



FUNDAMENTOS
DEL DISEÑO
Y LA CONSTRUCCIÓN
CON MADERA

PABLO GUINDOS



EDICIONES UC

**FUNDAMENTOS DEL DISEÑO Y
LA CONSTRUCCIÓN CON MADERA**

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

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

**FUNDAMENTOS DEL DISEÑO
Y LA CONSTRUCCIÓN CON MADERA**
Pablo Guindos B.

© Inscripción N° 309.667
Derechos reservados
Octubre 2019
ISBN N° 978-956-14-2453-1

Dibujos: Francisca Evans Zaldívar y Francisca González Rosas
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.
Fundamentos del diseño y la construcción con madera / Pablo Guindos;
ilustraciones de Francisca Evans y Francisca González.

1. Construcciones de madera – Chile.
 2. Estructuras de madera.
 3. Propiedades de la madera.
 4. Filosofía del diseño arquitectónico.
- I. t.
 - II. Evans, María Francisca, ilustrador.
 - III. González Rosas, Francisca, ilustrador.
- 2019 721.04470983 DCC23 RDA



FUNDAMENTOS DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN CON MADERA

PABLO GUINDOS



EDICIONES UC

Dedicado a Björn

TABLA DE CONTENIDOS

PRÓLOGO	17
PREFACIO	19
¿CÓMO LEER ESTE LIBRO?	21
1. INTRODUCCIÓN A LA CONSTRUCCIÓN CON MADERA	23
1.1 Breve reseña histórica	23
1.2 Una mirada hacia el futuro	28
1.3 Lecturas adicionales	30
2. ANATOMÍA Y FÍSICA DE LA MADERA	31
2.1 Singularidades	31
2.1.1 Nudos	32
2.1.2 Inclinação de las fibras	33
2.1.3 Madera de reacción	34
2.1.4 Fisuras y deformaciones	34
2.1.5 Ataques biológicos	34
2.1.6 Otras singularidades	35
2.2 Estructura interna	35
2.3 Propiedades físicas de la estructura: humedad y densidad	41
2.3.1 Contenido de humedad	41
2.3.2 Densidad aparente	42
2.3.3 Estabilidad dimensional	44
2.4 Lecturas adicionales	46
3. LA MADERA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	47
3.1 Comparación fundamental cuantitativa	47
3.2 Comparación fundamental cualitativa	52
3.3 Estructura idealizada y respuesta mecánica instantánea	56
3.4 Resumen y simplificación de la respuesta mecánica instantánea	61
3.5 Leyes elásticas constitutivas de la madera	62

4. PRODUCTOS DE INGENIERÍA DE MADERA	69
4.1 Introducción	69
4.2 Productos de madera sólida	70
4.3 Paneles tipo Brettstapel	76
4.4 Productos de chapas de madera	76
4.5 Productos de madera encolada	78
4.6 Productos de fibras y partículas de madera	84
4.7 Productos de virutas de madera	85
4.8 Productos compuestos	86
5. CLASIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN	91
5.1 Clasificación de la madera	91
5.1.1 Clasificación visual	94
5.1.2 Clasificación mecánica	100
5.2 Caracterización: ensayos mecánicos	104
5.2.1 Muestreo	104
5.2.2 Caracterización en Chile	106
5.2.2.1 Determinación de las propiedades fundamentales	106
5.2.2.2 Determinación de las tensiones admisibles medias	108
5.2.2.3 Ensayos mecánicos adicionales	110
5.2.5 Resumen de los parámetros fundamentales de cálculo en Chile, EE.UU. y Europa	114
5.2.6 Lecturas Adicionales	114
6. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL DESEMPEÑO MECÁNICO	115
6.1 Efecto de las variables físicas	115
6.1.1 Temperatura	115
6.1.2 Influencia de la humedad	117
6.1.3 Densidad y espesor de anillos	117
6.2 Influencia del volumen	118
6.3 Efecto del tiempo	119
6.3.1 Efecto de la duración de la carga o ratio de deformación	119
6.3.2 Deformación diferida (creep) y relajación	119
6.3.3 Fatiga	121
6.3.4 Envejecimiento	122
6.4 Efecto de las características anatómicas	122
6.4.1 Efecto de las singularidades	122
6.4.2 Madera juvenil	122
6.4.3 Pudrición y degradación	123
6.5 Efecto de la durabilidad	124
6.5.1 Tratamientos químicos	124
6.6 Efecto de desangulación carga-dirección de fibra	124

6.7	Efecto de colaboración en grupo (redundancia)	126
6.8	Efecto de la inestabilidad	128
6.8.1	Por pandeo	128
6.8.2	Por vuelco lateral-torsional	128
6.9	Efectos debidos a la concentración de tensiones	128
6.9.1	Rebajes (entalladuras).	128
6.9.2	Perforaciones	129
6.9.3	Concentración de compresión perpendicular	129
6.10	Efectos propios en las uniones	129
6.10.1	Efecto hilera en conectores mecánicos	129
6.10.2	Profundidad de penetración	130
6.10.3	Espaciamiento	130
6.10.4	Excentricidad	131
6.11	Efectos de curvatura en MLE	131
6.12	Efectos en piezas de sección circular	132
6.13	Resumen de efectos	132
6.14	Lecturas adicionales	134
7.	FUNDAMENTOS PARA EL CÁLCULO	135
7.1	Introducción	135
7.2	Concordancia entre enfoques de cálculo	136
7.3	Seguridad estructural	139
7.4	Lecturas adicionales	144
8.	DIMENSIONAMIENTO DE MIEMBROS ESTRUCTURALES	145
8.1	Planteamiento general para asignación de propiedades mecánicas.	145
8.2	Asignación de propiedades en Chile	145
8.3	Dimensionamiento de miembros en flexión simple	148
8.3.1	Riesgos de los elementos en flexión	148
8.3.2	Verificaciones en Chile	162
8.3.2.1	Vigas simples rectangulares	162
8.3.2.2	Vigas simples circulares	168
8.3.2.3	Vigas de MLE y LVL	168
8.3.3	Riesgos singulares en vigas de canto variable y/o curvas	170
8.3.3.1	Verificación en Chile	179
8.4	Dimensionamiento de miembros en compresión simple	185
8.4.1	Riesgos de los elementos en compresión simple	185
8.4.2	Verificación en Chile	191
8.4.2.1	Piezas rectangulares de madera aserrada o MLE	191
8.4.2.2	Piezas circulares	192
8.5	Dimensionamiento de miembros en tracción simple	193
8.5.1	Riesgos de los elementos en tracción simple	193
8.5.2	Verificación en Chile	194
8.6	Esfuerzos combinados	194

8.6.1	Tipos de esfuerzos combinados	194
8.6.1.1	Flexión esviada	194
8.6.1.2	Flexión simple o esviada y tracción paralela. . .	196
8.6.1.3	Flexión simple o esviada y compresión paralela	196
8.6.1.4	Esfuerzos de segundo orden en vigas-columnas	197
8.6.1.5	Cortantes en flexión esviada.	199
8.6.1.6	Cortantes en flexión simple o esviada y torsión	199
8.6.2	Verificación en Chile	199
8.7	Lecturas adicionales	201
9.	INTRODUCCIÓN AL DISEÑO DE UNIONES	203
9.1	Tipos de uniones	203
9.2	Filosofía de uniones	207
9.3	Principales parámetros que determinan el desempeño mecánico de una unión mecánica	210
9.4	Teoría de Johansen para uniones laterales con conectores rígidos . .	222
9.5	Tornillos inclinados	229
9.6	Lecturas adicionales	230
10.	SISTEMAS ESTRUCTURALES	231
10.1	Introducción	231
10.2	Componentes básicos de una cubierta	231
10.3	Componentes básicos de un entrepiso o forjado	234
10.3.1	Losa clásica (timber floor with joists)	234
10.3.2	Losa con vigas en I (timber floor with I-joists)	238
10.3.3	Losa de madera masiva (massive timber floor)	238
10.3.4	Losa nervada (rib slab)	240
10.3.5	Entrepisos de madera-hormigón	241
10.3.6	Luces habituales de entrepisos de madera	244
10.4	Morfología de vigas principales de entrepiso y cubierta	244
10.4.1	Elementos simples de madera aserrada	244
10.4.2	Vigas curvas y de sección variable	244
10.4.3	Vigas compuestas	247
10.4.4	Elementos en base a reticulados	249
10.4.4.1	Cerchas (tijerales).	250
10.4.4.2	Vigas en celosía de cordones paralelos.	253
10.4.4.3	Otros tipos de reticulados	253
10.5	Sistemas de envigados para transmisión de cargas perpendiculares en cubiertas y entrepisos	255
10.6	Columnas	257
10.7	Sistemas de muros	259
10.8	Pórticos (marcos)	269
10.9	Sistemas resistentes a la carga lateral (SRCL) y sistemas de arriostramiento	274

10.10	Continuidad de carga	282
10.11	Predimensionado	284
10.12	Lecturas adicionales	284
11.	INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS	285
11.1	Sistemas constructivos	285
11.2	Sistema poste-viga	286
11.3	Sistema de marco-plataforma	292
11.4	Sistema de balloon-frame	303
11.5	Sistema de construcción masiva con CLT	304
11.6	Otros sistemas constructivos	306
11.7	Límites aproximados en el número de pisos	314
11.8	Lecturas adicionales	314
12.	INTRODUCCIÓN A LA CONSTRUCCIÓN INDUSTRIALIZADA	315
12.1	Introducción	315
12.1.1	Definiciones preliminares	316
12.1.2	Estructuración del capítulo	318
12.2	Reseña histórica	319
12.2.1	Primeros sistemas	319
12.2.2	Primera revolución industrial	321
12.2.3	Post Segunda Guerra Mundial	323
12.3	Progresión de la producción digital	324
12.4	Conceptos importantes en relación al diseño arquitectónico industrializado	325
12.4.1	Sistemas	325
12.4.2	Materiales	328
12.4.3	Método	329
12.4.4	Producto	329
12.4.5	Clase	331
12.4.6	Cuadrículas (grid)	331
12.5	Componentes, paneles y módulos	333
12.5.1	Componentes	333
12.5.2	Paneles	334
12.5.3	Módulos y construcción modular	336
12.6	Prefabricación e industrialización en fábrica	339
12.6.1	Planificación de pedidos y sistemas de control en fábrica	339
12.6.1.1	Características esenciales del sistema APS	341
12.6.1.2	Características esenciales del sistema PPS	342
12.6.1.3	CAD/CAM	344
12.6.2	Esquemas de producción en fábrica	349
12.6.3	Área de mecanizado (preparación) de piezas	350
12.6.4	Área de ensamblado de componentes	355
12.6.5	Manipulación y transporte de material y componentes	362

12.6.6	Flujo de material en fábrica	364
12.6.7	Consideraciones generales acerca del diseño de la nave de planta de industrialización	369
12.7	Logística y montaje en obra	369
12.7.1	Logística, carga y transporte	370
12.7.1.1	Logística	370
12.7.1.2	Carga	370
12.7.1.3	Transporte	371
12.7.2	Preparación en la zona de construcción	372
12.7.2.1	Cimientos	372
12.7.2.2	Acceso a la obra	372
12.7.2.3	Zona de almacenamiento	372
12.7.2.4	Alojamientos para uso de los trabajadores	373
12.7.2.5	Grúa de montaje	373
12.7.2.6	Suministro de energía y agua	373
12.7.2.7	Eliminación de residuos	375
12.7.3	Instalación y montaje	376
12.7.3.1	Preparación	376
12.7.3.2	Organización	376
12.7.3.3	Fases de montaje	376
12.8	Lecturas adicionales	379
13.	FUNDAMENTOS DE LA PROTECCIÓN FRENTE AL FUEGO	381
13.1	Introducción	381
13.2	Reacción al fuego en la madera	382
13.2.1	Reacción físico-química	382
13.2.2	Reacción mecánica	385
13.3	Tasa de carbonización	387
13.4	Métodos predictivos del efecto del fuego	387
13.4.1	Soluciones constructivas in situ o prefabricadas con certificación de la resistencia al fuego	387
13.4.2	Método de las componentes aditivas	388
13.4.3	Método de la sección eficaz	389
13.4.4	Método de la resistencia y rigidez reducidas	393
13.4.5	Métodos basados en la modelación del fuego	395
13.4.5.1	Métodos de modelación estocástica	395
13.4.5.2	Métodos de modelación determinística	396
13.5	Prescripciones y desarrollo normativo en Chile	400
13.6	Nota sobre las disposiciones constructivas	403
13.7	Lecturas adicionales	403
14.	DURABILIDAD Y PROTECCIÓN DE LA MADERA	405
14.1	Introducción	405
14.2	Agentes bióticos y estrategias de protección	406

14.2.1	Hongos	407
14.2.2	Estrategias de protección frente a hongos	409
14.2.3	Insectos y perforadores marinos	410
14.2.4	Estrategias de protección frente a animales xilófagos	413
14.3	Agentes abióticos	416
14.4	Riesgo de ataque biológico y durabilidad natural	419
14.5	Tratamientos preservantes de la madera	420
14.6	Tratamientos de ignifugación de la madera	427
14.7	Durabilidad y protección en Chile	428
14.8	Lecturas adicionales	434
ANEXO A. AYUDAS AL PREDIMENSIONADO		435
ANEXO B. EJEMPLOS DE CONFIGURACIONES CONSTRUCTIVAS EN FUNDACIONES		445
GLOSARIO DE TÉRMINOS		453
Capítulo 1		453
Capítulo 2		455
Capítulo 3		456
Capítulo 4		459
Capítulo 5		460
Capítulo 6		460
Capítulo 7		461
Capítulo 8		462
Capítulo 9		462
Capítulo 10		463
Capítulo 14		463

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 primera parte de una trilogía, en la cual se introducen los fundamentos del diseño y la construcción con madera. Introducir a arquitectos, ingenieros y constructores en el empleo de la madera como material estructural en la construcción es el principal objetivo de esta publicación. Desde una perspectiva global se introducen los aspectos necesarios para emplear la madera con confiabilidad y eficiencia, lo que incluye aspectos relacionados con la tecnología de la madera, las bases del diseño y el cálculo, los sistemas constructivos, la industrialización y la protección del material.

Los otros dos libros de esta trilogía profundizan en el diseño estructural y tienen como principal objetivo consolidar y facilitar el cálculo de tal modo que se fomente el uso de la madera como alternativa estructural para multitud de obras, en especial para la construcción de edificios. Así pues, el segundo y tercer libro están principalmente destinados a ingenieros e investigadores. El segundo libro se titula *Conceptos avanzados del diseño estructural con madera. Parte I* y consiste en un texto especializado, en el cual, partiendo de las bases expuestas en este texto introductorio, se profundiza en el diseño y el cálculo estructural de uniones, refuerzos, elementos compuestos, pórticos y edificios construidos con el sistema de marco plataforma incluyendo el diseño anti-sísmico. El tercer libro, titulado *Conceptos avanzados del diseño estructural con madera. Parte II*, incluye el diseño estructural con CLT, la modelación numérica, la protección anti-incendios y un compendio de tablas y otras ayudas al cálculo.

Son dos las principales razones que me han llevado a escribir esta trilogía. La primera razón es que, si bien existen algunas obras de excelente calidad y profundidad en español, la mayoría aborda de una forma más bien específica o introductoria los contenidos relativos a esta materia. La segunda razón es que en los últimos años se han realizado avances muy relevantes en este campo que han ampliado enormemente el espectro de aplicación de la madera en la construcción. De este modo, la trilogía trata de abordar la materia de la forma más global posible, de hecho, los métodos de diseño a menudo se presentan de acuerdo a distintas metodologías internacionales, más que presentar exclusivamente un único método de cálculo. Por otra parte,

también se presentan los contenidos de la forma más actualizada posible con el fin de abarcar todas las aplicaciones estructurales que se han propiciado en las últimas dos décadas, tales como el diseño estructural con CLT, las consideraciones para el diseño de edificios, productos innovadores, industrialización moderna, modelación numérica, etc.

La principal motivación, sin embargo, para haber editado estos tres libros es 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 Montaña 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?

Para facilitar la comprensión de este libro, el texto debería leerse secuencialmente ya que la mayoría de contenidos requieren la comprensión de temas precedentes. Para lectores familiarizados con la materia, la lectura de capítulos independientes sí es adecuada. Sin duda, todos aquellos lectores interesados en la segunda y tercera parte de la trilogía deberían sentir que los contenidos de este libro han sido afianzados antes de abordar los otros libros, en especial la parte relativa al cálculo y los sistemas constructivos y estructurales lo que comprende desde el Capítulo 6 al Capítulo 11.

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 global del libro es la siguiente: tras una breve reseña histórica, en los Capítulos 2 a 5 se introducen conceptos básicos de tecnología de la madera; el Capítulo 6 sirve como transición entre tecnología de la madera y cálculo; los Capítulos 7 a 9 introducen las bases del cálculo; los Capítulos 10 a 12 introducen los sistemas estructurales y constructivos, como también la industrialización y prefabricación; los Capítulos 13 y 14 introducen conceptos básicos de protección de la madera frente a incendios y degradación por organismos xilófagos y agentes abióticos. Finalmente, se incluye un anexo de ayudas básicas al predimensionado (ayudas más avanzadas al cálculo se facilitan en el tercer libro), otro anexo de detalles constructivos, y un glosario de términos que puede ser muy necesario, especialmente cuando los capítulos se leen de forma independiente.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN A LA CONSTRUCCIÓN CON MADERA

I.1 BREVE RESEÑA HISTÓRICA

Prehistoria

La madera ha sido el primer *material de construcción masivo*^{1.1} empleado por el ser humano, y los primeros registros de su uso en la construcción datan de la época neolítica, año 9000 A.C., para abordar la construcción de cabañas en el borde entre Turquía e Irán. Inicialmente las construcciones se realizaban en forma circular u ovalada y posteriormente evolucionaron a formas cónicas, cilíndricas y rectangulares. Entre 6.500-6000 A.C. se construyeron las primeras edificaciones en dos alturas entre Anatolia y Chipre. En Grecia se establecieron las primeras construcciones con madera alrededor del año 4.000 A.C. El uso de la madera se extiende también entre las tribus nómadas de Norte América, África, Indonesia y Asia central, principalmente para la construcción de cabañas. Algunos de los estilos desarrollados por estas poblaciones tienen aún a día de hoy una influencia notable en las construcciones indígenas de Asia, África, Polinesia y Sudamérica.

Época Antigua

Las cubiertas de las tumbas reales de la primera dinastía egipcia (3.000 A.C.), fueron construidas con madera. A partir de este suceso se han reportado múltiples usos de la madera tanto en la cultura egipcia como en ciertas áreas de Líbano y Siria. En Japón la madera ha sido el principal material de construcción desde el período de Jōmon, extendiéndose desde 3500-300 A.C. En muchos casos, la duración de estas construcciones ha sido reportada en más de 1.000 años. Los antiguos griegos también realizaron importantes obras con madera durante esta época, como por ejemplo el Bouleterión de la casa del consejo de Priene, o el pórtico de Philipus en Delos. Este fue también el caso de los romanos, que emplearon la madera en la construcción de los primeros templos y realizaron obras notables como por ejemplo el puente sobre el Rin, de 600 metros de longitud, construido para las legiones del César, o

las basílicas de San Pedro y San Pablo en el exterior de las murallas de Roma. En China, la arquitectura tradicional ha tenido desde la época antigua una presencia muy importante de la madera. De hecho, este país es considerado como un lugar clave en el proceso de desarrollo constructivo, debido ello a la riqueza arquitectónica de los edificios gubernamentales de los cuales una gran mayoría lamentablemente, no han perdurado en el tiempo a causa de los cambios dinásticos.

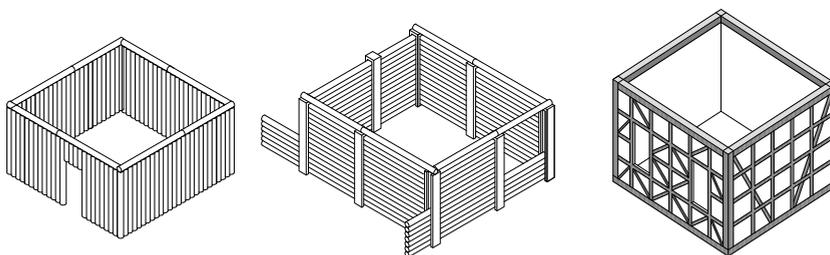
Desarrollo de las primeras construcciones modernas

La madera fue el principal material de construcción en gran parte de Europa desde la edad media hasta el renacimiento, y fue precisamente en este lugar, en donde se desarrollaron gran parte de las soluciones constructivas que fueron decisivas para los sistemas constructivos modernos con madera. Se piensa que las civilizaciones vikingas adaptaron sus construcciones con madera en base a las invasiones realizadas en el occidente del continente, en donde se construyó con madera de forma extensiva y encontrándose ejemplos notables, principalmente en la región alpina y Europa central. En particular, es posible identificar 4 tipos de construcciones que fueron clave para la construcción moderna:

- i. *Palisade o stave construction*, basada en paredes sólidas formadas por la aglomeración vertical de rollizos^{1,2}. Este tipo de construcción predominó en la Alemania neolítica desde donde se extendió primeramente al norte de Europa, y posteriormente a las regiones ribereñas próximas al río Mississippi en Norteamérica.
- ii. *Log-cabin construction*, basada en la disposición de rollizos horizontales. Este tipo de construcción fue fundamental para comenzar el desarrollo de varios tipos de unión, fundamentalmente en el encuentro entre muros. Fue desarrollada principalmente en Europa central, Rusia y Asia Menor, siendo la Iglesia de la Transfiguración en Kizhi, Rusia, quizá el ejemplo representativo más notable. Aunque gran parte del desarrollo se produjo en Europa y Asia occidental, es cierto que este tipo de construcciones también se desarrollaron en el período Yayoi en Japón (250 A.C-200 D.C.). Este tipo de construcción fue exportado a Norteamérica a mediados del siglo XVII y se piensa que fue el precursor principal de las *construcciones resistentes al cortante*³, desarrolladas posteriormente en esta región.
- iii. *Timber frame construction*, consistente en el uso de pórticos de madera acompañados o no de cercha en cubierta, fueron desarrollados también en Europa a partir del año 5.500-2.500 A.C., ver Figura 1.1.1. Estas construcciones surgieron como una necesidad de disponer de espacios más amplios de almacenamiento agrícola, y pueden ser considerados como los precursores de las estructuras porticadas modernas. Al igual que los tipos precedentes, esta

tipología también fue exportada a Norteamérica alrededor del siglo XVII y a día de hoy, se encuentran aproximadamente aún 80 estructuras antiguas en pie de esta tipología.

- iv. Finalmente, *roof beam, arch and truss timber construction*, que pueden ser considerados como una tipología más, ya que se basa en el uso de la madera tan sólo como material de cubierta. Las soluciones de este tipo logran generar cubiertas relativamente ligeras con luces de hasta 20 metros sin apoyos intermedios. Uno de los ejemplos primigenios puede ser considerado el palacio de Eltham, construido en Inglaterra en 1405. La aparición de este tipo de construcción fue clave para el desarrollo de *sistemas de arriostramiento*^{1,3}, que habitualmente estaban diseñados para evitar el vuelco en el plano y fuera del plano de elementos de cubierta sometidos a flexión.



a) Construcción tipo palisade o stave

b) Construcción tipo log-cabin

c) Construcción tipo timber frame

FIGURA 1.1.1 Estructuraciones antiguas referentes de la construcción moderna.

Por otra parte, la tipología oriental propia de Japón, China y Corea principalmente, también es considerada como un precursor de la estructuración moderna en madera. De hecho, para cuando la cultura oriental y occidental contactaron con intensidad durante el siglo XX, la ingeniería con madera en lejano oriente se encontraba totalmente desarrollada. Uno de los rasgos característicos de esta arquitectura consiste en la gran riqueza de uniones tradicionales y soluciones carpinteras, tanto en China como en Japón. Otra característica importante, es la enorme longevidad de algunos de las construcciones, muchas de ellas de culto religioso. En China se estima que a día de hoy existen al menos una docena de edificios de madera con una antigüedad superior a 1.000 años. Por otro lado, el edificio de madera más antiguo del mundo es considerado el Templo de la Ley Floreciente en Japón, cuya finalización data del año 607 D.C.

De este periodo es importante también notar construcciones destacadas en Chile, tales como las iglesias de Chiloé. Las iglesias más antiguas datan del siglo XVIII y no son conocidas únicamente por su belleza, sino también por la ausencia de conexiones mecánicas en entramados de gran complejidad, ver Figura 1.1.2.

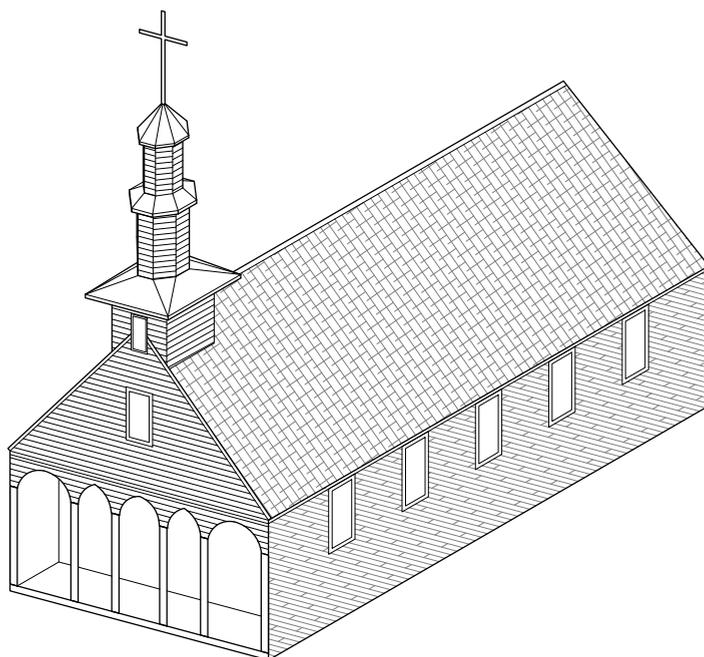


FIGURA 1.1.2 Iglesia de Achao, Chiloé, Chile.

Siglo XIX

El siglo XIX resultó, por una gran variedad de aspectos, clave para entender el contexto actual de la construcción con madera. Ya a finales del siglo XVIII, con la revolución industrial, los ladrillos comenzaron a sustituir la madera en muchas construcciones en Inglaterra y Europa. Por otra parte, vigas de hierro y acero comenzaron a sustituir elementos de madera, inicialmente en edificios de gran porte, y también se extendió masivamente el uso del hormigón. Sin embargo, fue a mediados y finales de 1800, cuando la madera tuvo su máxima utilización en Estados Unidos, sufriendo así un 'retraso' de unos 200 años respecto del apogeo en Europa. Ver la evolución del porcentaje del uso de madera en la construcción en la Figura 1.1.3.

Así, en 1833 se inventó en Chicago el *balloon framing*^{1.4}, el cual posteriormente derivaría también la introducción del *platform framing*^{1.5}. La introducción de ambos sistemas de construcción fue posible gracias a la enorme cantidad de recursos forestales, aserraderos, y productores de tableros presentes en el territorio americano, así como que hubiese una mayor disponibilidad de clavos. Estos sistemas se extendieron muy rápidamente debido en gran parte a la simplificación de las construcciones y la reducción drástica de los costos de obra. De hecho, estos sistemas de entramado ligero

siguen siendo hoy en día el sistema más empleado para baja altura en EEUU. Uno de los sucesos más desfavorables para la madera en esta época fue el gran incendio de Chicago en 1871, tras el cual gran cantidad de edificios fueron reconstruidos en hormigón y acero.

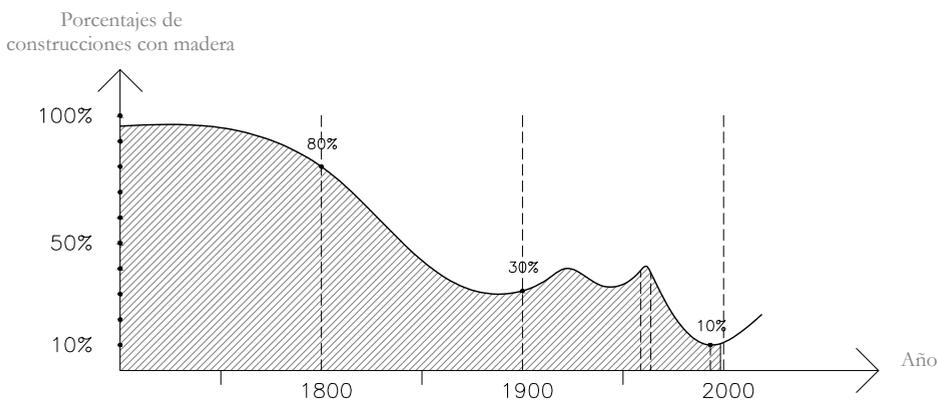


FIGURA I.1.3 Evolución del porcentaje de uso de madera en la construcción (basado en Winter 2017).

En la segunda mitad del Siglo XIX, se desarrollaron gran parte de las herramientas que se emplean actualmente en análisis estructural, y con ello el cálculo en las construcciones se convirtió poco a poco obligatorio. Consecuentemente, en esta época se comenzaron a caracterizar las propiedades mecánicas de las distintas $1^{1.6}$, algo que sin embargo ya se había iniciado con Galileo alrededor de 1638. Mientras tanto, en Europa, y pese a que durante el siglo XIX decreció fuertemente el uso de la madera frente a otros materiales (debido a la Revolución Industrial), se desarrollaron innovaciones que fueron clave para el uso moderno de la madera. Las más destacadas fueron seguramente el patentamiento del *terciado* (*plywood*)^{1.7} por parte de Samuel Bentham en Londres, Inglaterra (1797), la creación de arcos curvos de madera (1825), el desarrollo de estructuras híbridas de madera y acero (1839), la construcción del Palacio de Cristal en Londres, una celosía tridimensional con superficie alrededor de 70.000 m² (1851), y el patentamiento de la madera laminada encolada (MLE o *glulam*)^{1.8} por parte de Otto Hetzer en Weimar, Alemania, en 1872.

Siglo XX

El siglo XX fue el período en donde se consolidó la investigación en madera. Gran importancia tuvo en este desarrollo la creación del *Forest Products Laboratory* (FPL) en Madison, Wisconsin en 1910, ya que fue en este lugar donde se comenzaron a analizar las propiedades mecánicas de maderas, ensambles y uniones, al igual que

la durabilidad, secado, resistencia a fuego y otros aspectos cruciales para este material. Los conocimientos adquiridos en los primeros años se tradujeron en la primera versión del *Wood Handbook* en 1931.

El siglo XX fue también clave en dos aspectos que ocurrieron en años cercanos a la II Guerra Mundial. El primero de ellos fue la aparición de *adhesivos resinosos*^{1.9} que, a un bajo costo, ofrecían una resistencia superior a la propia madera. Esto definitivamente ayudó a expandir la madera laminada encolada, el terciado y el desarrollo de nuevos productos de ingeniería de madera. La baja disponibilidad de madera maciza en Europa, fomentó un alarde de invención en la ingeniería lo que promovió la búsqueda de materiales constructivos obtenidos a partir de elementos pequeños o de baja estética y calidad para la construcción, como por ejemplo los tableros de partículas en Alemania (originalmente denominados como ‘falsa madera’), el *OSB*^{1.10}, que fue inicialmente patentado por Armin Elmendorf en EEUU allá por 1965 y la *madera microlaminada (LVL)*^{1.11}, patentada en 1988 por Robbins Earl Herbert. Otra de las invenciones clave para el desarrollo de la madera a nivel constructivo, fue la introducción alrededor de los años 50 en EE.UU. de placas metálicas para la conexión de piezas estructurales de madera.

Durante el Siglo XX, también se realizaron algunas obras de importancia capital para la madera. Una de las más destacadas es la infraestructura de ensayo aeronáutico TRESTLE (ATLAS-I) en Nuevo México, EE.UU. Esta es aún a día de hoy la construcción más grande del mundo de madera laminada, con 15.350 m³ de *glulam*. Otra obra muy relevante es la Cúpula de Tacoma, en Washington, EE. UU. que destaca por su gran luz de 162 metros de madera laminada.

1.2 UNA MIRADA HACIA EL FUTURO

El final del siglo XX brinda la invención de la *madera contralaminada (CLT)*^{1.12}, atribuida en Austria a finales hacia finales de los años 70 y principios de la década de los 80. Pese a que la estructura de la madera contralaminada no es en sí muy innovadora (similar al *plywood*), este producto abre las puertas a una nueva filosofía de construcción denominada madera masiva (*mass timber*). Esta nueva estructuración puede ser vista como una evolución de la ancestral palisade o log-cabin, y permite abarcar mayores alturas en edificación debido a una resistencia y rigidez muy superiores.

Esta nueva corriente domina el actual resurgir de la madera y ha sido objeto de gran parte de las investigaciones y desarrollos ejecutados en las últimas dos décadas. A diferencia de las tipologías constructivas definidas anteriormente, la filosofía con madera masiva es la de construir en base a la utilización paneles de madera de gran sección. Este enfoque, ofrece ciertas ventajas como por ejemplo un mayor desempeño

lateral y resistencia al fuego respecto de tipologías constructivas convencionales, lo que permite abordar mayores alturas con un grado muy alto de prefabricación.

Amén de la madera contralaminada, se han introducido una serie de productos adicionales que, aunque en sí no son novedosos, contribuyen igualmente a esta filosofía de construcción masiva como por ejemplo el *mass LVL*^{1.13}, *dowel laminated timber (DLT)*^{1.14} y los compuestos de madera masiva con hormigón.

Este estímulo de las nuevas tecnologías con madera, acompañado de una mayor concienciación ecológica de la sociedad, y un desarrollo del conocimiento técnico del material madera en general, está impulsando la voluntad por desarrollar construcciones con madera en altura en la mayoría de países desarrollados. Aunque en muchas ocasiones este desarrollo viene estimulado por la introducción de tecnologías de madera masiva, también se están construyendo igualmente edificios de madera en base a tipologías más convencionales como entramados ligeros y pesados. Se prevé por tanto en el futuro, un gran desarrollo de la madera en altura tanto a nivel normativo como tecnológico y profesional.

Otro núcleo de desarrollo incipiente son sin duda las estructuraciones híbridas, específicamente estructuraciones que combinan la madera, el acero y el hormigón. Si bien existen estructuraciones híbridas desde hace más de un siglo, la economicidad, las tecnologías de unión, y la concepción holística que actualmente tenemos sobre el desempeño o *performance* de las edificaciones, es un entorno muy propicio para desarrollar este tipo de estructuraciones.

Finalmente, en opinión del autor, debe notarse que la '*revolución industrial*', que sin duda ha sido la gran impulsora de muchos de los principios y metodologías de la ingeniería moderna, ha tenido y tiene que 'aprender' a convivir con la '*revolución medioambiental*' en la que nos encontramos actualmente inmersos debido a la mayor concienciación acerca de nuestro impacto sobre el planeta y el cambio climático. Dicha revolución medioambiental, ha dotado a la ingeniería moderna con una perspectiva más sostenible respecto de la forma en la cual producimos y diseñamos, lo cual concierne lógicamente a la arquitectura, ingeniería estructural y construcción. Sin embargo, aun cuando estamos tratando de comenzar a adaptar nuestros métodos constructivos a esta nueva realidad, nos encontramos inmersos en una nueva revolución: la '*revolución de la tecnología de la información*', la cual sin duda afectará fuertemente a una de las industrias más arcaicas, incluyendo a la industria de la construcción. En esta nueva realidad, en la que los principios sobre los que diseñábamos están siendo notablemente afectados por dos revoluciones sucesivas, la madera no resulta ni mucho menos mal parada, ya que sin duda es un material mucho más sostenible que el acero y el hormigón, y también mucho más apto para la prefabricación y la aplicación de métodos y procesos manufactureros más modernos.

En los países de habla hispana, este desarrollo presenta ciertos retos particulares, más bien relacionados con barreras culturales y desconocimiento general, ya que tal como se mostró a lo largo de esta sección, por general en estas regiones no se ha empleado extensivamente la madera en la construcción; gran parte del desarrollo de *entramados pesados*^{1.15} se fundamentó en Europa central y septentrional, mientras que en Norteamérica se consolidaron fuertemente las tecnologías de *entramado ligero*^{1.16}. Sin embargo, los actores gubernamentales, académicos y privados adquieren progresivamente mayor concienciación del especial potencial que la madera tiene en estos países, ya que por lo general cuentan con condiciones forestales y necesidades de urbanización considerablemente superiores a las de los países más desarrollados.

1.3 LECTURAS ADICIONALES

Foliente GC (2000) History of Timber Construction. In Wood Structures: A Global Forum on the Treatment, Conservation, and Repair of Cultural Heritage. ASTM International.

Herzog T, Natterer J, Schweitzer R, Volz M, y Winter W (2004) Timber construction manual. Walter de Gruyter.