



GUÍA DE OPERACIÓN

DE EDIFICACIONES EN MADERA

AGRADECIMIENTOS

Esta Guía de Operación se realizó gracias a la participación del MINVU en especial a Paola Valencia, y a Susana Jara junto a su equipo conformado por: Ignacio González, Cristina Barría, Camilo Lanata, Xavier Irazoqui y Marcelo Soto.

Agradecemos a Diego Maige, profesional del CIM UC, por liderar el desarrollo del documento, al equipo de transferencias CIM UC Felipe Victorero, Javiera De La Barra, Clara Codrón, José Luis Caamaño y Daniela Méndez quienes aportaron al desarrollo técnico de este manual, y finalmente al equipo de comunicaciones CIM UC, Romina Rubio y Francisco López.

NOTA INFORMATIVA

Este manual no es de naturaleza obligatoria ni reglamentaria, está diseñado para facilitar el acceso a la información disponible en diferentes fuentes y principalmente en la normativa chilena vigente.

Las entidades que elaboraron este documento no se hacen responsables por las pérdidas, daños y otras consecuencias que puedan surgir dado el mal uso de este manual de manera directa o indirecta.

Este Manual no reemplaza por ninguna manera los documentos, ni normativas legales citadas. Además, no garantiza la aceptación o acreditación de un diseño, material o solución constructiva por cualquier entidad autorizada para ello por cualquier ley. De la misma forma, este documento no reemplaza la asesoría de un profesional competente, el usuario debe buscar este tipo de asesoría en caso de requerirla.



ÍNDICE

I._Introducción	7
II._Sustentabilidad y vida útil de un edificio. ¿Por qué madera?.....	9
Análisis de ciclo de vida	9
¿Qué es la huella carbono y por qué es importante?.....	9
Por qué cualquier construcción requiere mantenimiento.....	10
Particularidades de la madera como material	12
Estructura del árbol.....	13
Estructura celular de la madera	14
Higroscopía	15
Propiedades térmicas y químicas.....	16
Agentes de degradación de la madera	16
Sustentabilidad de la madera	20
Uso de la madera	20
Cómo llegar a un impacto positivo.....	21
Conclusiones.....	23
III._Cómo se prepara la madera para la construcción	24
¿Por qué la madera necesita preparación?	24
Preparación de la madera	24
Dimensionamiento	24
Secado	25
Protección del material	26
Calificación estructural.....	30
Rotulado	32
Conclusiones.....	34
IV._Importancia de las medidas de diseño y proceso de construcción.....	35
Diseñado para ser durable	35
Guías de diseño	38
Protección contra la humedad	38
Protección contra insectos y horadores marinos	45
Protección contra agentes abióticos	47
Más allá del diseño.....	49
Control de calidad.....	49
Termitas.....	49

Manejo de materiales	50
Conclusiones.....	51
V. Durabilidad edificios de madera: Operación y mantención.....	52
Vida útil de un edificio de madera	52
Operación y mantención de un edificio	55
Generales	55
Daños	55
Estructura y envolvente	56
Sistemas e instalaciones	57
Operación de un edificio de madera	58
Rutinas de inspección y mantención.....	59
Protocolos generales:	59
Protocolos de inspección de condensación.....	60
Rutinas de inspección y mantención para condiciones especiales	61
Conclusiones.....	75
Bibliografía.....	76



LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Edificaciones en madera: Fachhallenhaus, Casa comunal vikinga, Galpón Wetzel, Iglesia Achao, Templo Horyuji, Iglesia Stavkirke y Perry House.....	7
Figura 2 Ciclo de vida de un edificio y sus materiales.....	9
Figura 3 Partes del tronco del árbol.....	14
Figura 4 Estructura celular de la madera.....	14
Figura 5 Anisotropía de un elemento de madera.....	15
Figura 6 Ejemplos de rotulados de madera y Prototipo rotulado INFOR.....	33
Figura 7 Secuencia lógica para permitir el diseño y la especificación de la durabilidad de las maderas.	36
Figura 8 Motores de la penetración de aguas lluvias.....	38
Figura 9 Penetración de agua desde el interior.....	39
Figura 10 Detalles de instalación de barrera de humedad como plano de drenaje sobre muro.....	41
Figura 11 Cuatro líneas de defensa: la redundancia está diseñada en sistemas de pared exteriores al proporcionar múltiples líneas de defensa.....	41
Figura 12 Madera levantada para protección de salpicado de agua, ejemplificado respecto a nivel de suelo.....	43
Figura 13: Herraje típico en columna para evitar acumulación de agua.....	43
Figura 14 Detalle ranura de goteo. Redibujado.....	45
Figura 15 Pilote en contacto con agua, envuelto en plástico resistente. Redibujado.....	47

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Equivalencia entre dimensiones nominales y denominación comercial	24
Tabla 2 Porcentaje de humedad permitida en la madera estructural de acuerdo a zona climática-habitacional.....	25
Tabla 3 Categorías de especies de madera en Chile según durabilidad	26
Tabla 4 Clasificación de riesgo según uso y agente biológico de deterioro	27
Tabla 5 Retención mínima de ingrediente activo del preservante según nivel de riesgo de deterioro de la madera.....	27
Tabla 6 Propiedades mecánicas de la madera según grado estructural	32
Tabla 7 Tabla resumida del estudio solo con los costos asociados a las aplicaciones de pino radiata	53
Tabla 8 Vida útil de diseño para el edificio e instalaciones y sus componentes	57
Tabla 9 Costos de energía operativa y mantención para 2 edificios iguales pero con estructura diferente: uno de hormigón armado y otro prefabricado de madera.	58



I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día en Chile son producidos sobre 8.000.000 de metros cúbicos de madera aserrada al año (Gysling et al., 2020), lo cual se presenta como un gran potencial y oportunidad para la industria de la construcción para aprovechar este material. Sin embargo, en Chile la madera como material constructivo presenta barreras culturales que dificultan su masificación, de las cuales destaca la percepción de esta como uno bien no durable, observable por **ejemplo en la tabla de “vida útil de bienes físicos del activo inmovilizado” del Servicio de Impuestos Internos (SII)**, donde a las construcciones de madera se les atribuye una vida útil de tan solo 30 años (SII, 2003).

Los edificios de madera apropiadamente diseñados y mantenidos pueden tener una vida útil bastante larga, incluso de cientos de años. Esto es visible en múltiples sectores del mundo en estructuras menores y medianas, como las viviendas de

estructura híbrida tipo Fachhallenhaus alemanas, Colombage francesas y Half-timbered inglesas, o como viviendas y galpones del sur de Chile puramente construidos en madera. También existen obras de madera de gran tamaño como el templo Horyuji en Japón, las iglesias Stavkirke de Noruega, las iglesias de Chiloé, entre muchos otros. Esta gran durabilidad de estructuras de madera no solo es observable en grandes estructuras religiosas o residenciales, también es visible en edificios comerciales, de bodegas u oficinas de estructuras mixtas de mediana altura, construidos de finales del siglo XIX y principios del siglo XX, de los cuales muchos superan los 100 años de antigüedad, como lo son los casos de The Landing, en Gastown en Canadá; Butler Square en Minneapolis, USA; o Perry House en Brisbane, Australia, entre varios otros.



Figura 1 Edificaciones en madera: Fachhallenhaus en Alemania (Hindemith, 2009), Casa comunal vikinga en Dinamarca (Thyssen, 2002), Galpón Wetzel en Chile (ArquitecturaGalpones.cl, n.d.), Iglesia Achao en Chile (Linao, 2013), Templo Horyuji en Japón (CMPC Blog Piensa en Madera, n.d.), Iglesia Stavkirke en Noruega (Larsen, 2006) y Perry House en Australia (Raymond, 2015).

Para el caso particular de los edificios de madera con estructura tipo marco-plataforma, su durabilidad es respaldada con estudios de ciclo de vida, donde en Softwares como BEES del National Institute of Standards and Technology (NIST) de EEUU, muestran a la madera aserrada apropiadamente tratada y preservada, como un material con una durabilidad de al menos 75 años, sin requerir de mantenimiento mientras se asegure la hermeticidad al agua desde el exterior en techos y revestimientos exteriores, pudiendo llegar incluso a superar los 85 años (Kneifel, 2018).

Actualmente, sumado a lo anterior, con el desarrollo de investigaciones, nuevas tecnologías, modificaciones normativas, y la difusión y transferencia conocimiento técnico de diseño y ejecución, en países como Canadá, EEUU, Australia, Nueva Zelanda, Inglaterra, Francia, Finlandia, entre muchos otros, la cantidad de proyectos modernos de construcción de edificios de madera con estructura marco-plataforma en mediana altura ha crecido de forma considerable durante los últimos 20 años.

Es por esto que este documento compila y sintetiza en español conocimientos y experiencias nacionales y extranjeras sobre el diseño sustentable de edificios en madera, con un especial enfoque en el diseño y operación de estos para cumplir con altos estándares de durabilidad. Sirve de apoyo a profesionales, técnicos, revisores y trabajadores del área de la construcción y mercado inmobiliario, para entregarles desde nociones generales de diseño y rutinas de inspección y mantenimiento, hasta contenidos más específicos de ámbitos normativos, de diseño y técnicos. Su objetivo final es fomentar la utilización de madera de

manera más masificada y, además, responsable y consciente de las buenas prácticas de cuidado de un edificio –lo cual es transversal a la todos estos, independiente de su materialidad-, de su impacto ambiental y ciclo de vida completo, presentando el cómo las obras construidas con este material pueden responder apropiadamente a los requerimientos de la industria de la construcción.

Este documento se estructura por 4 capítulos principales:

- El primer capítulo, de carácter más bien teórico, donde se presenta a la madera y sus características.
- El segundo de orden principalmente práctico, donde se tratan las normativas de preparación de la madera para ser utilizada en la construcción.
- El tercero, donde se abordan los conceptos y detalles asociados al diseño con madera para aumentar su durabilidad.
- El cuarto y último, donde se expondrá lo asociado a la operación de un edificio de madera, con un enfoque hacia la mantención, el cual presentará hallazgos de investigaciones contemporáneas relativas a estos procesos, en conjunto con guías y nociones generales de los protocolos de mantención en condiciones normales y accidentales.

II. SUSTENTABILIDAD Y VIDA ÚTIL DE UN EDIFICIO. ¿POR QUÉ MADERA?

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Corresponde al estudio de impacto ambiental de un producto, proceso o sistema para la evaluación de su sustentabilidad, considerando su impacto ambiental, social y económico tanto para el presente como para las generaciones futuras. Puede tratar diferentes categorías como: potencial de calentamiento global (Global Warming Potential), uso de energía, consumo de agua, toxicidad y eutroficación (Symons, 2020).

Para el caso de un edificio, su ciclo de vida debe considerar desde la extracción y producción de los materiales, pasando por su transporte y posterior construcción; por su periodo de uso, considerando sus gastos energéticos y de mantención; hasta su demolición, donde se estudia si los materiales pueden ser reutilizados, reciclados, o si deben ser desechados (Symons, 2020).

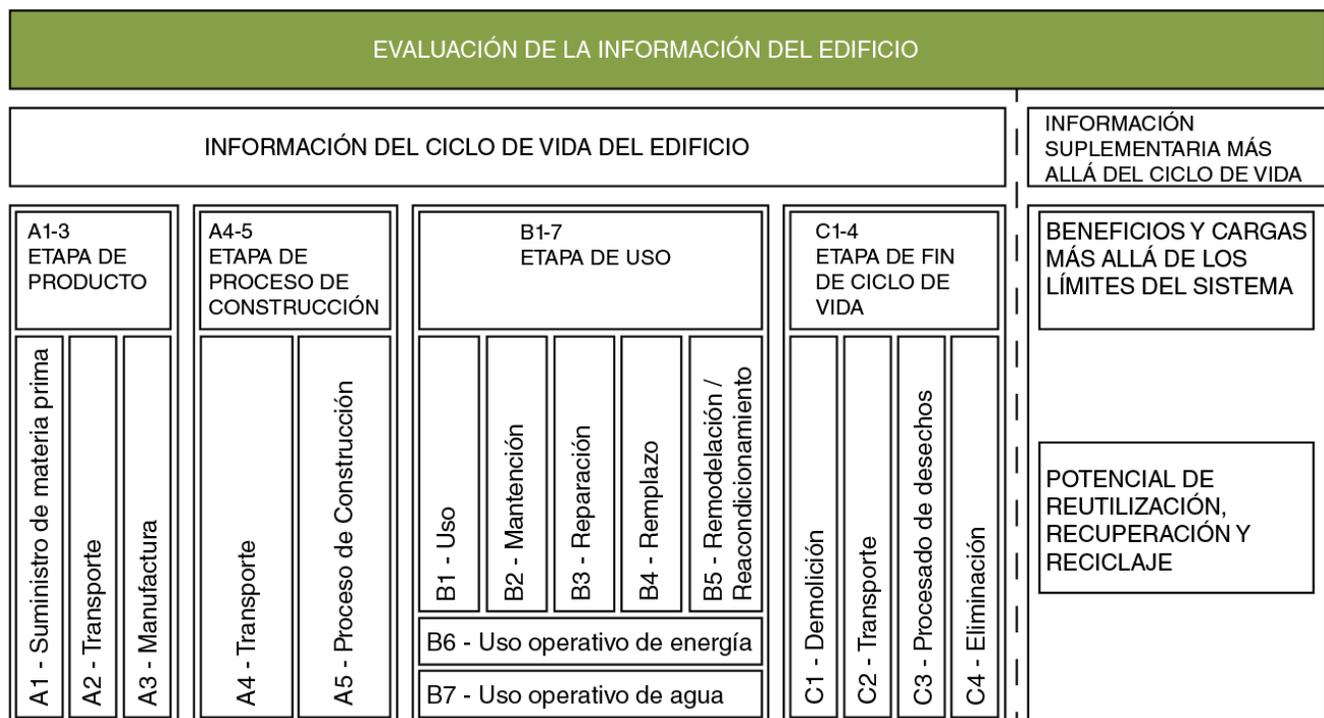


Figura 2 Ciclo de vida de un edificio y sus materiales. Redibujado. (Symons, 2020)

¿QUÉ ES LA HUELLA CARBONO Y POR QUÉ ES IMPORTANTE?

La huella de carbono es uno de los resultados obtenidos de un estudio de ciclo de vida para el análisis de Potencial de Calentamiento Global (GWP), y se define como la totalidad de gases de efecto

invernadero (GEI) emitidos por efecto directo o indirecto por un individuo, organización, evento o producto (Estévez, 2017).

En el caso de la construcción en madera, esta presenta un atractivo mayor y una oportunidad para la industria de la construcción, ya que, a diferencia de otros materiales como el hormigón armado o el acero que tienen altos consumos de agua y producen grandes cantidades de gases de invernadero en su ciclo de vida, al capturar CO₂ durante su crecimiento tiene una huella de carbono negativa en su ciclo de vida completo, por lo que su utilización reduce considerablemente la emisión de gases en la construcción. Esta y otras virtudes de la sustentabilidad, que serán profundizadas

más adelante, se vuelven una ventaja crítica, ya que el sector construcción y su operación son responsables por aproximadamente el 40% del uso de energía y emisiones de CO₂ equivalentes a nivel mundial. Dado ese impacto, y las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas, estamos en frente de un real desafío para reducir estas emisiones en la atmósfera mediante la creación, por ejemplo, de estructuras de baja huella de carbono asociada tanto a sus materiales y construcción, como a la eficiencia energética durante su uso.

POR QUÉ CUALQUIER CONSTRUCCIÓN REQUIERE MANTENIMIENTO

Durante el diseño de todo proyecto de edificación se debe considerar la durabilidad del mismo una vez que se da inicio a la ocupación de este por su propietario u otros usuarios. La durabilidad del edificio, incluyendo la de cada una de sus componentes, corresponde a la capacidad de desempeñar sus funciones requeridas para la vida útil proyectada de este, anticipándose a las influencias de los distintos agentes que pueden afectar a este durante dicho periodo. La evaluación de cuánto durará cada parte del edificio ayuda a decidir las especificaciones y detallamientos apropiados durante el proceso de diseño, y con estos sus respectivas rutinas de inspección o mantenimiento, incluyendo todas las capacidades técnicas o profesionales necesarias, para así prever la obsolescencia del sistema o sus partes, y con ello además anticiparse a los costos del ciclo de vida del proyecto, facilitando su optimización de estos. (International Standard, 2000).

Toda obra debe contar con rutinas de inspección y mantenimiento periódicas, de carácter preventivo o curativo según corresponda, sea para su estructura, elementos no estructurales, instalaciones o equipos. Además, esto es particularmente crítico tras casos de emergencia, como terremotos o incendios, donde esta debe ser apropiadamente inspeccionada, haciendo un levantamiento de daños tanto estructurales como no estructurales.

Todos protocolos de inspección y mantención naturalmente varían dependiendo de la materialidad de la obra. Todo tipo de material en construcción posee propiedades particulares que, además de determinar su función o comportamiento como elemento estructural o secundario, pueden verse afectadas negativamente por distintos eventos o procesos físicos, químicos o biológicos.

En los sistemas constructivos más comunes hoy en día en Chile se pueden observar las siguientes fallas y patologías constructivas:

- **Cerámicos:** Para este tipo de estructuras, como es el caso de la albañilería de ladrillos, se pueden presentar diversas fallas físicas por el moldeo o la cocción deficiente de estos, pudiendo generar piezas menos resistentes mecánicamente, microfisuraciones, deformaciones y corazones negros. También se puede producir la aparición de costras o eflorescencias, que corresponden a las fallas de origen químico generadas por: la presencia de sales solubles en la arcilla que no llegan a ser descompuestas durante la cocción, el ingreso de sales solubles en la presencia de una atmósfera ácida, por ascensión de agua por capilaridad que arrastre sales solubles desde el nivel de suelo, entre otras. Además, la captura de humedad hacia el interior del ladrillo por capilaridad puede producir un aumento del volumen de este, y con ello generar fisuras y deformaciones tanto en el ladrillo individual como en el elemento constructivo completo, y que en caso de heladas al también generarse el cambio de volumen mismo del agua entre los 0 t 4°C, generando fallas mayores. Estas reparaciones, dependiendo de la gravedad de la lesión pueden variar desde limpiezas sencillas o con químicos, el uso de adhesivos consolidantes, entre otros, hasta la sustitución del elemento mismo (Broto, 2005).
- **Hormigón armado:** Una estructura de este tipo en su periodo de operación debe ser inspeccionada regularmente para asegurarse que está recibiendo, o si requiere de, mantenimiento para mantener la capacidad de servicio, ya que esta puede encontrarse expuesta a distintas patologías constructivas por diversos factores, por ejemplo, por la elaboración inapropiada de la mezcla de hormigón, vibrados mal ejecutados, mal fraguado, uso no adecuado de aditivos, exposición al agua y congelamiento de esta, corrosión de la armadura, carbonatación por presencia de humedad y anhídrido carbónico en la atmósfera, entre otras. Todas estas fallas pueden comprometer tanto la estética como la capacidad estructural del sistema constructivo, y pueden requerir de reparaciones y mantenimientos desde superficiales, mediante el uso de pinturas hidrofugantes o impermeabilizantes, hasta invasivos, donde es necesario repicado superficial del hormigón para la revisión o intervención de la estructura, especialmente de la armadura (Broto, 2005).
- **Acero:** Para el caso las estructuras metálicas, los principales problemas que necesitan de atención son: especificación incorrecta del tipo de metal a utilizar, el uso de productos con fallas de fábrica o manipulados incorrectamente durante la construcción, fallas en la ejecución de soldadura, contacto entre metales de diferentes tipos, la exposición de elementos a la intemperie, entre otros, pudiendo todos estos generar problemas por corrosión del material. Para casos de corrosión, dependiendo del grado, forma y origen de esta, se puede requerir de distintos tipos de reparación, como por ejemplo, de un control de la oxidación, regularización de la soldadura y/o una regularización del perfil de la pieza, mediante la aplicación de rebajes, picado, rascado, control de cantos vivos, etc; y posteriormente llevar a cabo la limpieza del elemento con

llama, abrasivos, u otros procesos químicos, para luego proteger el elemento con pinturas o recubrimientos (Broto, 2005).

Los miembros portadores de carga generalmente se reemplazan cuando el 30% o más del acero se ha perdido por corrosión o cuando se deforman. Si los miembros adyacentes muestran signos de deterioro grave, puede ser más económico reemplazar marcos enteros o doblados. Este es un proceso complejo: un miembro con carga no debe ser retirado antes de que el esfuerzo se haya aliviado mediante la transferencia de carga a los miembros adyacentes o por nuevos miembros temporales y refuerzos adecuados (Mishra, 2011).

Entonces, independientemente del tipo de material a utilizar, para facilitar la inspección, mantenimiento o reparación, se deben respetar los siguientes puntos durante las etapas de diseño y construcción:

- Elección adecuada de materiales de construcción, de acuerdo a la ubicación y los objetivos del proyecto.
- Diseño o uso de soluciones constructivas que protejan al sistema constructivo de agentes perjudiciales para este.
- Diseño que permita la accesibilidad a los elementos, instalaciones o equipos del edificio.
- Especificaciones técnicas adecuadas para trabajos de construcción e instalación.
- Supervisión efectiva durante la construcción y rectificación de defectos antes de la certificación final.

En los próximos capítulos se tratarán las características específicas para el caso de los sistemas constructivos en madera y sus respectivas rutinas de mantenimiento y reparación, más específicamente para las estructuras de entramados, abarcando los temas de las particularidades del material, y el cómo debe ser preparado para la construcción, con énfasis en la importancia de las medidas de diseño para optimizar la operación y mantenimiento para edificios de este tipo.

PARTICULARIDADES DE LA MADERA COMO MATERIAL

Para poder entender la operación de un edificio es necesario comprender las propiedades de los materiales con los que es construido, especialmente para su estructura, puesto que todo material constructivo tiene sus ventajas y desventajas, y así aprovechar al máximo sus beneficios y evitar al máximo posible, por medio de un buen diseño, que se generen las condiciones donde dichas desventajas puedan presentarse, o actuar como un elemento crítico perjudicial para el proyecto. Dado el enfoque de este

documento, a continuación, trataremos las características de la madera.

La madera es un tejido vegetal rígido cuyas excepcionales propiedades mecánicas han permitido que los árboles se conviertan en unos de los seres vivos más grandes y largos del mundo (Trouy, 2016). Como toda materia orgánica natural, la madera es biodegradable y cuando el árbol muere, se descompone por hongos y microfauna, para permitir el reciclaje de los elementos. Construir de forma sostenible en madera se

trata de atraer las cualidades tecnológicas de la madera restándola, en la medida de lo posible, de la descomposición, ya que, la madera, cumpliéndose las condiciones apropiadas, puede permanecer en servicio durante siglos (Forest Products Laboratory, 2015). Por ello, a diferencia de otros materiales inorgánicos como el ladrillo, acero y hormigón, entre otros, la madera debe tener una serie de otras consideraciones de orden técnico que garanticen su durabilidad en el tiempo.

Primero, dado que en este documento aborda la temática de construcción, operación y mantenimiento, es necesario comprender las propiedades de un elemento de madera, con un especial enfoque en sus propiedades mecánicas, es decir, el cómo este se comporta ante distintos tipos de esfuerzos, las cuales, además, dado que ninguna especie es igual a otra, dependen directamente de la especie de árbol del cual fue extraído. El tipo de especie es además determinante de la durabilidad natural de su madera, la que corresponde a la capacidad del material leñoso para resistir tanto al ataque de organismos vivos (hongos, insectos y horadores), como al deterioro por desgaste mecánico y producto de diversas condiciones ambientales (Cartwright et al., 1958).

A pesar de que todas las especies sean diferentes, a estas se les puede clasificar de manera general en dos grandes clases: las maderas duras (angiospermas) y las maderas blandas (gimnospermas). Estas últimas incluyen a las coníferas, cicadas, ginkgo y gnétidas, y se diferencian de las duras por tener una estructura interna más sencilla y regular, y por ser, tal como su nombre lo indica, más blandas y por tanto, menos densas que el general de las duras, permitiendo entonces obtener elementos

altamente similares entre sí y, por ende, altamente estandarizables en todo lo que respecta a sus propiedades mecánicas, facilitando con ello la comprensión, diseño, cálculo, manipulación y trabajo de las estructuras que hagan uso de estas (Forest Products Laboratory, 2015). Es por este motivo que las coníferas son las más utilizadas en la industria de la construcción en madera, y más específicamente, en el caso chileno, el pino radiata.

ESTRUCTURA DEL ÁRBOL

El tronco del árbol, que es de donde se obtienen la mayoría de los distintos elementos de madera para la construcción, está constituido por varias capas concéntricas respecto al eje longitudinal central de este, las cuales se extienden en todo su largo, y corresponden, vistas de afuera hacia dentro, a:

- Corteza exterior: Piel que protege al árbol del exterior.
- Corteza interior: Es la sección por donde circula la savia para alimentar al tronco.
- Cambium: Es la capa que hace crecer a la madera por mitosis o división celular.
- Albura: Corresponde a los anillos más externos, son de madera joven y se reconocen por su color más claro.
- Duramen: Este es el núcleo muerto central del árbol, fuertemente lignificado, haciéndolo más impermeable y más resistente pero menos flexible que la albura. Suele ser de color más oscuro, aspecto que se ve acentuado en el caso de las coníferas.
- Médula: Parte central del árbol, vieja, dura y agrietada.

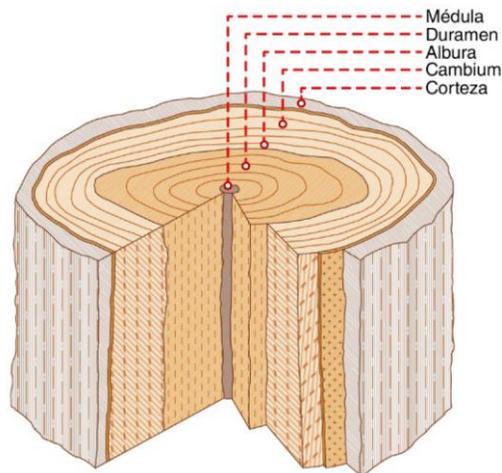


Figura 3 Partes del tronco del árbol (Elaboración propia)

ESTRUCTURA CELULAR DE LA MADERA

Las unidades básicas de la estructura son las células y se pueden distinguir en distintos tipos de acuerdo a su función. En su mayoría son de forma tubular y carácter elongado, motivo por el cual, son conocidas como fibras, y se posicionan casi exclusivamente de forma longitudinal, alineadas paralelas al eje del tronco, y distribuidas radialmente dentro de las capas del árbol.

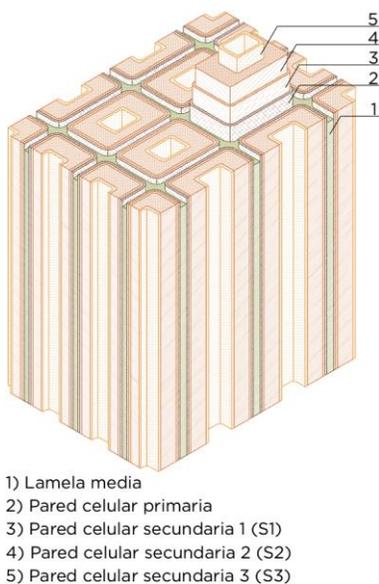


Figura 4 Estructura celular de la madera (Elaboración propia)

En el caso de las coníferas, al pertenecer a las gimnospermas, su estructura tal como fue mencionado anteriormente, es bastante sencilla, componiéndose principalmente por un solo tipo de células, la cual se hace cargo del transporte de agua y nutrientes, a la vez que provee soporte para el árbol. La elasticidad y resistencia de la especie de madera es determinada principalmente por la estructura de las paredes celulares de estas fibras (fig.4), las cuales están compuestas por distintos polímeros en dos capas (Broto, 2005; Herzog et al., 2000):

- Una de celulosa y hemicelulosa, las cuales se aglutinan formando una matriz de fibrillas, donde en la pared celular primaria se orientan en distintas direcciones formando una malla que otorga la principal fuente de resistencia a los esfuerzos de tensión, y en las paredes celulares secundarias se orientan en ángulos menos pronunciados.
- Otra compuesta por lignina, la cual es insoluble y rígida, impermeabilizando a la célula y otorgando una resistencia a los esfuerzos de compresión.

La madera, al tener estas células de carácter alargado y que, por lo tanto, se distribuyen en cantidades diferentes tanto horizontal como verticalmente, y que, además, sus resistencias a esfuerzos de compresión y tensión son determinadas por polímeros distintos, responde de manera diferente a dichos esfuerzos dependiendo de en qué dirección y en qué punto estos inciden sobre ella. A esta característica en que las propiedades físicas del material son determinadas según la dirección en que son analizadas se le llama anisotropía, y es apreciable en otras características de la

madera como su módulo de elasticidad, dureza, flexibilidad, resistencia al corte, conductividad, su dilatación y contracción por diferencias de temperatura, entre varias otras (Herzog et al., 2000). Este comportamiento en una pieza estándar de madera se ve afectado también por la forma de los anillos que las fibras forman al distribuirse radialmente, y la distancia de estos respecto al centro, ya que estos definirán la regularidad de la pieza dependiendo de si fue extraída cerca del centro, con una curvatura de anillos muy pronunciada, o lejos del centro, donde la curvatura es más suave y tiende a ser más cercana a una recta.

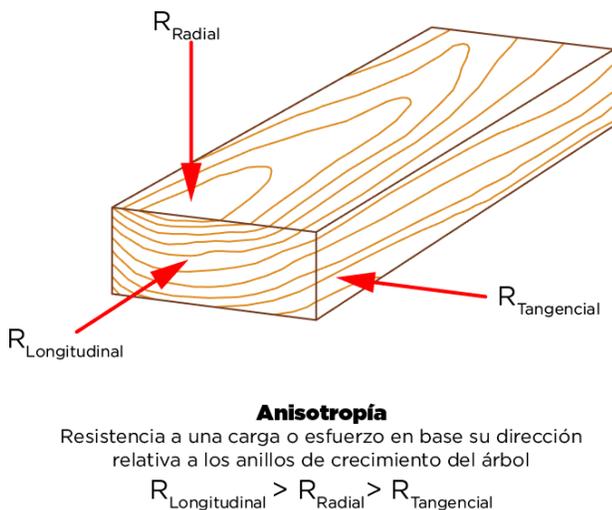


Figura 5 Anisotropía de un elemento de madera.
(Elaboración propia)

HIGROSCOPÍA

Luego, el siguiente atributo crucial a tener en cuenta es la humedad de la madera, puesto que esta es un material higroscópico, es decir, que adapta su humedad interior en base al ambiente donde se encuentra, absorbiendo o liberando humedad para buscar un equilibrio entre su contenido de agua interior, con la humedad relativa y temperatura del aire (Forest Products Laboratory, 2015). Al modificar su contenido

humedad, se ajustan los volúmenes de agua en el interior de las paredes celulares, llamada agua de impregnación, y los volúmenes de agua al interior de las células y otros vacíos intercelulares, denominada agua de imbibición o agua libre (Broto, 2005). En el punto en que la madera alcanza un 30% de humedad interior, que en el general de las especies corresponde a la capacidad máxima de contención de agua de impregnación, es denominado “**punto de saturación de fibras**” o PSF, y marca el límite en el cual cualquier aumento de humedad adicional es contenido como agua de imbibición, pudiendo llegar a más de un 200%. Los aumentos de volumen de agua por sobre el PSF dejan de influir en las propiedades físicas y mecánicas de la madera, por lo que todos los cambios críticos se dan bajo el 30% antes señalado.

Además, otro aspecto que puede afectar el contenido de humedad de la madera son las bacterias que puede contener de forma natural, las cuales si bien generalmente no representan un problema, algunas pueden hacer que esta sea aún más absorbente (Forest Products Laboratory, 2015).

Este carácter higroscópico se puede traducir en las siguientes consecuencias para el material:

- Al aumentar la humedad interior, las capacidades mecánicas de la madera se reducen. Mientras más seca sea la pieza, mejores propiedades tendrá.

- Con cambios de volumen de agua al interior, consecuentemente se alterarán las dimensiones de las piezas, hinchándose o contrayéndose, pudiendo generar: fallas en el sistema constructivo si estas no cuentan con espacio para crecer; o fallas de deformación o fisuramiento de la pieza.

-A mayor contenido de humedad, la madera es más propensa al ataque de hongos e insectos.

Por lo tanto, para su uso en la construcción, es crítico secar la madera para protegerla y aprovechar eficazmente sus propiedades, siempre considerando su porcentaje de humedad interno respecto al ambiente donde esta vaya a trabajar, evitando cualquier cambio de este. Para garantizar la sostenibilidad de las obras y los productos, es sobre todo necesario limitar los riesgos de humidificación mediante un diseño bien pensado.

PROPIEDADES TÉRMICAS Y QUÍMICAS

En la madera destacan sus propiedades térmicas, donde presenta principalmente dos atributos interesantes:

-Tiene un coeficiente de dilatación por cambios de temperatura muy bajo, por lo que los aumentos de esta por sí sola prácticamente no afectan su estabilidad dimensional.

-Tiene una conductividad térmica bastante baja, especialmente cuando se le compara con hormigón, acero o cerámicos.

Entre sus múltiples propiedades es importante recalcar también qué, si bien a diferencia de los otros materiales tratados al comienzo de este capítulo, cómo señala Broto en su enciclopedia de patologías de la construcción, la madera debido a su pH apenas ácido, si presenta en conjunto fibras ordenas y rectas, un alto contenido de lignina y celulosa, baja permeabilidad y mínimos movimientos por cambios de su contenido de humedad, esta ofrecerá una buena resistencia agresiones químicas. (Broto, 2005). Esto, independientemente de los resguardos ya señalados que la madera necesita, representa una ventaja, dado que en maderas de coníferas cumplen con esta

característica y, por lo tanto, pueden ser utilizadas en ambientes más salinos, o en ambientes contaminados de atmósferas más ácidas.

AGENTES DE DEGRADACIÓN DE LA MADERA

La madera como un material biológico se puede ver afectada por múltiples factores que la degradan, produciendo en ella defectos que pueden variar desde un nivel puramente visible y cosmético como cambios de color, hasta la pérdida de integridad de su estructura más interna y, por tanto, afectando sus propiedades mecánicas y resistencia como material. Estos agentes de degradación se pueden clasificar en 2 principales ramas según su tipo de origen: bióticos, que se originan por la acción de organismos como hongos e insectos; y abióticos, asociados a fenómenos físicos y/o ambientales que afectan las propiedades de la madera tales como la luz ultravioleta, humedad del aire, presencia de químicos, cambios de temperatura, fuego, entre otros.

Agentes bióticos:

- Hongos:

La descomposición es el resultado de una serie de eventos que incluyen una secuencia de colonización fúngica. Las esporas de estos hongos son omnipresentes en el aire durante gran parte del año, pero sólo conducen a problemas bajo ciertas condiciones. Los hongos de descomposición de la madera requieren madera como fuente de alimento, una temperatura sobre los 5°C, oxígeno y agua. El agua es normalmente el único de estos factores que podemos manejar fácilmente. Es más fácil controlar los hongos de descomposición antes de que la descomposición haya comenzado, evitando

que se generen condiciones para su desarrollo (Canadian Wood Council, 2000).

Estos organismos destructores de madera tienen la capacidad de descomponer los polímeros complejos que componen la estructura de la madera. Los hongos que habitan la madera se pueden separar en tres tipos de hongos:

a) Hongos Cromógenos:

Se alimentan de las células vivas de la madera sin altera la pared celular de las fibras. Hacen que en la madera se produzca un cambio de color (madera azulada), pero no afectan la resistencia de la madera.

b) Hongos de Pudrición:

Estos agentes bióticos se alimentan de la pared celular de las fibras de madera, reduciendo considerablemente su resistencia. Puede ser una pudrición: blanca, donde los hongos se alimentan de la lignina y facilitando la ruptura de la pieza en el sentido de las fibras; o parda, en la cual los hongos consumen la celulosa y no la lignina, produciendo una ruptura de las fibras en forma de cubos. En todos estos casos, cuando la madera se encuentra en este estado debe ser reemplazada inmediatamente (Fritz, 2004).

- Mohos

El moho es un hongo con la apariencia de algodón fino, y suele afectar la parte superficial de la madera, por lo que no tiene efectos sobre la estructura de los elementos de madera. Sin embargo, si este no es eliminado tempranamente, puede favorecer el desarrollo de hongos de pudrición, por lo que es fundamental evitar su aparición desde un principio. Si este llega a aparecer, dado su carácter

superficial, puede ser eliminado cepillando la pieza de madera en la cual se encuentra (Fritz, 2004).

La madera no será objeto de ataques de hongos a menos que se cumplan cuatro condiciones:

- 1) La humedad correcta: no ocurrirán ataques de estos entre 0 y 20% de contenido de humedad, siendo entre el 20-60% el margen donde hay suficiente humedad para que este se produzca. Cuando la humedad es superior al 60% la madera es demasiado húmeda y la cantidad de oxígeno presente en esta insuficiente para que se permitirlo (Trouy, 2016).
- 2) La presencia de oxígeno es fundamental. Rara vez la madera es atacada si se encuentra completamente sumergida o saturada. La madera enterrada a 600 mm o más bajo tierra, dada la escasa presencia de oxígeno, es muy difícil que se vea atacada por hongos.
- 3) La temperatura ideal para el desarrollo de hongos está en el rango de 5-40°C, siendo ideal entre 25°C a 40°C. A temperaturas menores el ataque de hongos es retardado, mientras que a temperaturas mayores, el hongo no sobrevivirá.
- 4) Es fundamental la existencia de alimentos en forma de nutrientes (hidratos de carbono, nitrógeno, minerales, etc). Estos son generalmente proporcionados por la madera en sí, especialmente en el caso de la albura, la cual es normalmente alta en azúcares y carbohidratos.

Por esto, la forma más efectiva de controlar la aparición del moho y hongos de pudrición es mediante el control del contenido de

humedad de las piezas de madera bajo el 20%.

- Coleópteros:

Son aquellos insectos que en su fase larval abren galerías para alimentarse de las fibras de la albura, a cargo del transporte de savia, o del duramen de los árboles, ocasionando con ello daños en la madera, principalmente en el fuste. Este tipo de insectos perfora la madera para alimentarse, protegerse, o ambas cosas, y pueden dañar desde árboles vivos hasta madera en descomposición, e incluso – lo que nos interesa - madera elaborada.

Su comportamiento alimenticio presenta algunas variaciones, por cuanto algunos dañan inmediatamente el duramen y otros dañan primero la zona cambial (Ripa & Luppichini, 2004).

Los coleópteros se dividen en 3 categorías, según el tipo de madera a la cuál prefieren atacar:

a) Madera con humedad superior al 20%

La familia de los Cerambícidos es la familia más importante de esta categoría. El alimento de sus larvas consiste de almidón, azúcares y sustancias albuminoideas de la madera. La mayoría atacan a los árboles en pie (Fritz, 2004).

b) Madera con humedad inferior a 18%

En general, atacan principalmente a la albura. A este grupo pertenecen los Líctidos, cuyas larvas se alimentan del almidón contenido en la pared celular. Para esto construyen galerías de alrededor de 1 mm de diámetro, destruyendo la madera y dejando tras de sí un aserrín fino. No atacan a las coníferas, solamente a las latifoliadas (Fritz, 2004).

c) Maderas secas, coníferas y latifoliadas

Pertenecen a la familia de los Anóbidos, comúnmente llamados Carcoma, y se alimentan de la celulosa y lignina. Son de tamaño pequeño, pudiendo medir entre 2,5 mm y 8,5 mm de largo. Construyen galerías de mayor tamaño que las de los líctidos, de unos 2 a 3 mm de diámetro, y dejan un aserrín menos fino que estos (Fritz, 2004).

- Termitas:

Las termitas son insectos del orden Isóptera. Como los otros insectos xilófagos, su principal alimento es el material vegetal muerto y la celulosa. Entre los insectos xilófagos estas destacan por poder afectar desde los elementos de terminación con base en celulosa, hasta la resistencia y funcionalidad de elementos estructurales de madera que no se encuentren impregnados (MINVU, 2017).

En Chile se encuentran termitas endémicas, tanto en las zonas Sur como el Norte del país. Estas especies construyen sus nidos dentro de la madera de la cual obtienen su alimento, principalmente cuando se encuentran en su estado larvario. De estas destacan las termitas de madera seca (TMS) y termitas de madera húmeda (TMH).

Sin embargo, existe una especie introducida en el país, conocida como termita subterránea (TS), la cual representa el mayor problema entre este tipo de insectos en el país, y se diferencia de las otras al no vivir en la madera, sino en termiteros que se ubican al interior del suelo y árboles (caso no muy común). Las obreras, en busca de alimento construyen galerías que pueden alcanzar cientos de metros de longitud. Estas galerías pueden ir desde el interior del suelo, pudiendo incluso

llegar a introducirse entre los cimientos, sobrecimientos, radieres y muros de las edificaciones taladrando el hormigón o canterías en muros de albañilería, aprovechando la existencia de grietas o perforaciones en estos elementos, como lo es el caso de cañerías y ductos. Estas galerías resultan en una camino superficial visible de una argamasa extraordinariamente dura (Fritz, 2004).

Cuando llegan a la madera, las obreras construyen las galerías en de la fibra, las cuales dejan despejadas de aserrín para poder regresar al termitero. Las huellas de ataque son las galerías visibles, sin embargo, el daño sólo se hace visible una vez que la madera falla por haber reducido su resistencia.

Si bien es común ver a estos insectos atacar maderas secas, para estos la humedad es fundamental para poder vivir, motivo por el cual tienen sus termiteros fuera de esta (Fritz, 2004).

- Horadores marinos:

Corresponden a crustáceos y moluscos que hacen perforaciones en elementos para alimentarse o vivir en esta, ocasionando daños considerables en periodos cortos de tiempo. Todo elemento de madera será atacado por horadores marinos si esta se encuentra sin un tratamiento preservante adecuado, y en contacto directo con el agua marina (Zaid Núñez, 2004).

Agentes abióticos:

- Degradación por la luz

La acción de luz ultravioleta produce una degradación lenta de la madera, con un efecto mayor en las piezas de albura que las de duramen, por medio de la descomposición de la celulosa presente en esta. Las capas superficiales de la madera

ya degradada por la luz UV generan una capa protectora frente al avance de esta degradación, previniendo que esta siga aumentando.

El efecto de esta degradación se hace visible, entre el primer y séptimo año, mediante el cambio de color de la madera.

Esta degradación se ve acelerada si se combina con la presencia de lluvia, ya que esta arrastra la celulosa descompuesta expuesta por la degradación ocasionada por la luz, resultando en la llamada madera meteorizada o madera gris (Fritz, 2004).

- Humedad atmosférica

Este fenómeno pasa porque, tal como fue mencionado anteriormente, la madera es una sustancia higroscópica, influida por los cambios de las condiciones de humedad atmosférica, produciéndose absorción de agua en las superficies que quedan expuestas, hinchándose con clima húmedo y lluvioso y contrayéndose en los períodos de sequía. Esto resulta en un deterioro especialmente importante en las capas superficiales expuestas de la madera, debido a que se producen tensiones alternas de compresión y dilatación en ellas (Fritz, 2004).

- Efecto hielo – deshielo

El agua al aumentar su volumen entre los 0°C y los 4°C, en los casos que las temperaturas llegan a este margen o bajan más aún, se produce un aumento de las fibras de la madera por la humedad que estas contienen, produciendo un daño en la integridad física de esta, pudiendo traducirse en la destrucción de las células más superficiales directamente afectadas por el cambio de temperatura. La repetición frecuente de este fenómeno puede resultar en el deterioro de la pieza en sí misma. (Fritz, 2004).

- El fuego

Además de los efectos debidos al clima, existe el riesgo de fuego, al cual ningún material puede estar expuesto de forma indefinida sin presentar alguna alteración, falla o deterioro. El cómo reacciona un elemento de madera frente al fuego depende de su espesor, contenido de humedad y de su densidad (Fritz, 2004).

Similar al efecto de la luz ultravioleta, la madera expuesta a fuego empieza a perder parte de su sección desde sus capas más externas, pero llegando eventualmente a formar una capa protectora carbonizada

que retrasa el avance de la carbonización más al interior de la pieza (Fritz, 2004). Sin embargo, cuando se trabaja con elementos de secciones menores, como es el caso de las estructuras marco-plataforma, cada uno de estos es utilizado aprovechando al máximo el aporte estructural de su sección, por lo que, independiente que la carbonización pueda proteger elementos de manera, estos no pueden perder parte de esta por efectos de fuego, ya que afectaría inmediatamente la resistencia estructural de cada elemento.

SUSTENTABILIDAD DE LA MADERA

USO DE LA MADERA

Además de la eficiencia energética operativa, permitida por la construcción en madera debido a su baja conductividad de calor y la facilidad que otorgan estos sistemas constructivos para la utilización de materiales aislantes, diseñar un edificio utilizando madera puede reducir significativamente su huella de carbono. Los bosques y los productos madereros reducen los niveles atmosféricos de gases de efecto invernadero de varias maneras, y numerosos estudios demuestran los siguientes mecanismos (Sathre et al., 2013):

- La madera se produce utilizando menos combustibles fósiles. Es una conclusión universal de varios estudios que la producción de madera necesita menos energía total – y en particular, menos energía fósil, que la mayoría de los materiales alternativos como acero, hormigón o albañería (John et al., 2009).

- Evita las emisiones de gases debidos a la producción de cemento. La emisión de CO₂ es inherente a la producción de cemento, debido a las reacciones químicas durante la transformación de la materia prima.
- Almacena carbono en los bosques. El ciclo de vida de los productos de madera empieza con el crecimiento de los árboles, y es por eso que se debe tomar en cuenta la circulación del carbono en el ecosistema de los bosques para entender el impacto del uso de la madera. Los árboles limpian el aire absorbiendo dióxido de carbono (CO₂), luego liberando el oxígeno (O₂), utilizando el carbono (C) para producir azúcares para su crecimiento, incorporándolo a sus hojas, ramas, tallos leñosos sólidos y suelo circundante, conservándolo en vez de emitirlo al medio ambiente. Si un bosque está manejado de manera sustentable – lo que es el caso general en Chile - después de una rotación completa de

silvicultura, la cantidad de carbono en la biomasa del bosque permanece igual.

- Los productos de madera siguen almacenando gran parte de este carbono, que se mantiene fuera de la atmósfera durante la vida útil del producto, incluso más tiempo si la madera se recupera y se utiliza en otros lugares. La madera es aproximadamente 50 por ciento de carbono en peso seco.

- Los residuos forestales y de molinos y otras biomásas leñosas son comúnmente utilizados por la industria forestal como una fuente limpia de bioenergía renovable, reduciendo aún más las emisiones de carbono fósil. El CO₂ emitido durante la combustión directa de biocombustibles producidos de forma sostenible se equilibra con la utilización de CO₂ en el crecimiento de los bosques.

CÓMO LLEGAR A UN IMPACTO POSITIVO

Algunos estudios parecen ir en contra de estos argumentos sobre el impacto positivo de la madera en las emisiones de carbono en la atmósfera.

Primero, se afirma que la industria forestal es muy contaminante, tanto que en el estado estadounidense de Oregon, sería la primera fuente de contaminación (Segerstrom, 2018). Además, la idea muy atractiva según la cual el carbono secuestrado por los bosques permanece en los productos de madera sería falsa: sólo entre el 15% y el 38% del carbono almacenado en el árbol estaría realmente secuestrado. Eso significaría que entre el 62% y el 85% del carbono se libera inmediatamente del proceso de extracción y producción (Cowin, 2018).

Aunque la industria forestal, como toda industria, si emite gases invernadero, y la totalidad del carbono secuestrado en los árboles no termina completamente dentro de los productos de madera usados en la construcción, estas alegaciones olvidan tomar en cuenta la totalidad del proceso de la construcción de madera, y con ello los beneficios de no usar estructuras de hormigón o de acero, que tienen huellas de carbono considerablemente altas.

Los bosques gestionados para la manufactura de madera son más sustentables y secuestran más carbono que **los bosques “viejos” que no están** gestionados (Eriksson et al., 2007). Varios estudios han demostrado (Robertson et al., 2012) que el impacto global de la madera es menor que el de otros tipos de materiales en la construcción, y que la madera secuestra más carbono que lo necesario para su manufactura (Lippke et al., 2009).

Esto resulta importante para un desarrollo urbano sustentable, ya que en la actualidad en las ciudades la captura de CO₂ por medio de elementos vegetales es mínima o inexistente, especialmente en comparación con las emisiones de CO₂ de las construcciones que hacen uso de estos espacios. Es por esto que la madera tiene un potencial fundamental, ya que al construir en dichos espacios en este material se aprovecha la superficie de la ciudad para almacenar el carbono capturado por la madera durante toda la vida útil del edificio. Por ejemplo, un edificio residencial de mediana altura estructurado con madera laminada contiene hasta 186 kgC/m² en la estructura principal, lo cual representa una cantidad superior a la

biomasa natural de bosques sobre un suelo de mayor densidad de carbono (52 kgC/m^2 típico de la eco-región de la cordillera costera hacia el océano pacífico de Norte América). Así, los bosques permiten la captura de CO_2 durante el crecimiento de los árboles, para que estos luego sean extraídos y utilizados como materiales de construcción, almacenando dicho carbono en ciudades mientras las superficies de bosque donde crecieron dichos árboles pueden a ser utilizadas nuevamente para la plantación de árboles y continuar con la captura de CO_2 . De esta manera, el diseño de edificios de materiales de origen biológico presenta la oportunidad de desarrollar centros urbanos como sumideros de carbono, compensando emisiones futuras de gases de efecto invernadero (Churkina et al., 2020). Este efecto es potenciable si los proyectos diseñados son de alta durabilidad en el tiempo y si además consideran la reutilización de sus materiales, ya que el reproceso, reciclaje, degradación, quema u otras acciones sobre estos materiales pueden liberar, parcial o totalmente, el carbono contenido dentro de estos nuevamente a la atmósfera.

Además, tal como señala Skullestad en su investigación sobre comparaciones de análisis de ciclo de vida de distintos sistemas estructurales, hay que considerar que:

“Dentro de un ciclo de vida de un edificio cualquiera, se espera que la relación entre las externalidades asociadas a la construcción y operación, se encuentren en una relación de 20 y 80% **respectivamente**” (Skullestad et al., 2016).

Esto significa que el uso de un edificio, una vez ya finalizada la construcción, es muy importante en términos de energía y emisiones de gases. Este impacto puede ser reducido gracias un buen diseño. Así, estudios realizados por la universidad de Cambridge, declaran que un edificio que utilice materiales renovables y reducidos en uso de energía como la madera, de considerar todo su ciclo de vida, puede tener entre un 34 y 84% menor impacto en el cambio climático que sus pares en hormigón (Skullestad et al., 2016).

CONCLUSIONES

La madera es entonces un material sustentable, sin embargo, la construcción utilizando a este material también tiene que ser sustentable, y para optimizar al máximo dicho rasgo, es necesario asegurar el ciclo de vida completo de esta, desde la extracción del material de bosques certificados por su manejo sustentable, siguiendo por la preparación de la madera para aprovechar cada una de sus propiedades y protegerla de cada uno de los factores externos que podrían afectarle negativamente, hasta la operación y mantenimiento del edificio. Estas consideraciones del periodo de uso de la edificación deben tenerse en cuenta en la fase de diseño -que será descrito en detalle en los capítulos siguientes-, influyendo positivamente en la economía de la obra en el largo plazo, para finalizar, en caso de demolición, con la reutilización o reciclaje de la mayoría del material utilizado. Es por esto que es fundamental que, al decidir sobre la calidad de los elementos y accesorios que se especificarán para una estructura de nuevo diseño, un diseñador debe elegir entre artículos que tienen costos iniciales relativamente más altos, apostando por un edificio eficiente con menores gastos de energía y bajos requisitos de mantenimiento continuo; o por artículos de costos menores, pero que pueden tener un impacto aún mayor en requisitos de operación y mantenimiento más costosos (Fritz, 2004).

El mantenimiento de un edificio de madera, a tratar en un capítulo específico más adelante, en resumen considera la siguiente lista de ítems (Wood Solutions, 2015):

- Inspección y reparación de terminaciones, recubrimientos, y acabados externos e internos.
- Limpieza: La suciedad, el moho, etc., atrapan la humedad, y aumentan el potencial de descomposición.
- Envolvente del edificio: Revisión de revestimientos, material de techumbre o cubierta, y protección general a intemperie.
- Protección contra termitas: Cualquier signo de presencia de termitas requiere de inspección e intervención dependiendo del tipo de termita y el nivel de daños.
- Ventilación: Se requiere de la revisión y limpieza de ventilaciones si estas se encuentran bloqueadas o con elementos que impidan su funcionamiento.
- Barreras de vapor: Requieren de chequeos de su integridad. Pueden ser reparadas o remplazadas en caso de ser necesario.
- Conectores metálicos: Pueden necesitar apriete de elementos de fijación, o reparación de corrosión.
- Instalaciones sanitarias: Fugas pueden aumentar la humedad en una zona, y con ello acelerar la descomposición de elementos de madera.
- Putrefacción: Se tiene que reparar o reemplazar cualquier elemento tan pronto como se note cualquier descomposición.
- Sellado de las caras de los extremos de piezas de madera: Requerido principalmente en obras como puentes, muelles, y postes que se encuentren en contacto con el suelo.

III. CÓMO SE PREPARA LA MADERA PARA LA CONSTRUCCIÓN

¿POR QUÉ LA MADERA NECESITA PREPARACIÓN?

Un edificio de madera correctamente diseñado, especificado y ejecutado, lógicamente será más fácil de mantener, y para ello, lo primero con lo que tiene que contar es la preparación adecuada de la madera, tanto como para cumplir con las normas asociadas a esta como material constructivo, como para el máximo aprovechamiento de sus cualidades.

En este capítulo se tratarán todas las variables y pasos que entran en acción para

calificar a un elemento de madera de pino radiata (pino insigne) como madera aserrada estructural, y por qué estas exigencias son necesarias. Para esto se abordan las exigencias de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (O.G.U.C) junto a todas las normas chilenas especificadas en esta para cumplir con esas exigencias.

PREPARACIÓN DE LA MADERA DIMENSIONAMIENTO

La madera comercial de pino radiata en Chile es estandarizada por medio de la normativa chilena titulada: Maderas – Pino radiata – unidades, dimensiones y tolerancias (NCh 2824), donde se establecen las medidas y sus respectivos métodos de medición para 3 tipos de elemento: madera verde (humedad entre 20 y 30%), madera seca y madera cepillada seca (humedad igual o inferior al 19%). Estas medidas consideran la dimensión nominal (ancho por espesor) y el largo de la

pieza, y consideran un margen de tolerancia de acuerdo al porcentaje de humedad de cada uno de los tipos.

Además, esta norma incluye una tabla (Tabla 1) donde se correlacionan las dimensiones que esta misma establece con las denominaciones comerciales (DC) usadas en Chile, las cuales hacen uso de la pulgada para el espesor y ancho de las piezas, y para los volúmenes de madera utilizan las pulgadas madereras (INN-CHILE, 2003).

DN (mm)	13	19	25	38	50	63	75	88	100	125	150	175	200	225	250
Aserrado verde	11	18	22	38	48	60	73	86	98	123	148	173	200	223	248
Aserrado seco	10	17	21	36	45	57	69	82	94	118	142	166	190	214	235
Cepillado seco	8	14	19	33	41	53	65	78	90	114	138	162	185	210	230
DC (adimensional)	1/2	3/4	1	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4	5	6	7	8	9	10

Tabla 1 Equivalencia entre dimensiones nominales y denominación comercial (INN-CHILE, 2003)

SECADO

La madera, como fue señalado en el primer capítulo, como material higroscópico, busca ajustar su porcentaje de humedad de equilibrio interior en base a la humedad relativa y temperatura del lugar donde esta se encuentra, y es por esto que, en las construcciones en madera, la O.G.U.C. establece que las piezas de madera con fines estructurales deben ser secadas a un porcentaje de humedad interior específico de acuerdo a su futura condición de servicio (Tabla 2), determinado por la zona climático-habitacional en la cual será instalada (MINVU, 2018a), de acuerdo a lo establecido en la norma chilena de título: Arquitectura y construcción – Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico (NCH 1079).

Esto es necesario puesto que, la madera al ajustar su porcentaje de humedad puede comprometer la integridad de la pieza o la del sistema estructural del cual forma parte, ya que corre el riesgo de presentar cambios dimensionales que pueden producir hinchamiento, contracción, torsión, alabeos de la pieza y fisuras, entre otras fallas, y además, en el caso particular de aumentar su porcentaje de humedad, puede reducir

algunas de sus propiedades estructurales como dureza, resistencia al corte y módulo de elasticidad. Es por esto que también es necesario contar con un almacenamiento apropiado de las piezas de madera durante la construcción, evitando en lo posible la alteración de su la humedad en su interior.

El secado de madera se realiza al interior de hornos especiales que ajustan en su interior la humedad, temperatura y presión. Un mal secado puede resultar en distintas fallas de la pieza como decoloración, fisuramiento, torsiones, curvatura, etc.

ZONA CLIMÁTICO-HABITACIONAL	HUMEDAD PERMITIDA	
	MÍNIMA %	MÁXIMA %
Norte litoral	11	18
Norte desértica	5	9
Norte valle transversal	11	16
Central litoral	11	17
Central interior	9	20
Sur litoral	12	22
Sur interior	12	22
Sur extremo	11	22

Tabla 2 Porcentaje de humedad permitida en la madera estructural de acuerdo a zona climática-habitacional (INN-CHILE, 2010)

PROTECCIÓN DEL MATERIAL

Como fue señalado en el capítulo 1, en la industria de la construcción se hace uso principalmente de maderas blandas, debido a la regularidad de su estructura celular interna. Sin embargo, estas son más propensas que las maderas duras al deterioro si se encuentran expuestas a la intemperie, bacterias, insectos, hongos u horadores marinos, por lo que requieren de protección adicional con elementos preservantes. Si bien el duramen de estas especies es la sección más durable del tronco de forma natural, en las maderas blandas este no es lo suficientemente resistente para ser durable por sí solo y, además, la alta presencia de lignina en su interior hace más dificultosa su impregnación. Es por esto que, en lugar de utilizar duramen para la elaboración de piezas de madera aserrada, se hace uso de la albura, ya que esta no tiene un interior fuertemente lignificado y sigue presentando la densidad y regularidad estructural interna adecuadas para facilitar su impregnación.

Para proteger a la madera de estos y otros agentes, lo más común hoy en día es el trabajo con compuestos químicos, generalmente de metales o metaloides en una solución en base a agua, los cuales al ser impregnados en la madera le otorgan propiedades fungicidas, pesticidas y/o de mayor resistencia a la humedad, extendiendo sobrevida del material. En estos tipos de compuestos es frecuente encontrar productos con arsénico, boro, cromo, zinc, cobre entre otros (Schiopu & Tiruta-Barna, 2012).

De acuerdo a la tabla del punto 3 del artículo 5.6.8 del capítulo 6 de la O.G.U.C, las

distintas maderas normadas en Chile son categorizadas en 5 tipos según su durabilidad (MINVU, 2018a), de acuerdo a lo establecido en la norma chilena: Maderas - Parte 1: Clasificación de maderas comerciales por su durabilidad natural (NCh 789/1), en la cual el pino radiata, la especie de madera más utilizada como elemento estructural en Chile, es considerado dentro del grupo 5: maderas no durables (Tabla 3)

CATEGORÍA	MADERA NOMBRE COMÚN
1. Muy durables	Alerce Ciprés de las Guaitecas Roble
2. Durables	Lenga Lingue Raulí
3. Moderadamente durables	Canelo Coigüe Tineo Ulmo
4. Poco durables	Araucaria Eucalipto Mañío hembra Mañío macho
5. No durables	Álamo Olivillo Pino insigne Tepa

Tabla 3 Categorías de especies de madera en Chile según durabilidad (INN-CHILE, 1987)

En base a esta tabla, se establece que las especies calificadas como no durables sólo pueden ser utilizadas para la construcción si son preservadas (MINVU, 2018a), mientras se sigan las exigencias de la norma chilena Madera Preservada - Pino Radiata - Clasificación según riesgo de deterioro en servicio y muestreo (NCh 819). Para esto, la norma señalada establece que el tipo de preservación de cada elemento depende directamente de la condición de riesgo bajo la cual este se encuentre (fig.4) (INN-CHILE, 2012).

Nivel de riesgo de deterioro	Condición de uso	Agente biológico de deterioro (ingreso y ataque)
Riesgo 1 (R1)	Uso en interiores, sobre el nivel del suelo y ambientes secos.	Insectos, incluida la termita subterránea.
Riesgo 2 (R2)	Uso en interiores, sobre el nivel del suelo, con posibilidad de adquirir humedad, ambientes mal ventilados.	Hongos de pudrición e insectos, incluida la termita subterránea.
Riesgo 3 (R3)	Uso en exteriores o interiores, exposición a las condiciones climáticas.	Hongos de pudrición e insectos, incluida la termita subterránea.
Riesgo 4 (R4)	Uso en exteriores o interiores, en contacto con el suelo, con posibilidades de contacto esporádico con agua dulce.	Hongos de pudrición e insectos, incluida la termita subterránea.
Riesgo 5 (R5)	Uso en exteriores o interiores, en contacto con el suelo, componentes estructurales críticos, contacto con agua dulce.	Hongos de pudrición e insectos, incluida la termita subterránea.
Riesgo 6 (R6)	Uso en contacto con agua marina.	Horadores marinos, hongos de pudrición e insectos, incluida la termita subterránea.

Tabla 4 Clasificación de riesgo según uso y agente biológico de deterioro (INN-CHILE, 2012)

Con el grupo de riesgo de la pieza ya determinado, esta se puede impregnar con los preservantes especificados dentro de la misma norma, cumpliendo con la retención

mínima de kilogramos de ingrediente activo por metro cúbico de madera a tratar, de acuerdo a dicho grupo de riesgo (fig.5) (INN-CHILE, 2012).

Riesgo	ACQ (kg/m ³)	B ₂ O ₃ (SBX) (kg/m ³)	BS (kg/m ³)	CA-B (kg/m ³)	CCA (kg/m ³)	Creosota (kg/m ³)	LFF (kg/m ³)	LOSP (Permetrina) (kg/m ³)	LOSP (Permetrina más tebuconazol más propiconazol) (kg/m ³)	Permetrina más TBTN (kg/m ³)	MCA _z (kg/m ³)	μCA-C (kg/m ³)
1	4,0	4,4	11,2	1,7	4,0	No se debe usar	34	0,086	0,086	0,086 + No se especifica	1,0	0,8
2	4,0	4,4	11,2	1,7	4,0	No se debe usar	34	No se debe usar	0,086/0,2	0,086 + 0,34	1,0	0,8
3	4,0	No se debe usar	11,2	1,7	4,0	No se debe usar en ambiente interior 128 – 400	42	No se debe usar	0,086/0,26	0,086 + 0,34	1,0	0,8
4	6,4	No se debe usar	No se debe usar	3,3	6,4	128	51	No se debe usar	No se debe usar	No se debe usar	2,4	2,2
5	9,6	No se debe usar	No se debe usar	5,5	9,6	192	55	No se debe usar	No se debe usar	No se debe usar	3,7	3,6
6* Zona de ensayo exterior	No se debe usar	No se debe usar	No se debe usar	No se debe usar	24 ó 40	400	No se debe usar	No se debe usar	No se debe usar	No se debe usar	No se debe usar	No se debe usar
6* Zona de ensayo interior	No se debe usar	No se debe usar	No se debe usar	No se debe usar	14 ó 24	400	No se debe usar	No se debe usar	No se debe usar	No se debe usar	No se debe usar	No se debe usar

Tabla 5 Retención mínima de ingrediente activo del preservante según nivel de riesgo de deterioro de la madera (INN-CHILE, 2012)

Es importante señalar que, si las piezas de madera obtenidas son del duramen, o tienen parte de su sección en la albura y otra en el duramen, dado que este último es más impermeable por sus altas cantidades de lignina y resina, se requiere de consideraciones especiales dependiendo del tipo de ingrediente activo a utilizar, establecido en cada una de las tablas de estos en la NCh819.

Para la retención del ingrediente activo, los elementos de madera dimensionados son insertados en una cámara llamada autoclave, en la cual, luego de introducir la madera, se extrae el aire de la cámara y se inunda con la solución del preservante, para luego inyectar más líquido dentro de la cámara, el cual aumenta la presión interior y fuerza a la primera solución, al no tener más espacio donde desplazarse, a penetrar en la madera. Dado que este compuesto se infiltra en la madera por medio de una solución en base a agua, el porcentaje de humedad de las piezas de madera aumenta, por lo que se requiere de un secado posterior, donde se reduce la cantidad de agua en su interior, mientras que se conservan los otros elementos de la solución. La adición de estos elementos por lo general puede generar una reducción de la resistencia al impacto y a flexión dinámica de las piezas, pero en una baja magnitud. Sin embargo, para una condición de riesgo tipo 6, donde la pieza está en directo contacto con agua marina, debido a la gran cantidad de preservante que necesita retener, este sí afecta a las capacidades estructurales de la pieza, reduciendo su resistencia en flexión en un 10% o más (INN-CHILE, 2014).

Es importante señalar en estos casos que, cuando se requiere una mayor cantidad de elemento activo, esto significa también un aumento de la cantidad de agua, lo cual al

analizar la tabla se puede observar que, por ejemplo, soluciones como la del micronizado de cobre (MCA_2 o $\mu CA \cdot C$), que suelen ser consideradas más costosas, requieren una cantidad inferior de solución para un mismo tipo de riesgo que la del arseniato de cobre cromado (CCA), y por consiguiente, se contrapesa parte de su costo y, además, esto permite que requieran de un secado de menor magnitud.

Una vez terminado este proceso de impregnado, es necesario almacenar la madera en un espacio cerrado y libre de humedad, para que el preservante pueda fijarse en su totalidad dentro de esta, siendo 7 días para la época de verano y 15 días para el invierno, ya que si las piezas son puestas en servicio inmediatamente corren el riesgo que, al no tener el preservativo 100% fijado, este puede lixiviarse, es decir, ser extraído de la madera por su disolución bajo la acción de agua, generalmente por fuertes lluvias o contacto directo con esta.

Para la producción de piezas impregnadas, es común la práctica del doble secado, puesto que, para su impregnación, la madera requiere antes ya haber sido secada. Esto porque una vez que la madera pasó por dicho proceso, se producen las fisuras posibles que puede tener la pieza, permitiendo entonces que, al impregnar la pieza, el preservante pueda adentrarse también en las fisuras. Si se secura solo una vez después de la impregnación, dado que el preservativo no puede adentrarse al 100% hacia el interior de la pieza, al secarla se abrirían estas mismas fisuras y quedaría expuesto el interior de la pieza a través de estas (Forest Products Laboratory, 2015).

Hoy en día, en muchos países, la durabilidad de la madera ya no es sinónimo de preservación química sistemática. Sin embargo, existen aún diferencias entre los

países. Por ejemplo, aunque exista una norma europea (EN 1995 - Eurocode 5: Design of Timber Structures, 2004), cada país de la Unión Europea tiene normas adicionales, que precisan aún más dicha norma. En Alemania, la norma del Instituto Alemán de Estandarización titulada Wood preservation - Part 3: Preventive protection of wood with wood preservatives (DIN68800-3) especifica que se debe evitar el uso de preservantes químicos en la madera, y que se debe justificar las razones del uso de estos (DIN 68800-3, 2012, p. 68800), incentivando el uso de medidas preventivas por diseño. Sin embargo, en Francia e Inglaterra, países vecinos a Alemania, es imprescindible el uso de preservantes químicos a menos que se pueda justificar de la durabilidad natural de la madera (Code de La Construction et de l'habitation. | Legifrance, 2020).

Hoy en día el CCA se encuentra regulado en varios países del mundo, donde en casos como el de Japón o la Unión Europea este es prohibido, o en Estados Unidos donde su uso es restringido en programas residenciales o exteriores donde haya contacto con el ser humano (Henke, 2009). Esto porque investigaciones han demostrado que la exposición al arsénico y al cromo pueden ser responsables de dañar la laringe, sistema nervioso, e incluso cáncer a la piel, hígado y riñón, entre otros síntomas (Coudert et al., 2013). La exposición a estos puede darse por:

- La manipulación y aserrado de la madera puede producir la liberación de aserrín o material particulado, el cual puede ser transportado en la ropa, respirado si no se usa mascarilla, o entrar en contacto con ojos si no se usan antiparras y guantes.

- La eventual lixiviación de dichos elementos en el tiempo por medio de la acción de agua.
- Quema no controlada de la madera sin uso de hornos especializados, liberando los elementos químicos por medio de las cenizas y el humo.

Es por estos motivos que es recomendable utilizar otros preservantes en cantidades equivalentes a los de CCA para un determinado tipo de riesgo, de acuerdo a la tabla 3 de la NCh 819. Si se decide utilizar CCA, deben tomarse todas las precauciones necesarias para evitar la exposición.

Si bien el cobre puede llegar a ser tóxico, solo lo es en el caso de grandes cantidades, por lo que hoy en día es visto como uno de los elementos mejor posicionados para la impregnación de madera. Otro elemento que destaca como una alternativa menos nociva es el boro, ya que es muy efectivo contra el deterioro natural de la madera, las termitas y otros insectos, sin embargo, piezas de madera tratadas con este preservante también pueden verse fuertemente afectadas por la lixiviación, por lo que debe evitarse el contacto de la pieza con la tierra, y su exposición a agua, lluvia o humedad (Forest Products Laboratory, 2015).

Dado el recurso importante de pino radiata en Chile, y las ventajas técnicas y ecológicas relacionadas con el uso de la madera en la construcción, un tratamiento de preservación que garantiza un rendimiento a largo plazo solo puede mejorar la competitividad de la madera. Por esa razón no se debe estigmatizar negativamente el uso de preservantes químicos en la construcción de madera, pero considerarlo como una ayuda

complementaria a otras medidas de prevención.

Además, existen otros procesos de protección para la madera (no normados en la NCh819), como los de tratamiento superficial y los de alteración química de la estructura natural de la madera. Los primeros pueden penetrar solo parcialmente la madera, por lo que requieren de mantenimientos periódicos, mientras que los químicos al alterar directamente la estructura interior tienen mayor duración y no requieren de mantenimiento, similar a los procesos de impregnación al vacío. Entre los procesos químicos se encuentran algunos tales como:

- **Vitrificado:** Se realiza mediante la encapsulación de las fibras de la madera con una fórmula de silicatos de sodio, y permite su uso en contacto permanente con el suelo o agua (Schiopu & Tiruta-Barna, 2012).
- **Acetilado:** Este proceso se basa en que la degradación de la madera se puede dar por el ataque de enzimas a los hidroxilos libres que contienen sus macromoléculas de celulosa y hemicelulosa. Entonces, para prevenir esta degradación, se trabaja mediante la saturación de los hidroxilos libres rellenando los espacios intramoleculares con grupos acetilos, sellándolos, y de esta forma, protegiéndolos del ingreso de agua y ataque de enzimas de los hongos de pudrición (Garay M & Henríquez A, 2012).
- **Termo tratado:** Este proceso, al igual que la impregnación al vacío, ocupa una máquina autoclave, con la cual se somete a la madera en su interior a alta presión y temperaturas (180-230°C), en conjunto con nitrógeno o vapor de agua

durante 24 a 48 horas. Este proceso incrementa la dureza, estabilidad dimensional y durabilidad de la madera tratada, sin embargo, altera sus propiedades mecánicas y su estética, por lo que no se considera su uso como elemento estructural, siendo más comúnmente utilizada como revestimiento, pavimento, muebles o ventanas (Schiopu & Tiruta-Barna, 2012).

CALIFICACIÓN ESTRUCTURAL

Considerando el enfoque de esta guía, cuyo eje es la construcción en madera incluyendo la estructura, es fundamental que los elementos de madera aserrada utilizados cuenten con un estándar certificado de su desempeño estructural, es decir, que todos estos tengan las mismas propiedades mecánicas necesarias para permitir el cálculo de la estructura, de acuerdo a la Norma Chilena Madera - Construcciones en madera - Cálculo (NCh1198). Para esto se debe considerar una muestra representativa del material producido, que se encuentre seca, y según sea el caso, que ya se encuentre impregnada. Para la definición de este estándar estructural, en Chile se puede realizar una calificación con 2 métodos diferentes:

Calificación Visual:

Consiste en el análisis y control visual de una pieza de madera seca (contenido de humedad inferior a 19%), y se rige por la Norma Chilena de título Pino radiata - Clasificación visual para uso estructural - Especificaciones de los grados de calidad (NCh1207). Para este tipo de calificación, se determina en una pieza el tramo con la mayor cantidad de elementos o características debilitantes tales como nudos, fisuras, defectos en las aristas,

presencia de bolsillos de resina, entre otras. Con este sector de la pieza ya elegido, el revisor realiza un análisis de la geometría visible de las distintas fallas y de la proyección de estas hacia el interior de la pieza. De esta forma se determina si el elemento es de grado estructural selecto (GS), grado estructural 1 (G1) o grado estructural 2 (G2). Una vez clasificada la pieza, esta debe ser marcada con un timbre o etiqueta donde se indique a lo menos: la empresa que produjo la pieza, el grado de la pieza, el organismo que realizó la calificación, y la mención a la NCH1207 (INN-CHILE, 2005).

Calificación Mecánica:

Con esto en mente, los procesos de clasificación estructural mecánica consisten en el ensayo de pieza de madera representativa de una producción, siendo sometida en una de sus caras, a modo de viga, a cargas de flexión mediante la aplicación de fuerzas con el uso de una máquina, la cual mide la magnitud de dichas fuerzas, las que se asocian con la deformación constante producida en la pieza, con lo que determina el valor del módulo de elasticidad en flexión de la pieza, y con ello los valores de las propiedades mecánicas como tensiones admisibles de compresión y tracción paralela, compresión normal y cizalle (Fritz, 2004).

Estos ensayos están normados por la norma del British Standards Institution titulada Structural timber. Grading. Requirements for machine strength graded timber and grading machines; o por la norma del Australian y New Zealand Standards de título Timber - Stress-graded - Product requirements for mechanically stress-graded timber (AU/NZS 1748:1997). En la primera norma se especifican la metodología del uso de las máquinas, el análisis de los datos arrojados con estas, y las calificaciones estructurales correspondientes de acuerdo a las propiedades mecánicas de la muestra analizada (fig. 6), determinando la calidad estructural como C16 o C24; y en la segunda se especifican las propiedades estructurales para las calificaciones MGP (machine graded pine). En ambas formas es necesaria una inspección visual de esta para la revisión de características que no son percibidas por la máquina, como el tamaño y profundidad de fisuras de la pieza (BSI, 1998; Standards Australia, 1998). Dado que la calificación mecánica en Chile se basa en estas normas extranjeras, las piezas calificadas por este medio son más factibles para su exportación.

Las propiedades mecánicas de cada tipo de calificación se pueden observar en la siguiente tabla de la NCh1198:

Grado Estructural	Tensiones admisibles de:					Módulo de elasticidad en flexión	Índice de aplastamiento en compresión normal
	Flexión ¹⁾	Compresión paralela	Tracción paralela ¹⁾	Compresión normal	Cizalle		
	F_t MPa	F_{cp} MPa	F_{tp} MPa	F_{cn} MPa	F_{cz} MPa		
a) Visuales							
GS	11,1	8,5	6,0	2,5	1,1	10500	5,65
G1	7,5	7,5	5,0	2,5	1,1	10000	
G1 y mejor	9,5	7,8	5,5	2,5	1,1	10100	
G2	5,4	6,5	4,0	2,5	1,1	8900	
b) Mecánicos							
C24	9,3	8,0	4,7	2,5	1,1	10200	5,65
C16	5,2	7,5	3,5	2,5	1,1	7900	
MGP 10	8,4	10	4,0	2,5	1,3	10000	
MGP 12	13,5	15,5	6,0	2,5	1,3	12700	
1) Valores aplicables sobre piezas de altura de sección transversal ≤ 90 mm, excepto en los Grados mecánicos MGP 10 y MGP 12, para los que el límite incrementa a 160 mm.							
2) Valores aplicables sobre piezas de altura de sección transversal ≥ 180 mm excepto en los Grados Mecánicos MGP 10 y MGP 12, cuyos valores son aplicables sobre cualquier altura de sección transversal. El módulo de elasticidad característico inherente al percentil del 5%, E_{fk} , se puede estimar como 0,60 E_f .							

Tabla 6 Propiedades mecánicas de la madera según grado estructural (INN-CHILE, 2014)

ROTULADO

El estudio del INFOR sobre “El mercado de la Madera Aserrada para Uso Estructural en Chile”, publicado en el primer semestre del año 2020, expone que hoy en día en Chile la preparación de la madera para la construcción presenta grandes desafíos, ya que, como veremos a continuación, una muestra considerable de aserraderos y empresas del sector de la construcción desconoce, no aplica, o no certifica los procedimientos necesarios para la preparación de la madera estructural.

El mercado de la madera aserrada con fines estructurales se encuentra en torno a los 500.000 m³ al año, de los cuales se estima que solo 20.000 m³ son clasificados como estructurales por laboratorios. De todos los aserraderos entrevistados en dicho estudio, el 46,5% asegura conocer los requisitos normativos para que una madera pueda ser clasificada como madera aserrada estructural, a la vez que el 31% del total de

los entrevistados asegura producir madera aserrada estructural certificada (Gysling et al., 2020).

El mercado de la madera aserrada en Chile es protagonizado por el pino radiata, el cual representa un 96,8% de la producción nacional, seguido por otras especies exóticas con un 1,9% y otras especies nativas con un 1,3%. El pino radiata al corresponder a una madera de categoría no durable, tal como fue señalado anteriormente, requiere por norma estar preservado y, sin embargo, solo el 3,4% de la producción nacional de pino radiata estructural cumple con esto (Gysling et al., 2020).

Por otra parte, en el mismo informe Gysling expone que:

“De las empresas que consumen madera aserrada, el 92% declara haberla especificado seca, y el 37% declara haberla usado impregnada”, y de las productoras solo el 11,6% dice haber

“**recibido solicitudes** de compra para madera aserrada estructural clasificada de pino radiata, que contara con un certificado de algún laboratorio **acreditado**” (Gysling et al., 2020).

Por esto, dicho estudio estima que solo un 0,25% de la producción del año 2018 fue vendido con un certificado de este tipo. Entre los aserraderos entrevistados solo el 45,7% manifestó interés en producir madera aserrada estructural que cumpla con todos los estándares y normativas para ser calificada como tal (Gysling et al., 2020).

En este escenario, el ministerio de vivienda y urbanismo, en conjunto con el ministerio de economía y el INFOR, ha creado la iniciativa para implementar en Chile un decreto bajo el cual la madera aserrada deberá ser rotulada, similar a sistemas utilizados en otros países (fig. 5).

Para las maderas aserradas estructurales el rotulado a implementar busca que en cada pieza se especifiquen los siguientes ítems (MINVU, 2018b):

- Identificación del proveedor
- País de origen
- Especie
- Terminación: Cepillado o dimensionado
- Dimensión: Denominación comercial, acompañada por dimensión en milímetros y largo en metros

-Contenido de humedad: CH<20%

-Grado estructural: GS, G1, G2, C16, C24, MGP10 o MGP12.

-Preservación: Tipo de preservante y clase de riesgo de acuerdo a la NCH 819

El rotulado para madera estructural debe realizarse pieza a pieza, y debe permitir su adecuada legibilidad y facilidad de acceso, cumpliendo con las siguientes características: situarse a no más de 1 metro de distancia del extremo de la pieza; tener caracteres de tamaño suficiente para su lectura; y la información debe encontrarse distribuida uniformemente, sin destacar una por sobre la otra. Estos rótulos pueden ser hechos por medio de impresión, timbrado o etiqueta adherida (MINVU, 2018b).

Esto tiene por objetivo facilitar la compra y adquisición informada de piezas de madera, asegurando los estándares normativos y de calidad, a la vez que también facilita el control y verificación de los materiales al momento de ingresar a la obra, planta o industrializadora, de acuerdo a los parámetros de la memoria de cálculo y especificaciones técnicas de un proyecto (MINVU, 2018b).



Figura 6 Ejemplos de rotulados de madera (Smulski, 1996) y Prototipo rotulado INFOR (MINVU, 2018b)

CONCLUSIONES

Es importante entender que el pino radiata, la principal madera utilizada para la construcción en Chile, es una madera de categoría no durable y, por lo tanto, debe ser preservada siempre que vaya a ser utilizada para estos usos. A esto se suman las exigencias de dimensionamiento, calificación estructural, requisitos de contenido de humedad, etc. Todos los requisitos normativos mencionados en este capítulo son de carácter obligatorio, por lo que determinan el mínimo que se debe a tener a consideración antes de proyectar una edificación de madera.

Esto resulta particularmente crítico ya que, como se ha visto en las investigaciones del INFOR antes señaladas, este tipo de información de construcción en madera aún no es apropiadamente conocida y

manejada por todos los actores involucrados en los procesos de un proyecto de este tipo, desde los proveedores del material (aserraderos), hasta los profesionales que especifican el material a utilizar en el sistema constructivo.

Hoy en día, teniendo en cuenta el horizonte donde se apunta a la construcción de mediana altura en madera, es fundamental que estos requerimientos sean difundidos a todos los actores involucrados, tanto porque son exigencias normativas como porque contribuyen a la ejecución de mejores proyectos.

Sumado a lo anterior, en el próximo capítulo se abordarán guías de diseño que complementarán a los resguardos que debe tener la madera como material, tanto para incrementar la durabilidad de esta como la de edificaciones donde se utilice.



IV. IMPORTANCIA DE LAS MEDIDAS DE DISEÑO Y PROCESO DE CONSTRUCCIÓN

DISEÑADO PARA SER DURABLE

Con los temas tratados en los capítulos anteriores se dan a conocer las propiedades de la madera, los factores que pueden alterar la vida útil de esta, y cuáles exigencias normativas debe cumplir para poder ser utilizada en la construcción, específicamente del caso chileno. Sin embargo, a pesar que dichas normas para su preparación sean fundamentales para protección de la madera, funcionamiento de la estructura y la correcta ejecución de la obra, es recomendable incorporar en el proceso de diseño y ejecución del proyecto estrategias complementarias para asegurar la durabilidad de una edificación construida en madera durante de su vida útil completa.

Hoy en día múltiples experiencias e investigaciones a nivel internacional exponen que las edificaciones de madera pueden cumplir con creces sus expectativas de vida útil, operación y mantenimiento. Un ejemplo son las guías de diseño de Wood Solutions, donde en la guía número 51, titulada **“Ingeniería de costos”**, se expone:

“La gran mayoría de la madera se utiliza en aplicaciones donde su permanencia es incuestionable. Protegida de la intemperie, la humedad, los insectos y los productos químicos fuertes, la madera ha documentado un rendimiento satisfactorio durante siglos” (Wood Solutions, 2015).

Otro caso es la investigación de Vivian Tam titulada **“Análisis de costos de ciclo de vida de la implementación de edificios verdes utilizando aplicaciones de madera”**, donde concluye que la madera aplicada para fines

estructurales, apropiadamente protegida por revestimientos interiores y la envolvente exterior, no requiere de mantención en todo su ciclo de vida, salvo para los casos extremos donde su integridad estructural se haya visto afectada por termitas.

En la guía de diseño de Wood Solutions sobre Ingeniería de costos, también se expone que actualmente en Australia existen proyectos de mediana altura en madera cuyos requerimientos de mantención resultan similares, o incluso menores, que los de otros edificios de materiales más pesados en las mismas zonas donde estos se emplazan (Wood Solutions, 2019).

La influencia del diseño y detallamiento del proyecto, tanto estructural como arquitectónico, es fundamental para extender la vida útil de los componentes de madera. Esto puede ser logrado siguiendo principios de diseño que, por un costo adicional menor, permitirán crear una diferencia significativa en la esperanza de la vida tanto de los componentes de madera como del edificio en sí mismo, y con ello optimizar sus costos asociados a su operación y mantenimiento (Timber Research and Development Association, 2016).

El objetivo de este capítulo es presentar dichos principios de diseño asociados a la protección de la madera contra variables físicas, químicas y biológicas que puedan alterar, perjudicar, o incluso poner en riesgo a la integridad de una edificación de madera, principalmente enfocado en una estructura tipo marco-plataforma.

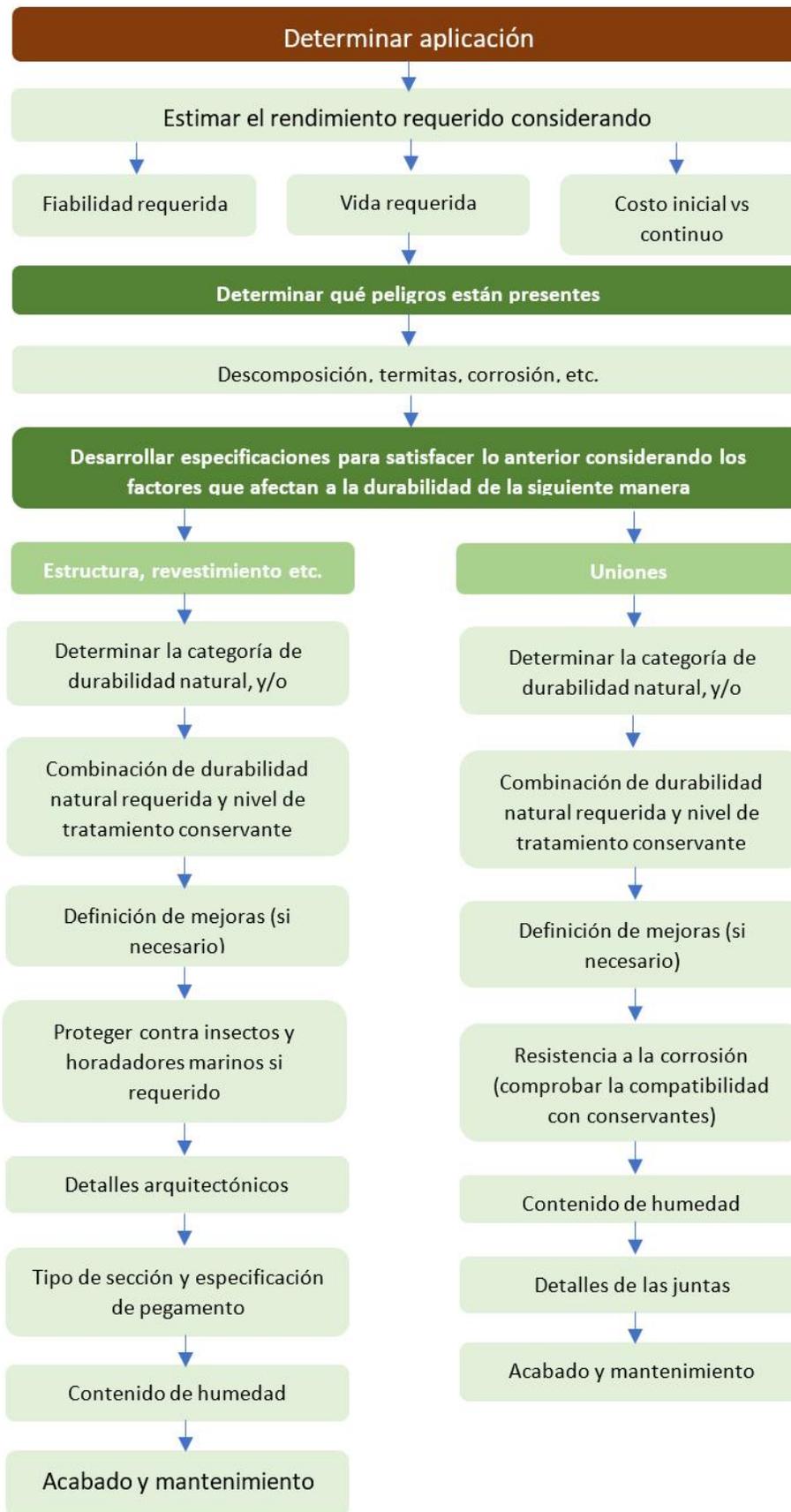


Figura 7 Secuencia lógica para permitir el diseño y la especificación de la durabilidad de las maderas. Redibujado y traducido. (Wood Solutions, 2015)

Antes de presentar dichos principios, es clave tener presentes los requisitos de rendimiento para la durabilidad del proyecto, los cuales deben determinarse o considerarse de manera similar a la requerida para el diseño estructural, es decir (Wood Solutions, 2015):

Consideraciones de diseño:

- Estructura temporal o permanente
- Parte del edificio (envolvente, revestimiento, cubierta, marco estructural, etc.)
- Expectativa de vida útil

Consideraciones de fiabilidad:

- Estructura temporal o permanente
- Nivel de seguridad (pérdida de vidas o lesiones)
- Costo o consecuencia del fracaso
- Parte de la construcción
- Revestimiento
- Estructura

Consideraciones de costos:

- Costos iniciales
- Costos de mantenimiento
- Costos de sustitución de piezas

- Costos incurridos en casos de fallas durante la vida útil

Estas consideraciones permiten la comprensión del edificio y sus partes en su vida útil completa, dando pie a un diseño consciente que no se detiene en el punto en que la obra es terminada, incorporando al proceso de diseño nociones relativas al uso y operación de esta como elementos fundamentales del proyecto para su correcto funcionamiento.

Con los requisitos de rendimiento claros, se deben tomar en cuenta las amenazas para sistema constructivo en madera durante su vida útil, las cuales corresponden a (Wood Solutions, 2015):

- Ataque de hongos
 - en el suelo
 - sobre el suelo
- Ataque de insectos
 - termitas y perforadores
- Corrosión de los sujetadores
- Intemperie
- Horadores marinos
- Degradación química
- Fuego



GUÍAS DE DISEÑO

PROTECCIÓN CONTRA LA HUMEDAD

La humedad, tal como fue señalado anteriormente en el capítulo III, es el principal factor que permite la proliferación de hongos e insectos, la deformación y aparición de fallas en los elementos de entramado, cambios en las propiedades físicas y mecánicas de estos, etc. Por lo tanto, la protección contra la humedad, proveniente tanto del exterior como del interior, constituye el primer y principal factor crítico en el diseño de toda edificación en madera.

Las fuentes de humedad y los mecanismos de transporte que impactan los edificios son numerosos y complejos, por lo que es necesario desarrollar estrategias de control para tratar de manera efectiva a cada una de estas fuentes y mecanismos. Varios estudios recientes han llegado a la conclusión que la principal fuente de ingreso de humedad a un edificio, especialmente en zonas húmedas costeras, es mediante la penetración de aguas lluvias en los muros con al menos una cara expuesta a la intemperie (Canadian Wood Council, 2000).

El ingreso de agua de lluvia en los muros depende de 3 factores:

- Que el agua esté en contacto con superficies de soluciones constructivas de la envolvente del edificio, o que permanezca sobre o dentro de estas.
- Que dicha agua esté cercana a una apertura de la envolvente.
- Que exista una fuerza que mueva al agua a través de esa apertura.

Las fuerzas que mueven al agua responden 4 formas, de las cuales las 2 más predominantes en un edificio de madera son el flujo líquido y la capilaridad. El primero consiste en una fuerza que impulsa al líquido, como lo es la gravedad, la acción del viento o la succión por diferencias de presión. En cambio, la capilaridad consiste en el movimiento del líquido por las fuerzas de tensión superficial de este al estar en contacto con un material poroso. Una variable de esta es la succión capilar, la cual ocurre cuando el líquido entra en contacto con un espacio pequeño creado entre dos materiales, haciendo que el líquido avance por dicho espacio.

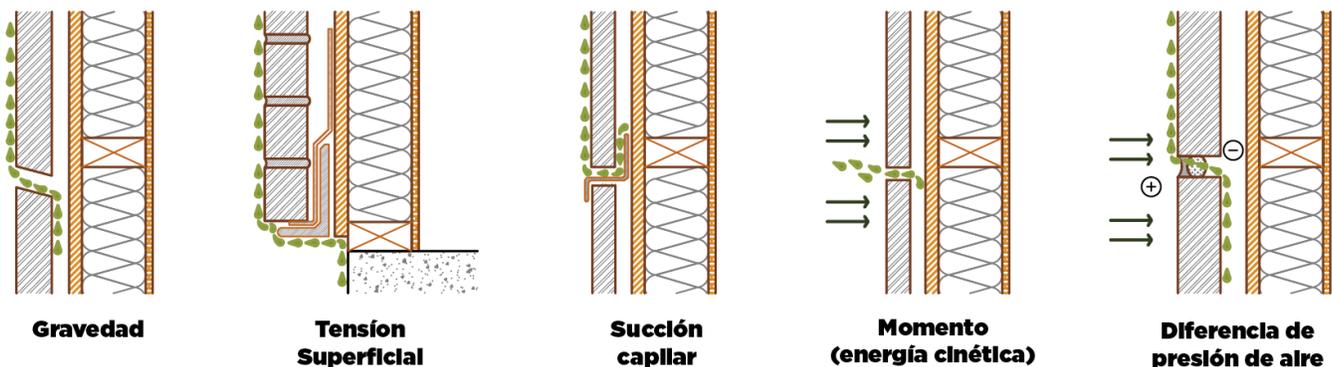


Figura 8 Motores de la penetración de aguas lluvias (Canadian Wood Council, 2000)

En un segundo orden, y no por eso menos importante, está el ingreso de humedad al interior del muro mediante penetración de vapor. Esta se da por dos razones (Canadian Wood Council, 2000):

- Difusión de vapor: Corresponde al movimiento de vapor de agua a través de los elementos del muro, resultante de un diferencial de presión de aire entre las dos caras de este.
- Fugas de aire: Estas ocurren por el movimiento de aire húmedo a través de terminaciones en el muro que no se encuentren apropiadamente selladas.

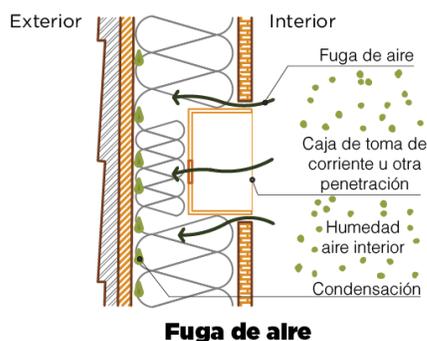
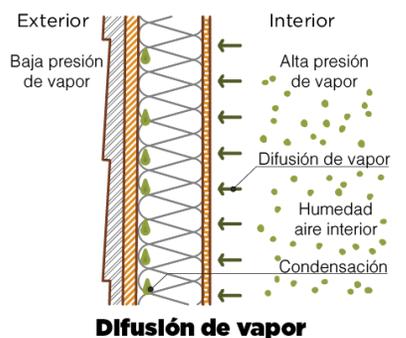


Figura 9 Penetración de agua desde el interior. Redibujado. (Canadian Wood Council, 2000)

El principio de redundancia

Para la gestión eficaz del control del ingreso de agua desde el exterior hacia la estructura se recomienda el uso de la estrategia de redundancia, la cual consiste en múltiples líneas de defensa de distinto funcionamiento pero que comparten este mismo objetivo. Con este principio se reconocen las limitaciones inherentes y

posibles fallas o errores de los procesos de diseño y construcción, y por tanto la imposibilidad de proteger a la madera mediante una estrategia puntual. De esta manera, la redundancia busca otorgar capas adicionales de protección frente al ingreso de la humedad en caso que se den esos errores o fallas, evitando impactos significativos en el rendimiento de la envolvente (Canadian Wood Council, 2000).

Estas líneas de defensa corresponde a las siguientes cuatro estrategias de diseño (CMHC Canada Mortgage and Housing Corporation, 2002) (Canadian Wood Council, 2000):

1) Desviación (Deflection):

Corresponde a la primera línea de defensa, a modo de una barrera física que impide el ingreso de agua de lluvia hacia el interior del edificio. Consiste en estrategias que eviten al máximo posible que el agua de lluvia entre en contacto con la fachada del edificio, minimizando las posibilidades para que esta penetre la envolvente. Este principio es evidente en muchos patrones de diseño de edificios que históricamente han demostrado ser eficaces para reducir la cantidad de agua de lluvia en las paredes exteriores. Estos incluyen (Canadian Wood Council, 2000):

- a) Emplazamiento y orientación del edificio para que esté protegido de los vientos predominantes.
- b) Uso de voladizos de techo de tamaños considerables y dispositivos de recolección de agua en la parte superior de las paredes exteriores.
- c) Los revestimientos de techo y muro que permitan el desplazamiento del agua para no introducirse al interior de los muros y techos.

d) Uso de detalles arquitectónicos que repelan agua de lluvia, tales como hojalaterías, cortagoteras, alfeizares que se proyecten un poco más allá del plano de fachada, etc.

2) Drenaje (Drainage):

El drenaje es generalmente el medio principal de proporcionar redundancia en una solución de muro o techo, y consiste en sistemas que recogen el agua lluvia y permiten su movimiento por gravedad a través de estos para evitar su ingreso más al interior del paquete constructivo de muro o techo. En su forma más simple, esto se logra mediante la adición de un plano de drenaje dentro del paquete constructivo de muro o techo, normalmente ubicado entre la placa estructural de la cara exterior del elemento y el revestimiento. Este plano de drenaje normalmente consiste en una barrera de humedad, la cual debe funcionar en combinación con hojalaterías, láminas metálicas, botaguas, tapajuntas y cintas de sellado en interrupciones del plano como ventanas, puertas u otro tipo vanos o discontinuidades, para evitar que la humedad la penetre hacia el interior. Las barreras de humedad deben ser instaladas de acuerdo a las recomendaciones y especificaciones técnicas del producto, considerando todos sellos, también conocidos como flashing, necesarios para mantener la hermeticidad de la envolvente.

3) Secado (Drying)

Es el mecanismo por el cual los paquetes de muro remueven acumulaciones de humedad por medio de ventilación. Las cavidades de drenaje, también llamadas cámaras de aire, consisten en distanciar el

plano de drenaje y el revestimiento exterior, permitiendo la ventilación y secado de las barreras de humedad y de la parte trasera de los revestimientos, limitando aún más la permanencia de la humedad al interior de la solución constructiva. Otra variable del secado sobre la cual aún se investiga hoy en día, es el secado y eliminación de humedad por difusión de vapor, la cual será tratada más adelante.

4) Materiales durables (Durable materials)

El último principio de control de la penetración de la lluvia es usar materiales cuya durabilidad es natural, o mejorada con preservantes químicos, permitiendo manejar la permanencia de dicha agua sin producir efectos negativos hasta que esta se seque. Esto es particularmente importante en sectores donde haya elementos de madera tengan un mayor riesgo de permanecer húmedos en casos de ingreso de agua, o que estén en contacto con elementos que puedan humedecerse.

Dado que en Chile se hace uso del pino radiata, el cual es considerado una madera no durable, tal como fue señalado en el capítulo anterior, toda la estructura debe usar elementos preservados, por lo que este punto se puede considerar satisfecho solo por el cumplir con la normativa. Un caso común donde es fundamental este tipo de maderas, es en las soleras inferiores que se encuentren en contacto con el hormigón, las cuales, si bien cumplirían con la norma, es recomendable incluir detalles adicionales que protejan aún más los paquetes constructivos, como lo es la adición de un elemento impermeabilizante entre el hormigón y la solera de madera.

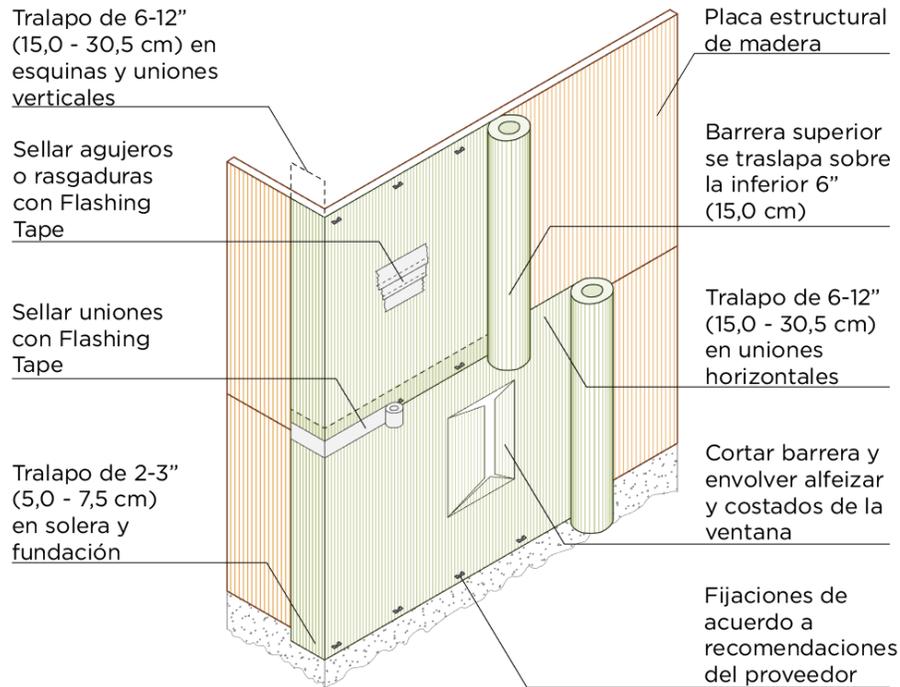


Figura 10 Detalles de instalación de barrera de humedad como plano de drenaje sobre muro. Redibujado.

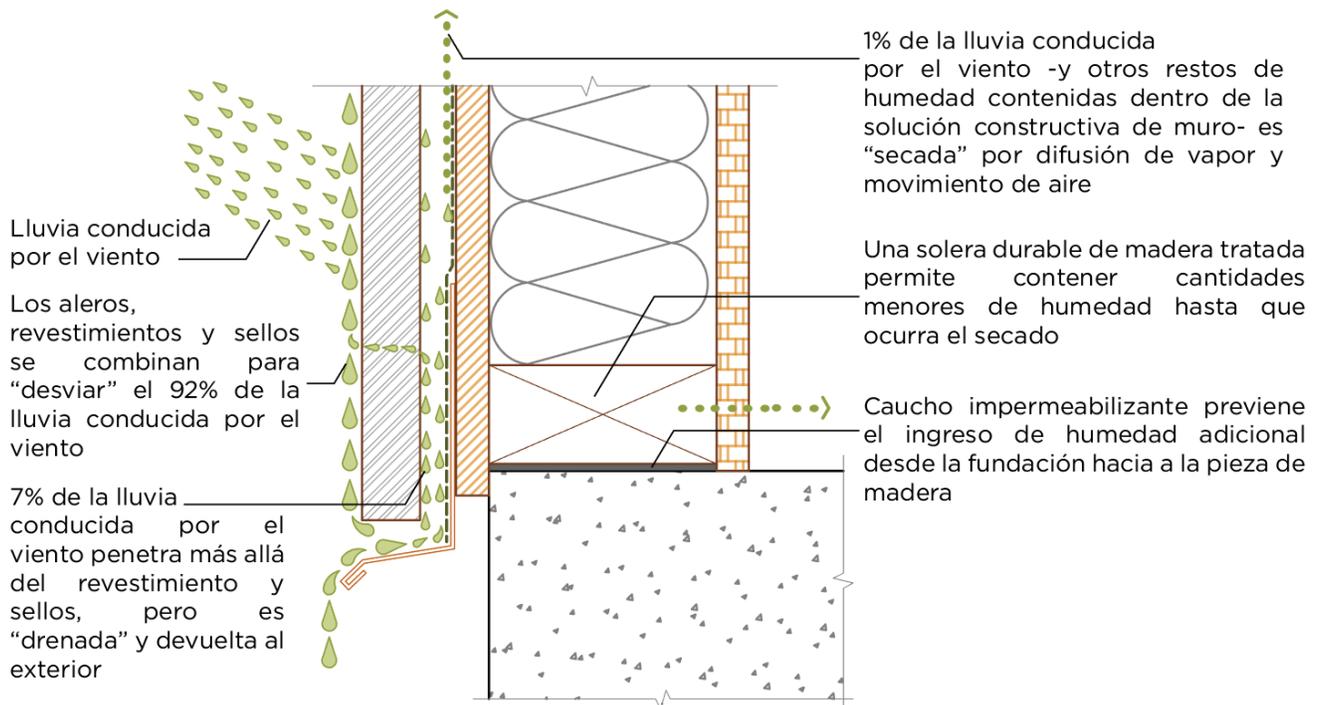


Figura 11 Cuatro líneas de defensa: la redundancia está diseñada en sistemas de pared exteriores al proporcionar múltiples líneas de defensa. Redibujado. (Canadian Wood Council, 2000)

Condensación intersticial y difusión de vapor

En latitudes templadas, la presión de vapor en invierno suele ser mayor dentro de un edificio que afuera, lo que resulta en un flujo de vapor de agua desde el interior hasta el exterior. Este vapor al entrar en contacto con superficies frías de materiales de la solución constructiva se transforma en agua, pudiendo quedar atrapada dentro de esta. Así, el contenido de humedad aumenta y la estructura se vuelve un ambiente confinado y húmedo favorable al desarrollo de hongos, y pudrición.

La condensación puede además producir la aparición de hongos en las terminaciones interiores de los recintos, los cuales pueden ser dañinos para la salud de los habitantes.

Se debe asegurar de que el vapor de agua en paredes y techos se difunda hacia afuera especificando barreras progresivamente más permeables al vapor de agua hacia el exterior (lado frío). La resistencia al vapor en el interior (lado cálido) debe exceder la del exterior, utilizando entonces una barrera preferiblemente 5 veces más resistente al paso del vapor que la barrera exterior. Es decir, la barrera de vapor (la más interna) tiene por objetivo evitar dentro de lo posible que la presión de vapor del recinto haga que la humedad penetre hacia el interior del paquete constructivo, y la barrera de humedad (la más externa), que debe evitar el ingreso de agua desde el exterior, si debe ser permeable al vapor de agua que viene desde el interior, en caso que este logre traspasar la primera barrera, permitiendo en ese escenario que la humedad escape hacia el exterior, evitando que se quede atrapada dentro de la solución constructiva (Timber Research and Development Association, 2016).

Es importante tener en mente que este funcionamiento no es el mismo para edificaciones de condiciones tropicales, donde la barrera de vapor se ubica en la cara exterior de la solución constructiva, bajo el revestimiento (Tasman Insulation New Zealand, n.d.). Dado que esto no corresponde al clima de Chile, no se elaborará más sobre detalles para estos climas.

Otros criterios de diseño para el control de humedad

a) Ventilación

Durante la mayor parte del año, el aire exterior se puede utilizar para secar la madera para bajar el umbral de descomposición. Cuando exista riesgo de acumulación de humedad o condensación en lugares inaccesibles, se recomienda proporcionar ventilación en forma de movimiento de aire libre, por ejemplo:

- En cavidades de drenaje detrás del revestimiento.
- Debajo de las plantas bajas suspendidas.
- En espacios fríos de techo / vacíos.

b) Protección contra infiltraciones en fundaciones

Es necesario proteger las fundaciones del ingreso de humedad del suelo por capilaridad, y el arrastre de sales por medio de esta, ya que puede producir eflorescencias en el hormigón o producir el movimiento de agua desde la fundación a las piezas de madera.

Para esto se recomienda (MINVU, n.d.):

- Distanciar de la fundación todo tipo de elemento vegetal como plantas, árboles o flores que requieran mucho riego.

- No plantar árboles de grandes raíces, ya que estas pueden romper y obstruir las fundaciones, radiers y tuberías.
- Mantener los sobrecimientos despejados.

c) Protección contra la humectación indirecta

La protección contra la humectación indirecta, como salpicaduras de agua de lluvia, se puede lograr mediante (Timber Research and Development Association, 2016):

- Elevar cualquier madera externa por encima de una zona de salpicaduras que sea de al menos 200 mm (250 mm preferido) desde el suelo o desde superficies horizontales como techos.
- El uso de canales de grava o drenaje para reducir las salpicaduras de agua por debajo del revestimiento de madera o la carpintería.

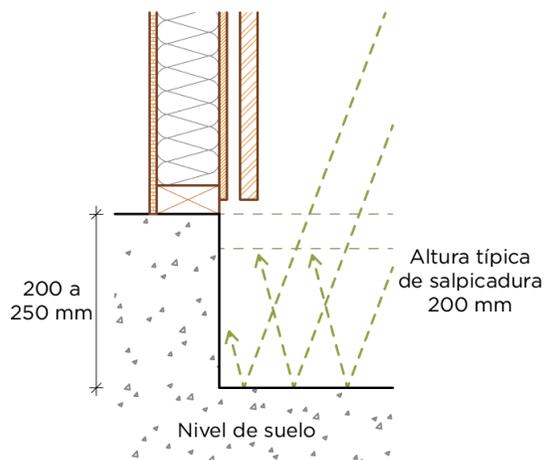


Figura 12 Madera levantada para protección de salpicado de agua, ejemplificado respecto a nivel de suelo. Redibujado. (Timber Research and Development Association, 2016)

- Asegurando que los elementos de hojalatería por debajo de

componentes de madera que se proyecten más allá del plano de la pieza de madera, tales como cortagoteras, botaguas, y tapajuntas sean inclinados para así desviar el agua y controlar mejor la cantidad de lluvia que salpicará sobre estas superficies y pudiera llegar nuevamente a la madera.

- Los soportes de acero (herrajes) u otro material para columnas, postes o pilares de madera deben ser diseñados evitando formar puntos donde se acumule o permanezca humedad (trampas de humedad). Además, deben considerar la distancia al suelo para evitar el acceso de agua a la madera por salpicadura.

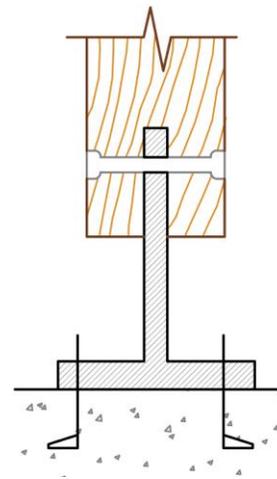


Figura 13: Herraje típico en columna para evitar acumulación de agua. (Timber Research and Development Association, 2016)

- ### d) Permitir el movimiento de la madera por efecto de su humedad

La madera como material higroscópico durante su vida útil continuará encogiéndose o hinchándose en respuesta a los cambios en su contenido de humedad. Por lo tanto, para los elementos de madera que puedan estar expuestos a un cambio de su humedad interior, es importante que la

madera se seque a un contenido de humedad adecuado a su uso previsto antes de la instalación, o que el diseñador, similar al caso de las juntas de dilatación del hormigón, tenga en cuenta para la madera la probable expansión o contracción de esta según corresponda, tales como:

- El diseño de uniones que prevean el movimiento de humedad, por ejemplo, mediante el uso de ranuras o agujeros con mayor holgura en su tamaño en las conexiones para acomodar dicho movimiento.
- Los elementos de madera cuyos herrajes vayan por el interior del mismo en vez de por las caras exteriores tienen menos efectos de contracción.
- En revestimientos de madera se debe considerar que las piezas estén dispuestas y fijadas de manera que permitan la expansión o contracción de cada pieza individualmente.

e) Recubrimientos protectores

Los recubrimientos como pinturas, barnices, stains, repelentes de agua, preservantes solubles, entre otros, tienen como principal objetivo dar una protección adicional a la madera frente a los efectos de la humedad a los que se puede encontrar expuesta y son utilizados generalmente cuando esta es instalada en ambientes exteriores.

La madera, como se ha mencionado anteriormente, es un material anisotrópico, y los cortes transversales, también conocidos como cabeza o “*end-grain*”, dado que son perpendiculares al sentido de las fibras de la madera, las cuales en las condiciones naturales del árbol se encargan de mover el agua a lo largo del tronco, son los más permeables. Por este motivo, se debe evitar su exposición a la intemperie.

Además, dado que los procesos de impregnación no penetran por completo a las piezas de madera, las piezas de madera al ser cortadas exponen el interior no impregnado, por lo que deben contar con protecciones adicionales. Entonces, si es que estos llegan a estar expuestos, para protegerlos de la humectación se puede especificar el uso de capas adicionales de recubrimientos en estos. El diseño debe considerar que haya suficiente espacio para el acceso para el mantenimiento de estos recubrimientos, por ejemplo, para el repintado. Este espacio puede a la vez ser de utilidad para que se ventile la cabeza, facilitando su secado (Timber Research and Development Association, 2016).

f) Separar la madera de los materiales húmedos

En elementos de madera como soleras, la madera debe aislarse del suelo, de los materiales capaces de retener humedad, y de superficies húmedas, mediante una membrana impermeable a prueba de humedad o, como es en el caso de columnas de madera, preferiblemente proporcionando suficientes espacios de aire para evitar la absorción o la acción capilar.

g) Trampas de agua y caminos capilares

Una trampa de agua es un lugar donde el agua no fluye y/o puede estancarse, lo cual favorece el movimiento del agua por capilaridad y el desarrollo de hongos y pudrición. Para esto se recomienda lo siguiente (Timber Research and Development Association, 2016):

- Pendiente suficiente para superficies 'horizontales' que permita el desplazamiento del agua sin que se quede quieta. Una pendiente de 12,5% es recomendada.

- Drenaje para garantizar que las uniones entre los componentes expuestos y las conexiones no se conviertan en trampas de agua.
- Ranuras de goteo cerca de extremos de superficies horizontales inferiores expuestas, para evitar que el agua se desplace por la parte inferior.
- Ranuras anti-capilares, que interrumpan la continuidad de la apertura entre 2 superficies cercanas que se enfrenten, evitando que la humedad sea arrastrada por la acción capilar entre esas superficies cercanas.
- Parte inferior achaflanada de los extremos de corte para garantizar que la humedad no se 'cuelgue' por debajo y no se devuelva por la cabeza de la pieza.
- Evitar esquinas afiladas en piezas de madera, ya que se desgastan más rápido. El uso de esquinas redondeadas permite que las superficies verticales extraigan humedad de las horizontales.

Tapa, tapacan, pasamanos u otro con ranura de goteo

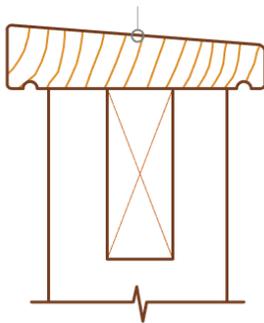


Figura 14 Detalle ranura de goteo. Redibujado. (Timber Research and Development Association, 2016)

PROTECCIÓN CONTRA INSECTOS Y HORADORES MARINOS

Termitas

Hoy en día gracias a los avances en tecnología, productos y soluciones disponibles es posible construir edificios íntegramente de madera en áreas susceptibles al desarrollo de colonias de termitas, mientras se tomen las medidas preventivas y resguardos necesarios para evitar el ingreso de estas a la edificación (MINVU, 2017). Entre las distintas medidas preventivas destacan las estrategias de diseño, el tratamiento de la madera y las buenas prácticas en obra.

a) Estrategias de diseño

La humedad es uno de los principales factores que puede atraer a termitas de madera húmeda (TMH) y termitas subterráneas (TS). Por esto, un diseño adecuado facilita considerablemente la protección contra este tipo de insectos.

En el caso de las termitas subterráneas, las cuales representan la amenaza más compleja respecto a su prevención y tratamiento, la estrategia preventiva consiste en limitar el acceso de estas a la edificación. Los tres principales puntos de acceso de las termitas subterráneas a la edificación son (MINVU, 2017):

- Construcción de túneles a través de madera en contacto con el suelo.
- Ingreso por tuberías desprotegidas o expuestas en superficies verticales de sobrecimientos.
- Construcción de túneles a través de grietas, juntas o cavidades en el hormigón.

Además, se debe tener especial cuidado en puntos vulnerables como fundaciones, dilataciones, canalizaciones y jardineras (MINVU, 2017):

- Las fundaciones y radieres de hormigón deben ser diseñados y ejecutados con el cuidado de constituir elementos monolíticos, sin presencia de fisuras, grietas o burbujas de aire en estos, dado que estos facilitan el acceso de termitas a la vivienda. Para el caso de elementos no monolíticos se deben especificar y ejecutar sellos adecuados que mantengan a la edificación hermética al ingreso de estos insectos. Estos sellos deben ser de materiales que no se fisuren y que sean durables y resistentes al paso del tiempo.
- En el caso de la existencia de elementos que atraviesen una edificación, tales como shafts, canalizaciones internas, ductos sanitarios, eléctricos o cualquier otro tipo de instalación, dicho atraveso debe ser también sellado con un material durable y no fisurable.
- Los sobrecimientos y radieres deben quedar expuestos al menos en unos 20 cm sobre el nivel del terreno natural, para su correcta inspección.
- Los sótanos y áreas de registro soterradas deben tener una altura mínima de 45 cm sobre el nivel del terreno, y deben contar con una escotilla de acceso que facilite su ingreso.
- Las juntas de dilatación deben ser consideradas con sellos adecuados, evitando la aparición de fisuras o rupturas que faciliten la circulación de termitas.
- Todos los elementos que perforen a la edificación y requieran sellos deben permitir su inspección periódica para la constatación de la ocurrencia de ataques de termitas.

- Las jardineras en bases de muros perimetrales deben ser evitadas en edificaciones susceptibles al ataque de termitas, ya que están mantienen la humedad a nivel de suelo, contiguo a la edificación, propiciando las condiciones para el hábitat de termitas. Si se considera el uso de jardineras, estas deben ser distanciadas de la edificación.

En cuanto a elementos que permitan bloquear efectivamente el acceso de termitas a una edificación dada, teniendo en cuenta los puntos de vulnerabilidad señalados anteriormente, algunas estrategias a tomar en cuenta son el uso de barreras físicas, sello de fisuras y/o barreras químicas tales como (MINVU, 2017):

- Mantener las distancias entre el suelo y la edificación para evitar el ingreso de humedad y para evitar el acceso de las termitas. Se debe evitar el uso de elementos que puedan servir de puente para las termitas hacia la edificación, sean permanentes o transitorios.
- En todo el perímetro de fundación, tanto a nivel como bajo el suelo, en basamentos, radieres y atravesos de instalaciones se puede instalar una malla metálica de acero inoxidable de una trama de 0,75 mm, la cual previene el ingreso de termitas de menor tamaño. La malla debe ser correctamente afianzada mediante abrazaderas, y durante toda la construcción se debe cuidar su integridad.
- Las barreras químicas consisten en la inyección de líquidos, polvos o espuma en el suelo inmediato a la edificación, creando una zona intermedia de suelo tratado que evita el paso de las termitas.

b) Tratamiento de la madera

A pesar de estas estrategias de diseño, el uso de madera impregnada es una de las formas más efectivas de evitar ataques, ya que previene que esta se deteriore y genere las condiciones para la proliferación de estos xilófagos. El uso obligatorio de madera preservada está estipulado en la OGUC y en la NCh819, para piezas o elementos de madera, ya sea estructural o de terminación, sometidos o no a cálculo estructural, tal como fue señalado en el capítulo III del presente documento.

Coleópteros

En el caso de los coleópteros, ningún tipo de medida de diseño puede prevenir un ataque a elementos expuestos. Para estos la única solución es una preservación por tratamiento de superficie (Trouy, 2016). A diferencia de las termitas subterráneas, que representan la mayor amenaza entre los insectos para las estructuras de madera, como estos insectos habitan en la madera pueden ser eliminados aplicando insecticidas en los elementos afectados.

Horadores marinos

Para proteger la madera de los horadores marinos, que son un riesgo para la madera sumergida en agua salada, además de la preservación química se puede usar también como medida constructiva el “*Wood pile wrap*”, que consiste en el uso de un plástico resistente que se envuelve alrededor de pilotes, formando una barrera física que evita el ataque de los horadores a la madera (Pile Wrapping - Eastern Marine Services, 2020).

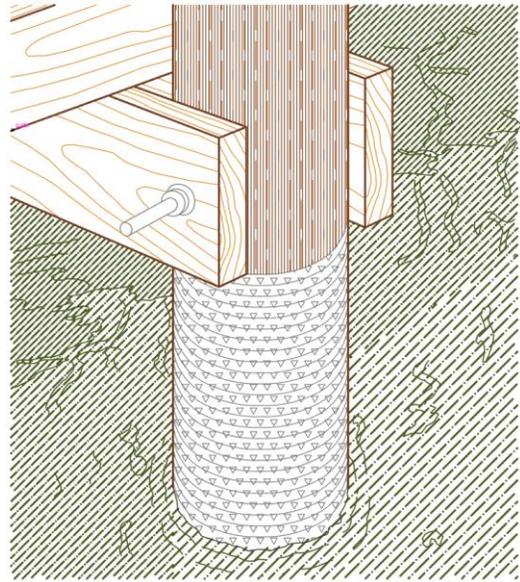


Figura 15 Pilote en contacto con agua, envuelto en plástico resistente. Redibujado. (Pile Wrapping - Eastern Marine Services, 2020)

PROTECCIÓN CONTRA AGENTES ABIÓTICOS

Protección con recubrimientos

Este tipo de protección es común en elementos de madera que puedan estar expuestos a la intemperie, tales como revestimientos, columnas, proyecciones de vigas, etc. Los recubrimientos utilizados para proteger la superficie de la madera de los efectos de la luz ultravioleta (UV) pueden crear sus propios problemas. Los colores oscuros expuestos al sol pueden crear altas temperaturas superficiales de madera, lo que conduce a un aumento de las fisuras superficiales y la exudación de resina de algunas maderas blandas.

Los recubrimientos resistentes al vapor, como el barniz o la pintura al aceite, pueden atrapar cualquier humedad dentro del componente de madera. Por lo tanto, para la madera expuesta a la luz UV, se deben utilizar únicamente recubrimientos flexibles permeables al vapor. Alternativamente, se pueden especificar especies durables que se pueden dejar inacabadas para el clima y

que se blanqueen de forma natural. Por esto, siempre es necesario consultar a los fabricantes antes de especificar tratamientos (Timber Research and Development Association, 2016).

Estos acabados pueden evitar que la madera se decolore o manche, sin embargo, requieren ser aplicados nuevamente, donde la cantidad de años entre aplicaciones varía de acuerdo a las especificaciones del producto utilizado.

Protección física con cobijo

Otra forma de proteger a la madera de la luz ultravioleta excesiva es mediante una barrera física como grandes voladizos, tapacanes, pantallas, pérgolas, árboles, entre otros. Al controlar la cantidad de radiación directa que llega a la madera, esto también sirve de protección para los recubrimientos de la madera, tales como pinturas, barnices, entre otros. En casos que se quisiera dejar envejecer de forma natural a la madera expuesta, no es recomendable utilizar este tipo de elementos para protegerla de la luz UV, ya que esto previene el blanqueamiento de su superficie y la remoción de elementos extractivos de esta por la acción de lluvia (Timber Research and Development Association, 2016).

Productos químicos

Si bien la madera es resistente a ácidos y bases suaves, los ácidos fuertes (menos de PH 2) y las bases fuertes (más de PH 10) pueden causar degradación de la estructura química de la madera. Las maderas expuestas a la intemperie que pasan por este tipo de degradación, pueden exudar tanino mientras se secan, el cual puede

manchar los componentes circundantes o incluso atacar componentes metálicos si están expuestos permanentemente a un alto contenido de humedad (Timber Research and Development Association, 2016).

Protección contra el fuego

La protección contra el fuego debe estar de acuerdo con las normativas nacionales, establecidas en los artículos 4.3.3 y 4.3.5 sobre protección al fuego de la O.G.U.C, donde distintas condicionantes como el tipo de uso del edificio, número de pisos y tipo de elemento constructivo determinan el nivel de exigencia de resistencia al fuego en minutos para un paquete constructivo. Para determinar si la solución constructiva cumple con dicho requerimiento, esta debe ser ensayada de acuerdo a la NCh 935 de título Prevención de incendio en edificios - Ensayo de resistencia al fuego - Parte 1: Elementos de construcción en general. Con un adecuado diseño, una solución constructiva permite una seguridad óptima contra el fuego, en prevención y en caso de incendio.

Otros factores de diseño a considerar para los casos de incendios es la compartimentación de las soluciones constructivas para evitar el movimiento de fuego y gases a través de las cavidades en muros (fireblocking), y entrepisos y techos (draftstopping). Para más información sobre cómo construir en madera con soluciones adecuadas contra el fuego, se puede referir al Manual de Soluciones Constructivas MINVU, editado por el Centro UC de Innovación de Madera.

MÁS ALLÁ DEL DISEÑO

CONTROL DE CALIDAD

El proceso de construcción debe seguir adelante con la intención de diseño. Esto comienza en la fase de diseño con documentación de construcción y es indispensable para la correcta ejecución de la obra y una protección de esta que maximice su durabilidad. Esto incluye el fin de facilitar que el diseño de la envolvente del edificio sea claramente comunicado a todo el equipo de construcción. Las diversas estrategias de control de humedad deben ser transmitidas eficientemente, para que el equipo de construcción y supervisores lo entiendan antes de ejecutarlo, idealmente mediante una descripción narrativa y un concepto que permita la comprensión de la estrategia general de manejo de aguas y de los detalles a ejecutar, tomando en consideración las capacidades del equipo.

Los dibujos a gran escala y, en algunos casos, los dibujos tridimensionales, son necesarios para indicar visiblemente las relaciones de varios componentes la solución constructiva, sus uniones y encuentros. En particular, el plano de drenaje (barrera de humedad, sellos, botaguas y tapajuntas) debe estar claramente expresado en los detalles. Si la intención de diseño y los supuestos no están claramente articulados, es muy posible que los instaladores malinterpreten los detalles durante la construcción (Canadian Wood Council, 2000).

Si bien el mayor enemigo de la madera es la humedad, la correcta ejecución de los muros en sí mismos también es crítica, para así proteger su integridad estructural y contra fuego.

Para esto mismo también es necesario llevar a cabo supervisiones minuciosas de la ejecución de cada una de las partidas y construcción de cada elemento de la obra, la cual además debe apoyarse, según corresponda, con la documentación y manuales de instalación de los distintos tipos de productos a utilizar como fijaciones, barreras de vapor, sellos, cintas de sellado, entre otros.

TERMITAS

En el caso de a protección contra el ataque de termitas, toda construcción, y especialmente las que se encuentren en zonas con riesgo de ser afectadas por termitas, debe considerar la implementación de protocolos durante la fase de construcción que permitan reducir la ocurrencia de casos de infestación (MINVU, 2017):

- Se debe cerciorar preventivamente de que no existan termitas en el sitio de construcción a través de una inspección, y en el caso de encontrarse, deben ser eliminadas y revisar en terrenos vecinos si también hay presencia de estas.
- Las calcatas de suelo deben someterse a un análisis biológico.
- Es posible utilizar el tratamiento de cebo Noviflumuron como método preventivo. El INIA evaluó este cebo como método de control y prevención, y certificó que es un sistema efectivo para la eliminación de colonias, permitiendo eliminar y detectar de forma rápida las termitas.
- Se debe eliminar la madera enterrada preexistente.
- Todos los materiales ingresados, incluso la tierra, deben ser inspeccionados.

- Es importante que el jefe de obra y el encargado de patio o abastecimiento se encuentren capacitados para identificar la existencia de termitas subterráneas y sus indicios.
- Al generar los niveles de terreno, se debe tener especial cuidado de generar pendientes para evacuación del agua lejos de las edificaciones. De igual forma, deberán considerar drenes de ser necesario, a fin de evitar la humedad en torno a la construcción.

Estas precauciones antes de construir son necesarias, ya que si bien la preservación de madera de acuerdo a la NCh 819 la protege de termitas, en este caso el pino radiata, si un elemento se encuentra expuesto a estas, por ejemplo, estando en contacto con el suelo (riesgo 4), tal como presenta la investigación de Mauricio Baeza sobre la retención mínima de CCA para proteger a la madera frente ataques de termitas subterráneas (Baeza et al., 2002), a pesar que dicha preservación puede ser altamente eficaz (se presume un comportamiento similar para cantidades equivalentes de otros preservantes para un mismo nivel de riesgo de acuerdo a la NCh819), de todas formas se pueden presentar daños suaves o incipientes, aunque sea en casos aislados. Esto podría llegar a presentar un peligro para la estructura si las termitas pudieran avanzar, aunque sea produciendo daños menores, hasta elementos de madera preservados para riesgos menores.

MANEJO DE MATERIALES

Incluso cuando la madera se compra seca y se entrega en el lugar de trabajo, esta se puede humedecer antes o durante la construcción, por lo que controlar su

porcentaje de humedad es fundamental. Para controlar esto se deben desarrollar procedimientos para (Canadian Wood Council, 2000):

- Mantener secos los materiales a base de madera mientras se almacena en el lugar.
- Minimizar la humectación de los materiales instalados.
- Promover el secado de materiales con ventilación, calefacción o deshumidificación.

En los edificios que están expuestos a una humectación significativa durante la construcción, se deben considerar horarios para el secado adecuado a los materiales de estructura y revestimiento. Las barreras de humedad, instaladas poco después de instalar los ensamblajes, se pueden utilizar para minimizar la exposición a las condiciones climáticas, sin embargo, con estas se debe tener en cuenta que tienen en sus especificaciones del producto un tiempo estimado máximo de exposición a la luz solar directa.



CONCLUSIONES

La principal lección aprendida de los capítulos anteriores es que, ante todo evento, se debe proteger a la madera del incremento de su contenido de humedad, y con ello de todas las amenazas que eso incluye, es decir, la degradación, aparición de hongos, atracción de insectos xilófagos, alternación de sus propiedades mecánicas, aparición de fallas, y detrimento de sus cualidades estéticas.

Junto a esto, la madera debe ser protegida de otros agentes perjudiciales para esta, como lo son la luz UV directa, agentes químicos fuertes, fuego, terrenos con preexistencia de termitas y, si corresponde, de horadores marinos.

Mediante el diseño estructural y arquitectónico se pueden proporcionar todas las protecciones necesarias frente a dichos factores. Esto debe ser abordado tanto a la escala macro del edificio en su emplazamiento, orientación y forma, como en la escala del detalle.

Una envolvente apropiadamente diseñada y construida no solo protegerá a la madera y

el edificio de dichos agentes, sino que también permitirá un mejor desempeño térmico del edificio y una correcta ventilación, facilitando la existencia de un espacio interior confortable sin problemas de humedad, condensación y calidad de aire.

Sumado a todas las recomendaciones y guías anteriores, es importante diseñar una construcción pensando en su facilidad y accesibilidad para su inspección, mantención y reparación, ya que todo esto facilitará la estimación de la durabilidad de la obra y sus costos asociados, en conjunto con la elaboración de planes de mantenimiento de la misma, los cuales serán abordados en el próximo capítulo.



V. DURABILIDAD EDIFICIOS DE MADERA: OPERACIÓN Y MANTENCIÓN

VIDA ÚTIL DE UN EDIFICIO DE MADERA

Para asegurar el desempeño ideal del diseño de un edificio de madera en el tiempo es necesario, tal como fue presentado en los capítulos anteriores, aprovechar al máximo las cualidades que ofrece el material, utilizarlo y tratarlo según corresponda para evitar que se den condiciones desventajosas para el mismo, planificar y detallar acorde a esas características, protegiendo al total del edificio y sus partes, resguardándose de elementos perjudiciales para este. Considerando esto, es fundamental entender que, si bien en este documento el foco está sobre el uso de la madera, ningún edificio puede ser diseñado sin tomar en consideración la mantención de sus distintos elementos, incluyendo los no estructurales, tales como sistemas e instalaciones.

A pesar de contar con cientos de años de historia y obras que demuestran la longevidad de construcciones que hagan uso de madera, independiente de si es una porción o el total del edificio, en la actualidad es muy común que en la industria de la construcción no se conozcan estos datos y se estime que las construcciones con estructura principalmente de madera son las de menor vida útil. Es por esto que hoy en día instituciones, investigadores y empresas buscan des-estigmatizar a la madera como un material poco durable.

Entendiendo esto, es fundamental iniciar este capítulo aclarando que diversas investigaciones demuestran que en un edificio de madera los elementos

estructurales internos y los protegidos de la intemperie son estables sin requerir de mantención, y que los expuestos al ambiente exterior pueden mantener su durabilidad en el largo plazo mientras se les inspeccionen y sean mantenidos regularmente mediante la aplicación de recubrimientos de terminación que protejan la madera (Wood Solutions, 2019).

En el capítulo anterior sobre las medidas de diseño para la durabilidad de edificios de madera se presentó la misma conclusión del estudio de Vivian Tam sobre el análisis de ciclo de vida de edificios de madera para el caso de Australia, en el cual además se profundiza el análisis sobre el comportamiento de distintas especies de madera, incluyendo el pino radiata, exponiendo la vida útil mínima esperada bajo 3 tipos de condiciones de riesgo (Tam et al., 2017):

- Bajo: no sometido a luz solar directa, áreas húmedas o a movimiento estructural significativo. Este, por ejemplo, correspondería al común para la mayoría de los casos de entramado de madera de Chile.
- Duro: expuesto a luz solar, áreas húmedas y movimiento estructural durante el día u ocasionalmente.
- Extremo: expuesto constantemente a luz solar directa y/o agua y/o viento y/o movimiento estructural.

Aplicación	Costo inicial (AU\$/m ²)	Vida útil (años) mínima esperada, de acuerdo a condición		Mantenimiento requerida (cantidad de eventos en total de vida útil)	Costo de cada evento de mantenimiento (AU\$/m ²)	Costo de demolición y remoción (AU\$/m ²)
Revestimiento Exterior	64	Baja	36.7	3.3	45	18,3
		Dura	30.7	3.7	46,7	23,3
		Extrema	23.0	4.0	51,7	26,7
Estructural	66,7	Baja	53.3	0.0	-	28,3
		Dura	49.0	0.3	-	28,3
		Extrema	42.7	2.3	-	30,0
Pavimento	66,7	Baja	53.3	0.0	0	28,3
		Dura	49.0	0.3	8.3	28,3
		Extrema	42.7	2.3	33,3	30,0
Terminaciones cielos	66,7	Baja	53.3	0.0	0	28,3
		Dura	49.0	0.3	8,3	28,3
		Extrema	42.7	2.3	33,3	30,0

Tabla 7 Tabla resumida del estudio solo con los costos asociados a las aplicaciones de pino radiata, con su valor en dolar australiano. Para elementos estructurales, dado que cualquier falla significa su remplazo total, no se le asume un costo de mantenimiento, considerando el costo de remoción y remplazo. No se consideran elementos que para las mismas funciones usen otras maderas, o que cuya función requiera de una madera distinta.

Tal como fue señalado, la estructura adecuadamente protegida no requiere de mantenimiento, y solo trae consigo costos asociados a mantenimiento en los casos extremos, considerando como costos la restitución de material asociados a la demolición, remoción, y reposición de elementos. Además, es importante señalar que la investigación aclara que en sus casos de estudio en condición extrema hubo actividad de termitas.

Como es de esperarse, la madera utilizada para revestimientos exteriores es la que presenta una menor vida útil y una mayor cantidad de eventos de mantenimiento durante esta. Por otra parte, se expone que en general la madera utilizada en otras aplicaciones como pavimentos o cielos puede requerir de mantenimiento una sola vez en toda su vida útil, el cual consiste en un re-lijado, parchado y recubrimiento de cada elemento con algún tipo de acabado (barniz, laca, aceite, etc). Estos costos de mantenimiento son asumidos dentro del plan de mantenimiento del edificio y no se ven

reflejados en los costos directos asociados al ciclo de vida de cada elemento (Tam et al., 2017).

Otra investigación interesante sobre la durabilidad para este tipo de proyectos es la realizada por Jennifer O'Connor, donde se estudió un catastro del 75% de los edificios demolidos en la ciudad de Minneapolis entre los años 2000 y 2003, cuyo total corresponde a 227 edificios de distintas materialidades. De esta investigación es interesante que solo el 38% de los edificios (86 casos) fueron demolidos por su "condición o estado físico", donde en 54 de los casos se precisó que esta condición se debía a la falta de mantenimiento del edificio (en la investigación se presume para elementos no estructurales), y solo 1 de estos casos especificó haber tenido problemas de descomposición/deterioro de estructura de madera (O'Connor, 2004).

Al final de ese sondeo se llegó a 2 conclusiones principales:

-No hay una correlación directa entre la materialidad de un edificio y su vida útil, ya que la mayoría de los casos estudiados fueron demolidos por razones que no tienen relación con el estado físico del edificio.

Algunos ejemplos de estas razones fueron:

- Para su demolición y posterior construcción
- Por falta de mantenimiento, principalmente de componentes no estructurales, los cuales pueden haber también afectado a la vida útil del edificio completo.
- Casos donde el edificio ya no se consideró apto para el uso que se le quiere dar, y que sería remplazado por otro de la misma categoría, pero más grande.
- Donde, por obsolescencia de componentes y equipos, incorporar mejoras se consideró muy costoso.

-Los edificios de madera analizados en el estudio son los que tuvieron una mayor vida útil, puesto que la mayoría del total de la muestra superaron los 75 años, a diferencia de los de hormigón armado que más de la mitad fueron demolidos antes entre los 26 y 50 años.

Es importante entender que muchas de estas investigaciones se apoyan en información empírica y muestras acotadas, afectadas por distintas variables sociales, urbanas y económicas, por lo que no son suficientes para tomar conclusiones

globales sobre las construcciones de madera, pero sí lo son para arrojar luces y orientar respecto a dudas sobre prejuicios relativos a la durabilidad, vida útil y costos de estas.

A continuación, se tratarán las medidas necesarias para el cuidado del edificio y sus partes una vez que este ya entró en su fase de uso y operación, partiendo con nociones generales del por qué son necesarias, cómo influyen y cómo son entendidas hoy en día en cuanto a la construcción en madera y otros materiales, normativa e ideas generales de costos. Luego, se presentarán rutinas de inspección, mantención y reparación para este tipo de edificios frente a diversas amenazas como termitas, fuego, sismos, entre otras.



OPERACIÓN Y MANTENCIÓN DE UN EDIFICIO

Antes de elaborar un plan de operación y mantenimiento de un edificio de madera, es clave comprender cuales son los tipos de acciones que involucra un plan de este tipo, sobre qué daños o fallas se trabajan, y cuál es la vida útil con la que se va a proyectar, tanto para el edificio y sus materiales como para sus sub sistemas e instalaciones.

A continuación se presentan cada uno de los factores involucrados en la operación y rutinas de mantenimiento de un edificio de madera marco-plataforma, presumiendo que este fue construido rigurosamente siguiendo todas las normas y guías de diseño presentadas en los capítulos anteriores y, por lo tanto, no se tratarán por ejemplo, fallas originadas por la contracción o hinchamiento excesivo de elementos por haber utilizado madera verde; o fallas producidas por no haber utilizado piezas de madera tratadas adecuadamente por su especie y por el tipo de riesgo que estará expuesta durante su vida útil; u otras de ordenes similares.

GENERALES

Durante el periodo de uso de una construcción, para asegurar su durabilidad e integridad en el largo plazo requiere de un plan de mantenimiento, independiente de su tipo estructura, el cual consiste principalmente en todas las acciones técnicas, administrativas y de supervisión para evitar o tratar el deterioro y fallas de los componentes o elementos del edificio, y así mantener las funciones originales para las cuales fueron incorporados en el diseño del proyecto. Estas pueden ser de conservación, asociadas a la preservación del funcionamiento de los elementos, o de actualización, donde estos son

reemplazados por elementos nuevos de una mejor condición.

En este capítulo se hará el enfoque en las acciones de conservación, las cuales pueden ser de carácter (Muñoz, 2008):

- Preventivo: Corresponden a las inspecciones, pruebas, intervenciones, reparaciones, etc., para evitar fallas del elemento, o reducir su impacto y/o frecuencia.
- Predictivo: Se basa el seguimiento y diagnóstico constante del elemento con el fin de detectar posibles fallas en etapas tempranas de su desarrollo antes de que estas se vuelvan críticas.
- Correctivo: Son las acciones de reparación y sustitución de un elemento una vez que ya hubo una falla.

DAÑOS

Se considera como daño estructural cuando este resulta en un cambio significativo de la capacidad del edificio de resistir a cargas o resistir a sismos futuros. En cambio, se considera como daño no estructural a todo aquel de orden cosmético o que no sea estructuralmente significativo (CUREE, 2010).

Toda evaluación de daño debe iniciarse con una inspección visual del propietario, contratista o representante de una aseguradora usando los criterios establecidos en el documento. Si esta inspección identifica condiciones que indiquen la necesidad de asistencia técnica, el/los consultor/es técnico/s apropiado/s, tal como un especialista en estructuras, este deberá ser contratado para profundizar sobre la evaluación de daños. En algunos casos el especialista puede recomendar

una inspección invasiva para determinar de manera confiable la naturaleza y extensión de posibles daños ocultos producidos por el sismo (CUREE, 2010).

Una inspección invasiva, también conocida como **“ensayo destructivo”**, es una técnica de investigación que puede ser usada para inspeccionar la condición de las partes o sectores de un edificio que pueden estar ocultas a la observación directa, por ejemplo, picar un muro de hormigón, remover terminaciones de un muro de entramado de madera, etc. Este tipo de inspección debería ser solo necesaria en aquellas instancias cuando el consultor técnico no pueda asegurar la inexistencia de daño, o no pueda asumir el nivel de daño sin usar medios invasivos.

ESTRUCTURA Y ENVOLVENTE

Las rutinas de inspección y mantenimiento en un edificio de madera deben abordar desde la envolvente del edificio que protege a todos sus componentes de la intemperie y los sistemas de ventilación y barreras de vapor para controlar la humedad del aire interior y la condensación, hasta cada elemento que conforma la estructura y terminaciones interiores, incluyendo también las instalaciones, especialmente las sanitarias, cuyas fallas pueden afectar gravemente a la estructura.

Para este documento no se considera los efectos de daños al edificio por concepto de movimientos o inestabilidad del suelo del terreno o por fallas en sistemas de fundaciones.

Vida útil de los componentes de una estructura de madera

Para entender los criterios y protocolos de mantenimiento para la estructura y envolvente de un edificio de madera, primero es necesario entender el cómo se

desempeñan cada uno de los componentes más comunes que constituyen a sus distintas partes. Para esto, se presenta la información referencial de la base de datos del software BEES (Building for Environmental and Economic Sustainability) para cálculo de ciclo de vida de edificios, desarrollado por el laboratorio de ingeniería del Instituto Nacional de Standards y Tecnología de Estados Unidos (NIST) (Kneifel, 2018):

- Madera aserrada tratada: las piezas pueden tener una vida útil de 75 a 85 años y no requieren de mantenimiento mientras se asegure la estructura evitando el ingreso de agua.
- Placas estructurales OSB o terciado: Las placas estructurales OSB o de terciado se comportan de la misma manera, teniendo la misma vida útil que el entramado y solo necesitando ser reemplazadas si el este también requiere.
- Lana de vidrio: Se estima una vida útil superior a los 50 años. No requieren de reemplazo o mantenimiento durante el uso normal del edificio.
- Placa Yeso-cartón: Estos utilizados como revestimiento interior, si son mantenidos y protegidos apropiadamente pueden tener una vida útil de 75 años.
- Revestimiento exterior vinílico (PVC): Su vida útil asumida es de 50 años. No requiere de ningún tipo de mantenimiento más que limpieza para mantener su apariencia.
- Revestimiento exterior de madera (especie cedro): Para estos se asume una vida útil de 40 años. Para mantener su apariencia y prolongar su vida útil requieren la aplicación de dos manos de recubrimiento tipo Stain. Otros recubrimientos deben seguir sus especificaciones técnicas.

De aquí es fundamental recalcar que la estructura de madera no expuesta a la intemperie, tal como es el caso de los elementos del entramado de muros, entrepisos y cerchas, no requiere de inspecciones y mantenciones protocolares, excepto en casos de fallas o fugas de elementos sanitarios de alcantarillado y agua potable, o casos de ingreso de humedad a la estructura por fallas de la envolvente, puesto que se puede propiciar la aparición de termitas, hongos, o deformaciones de la estructura por hinchamiento, encogimiento, etc.

SISTEMAS E INSTALACIONES

Todo edificio debe considerar una vida útil por diseño, y eso implica que sus componentes, sistemas e instalaciones deben permitir cumplir con dicha vida útil, sea mediante su facilidad de acceso para ser mantenidos o reemplazados, o para cumplir con la misma vida útil que el edificio en sí.

Para poder cumplir con esto, en el manual sobre durabilidad de edificios de la Mesa de Códigos de Construcción Australianos (ABCB), presenta guías donde se establecen los criterios de vida útil por diseño con que deben ser elegidos y especificados dichos sistemas y componentes (Tabla. 8) (Australian Building Codes Board, 2015).

En este sentido, las estructuras de madera destacan en facilitar y ampliar las alternativas de elección de estos elementos. Ello porque al no estructurar con elementos sólidos de muro, piso, entrepiso y techo, facilitan llevar a cabo reparaciones in-situ durante el uso de un edificio, lo cual es particularmente ventajoso para resolver fallas en sistemas e instalaciones que involucren agua, o resolver fallas ocasionadas por fugas de agua. Además, estas labores pueden ser logradas con una intervención, ruido y ejecución mínimos (Wood Solutions, 2019).

Categoría de vida útil del edificio según diseño	Vida útil según diseño (años)	Vida útil según diseño (años) para componentes o sub sistemas, fácilmente accesibles y de reparación o reemplazo económicos	Vida útil según diseño (años) para componentes o sub sistemas, moderadamente accesibles y costosos de reemplazar o reparar	Vida útil según diseño (años) para componentes o sub sistemas, no accesibles y de reemplazo o reparación no económicos
Corta	1 < Vida útil por diseño < 5	5 o vida útil por diseño (Si vida útil de diseño < 5)	Vida útil por diseño	Vida útil por diseño
Normal	50	5	15	50
Larga	100 o más	10	25	100

Tabla 8 Vida útil de diseño para el edificio e instalaciones y sus componentes (Australian Building Codes Board, 2015)

OPERACIÓN DE UN EDIFICIO DE MADERA

Considerando los datos presentados sobre los materiales y sistemas, se puede confirmar la premisa que las construcciones de madera no requieren de costos de mantención comparativamente diferentes a las de otros materiales y que pueden tener una vida útil larga, especialmente si no se considera el uso de revestimientos exteriores de madera. Esto es observable, por ejemplo, en la investigación de Lavender y Sarden (Lavender & Sardén, 2009), quienes estudiaron preocupaciones del sector inmobiliario en torno a la edificación prefabricada en madera marco-plataforma, donde los actores participantes de esta manifiestan inseguridades principalmente en lo que respecta a costos de funcionamiento (operación y mantención), desempeño a largo plazo y costos iniciales de construcción. El estudio levantó costos de operación y mantención de edificios de madera en la localidad de Estocolmo, Suecia, cuyo clima se asemeja a los del extremo sur de Chile. Todos estos casos levantados son administrados

profesionalmente por inmobiliarias, cooperativas de vivienda o por organismos municipales. Los resultados muestran que los edificios de madera tienen costos similares a los de hormigón armado, con una diferencia promedio de un 1,1% a favor de los edificios de madera, lo cual es respaldado en entrevistas por los administradores de las propiedades y los personales de mantención.

Un hallazgo interesante del estudio es que una de las propiedades estudiadas consiste de 2 edificios iguales, construidos el mismo año, número de departamentos, edad de los residentes (la diferencia de edades promedio entre edificios es de 0.5 años), ubicados en la misma zona, con la misma orientación y manejados por el mismo administrador, pero con la única diferencia en que uno fue construido en hormigón armado y el otro en madera (Lavender & Sardén, 2009). La comparación de gastos (corona sueca transformada a peso chileno aproximado) asociados a funcionamiento de estos casos fue la siguiente:

	Edificio de Madera	Edificio de Hormigón Armado
Gasto energético (Calefacción)	81 $kWh/año, m^2$	103 $kWh/año, m^2$
Mantención estimada (en plan de mantenimiento)	665400 SEK	692400 SEK

Tabla 9 Costos de energía operativa y mantención para 2 edificios iguales pero con estructura diferente: uno de hormigón armado y otro prefabricado de madera. Valores en moneda corona sueca (Lavender & Sardén, 2009)

Se señala que el costo de calefacción para el edificio de hormigón es un 27% mayor al del edificio de madera, y que los gastos de mantención, asociados para los primeros 25 años de operación, son similares, y que la diferencia entre ambos se da por la mantención de pavimentos interiores del

edificio de hormigón, lo cual es consecuencia de una decisión de diseño totalmente independiente de la elección del sistema constructivo y materiales utilizados en la estructura (Lavender & Sardén, 2009).

RUTINAS DE INSPECCIÓN Y MANTENCIÓN

Considerando lo presentado en capítulos anteriores, un edificio de madera diseñado de acuerdo a los requerimientos normativos y recomendaciones para su ciclo de vida completo, contará con materiales de gran durabilidad y costos de operación y mantención similares a edificios de otras materialidades.

PROTOCOLOS GENERALES:

A continuación, se presentan las rutinas generales de inspección de carácter preventivo y predictivo, consideradas para condiciones de operación normales de un edificio madera (Wood Solutions, 2015):

a) Muros:

- Recubrimientos exteriores: Depende de las especificaciones de los productos aplicados. En general se recomienda una inspección y mantención cada 10-15 años. Para productos de madera aplicar barnices o recubrimientos según instrucciones del proveedor.
- Revestimientos exteriores de muro: Inspección y mantención cada 10 años. Dependiendo del tipo de elemento especificado, se puede aspirar a un diseño con vida útil entre 5 y 100 años.
- Membranas expuestas: Inspección y mantención cada 10 años. Dependiendo del tipo de elemento especificado y detalle según diseño, se puede aspirar a un diseño con vida útil entre 5 y 100 años. Revisar integridad del elemento (posición, rasgaduras, etc).
- Revestimientos interiores de muros: Inspección y mantención cada 10-15 años. Revisar integridad del elemento para detectar abolladuras,

grietas, mellados, moho, hongos, humedad, etc.

- Barreras de vapor: Revisar integridad en caso de encontrar fallas en revestimientos interiores.
- Aislación: Revisar junto a barrera de vapor. Ver que no se haya caído o desplazado de su posición, que no presente humedad, etc.

b) Techo

- Cubierta de techo (tejas, planchas de zinc, u otros): Inspección y mantención cada 10 años. Dependiendo del tipo de elemento especificado, se puede aspirar a un diseño con vida útil entre 5 y 100 años.
- Membranas expuestas: Inspección y mantención cada 10 años. Dependiendo del tipo de elemento especificado, se puede aspirar a un diseño con vida útil entre 5 y 100 años.
- Barreras de vapor: En caso de encontrar daños en cubierta de techo y membranas, revisar integridad de la barrera.
- Aislación: Revisar junto barrera de vapor.

c) Ventilación (muros, techos y pisos ventilados):

- Se debe revisar que los elementos y aperturas de ventilación no se encuentren bloqueados y, si es el caso, deben ser limpiados. Esto debe realizarse cada 10 años.

d) Pisos ventilados:

- Barreras de vapor: Revisar integridad de la barrera cada 15 años

e) Elementos metálicos:

- Si estos fueron especificados adecuadamente no requieren de mantenimiento, sin embargo, es recomendable revisarlos una vez a los 6 meses y otra a los 12 meses una vez terminada la construcción. En estas inspecciones se debe buscar si en estos hay presencia de corrosión, debiendo ser remplazados inmediatamente, y se debe observar si la madera se ha visto afectada por cambios de humedad, y por tanto de hinchamiento y/o encogimiento, donde si es ese el caso, es necesaria una revisión de la condición de las fijaciones, reapretando según sea necesario.

f) Sistemas de evacuación de aguas lluvias (CCHC, 2014):

- Todos los años antes de iniciar la temporada de lluvias, personal especializado debe revisar las canaletas, bajadas, gárgolas, etc, para mantener su funcionamiento. Se considera su despeje de hojas, polvo, excrementos de aves, etc.

g) Barreras contra termitas:

- Físicas: Inspección y mantenimiento cada 10 años.
- Químicas: Reponer según instrucciones proveedor.

PROTOCOLOS DE INSPECCIÓN DE CONDENSACIÓN

Para la detección de condensación en un edificio se debe llevar a cabo una inspección visual de los elementos interiores de la vivienda en busca de lo siguiente (MINVU, n.d.):

- Manchas en muros y pisos.
- Pintura suelta o abultada en muros y cielos.
- Papeles murales sueltos, dañados o abultados.
- Presencia de hongos muros y cielos.

En caso de encontrar hongos, la superficie debe ser limpiada con un producto antihongos o con una solución de cloro con agua.



RUTINAS DE INSPECCIÓN Y MANTENCIÓN PARA CONDICIONES ESPECIALES

Para condiciones especiales y para condiciones accidentales, la más común de todas es la aparición de humedad al interior del sistema constructivo, generalmente por fallas en sistemas sanitarios de alcantarillado y agua potable. Dado este carácter accidental, no requieren de rutinas particulares, sino más bien la inmediata reparación de dichas fallas al ser detectadas. Si bien en los capítulos anteriores se han tratado los efectos negativos que los cambios de humedad pueden producir en la madera, también es fundamental tener presente los efectos que esta tiene sobre otros elementos del sistema constructivo, tales como la aislación o los revestimientos interiores, puesto que estos propensos a perder efectividad en sus respectivos roles si se ven expuestos a humedad.

Los primeros elementos a considerar para estos casos de exceso de humedad son las placas de yeso-cartón tradicionales y las resistentes al fuego, ya que al ser expuestas a humedad constante pierden color, presentan deformaciones en forma de globos, o en el peor de los casos, pierden su integridad estructural, ablandándose, deformándose o incluso pudiendo llegar a colapsar. Además, bajo estas condiciones pueden dar lugar a la formación de moho, visible en forma de puntos o manchones negros, cuyas esporas son tóxicas para los habitantes del recinto afectado. Es crítico que, en caso de detectarse humedad en estos elementos, se debe chequear si hay presencia de esta humedad también en los elementos del entramado y la aislación. (Orange Restoration, 2019; Rytech, 2020).

La aislación es otro componente de la construcción de los edificios marco plataforma que generalmente no requiere mantenimiento y que, sin embargo, puede verse afectada considerablemente por la presencia de agua o humedad, reduciendo su efectividad como aislante en el momento que su volumen de aire es remplazado por agua, o cuando se genera una aglomeración de esta con las fibras y polvo. También, ante la aparición de humedad, esta es absorbida por la aislación, haciéndose más pesada, por lo que podría caerse o reacomodarse, dando lugar a puentes térmicos. Además, la aislación puede retener humedad por largos periodos de tiempo, pudiendo incluso dar lugar a la formación de moho en las caras interiores de placas de yeso cartón. Por estas razones en casos extremos es necesario el remplazo total de esta en la zona afectada (Matthews, n.d.).

Para poder detectar la ubicación exacta u origen en estas fallas se pueden hacer inspecciones con herramientas como cámaras termográficas, con las cuales se pueden fallas constructivas en elementos detectables por puentes térmicos, lanas caídas por su aumento de peso al absorber agua, o detectar cambios de temperatura, por ejemplo, por filtraciones de agua fría o caliente, entre otras cosas.

Los elementos como barreras de humedad solo pueden presentar daños en casos de actividad sísmica considerable, en partes particulares de un edificio. Esto será analizado más adelante en la sección dedicada a sismos.

Sistemas e instalaciones

En los edificios de madera la mantención de los sistemas mecánicos, eléctrico y de plomería (MEP) es principalmente crucial en 2 variables: humedad y ventilación.

La humedad es crítica, tal como ha sido señalado en los capítulos anteriores, ya que esta puede alterar a los elementos de madera que componen a la estructura de madera, alterando sus dimensiones, propiedades mecánicas, y propensión al ataque de hongos y termitas.

En casos de detectar fugas de agua o una presencia considerable de humedad, es fundamental inspeccionar todos los elementos del paquete constructivo donde se dio y expandió la falla para encontrar su causa u origen y repararla, en conjunto con todos los elementos afectados por esta. Para mantener la salud de los usuarios y evitar gastos excesivos de reparación es que es necesario actuar lo antes posible en caso de la aparición de fallas en sistemas de plomería o ventilación.

La ventilación es particularmente crítica también ya que, como el objetivo de construir en madera es la sustentabilidad y la eficiencia energética, las construcciones deben ser lo más herméticas posibles, por lo que requieren de una ventilación constante, idealmente por medio de sistemas mecánicos pasivos o activos, para mantener el confort interior y evitar la contaminación del aire interior por exceso de CO₂, proliferación de moho y hongos, etc.

Estos deben ser inspeccionados, mantenidos, reparados o remplazados según las especificaciones técnicas de cada sistema.



Fuego

a) Sistemas pasivos

Para anticiparse a casos de incendios, toda construcción debe cumplir con las exigencias mínimas de seguridad asociadas a la resistencia a fuego, establecidas en la O.G.U.C dentro del título 4: de la arquitectura, en el capítulo 3: de las condiciones de seguridad contra incendios. En los artículos 4.3.3 y 4.3.4 se establece que, según el tipo de uso, número de pisos, superficie, y densidad de carga de combustible, los elementos soportantes verticales y horizontales, muros, techumbres y escaleras deben cumplir con requisitos de resistencia al fuego. Para esto, cada elemento, entendido como una solución constructiva, debe contar con un ensayo de laboratorio, basado en la Norma NCh 935/1- Ensayo de resistencia al fuego - Parte 1: Elementos de construcción general, que avale el cómo cumple con las exigencias de resistencia a fuego (MINVU, 2018a).

Entonces, para asegurar la resistencia al fuego de un edificio durante su operación, es clave velar por mantener ante todo evento la integridad de las soluciones constructivas. En los edificios de entramado de madera, dado que estos están compuestos por múltiples piezas de madera de secciones menores, la sección de estas está enfocada totalmente en estructurar el sistema, por lo que no puede verse reducida al carbonizarse por la acción del fuego. Es por esto que se utilizan revestimientos, como por ejemplos placas yeso-cartón, que asumen el rol de retrasar la carbonización de los elementos del entramado, adecuando a la solución constructiva de acuerdo a lo establecido en la OGUC. Además, estos también apoyan en el control del aumento de la temperatura y paso de gases de un lado al otro de la

solución, y son complementados por todos los otros elementos como placas estructurales, aislación, barreras, etc. Por ello, es crítico que estos sean adecuadamente mantenidos y reparados en caso de encontrarse fallas.

b) Sistemas activos

Si bien para los edificios de uso residencial, que constituyen el principal enfoque de este documento, actualmente no se les es exigido por norma contar con sistemas de protección activo como sistemas de rociadores, en el extranjero para los edificios residenciales de mediana altura estos están siendo incorporados para apoyar –en ninguna manera remplazar o compensar- a las soluciones constructivas.

En su investigación sobre las modificaciones a las normas de construcción en Australia para permitir la construcción de edificios de 8 pisos en madera, Paul England señala que la utilización de estos sistemas mejora considerablemente las condiciones de seguridad para los usuarios de edificios de mediana altura en madera cuando se les compara con la de otros edificios similares, pero de materiales no combustibles que no hacen uso de estos sistemas (England & Iskra, 2016).

En el International Building Code (IBC) de Estados Unidos, se establece que, según uso, superficie y tipo de soluciones constructivas, un edificio de madera puede ser diseñado de 4 pisos de altura, tanto desde su primer piso como sobre un podio (otro tipo de estructura que cuente con un elemento horizontal que haga de cortafuegos entre ambos tipos de estructuras), pero que al considerar un sistema de protección activo mediante el uso de rociadores, este puede aumentar su cantidad de pisos en un piso adicional

(International Code Council, 2011; WoodWorks, 2016). Este sistema de rociadores debe registrarse por la norma norteamericana NFPA 13: Standard for the Installation of Sprinkler Systems. Otro ejemplo es el National Construction Code (NCC) de Australia, donde todos los edificios que ocupen elementos estructurales de madera, y que sean de 4 o más pisos y de una altura total menor a 25 metros, deben contar con sistemas de protección activos como rociadores, acogidos a norma AS 2118.4-1995 (Wood Solutions, 2016).

Considerando lo anterior, a continuación, se exponen a modo de referencia los protocolos de mantención para sistemas activos de protección contra el fuego en edificaciones de tipo residencial, asociados a lo descrito en la NFPA 25: Standard for the Inspection, Testing, and Maintenance of Water-Based Fire Protection Systems. Cabe destacar que, la norma chilena NCh 2095/6 Protección contra incendios – Sistemas de rociadores – Parte 6: Recepción del sistema y mantención, establecida en la O.G.U.C para la mantención de sistemas de rociadores, en su artículo 5.1 exige que los sistemas de rociadores instalados deben mantenerse de acuerdo a lo establecido en la NFPA25 (National Fire Protection Association, 2016) (INN-CHILE, 2001).

Todo el contenido a exponer en esta sección es una síntesis de la norma NFPA 25 y en ninguna manera la reemplaza. Su fin es informar en términos generales sobre los protocolos a tener en cuenta al momento de planificar edificios de este tipo, con un enfoque específico en los sistemas de rociadores más comunes en edificios residenciales de madera, es decir, los rociadores con tubería húmeda. Para la elaboración de un plan de inspección,

testeo y mantenimiento definitivo, referir a NFPA 25.

En términos generales, para el sistema de rociadores contra incendio en un edificio de madera de mediana altura se deben realizar rutinas de inspección, testeo y mantención. Estas deben hacerse principalmente en base a los siguientes componentes: Rociadores, cañerías, válvulas, alarmas, elementos para evitar el congelamiento del agua, elementos de sujeción o apoyo, y señaléticas.

La administración del edificio debe tener toda la literatura del fabricante de cada tipo de componente y equipo del sistema de protección contra incendios para así, al momento de llevar a cabo las distintas rutinas asociadas a mantención, facilitar y controlar correctamente dichos procedimientos.

De acuerdo a lo establecido en la norma NFPA 25, en su capítulo 5: Sistemas de rociadores, las rutinas de inspección y mantención del sistema en general se realizan anualmente, y se deben revisar anualmente los siguientes elementos (National Fire Protection Association, 2016):

- Rociadores
- Cañerías
- Elementos de sujeción, refuerzo y apoyo
- Señalética
- Heat tracing: Corresponden a los elementos utilizados para el control de la temperatura interior de las cañerías. Su objetivo es que esta no baje de los 4°C, evitando que el agua aumente su volumen o se congele, evitando obstrucciones y fallas en las cañerías. Deben ser mantenidos según las instrucciones del fabricante.

Todos los elementos instalados en espacios ocultos, por ejemplo, sobre cielos falsos, no requieren ser inspeccionados. Elementos en espacios no ocultos, pero de difícil accesibilidad deben ser inspeccionados durante apagados programados generales del sistema.

Para la inspección de estos se debe contar con las herramientas necesarias para, según corresponda, poder remplazar o reposicionar unidades. En cada inspección se debe contar con al menos 6 rociadores de repuesto.

Para los sistemas de válvulas, se requieren de rutinas específicas, expuestas en la NFPA 25, en el capítulo 13: Componentes comunes y válvulas. La frecuencia de estas rutinas de inspección dependen del tipo de elemento, y requieren examinar lo siguiente (National Fire Protection Association, 2016):

- Medidores (cada 5 años)
- Dispositivos de supervisión de señales (cada 3 meses)
- Válvulas de control (cada 4 meses)
- Válvulas de alarma (cada 3 meses)
- Válvulas anti-retorno (cada 5 años)

En cuanto al sistema completo, una vez al año se debe llevar a cabo un test de drenaje. Los resultados de este serán usados para verificar si hay una presión y volumen de agua apropiados en el sistema de aspersores para incendio. Se debe realizar también un testeado de los sistemas anti-sabotaje mediante la verificación de señales recibidas en paneles de control de alarmas y mediante la manipulación de la válvula en su rango completo de movilidad. Además, se inspeccionará la conexión del departamento de bomberos para verificar que no esté obstruida y que las tapas sean

adecuadas (National Fire Protection Association, 2016).



Termitas

Como fue presentado anteriormente en el capítulo 3, las termitas presentes en Chile anidan en lugares diferentes dependiendo de la especie: las termitas de madera húmeda (TMH) y las termitas de madera seca (TMS) anidan dentro de la madera, y las termitas subterráneas habitan en bajo el suelo. Es por esto que los métodos de detección y de eliminación depende directamente de la especie, donde el caso de las TMH y TMS se debe actuar sobre la construcción afectada, y para las TS en el terreno donde se ubica el edificio, y en estas últimas, dependiendo del nivel de infestación, puede llegar a ser necesaria la revisión de los alrededores e incluso una zona de la región o provincia (MINVU, 2017). En caso de daños a la edificación, una vez eliminada la presencia de termitas se puede proceder a la reparación.

Dentro de los protocolos de mantención del edificio de madera, tal como ha sido señalado anteriormente, el control de la humedad es crítico no solo para preservar sus cualidades estructurales y evitar la aparición de hongos, es también crítico porque para las termitas de madera húmeda (TMH) requieren de ambientes húmedos para sobrevivir, y porque las termitas subterráneas (TS), a pesar que normalmente aniden en el suelo natural, pueden hacer nidos satélites en construcciones con presencia de humedad (MINVU, 2017).

La existencia de una infestación de termitas es generalmente perceptible una vez que esta ya se ha extendido considerablemente por largos periodos de tiempo, ya que los daños producidos por estos insectos no son visibles al inicio de su infestación. Esto por esto que es ideal llevar a cabo inspecciones en el terreno, incluso desde antes de ejecutar el proyecto, para detectarlas y

controlarlas temprano, lo cual representa costos considerablemente menores a su detección tardía (MINVU, 2017).

Las TMS y TMH son detectables por la presencia de sus fecas, acumuladas en forma de montículos fuera de los orificios de expulsión de las galerías. Cuando los daños son mayores las galerías son cada vez más superficiales, produciendo su colapso, exponiendo el interior de la madera. Las TS son identificables por la presencia de galerías externas de barro que usan para acceder desde el exterior hasta la madera (MINVU, 2017).

Algunos métodos efectivos complementarios para la hallar infestaciones de termitas son termitas son mediante el uso de detectores como:

- Detectores de emisiones acústicas: Captura los distintos sonidos emitidos por las termitas al arrancar fibras de madera, o las alertas de peligro de termitas soldado cuando golpean sus cabezas. Estos sonidos son amplificados y filtrados por un transductor para ser interpretados por un operador (MINVU, 2017).
- Medidores de humedad: En caso de detectar la infestación de termitas en un edificio, dado que estas buscan lugares húmedos, monitorear la presencia de humedad en elementos constructivos como muros, pisos o cielos puede permitir encontrar sectores con mayor probabilidad de infestación más acotados (MINVU, 2017).
- Cámaras termográficas: Las termitas al digerir la madera y procesar la celulosa estas generan calor, alterando los patrones normales del muro, cielo o piso observable con la cámara termográfica, permitiendo

ubicar con mayor precisión donde estas están actuando (Rice, n.d.).

Dado que las distintas especies habitan en lugares diferentes, requieren de procesos de supresión diferentes para poder eliminar las colonias completas. Para las termitas de madera seca y de madera húmeda se puede recurrir a las siguientes opciones para su eliminación (MINVU, 2017) (Canadian Wood Council, 2001):

- a) Plaguicidas localizados: Es un tratamiento que solo se puede usar en etapas tempranas de infestación, cuando esta es menos difícil de localizar, y consiste en la inyección de un agente líquido o espuma en la pieza afectada. Esta inyección puede ser directamente los orificios realizados por las termitas, o mediante la perforación de la pieza para la posterior inyección del agente a través de esta. Este procedimiento requiere monitoreos posteriores y de iteraciones adicionales hasta la eliminación completa de las colonias de termitas. El agente plaguicida utilizado debe ser autorizado en el Instituto de Salud Pública (ISP)
- b) Reemplazo de piezas: En caso que la infestación solo haya afectado piezas determinadas de la construcción, estas pueden ser removidas y reemplazadas para evitar la expansión de la colonia. Las piezas retiradas deben ser desechadas en lugares especializados donde se manejen los protocolos adecuados y autorizaciones pertinentes para el manejo de este tipo de agentes (MINVU, 2017).
- c) Fumigación: Este tipo de solución requiere de servicios especializados autorizados y certificados, en el caso de Chile como Empresa Aplicadora de Plaguicidas de Uso Sanitario y Doméstico (EAPUSYD). Esta puede ser

considerada cuando la infestación sea de una escala mayor a las tratadas en las alternativas anteriores, o cuando las colonias no sean de fácil acceso para extracción o intervención de elementos puntuales. Consiste en el uso de gases insecticidas en el edificio completo, por lo que requiere que el edificio sea cubierto por completo para poder contenerlos, y que los usuarios de este y animales lo desalojen completo por al menos 2 a 3 días. La principal desventaja de este método es que actúa solo sobre las colonias presentes en este y no provee protección residual, pudiendo volver a ser infestado.

- d) Tratamiento de calor: Al igual que el caso de la fumigación, requiere de servicios especializados autorizados y certificados, puede ser considerado para las mismas condiciones de infestación, y requiere del desalojo del edificio completo. Consiste en, mediante el uso de quemadores de gas propano, elevar la temperatura interior de la estructura de madera a 50°C por un periodo de 30 minutos, para lo cual es necesario subir la temperatura interior del edificio a aproximadamente 70°C (similar a un sauna) por al menos una hora. Para esto se requiere de envolver al edificio completo en un material aislante, y proteger todos los elementos y artefactos sensibles al calor. Este método tampoco protege de la reinfestación de colonias de termitas (Canadian Wood Council, 2001).

Para más información sobre los procedimientos legales para llevar a cabo las últimas 2 alternativas, revisar el manual de "Recomendaciones para la prevención y control de ataques de termitas en edificaciones" publicado por el Centro UC de Innovación en madera.

Para la supresión de las termitas subterráneas se requiere de métodos con un tiempo más extendido para asegurar la eliminación de las colonias en el suelo alrededor de la construcción. El método recomendado para esto, el cual requiere ser llevado a cabo por profesionales especializados y certificados, es la utilización de cebos, debido a su nivel de precisión y al ser menos dañino para el medio ambiente, que consiste en la instalación de dentro de tubos o trampas en el suelo, dispuestas en intervalos de 3 a 5 metros alrededor del edificio. Estas piezas de madera, en un principio de madera sin tratamiento, son utilizadas para monitorear la presencia de las colonias de termitas en el área. Una vez que verificada la actividad de termitas, las piezas son remplazadas por otras tratadas con químicos de acción lenta, con el objetivo de que las termitas obreras al trasladar su alimento de vuelta a la colonia, este venga contaminado con el químico, cuya acción puede eliminar a la colonia en un periodo entre 6 y 12 meses. Su efecto se comienza a ver cuándo las termitas comienzan a cambiar de piel. Todos los insectos tienen exoesqueletos que deben ser renovados; tejido orgánico, duro y rígido que recubre exteriormente el cuerpo; pero debido a los agentes en el cebo no podrán realizar la muda y por ende comenzarán a enfermar y morir sin asociar esto al producto (Canadian Wood Council, 2001; MINVU, 2017).

Para el control del reingreso de termitas subterráneas al edificio se puede hacer uso de inyecciones de productos insecticidas bajo el suelo de la edificación para formar una barrera química estas. Estas se realizan en el perímetro exterior del edificio distanciadas 30cm una de la otra.

Otra forma de aplicar barreras químicas es mediante la excavación de zanjas de 30 cm

de profundidad y 35 cm de ancho alrededor de la construcción, para verter en estos 5 litros de insecticida por metro lineal de zanja, y luego rellenas con tierra. La disposición de la tierra removida para excavar la zanja es clave, ya que esta puede tener presencia de termitas. Las mayores ventajas de estas últimas es que no requieren perforar al interior bajo la edificación, son menos costosas y más rápidas, y sus desventajas se asocian principalmente a conflictos de interferencias con otros elementos de la construcción como cañerías (MINVU, 2017).

El manejo de las termitas es un proceso continuo que requiere vigilancia constante y mantenimiento, el que se traduce en reducción de problemas, molestias y gastos. Así, un protocolo de prevención en el tiempo debe contar con a lo menos (MINVU, 2017):

- a) Realización de una inspección profesional cada año.
- b) Eliminar desechos húmedos para evitar ambientes favorables para la presencia de termitas alejados de las áreas edificadas.
- c) Antes, durante y después de la construcción, no enterrar desechos de madera, especialmente cerca de la edificación. Asegúrese de retirar toda madera que quedara después de la construcción y no almacene elementos de madera cercanos a la vivienda.
- d) En caso de remover árboles o arbustos, retire todos los residuos enterrados como tocones o raíces, y disponga de ellos adecuadamente según sea requerido.
- e) Esté atento a la posible aparición de grietas en fundaciones durante el proceso de asentamiento de las mismas, que pudieran abrir nuevas rutas

de acceso en el caso de termitas subterráneas.

- f) Reparar rápidamente cualquier filtración que se presente en la techumbre o instalación sanitaria, de modo tal que la humedad no penetre a la parte interior de la vivienda y genere condiciones favorables para el ataque de termitas.
- g) Evitar la acumulación de humedad en la proximidad de las fundaciones de su casa, como es el caso de riego de plantas adyacentes a los muros de la edificación. Desvíe el agua con sistemas de drenaje apropiado, canaletas y cortagoteras.
- h) Mantener la integridad de las barreras físicas tales como partículas o mallas. No deposite tierra sobre la barrera ni permita que las raíces crezcan en ellas.
- i) Corregir en baños o logias problemas de mala ventilación, cañerías que goteen, goteras de la condensación de acondicionadores de aire y todas aquellas fuentes húmedas que puedan atraer termitas.
- j) No almacenar madera, cajas de cartón u otros materiales a base de celulosa en áreas de registro.
- k) Impedir que los matorrales, enredaderas y otras plantas crezcan y cubran las salidas de ventilación.
- l) En caso de acopiar madera, evite el contacto de esta con el suelo. Disponga una distancia de a lo menos 50 cm entre el suelo y la madera

Sismos

Tras un evento sísmico es necesario la inspección del edificio completo para determinar el nivel de daños posibles que este pudiera haber sufrido, para así poder determinar la magnitud de los mismos y, por tanto, de las reparaciones necesarias.

Se presume que el edificio ha sido apropiadamente diseñado y calculado. No se abordarán casos de fallas por deficiencias en esto, por ejemplo, el deslizamiento de un muro por la mala o inexistente sujeción de la solera inferior del muro a la fundación o entrepiso.

En cuanto a los costos asociados a las rutinas de inspección y reparación tras eventos de este tipo, hoy en día las investigaciones y levantamientos sobre estos procedimientos son escasos.

Un proyecto que ha ayudado a mejorar la imagen de la construcción de entramado de madera en mediana altura es el NEESWood Capstone Project, realizada por la National Science Foundation (NSF) y llevada a cabo por su equipo NEESWood (Network for Earthquake Engineering Simulation), en colaboración con múltiples empresas y el gobierno de Japón en el año 2009. En esta se estudió el comportamiento ante sismos de un edificio de madera con estructura de entramado de madera marco-plataforma de 7 pisos, con un total de 1400 m². El prototipo escala 1:1, incluyendo terminaciones interiores, fue diseñado para aguantar terremotos de gran intensidad, incorporando en su estructura el sistema ATS (anchor tie-down system), y fue ensayado en la mesa sísmica de E-Defense, simulando un sismo de 7,5° Richter que puede ocurrir una vez cada 2500 años (National Science Foundation, n.d.). Las únicas fallas que presentó el edificio tras el ensayo fueron el

agrietamiento menor en algunas placas de yeso-cartón y un retiro mínimo de clavos, sin producir daño estructural (Simpson Strongtie, n.d.).

Con este ensayo y la visibilidad de la construcción de edificios de mediana altura en madera en el extranjero, a pesar de la ausencia de nuevas investigaciones sobre costos de rehabilitación post sismo, se puede presumir que con el avance tecnológico de la madera ligado a un buen diseño (tanto estructural como arquitectónico) y un buen plan de mantenimiento, se derivará en un edificio eficiente sin costos considerablemente mayores a los de uno construido con otra materialidad.

Para la elaboración de protocolos y rutinas de inspección, y de lineamientos generales de reparación post-sismo, este sub-capítulo del documento se apoya sintetizando contenidos de la publicación del Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering (CUREE) titulada Guías generales para estimación y reparación de daños ocasionados por sismos en edificios residenciales de entramado tipo marco plataforma (CUREE, 2010). Es importante señalar que dicha publicación trabaja solo con sistemas de muros convencionales, revestidos en al menos una de sus caras con placas de yeso-cartón y en la otra con estuco, y también para los que cuenten con solo una placa estructural, y no está enfocada en los siguientes tipos de construcciones:

- Edificios configuraciones de muros no convencionales.
- Edificios con plantas libres de pocas particiones interiores.
- Edificios con frentes con frentes abiertos, es decir, que sus fachadas

tienen una presencia escasa o nula de muros estructurales.

- Edificios con revestimientos exteriores distintos a estuco.

A pesar que dicha publicación no considere otros tipos de terminación exterior, como el uso de cámaras ventiladas con otros tipos de revestimiento, o el uso de más de una placa estructural, todos los protocolos de inspección y reparación asociados a los otros tipos de elementos del edificio si pueden ser considerados de manera más general para el tipo de construcción abordado en el presente documento.

Toda inspección en este tipo de eventos debe ser documentada y fotografiada de todas las fachadas y recintos, incluyendo ubicación y severidad del daño, considerando también los casos donde no haya daños visibles. Al momento de llevar a cabo la inspección, se recomienda no inspeccionar sótanos o entre techos, puesto que pueden presentar riesgos importantes. Por esto, si en la inspección del resto del edificio se concluye que es necesaria una inspección más profunda por parte de personal capacitado, este puede proceder a revisar dichos espacios.

Ante los empujes que ejerce un sismo sobre este tipo de edificios, se generan en los muros esfuerzos de volcamiento, deslizamiento y cizallamiento. En un edificio apropiadamente diseñado y calculado, el último de estos esfuerzos será el principal responsable de las fallas de elementos no estructurales. Es fundamental entender que las fallas visibles en revestimientos como placas yeso-cartón, tales como la o su deformación agrietamiento no implican necesariamente la presencia de daño estructural. Los primeros indicadores de daño severo a un edificio tras un sismo pueden ser observables desde el exterior

en las elevaciones de este, y corresponden a:

- La inclinación del edificio (desaplomo)
- Cizallamiento de puertas y ventanas: Inclinación de los elementos verticales que definen el vano (lado superior desplazado respecto a su posición original)
- Aparición de daños o separaciones en encuentros entre distintos partes de la construcción, tales como techos y pisos discontinuos (por ejemplo, en medios pisos), o en encuentros entre distintas alas del edificio, o del mismo con ampliaciones, garajes, chimeneas, entre otros.

Para el levantamiento de daños al interior del edificio, los primeros elementos a inspeccionar deben ser los muros, puesto que estos son los principales encargados en resistir los esfuerzos ocasionados por el sismo. De los componentes del muro, en caso que el sismo haya sido lo suficientemente fuerte para producir daños, los más susceptibles a estos son los revestimientos interiores como placas de yeso-cartón, debido a su carácter rígido y frágil, pudiendo presentar desde daños cosméticos menores hasta daños mayores que afecten la integridad de dicha placa. Las placas estructurales, generalmente OSB o terciado, son utilizadas como el principal componente en otorgar resistencia al muro ante los esfuerzos generados por un sismo, por lo que estas son las siguientes en presentar daños en eventos sísmicos de mayor intensidad. En la gran mayoría de los casos los daños se concentran en estos elementos, y el daño a los elementos del entramado de madera del muro, debido a su carácter flexible, es poco común. Tras la inspección y un adecuado

análisis del estado del edificio y sus partes, en caso de sospechar que los componentes del entramado presenten daños, dado que estos se encuentran al interior de los paquetes constructivos, la determinación del daño y reparación del mismo solo puede ser apropiadamente determinada tras una inspección invasiva, donde se remuevan todos los elementos más externos como barreras de vapor, placas de yeso-cartón y otras terminaciones. De no presentarse indicadores de daños estructurales significativos, el daño a elementos superficiales deberá considerarse cosmético y ser reparado.

En un tramo de muro ininterrumpido la mayoría de los esfuerzos son distribuidos uniformemente, sin embargo, en las esquinas de vanos de puertas y ventanas se producen concentraciones de esos esfuerzos, dando origen en estos puntos a grietas en los elementos de terminación. Las grietas y fisuras en revestimientos interiores generalmente se encontrarán presentes en lugares similares en ambas caras del muro, y en edificios de más de un piso tendrán una mayor concentración y tamaño en el piso más bajo. También se pueden producir grietas o rupturas a lo largo de esquineros para yeso-cartón, en encuentros muro-cielo o muro-piso, en esquinas entre muros y cielos, y a lo largo de cintas de unión entre placas de yeso-cartón. A medida que aumenta la intensidad del sismo estas grietas se extienden en su largo y grosor, produciendo también en algunos casos la formación de grietas en **forma de "X", particularmente en placas de terminación interiores entre ventanas.**

En casos severos, es posible que las placas de yeso-cartón se desprendan o suelten del entramado o placas más interiores, motivo por el cual, en casos que estas no se hayan desprendido, se debe revisar si presentan

protuberancias o deformaciones, palpándolas para sentir si estas y la placa estructural se han soltado de los pies derechos del entramado.

Otro buen indicador de la severidad del daño producido es si en los muros hay presencia residual de los efectos del cizallamiento. Cuando estos resultan en la inoperatividad o deficiencia de la apertura y cierre de puertas y ventanas, o en la ruptura de vidrios de ventanas, es indicativo de la posibilidad de daño estructural. Las puertas y ventanas abatibles son especialmente sensibles al cizallamiento del edificio, por lo que, si hay un patrón consistente de las fallas antes mencionadas en este tipo de elementos, acompañado de daño a muros adyacentes o en el mismo eje, es indicativo de la posible presencia de daño estructural.

En cuanto a los casos particulares de techos, cielos y entrepisos, sus daños tras eventos sísmicos son esencialmente no estructurales, siendo los más comunes el desalineado o caída de tejas, daños en terminaciones y aparición de grietas menores en cielos en esquinas cóncavas. En zonas de fuerte actividad sísmica se puede producir daño estructural en techos y entrepisos cuando estos presentan planos discontinuos, puesto que esto representa una irregularidad en la transmisión horizontal de las cargas del sismo cuando actúan sobre el edificio. Estas pueden ser, por ejemplo: medios pisos, transición de sectores de un piso al piso superior siguiente, ampliaciones, etc. En edificios de más de 2 pisos de altura, cuando el diseño del proyecto tiene esquinas cóncavas en planta, por ejemplo, plantas con forma de L, T, U, etc, se puede producir daño estructural en estas, es decir, en el encuentro de las distintas alas del edificio, puesto que estas se mueven en direcciones levemente diferentes. Este tipo de daños

tienden a ser mayores a medida que incrementan la cantidad de pisos del edificio, por lo que son constituyen puntos críticos a la hora del diseño y cálculo estructural.

En caso de sismos, los sistemas MEP suelen ser bastante robustos y no sufren daños serios. Sin embargo, cuando su soporte depende de su apoyo o fijación a elementos rígidos del edificio, si este contrae daños estructurales severos, estos sistemas también se verán afectados, pueden producirse fallas considerables en ellos, pero particularmente críticas en los casos de producir fugas de agua o gases (CUREE, 2010).

Una vez finalizada la inspección, deberá realizarse una evaluación por parte de un especialista en estructuras si se encontraron las siguientes fallas:

- Los muros, afectados por cizallamiento, se encuentran visiblemente desaplomados, o si puertas y/o ventanas se han vuelto inoperables.
- Placas yeso-cartón se abultan o presentan protuberancias, se encuentran aflojadas, o se han desprendido de la estructura de entramado.
- Hay presencia de daño visible en el primer piso.
- Presencia de daños en encuentros entre distintas partes de un edificio como techos y pisos discontinuos (por ejemplo, en medios pisos), o en encuentros entre distintas alas del edificio, o del mismo con

ampliaciones, garajes, chimeneas, etc.

- Pisos con aparición de tramos hundidos o que generen una sensación de rebote al pisarlos.
- En techos, hundimiento en secciones de la cumbrera.
- Aparición de patrones de grietas, huecos o separaciones en encuentros entre terminaciones de pisos.

Reparación

Para las fallas no estructurales más comunes, las reparaciones pueden

a) Placas yeso-cartón en muros:

- Si se encuentran fracturadas, deben ser reemplazadas completamente.
- Si se han aflojado significativamente, se deben instalar nuevos elementos de fijación alrededor del perímetro y a lo largo de las uniones que presenten señales de movimiento.
- Si se han hecho visibles las cabezas de fijaciones como tornillos o clavos, se debe instalar un nuevo elemento de fijación adyacente al que presentó la falla, y volver a fijar o remover el original.
- Las terminaciones de las áreas reparadas deben ajustarse a las de áreas adyacentes.

b) Placas yeso-cartón en cielos:

- Las terminaciones de las áreas reparadas deben ajustarse a las de áreas adyacentes.
- Para grietas formadas a lo largo de esquineros o uniones entre paneles, se debe remover la cinta de unión, para luego instalar una cinta para juntas nueva, emparejar la superficie

y aplicar la terminación correspondiente.

- Para grietas de menos de 15cm de largo, y de un grosor no superior a medio milímetro, pueden ser parchadas usando cinta para juntas y pasta muro,
- En caso de producirse grietas de más de 15 cm y/o de espesor superior a medio milímetro, en el sector donde esta se produjo se **debe remover un tramo de 32x48'** (81x120cm) entre las vigas o distanciadores más cercanos a la grieta y que sujetan la plancha. Este tramo debe ser remplazado, para luego emparejar la superficie y aplicar la terminación correspondiente.

c) Encuentros entre elementos de madera expuestos y terminaciones:

- Para daños cosméticos menores, se debe limpiar la zona afectada para aplicar la terminación que corresponda al elemento de madera y la terminación que se encuentra con este.
- En caso que se hayan producido grietas o separaciones en sellos o pasta muro, estos deben ser removidos para limpiar la separación, y luego re-sellar la unión. Luego, se deben aplicar las terminaciones necesarias para volver a su estado original.
- Este tipo de encuentros siempre puede presentar la aparición de grietas o separaciones debido a los posibles cambios dimensionales de la pieza de madera por su carácter higroscópico.

d) Techumbre:

- Tejas u otros elementos de cubierta que se hayan soltado o desalineado pueden ser removidas y re-instaladas. En caso de detectar daño a la barrera de humedad (fieltro, typar, tyvek o técnicamente equivalente), esta debe ser removida y remplazada.
- Elementos de flashing dañados deben ser reparados remplazados.

e) Terminaciones de piso:

Dependen completamente del tipo de terminación.

- En pavimentos de madera, estos generalmente requerirán la reparación o remplazo de las piezas afectadas. La reparación completa o restauración de la terminación de piso generalmente no es necesaria.
- Para pavimentos de baldosas (cerámicas, vinílicas, o piedra) pueden ser resueltas con tan solo remplazar las piezas dañadas.
- En pisos flotantes generalmente se requerirá el remplazo completo de la pieza dañada, independiente de si es un elemento de menores dimensiones o una plancha/lámina de dimensiones mayores.

En caso de determinarse la presencia de daño a elementos estructurales, todo daño de este tipo solo puede ser reparado con el asesoramiento de un especialista en estructuras.

f) Entramado de muros:

- Cuando los elementos del entramado presenten daños, las piezas pueden ser remplazadas, re-fijadas, o se puede instalar un

elemento de apoyo junto a la pieza dañada.

- Cuando el edificio se haya desplomado de forma permanente, desplazando la parte superior de un muro 1/2 pulgada (1,27 cm) respecto a la altura total del muro (se presume un muro estándar de 244 cm), se deben remover las terminaciones de los muros afectados, realinear el

edificio, y reinstalar las terminaciones.

g) Entramado de pisos:

- Rara vez se pueden producir daños en este tipo de elementos, y su reparación en dichos casos debe ser realizada de acuerdo al criterio del especialista de estructuras.

CONCLUSIONES

Se puede concluir, tanto con las obras de construcción en madera históricas como con obras contemporáneas, que la madera permite el diseño de proyectos sostenibles y con una vida útil extendida, mientras este diseño sea consciente de las cualidades del material, como protegerlo, y cómo mantenerlo, pudiendo incluso llegar a los cientos de años.

Es crucial entender que, teniendo una mirada sustentable, cualquier edificio requiere considerar durante las etapas de diseño el cómo este va a funcionar, tanto en su huella de carbono y gastos energéticos como en sus gastos de mantención, sea para el edificio construido o para cada uno de los sistemas e instalaciones que este contiene.

Con el incremento de la experiencia y cantidad de proyectos de mediana altura en madera a nivel internacional, sumado al aporte científico de la academia y otras

organizaciones, se demuestra que este tipo de edificios pueden llegar a contar con costos de operación y mantención similares e incluso menores a los de edificios estructurados en otras materialidades.

El desafío está en la difusión de conocimientos y capacitación de actores que pueden desarrollar y ejecutar estos tipos de proyectos, para así darle la oportunidad a este material y apuntar a un crecimiento más sustentable.



BIBLIOGRAFÍA

- ArquitecturaGalpones.cl. (n.d.). *Galpón Wetzel Mueblería*. Retrieved January 6, 2021, from <http://arquitecturagalpones.cl/fichas/WETZELMUE-DF.pdf>
- Australian Building Codes Board. (2015). *Durability in buildings including plumbing installations. Handbook* (Segunda edición). <https://www.abcb.gov.au/Resources/Publications/Education-Training/Durability-in-Buildings-including-Plumbing-Installations>
- Baeza, M., Briones, R., & Hernández, G. (2002). Retención mínima de sales CCA en madera de pino radiata que protege del ataque de la termita subterránea. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 4(2), 186–192. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2002000200009>
- Broto, Carles. (2005). *Enciclopedia Broto de patologías de la construcción*. Structure.
- BSI. (1998). *BS EN 519:1995 Structural timber—Grading—Requirements for machine strength graded timber and grading machines* (1995th ed.). British Standards Institution. [http://home.aktor.qa/External%20Documents/Intenational%20Specifications/British%20Standards/BS%20EN/BS%20EN%2000519-1995%20\(1998\).pdf](http://home.aktor.qa/External%20Documents/Intenational%20Specifications/British%20Standards/BS%20EN/BS%20EN%2000519-1995%20(1998).pdf)
- Canadian Wood Council. (2000). *Moisture and Wood-Frame Buildings*.
- Canadian Wood Council. (2001). *Wood termite control—Wood Frame Buildings* (No. 3; Building Performance Bulletin). Canadian Wood Council.
- Cartwright, K. St. G., Findlay, W. P. K., Great Britain, & Department of Scientific and Industrial Research. (1958). *Decay of timber and its prevention*. H.M.S.O. for Dept. of Scientific and Industrial Research.

- CCHC. (2014). *Manual de uso y mantención de la vivienda*. Cámara Chilena de la Construcción. https://cchc.cl/uploads/archivos/archivos/Manual-de-Uso-y-Mantencion-de-la-Vivienda_CChC_enero_2014.pdf
- Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C., Ruff, A., Vinke, K., Liu, Z., Reck, B., Graedel, T. E., & Chellnhuber, H. (2020). Buildings a global carbon sink. *Nature Sustainability*, 10.
- CMHC Canada Mortgage and Housing Corporation. (2002). *Moisture and durability*.
- CMPC Blog Piensa en Madera. (n.d.). *Templo Hōryū-ji*. Retrieved June 1, 2021, from <https://www.cmpcmaderas.com/Pensemos-en-madera/El-edificio-de-madera-m%C3%A1s-antiguo-del-mundo>
- Code de la construction et de l'habitation.** | Legifrance, (2020). <https://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do?cidTexte=LEGITEXT000006074096&dateTexte=29990101&categorieLien=cid>
- Coudert, L., Blais, J.-F., Mercier, G., Cooper, P., & Janin, A. (2013). 21—Remediation processes for wood treated with organic and/or inorganic preservatives. In F. Pacheco-Torgal, V. W. Y. Tam, J. A. Labrincha, Y. Ding, & J. de Brito (Eds.), *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste* (pp. 526–554). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857096906.4.526>
- Cowin, L. (2018). *Mass timber's striking case for sustainability*. Construction Dive. <https://www.constructiondive.com/news/mass-timbers-striking-case-for-sustainability/540755/>
- CUREE. (2010). *General guidelines for the assessment and repair of earthquake damage in residential woodframe buildings*. Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering. <http://curee.org/projects/EDA/docs/CUREE-EDA02-2-public.pdf>

- DIN 68800-3:2012-02, *Holzschutz—Teil 3: Vorbeugender Schutz von Holz mit Holzschutzmitteln*. (2012). Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/3090733>
- EN 1995—Eurocode 5: Design of timber structures, (2004).
- England, P., & Iskra, B. (2016). Australian Building code change—8 storey timber residential and office buildings. *WCTE 2016 E-Book*, 5072.
- Eriksson, E., Gillespie, A., Gustavsson, L., Langvall, O., Olsson, M., Sathre, R., & Stendahl, J. (2007). Integrated carbon analysis of forest management practices and wood substitution. *Canadian Journal of Forest Research*, 37, 671–681. <https://doi.org/10.1139/X06-257>
- Estévez, R. (2017). ¿Qué es la huella de carbono? *ecointeligencia - cambia a un estilo de vida sostenible!* <https://www.ecointeligencia.com/2017/07/huella-carbono/>
- Forest Products Laboratory. (2015). *Wood Handbook—Wood as an Engineering Material—Centennial Edition* (2010th ed.). USDA. https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr190.pdf
- Fritz, A. (2004). *La construcción de viviendas en madera*. Corporación Chilena de la Madera.
- Garay M, R., & Henriquez A, M. (2012). Tratamiento químico de acetilación en madera de *Pinus radiata*. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 14(1), 103–113. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2012000100009>
- Gysling, A., Kahler, C., Soto, D., Alvarez, V., Pardo, E., Poblete, P., Mejías, W., Bañados, J., Baeza, D., & Vergara, D. (2020). *El mercado de la madera aserrada para uso estructural en Chile* (Información y Economía Forestal, p. 124). Instituto Forestal. <https://bibliotecadigital.infor.cl/bitstream/handle/20.500.12220/29220/mercado-madera-aserrada.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Henke, K. (2009). *Arsenic: Environmental Chemistry, Health Threats and Waste Treatment*. John Wiley & Sons.

Herzog, T., Natterer, J., Schweitzer, R., Volz, M., & Winter, W. (2000). *Timber Construction Manual* (Edición: 1). Birkhäuser Architecture.

Hindemith, A. (2009). *Winsen Museum Farm*.
https://en.wikipedia.org/wiki/File:Winsenmuseum_groode_Hus.jpg

INN-CHILE (Ed.). (1987). *NCH789/1 Maderas - Parte 1: Clasificación de maderas comerciales por su durabilidad natural* (1987th ed.). Instituto Nacional de Normalización.
<http://tipbook.iapp.cl/ak/7ba2f4bd8e4ba3715cad4afabda5061914006c38/embed/view/nch7891>

INN-CHILE. (2001). *NCh 2095/6 Protección contra incendios – Sistemas de rociadores – Parte 6: Recepción del sistema y mantención*. Instituto Nacional de Normalización.
<http://tipbook.iapp.cl/ak/7ba2f4bd8e4ba3715cad4afabda5061914006c38/embed/view/nch20956#page/1>

INN-CHILE. (2003). *NCh 2824 Maderas—Pino radiata— Unidades, dimensiones y tolerancias* (2003rd ed.). Instituto Nacional de Normalización. https://kupdf.net/download/nch-2824-2003pdf_5a940f67e2b6f57b4a52362a_pdf

INN-CHILE. (2005). *NCh 1207 Pino radiata—Clasificación visual para uso estructural—Especificaciones de los grados de calidad* (2005th ed.). Instituto Nacional de Normalización.
<http://tipbook.iapp.cl/ak/7ba2f4bd8e4ba3715cad4afabda5061914006c38/embed/view/1207#page/4>

INN-CHILE. (2010). *NCh 1079 Arquitectura y construcción—Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico* (2008th ed.). Instituto Nacional de Normalización.
<http://tipbook.iapp.cl/ak/a871a9028e2d17e03ecbc8b26cef7a6b0b0b13b5/embed/view/minvu-nch01079-2008-049>

- INN-CHILE. (2012). *NCh 819 Madera Preservada—Pino Radiata—Clasificación según riesgo de deterioro en servicio y muestreo* (2012th ed.). Instituto Nacional de Normalización. <http://tipbook.iapp.cl/ak/7ba2f4bd8e4ba3715cad4afabda5061914006c38/embed/view/nch819>
- INN-CHILE. (2014). *NCh 1198 Madera—Construcciones en madera—Cálculo* (2014th ed.). Instituto Nacional de Normalización. <http://tipbook.iapp.cl/ak/f6cedab2f43b53969a80e8a264eb74d1e85512dc/embed/view/nch1198b>
- International Code Council. (2011). *2012 International Building Code*.
- International Standard. (2000). *ISO 15686-1:2000 Buildings and constructed assets—Service life planning—Part 1: General principles* (2000th ed.).
- John, S., Nebel, B., Perez, N., & A.h, B. (2009). *Environmental Impacts of Multi-Storey Buildings Using Different Construction Materials*. <https://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/8359>
- Kneifel, J. (2018). *BEES (Building for Environmental and Economic Sustainability)* [English]. National Institute of Standards and Technology. <https://www.nist.gov/services-resources/software/bees>
- Larsen, J. (2006). *Heddal Stavkirke*. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Church_Heddal_no_060815.jpg
- Lavender, E., & Sardén, Y. (2009). Maintenance and operating costs in off-site timber framed housing. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/228848970_Maintenance_and_operating_costs_in_off-site_timber_framed_housing

- Lenzen, M., & Treloar, G. (2002). Embodied energy in buildings: Wood versus concrete—reply to Börjesson and Gustavsson. *Energy Policy*, 30(3), 249–255. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(01\)00142-2](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(01)00142-2)
- Linao, L. (2013). *Iglesia Achao*. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Iglesia_de_Achao_-_fachada.JPG
- Lippke, B., Wilson, J., Emeritus, P., Meil, J., & Taylor, A. (2009). Characterizing the importance of carbon stored in wood products. *Wood and Fiber Science*, 42.
- Matthews, M. (n.d.). *Is Fiberglass Insulation Ruined if It Gets Wet?* Home Guides | SF Gate. Retrieved August 17, 2020, from <https://homeguides.sfgate.com/fiberglass-insulation-ruined-gets-wet-97851.html>
- MINVU. (n.d.). *Manual de uso y Mantenición de la vivienda. Región de Atacama*. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Retrieved August 13, 2020, from <https://docplayer.es/19829108-Region-de-atacama-manual-de-uso-y-mantenion-de-la-vivienda.html>
- MINVU. (2017). *Recomendaciones para la prevención y control de ataques de termitas en edificaciones* (2nd ed.). Centro UC de Innovación en Madera.
- MINVU. (2018a). *Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones* (2018th ed.).
- MINVU. (2018b). *Requisitos de rotulado e la madera aserrada para construcción*. Ministerio de vivienda y urbanismo. <https://csustentable.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2018/04/Rotulado-Madera-Proveedores.pdf>
- Mishra, A. (2011, April 3). Maintenance of Steel Structures and its Components for Durability. *The Constructor*. <https://theconstructor.org/structural-engg/maintenance-of-steel-structures/5624/>
- Muñoz, M. (2008). *Mantenimiento Industrial*. <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/teoria-de-maquinas/lecturas/MantenimientoIndustrial.pdf>

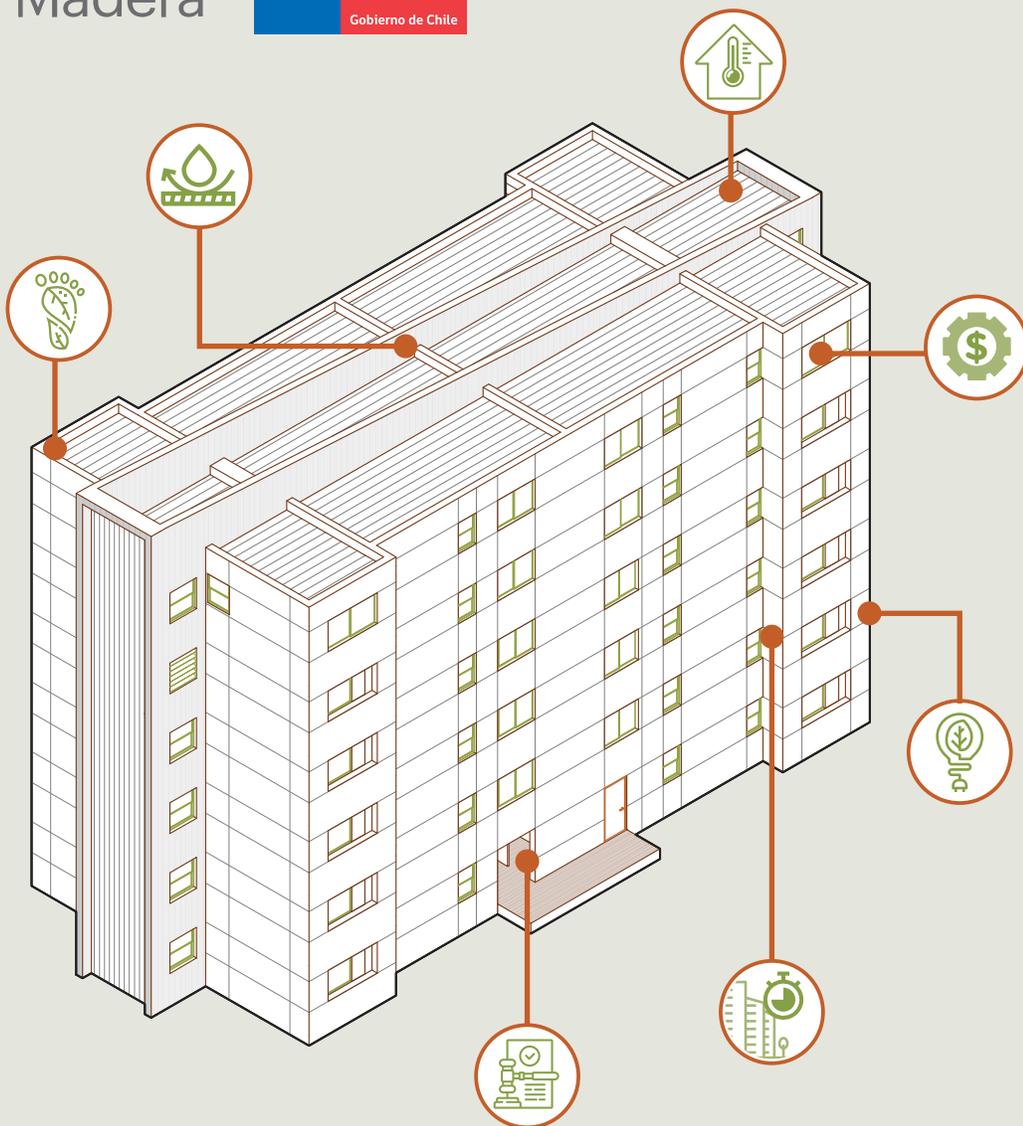
- National Fire Protection Association. (2016). *NFPA 25: Standard for the Inspection, Testing, and Maintenance of Water-Based Fire Protection Systems, 2017 Edition*.
- National Science Foundation. (n.d.). *Home—Standing Strong: 2009 NEESWood Capstone Test*. Retrieved September 10, 2020, from <https://www.nsf.gov/news/newsmedia/neeswood/>
- O'Connor, J. (2004). *Survey on actual service lives for North American buildings*. 9.
- Orange Restoration. (2019, March 13). What Should You Do If You Experience Wet Drywall? | Water Damage Tips. *Orange Restoration*. <https://orange-restoration.com/wet-drywall-san-diego/>
- Pile Wrapping—Eastern Marine Services. (2020). <https://easternmarineservices.com/commercial-marine-services/pile-wrapping/>
- Raymond, K. (2015). *Perry House*. https://en.wikipedia.org/wiki/Perry_House,_Brisbane#/media/File:Perry_House,_2015.jpg
- Rice, D. (n.d.). *Finding termites with thermal cameras*. Termicam.Com. Retrieved August 13, 2020, from <https://www.termicam.com/termites/finding-termites-with-thermal-cameras/>
- Ripa, R., & Luppichini, P. (Eds.). (2004). *Termitas y Otros Insectos Xilófagos en Chile: Especies, Biología y Manejo*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA.
- Robertson, A. B., Lam, F. C. F., & Cole, R. J. (2012). A Comparative Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Mid-Rise Office Building Construction Alternatives: Laminated Timber or Reinforced Concrete. *Buildings*, 2(3), 245–270. <https://doi.org/10.3390/buildings2030245>
- Rytech. (2020, March 24). Do I have to Replace Drywall After Water Damage? *Rytech Inc*. <https://www.rytechinc.com/blog/water-damage-drywall-replacement/>
- Sathre, R., O'Connor, J., & FPInnovations (Institute). (2013). *A synthesis of research on wood products and greenhouse gas impacts*. <http://www.deslibris.ca/ID/238842>

- Schiopu, N., & Tiruta-Barna, L. (2012). 6—Wood preservatives. In F. Pacheco-Torgal, S. Jalali, & A. Fucic (Eds.), *Toxicity of Building Materials* (pp. 138–165). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857096357.138>
- Segerstrom, C. (2018, May 16). *Timber is Oregon's biggest carbon polluter*. <https://www.hcn.org/issues/50.11/climate-change-timber-is-oregons-biggest-carbon-polluter>
- SII. (2003). *Tabla de vida útil de los bienes físicos del activo inmovilizado*. http://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/tabla_vida_enero.htm
- Simpson Strongtie. (n.d.). *Collaboration on NEES Testing*. Simpson Strong-Tie Site. Retrieved August 31, 2020, from <https://www.strongtie.com/about/research-testing-innovation/academia/nees-testing>
- Skullestad, J. L., Bohne, R. A., & Lohne, J. (2016). High-rise Timber Buildings as a Climate Change Mitigation Measure – A Comparative LCA of Structural System Alternatives. *Energy Procedia*, 96, 112–123. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.112>
- Standards Australia. (1998). *AU/NZS 1748:1997 Timber—Stress-graded—Product requirements for mechanically stress-graded timber* (1997th ed.). Standards Australia & Standards New Zealand. <https://www.saiglobal.com/PDFTemp/Previews/OSH/As/as1000/1700/1748.pdf>
- Symons, K. (2020). *Timber, carbon and the environment*. Wood Processors and Manufacturers Association.
- Tam, V. W. Y., Senaratne, S., Le, K. N., Shen, L.-Y., Perica, J., & Illankoon, I. M. C. S. (2017). Life-cycle cost analysis of green-building implementation using timber applications. *Journal of Cleaner Production*, 147, 458–469. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.128>
- 

- Tasman Insulation New Zealand. (n.d.). *Design Guide for Tropical Conditions*. Retrieved December 16, 2020, from https://tropex.co.nz/sites/default/files/product_pdfs/Insulation%20Design%20Guide%20for%20the%20Tropics.pdf
- Thyssen, M. (2002). *Casa Comunal Vikinga*. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fyrkat_hus_stor.jpg
- Timber Research and Development Association (Ed.). (2016). *Designing for durability -part 2: Principles of design*. Exova (UK).
- Trouy, M.-C. (2016). *Matériau bois – Durabilité*. 24.
- Wood Solutions. (2015). *Timber service life design. Design guide for durability*. (2015th ed.). Forest and Wood Products Australia. https://www.woodsolutions.com.au/system/files/WS_TDG_05_1_17.pdf
- Wood Solutions. (2016). *Fire Safety Design of Mid-rise Timber Buildings. Basis for the 2016 changes to the national Construction Code* (2015th ed.). Forest and Wood Products Australia. <https://www.woodsolutions.com.au/publications/fire-safety-design-mid-rise-timber-buildings>
- Wood Solutions. (2019). *Cost Engineering of Mid-rise Timber Buildings* (2019th ed.). Forest and Wood Products Australia. <https://www.woodsolutions.com.au/publications/cost-engineering-mid-rise-timber-buildings>
- WoodWorks. (2016, Agosto). *Practical, Code-Compliant Detailing for Mid-Rise Wood Structures. Detailing Considerations for Mid-Rise Wood Frame Buildings*. Lunch Seminars. <http://www.woodworks.org/wp-content/uploads/15LL11-Practical-Code-Compliant-Detailing-for-Mid-Rise-Wood-Structures.pdf>

Zaid Núñez, L. K. (2004). *Estudio del Biodeterioro en Madera de Eucalyptus globulus Lab. Por método gravimétrico* [Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales].
<http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/105048>





GUÍA DE OPERACIÓN DE EDIFICACIONES EN MADERA