CLT. . . . .	352
	3.4.2.5.1 Concepto de diseño según el método europeo . . . . .	354
	3.4.2.5.2 Concepto de diseño según el método estadounidense . . . . .	356
3.4.2.6	Procedimiento de diseño de entramados ligeros de madera . . . . .	357
	3.4.2.6.1 Capacidad de soporte de carga (integridad estructural). . . . .	358
	3.4.2.6.2 Función de compartimentación (aislación térmica) . . . . .	360
	3.4.2.6.3 Detalles constructivos . . . . .	365
3.4.2.7	Diseño de uniones . . . . .	366
3.5	Lecturas adicionales . . . . .	369
<b>ANEXO A. EJEMPLO DE CÁLCULO ESTRUCTURAL DE UN EDIFICIO DE 6 PISOS CON EL SISTEMA MARCO-PLATAFORMA</b>		<b>373</b>
A.1	Descripción de la edificación y condiciones de cálculo. . . . .	373
	A.1.1 Vista en planta y configuración del edificio . . . . .	374
A.2	Materiales y descripción de elementos estructurales . . . . .	375
	A.2.1 Escantillón de muros y sus elementos . . . . .	377
	A.2.2 Escantillón de losa de entrepiso . . . . .	378
A.3	Cargas de diseño . . . . .	380
	A.3.1 Carga muerta . . . . .	380
	A.3.2 Sobrecargas de uso . . . . .	380
	A.3.3 Combinaciones . . . . .	380
A.4	Metodología de análisis . . . . .	380
	A.4.1 PASO 1: Determinación de la matriz de rigidez del edificio sin considerar aporte de flexibilidad del anclaje por volcamiento . . . . .	381
	A.4.2 PASO 2: Evaluación de Propiedades dinámicas de la estructura . . . . .	388

A.4.3	PASO 3: Distribución de fuerzas horizontales equivalentes para cada modo de vibración . . . . .	389
A.4.4	PASO 4: Determinación de la matriz de rigidez del edificio considerando el aporte de flexibilidad del anclaje por volcamiento . . . . .	390
A.4.5	PASO 5: Análisis estáticos para cada modo de vibración y evaluación de las fuerzas internas en los muros por medio de la combinación modal . . . . .	391
A.4.6	PASO 6: Verificación de capacidades resistentes a corte de los muros . . . . .	391
A.4.7	PASO 7: Verificación de desplazamientos laterales admisibles . . . . .	393
A.5	Desarrollo del ejemplo para el diseño del edificio de seis pisos . . . . .	394
A.5.1	Consideraciones previas . . . . .	394
A.5.2	PASO 1: Determinación de la matriz de rigidez del edificio sin considerar aporte de flexibilidad del anclaje por volcamiento . . . . .	397
A.5.3	PASO 2: Evaluación de las propiedades dinámicas de la estructura . . . . .	409
A.5.4	PASO 3: Distribución de fuerzas horizontales equivalentes para cada modo de vibración . . . . .	413
A.5.5	PASO 4: Determinación de la matriz de rigidez del edificio considerando el aporte de flexibilidad del anclaje por volcamiento . . . . .	418
A.5.6	PASO 5: Análisis estáticos para cada modo de vibración y evaluación de las fuerzas internas en los muros por medio de la combinación modal . . . . .	427
A.5.7	PASO 6: Verificaciones de capacidades resistentes a corte de los muros . . . . .	430
A.5.8	PASO 7: Verificación de desplazamientos laterales admisibles . . . . .	434
A.5.9	Resultados en cuanto a la conformación de los muros estructurales . . . . .	436
A.5.10	Lecturas adicionales . . . . .	438
<b>ANEXO B. MÉTODO SIMPLIFICADO DE PREDISEÑO DE EDIFICIOS DE MARCO-PLATAFORMA</b>	441	
B.1	Introducción . . . . .	441
B.2	Resumen y filosofía del método . . . . .	442
B.3	Niveles de desempeño y sismos asociados . . . . .	442
B.4	Tipos de muro . . . . .	443
B.5	Modelo computacional . . . . .	445
B.6	Rigidez y capacidad de muros . . . . .	446

B.7	Registros sísmicos empleados . . . . .	449
B.8	Determinación de la distribución óptima de capacidad en altura . .	450
B.9	Análisis de la distribución de capacidades optimizada con sismos de intensidad creciente . . . . .	454
B.10	Estimación del factor $\alpha$ partir de un análisis por desempeño . . . . .	455
B.11	Resumen del procedimiento de prediseño simplificado . . . . .	457
B.12	Lecturas adicionales . . . . .	458
<b>ANEXO C. AYUDAS AL CÁLCULO . . . . .</b>		<b>461</b>
C.1	Tablas de espesor mínimo en conectores . . . . .	461
C.2	Factor de modificación de humedad y duración de la carga . . . . .	480
C.3	Resumen de aplicación de factores de modificación según NCh1198 . . . . .	482
C.4	Estimación conservadora de propiedades de MLE . . . . .	486
C.5	Valores seccionales comunes del CLT . . . . .	486



## 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 supone la tercera y última parte de una trilogía de libros destinada a introducir el diseño y la construcción con madera y profundizar en el cálculo estructural de estructuras de madera. Partiendo de la base del primer libro introductorio “*Fundamentos del diseño y la construcción con madera*”, este tomo consiste en un volumen avanzado que abarca el diseño estructural con CLT, la modelación numérica de componentes y estructuras, la protección frente a incendios y un compendio de anexos con tablas de ayuda y otras herramientas que facilitarán el diseño estructural con madera. El segundo libro titulado “*Conceptos avanzados del diseño estructural con madera. Parte I*”, puede considerarse complementario al presente volumen, ya que en él se cubrieron temas tales como el diseño y cálculo de uniones, refuerzos, elementos compuestos, pórticos y edificios construidos con el sistema liviano de marco-plataforma con énfasis en su diseño anti-sísmico.

El objetivo de este libro, junto con el volumen anterior, es servir como un manual de diseño y cálculo para ingenieros, diseñadores, investigadores y desarrolladores con el fin de facilitar el diseño estructural con madera y aproximarlo, en la medida de lo posible, al diseño estructural con hormigón armado y acero. Amerita destacar cierto carácter diferenciador de este tomo respecto del segundo. El segundo volumen abarcó, no exclusivamente pero sí en su mayoría, materias que tradicionalmente han sido el foco de la ingeniería estructural con madera tradicional. Esto sin lugar a dudas, resulta crucial para que los diseñadores se familiaricen no sólo con los contenidos específicos de cada tema, sino también con la filosofía general del diseño estructural con madera, su ingeniería de detalle, sus retos, etc. En líneas generales este tercer tomo, sin embargo, podría entenderse como un texto más dirigido hacia el futuro y las posibles tendencias venideras. Ejemplo de ello lo constituye el estructural con CLT, que a día de hoy sigue generando constantes inclusiones y avances en la normativa, como también la modelación numérica —cada día más empleada en oficinas y academia— y la protección frente a incendios —cada vez más relevante en la forma que diseñamos. Adicionalmente, este volumen incluye una compilación de tablas, metodologías simplificadas y otras herramientas que deberían facilitar

considerablemente la canalización de una buena parte de los conceptos discutidos en el segundo y tercer volumen.

La necesidad de aglutinar y armonizar los contenidos de este ultimo tomo pueden considerarse mayores que las de los tomos precedentes. Esto debido a que existen realmente pocos textos a nivel internacional que expongan con la perspectiva global los temas que aquí se discuten, los cuales en su gran mayoría no han sido reportados en la literatura castellana. Por supuesto, tal como se argumentó en el segundo volumen, este libro también trata de remediar la carencia evidente de material didáctico en la profesión, que limita fuertemente las aplicaciones estructurales en las cuales la madera es empleada frecuentemente en Ibero-Latinoamérica.

La motivación común para haber editado esta trilogía se sustenta en 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 Montaño 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 Montaño, 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?

Aunque en ciertos aspectos este tercer tomo pudiese ser considerado como independiente del segundo libro titulado “*Conceptos avanzados del diseño estructural con madera. Parte I*”, se recomienda haber consultado inicialmente el volumen anterior ya que en él se introducen temas transversales muy importantes para el diseño estructural con madera, tales como ingeniería de detalle, tratamiento de interfaces semirrígidas, ect. Asimismo, enfáticamente se recomienda a todos aquellos autores no familiarizados con la materia, que hayan consolidado los contenidos del primer libro “*Fundamentos del diseño y la construcción con madera*” antes se introducirse en este texto. En especial la parte relativa al cálculo y los sistemas constructivos y estructurales lo que comprende desde el Capítulo 6 al Capítulo 11 del libro primero, así como el Capítulo 13 relativo a la protección frente al fuego. El lector debe prestar 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.

La estructura global de este libro es la siguiente: en el Capítulo 1 se incluye todo lo relativo al diseño estructural con CLT. Esto incluye los modelos de cálculo analíticos y numéricos, las verificaciones de las normativas internacionales, el diseño de uniones, y las principales consideraciones para el diseño de edificios. En materia de madera contralaminada se ha optado por aglomerar todos los contenidos juntos, debido a que el diseño con este material presenta múltiples diferencias respecto del diseño con madera convencional. En el Capítulo 2 se presenta la modelación numérica con la madera, lo que incluye principalmente la modelación del material madera y sus productos, la modelación de las uniones, y la modelación de ensambles tales como muros o losas. El Capítulo 3 aborda conceptos avanzados de la ingeniería de protección frente a incendios, lo que requiere haber consolidado anteriormente la introducción a la protección frente a fuego presentada en el Capítulo 13 del libro primero. Posteriormente se incluyen tres anexos cuya finalidad es facilitar el diseño

estructural. En el Anexo A se presenta un ejemplo de cálculo de edificio de 6 pisos construido con el sistema marco plataforma. El ejemlo se focaliza en la parte que pudiese ser más complicada del diseño, lo que incluye el diseño antisísmico mediante análisis modal espectral. El Anexo C detalla un método de prediseño simplificado para edificios de madera regulares, construidos con el sistema de marco plataforma. Fiinalmente, el Anexo C se compilan una serie de tablas y ayudas en lo relativo al diseño de uniones, factores de moficiación, tensiones admisibles para madera laminada encolada y valores seccionales para tableros de CLT.

---

## CAPÍTULO I

# DISEÑO ESTRUCTURAL CON CLT

### 1.1 INTRODUCCIÓN Y BASE MECÁNICA DIFERENCIADORA

El diseño estructural con CLT difiere en muchos aspectos respecto del diseño estructural con madera aserrada, MLE, LVL, terciado, OSB y LSL entre otros; es por ello que el diseño estructural con CLT amerita un capítulo aparte. Este capítulo está organizado de la siguiente manera:

- En la primera parte que se presenta dentro de esta Sección 1.1, se introducen las principales singularidades estructurales del CLT, es decir la base mecánica diferenciadora.
- En la segunda parte, Sección 1.2 se presentan diversos modelos analíticos para modelar el CLT con elementos tipo viga.
- En la tercera parte, Sección 1.3, se detallan los modelos empleados para modelar el CLT como un elemento tipo placa, como también los principales procedimientos empleados para la verificación de estos elementos.
- En la cuarta parte, Sección 1.4, se resumen los procedimientos de verificación analítica de CLT.
- En la quinta parte, Sección 1.5, se presenta el diseño de uniones.
- En la sexta y última parte, Sección 1.6, se detallan diversas consideraciones para el diseño de edificios de CLT. Principalmente se presenta en este apartado la modelación y verificación de muros y losas, y la modelación y verificación de líneas de unión.

#### 1.1.1 *Placa ortotropa gruesa*

Desde el punto de vista mecánico, el CLT es tratado casi siempre como un elemento tipo *placa ortotropa gruesa* (*thick plate*); es decir, es un elemento tipo plato en el cual

la contribución del cortante en la deformación no es nada despreciable a diferencia de las placas delgadas (*thin plate*), en donde la flexión suele dominar. En un tablero de terciado y OSB, habitualmente la relación luz/grosor es del orden de 600 mm (separación entre pies derechos, envigado, etc.) / 11-18 mm = 33-54; sin embargo, es relativamente frecuente que dicha relación en el CLT sea del orden de 2500 mm (muros) - 5000 mm (losas) / 120 - 220 mm ≈ 20, o incluso relaciones menores. En la práctica habitual de la modelación estructural, suele asumirse que

$$\text{placa delgada si es que } \frac{l}{t} > 20$$

$$\text{placa gruesa si es que } \frac{l}{t} \approx 10 - 20$$

$$\text{elemento sólido si es que } \frac{l}{t} < 10$$

Por lo tanto, con la salvedad de que la pieza a analizar sea muy esbelta (y por tanto pueda modelarse despreciando la contribución del corte), o bien muy poco esbelta (y por tanto debe modelarse en 3D); casi siempre debe considerarse el CLT como un plato grueso considerando la contribución del cortante.

Nótese que las placas ortrotropas laminadas y delgadas han sido muy frecuentes en la madera, como por ejemplo el terciado, y de hecho existen teorías para calcular estas piezas como por ejemplo el *método k* (ver secciones posteriores), sin embargo, estos materiales habitualmente no se comportan como un plato grueso. Sí el CLT.

### 1.1.2 Capas perpendiculares sin contribución axial efectiva

El primer rasgo diferenciador que debe destacarse en este sentido, es que, si bien otros tableros de ingeniería de madera tales como el OSB y el terciado pueden exhibir un comportamiento de placa ortotropa tal como el CLT, los grandes espesores de la madera contralaminada hacen que este producto sea también empleando para resistir cargas axiales dentro del plano. Este rasgo por sí solo provoca que la forma de diseñar sea diferente. Así, desde el punto de vista analítico, el empleo de tableros delgados como el OSB o el terciado se aborda en la mayoría de casos, en la práctica, mediante el uso de tablas tal como se describió en el Capítulo 5 del libro “*Conceptos avanzados del diseño estructural con madera. Parte I*”. Sin embargo, el hecho de que el CLT se emplee también para resistir cargas axiales en el plano, obliga a que el cálculo mecánico (sin emplear tablas) sea inevitable.