

6. Degradación de Maderas

□ 6.1 Introducción

La madera es uno de los materiales de construcción más utilizados por el hombre a lo largo de la historia, tanto por su gran valor decorativo, como por sus excelentes propiedades físico-mecánicas. Aún actualmente, constituye el material de construcción más utilizado en ingeniería, ya que su producción anual (en toneladas) supera a la de otros materiales como, por ejemplo, el cemento y el acero. La madera es considerada un excelente material para ser usado en la construcción y otras actividades por poseer una buena relación resistencia-peso. Pensemos, a título de ejemplo, en su reducido peso específico o en su resistencia a la tracción, la cual, a igualdad de peso, es de 4 a 5 veces superior a la del acero común. Además, presenta muy buena trabajabilidad, adhesividad y baja conductividad térmica. No obstante, a pesar de estas y de otras excelentes características, presenta como cualquier otro material ciertas limitaciones como el hecho de ser combustible y degradable. Frente al agotamiento de los bosques naturales de maderas nobles y durables, la preservación es la respuesta técnica que posibilitará la incorporación de un gran número de especies a los distintos campos de aplicación, con igual o mayor duración que las tradicionalmente conocidas.

En el presente capítulo se tratarán los agentes que generan la degradación de la madera, los factores de riesgo en cada situación particular y los métodos que permiten protegerla o detener la acción de dichos agentes. Sin embargo, antes de abordar el tema de la degradación de la madera y a fin de entender los mecanismos operantes durante el proceso, es necesario conocer la estructura y las propiedades de la misma.

□ 6.2 Estructura de la madera

La madera es un material compuesto natural que está formado, principalmente, por una disposición compleja de moléculas de celulosa reforzadas por una sustancia polimérica llamada lignina y otros compuestos orgánicos. Debido a su estructura compleja, no puede esperarse que la madera posea las propiedades ingenieriles de un producto homogéneo, como las que pueden proporcionar una barra de acero o una pieza de plástico moldeada. La resistencia de la madera es altamente anisotrópica (es decir que sus propiedades varían con la dirección en la que se las mida), siendo su resistencia a la tracción mucho mayor en la dirección paralela al tronco del árbol que en la perpendicular a él.

Cuando examinamos la sección transversal de un árbol típico (**Figura 6.1**) observamos varias capas:

- la capa de *corteza exterior* que está constituida por tejido muerto y seco y que es la que confiere protección al árbol;
- la capa de *corteza interior* que es húmeda y blanda y lleva alimento a todas las partes en crecimiento del árbol;
- la capa de *cambium* que es la capa de tejido entre la corteza y el tronco y el lugar donde se producen las células de ambos;
- la *albura* que es la madera ligeramente coloreada que forma la parte exterior del tronco del árbol. La albura contiene algunas células vivas que cumplen funciones de almacenamiento de alimento y conducción de la savia desde las raíces a las hojas del árbol;
- el *corazón o duramen* es la región interna y más antigua del árbol y no está viva. Es más oscuro que la albura y proporciona resistencia al árbol;
- la *médula* es el tejido blando situado en el centro del árbol, alrededor del cual comienza a crecer el árbol.

Los árboles se clasifican en dos grupos llamados de *madera blanda* y de *madera dura*. Si la semilla del árbol está descubierta, el árbol es de madera blanda, y si la semilla está cubierta es de madera dura. En general los árboles de madera blanda son conocidos como árboles de hoja perenne porque mantienen sus hojas a lo largo del año (pinos, cedros y coníferas en general), mientras que los de madera dura son conocidos como árboles de hoja caduca porque pierden sus hojas una vez al año (por ejemplo robles y cerezos).

En cada estación de crecimiento se forma, anualmente, una nueva capa de madera alrededor del tronco del árbol. Estas capas se denominan *anillos anuales de crecimiento* y son particularmente evidentes en los árboles de madera blanda. A su vez, cada anillo tiene dos sub-anillos: *de madera temprana* (primavera) y *de madera tardía* (verano). La madera temprana, generalmente, tiene un color más claro y el tamaño de sus células es mayor.

La estructura interna de la madera blanda es diferente a la de la madera dura (**Figura 6.2**). La madera blanda consta de dos tipos de células: *traqueidas* y *parénquimas*. Las *traqueidas* son células tubulares largas y de paredes finas que cumplen la doble función de sustentación del árbol y medio de conducción de líquidos. El espacio abierto en el centro de estas células se llama *lumen* y se usa para la conducción del agua. La longitud de una traqueida longitudinal es de 3 a 5 mm y su diámetro es de 20 a 80 μm . Los agujeros situados al final de las células permiten que fluya líquido de una célula a otra. Las traqueidas longitudinales constituyen el 90% del volumen de la madera blanda. Las células de madera temprana tienen un diámetro relativamente grande, paredes finas y lumen de gran tamaño. Las células de madera tardía tienen un diámetro más pequeño y paredes gruesas con un lumen más pequeño. Los *radios de la madera*, que corren en la dirección transversal desde la corteza hasta el centro del árbol, están formados

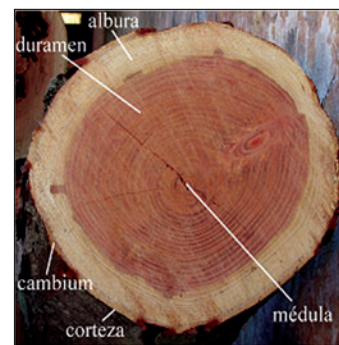


Figura 6.1. Sección transversal de un árbol. Se pueden observar los anillos de crecimiento.

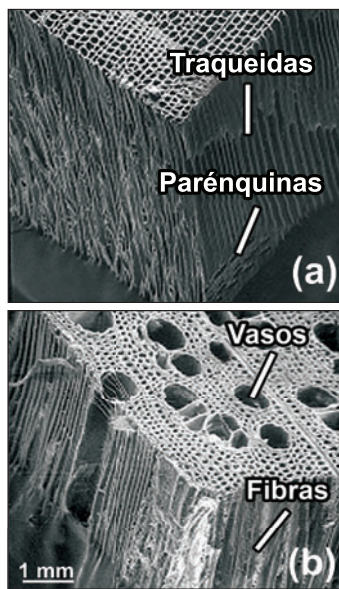


Figura 6.2. (a) Estructura de la madera blanda, donde se aprecian las células tubulares largas llamadas traqueidas; (b) Estructura de la madera dura, donde se aprecian las fibras longitudinales y los vasos.

por agregados de pequeñas *células de parénquima* que tienen forma de ladrillo y paredes muy finas. Estas células sirven como almacén de alimento y están interconectadas a lo largo de los radios por pares de agujeros.

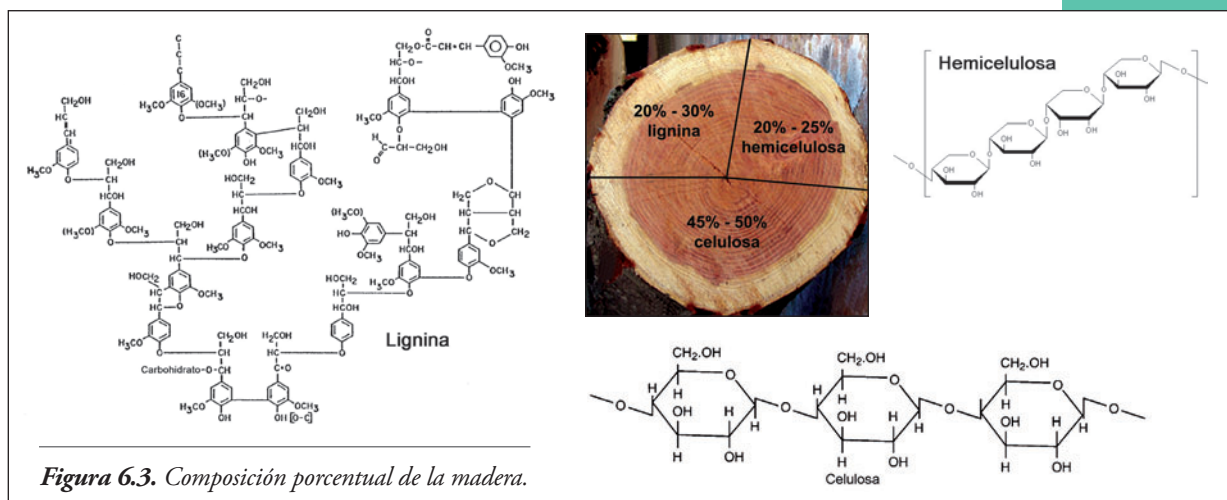
Las maderas duras, a diferencia de las blandas, tienen 4 tipos de células: *traqueidas*, *parénquimas*, *fibras* y *vasos*. En este tipo de madera, las *traqueidas* y las *parénquimas* cumplen las mismas funciones que en las maderas blandas pero las traqueidas son escasas. Por lo tanto, las funciones de sustentación del árbol y conducción de líquidos son llevadas a cabo por las *fibras* y los *vasos*, respectivamente. Los *vasos* son poros de gran diámetro para la conducción de fluidos. Son estructuras de paredes finas orientadas en la dirección longitudinal del tronco del árbol. Las células longitudinales responsables de la sustentación del tronco del árbol de madera dura son llamadas *fibras*. Son células alargadas con finales en punta y son normalmente de paredes gruesas. Varían en longitud desde 0,7 hasta 3 mm y tienen en promedio menos de 20 μm de diámetro.

Si analizamos la estructura de cada célula de madera con gran ampliación, veremos que están compuestas de varias capas concéntricas que crecen desde el centro de la célula. Los principales constituyentes de la célula de la madera son *celulosa*, *hemicelulosa* y *lignina*.

Un componente minoritario son los **extractos**, que en general son compuestos orgánicos complejos (ceras, grasas, azúcares, gomas, resinas). Los extractos son los responsables de la coloración de la madera y de su resistencia al ataque de hongos e insectos, ya que la mayoría de ellos son tóxicos.

Las moléculas cristalinas de celulosa constituyen entre el 45% y el 50% del material sólido de la madera. La celulosa es un polímero lineal $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ compuesto por n unidades de glucosa $(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6)$, donde n (llamado grado de polimerización) puede variar desde 5.000 hasta 10.000. El enlace covalente entre las unidades de glucosa crea una molécula fuerte con alta resistencia a la tensión. La unión lateral entre las moléculas de celulosa se establece por enlaces de hidrógeno y dipolos, que son más débiles. La hemicelulosa constituye del 20% al 25% en peso de la célula de la madera y es una molécula amorfa ramificada formada por varios tipos de unidades de azúcar. Las moléculas de hemiglucosa tienen un grado de polimerización entre 150 y 200. El tercer constituyente mayoritario de las células de la madera es la lignina, que representa entre el 20% y el 30% en peso de la célula. La lignina es un material polimérico tridimensional con entrecruzamientos muy complejos formados a partir de unidades fenólicas (**Figura 6.3**).

La pared celular consta de **microfibrillas** unidas por un segmento de lignina. Se cree que dichas microfibrillas están formadas por un núcleo cristalino de celulosa rodeado por una región amorfa de hemicelulosa y lignina. El orden y orientación de las microfibrillas varían en diferentes capas de la pared de la célula.



□ 6.3 Propiedades de la madera

6.3.1 Contenido de humedad

La madera, a menos que sea secada en estufa hasta obtenerse un peso constante, siempre contiene algo de humedad. El agua que se encuentra en la madera puede estar absorbida en las paredes de las células (cada célula de madera puede llegar a absorber hasta el 30% de su peso en agua), o bien como agua libre en el lumen de las fibras. El porcentaje de agua en la madera se define del siguiente modo:

$$\text{Contenido de humedad de la madera (\% en peso)} = \frac{\text{peso de agua en la muestra}}{\text{peso de la muestra de madera seca}} \times 100\%$$

Debido a que el porcentaje de agua se calcula sobre una base seca, el contenido de humedad de la madera puede superar el 200%. En un árbol vivo, el contenido promedio de humedad en la albura de la madera blanda es de 150%, mientras que en el duramen es del 60%. En maderas duras, la diferencia es mucho menor, encontrándose promedios para ambos constituyentes, del orden del 80%.

6.3.2 Densidad

En general se observa que la densidad de las maderas blandas es menor que la de las maderas duras, debido a que estas últimas tienen menos huecos en su estructura. Ade-

más, la densidad de la madera depende, obviamente, del contenido de humedad de la misma. El agua que se aloja en el lumen puede ser extraída con relativa facilidad, pero la que se aloja entre las fibras de celulosa está más firmemente adherida. Luego, cuando la madera completamente saturada con agua comienza a secarse, el agua contenida en el lumen se evapora primero y la madera no cambia sus dimensiones ni sus propiedades. Sin embargo, cuando se prosigue con el secado y el contenido de humedad desciende por debajo del 30%, comienza a desprenderse el agua contenida entre las células. La madera comienza a contraerse debido a que disminuye la distancia entre las células y las propiedades de la madera comienzan a variar.

En general, la densidad de la madera se da para un contenido de humedad del 12%, que es el valor para el cual la madera está en equilibrio con una atmósfera que contiene una humedad relativa ambiente del 65% y una temperatura de 20°C. La madera más liviana que se conoce es la madera balsa (su nombre científico es *Ochrocona lagopus*) y tiene una densidad de tan sólo 0,11g/cm³, siendo más liviana que el corcho. En el otro extremo existen maderas muy densas, como la de ébano (1,26 g/cm³), que no flotan en el agua.

6.3.3 Resistencia mecánica

La madera presenta mejores propiedades mecánicas (mayor resistencia mecánica) en la dirección longitudinal que en la dirección transversal. El motivo de esta diferencia es que en la dirección longitudinal la resistencia de la madera se debe a los fuertes enlaces covalentes de las microfibrillas de celulosa que están orientadas a lo largo del tronco del árbol, mientras que la resistencia perpendicular es menor porque depende de la resistencia de los débiles enlaces de hidrógeno, que unen las moléculas de celulosa lateralmente. Así, la resistencia a la tracción en la dirección longitudinal oscila entre 70 y 120 MPa, mientras que en la dirección transversal se reduce a valores comprendidos entre 2 y 8 MPa. A su vez, la resistencia a la compresión en la dirección longitudinal (que oscila entre 30 y 50 MPa) es menor que la resistencia a la tracción en la misma dirección, debido a que las fibras tienden a torcerse en compresión. A modo de comparación, la resistencia a la tracción de los aceros puede variar entre 200 y 1.000 MPa.

Por otra parte, la madera verde es más débil que la madera secada en estufa. La razón de la diferencia es que al eliminar el agua, la estructura de la célula se hace más compacta y se establecen uniones por enlace de hidrógeno. De esta manera, la madera se encoge y se hace más densa y fuerte. Por tal motivo, y a fin de aunar criterios, las propiedades mecánicas de la madera se suelen dar, igual que la densidad, para un contenido de humedad del 12%.

6.3.4 Contracción

La madera se contrae a medida que se elimina de ella la humedad. La madera se contrae más en la dirección transversal del tronco que en la longitudinal. Mientras que la variación de la

contracción transversal oscila entre un 10% y un 15%, la longitudinal es de tan sólo un 0,1%, aproximadamente. Como ya se ha mencionado anteriormente, cuando la madera comienza a secarse, primero se evapora el agua libre contenida en el lumen (ya que no está químicamente unida a la madera) y las dimensiones de la madera, así como las propiedades mecánicas de ella no cambian. Sin embargo, cuando se continúa secando la madera y se obtienen contenidos de humedad menores al 30%, comienza a eliminarse el agua de las microfibrillas que componen las células de madera (en este caso sí existe una unión química, covalente, entre las moléculas de agua y los grupos oxhidrilo de la celulosa). Éstas empiezan a apretarse y la madera se hace más densa. Debido a que la dimensión más larga de las microfibrillas está orientada en la dirección longitudinal del tronco, la madera se contrae transversalmente.

6.3.5 Otras propiedades

La madera es un excelente aislante eléctrico y térmico y posee muy buenas propiedades acústicas. Puede ser trabajada y moldeada con facilidad y es inerte a un gran número de productos químicos. Lamentablemente, también es un material combustible e higroscópico, esto es que tiene tendencia a absorber agua y como consecuencia de las fluctuaciones en el contenido de humedad en la madera, ésta se deforma y cambia su tamaño. Finalmente, la madera puede presentar imperfecciones, como nudos, que llevan a un decrecimiento de su resistencia mecánica.

Antes de ser utilizada, la madera verde, cuyo contenido de humedad es siempre mayor al 30%, se debe secar hasta que esté en equilibrio con el medio ambiente en el cual se va a usar y que corresponde típicamente a un valor del 12% de humedad. De este modo se evita la compresión que ésta sufre como consecuencia de la pérdida de humedad, compresión que puede alcanzar valores de hasta un 10% de las dimensiones de la pieza. A su vez, se debe tener en cuenta que la madera, una vez seca y puesta en servicio, está sometida a cambios de humedad diarios o estacionales, al cambiar la humedad relativa ambiente. Estos cambios son generalmente pequeños. Por ejemplo, a 25°C un cambio en la humedad relativa ambiente del 60% al 90% genera un cambio del 2% en el volumen de la pieza. Finalmente, hay que destacar que la madera también puede contraerse o expandirse por cambios en la temperatura, pero estos cambios no son demasiado importantes y a los fines prácticos pueden ser ignorados.

□ 6.4 Agentes de degradación de la madera.

Clasificación general

Los agentes de degradación que, directa o indirectamente, intervienen en la alteración de la madera, se pueden dividir en una primera clasificación en abióticos (no vivos) y bióticos (vivos).

Los **agentes de degradación abióticos** son aquellas causas de alteración de la madera de origen no vivo, y comprenden desde los agentes atmosféricos (radiación solar, humedad at-

mosférica, acción corrosiva de la lluvia, el viento y la temperatura) hasta los mecánicos, químicos y el fuego. El efecto de la intemperie en los elementos de construcción constituye un fenómeno compuesto por numerosos factores, entre los que encontramos no sólo los agentes atmosféricos anteriormente indicados, sino también la superposición de los mismos, su diferente intensidad, su periodicidad (diaria, estacional).

En resumen, los principales agentes de degradación abióticos son:

1. cambios de humedad, que llevan a la dilatación y contracción;
2. radiaciones solares, que generan la fotodegradación;
3. fuego;
4. agentes químicos;
5. agentes mecánicos.

Por otra parte, la madera también es atacada por **agentes de degradación bióticos**. Como toda la materia orgánica, la madera y sus derivados pueden sufrir el ataque de organismos vivos, fundamentalmente hongos e insectos que, cuando encuentran condiciones favorables a su acción y desarrollo, pueden llegar incluso a destruirla completamente.

Los principales agentes de degradación bióticos son:

1. hongos cromógenos (cambian el color de la madera);
2. hongos xilófagos (se alimentan de la madera);
3. mohos;
4. insectos de ciclo larvario (escarabajos);
5. insectos sociales (termitas subterráneas, termitas de madera seca);
6. perforadores marinos (atacan maderas inmersas en agua de mar).

□ 6.5 Agentes de degradación abióticos

6.5.1 El agua

En el árbol, el agua desempeña un papel fundamental como vehículo de transporte de las materias nutrientes. Pero, una vez que el árbol ha sido talado y convertido en madera, el contenido del agua es muy peligroso ya que, entre otras cosas, su presencia propicia el ataque de numerosos agentes degradadores. La presencia del agua es peligrosa para la madera en tres aspectos fundamentales.

- *Estabilidad dimensional:*

la absorción y pérdida de agua produce movimientos de hinchazón y retracción que dañan los trabajos de carpintería. La humedad atmosférica produce deterioro por los repetidos cambios de dimensiones que se producen en las capas superficiales de las piezas que se encuentran a la intemperie.

Cabe recordar que 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.

En todo caso, la penetración de agua es relativamente lenta y no se producen cambios en el contenido de humedad o en el volumen de la pieza, siempre que no haya una condición especial, en la cual el estado de humedad o sequedad exceda de lo normal. Se puede concluir que el daño esperado se concentra en las capas externas de la madera, ya que se producen tensiones alternas de compresión y dilatación que se traducen en una desintegración mecánica de las capas superficiales. El efecto hielo – deshielo es otro factor importante dado que la humedad contenida en las cavidades celulares se transforma a estado sólido, aumentando el volumen (anomalía del agua) de las fibras leñosas de la madera en estado verde, produciendo un daño en la integridad física del material, lo que puede traducirse en la destrucción de las células ubicadas en la superficie. Si este fenómeno es repetitivo puede afectar la resistencia de la pieza.

- *Agentes destructores:*

entre el 12 y el 30% de humedad, se desarrollan todos los ataques de agentes xilófagos, tanto hongos como insectos, que se alimentan de las materias nutritivas contenidas en la madera.

- *Acabados exteriores:*

si las maderas con un alto contenido de humedad son recubiertas por un barniz pelicular tradicional, rígido y sumamente impermeable, cuando el agua que está en el interior de la madera quiera salir (por ejemplo, en forma de vapor al calentarse por efecto de la radiación solar), destruirá esta capa de barniz, dejando un aspecto desagradable en la superficie.

6.5.2 El Sol

En nuestro país, el Sol es sin duda el peor enemigo de la madera situada en exteriores y, en general, de la madera de construcción, ya que la mayoría de los trabajos realizados con este material, sean ventanas, pérgolas, puertas de entrada, mobiliario urbano, viviendas, etc., están expuestos a su acción (**Figura 6.4**). Lógicamente las maderas en el interior de los edificios, al no estar expuestas a estos riesgos, no necesitan de un tratamiento especial y pueden ser acabadas con los barnices de tipo tradicional. De las muchas radiaciones emitidas por el Sol, las que más afectan a la madera son la *radiación ultravioleta* y la *radiación infrarroja*.

- *Radiación ultravioleta:*

esta radiación quema las células de la superficie de la madera descomponiendo la celulosa, pero sin calentar la misma. La acción de la luz es lenta y a medida que transcurre el tiempo la degradación no aumenta, dado que los primeros milímetros afectados sirven de protección al resto. Así, los efectos de la luz se hacen visibles entre el primer y el



Figura 6.4. Madera dañada por la exposición, sin protección, a los agentes de degradación abióticos.

séptimo año y la madera cambia de color, oscureciéndose o aclarándose, según el grado de exposición en que se encuentre, y descamándose. La degradación afecta los primeros milímetros de la madera, con mayor intensidad en las épocas de primavera que en las de otoño, y más la albura que el duramen. La degradación por la luz es más rápida si se combina con el deslavado que puede producir la lluvia, que arrastra la celulosa descompuesta de la superficie, produciendo la degradación denominada “madera meteorizada”.

- *Radiación infrarroja:*

al contrario que la anterior, esta radiación calienta la superficie de la madera, pero sin quemarla. Produce la evaporación del agua contenida en las células de la superficie, originando tensiones en el interior de la madera, que producen fisuras y grietas, así como alabeos.

En la actualidad no existe más que una fórmula para proteger la madera de los efectos de la radiación ultravioleta, y consiste en la aplicación de barnices que posean pigmentos resistentes a dicha radiación (generalmente óxidos minerales), que actúan como superficies reflectantes.

Es sabido que la radiación ultravioleta es reflejada por los tonos marrones y oscuros del espectro y es esta propiedad la que se utiliza para proteger a la madera mediante la aplicación de una pigmentación superficial adecuada. Sin embargo, hay que tener en cuenta, sobre todo en zonas muy calurosas, que las superficies oscuras (buenas para reflejar los rayos ultravioletas), absorben la radiación infrarroja y, por lo tanto, calientan demasiado la superficie de la madera. Si esta madera es muy resinosa, puede dar lugar a problemas de exudación de resina, creando un efecto desagradable en la superficie.

6.5.3 El fuego

Es uno de los agentes destructores que ningún material puede tolerar, indefinidamente, sin presentar algún deterioro. La reacción al fuego de las maderas depende de:

1. el espesor de la pieza de madera;
2. el contenido de agua de la madera;
3. la densidad de la madera (que depende de la especie).

La madera está formada, fundamentalmente, por materiales ricos en carbono (celulosa y lignina), admitiéndose que la madera contiene aproximadamente 48 % de carbono. La temperatura de inflamabilidad de la madera, en circunstancias favorables, es aproximadamente 275°C, siendo un factor importante el tiempo durante el cual es calentada. Por debajo de 100°C, casi no se escapa de la madera más que el vapor de agua. Incluso si la temperatura externa es superior a 100°C, la de la madera queda igual a 100° si el agua no se ha desprendido del todo. De 100°C a 275°C se desprenden gases: CO₂ incombustible, CO combustible y piroleñosos. Hacia 275°C la reacción es exotérmica, los gases se desprenden en abundancia, la proporción de CO₂ disminuye rápidamente y aparecen los hidrocarburos adquiriendo la madera un color achocolatado. Por encima de los 350°C los desprendimientos gaseosos son

menos abundantes, pero son todos combustibles. Más allá de los 450°C el hidrógeno constituye la mayor parte de los gases desprendidos, siendo el residuo sólido carbón de madera, susceptible de quemarse con desprendimiento de gases combustibles. La temperatura de la madera en el curso de su combustión está comprendida entre 400°C y 500°C, aproximadamente. Esta temperatura es la mínima necesaria para continuar la combustión, por supuesto si existe suficiente oxígeno. La velocidad típica a la que avanza el frente de combustión es del orden de 0,5-0,6 mm/min. Por otro lado, se ha encontrado que las vigas de grandes secciones transversales atacadas por el fuego sólo se dañan en una superficie carbonizada de pequeño espesor, que cubre y protege la madera no afectada por el fuego. La explicación es la baja conductibilidad térmica de la madera, que transmite una pequeña proporción del calor hacia el interior de ella. Ésta es una situación mucho más favorable que la que ocurre en los aceros, en los cuales el colapso de la estructura es total cuando se alcanza cierta temperatura crítica, pues el acero es un metal y por lo tanto, excelente conductor del calor.

6.5.4 Agentes químicos

En general, la madera es muy resistente a un gran número de productos químicos. En particular, la madera es resistente en medios suavemente ácidos, resultando superior al hierro fundido y algunos aceros, aunque su resistencia en medios alcalinos es inferior debido a la disolución de la lignina y la hemicelulosa en estos medios. Las sales de hierro son, generalmente, muy ácidas y en presencia de humedad degradan la madera dándole una coloración azul oscuro. Esto es lo que se observa en las proximidades de bisagras o clavos de hierro.

6.5.5 Agentes mecánicos

Cuando la madera se encuentra sometida a condiciones de movimiento está expuesta al deterioro por desgaste mecánico. Es el caso de los durmientes de ferrocarril, maderas de puentes y muchas otras que se encuentran expuestas a la acción del rozamiento. Entre los agentes mecánicos de degradación también podemos citar al viento, el cual arrastra partículas de polvo y arena, que golpean la madera contribuyendo a su desgaste. A título de ejemplo podemos decir que la madera sólo expuesta a los efectos adversos de la intemperie (radiaciones solares, lluvia y viento) y en ausencia de otros agentes degradadores como ser hongos e insectos, presenta una tasa de remoción superficial de sólo 1mm cada 20 años. Luego, los agentes de degradación bióticos cobran importancia y se convierten en los principales agentes de degradación de la madera, como veremos a continuación.

□ 6.6 Agentes de degradación bióticos

Teniendo en cuenta que la madera es una materia orgánica, es sorprendente encontrar que, en muchos casos, puede resistir el ataque de hongos e insectos por períodos prolongados de

tiempo. Esto se debe, en parte, al hecho de que los extractos contenidos en las células resultan tóxicos para muchos seres vivos. Debido a que los extractos se encuentran en mayor proporción en el duramen, éste resulta más resistente al ataque de agentes bióticos que la albura. Por otra parte, la resistencia de la madera está dada por su bajo contenido de nitrógeno, elemento necesario para el crecimiento de los hongos.

6.6.1 Los hongos

Estos agentes destructores de la madera son, quizá, menos conocidos que los demás. Es común adjudicar el deterioro al agua, sin embargo, la humedad es la que permite el desarrollo de hongos, que son en realidad los causantes de la degradación: una madera seca es mucho menos propensa al ataque de hongos. Los hongos se desarrollan cuando el contenido de humedad está comprendido entre 30 y 50 %. Los hongos necesitan de una temperatura moderada para llevar a cabo su actividad vital, encontrándose dicha temperatura entre 20 y 40°C, una cantidad adecuada de oxígeno y un pH entre 5 y 6 (las maderas presentan un valor cercano a 5). La madera es el alimento de los hongos en la mayoría de los casos, aunque no todos pueden alimentarse directamente de ella y lo hacen mediante la acción de enzimas que ellos mismos segregan, descomponiéndola en sustancias más simples y fácilmente asimilables. Veamos una clasificación de los hongos que atacan la madera, en función del grado de destrucción que su ataque causa en la madera.

- *Hongos cromógenos:*

son aquellos que dan origen a una coloración de la masa de la madera, causada por la refracción de la luz en las hifas del hongo (conjunto de células que componen el cuerpo de los hongos). Generalmente, no merman las propiedades físico-mecánicas de la madera, pero la deprecian, sobre todo desde el punto de vista decorativo ya que producen manchas. Los más conocidos son los que provocan el “azulado” del pino o el “corazón rojo” del eucaliptus. La presencia de estos hongos es un indicador de que en la madera hay un alto contenido de humedad.

- *Hongos xilófagos (Xilo=madera; Fago=comer):*

son los hongos responsables de la destrucción total de la madera, ya que atacan a la celulosa o a la lignina de que está compuesta. Podemos clasificarlos en dos grandes familias: ascomicetos y basidiomicetos. Los ascomicetos son los responsables de la pudrición denominada “blanca”. Su alimento es la lignina. Los ataques se producen en maderas que son humedecidas permanentemente (zonas de goteras o muros con humedades de capilaridad). La madera afectada pierde su color característico, se vuelve fibrosa y se parte con facilidad (**Figura 6.5a**). Es muy frecuente este ataque en las cabezas de las vigas. Los basidiomicetos son los responsables de la pudrición “parda” o “cúbica”. Su alimento es la celulosa, y el resultado de su ataque es una madera sin resistencia a ningún tipo de esfuerzo, que se deshace en prismas paralelepípedicos en tres direcciones perpendiculares. De ahí su calificativo de “cúbica” (**Figura 6.5b**).

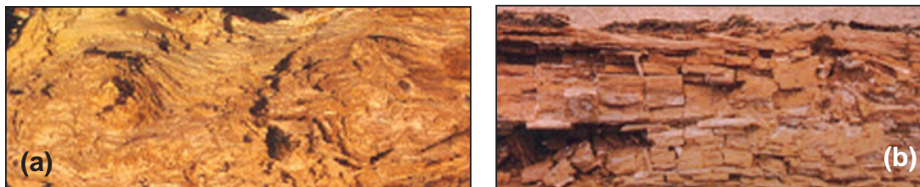


Figura 6.5. (a) Madera con pudrición blanca; (b) Madera con pudrición cúbica (tomado de <http://fai.unne.edu.ar/biologia/fungi/xilofagos.htm>).

Los efectos de ambos tipos de hongos de la pudrición (blanca y parda) sobre la madera son:

1. alteraciones de la composición química;
2. disminución de peso;
3. reducción de la resistencia;
4. modificación del color natural;
5. incremento de la inflamabilidad;
6. aumento de la susceptibilidad al ataque de ciertos insectos.

6.6.2 Mohos

Los mohos son otro grupo de hongos que no puede penetrar en la madera, ni siquiera utilizando las vías abiertas como los vasos. Suelen colonizar y desarrollarse en la madera húmeda utilizando, parcialmente, los azúcares solubles de la superficie y las impurezas del aire, en ambientes de humedad relativa y temperatura favorables, causando un aspecto algodonoso de distintas tonalidades en la superficie de la madera. Los mohos no afectan mayormente las propiedades mecánicas de la madera, ni afectan su aspecto, pero son de considerable importancia por la cantidad de esporas que suelen producir que, en algunos casos, origina alergias o enfermedades pulmonares en los obreros forestales, causando irritación en la piel o impidiendo la respiración. Estos tipos de hongos pueden desarrollarse muy rápidamente en la madera, cuando las condiciones del ambiente les son favorables, particularmente cuando la madera se encuentra húmeda y en ambientes cerrados sin circulación de aire.

6.6.3 Los insectos

Entre los animales terrestres destructores de madera, los más importantes por el valor económico de los daños que originan, son los insectos. Según la clasificación de los agentes destructores hecha al comienzo de este capítulo, los insectos que atacan la madera pueden clasificarse en los que se desarrollan por metamorfosis complicada (ciclo larvario), y los que se agrupan en grandes sociedades (sociales).



Figura 6.6. Insectos de ciclo larvario. Los insectos adultos (a) depositan los huevos en las grietas y rendijas de la madera. Del huevo sale la larva (b), que es el verdadero enemigo destructor: vive y se alimenta de la madera. En la figura se aprecia la madera atacada y en ella, los orificios de salida del insecto una vez concluida la metamorfosis de la larva (c).



Figura 6.7. Insectos sociales: ejemplo de termita.

• *Insectos de ciclo larvario:*

tienen una gran importancia por el gran número de especies repartidas por todas las zonas de la Tierra. Se desarrollan a partir de huevos depositados por insectos hembra adultos, que son puestos en el interior de la madera. De cada huevo nace una larva que inmediatamente comienza a comer madera, arrancando virutas con sus fuertes mandíbulas y separando las sustancias nutritivas (celulosa y otros azúcares), dejando un aserrín característico que llena las galerías hechas en el interior de la madera (**Figura 6.6**). Las larvas construyen, por lo general, galerías en la dirección de las fibras de la madera, dejando una capa externa sin destruir que dificulta la determinación e importancia de los daños a simple vista.

• *Insectos sociales:*

los más importantes son las termitas (**Figura 6.7**) que forman colonias con una organización social parecida a la de las abejas y las hormigas. En los termiteros hay una perfecta organización de castas y una distribución de tareas. Esto les permite ser sumamente eficaces en su trabajo (que no olvidemos que es la destrucción de la madera para alimentarse). Por ello, aunque cada insecto aislado es insignificante, organizados y trabajando en equipo, son el peor enemigo para la madera en la construcción. Las termitas de madera seca no requieren de suministros especiales de agua, abren galerías y aprovechan las grietas existentes donde inician su actividad formando colonias. Son de color pálido cremoso y por esta razón se las denomina hormigas blancas. El hecho de que las galerías se orientan siempre paralelas a las fibras hace dificultoso detectar el ataque en forma temprana. Generalmente, el ataque se detecta cuando la pieza se encuentra bastante destruida interiormente, notándose solamente la presencia de pequeños orificios circulares abiertos para expeler los excrementos de las galerías hacia el exterior y para permitir la salida de los adultos alados.

También existen especies de termitas subterráneas que habitan en la tierra y a través de galerías logran alcanzar la madera. Atacan edificaciones, puentes, construcciones de madera, cubiertas y pisos. La existencia de madera masticada en las estructuras es muestra evidente del ataque de termitas subterráneas. A partir del tamaño y tipo de perforación o túnel realizado, de la orientación de los túneles, de la presencia o no de aserrín, etc., es posible identificar qué tipo de insecto es el responsable del ataque de la madera y proceder a su eliminación.

6.6.4 Los perforadores marinos

Los perforadores u horadores marinos destruyen la madera de astilleros, embarcaciones, muelles y otras estructuras fijas y flotantes establecidas en el mar. Estos agentes de degradación revisten mucha importancia en zonas

tropicales y subtropicales donde se encuentran todas las especies capaces de atacar a la madera. Entre los perforadores marinos se encuentran dos grupos: Moluscos y Crustáceos.

Los Moluscos viven y se desarrollan en aguas que tengan no menos del 10% de salinidad. Algunos tienen forma de gusanos con un cuerpo alargado y un par de apéndices que le sirven para remar. Tienen el hábito de perforar túneles en la madera que pueden llegar a ser de más de un metro de longitud. Se entierran a sí mismos en la madera y crecen dentro de ella, de la cual se alimentan. Otros tienen forma de almeja. Ambos tipos pueden causar daños considerables.

Los Crustáceos poseen un cuerpo dividido en varias partes, tienen dos pares de antenas y por lo menos cinco pares de patas. Se mueven libremente alrededor de las estructuras de madera enterradas en el mar produciendo un ataque superficial caracterizado por el gran número de perforaciones que realizan.

□ 6.7 Categorías de riesgo

De las características propias y de la biología de los grupos de organismos xilófagos citados, se desprende que el riesgo que corre una madera de ser atacada por cada uno de ellos depende, fundamentalmente, de la utilización concreta que vaya a hacerse de dicha madera y de las condiciones de su puesta en servicio. En consecuencia, y considerando a la humedad como el principal factor limitante en el desarrollo de los diferentes organismos xilófagos, se consideran a continuación las cuatro clases de riesgo detalladas (**Tabla 6.1**), para maderas utilizadas en construcciones sobre tierra (no en medio marino).

CLASES DE RIESGO PARA MADERAS QUE SON UTILIZADAS EN CONSTRUCCIONES SOBRE TIERRA. TABLA 6.1

Clase de Riesgo	Situación de puesta en obra	Humidificación en servicio	Hongos	Termi-tas	Coleópteros
1	*Sin contacto con el suelo *Bajo cubierta	Ninguna	-	I	IV
2	*Sin contacto con el suelo *Bajo cubierta	Accidental	I	II	IV
3	*Sin contacto con el suelo *A la intemperie	Frecuente	II	III	IV
4	*En contacto con el suelo o con una fuente de humedad	Permanente	III	III	IV

I.- Riesgo de ataque no constante. Su importancia depende del tiempo que la madera tarde en recuperar una humedad <20%.
II.- Riesgo de ataque importante pero no constante o ataque de evolución lenta.
III.- Riesgo de ataque importante y constante, evolución rápida.
IV.- Riesgo de ataque constante, de intensidad variable según la especie de madera y el tipo de insectos adultos existentes en las zonas capaces de atacar a la misma.

Para la elección del sistema de tratamiento, además de la categoría de riesgo que va a afectar a la madera como consecuencia de las condiciones de su puesta en servicio, es conveniente tener en cuenta la repercusión que su destrucción, a causa de un ataque producido por organismos xilófagos, tiene para la estabilidad del edificio, y los costos que entrañaría su reparación o sustitución. Estas consideraciones se resumen en la **tabla 6.2**.

PROTECCIÓN REQUERIDA PARA LAS DISTINTAS UTILIZACIONES. TABLA 6.2

Situación de la Madera	Clase de Riesgo	Medidas a adoptar en cuanto a protección	Tipo de protección
*Madera en interior en ambiente siempre seco. Funciones de revestimiento o acabado	1	Tratamiento facultativo en función de que su costo no supere el de una reparación o tratamiento curativo	Superficial: 1mm<P≤3mm
*Maderas en funciones estructurales y ambiente siempre seco *Maderas no estructuradas con riesgo accidental de humedad	1 2	Tratamiento preventivo aconsejable, especialmente en caso de reparaciones difíciles y costosas	Superficial: 1mm<P≤3mm Media: 3mm<P≤0,75 x S*
Maderas sometidas a períodos alternativos de humedad y sequedad, sin estar en contacto con el suelo	3	Tratamiento preventivo obligatorio	Media: 3mm<P≤0,75 x S Profunda: P>0,75 x S*
Maderas en contacto con el suelo o con una fuente de humedad permanente que le comunica un contenido de humedad > 20%	4	Tratamiento preventivo obligatorio	Profunda: P>0,75 x S

P: Profundidad de la protección
S*: Superficie de la sección de la pieza de madera a tratar

□ 6.8 Tratamientos protectores de la madera

6.8.1 Protección frente a los agentes abióticos

El deterioro de la superficie de la madera expuesta a la intemperie tiene su base en procesos de tipo fotoquímico, biológico, físico y/o mecánico. La madera al exterior envejece con mayor celeridad que la situada dentro de las construcciones, debido a su exposición permanente a condiciones climáticas adversas y muy cambiantes, que producen alteraciones superficiales que afectan su aspecto decorativo y facilitan la entrada de otros agentes destructivos de la madera, como hongos e insectos xilófagos. Para evitar el envejecimiento prematuro de las maderas expuestas a la intemperie es de vital importancia saber elegir los productos más adecuados para su protección, conservación y decoración, de manera que el

mantenimiento de dichas maderas sea el más cómodo posible a lo largo de su vida útil. La manera de proteger la madera contra la acción de la intemperie es aplicando pinturas, lacas o barnices, que la defienden de estos cambios climáticos que son siempre inevitables.

A la hora de optar por usar madera, es conveniente tomar conciencia de que la humedad representa su mayor enemigo, puesto que es el factor que permite que se desarrollen los organismos xilófagos más destructores (hongos de pudrición y termitas). Por consiguiente, deben tomarse todas las medidas posibles de tipo constructivo que favorezcan el mantenimiento de la humedad de la madera por debajo del 20%, umbral de actuación de hongos y termitas subterráneas. Antes de determinar el tratamiento químico de protección que debe aplicarse a la madera, según la categoría de riesgo en que vaya a ser utilizada, hay que estudiar la posibilidad de reducir esta categoría de riesgo aplicando, siempre que sea posible, las medidas constructivas que reduzcan el riesgo potencial que corre la madera de ser atacada por los diferentes agentes destructores y xilófagos.

6.8.2 Protección frente a los agentes bióticos

6.8.2.1 Características que debe reunir un preservante

Un preservante debe reunir ciertas características:

- *toxicidad*, es fundamental para controlar o anular la actividad de los agentes bióticos que afectan a la madera;
- *buena penetrabilidad* en la madera, para lo cual es necesario que el producto químico posea cierto grado de viscosidad;
- *permanencia en la madera*, característica que se logra cuando el preservante no se altera por volatilización o cambios químicos dentro de la madera;
- *inocuidad*, es decir que todo preservante debe ser seguro de manipular por el hombre e inocuo para los animales domésticos;
- *no corrosivo* para metales como ser alambres, clavos y pernos;
- *no combustible*;
- *económico y accesible*.

6.8.2.2 Clasificación de los preservantes

Los preservantes se clasifican según su origen en:

CREOSOTAS

- Creosota ordinaria.
- Creosota líquida.
- Mezclas de creosota.

PRODUCTOS ORGÁNICOS (óleosolubles)

- Naftenatos.
- Pentaclorofenol.
- Óxido tributil estanoso.
- Quinolinolato de cobre.

PRODUCTOS INORGÁNICOS (hidrosolubles)

- Sales múltiples.
- Arsénico-Cobre-Amoníaco (ACA).
- Cupro-Cromo-Arsenicales (CCA).
- Cupro-Cromo-Bóricas (CCB).
- Compuestos de boro.
- Otros compuestos hidrosolubles.

La CREOSOTA se obtiene de la destilación de alquitrán de hulla. Es una mezcla extraordinariamente compleja que contiene sustancias neutras, ácidas y alcalinas. Posee hidrocarburos aromáticos que componen el grupo mayoritario (80-90%); la fracción ácida (5% de la creosota total) que está constituida por fenoles, creosoles, xilenoles y naftoles de alto poder fungicida e insecticida y, finalmente, la fracción básica (también el 5% de la creosota) constituida por piridinas, quinolinas y acridinas.

La creosota es insoluble en agua, de alta toxicidad contra hongos e insectos, de buena permanencia, no tiene acción corrosiva con los metales de olor fuerte y penetrante, por lo que no es aconsejable para interiores de viviendas. Su gran desventaja es que la madera luego de ser tratada con creosota no puede ser pintada ni barnizada y que la madera impregnada con creosota queda muy sucia y produce irritación en la piel, debido a su compleja composición.

Entre los PRODUCTOS ORGÁNICOS se encuentran una variedad de sustancias que se ha ido desarrollando recientemente, tomando en cuenta su característica principal de ser solubles en solventes oleosos derivados del petróleo. Entre los principales preservantes figuran los naftenatos, el pentaclorofenol, el óxido tributil estanoso y el quinolinolato de cobre.

Los naftenatos son sustancias provenientes de la combinación de ácidos nafténicos ($C_{11}H_{20}O_2$) obtenidos como subproductos en la refinación de petróleo y sales de elementos metálicos como el cobre y el zinc. Los naftenatos son compuestos cerosos o gomosos no cristalinos y solubles en aceite. El naftenato de cobre es el más generalizado en la preservación de maderas, de color verde oscuro y olor desagradable y de gran toxicidad para hongos. Se utiliza en soluciones al 5%, donde el cobre metálico se encuentra al 0,5%. Lamentablemente, la madera tratada con esta sustancia no es fácil de pintar pues el color verde oscuro exuda a través de la pintura. También se ha experimentado con naftenato de zinc que es casi incoloro y menos tóxico.

El pentaclorofenol (C_6Cl_5OH) es un compuesto químico cristalino formado por reacción del cloro sobre el fenol. Es el más tóxico y más empleado dentro de los preservantes orgánicos óleosolubles. Resulta eficaz para hongos e insectos, pero ineficaz contra los

perforadores marinos. Se utiliza, particularmente, para combatir a la mancha azul de la madera. Es un producto granulado de color parduzco insoluble en agua. Para su uso se disuelve 5% de producto activo en aceite, y su aplicación puede ser inmediata. Es irritante a la piel y las mucosas, pero presenta baja volatilidad y gran estabilidad química.

El óxido tributil estanoso es un producto de alto poder fungicida e insecticida y que se fija bien en la madera. Es incoloro e insoluble en agua y es soluble en la mayoría de los solventes orgánicos. Este preservante tiene una afinidad natural por los materiales celulósicos, por lo que controla muy bien a los hongos que son causantes de la pudrición parda en la madera.

El quinolinolato de cobre es un producto de color ligeramente amarillento que se disuelve en solventes ligeros. Además de brindar una buena protección contra hongos tiene buena fijación en la madera, y se recomienda su utilización particularmente en maderas que tienen contacto con productos alimenticios ya que no es irritable a la piel.

Al grupo de los PRODUCTOS INORGÁNICOS pertenecen una serie de sustancias o mezclas químicas que se emplean utilizando el agua como solvente; tienen gran poder fungicida e insecticida, son buenos fijadores, reducen la acidez y el efecto corrosivo, no son fitotóxicos, carecen de olor y no son inflamables. Algunos preservantes de este grupo son fuertemente fijados en la madera, siendo muy resistentes a la lixiviación y permitiendo un buen acabado en la madera. La desventaja de estos compuestos es que hinchon a la madera recién impregnada y obligan, en algunos casos, a secar nuevamente a una temperatura máxima de 60°C a las piezas cortadas.

El sulfato de cobre es utilizado desde el año 1767 en Francia. Tiene un gran poder fungicida y costo reducido. Sin embargo, entre las desventajas que presenta podemos citar que es corrosivo para el acero y que, al permanecer soluble dentro de la madera, es propenso a ser eliminado por lixiviación durante su puesta en servicio, disminuyendo así sus propiedades de protección. Su dosificación corriente es al 5% de concentración en agua.

En general las sales preservantes más complejas tienen en su composición un elemento fungicida como el cobre y uno insecticida como el arsénico o el boro; además se incluye un fijador como el cromo. Las características de estas sales son: que presentan alta resistencia a la lixiviación y buena fijación de los principios activos, pero se debe tener precaución para su manipulación.

Entre las principales sales múltiples utilizadas encontramos:

- las sales a base de arsénico, cobre y amoníaco (sales ACA), formadas por cobre en forma de óxido cúprico y arsénico en forma de óxido arsénico, disueltas en amoníaco. A las dos o tres semanas de tratada la madera, se evapora el amoníaco y los precipitados de cobre y arsénico se fijan definitivamente. Estas sales son eficaces contra hongos e insectos;
- las sales cupro son mezcla de óxido cúprico con óxidos de cromo y arsénico (sales CCA). La reacción química que permite la fijación en la madera es compleja; en

términos generales los óxidos metálicos son reducidos por los azúcares de la madera, para formar precipitados insolubles y no lixiviables. Los precipitados CCA se fijan permanentemente a la madera, no son volátiles ni se evaporan. Son muy eficaces en la protección de maderas en contacto directo con el suelo y bajo las condiciones más desfavorables como el agua de mar;

- las sales cupro-cromo-bóricas (CCB) poseen como componentes activos cobre en forma de óxido cúprico, cromo en forma de óxido crómico y boro en forma de ácido bórico. Estas sales combinan la acción fungicida del cobre con la acción insecticida del boro y con el poder de fijación del cromo para evitar la lixiviación. Es un preservante para la aplicación en árboles recién talados. La madera luego de tratada adquiere una coloración verdosa, pero puede ser pintada y no despiden olores ni vapores irritantes. Estos preservantes se utilizan en concentraciones no menores al 5%. La fijación de estas sales en la madera es muy lenta y en general se recomienda dejar secar por lo menos de 6 a 8 semanas antes de usar;
- los compuestos de boro fueron utilizados, primeramente, como productos retardadores de la acción del fuego, pero luego se descubrió que tenían acción efectiva contra hongos e insectos. Las maderas tratadas con componentes de boro se utilizan en lugares secos y en interiores para evitar que el producto químico se lixivie por la humedad. Estos compuestos de boro también son algo corrosivos, por eso deben mezclarse con equivalentes de óxido bórico o bórax para contrarrestar su efecto negativo.

Existen en el mercado internacional otros compuestos hidrosolubles para proteger la madera, aunque en muchas situaciones su uso es restringido y se los compara con las sales CCA. Se tienen por ejemplo sales que combinan la acción del cobre y cromo con las de flúor o el fósforo y sales cromo-zinc-cloro y flúor-cromo-arsénico-fenol.

6.8.3 Métodos de aplicación de los preservantes

Los tratamientos protectores, en general, son el resultado de la combinación de dos elementos diferentes: el producto protector y el sistema de aplicación o introducción de éste dentro de la madera. Una vez establecida de forma definitiva la clase de riesgo que va a afectar en las condiciones de puesta en servicio de la madera, se establecerá el tratamiento químico de protección más adecuado para asegurarle una vida útil lo más larga posible. Se reconocen tres tipos de métodos básicos para el tratamiento de la madera:

1. métodos preventivos,
2. métodos curativos,
3. tratamiento del suelo.

Los primeros son los que se aplican a una madera seca antes o después de su puesta en servicio, para evitar que sea atacada por los organismos destructores. Los curativos son

los aplicados a una madera puesta en obra que ha sido objeto de algún tipo de ataque. Tienen como misión paralizar el avance de los daños matando al agente destructor que está actuando sobre ella y dejar a la madera protegida contra posibles ataques futuros. Los tratamientos del suelo se refieren, ante todo, a la práctica de minimizar el peligro que pueden presentar algunos sitios, a la puesta en servicio de componentes de madera, particularmente postes de alumbrado o teléfono, o estantes y postes para cercas.

Dentro de los **métodos preventivos** se encuentran los métodos convencionales que comprenden: *pretratamientos, procesos sin presión o caseros y métodos con presión o industriales*. En cuanto a los **métodos curativos**, estos incluyen: *inspección y tratamientos curativos en edificios e inspección y tratamiento curativo de postes*.

Los *pretratamientos* son una serie de procesos que se realizan antes de tratar a la madera con los preservantes químicos. Lo primero que debe realizarse es un descortezado, dado que la presencia de corteza impide una buena impregnación del preservante. Es una simple acción mecánica que se realiza utilizando palas o cuchillos, o en forma mecánica con máquinas fabricadas para este fin. En aquellos casos en los que la madera no vaya a ser utilizada inmediatamente, el descortezado también evita el ataque de insectos. En estos casos también se recurre a la inmersión de la madera en agua dulce para evitar su deterioro, ya que si bien los hongos crecen en la madera cuando ésta se encuentra húmeda, su desarrollo no es posible cuando la madera se halla totalmente saturada en agua. Cuando no se tiene un flujo de agua, por ejemplo ríos, se recurre a la aspersión con agua dulce en forma constante. El objetivo es mantener permanentemente humedecida la madera, para evitar el desarrollo de hongos e insectos. Si no se dispone de agua corriente, y las piezas de madera van a quedar en algún patio o sitio de almacenamiento, es recomendable el empleo de aspersión con sustancias antifúngicas y/o insecticidas. Se trata de una simple aspersión que se aplica periódicamente si las piezas van a estar almacenadas por períodos de tiempo prolongados. Las sustancias químicas que se emplean para estos tratamientos son básicamente sales solubles en agua, de las cuales las que se utilizan contra los hongos son el bórax y el ácido bórico, cuyo costo los hace accesibles y manejables y presentan muy pocas limitaciones ambientales.

Los *procesos sin presión o caseros* comprenden los métodos de tratamiento que no emplean presión para forzar al preservante dentro de la madera. Algunos de estos métodos son: pincelado, brochado, pulverizado, inmersión, inmersión instantánea, inmersión en caliente, ascensión simple o doble, así como todos los procesos que comprenden fenómenos de difusión (movimiento espontáneo de una sustancia a través de una determinada materia, de una zona de mayor concentración a otra de menor concentración).

El pincelado es el método más sencillo, que requiere la mínima inversión y puede ser realizado con preservantes hidrosolubles y también óleosolubles de baja viscosidad. El proceso permite su aplicación en el mismo sitio. El mayor inconveniente es que la protección es muy superficial (algunos milímetros) y, en consecuencia, no sirve para garantizar largos períodos de protección. Se recomienda su empleo en situaciones de riesgo con poca incidencia de organismos xilófagos.

El brochado y pulverizado también son métodos sencillos que se utilizan para maderas ya instaladas o puestas en servicio. En general, se utilizan productos óleosolubles y se logran penetraciones pequeñas, por lo que es necesario aplicar el producto dos o tres veces.

Los métodos de inmersión consisten en sumergir las piezas de madera en un recipiente apropiado, de modo que queden totalmente cubiertas con el producto químico. La inmersión rápida (algunos segundos a minutos) es habitualmente suficiente cuando se utilizan maderas verdes y preservantes hidrosolubles, debiéndose tomar la precaución de cubrir las piezas tratadas con un plástico para evitar la evaporación y permitir que el preservante difunda dentro de la madera. La inmersión en caliente es otra variedad dentro de los procesos de inmersión en donde la alta temperatura facilita la difusión del preservante en la madera.

El proceso de ascensión simple consiste en colocar postes con extremos gruesos dentro de un tanque conteniendo las sales hidrosolubles que se utilizan como preservantes. La pieza, que debe tener un alto contenido de humedad, recibirá una migración de la sal, normalmente más concentrada en el tanque, hacia el interior de la madera. Además, la evaporación del agua de la madera facilita que el reactivo ascienda por capilaridad. En el proceso de ascensión doble, el procedimiento se repite dos veces cambiando el preservante. Se utiliza para garantizar que la sal preservante quede fija en la madera, para lo que se recurre a un primer período de difusión con una sal, por ejemplo cúprica, seguida por un período de difusión con un fijador, usualmente dicromato de potasio. Este proceso puede garantizar relativamente largos períodos de vida útil, hasta 10 años en algunos casos.

Los *procesos a presión o industriales* permiten regular las condiciones del tratamiento, pudiéndose variar la penetración y retención del producto. Requieren instalaciones costosas. En general, una planta a presión consiste en bombas, reservorios de almacenamiento, de mezcla, equipo de control y autoclave o cilindro de impregnación.

Si bien existen distintas variantes de estos procesos, el tratamiento básico consiste en:

- 1- introducir la madera en el cilindro de impregnación (denominado autoclave) y hacer un vacío de 0,6 kg/cm² para eliminar el aire contenido en el cilindro y la madera;
- 2- introducir la solución con el preservante hasta llenar completamente el cilindro;
- 3- aplicar presión (del orden de 8 a 14 kg/cm²) y medir la cantidad de preservante que penetra, manteniendo la presión constante hasta la retención deseada;
- 4- devolver la solución al tanque de almacenamiento;
- 5- aplicar vacío nuevamente para recuperar el exceso de preservante.

La forma de aplicación del producto protector a la madera varía, según se trate de proteger la madera antes de la puesta en obra o una vez puesta en obra (**Tabla 6.3**).

TIPO DE TRATAMIENTO Y FORMA DE APLICACIÓN DEL PRODUCTO PROTECTOR. TABLA 6.3

TRATAMIENTOS	Situación de puesta en obra		Humidificación en servicio	
	Superficial	En profundidad	Superficial	En profundidad
PREVENTIVOS	*Inmersión breve *Pincelado *Pulverización *Brochado	*Inmersión prolongada *Doble ascensión *Impregnación a presión	*Pulverización *Brochado	*Inyección a presión
CURATIVOS			*Pulverización *Brochado	*Inyección a presión

A la hora de aplicar un tratamiento curativo, por ejemplo, debido a termitas subterráneas, hay que tener en cuenta si este agente destructor se encuentra presente en el edificio, pues para erradicarlo no basta con el tratamiento de la madera, sino que es necesario aplicar un tratamiento complementario antitermitas de todo el edificio, consistente en:

1. tratamiento de los muros: inyección a presión;
2. tratamiento de las fundaciones: inyección a presión;
3. construcción de una barrera insecticida perimetral.

□ 6.9 Métodos para determinar la durabilidad de las maderas

La durabilidad natural es la propiedad de la madera de resistir, en mayor o menor grado, el ataque de los agentes de destrucción en condiciones naturales de uso. El grado de durabilidad de una pieza depende de la especie y de las condiciones de utilización. Por ejemplo, la madera será más susceptible a ser atacada en condiciones cálidas y húmedas, que en climas fríos y secos. También la posibilidad de ataque será mayor si ésta se encuentra en contacto directo con el suelo. Existen ciertas especies que tienen buena durabilidad natural, debido a que poseen ciertos constituyentes como los fenoles y otros a los que hasta hace muy poco se los denominaba taninos y que actualmente reciben el nombre de polifenoles. Los polifenoles son compuestos que tienen más de un grupo oxhidrilo (OH) en su anillo bencénico y que resultan tóxicos para los hongos.

Para determinar la durabilidad natural de la madera se deben realizar diferentes pruebas o ensayos, tanto en el laboratorio como en cementerios de madera. Para la realización de los ensayos de laboratorio se cuenta con normas americanas y europeas que consisten en una serie de instrucciones precisas sobre el modo en que se deben realizar los ensayos, de manera que sean comparables. El objetivo principal que se persigue al ejecutar este ensayo es determinar la masa de cada muestra mediante la diferencia de pesadas antes y después de haber estado expuesta a un cultivo de hongos por un tiempo preestablecido, generalmente comprendido entre 12 y 16 semanas.

Se utiliza la siguiente fórmula para la determinación de la pérdida de peso:

$$\% = \frac{P_{s1} - P_{s2}}{P_{s1}} \times 100$$

donde % es la pérdida de masa, P_{s1} es el peso de la muestra antes del ensayo y P_{s2} es el peso de la muestra después del ensayo.

Los ensayos anteriormente indicados son sencillos de realizar, lo que permite obtener resultados que determinarán la eficiencia de los distintos preservantes en la madera tratada. Se debe contar, además, con una muestra testigo y sin tratar con productos químicos preservantes, para poder comparar los daños obtenidos. Con la interpretación de los resultados se puede tener una clasificación de la madera por su durabilidad natural, siempre bajo las especificaciones de las normas (Tabla 6.4).

CLASIFICACIÓN DE LA MADERA POR SU DURABILIDAD. TABLA 6.4

Categoría AR (Altamente Resistentes)
Pérdida de peso entre 0 y 1% con una duración en uso exterior de más de 15 años. Son, en general, maderas de alta densidad y de duramen que no es posible tratar.
Categoría R (Resistentes)
Pérdida de peso entre 1 a 5% con una duración en uso exterior de 10 a 15 años. Son maderas de alta densidad y tratabilidad variable para el duramen.
Categoría MR (Moderadamente Resistentes)
Pérdida de peso entre 5 y 10%, con una duración en uso exterior de 1 a 10 años. Son generalmente maderas de alta densidad y con posibilidades de recibir tratamiento.
Categoría MPR (Muy Poco Resistentes)
Pérdida de peso entre 10 y 30%, con una duración en uso exterior de 1 a 5 años. Son maderas de densidad media y buena tratabilidad.
Categoría NR (No Resistentes)
Pérdida de peso mayor al 30% y una duración de uso exterior menor que un año. Son, en general, maderas de muy baja densidad y muy buena tratabilidad.

Los ensayos de campo o cementerios de maderas permiten, al igual que los de laboratorio, determinar la durabilidad y la efectividad tóxica de los productos químicos preservantes. La diferencia fundamental es que en los ensayos de campo, los factores climáticos tienen influencia directa con el desarrollo del organismo xilófago. Los cementerios de ensayo de durabilidad natural deben contar con ciertos requisitos: deben garantizar la permanencia de su funcionamiento porque son de largos períodos de observación y no tener influencia de personas y animales; el ambiente tiene que reunir condiciones favorables para la actividad biológica para insectos y hongos, con buena exposición solar y el terreno no debe haber sido utilizado en cultivos agrícolas.

El tamaño de las muestras en los cementerios es variado, desde pequeñas hasta postes. Las evaluaciones se hacen según la intensidad de los daños observados y con la clave se interpretarán los resultados de la inspección (Tabla 6.5).

CLAVE PARA INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DURANTE LA INSPECCIÓN DE LA MADERA EN ENSAYOS DE CAMPO. TABLA 6.5

Grado de pudrición	Descripción de la madera en observación	Puntaje o Porcentaje
1	Sana (ninguna señal de pudrición)	100
2	Superficie blanda o indicios de pudrición	75
3	Pudrición comprobada poco avanzada	50
4	Pudrición profunda o intensa	25
5	Pudrición total o destrucción	0

Como conclusión, cabe destacar que la madera, como material de construcción, posee enormes ventajas, tales como su resistencia, economía, facilidad de trabajado y durabilidad, siempre y cuando esté convenientemente protegida. Si, además, se tiene en cuenta que se trata de un recurso renovable pero con ciertas limitaciones, la protección de las mismas adquiere gran importancia.

En los últimos cuatro capítulos hemos analizado con detalle la degradación de cada uno de los diversos materiales de uso más común: metales, vidrios y cerámicos, plásticos y madera. En el próximo capítulo, y a modo de integración de todo lo expuesto, ejemplificaremos algunos casos especiales de degradación. Estudiaremos la degradación de objetos de la vida cotidiana (estructuras de hormigón armado tales como calles, puentes, balcones); de dispositivos usados en medicina (implantes y prótesis); de objetos de valor histórico o artístico (cuadros, estatuas, medallas); y de estructuras que, por la aplicación particular que se les dará, deben presentar un alto grado de resistencia a la degradación (repositorios de material radioactivo).