

FRANCISCO ARRIAGA,
FERNANDO PERAZA,
MIGUEL ESTEBAN, IGNACIO BOBADILLA
Y FRANCISCO GARCÍA

INTERVENCION EN ESTRUCTURAS DE MADERA

Depósito Legal: M-46.312-2002
ISBN: 84-87381-24-3
Imprime: Artes Gráficas Palermo, S.L.
Avda. De la Técnica, 7. Pol. Ind. Santa Ana
28529 Rivas (Madrid)

Autores:

Francisco Arriaga Martitegui. Dr. Arquitecto. Profesor de Cálculo de Estructuras de la U.P.M.
Fernando Peraza Sánchez. Ingeniero de Montes. Director Técnico de AITIM.
Miguel Esteban Herrero. Ingeniero de Montes de AITIM.
Ignacio Bobadilla Maldonado. Dr. Ingeniero de Montes de AITIM.
Francisco García Fernández. Ingeniero de Montes de AITIM.

Dibujos:

Francisco Arriaga Martitegui

Fotografías:

AITIM

Foto portada:

Estructura de la cubierta de la Sala Nuova del Pallazzo Vecchio (Florencia). Giorgio Vasari, 1563.
AITIM

- © Francisco Arriaga Martitegui y Fernando Peraza Sánchez
- © de esta edición Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho.

Este libro ha sido financiado por la Orden FOM/495/2002 de 22 de febrero de 2002 (BOE de 7-3-01) del Ministerio de Fomento para actuaciones relacionadas con las infraestructuras y sistemas de transportes, vivienda y urbanismo.

Intervención en estructuras de madera

Prólogo

Este libro está dirigido a la formación de los técnicos que se enfrentan a una intervención en edificios con estructura de madera. En una gran parte de las actuaciones de rehabilitación en la construcción aparece la madera como material estructural y en muchas ocasiones se encuentran entre sí dos hechos de tendencia contraria: por un lado el conocimiento del material y su patología es escaso debido a la falta de formación en este campo en los planes de estudio anteriores; y por otro lado la fuerte tendencia hacia la conservación del patrimonio arquitectónico, que ahora ya incluye a la estructura de madera como una parte más del edificio.

El contenido del libro es en gran parte el resultado de la experiencia adquirida en AITIM en la intervención para el diagnóstico de estructuras de madera y la propuesta de medidas de actuación, así como del resultado del estudio bibliográfico actualizado.

La organización del contenido del libro está fundamentada en el mismo proceso que se sigue en la intervención arquitectónica. Únicamente en el primer capítulo se trata brevemente sobre las causas de los daños en las estructuras de madera con un carácter más expositivo.

El segundo capítulo expone la sistemática de la inspección del edificio describiendo las técnicas de exploración disponibles. El capítulo tercero define las líneas generales para establecer un diagnóstico de la estructura a partir de la evaluación de la gravedad de los daños y los siguientes capítulos se dedican a las medidas de actuación posibles.

En el capítulo cuarto se describen las medidas de actuación de carácter constructivo que son las primeras que deben atenderse para garantizar la validez del tratamiento y consolidación posteriores. El capítulo quinto se centra en los tipos de tratamiento de carácter curativo para cada grupo de daños incluyendo un detalle suficiente para poder controlar la calidad del mismo. En el capítulo sexto se recogen las medidas de carácter estructural para la recuperación de la seguridad estructural y en su caso el refuerzo. Este capítulo se encuentra organizado por elementos constructivos a reparar describiendo varias posibilidades de actuación con diferentes técnicas con el fin de que el proyectista elija la más adecuada.

Finalmente el capítulo séptimo incluye una serie de ocho casos prácticos de inspección y propuestas de intervención extraídos de ejemplos reales de la propia actividad de AITIM en este campo, aunque con un carácter anónimo.

Como es habitual en otras publicaciones de AITIM la segunda parte del libro se destina a la inclusión de varios anexos que profundizan en algunos aspectos técnicos más especializados. Así se incluye un anexo sobre los organismos xilófagos que facilita las bases para la identificación del tipo de ataque y el conocimiento de su modo de actuación. Otros anexos se dedican al tema de la clasificación estructural de la madera teniendo en cuenta las particularidades de las piezas de gran escuadría.

Uno de los anexos recoge de manera simplificada, pero con rigor, el procedimiento de cálculo de las estructuras de madera de acuerdo con las últimas versiones del eurocódigo 5 «Proyecto

de estructuras de madera». Éste incluye numerosos ejemplos de aplicación a las piezas estructurales más habituales en la rehabilitación.

Otro de los anexos a destacar es el dedicado a la terminología de la construcción con madera, donde se han recogido y explicado los términos más frecuentes de la carpintería de armar con el fin de utilizar una nomenclatura correcta.

Por último, se han incluido otros temas específicos sobre la tecnología de las resinas epoxi, el cálculo de los refuerzos encolados y los sistemas mixtos de madera y hormigón.

En la redacción del texto han surgido numerosas dudas y en muchos casos ha sido necesaria una comprobación de algunas ideas que se manejan habitualmente pero sin conocer si tienen el rigor suficiente. Por este motivo queremos agradecer su colaboración desinteresada que ha resultado de gran ayuda, a las siguientes personas, especialistas en sus campos de conocimiento: Dña. María Angeles Navarrete Varela, Ingeniera de Montes del CIFOR-INIA; D. Ramón Argüelles Álvarez, Dr. Ingeniero de Montes, Catedrático de Cálculo de Estructuras de la E.T.S. de Ingenieros de Montes de Madrid, D. José Antonio Rodríguez Barreal, Dr. Ingeniero de Montes, Catedrático de Patología y Conservación de maderas de la E.T.S. de Ingenieros de Montes de Madrid; Dña. Cristina Villar, Restauradora de la empresa Pátina; D. José María Quiroga, Químico de la empresa Promax S.A.; D. Joaquín Martín Diéguez, Ingeniero T. Forestal de la empresa 3ABC Lasures S.A.; Dña Milagros Fernández de Lezeta, gerente de la Asociación Nacional de Empresas de Control de Plagas (ANECPLA).

Los autores

Índice

Capítulo 1. PATOLOGÍA 15

1.1 Introducción	17
1.2 Patología de origen biótico	17
1.2.1 Generalidades	17
1.2.2 Hongos xilófagos	17
1.2.3 Insectos de ciclo larvario	19
1.2.3.1 Anóbidos (carcoma)	20
1.2.3.2 Cerambícidos (carcoma grande)	20
1.2.3.3 Líctidos (polilla)	21
1.2.3.4 Curculiónidos (gorgojo de la madera)	22
1.2.3.5 Bostríchidos	22
1.2.4 Insectos sociales (termitas)	22
1.2.4.1 Reticulitermes lucifugus Rossi	23
1.2.4.2 Criptotermes brevis Walker	24
1.2.4.3 Kaloterms flavicollis Fabre	24
1.2.5 Otros insectos	24
1.2.6 Xilófagos marinos	25
1.3 Patología de origen abiótico	26
1.3.1 Agentes atmosféricos o meteorológicos	26
1.3.2 Productos químicos	27
1.3.3 Fuego	28
1.4 Patología de origen estructural	31

Capítulo 2. INSPECCIÓN 37

2.1 Introducción	39
2.2 Reconocimiento visual exterior	40
2.3 Reconocimiento de la estructura	42
2.3.1 Generalidades	42
2.3.2 Puntos críticos de las piezas de madera	42
2.3.3 Zonas de riesgo	43

2.4 Técnicas de exploración	47
2.4.1 Equipos tradicionales de exploración	47
2.4.2 Técnicas especiales de exploración	50
2.4.2.1 Ultrasonidos	51
2.4.2.2 Métodos de vibraciones inducidas	56
2.4.2.3 Resistógrafo	58
2.4.2.4 Medición de la densidad superficial	60
2.4.2.5 Gamma-densitometría	60
2.4.2.6 Fractómetro	60
2.4.2.7 Datación de la madera	60
2.4.2.8 Detección acústica de insectos xilófagos	63

Capítulo 3. DIAGNÓSTICO 67

3.1 Evaluación de los daños de origen abiótico	69
3.2 Evaluación de los daños de origen biótico	72
3.2.1 Hongos de pudrición	72
3.2.2 Insectos de ciclo larvario	73
3.2.3 Insectos sociales: termitas	75
3.2.4 Xilófagos marinos	76
3.3 Evaluación de la capacidad resistente de la estructura	78
3.3.1 Introducción	78
3.3.2 Metodología basada en la clasificación visual	78
3.3.3 Otros métodos de evaluación de la capacidad portante de la estructura	81

Capítulo 4. MEDIDAS DE CARÁCTER CONSTRUCTIVO 81

4.1 Introducción	87
4.2 Las humedades procedentes del suelo	89
4.3 El arranque de la estructura desde el terreno	93
4.4 Las apoyos de las vigas en los muros	93
4.5 Los aleros y la protección mediante vuelos	97
4.6 Humedades accidentales en la cubierta y en las instalaciones	99
4.7 Las condensaciones	99
4.8 Medidas específicas para cada tipo de ataque	99

Capítulo 5. TRATAMIENTOS DE PROTECCIÓN..... 101

5.1 Introducción	103
5.2 Metodología del tratamiento contra hongos xilófagos	103
5.2.1 Tratamiento curativo	103
5.2.2 Tratamiento con productos en forma de pastas	105
5.2.3 Tratamiento con implantes	105
5.3 Metodología del tratamiento contra los insectos de ciclo larvario	107
5.3.1 Tratamiento con productos líquidos	107
5.3.2 Tratamiento con productos gaseosos (fumigación)	112
5.3.3 Tratamiento con productos en forma de humos	112
5.3.4 Tratamiento por esterilización con calor	113
5.3.5 Tratamiento por esterilización con frío	114
5.4 Métodos del tratamiento contra insectos xilófagos sociales	115
5.4.1 Tratamiento químico tradicional	115
5.4.2 Tratamiento químico no repelente	123
5.4.3 Sistema de cebos	124
5.4.4 La lucha biológica	125

Capítulo 6. MEDIDAS DE CARÁCTER ESTRUCTURAL 129

6.1 Introducción	131
6.2 Descripción general de las técnicas	132
6.3 Actuaciones sobre los apoyos de las vigas	133
6.3.1 Introducción	133
6.3.2 Apeo sobre una línea adosada al muro	133
6.3.3 Refuerzo del apoyo mediante perfiles metálicos	134
6.3.4 Soluciones con aporte de madera	135
6.3.5 Soluciones con formulaciones epoxi	138
6.4 Actuaciones sobre piezas sometidas a flexión	143
6.4.1 Introducción	143
6.4.2 Soluciones con aporte de madera	143
6.4.3 Aplicación de la tecnología de las resinas epoxi	145
6.4.4 Soluciones de sustitución con hormigón	152
6.4.5 Soluciones mixtas de madera y hormigón	154
6.4.6 Soluciones mixtas de madera y tablero	164
6.4.7 Soluciones con acero	165

6.5 Actuaciones en pies derechos	168
6.6 Actuaciones en armaduras de cubierta	172

Capítulo 7. Ejemplos de inspección 185

Ejemplo 7.1. Cubierta de una sala	189
Ejemplo 7.2. Edificio de viviendas	195
Ejemplo 7.3. Edificio de viviendas	201
Ejemplo 7.4. Cubierta de una iglesia	205
Ejemplo 7.5. Edificio de viviendas	209
Ejemplo 7.6. Edificio de viviendas	213
Ejemplo 7.7. Edificio de vivienda y local comercial	219
Ejemplo 7.8. Edificio de viviendas	225

ANEXOS 229

Anexo A. Organismos xilófagos 231

A.1 Generalidades	233
A.2 Hongos xilófagos	234
A.2.1 Mohos	235
A.2.2 Hongos cromógenos	235
A.2.3 Hongos de pudrición	236
A.3 Insectos de ciclo larvario	239
A.3.1 Anóbidos (carcoma)	242
A.3.2 Cerambícidos (carcoma grande)	246
A.3.3 Líctidos (polilla)	250
A.3.4 Curculiónidos (gorgojo de la madera)	252
A.3.5 Bostríchidos	254
A.3.6 Escolítidos y platipódidos	255
A.4 Insectos sociales (termitas)	257
A.4.1 Características de las termitas	257
A.4.2 Reticulitermes lucifugus Rossi	258
A.4.3 Criptotermes brevis Walker	261
A.4.4 Kaloterme flavicollis Fabre	262
A.5 Otros insectos	263
A.5.1 Sirícidos (avispa de la madera)	263
A.5.2 Xilocópidos (abeja de la madera)	263

A.6 Xilófagos marinos	264
A.6.1 Moluscos xilófagos	264
A.6.2 Crustáceos xilófagos	
Anexo B. Normas de clasificación	269
Anexo C. Propiedades mecánicas asignadas a la madera en la antigüedad	281
Anexo D. Reglas de clasificación visual de la madera de gran escuadría	287
Anexo E. Comprobación de estructuras de madera	299
E.1 Introducción	301
E.2 Bases de cálculo	302
E.2.1 Propiedades mecánicas de la madera. Clases resistentes	302
E.2.2 Valores de cálculo de las propiedades mecánicas de la madera	302
E.2.3 Valores de cálculo de los efectos de las acciones	306
E.2.4 Inestabilidad por pandeo y vuelco lateral	307
E.2.5 La deformación y la fluencia	309
E.2.6 Estabilidad al fuego	309
E.2.7 Efecto de la patología de origen biótico	311
E.3 Peritación de elementos estructurales	311
E.3.1 Vigas y viguetas	311
E.3.2 Correas	315
E. 3.3 Piezas traccionadas	321
E.3.4 Piezas comprimidas	325
E.3.5 Uniones tradicionales	330
Anexo F: Terminología de la construcción con madera	333
F.1 Introducción	335
F.2 Entramados verticales	336
F.3 Entramados horizontales	340
F.4 Armaduras de cubierta	342

F.5 Uniones	353
F.5.1 Ensambles	353
F.5.2 Empalmes	357
F.5.3 Acoplamientos	359
F.5.4 Uniones en los extremos de los pilares	350
F.6 Términos de carpintería de armar	361
Anexo G: Productos protectores	385
G.1 Introducción	387
G.2 Protectores de la madera contra organismos xilófagos	388
G.2.1 Composición	388
G.2.2 Características de los protectores de la madera	389
G.2.3 Eficacia del producto	389
G.2.4 Clasificación de los protectores	389
G.3 Productos retardantes del fuego	393
G.3.1 Tipos de productos ignífugos	393
G.3.2 Efectos de los productos retardantes del fuego sobre otras propiedades de la madera	394
Anexo H. Métodos de tratamiento tradicionales	397
H.1 Durabilidad natural y tratamientos protectores	399
H.2 Antecedentes de la protección de la madera. Métodos y protectores tradicionales	400
H.3 Protectores tradicionales en la actualidad	405
H.3.1 Pigmentos y tintes	405
H.3.2 Acabados a base de aceites	407
H.3.3 Acabados a base de ceras	408
H.3.4 Gomas y resinas	409
Anexo I. Seguridad e higiene en el trabajo	413
Anexo J. Tecnología de las resinas epoxi	419
J.1 Introducción	421
J.2 Materiales	422

J.2.1 Madera	422
J.2.2 Formulación epoxi	422
J.2.3 Materiales de refuerzo	423
J.3 Polimerización	425
J.4 Protección de la madera	426
Anexo K. Cálculo de los refuerzos encolados	429
K.1 Introducción	431
K.2 Refuerzo de piezas sometidas a flexión mediante placas	433
K.2.1 Resistencia a flexión	433
K.2.2 Resistencia a cortante	434
K.2.3 Inestabilidad de la placa	435
K.2.4 Longitud de anclaje	436
K.2.5 Disposición constructiva	438
K.3 Refuerzo de piezas sometidas a flexión mediante barras	438
K.3.1 Determinación de la sección de las barras de conexión	438
K.3.2 Longitud de anclaje de las barras	441
K.3.3 Disposiciones constructivas	442
K.4 Refuerzo de piezas sometidas a esfuerzos axiales	443
K.4.1 Generalidades	443
K.4.2 Cálculo de la sección del refuerzo	444
K.4.3 Longitud de anclaje	445
K.5 Refuerzo de uniones mediante clavijas encoladas	446
K.6 Cálculo de la capacidad de carga de uniones mediante barras de acero encoladas según Eurocódigo 5	446
K.6.1 Barras con carga axial	446
K.6.2 Barras con carga lateral	448
K.6.3 Barras sometidas a una combinación de carga lateral y axial	449
K.6.4 Consideraciones constructivas	449
Anexo L: Cálculo de sistemas mixtos de madera y hormigón	454
L.1 Introducción	453
L.2 Parámetros básicos para el cálculo	453

L.3 Procedimiento de cálculo de la sección mixta de madera y hormigón	455
L.3.1 Rigidez eficaz a flexión	455
L.3.2 Tensión normal	456
L.3.3 Tensión tangencial máxima	456
L.3.4 Fuerza rasante en el conector	456
L.4 Consideraciones constructivas	457
L.5 Ejemplo de cálculo	457

UNIDADES

Las unidades adoptadas corresponden al Sistema Internacional. Las unidades prácticas recomendadas en el sistema S.I., son las siguientes:

Para resistencias y tensiones:	N/mm^2
Para fuerzas:	kN
Para fuerzas por unidad de longitud:	kN/m
Para fuerzas por unidad de superficie:	kN/m^2
Para momentos:	$kN\cdot m$

La correspondencia con el sistema Metro-Kilopondio-Segundo es la siguiente:

$$1 \text{ kp} = 9,8 \text{ N} \simeq 10 \text{ N}$$

$$1 \text{ N} = 0,102 \text{ kp} \simeq 0,1 \text{ kp}$$

$$1 \text{ kp/cm}^2 = 0,098 \text{ N/mm}^2 \simeq 0,1 \text{ N/mm}^2$$

$$1 \text{ N/mm}^2 = 10,2 \text{ kp/cm}^2 \simeq 10 \text{ kp/cm}^2$$

Capítulo 1

Patología



1.1 Introducción

Los daños que pueden encontrarse en una estructura de madera pueden tener tres orígenes principalmente: los daños de origen biótico relacionados con los organismos xilófagos; los de origen abiótico, donde pueden situarse las consecuencias de la exposición a la intemperie y el fuego; y los de origen estructural. En realidad los daños producidos por los organismos xilófagos provocan problemas mecánicos que afectan a la seguridad estructural, pero a veces se pueden dar problemas cuyo origen es un defecto de cálculo o de construcción sin la presencia de los xilófagos.

El primer paso que se da para la intervención en un edificio con el fin de conocer su estado para definir el tipo de actuación es la inspección del mismo. Este tema se trata en el capítulo segundo. Pero antes de la inspección es conveniente conocer la patología que afecta a las estructuras de madera.

1.2 Patología de origen biótico

1.2.1 Generalidades

En este apartado se realiza una exposición de los diferentes tipos de organismos xilófagos que pueden afectar a las estructuras de madera. Para cada tipo de agente xilófago se resumen las características principales de su modo de actuación y se recogen las especies más relevantes. En el anexo A se incluye una información más detallada orientada a la identificación de la especie y a sus particularidades.

Los grandes grupos en los que pueden clasificarse los organismos xilófagos son los siguientes:

- Hongos xilófagos
- Insectos de ciclo larvario
- Insectos sociales (o termitas)
- Otros insectos
- Xilófagos marinos

1.2.2 Hongos xilófagos

Los hongos son vegetales de organización celular muy primitiva que viven de forma saprófita, alimentándose de elementos muertos, o en forma parásita, alimentándose de sustancias de otros animales o vegetales con quien vive unido. La presencia de los hongos se puede detectar por un color anormal de la madera, su manifestación sobre la superficie de la madera (en forma de micelios o de cuerpos de fructificación), la degradación del material o la presencia de insectos xilófagos que suelen acompañarlos.

El hongo se introduce en la madera mediante las hifas (células muy finas sólo visibles con microscopio) para recoger el alimento. El conjunto formado por las hifas durante su crecimiento se denomina micelio, que en determinadas circunstancias se transforma en los cuerpos de fructificación (parte normalmente visible del hongo). Éste, desprende las esporas para su reproducción que pueden trasladarse a otras zonas mediante el viento o los animales. En la práctica hay esporas presentes en cualquier ambiente por lo que en condiciones adecuadas su desarrollo es muy fácil.

El requisito que tiene más relevancia en relación a su comportamiento es su dependencia de la humedad. El contenido mínimo de humedad en la madera, que permite su desarrollo, es del 18 al 20 %. Toda madera con contenidos superiores a este valor está expuesta al ataque de los hongos; y al contrario, si el contenido de humedad es inferior a dicho umbral el ataque no puede desarrollarse. El contenido de humedad óptimo está entre el 35 y el 50 %.

Dentro de los hongos xilófagos pueden diferenciarse dos grandes grupos: el primero está formado por los mohos y los hongos cromógenos y el segundo por los hongos de pudrición.

Los mohos y los hongos cromógenos se alimentan de las sustancias de reserva de la madera y no producen degradaciones en la pared celular, por lo que no afectan a las propiedades mecánicas. Su efecto es el cambio de la coloración de la madera. Su crecimiento se detecta cuando la superficie se oscurece o cuando el cuerpo de fructificación forma sobre la superficie una especie de pelusilla (proliferaciones algodonosas) transparente o con tonalidades que van desde el color blanco al negro. Los más característicos son los hongos del azulado de la madera y el pasmo del haya.

Aunque no resultan peligrosos por su mínima acción degradadora, son indicativos de un mayor riesgo porque crean las condiciones necesarias para el desarrollo de los hongos de pudrición.

Los hongos de pudrición son los que producen daños graves en la madera. Se alimentan de los componentes de la pared celular llegando a provocar la destrucción completa de ésta. La hifa producen productos químicos (enzimas) que disuelven los nutrientes de la madera con los que se alimentan. Su efecto es la pérdida de densidad y resistencia acompañados de un cambio de coloración. En las etapas iniciales no es fácil de reconocer ya que las hifas permanecen ocultas en su interior. Según va desarrollándose la pudrición se va acentuando el cambio de color y la madera comienza a perder peso. En la fase final del proceso se llega a la destrucción total de la estructura de la madera con una pérdida completa de sus propiedades mecánicas.

Las pudriciones pueden clasificarse en los tipos siguientes:

- pudriciones pardas o cúbicas
- pudriciones blancas o fibrosas
- pudriciones blandas

La pudrición parda es la más grave y peligrosa y está producida por hongos que se alimentan preferentemente de la celulosa y la hemicelulosa dejando, como consecuencia, un residuo de color marrón oscuro formado principalmente por lignina. Al secarse la pieza el material residual tiende a agrietarse formando una estructura de pequeños cubos o prismas que se disgrega con facilidad entre los dedos como si fuera polvo, figura 1.1. El ataque inicial de estos hongos favorece el ataque posterior de los insectos de ciclo larvario (generalmente anóbidos).

La pudrición blanca está producida por hongos que se alimentan preferentemente de la lignina, aunque también en menor grado de celulosa. La madera atacada toma un color blancuzco debido al complejo celulósico resultante (complejo de celulosa más o menos blanquecino que rara vez es de tono uniforme, sobre el que aparecen vetas blancas separadas por zonas de madera normal). La madera atacada presenta un aspecto fibroso, por lo que a veces se la llama pudrición fibrosa. Generalmente afectan más a las maderas de frondosas que a las de



Figura 1.1 Daños producidos por hongos de pudrición parda.

coníferas, debido a que éstas tienen un mayor contenido de lignina. A menudo se denomina pudrición corrosiva o deslignificante.

La pudrición blanda está originada por hongos inferiores, cuyas hifas se desarrollan en el interior de la pared celular de las células de la madera y atacan principalmente la celulosa de la pared

secundaria. La madera atacada tiene un aspecto final blando o esponjoso, parecido al de queso fresco. Esta pudrición se produce cuando existen altas condiciones de humedad, tanto en el ambiente como en la madera.

1.2.3 Insectos de ciclo larvario

Los insectos de ciclo larvario, que aquí se describen, pertenecen al orden de los coleópteros. Su característica común es que se alimentan de la madera durante su etapa de larva. El ciclo biológico comienza cuando las hembras ponen los huevos en la madera dentro de las fendas, ranuras u orificios de la superficie. De estos huevos nacen pequeñas larvas que comienzan a alimentarse de la madera realizando galerías que disminuyen la capacidad resistente de la pieza. Las larvas permanecen en el interior de la madera un periodo muy variable en función de la especie que puede ir desde unos meses hasta más de diez años y es durante esta fase cuando producen daños en las piezas de madera. Al acercarse el final de su ciclo de vida, la larva se aproxima a la superficie de la pieza, crea una cámara aislada donde se transforma en pupa y sigue su proceso de metamorfosis hasta convertirse en un insecto adulto con alas. Éste rompe la cámara de pupación y la fina capa de madera que queda superficialmente y sale al exterior para aparearse; la hembra volverá a colocar huevos en las piezas de madera. Los orificios de salida en la superficie de la madera indican, por tanto, que al menos ha vivido dentro una generación.

Existen géneros que se alimentan de madera de frondosas, otros de maderas de coníferas y otros que pueden atacar indistintamente a ambas.

Los principales coleópteros xilófagos que actúan en España y que atacan a la madera puesta en obra están constituidos por las familias siguientes:

- Anóbidos (vulgarmente carcoma)
- Cerambícidos (carcoma grande)
- Líctidos (polilla)
- Curculiónidos (gorgojo de la madera)
- Bostríchidos

1.2.3.1 Anóbidos (carcoma)

Los anóbidos son pequeños coleópteros de 3 a 11 mm de longitud, en estado adulto, conocidos vulgarmente como carcoma y son ataques característicos de los muebles antiguos, aunque también atacan a las piezas estructurales. Hay especies que se alimentan de la madera de conífera y otras de la madera de frondosa. Por lo general, afectan a la albura y preferentemente con cierto contenido de humedad. Es frecuente que su ataque acompañe al de los hongos de pudrición.

La larva puede alcanzar una longitud de 3 a 5 mm. Los orificios de salida son de forma circular con 1,5 a 4 mm de diámetro, según la especie, figura 1.2. La duración de su ciclo biológico es muy variable, desde un mínimo de 8 meses hasta varios años; de forma general se puede estimar de 2 a 3 años.

Las especies más frecuentes en la construcción en España son las siguientes:

- *Anobium punctatum* De Geer
- *Xestovium rufovillosum* De Geer

1.2.3.2 Cerambícidos (carcoma grande)

Los insectos de la familia de los Cerambícidos son los xilófagos, de los que afectan a la madera puesta en obra, de mayor tamaño que existen en España. Se conocen vulgarmente como carcoma grande y en su campo de actuación se encuentran las estructuras de madera, frecuentemente en cubiertas. En piezas antiguas es fácil observar algún orificio de salida de este insecto, aunque el ataque se encuentre inactivo. Por lo general sólo se alimentan de la albura de la madera por lo que en piezas de gran contenido de duramen el daño es limitado. Hay especies que se alimentan de coníferas y otras de frondosas.

Las especies más habituales en España son las siguientes:

- *Hylotrupes bajulus* L.
- *Hesperophanes cinereus* Vill.
- *Ergates faber* L.

Por lo general el ataque del *Hylotrupes bajulus* (especie más frecuente en coníferas) se da en maderas secas (entre el 10 y 14 %), en particular en las estructuras de cubiertas. La larva puede alcanzar una longitud de 30 mm, tiene un diámetro de 6 mm y es de color blanco plateado.

Las galerías son de forma ovalada, siguen la dirección



Figura 1.2 Daños producidos por anóbidos.



Figura 1.3 Daños producidos por cerambícidos.

afectando sólo a las piezas que contienen albura. En España únicamente se han detectado dos especies (*Lyctus brunneus* y *Lyctus linearis*)

El serrín que producen es muy fino, de color blanco cremoso; su tacto se asemeja a la harina o al polvo de talco y suele estar apretado por la larva en las galerías. Los orificios de salida tienen forma circular con un diámetro aproximado de 1 a 2 mm, figura 1.4. El insecto adulto tiene un

tamaño cuya longitud varía entre 2 y 7 mm.



Figura 1.4 Daños producidos por líctidos.

de la fibra, están taponadas por serrín y presentan marcas o estrías en las paredes de las mismas. El serrín es basto, tiene forma cilíndrica y no es expulsado al exterior, ya que las galerías están cerradas por una fina película de madera que las larvas dejan intacta, figura 1.3.

El insecto adulto de los cerambícidos tiene una longitud de 10 a 20 mm (en algunas especies puede alcanzar los 50 mm). Los orificios de salida tienen forma elíptica con un diámetro de 6 a 12 mm. La duración del ciclo de vida varía mucho, oscilando entre 2 y 10 años.

1.2.3.3 Líctidos (polilla)

Los líctidos son insectos de pequeño tamaño (6 a 8 mm de longitud) que se conocen vulgarmente como polillas. Se alimentan de albura de algunas especies de frondosas como el roble, el fresno y el olmo. Las condiciones óptimas para su ataque corresponden a un contenido de humedad de alrededor del 16 % y una temperatura de 25 °C. El daño más frecuente producido por estos insectos se da en los pavimentos de parquet de madera de roble,

Normalmente, la duración del ciclo biológico es de un año, pudiéndose acortar si existen altas temperaturas. La brevedad de su ciclo biológico permite sucesivas infestaciones que pueden originar una rápida destrucción de la madera.

1.2.3.4 Curculiónidos (gorgojo de la madera)

Hasta hace unos veinte años este insecto no comenzó a identificarse en la madera de construcción en España; los signos de su ataque pueden confundirse fácilmente con el de los anóbidos.

En España se han identificado tres especies en madera de edificios antiguos (*Pselactus spadix* H., *Hexarthrum exiguum* B. y *Amaurorrhinus bewickianus* W.) (Rodríguez T., 1985).

Sus daños son muy parecidos a los de los anóbidos. Atacan a la madera de albura de las frondosas y las coníferas. Cuando existen ataques previos de hongos pueden afectar a la madera de duramen. Requieren una humedad en la madera mayor o igual al 20 %. Las galerías que realizan las larvas (y también los insectos adultos) en la madera de albura son de sección circular y son similares a las de los anóbidos. El serrín que producen es parecido al de los anóbidos pero algo más fino y de forma heterogénea.

Los orificios de salida son de forma circular con un diámetro de 1 a 2 mm. La duración del ciclo biológico en algunas especies es de 1 año, y en otras puede llegar a 2 años. Los insectos adultos tienen una longitud de 3 a 5 mm.

1.2.3.5 Bostrichidos

Estos insectos se alimentan principalmente de la madera de albura de las frondosas (tropicales principalmente) con alto contenido en almidón y con cierto grado de humedad. En España la especie que produce más daño es el *Apathe capucina* L., que ataca a las frondosas boreales (castaño, chopo y roble).

Realizan galerías circulares con diámetros de 3 a 6 mm. El serrín es muy fino, parecido a la harina, de color crema y se encuentra aprisionado en el interior de las galerías. El insecto adulto tiene una longitud de 4 a 6 mm. Los orificios de salida son circulares con diámetros de 3 a 6 mm. Por las características del ataque pueden confundirse con los líctidos, pero éstos realizan orificios de menor diámetro (1 a 2 mm). La duración del ciclo biológico es aproximadamente un año.

1.2.4 Insectos sociales (termitas)

Las termitas son insectos del orden *Isoptera* que viven bajo una organización social avanzada. Constituyen una agrupación de individuos en la que los distintos tipos o castas, incapaces de vivir solitariamente, desempeñan diferentes cargos o funciones en el desarrollo de la colonia. El ciclo de vida de una colonia empieza con el vuelo, en forma de enjambre, de los individuos sexuales, que en ciertos días del año salen en gran cantidad del antiguo nido. Los individuos que constituyen una pareja buscan un lugar apropiado para el futuro nido, abriendo una cavidad (cámara nupcial) en la que realizan la copulación. Los huevos que pone la hembra, futura reina, se convierten en ninfas que según las necesidades de cada momento pueden dar lugar a castas o individuos morfológicamente distintos:

- Individuos sexuales: entre los que se distinguen las parejas reproductoras, tanto la pareja real fundadora como las secundarias (individuos neoténicos), que aparecen posteriormente y que tienen la misión de aumentar la población de la colonia; y los individuos alados reproductores, que pueden abandonar el nido y crear otros nuevos.
- Soldados: individuos con mandíbulas grandes, también hay formas especiales que están

armadas con una glándula que produce una secreción pegajosa. Su misión es la defensa de la colonia.

- Obreros: generalmente de forma poco especializada. Su misión es realizar todos los trabajos de la comunidad: buscar alimento, alimentar a los demás individuos de la colonia, cuidar a la pareja real y construir, reparar y limpiar el nido.

Las termitas que se encuentran en España se pueden clasificar en los dos grupos siguientes:

- Termitas subterráneas: caracterizadas porque tienen sus nidos en el subsuelo. La especie que se encuentra en la península y Baleares es la *Reticulitermes lucifugus* Rossi.
- Termitas de madera seca: hacen sus nidos en la madera. La especie que se encuentra sólo en Canarias es la *Criptotermes brevis* Walker. Además existe otra especie, la *Kaloterмес flavicollis* Fabr., que presenta daños de escasa importancia para la madera de construcción, ya que sólo viven en árboles de frondosas enfermos y sus colonias son poco numerosas.

1.2.4.1 *Reticulitermes lucifugus* Rossi

Su nido principal está en el suelo y casi siempre fuera de los edificios atacados; a través de él entran subterráneamente en los edificios en donde pueden formar nidos secundarios. La tierra les aporta los tres elementos indispensables para su supervivencia: la oscuridad, una temperatura moderada relativamente constante y una humedad permanente. Aprovechan pequeños rincones húmedos de muros y paredes o las cavemas ya producidas en la madera atacada (especialmente en las cabezas de vigas o detrás de zócalos) y una vez en la casa pueden interrumpir su comunicación con el nido principal, sin perjuicio para el desarrollo de la colonia en su nido principal.

Para su desarrollo necesitan un cierto grado de humedad en el suelo y un elevado porcentaje de humedad relativa del aire (para su plena actividad necesitan una humedad relativa del aire del 95 al 100 %, es decir el aire está prácticamente saturado). Durante su actividad recogen constantemente tierra húmeda con la que recubren los canales que construyen o en las galerías que practican en la madera para garantizar la conservación de la humedad.

En la madera abren galerías paralelas a la dirección de las fibras, dejando una capa exterior intacta que les oculta del exterior, de espesor muy reducido (1 a 2 mm). Los daños son muy



característicos dejando entre las galerías verdaderas tiras de madera sin atacar, con lo que adquiere el aspecto de «hojas de libro», figura 1.5. La posible explicación de esta forma de ataque radica en que es más fácil alimentarse de la madera blanda de primavera, y por lo tanto dejan intacta la madera más dura formada en verano.

En ciertos casos construyen tubos o canales de pequeño

Figura 1.5 Daños producidos por termitas.

diámetro (1-2 mm) y de pared gruesa, constituidos por deyecciones aglomeradas por una sustancia de secreción y tierra, que se endurece rápidamente al contacto con el aire. Estos tubos o canales sirven como vías de paso de una pieza de madera a otra y en ellos se mantiene un alto grado de humedad necesario para su supervivencia.

Normalmente necesitan varios años para provocar daños peligrosos para un edificio; sin embargo, existen casos en los que dos o tres años han sido capaces de producir daños estructurales graves.

1.2.4.2 Criptotermes brevis Walker

El *Criptotermis* suele formar sus nidos en la madera seca de las edificaciones. Se han encontrado ataques en muebles, armarios, marcos de cuadros, vigas de cubierta, etc.; no se han encontrado ataques en árboles muertos ni en tocones. El desarrollo es muy lento, la reina sólo pone de 1 a 2 huevos por día y la colonia no suele ser muy numerosa, rara vez llegan a unos miles de individuos, el número habitual de individuos es de 100 a 250.

Sus necesidades de humedad corresponden a un contenido de humedad de la madera del 15 %, que es el límite máximo para su ataque. La señal típica de su ataque es la falta de aglomerados en las galerías que practican. Las perforaciones de entrada están siempre tapadas por una secreción que forma una película fina, quedando así el orificio casi invisible.

El aspecto del ataque en la madera degradada es similar al del *Reticulitermes*, pero en este caso se realiza por las ninfas procedentes de las larvas, que no se convierten en obreras sino que se mantienen en ese estado de ninfas. Posteriormente algunas ninfas se convierten en soldados, pero la gran mayoría se transforman en individuos sexuados alados.

Su capacidad de destrucción es muy elevada; es posible que destruya mobiliario fijo en meses y estructuras de cubierta, muy atacados, en uno o dos años.

1.2.4.3 Kaloterms flavicollis Fabre

Esta especie vive en los árboles principalmente en los paseos con ramas cortadas lo que facilita la formación de los nidos. Sus daños son reducidos y sólo alcanza cierta importancia en cultivos de árboles frutales, alcornoque o vid. Forman los nidos en la madera y realiza galerías que tapa con un aglomerado de un material menos resistente que el de las termitas subterráneas. Las colonias constan de pocos individuos y rara vez pasan del millar, por lo que los daños suelen ser localizados.

1.2.5 Otros insectos

En este apartado se incluyen otros insectos pertenecientes al orden *Hymenoptera* cuya importancia es, relativamente, menor para la madera utilizada en edificios o en la construcción.

Los sirécidos (avispa de la madera) son insectos parecidos a las avispas que atacan a los árboles de coníferas enfermos o recién cortados. La madera procedente de estos árboles puede incorporarse posteriormente a los edificios y las larvas que han introducido pueden emerger posteriormente como adultos. Sin embargo, no pueden volver a infestar la madera seca. Las larvas realizan galerías de sección circular con diámetros de 4 a 7 mm de grandes

longitudes (20 a 45 cm). La duración del ciclo biológico es de dos a tres años. El insecto adulto es parecido a una avispa de color negro y con una longitud de 18 a 35 mm. Los orificios de salida son de forma circular de 4 a 7 mm de diámetro.

Los xilócópodos (abeja carpintera) no son propiamente xilófagos, ya que la madera no constituye su principal fuente de alimento. Afectan a la madera sana o ligeramente degradada de coníferas y frondosas de troncos de árboles, madera estructural y postes de transmisión. El insecto adulto hembra perfora galerías de 10 a 15 mm de diámetro en la pieza de madera siguiendo la dirección de la fibra. La longitud de las galerías puede llegar hasta 45 cm. El insecto adulto normalmente se identifica como una abeja de color negro, con un tamaño de 20 a 25 mm. Los orificios de salida son de forma circular con diámetros de 10 a 15 mm.

1.2.6 Xilófagos marinos

Los daños más importantes para la madera en contacto con el agua marina son los producidos por los moluscos y los crustáceos. Se diferencian entre sí, además de sus diferencias anatómicas, por la forma del ataque y el aspecto que presenta la madera degradada. Los moluscos realizan una degradación en el interior de la madera que no suele ser visible; mientras que los crustáceos realizan una degradación superficial que siempre es visible desde el exterior.

Afectan a la madera de albura y duramen de las especies coníferas y frondosas de las embarcaciones, puertos y muelles.

El género más importante de los moluscos es el *Teredo* que utiliza la madera como cobijo y como alimento junto con sustancias orgánicas disueltas en el agua. Realiza galerías de 10 a 12 mm de diámetro recubiertas de una capa caliza. La especie más importante es el *Teredo navalis*, conocido antiguamente como «calamitas navium» o «broma». El *Teredo* vive en el interior de la madera durante toda su vida. Las paredes de la galería aparecen recubiertas de una capa caliza. La degradación no es visible desde el exterior.

Los crustáceos xilófagos se diferencian de los moluscos en que no se encuentran aprisionados en el interior de la madera, sino que pueden moverse libremente en su interior. La degradación que producen es visible exteriormente y es muy diferente a la causada por los moluscos. Actúan en masa y su fuerza destructora puede ser extraordinaria. Abren galerías con longitudes inferiores a 1 cm y con diámetros de 2 mm y dejan la madera prácticamente cribada (tienen el aspecto de un panal). Los finos tabiques de separación de las galerías se rompen con el impacto del agua quedando al cabo de un cierto tiempo formada una nueva superficie de ataque a la vez que se da una disminución de la resistencia del elemento de madera por pérdida de sección. El desgaste anual en profundidad varía de 3 a 6 cm.

Las principales especies presentes en España son la *Limnoria lignorum* White, *Limnoria tripunctata* Men y *Chelura terebrans* Ph.

1.3 Patología de origen abiótico

Los agentes destructores abióticos incluyen, principalmente, a los agentes atmosféricos (el sol y la lluvia), los agentes químicos y el fuego.

1.3.1 Agentes atmosféricos o meteorológicos

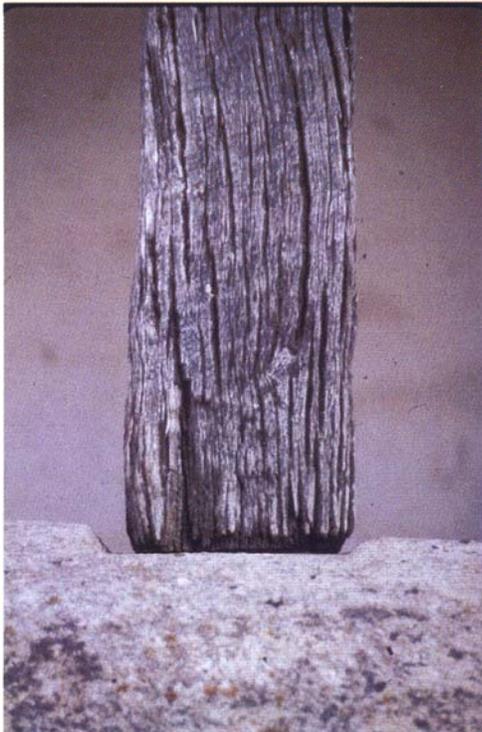
Los principales agentes atmosféricos o meteorológicos son el sol y la lluvia, que actúan sobre la superficie de la madera colocada al exterior y sobre la protección superficial que pueda tener.

Una de las principales causas del deterioro superficial de la madera se debe a los cambios rápidos del contenido de humedad de la capa externa. El agua de lluvia que moja la superficie de la madera sin protección es absorbida rápidamente por la capa superficial de la madera seguida de la adsorción en las paredes de las células. El vapor de agua es recogido directamente por las paredes de las células.

La diferencia de humedad entre el interior y la capa superficial, que tiende a hinchar, provoca un estado de tensiones en la pieza que ocasiona curvaturas, alabeos y fendas.

La radiación solar actúa principalmente a través de los rayos ultravioletas e infrarrojos. La acción de los rayos ultravioleta se localiza en la superficie de la madera; ésta se oscurece tendiendo al principio al color marrón y posteriormente toma un color grisáceo, figura 1.6.

La radiación ultravioleta degrada los componentes de la madera comenzando por la lignina. La incidencia del agua de lluvia provoca por erosión la eliminación de los productos degradados por la acción del sol. Las células superficiales se recubren lentamente de mohos que viven de la humedad de la madera y de los productos de la fotodegradación, dando a la superficie una coloración grisácea o negruzca. El agua y el sol actúan de forma combinada y se potencian entre sí multiplicando sus efectos.



La degradación que producen es lenta, se estima en 1 a 13 mm por siglo. La degradación de la superficie depende principalmente de su orientación, además de la especie de madera y el clima. En nuestro hemisferio las fachadas sur, suroeste y oeste son, por este orden, las más desfavorables frente a la acción del sol.

Los rayos infrarrojos provocan una acción degradante indirecta sobre la madera ya que mediante un proceso de calentamiento superficial generan la aparición de fendas en la cara expuesta y la subida de resinas a la superficie. El contenido de humedad de la madera es función directa de la temperatura

Figura 1.6 Efecto de la radiación solar: fotodegradación.

de la misma. La superficie expuesta sufre un proceso de calentamiento que origina una pérdida de humedad superficial, como el interior de la pieza se mantiene más frío su contenido de humedad será diferente al de la capa superficial. Esta diferencia de contenidos de humedad entre la superficie y el interior de la pieza se traduce en tensiones, ya que la superficie de la pieza tenderá a contraerse al disminuir su contenido de humedad por la acción del calor y dicha contracción se ve dificultada o frenada por la parte interior, que provoca la aparición de fendas. En realidad se debería hablar de microfendas ya que muchas veces no son visibles por el ojo humano.

La aparición de fendas también está relacionada con la especie de la madera utilizada. Si la madera tiene un coeficiente de contracción elevado se favorece la aparición de fendas, si por el contrario tiene un coeficiente de contracción bajo disminuye la posibilidad de que aparezcan fendas o si aparecen su número y su profundidad suele ser mucho menor. Otro efecto negativo provocado por este calentamiento es la subida de la resina que aflora en la superficie de la pieza, algunas especies cuyo contenido en resina es elevado presentan con mayor incidencia esta particularidad.

1.3.2 Productos químicos

En general la acción de los productos químicos sobre la madera se traduce normalmente en simples alteraciones del color. La madera es muy resistente a los agentes químicos aunque sufre alteraciones por la acción de los ácidos fuertes y lejías alcalinas e incluso los detergentes. La cal apagada en estado fresco puede ejercer una acción corrosiva si está mucho tiempo en contacto con la madera.

La madera, principalmente la madera de frondosas, puede sufrir daños de origen químico en ambiente ácido o álcali. Los ácidos rompen las cadenas de carbono de la composición de la madera (hidrólisis) dejando la parte afectada con un aspecto fibroso parecido al de la pudrición blanca; en este aspecto las frondosas son más susceptibles de deterioro. En zonas industriales con alta contaminación se han podido encontrar daños de este tipo en las piezas de la estructura de cubierta de madera de coníferas.

El ambiente alcalino produce un daño muy diferente y más grave. Mientras que los ácidos afectan a la celulosa, pero tienen poca influencia sobre la lignina, los álcalis actúan al revés, degradan la lignina y las hemicelulosas de forma que la madera pierde resistencia y consistencia. En la madera para la construcción este proceso apenas tiene relevancia.

La mayoría de las maderas son ácidas debido a la presencia de ácidos libres, predominantemente ácido acético. Las maderas tradicionalmente utilizadas en la construcción, como el pino silvestre y el roble, tienen valores del pH de 5 y 4 respectivamente. Es decir el roble es 10 veces más ácido que el pino silvestre. La acidez no presenta problemas salvo que la madera esté húmeda; sin embargo, algunas maderas como el roble o el castaño, exudan ácido acético durante el secado. El roble verde contiene elevados niveles de ácido acético que provoca la corrosión de los metales si no están adecuadamente protegidos.

El roble y otras maderas, con el paso del tiempo pierden los ácidos libres y se reduce su capacidad de corrosión. Sin embargo, si la madera se humedece o si está sometida a cambios cíclicos de humedad y secado (debidos por ejemplo a la ventilación, calefacción y ocupación) puede producir más ácido por un proceso de hidrólisis (Ridout, 2000).

Normalmente estas manchas son de color negro o negro azulado y se producen como resultado de la formación de compuestos de hierro de color oscuro. Pueden eliminarse con una solución acuosa de ácido oxálico al 8 % en las zonas afectadas. Una vez eliminada la mancha debe tenerse cuidado en lavar bien con agua la superficie para eliminar cualquier rastro de ácido, ya que podría formar otras manchas al reaccionar con otros componentes de la madera (López de Roma, 1985).

1.3.3 Fuego

Comportamiento de la madera frente al fuego:

La madera y sus productos derivados están formados principalmente por celulosa y lignina, los cuales se componen de carbono, hidrógeno y oxígeno. Estos componentes la hacen combustible. La madera maciza no arde rápidamente y son realmente pocos los casos en los que en un incendio haya sido el primer material en arder.

Sin la presencia de llama, la madera necesita una temperatura en la superficie superior a 400 °C para comenzar a arder en un plazo de tiempo medio o corto. Incluso con la presencia de llama se necesita una temperatura en la superficie de unos 300 °C durante un cierto tiempo antes de que se produzca la ignición.

Cuando la madera se encuentra expuesta a un incendio en fase de pleno desarrollo, presenta un comportamiento de características muy favorables para la estructura. Inicialmente se produce una combustión rápida de la superficie de la madera y se origina una capa carbonizada. Debajo de esta capa existe otra en la que se produce la pirólisis de la madera y finalmente bajo esta capa aparece la madera sin afectar por el fuego.

La madera es un material con gran capacidad de aislamiento térmico lo que supone una importante ventaja en caso de incendio. El coeficiente de conductividad térmica de las coníferas (pino y abetos) en la dirección perpendicular a la fibra varía aproximadamente de 0,09 a 0,12 kcal/mh°C (en las maderas muy ligeras se sitúa en 0,005 y en las pesadas puede llegar a 0,30). En el caso de los tableros de partículas, y dependiendo del espesor, puede variar de 0,08 a 0,15; y en los de fibras de densidad media de 0,06 a 0,72.

La capa carbonizada es 6 veces más aislante que la propia madera. De esta forma el interior de la pieza se mantiene frío y con sus propiedades físicas y mecánicas inalteradas. La pérdida de capacidad portante de la estructura se debe a una simple reducción de la sección, más que a una pérdida de resistencia del material.

La combustibilidad de la madera depende de la relación entre la superficie y el volumen de la pieza, de tal forma que cuanto mayor es esta relación (como ocurre en las piezas de pequeña escuadría) más fácil es la ignición y más rápida la propagación de la llama. Las aristas vivas y las secciones con partes estrechas aumentan esta relación conduciendo a un comportamiento al fuego menos favorable.

Las fendas también incrementan los efectos del fuego; este es el motivo por el cual en la madera laminada, que apenas tiene fendas, se emplea una velocidad de carbonización menor que en la madera maciza.

Cuanto más elevada sea la densidad de la madera menor facilidad tiene para comenzar a arder

y más lenta es la combustión. El contenido de humedad de la madera es otro factor que influye en el comportamiento al fuego. Sin embargo, en la práctica tiene poca relevancia ya que en la mayoría de las estructuras el contenido de humedad se encuentra entre el 8 % y el 15 %; es decir, por cada tonelada de madera deberá evaporarse entre 80 y 150 kg de agua antes de que entre en combustión.

Reacción y resistencia al fuego:

La reacción al fuego es un índice de la capacidad del material para favorecer el desarrollo del incendio. La clasificación de los materiales en reacción al fuego se define en la norma UNE 23.727, que distingue 5 clases:

M0	No combustible
M1	Combustible pero no inflamable. Su combustión no se mantiene cuando cesa la aportación de calor desde un foco exterior.
M2	Combustible y difícilmente inflamable.
M3	Combustible y medianamente inflamable.
M4	Combustible y fácilmente inflamable.

La madera de manera general se clasifica como M3, salvo en caso de espesores reducidos (Argüelles et al., 2000).

La resistencia al fuego de un elemento constructivo se mide como el tiempo durante el que es capaz de seguir cumpliendo su función (resistencia, estanqueidad, aislamiento) en una situación de incendio. Para la madera en grandes escuadrías es fácil alcanzar tiempos elevados de resistencia y estabilidad al fuego

Como consecuencia de la Directiva Europea sobre los Productos de la Construcción (1988) y en concreto dentro del requisito esencial de la Seguridad en caso de incendio se ha establecido recientemente un nuevo sistema de clasificación de la reacción al fuego que armoniza los distintos sistemas de clasificación nacionales. Se denomina sistema de Euroclases y sustituye a los sistemas nacionales anteriores, como el comentado al inicio de esta sección. Consiste en dos subsistemas, uno para aplicación a los materiales de construcción en general excepto revestimientos de suelos y otro específico para suelos. Ambos utilizan la designación en las clases: A1, A2, B, C, D, E y F, con el subíndice FL, en el caso de la clasificación de suelos (Medina, 2001).

La clasificación se realiza en función de las prestaciones alcanzadas por el material sometido a un conjunto de ensayos («Single Burning Item» o SBI, inflamabilidad, panel radiante).

Velocidad de carbonización:

Existe una relación lineal entre la profundidad carbonizada y el tiempo transcurrido. Esta relación constante que se denomina velocidad de carbonización permite determinar cual es la sección residual después de un tiempo determinado. Para madera maciza de coníferas esta velocidad es de $0,67 \text{ mm/min}$ y para madera de frondosas es de $0,54 \text{ mm/min}$.

El efecto del fuego sobre las aristas de la pieza produce un redondeo con un radio de curvatura que es función del tiempo (por ejemplo al cabo de 30 minutos el radio es de 20 mm). La consideración del redondeo de las esquinas de la sección complica el cálculo de las propiedades

mecánicas de la sección residual. Para simplificar este proceso se define una velocidad de carbonización eficaz, con un valor ligeramente superior al real y que permite considerar la sección residual con las aristas vivas (como si no se produjera el redondeo). Esta velocidad eficaz es de 0,8 mm/min en coníferas y 0,5 a 0,7 en frondosas (Argüelles et al., 2000).

Comportamiento de las uniones:

Las uniones en las estructuras de madera constituyen un punto débil en caso de incendio. Las mayores profundidades de carbonización se darán en los ensambles de las piezas, bien porque existen juntas que facilitan la penetración o porque se emplean elementos metálicos que conducen el calor hacia el interior.

En general, de acuerdo con la norma UNE ENV 1995-1-2, la estabilidad al fuego de las uniones realizadas con elementos metálicos calculadas en situación normal, alcanzan un tiempo de 15 minutos. Para llegar a 30 o 60 minutos es necesario sobredimensionar la capacidad de carga de la unión e incluso proteger los elementos metálicos de la acción del fuego.

Incendio y riesgos de pudrición posteriores:

Tras las labores de extinción del fuego en un edificio pueden transcurrir varios meses hasta que se inician las obras de reparación. Este plazo se alarga debido a varias razones como pueden ser la necesidad de un tiempo para la toma de decisiones y la financiación o los procesos de investigación y de inspección de las compañías de seguros. El agua que se ha vertido durante la extinción y la que puede entrar a través de las cubiertas derrumbadas es retenida en los muros de la edificación y en todos los restos acumulados en el suelo. En esta situación es fácil un proceso de pudrición, como se ha detectado en algunos sucesos de este tipo (Ridout, 2000).

1.4 Patología de origen estructural

El deterioro que puede sufrir una estructura debido a causas relacionadas con la estabilidad y resistencia pueden resumirse en los siguientes grupos:

- Sección insuficiente para las cargas que actúan o como consecuencia de un aumento de las cargas con respecto al origen de la estructura.
- Deformaciones elevadas debidas al efecto de la fluencia en piezas colocadas en verde y roturas a largo plazo.
- Fallos en las uniones debidas a un dimensionado insuficiente o a un diseño incorrecto y posible incremento de la deformación.
- Roturas en alguna pieza con defectos locales muy superiores a los medios en la estructura.
- Anriostramiento insuficiente que conduce al desplome y pérdida de verticalidad de parte de la estructura.

En general la mayoría de estos fallos suelen manifestarse poco tiempo después de la construcción, normalmente tras las primeras cargas de importancia debidas al uso o a la nieve. Sólo en algunas ocasiones en las que la pieza está dimensionada de manera insuficiente para cargas de larga duración, la rotura se puede producir al cabo de varios años. Pero en este caso las deformaciones son muy exageradas y van aumentando paulatinamente. Un lugar donde puede alcanzarse esta situación es en las cubiertas de edificios con cargas de nieve poco relevantes donde la carga permanente es la más importante.

Sección insuficiente:

La sección insuficiente provoca una deformación excesiva de la pieza que sirve como signo para su detección previa. Las flechas en vigas de madera suelen ser, por lo general, más apreciables a simple vista que en otros sistemas constructivos, sobre todo en estructuras ya antiguas.

Como aproximación, la flecha de una viga correctamente dimensionada estará alrededor de $l/300$ para las condiciones de carga total. En una inspección de un edificio lo normal es que se encuentre con la carga permanente y una parte pequeña de la carga de uso. En el caso de forjados de piso de edificaciones antiguas es frecuente que la carga permanente llegue a ser un 40 % de la carga total; y si se considera el efecto de la fluencia de la carga permanente su peso puede ser del 50 % de la flecha total. Por lo tanto, la flecha que puede esperarse en esta situación es del orden de $l/500$ o $l/600$, es decir, no apreciable a simple vista.

Sólo la peritación de la estructura puede resolver las dudas, pero orientativamente pueden seguirse las indicaciones siguientes para estimar su gravedad en un primer tanteo, considerando una calidad de madera media. La capacidad de carga por resistencia a flexión estará agotada si la flecha de la viga supera la relación luz/flecha = $3125/(lh)$, siendo l , la luz de la viga y h el canto. Es decir, para una esbeltez $lh = 20$ la flecha sería de $l/156$. Si la viga se encuentra sin coeficiente de seguridad alguno, ya próxima al fallo, esta relación baja a $l/flecha = 1700/(lh)$; es decir para $lh = 20$ correspondería una flecha de $l/85$.

Si la madera se ha colocado en verde las deformaciones debidas a la fluencia aumentan en alto grado por lo que podrían esperarse flechas 1,6 veces mayores; en el caso de $lh = 20$ las flechas serían de $l/96$ y $l/53$, respectivamente. Este efecto de la fluencia de la madera colocada en verde explica porqué a veces se encuentran piezas con deformaciones muy exageradas para las cargas que están actuando.



Figura 1.7 Empalme de rayo de Júpiter con refuerzo metálico. Se aprecia fenda o posible inicio de rotura.



Figura 1.8 Deformación excesiva de una cercha originada por deslizamiento de las uniones entre par y tirante.

Es frecuente encontrar suelos con gruesos rellenos que pretenden recuperar la horizontalidad perdida que producen un efecto de agravamiento de las deformaciones. Otras veces, también con un criterio erróneo se han colocado capas de hormigón con este mismo fin, además de suponer que puede reforzar el conjunto. Esta falsa solución no hace sino agravar la situación, salvo que se hayan dispuesto algún tipo de conectores entre la madera y la capa de hormigón, calculados adecuadamente para conseguir una estructura mixta.

Deformaciones excesivas y roturas a largo plazo:

Este apartado se encuentra relacionado con el anterior. Las deformaciones pueden ser exageradas debidas a un efecto de la fluencia cuando se han colocado las piezas en verde. En este caso la deformación de las cargas permanentes debida a la fluencia se incrementa en un orden del 100 % respecto a la deformación instantánea. Esto puede detectarse mediante el cálculo de la estructura al comprobar que es preciso incluir un efecto de la fluencia muy notable para justificar la deformación medida en la obra.

La madera tiene una resistencia que depende de la duración de las cargas. Ante cargas de breve duración presenta una capacidad mayor que ante cargas permanentes. Este es uno de los factores de más importancia en el cálculo después de la calidad de la madera. En algunos casos puede haberse dimensionado la estructura para unas cargas inferiores a las reales (sobre todo en lo que afecta a las cargas permanentes). Si las cargas variables son pequeñas, como puede ocurrir en las cubiertas, la estructura puede ser viable durante un plazo de tiempo limitado. En este caso las deformaciones irán aumentando paulatinamente hasta que se alcance la rotura de la pieza, simplemente por haber transcurrido un plazo excesivo para la carga actuante de forma permanente. En algunos casos este fallo se ha alcanzado después de 60 años de servicio.

Uniones:

Las uniones constituyen puntos críticos ya que a veces no se dedica la misma atención que al resto del dimensionado de la estructura. Es importante revisar los detalles constructivos de las uniones para detectar si existen signos de aplastamientos localizados sobre los elementos metálicos de fijación; normalmente estos fallos se despejan al comienzo de la vida útil de la estructura. También se pueden encontrar roturas en las zonas de ensambles de las piezas en la construcción de tipo tradicional con uniones carpinteras. Las zonas de los cogotes de los tirantes o las superficies de cizalladura en los empalmes de rayo de Júpiter pueden presentar roturas por cortante. Generalmente, en estos casos se habrán añadido piezas metálicas de refuerzo, figura 1.7.

La estructura sufre unas deformaciones añadidas a las debidas a las deformaciones elásticas que son consecuencia de los deslizamientos que se producen en las uniones. Este incremento de la deformación puede estimarse por cálculo en muchas ocasiones. Generalmente, no tiene una gran relevancia, por ejemplo en el caso de las cerchas, salvo que existan holguras o desajustes importantes en las uniones. A veces estos desajustes se han originado por una degradación puntual de la zona de unión, por ejemplo por pudrición o por aplastamiento en las espigas de un ensamble, figura 1.8.

Roturas locales:

En algunas ocasiones se pueden encontrar piezas aisladas partidas entre los parecillos de una cubierta o en las viguetas de un forjado, dentro de un conjunto en buen estado y sin deforma-

ciones notables. En estos casos, es muy probable que el fallo se deba a un defecto exagerado (normalmente un nudo o grupo de nudos en el vano central de la pieza) que disminuye en alto grado la calidad de la madera puntualmente. Muchas veces estas roturas se encuentran con algún tipo de refuerzo con pletinas metálicas o con apeos provisionales. Si no es un defecto extendido y no existen grandes deformaciones en el resto de las piezas, no resulta preocupante.

Arriostramiento insuficiente:

En estructuras de madera antiguas los defectos de arriostramiento pueden hacerse relevantes en estructuras compuestas por pilares y formas de cubierta, sobre todo si son de más de una planta. Una estructura que no cuente con el necesario arriostramiento fallará con seguridad, pero antes, si encuentra elementos no estructurales que puedan servirle de apoyo logrará un equilibrio poco estable y con una elevada deformación. A veces puede que exista un sistema de arriostramiento de resistencia suficiente pero con rigidez escasa, lo que hace prácticamente inútil su misión.

Fendas de secado y revirado de las piezas:

Las fendas de secado en la madera de gran escuadría son inevitables. La contracción transversal de la madera de coníferas es del orden del 0,20 % por cada grado de humedad. Esto quiere decir que una madera que pase de la condición de verde (por encima del 30 % de contenido de humedad) a un 10 % en condiciones secas de interior, sufrirá una merma del orden del 4 % de sus dimensiones transversales.

Si se trata de una madera enteriza (que contenga el corazón de la pieza en el centro de la sección) la diferencia de contracción en la dirección radial y tangencial provocará un inevitable fendado en las caras de la pieza que para el caso anterior se puede estimar en un 2 %. Es decir, una sección de 200 x 200 mm tendrá fendas de al menos unos 4 mm de grueso, figura 1.9.

También en las piezas enterizas es frecuente que la pieza sufra una deformación de alabeo debida a la contracción de la madera durante el secado. El revirado se origina como consecuencia del crecimiento ligeramente en espiral de las fibras de la madera, figura 1.10.

Anexos relacionados con este capítulo:

Anexo A: Organismos xilófagos.

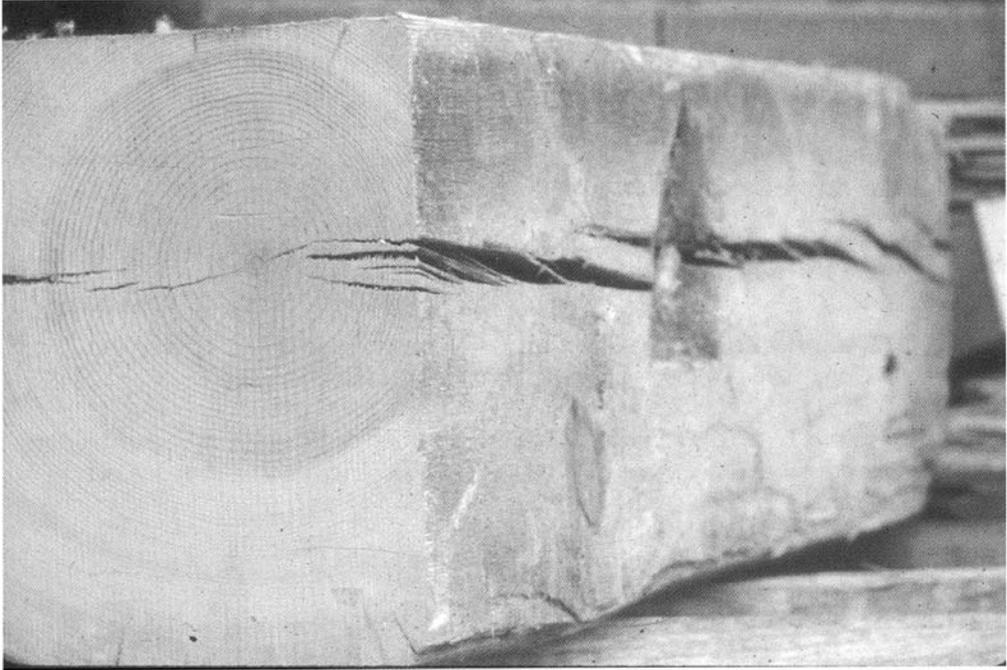


Figura 1.9 Fendas de secado en una pieza de gran escuadría.



Figura 1.10 Alabeo de las piezas después del secado.

Referencias bibliográficas:

Argüelles, R. y Arriaga, F. (2000). Estructuras de madera. Diseño y cálculo. Editorial AITIM. Madrid, 663 págs.

López de Roma, A. (1985). Patología y protección de la madera. La madera en la conservación y restauración del patrimonio cultural. Ministerio de Cultura, Madrid. Págs. 63-87.

Medina, G. (2001). Reacción al fuego de los materiales de construcción. AITIM nº 212, págs. 75-78.

Ridout, B. (2000). Timber decay in buildings. English Heritage, The Historic Buildings and Monuments Commission for England, and Historic Scotland. London. 232 pp.

Rodríguez Trobajo, E. (1985). Biodegradación y conservación de la madera estructural. Incidencia de tres especies inéditas en España. La madera en la conservación y restauración del patrimonio cultural. Ministerio de Cultura, Madrid. Págs. 88-94.

Capítulo 2

Inspección

2.1 Introducción

La inspección de un edificio con estructura de madera puede realizarse con diferentes niveles de intensidad en el reconocimiento en función de la disponibilidad de tiempo. En general, lo más adecuado es realizar una primera fase de inspección general para conocer el edificio y efectuar un reconocimiento visual exterior. Es importante y de gran ayuda la existencia de planos al menos a nivel de estructura. En esta inspección previa se marcarán los puntos donde deben realizarse catas para inspeccionar zonas ocultas de la madera. Además se revisará el estado aparente de las fachadas, cubiertas y forjados para detectar signos de patología estructural.

En una segunda fase, que puede extenderse a varias jornadas en función de la superficie del edificio, se realizará la inspección de las catas abiertas anotando la patología encontrada y sus características.

Normalmente, existe una tercera fase que complementa la anterior y que se desarrolla durante la primera etapa de las obras en la que se terminan de ver zonas que quedaban ocultas siguiendo las pautas establecidas en la fase anterior.

Un aspecto muy importante a tener en cuenta antes de realizar la inspección es acordar con el solicitante, mediante un contrato, el contenido de la inspección. En este contrato o acuerdo se debe especificar la autorización para realizar todo tipo de trabajos que permitan llegar a la estructura de madera, ya que generalmente será necesario realizar catas, o levantar parcial o totalmente suelos, falsos techos o tabiques. En muchas ocasiones sólo se solicita una inspección parcial del edificio, que en la mayoría de los casos no aporta toda la información mínima necesaria (como por ejemplo la localización de las fuentes de humedad). Si el solicitante de la inspección insiste en que sólo se realice esta inspección parcial, deberá recogerse este hecho en el informe que se realice posteriormente.

Otro punto importante a definir en el contrato es la valoración de la capacidad portante de la estructura de madera; normalmente las personas que realizan las inspecciones son expertas en la detección de las degradaciones y en la realización de tratamientos curativos en la madera pero suelen carecer de los conocimientos para el análisis estructural de la madera. Esta valoración estructural deberá realizarse por profesionales en la materia.

Antes de realizar la inspección es conveniente recoger información sobre la historia del edificio. Este punto puede resultar complicado o difícil de realizar, ya que en la mayoría de los casos se trata de edificios antiguos de los que se dispone de poca o de ninguna información escrita; en algunos casos se tiene que recurrir a testimonios de los propios vecinos, con la consiguiente incertidumbre sobre su fiabilidad. En principio, toda la información que se recoge se debe considerar útil, pero se recomienda verificarla y comprobarla in situ para poder tomarla como verdadera. Algunos datos interesantes pueden ser los siguientes: fecha de la construcción, materiales empleados en los elementos estructurales (especie de madera), tipo de construcción (entramado pesado, rellenos de fábrica, etc.), planos originales (dimensiones de las piezas de madera utilizadas), ocupaciones y usos del edificio, obras o reparaciones realizadas, incidencias (fuegos, rayos, etc.), tipo de terreno, asentamientos del terreno, roturas de la cubierta, daños provocados por agentes degradadores xilófagos en edificios próximos, etc.

En este capítulo se describen las líneas generales de estas fases de inspección que terminan con un informe sobre el estado de conservación de la estructura desde el punto de vista de su patología de origen biótico y en su caso de la seguridad relativa a su capacidad portante. El resultado del informe debe incluir las recomendaciones para la actuación en el proyecto o en la obra de acuerdo con los capítulos siguientes.

2.2 Reconocimiento visual exterior

La inspección exterior varía con cada edificio, su altura, materiales empleados en las fachadas, facilidad de acceso a la cubierta, forma de acceso al mismo (a ras de suelo, escaleras), etc. Algunas veces es interesante utilizar prismáticos para evaluar el estado de los aleros de madera, bajantes y canalones situados a gran altura, estado de los balcones y de la carpintería exterior, las piezas de madera que estén al exterior, etc. Su objetivo principal, como ya se ha mencionado anteriormente, es la detección de las fuentes de humedad y la posible entrada del agua de lluvia en el edificio. A continuación se exponen los defectos que aparecen con mayor frecuencia.

Fachadas y patios

La fachada correspondiente a los vientos dominantes es la que requiere más atención, ya que el agua de lluvia tendrá una mayor incidencia sobre ella. El estado del revestimiento, la aparición de posibles desconchones, y la presencia de manchas de humedad en los muros de fachada indican la existencia de humedades, que se trasladarán a las cabezas de las vigas de los forjados conectados con el muro de la fachada y a la carpintería exterior (ventanas y balcones). Las juntas de mortero en aquellos edificios con fachada de ladrillos, en perfecto estado, parcialmente perdidas o desechas, indicará si el agua de lluvia tiene un acceso fácil o difícil al interior del edificio.

La aparición de grietas inclinadas en los muros y el descuadrado de la carpintería de huecos es consecuencia, normalmente, de la existencia de problemas de cimentación por asentamientos del terreno que requerirán un estudio más exhaustivo. Es frecuente que al pie de una bajante las fugas produzcan un lavado de la arena y de lugar a un asentamiento, figura 2.1. La aparición de grietas horizontales junto con desplomes de los muros indican problemas graves de estabilidad, figura 2.2.

La existencia de salientes en la fachada como pueden ser las cornisas y repisas de balcones constituye otro punto a anotar, ya que es posible que se acumule agua en ellos o que un deterioro de los mismos permita la entrada de agua impregnando la fábrica.

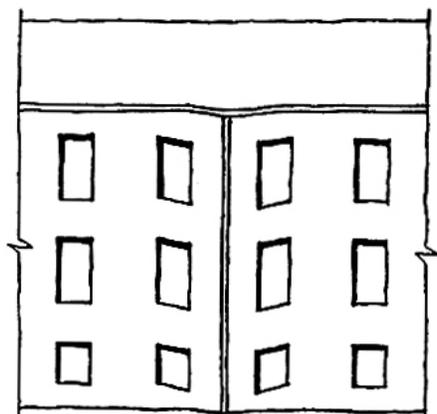


Figura 2.1 Asentamiento de la cimentación de un muro causado por el arrastre de arena producido por la arqueta de la bajante.

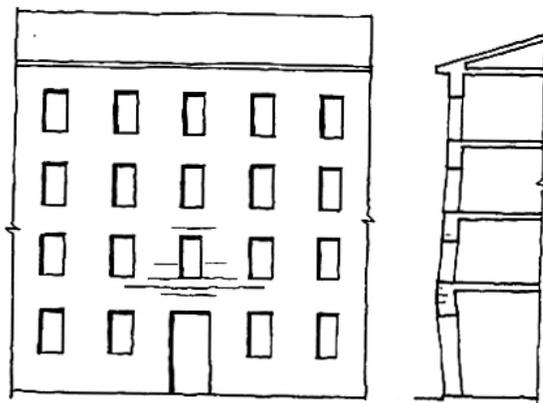


Figura 2.2 Grietas horizontales y desplome de un muro.

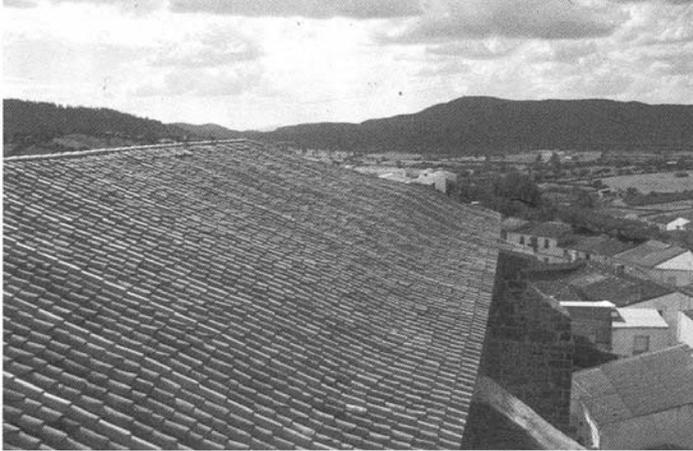


Figura 2.3 Irregularidades en la superficie de una cubierta.

Cubierta, aleros y bajantes

Es evidente que debe revisarse el estado de la cubierta para conocer si existen filtraciones por goteras, aunque esto se ve más claramente desde el interior. Desde el exterior resulta de utilidad una vista de la superficie de la cubierta para descubrir si existen deformaciones irregulares o anómalas que pueden indicar problemas estructurales, figura 2.3.

La rotura o taponamiento de las ventilaciones de la cubierta es otro punto a inspeccionar por la incidencia que tiene en la ventilación de las mismas y la entrada de pájaros que pueden provocar otro tipo de deterioros y degradaciones.

El deterioro de los aleros y canalones permite la entrada del agua de lluvia en las zonas de apoyo de la estructura de la cubierta. Si se encuentran en mal estado habrá que esperar problemas de pudrición en las cabezas de los pares y viguetas o tirantes que apoyen en el interior. La utilización de prismáticos puede resultar cómoda para la inspección visual desde el suelo. Igualmente es necesario comprobar si las bajantes muestran manchas de humedad que indiquen fugas que terminarán favoreciendo la pudrición en las piezas de madera que se encuentren próximas en el interior. La localización de estos puntos húmedos deberá tenerse presente en la inspección del interior del edificio.

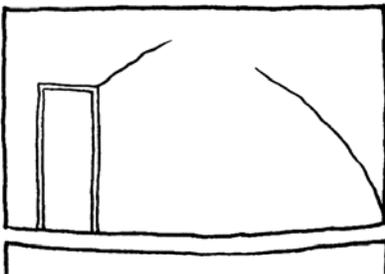


Figura 2.4 Grietas de arco de descarga provocadas por la flecha del forjado.

Flechas en forjados

Las deformaciones en forjados de madera suelen ser más elevadas en general, que las aceptadas en otros sistemas constructivos utilizados en la actualidad. En todo caso es importante anotar si existen flechas elevadas que pueden indicar cargas permanentes excesivas a veces producidas por solados sucesivos que pretenden conseguir una horizontalidad perdida y que terminan por agravar el problema en lugar de solucionarlo. Las flechas excesivas provocan grietas en los tabiques que apoyan sobre ellos, generalmente describiendo la línea de un arco de descarga, como se indica en la figura 2.4.

2.3 Reconocimiento de la estructura

2.3.1 Generalidades

El reconocimiento de la estructura se dirige a valorar los daños producidos por los agentes xilófagos con el fin de evaluar su repercusión en el comportamiento estructural; el reconocimiento también puede incluir la identificación de la especie de madera, la determinación de su calidad y la geometría de la estructura con el fin de comprobar su capacidad portante.

En el reconocimiento de la estructura del edificio deben preverse algunos factores como son los siguientes:

Planificación: después de la primera visita inicial es fácil realizar una planificación de la inspección.

Iluminación: debe preverse la existencia de luz, ya sea natural o artificial.

Acceso a la estructura: se debería acceder a todas las zonas. Cuando el acceso no sea posible (por ejemplo en las vigas o viguetas de forjados que queden ocultos), se puede plantear la realización de un muestreo teniendo en cuenta las limitaciones del mismo.

El planteamiento de un muestreo para la inspección de edificios de gran superficie resulta inevitable cuando el tiempo disponible es limitado. La selección de las áreas de muestreo deberá hacerse principalmente sobre las zonas de riesgo que en este capítulo se tratan.

Acceso y limpieza de la zona: para poder inspeccionar las piezas de madera muchas veces es necesario eliminar los materiales que recubren los suelos, muros y tabiques, la mampostería y otras piezas de madera de menor rango. Esta operación facilitará posteriormente la ejecución del tratamiento curativo.

Planos o croquis: sobre cada planta del edificio se señalan las zonas atacadas, las piezas que presentan problemas y las catas realizadas. Estos planos o croquis contienen numerosas anotaciones que posteriormente deben registrarse de forma ordenada. Las referencias de las fotografías que se efectúen pueden registrarse en los planos.

2.3.2 Puntos críticos de las piezas de madera

La degradación de una pieza de madera comienza por su parte más fácilmente atacable o débil. Esta parte se corresponde con la albura de la madera que se encuentra en la zona externa de la sección de la pieza. La degradación del duramen es mucho más difícil y por tanto el deterioro de la sección es siempre de fuera hacia dentro.

Por otro lado, la superficie de mayor riesgo en una pieza de madera es la testa. El plano de corte es transversal a la dirección de la fibras, presentando una gran porosidad y capacidad de absorción de agua, muy superior al resto de los planos de corte que puede presentar la pieza. La mayor retención de humedad facilita el desarrollo de los hongos de pudrición. Por este motivo, la degradación de la pieza suele iniciarse o agravarse en las testas.

Como ejemplos típicos de deterioros en estos puntos críticos se pueden mencionar los siguientes, figura 2.5:

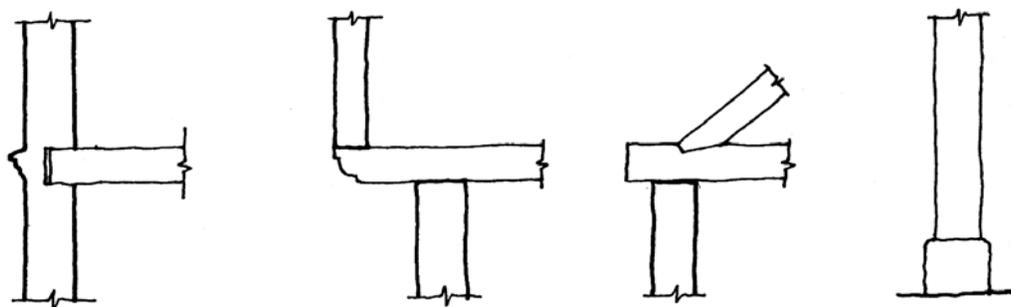


Figura 2.5 Ejemplos de puntos críticos de una estructura de madera: apoyo de vigas en muro de fachada, vuelos del forjado, ensamble del par y el tirante, apoyo de pilar.

Cabezas de las vigas en el apoyo dentro del muro: la testa de la pieza coincide con una zona de riesgo elevado si el muro puede retener la humedad.

Testas de vigas voladas expuestas a la intemperie.

Ensamblajes de piezas en una armadura: las uniones entre piezas son lugares donde es fácil la retención del agua procedente de una gotera de cubierta. Un ensamble tiene rebajes y cajas donde se puede acumular el agua y normalmente se encuentran en ese punto las testas de las piezas de madera. La pudrición puede comenzar en estos lugares con más facilidad.

Extremo inferior de soportes: esta situación se puede producir en la zona de arranque de los muros que incorporan pilares de madera o en pilares aislados colocados al exterior (como soportales, pérgolas o galerías). En el primer caso la humedad accidental procedente del suelo puede llegar al pilar si no está lo suficientemente alejado por otros elementos constructivos como las basas de piedra. En el segundo caso cuando el pilar esté expuesto a la lluvia, el agua escurre por las caras hasta depositarse en la zona inferior y acumularse si el diseño no facilita la evacuación del agua. Estos fenómenos pueden favorecer las pudriciones.

2.3.3 Zonas de riesgo

En la inspección del edificio es conveniente dirigirse principalmente a las zonas de mayor riesgo de ataque en la estructura de madera. Estos lugares están ligados con fuentes de humedad que permiten el desarrollo de los hongos y facilitan la acción de algunos insectos xilófagos. Si la madera se encuentra en buen estado en estas zonas de riesgo es seguro que en el resto del edificio se encontrará en buen estado. Si existen daños en las zonas de riesgo deberá indagarse si se ha extendido a otras partes del edificio. A continuación se incluye una relación de estas zonas de riesgo, figura 2.6.

Piezas en contacto o cercanas al suelo:

Todas las piezas que arrancan de la cimentación o de la solera presentan un mayor riesgo de tener ataques de pudrición y carcoma (insectos de la familia de los anóbidos). También constituyen un punto de paso de las termitas, por lo que un ataque de estos insectos se detectará fácilmente en estos lugares. Este es el caso de los pies derechos de muros entramados que arrancan del suelo o el caso más grave todavía, como el de los forjados apoyados sobre muros de sótano.

Un punto que resulta especialmente indicado para detectar la presencia de termitas en la planta baja del edificio es el de los cercos de la carpintería de puertas, que es un camino fácil para la entrada de estos insectos.

Los pilares de soportales o galerías presentan también mayor riesgo por la acción del agua de lluvia, aunque los daños que se derivan son de pudriciones ligeras, carcoma y deterioro superficial. Al tratarse de piezas más ventiladas y con pocas posibilidades de retención de la humedad el desarrollo de la pudrición es más lento y por otro lado su carácter más externo no es frecuente el acceso de las termitas.

Sótanos:

En los sótanos es habitual que las condiciones ambientales sean muy húmedas y que existan filtraciones de humedad a través del terreno y del suelo que se trasladarán al arranque de los muros y a las piezas de madera embebidas en ella. Las pudriciones y los ataques de anóbidos son característicos de estos locales.

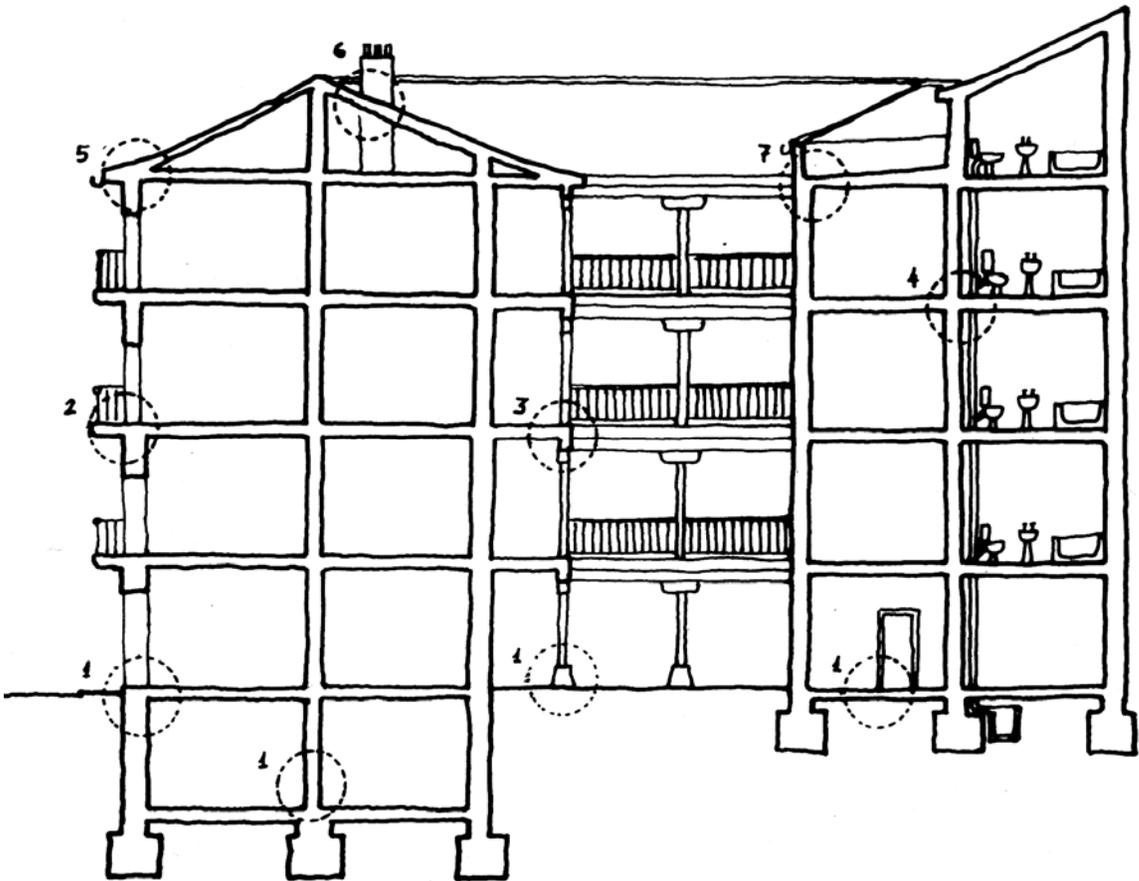


Figura 2.6 Zonas de riesgo en la construcción con madera: 1.- Piezas cercanas al suelo, 2.- apoyos de vigas en muros de fachada con repisa de balcones, 3.- Forjados de galerías, 4.- Forjados en locales húmedos, 5.- Aleros y encuentro de la cubierta con el muro, 6.- Paso de chimeneas en cubierta, 7.- Forjados con cubierta plana.

Apoyo de vigas y otros elementos en los muros:

El caso más característico es el de las cabezas de viguetas de forjado de piso que apoyan sobre los muros de fachada, ya que pueden retener el agua de lluvia. Esta situación se agrava en el caso de coincidir con huecos de balcones o cuando existen cornisas de fachada que también pueden permitir la retención del agua de lluvia. La obra de fábrica tiene una gran capacidad de absorción de humedad que posteriormente se traspasa a las cabezas de las vigas, conduciendo a su pudrición si la situación se mantiene en el tiempo.

En los apoyos de las vigas sobre los muros interiores es prácticamente imposible encontrar daños de pudrición, pero no puede descartarse el paso de las termitas. La situación cambia si existen conducciones de agua en las proximidades.

En la coronación de los muros de fachada se presenta una situación parecida a la de los forjados, con piezas de madera apoyadas sobre muros que pueden retener la humedad.

Paso de conducciones de agua: baños y cocinas:

Las proximidades al paso de instalaciones sanitarias, principalmente del paso de bajantes en los locales húmedos como los baños y cocinas, son lugares en los que será difícil no encontrar daños de pudrición por efecto de las fugas de agua y en algunos casos debidos a las condensaciones. En los edificios antiguos las instalaciones de conducción de agua se han insertado con posterioridad al origen del edificio y su diseño no es el más correcto, ya que en caso de fallos el agua empapa la masa de los muros de fábrica y al final la madera alcanza un contenido de humedad adecuado para el desarrollo de los hongos de pudrición.

En las cocinas es frecuente encontrar daños justamente en la zona de las viguetas que se encuentra bajo la zona del fregadero y otros aparatos. Es normal encontrar que parte de la estructura ha sido sustituida anteriormente por otro material como el acero.

Cubiertas:

La cubierta es un lugar de entrada de agua en cuanto se descuida el mantenimiento. En primer lugar cabe hacer mención al caso de la cubierta plana que presenta un riesgo muy superior al de la cubierta inclinada; un fallo de la impermeabilización o en los remates de la misma con el muro perimetral es más fácil, y si la estructura de soporte es de madera se derivan problemas de pudriciones. En el caso de la cubierta inclinada pueden hacerse las observaciones que a continuación se incluyen.

En algunos casos no es posible la inspección del espacio bajo la cubierta porque es de difícil acceso o no se dispone de tiempo suficiente para preparar las vías de recorrido. En estas situaciones es de utilidad el empleo de espejos colocados en barras extensibles.

Si el mantenimiento es adecuado y no hay humedades persistentes lo normal es encontrar la madera en buen estado y en todo caso como corresponde a la madera seca se podrán detectar ataques de carcoma grande (insecto de la familia de los cerambícidos). Los daños por pudrición suelen encontrarse sólo en las zonas de los apoyos sobre los muros correspondiente a los aleros.

La rotura o descolocación de las tejas por la acción del viento, o la obstrucción de las canalizaciones para el desagüe provocan la entrada de agua que afectará al entablado y a la armadura

de la cubierta. Si esta humedad se mantiene a lo largo del tiempo se originan procesos de pudrición. Normalmente los daños se inician en los ensambles de las piezas que constituyen la estructura de la cubierta y también en las zonas de apoyo de los pares, ya que el agua escurre por el faldón hasta la parte inferior.

Los fallos de la impermeabilización por el paso de chimeneas y otros conductos producen daños en las zonas hacia las que escurre y se retiene el agua. Las zonas de encuentro de faldones en las limahoyas son lugares de posible riesgo ya que el agua termina por dañar la pieza estructural que forma la lima, principalmente en el apoyo, y las cabezas de los pares cojos que apoyan en ella.

La obstrucción de los canalones desencadena un proceso de deterioro, que comienza con el daño de los entablados del alero, con lo que aumenta la entrada de agua que termina por emparar el muro y permitir el desarrollo de los hongos de pudrición en los canecillos y en las cabezas de los pares y tirantes.

La falta de ventilación en cubiertas puede provocar la condensación del agua con el peligro de daños por pudrición. Normalmente los espacios bajo la cubierta son lugares muy ventilados.

Carpintería exterior:

Los defectos de la carpintería de ventanas y balcones pueden permitir la entrada de agua al interior, con los consiguientes daños en los pavimentos y posteriormente en las cabezas de las viguetas del forjado.

2.4 Técnicas de exploración

Las técnicas empleadas para la estimación de los daños producidos por los agentes xilófagos en la madera son generalmente sencillas y requieren un equipo mínimo. Se basan principalmente en la inspección visual de la superficie complementada con el descubrimiento de zonas no visibles para determinar la gravedad del daño.

También existen otros métodos no destructivos, apoyados en tecnologías más sofisticadas que emplean equipos especiales, como los sistemas basados en la transmisión de ultrasonidos, ensayos mecánicos no destructivos, análisis de vibraciones y resistógrafos que se orientan hacia la evaluación de las propiedades mecánicas. Dentro de este grupo también existen métodos para la determinación de la actividad de los ataques xilófagos mediante la identificación de sonidos, pero su aplicación práctica es todavía escasa.

2.4.1 Equipos tradicionales de exploración

Se basan en la valoración directa, ya sea en forma visual o táctil, de la zona de madera degradada. En primer lugar se buscarán los signos que puedan haber dejado los agentes bióticos en la superficie de la madera (como abultamientos, orificios de salida, presencia de serrín, cuarteado, etc.), de acuerdo con lo indicado en la identificación del agente degradador. Se hará hincapié en las zonas de riesgo del edificio mencionadas anteriormente, en algún caso en particular será preciso descubrir zonas ocultas por solados o muros de fábrica.

A continuación se relacionan de forma exhaustiva los medios e instrumentos que se pueden utilizar en las inspecciones, junto con su función y utilidad. La utilización de cada uno de ellos dependerá de cada situación y del grado de detalle que se quiera obtener en la inspección.

Cuaderno de notas y lápiz:

Todas las notas y observaciones deben ponerse por escrito y estar perfectamente detalladas; esta forma de trabajo permite volver a repasar y ampliar las anotaciones. Se recomienda realizar pequeños croquis y planos que nos ayudarán en la localización de las piezas y zonas que tienen degradaciones.

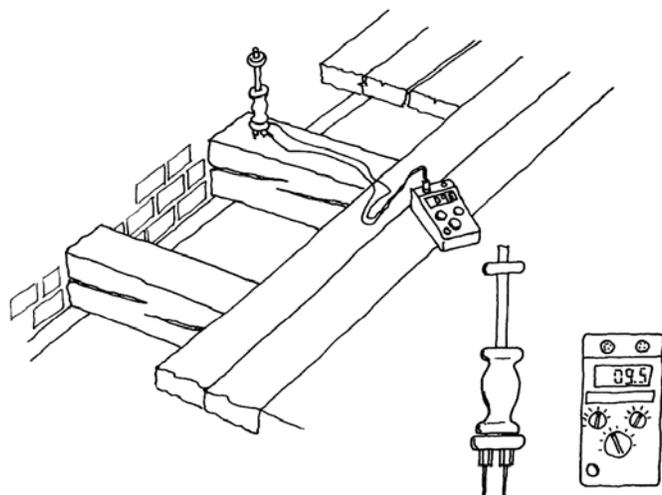


Figura 2.7a Medición del contenido de humedad con xilohigrómetro.

Linterna o foco de luz portátiles:

En algunos casos las zonas que se inspeccionan suelen estar mal iluminadas y no permiten ver con claridad las degradaciones de la madera. Además la gran mayoría de los agentes xilófagos (hongos y termitas) realizan la degradación de la madera en zonas oscuras (rincones, sótanos, etc.), por lo que la utilización de estos medios resulta de gran utilidad.

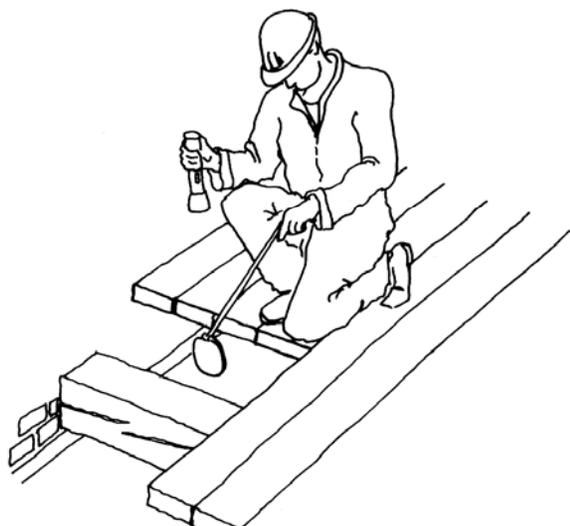


Figura 2.7b Espejos para la inspección de zonas de difícil acceso.

portaespejos permite analizar de forma indirecta zonas de difícil acceso, como las situadas debajo de solados o las partes más bajas de la cubierta, figura 2.7b.

Martillo corriente o de pasta:

El sonido producido al golpear un elemento estructural permite estimar si se encuentra o no bajo carga. Un sonido sordo (blando, grave, sin rebote), indica que la pieza puede no estar en carga y que probablemente tenga daños. Por el contrario, un sonido claro y tenso revela una pieza que se encuentra en tensión. Por otro lado el golpe de martillo sobre la superficie de la madera detecta las zonas atacadas en el interior al producirse un sonido hueco. El martillo de

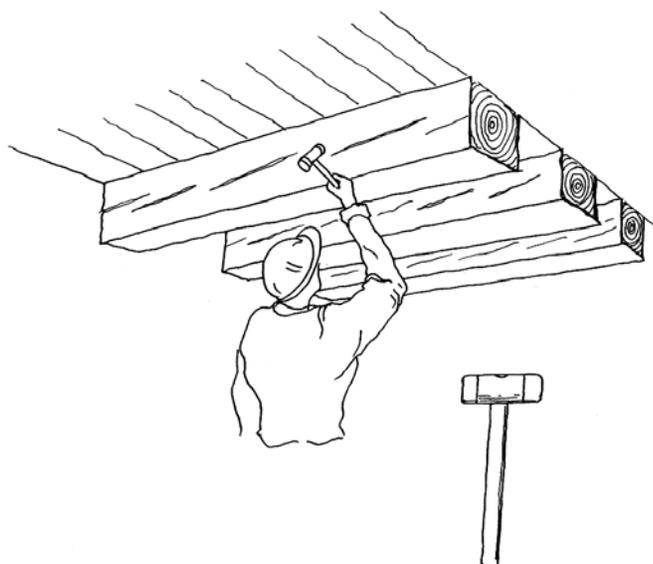


Figura 2.7c Martillo de pasta para golpear la superficie de la pieza.

Xilohigrómetro o medidores de humedad:

El contenido de humedad de la madera y el de los muros suele ser uno de los factores más importantes para el desarrollo de algunos agentes xilófagos. Estos aparatos permiten determinar el contenido de humedad de una forma rápida, figura 2.7a.

Lupa:

En caso de dudas y para un primer análisis de las degradaciones producidas por los agentes xilófagos la utilización de una lupa de unos 10 aumentos es de gran utilidad.

Espejos:

La utilización de espejos y de varillas

de pasta se utilizará preferentemente por no dañar la superficie, figura 2.7c.

Punzón, destornillador y formón:

El punzón permite tantear rápidamente si existe degradación bajo la superficie externa de la madera. En zonas de poco espesor sirve para conocer la profundidad del ataque. Haciendo palanca con un destornillador o con un formón estrecho pueden extraerse muestras de madera atacadas para la identificación posterior del agente xilófago, figura 2.7d.

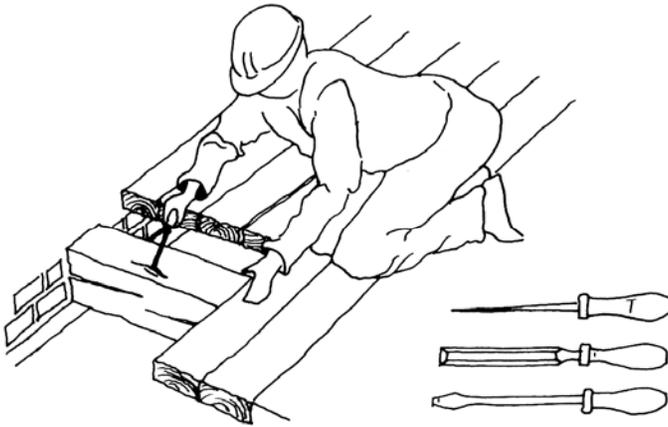


Figura 2.7d Punzón, formón y destornillador para detectar la profundidad del ataque y descubrir las galerías.

Taladro:

Una máquina taladradora de pilas (o eléctrica) de dimensiones reducidas, con brocas de pequeño diámetro (3 a 6 mm), permite conocer la profundidad y extensión del ataque sin necesidad de eliminar toda la parte destruida. La viruta de madera que se desprende también permite valorar el estado de la madera. La utilidad mayor de este instrumento está en la detección del estado de conservación de la madera

de las zonas ocultas de las piezas como pueden ser las cabezas de las vigas que quedan embebidas en el muro; en este caso el taladro se practica desde la cara superior dirigiéndolo oblicuamente hacia la testa de la pieza, figura 2.7e.

Pinceles y brochas:

Normalmente la madera esta cubierta de polvo y suciedad por lo que se hace necesaria una pequeña limpieza.

Azuela:

Se emplean para eliminar zonas de madera degradadas. Se utilizan principalmente para preparar la realización de los tratamientos curativos, aunque también se pueden utilizar para comprobar el alcance del ataque.

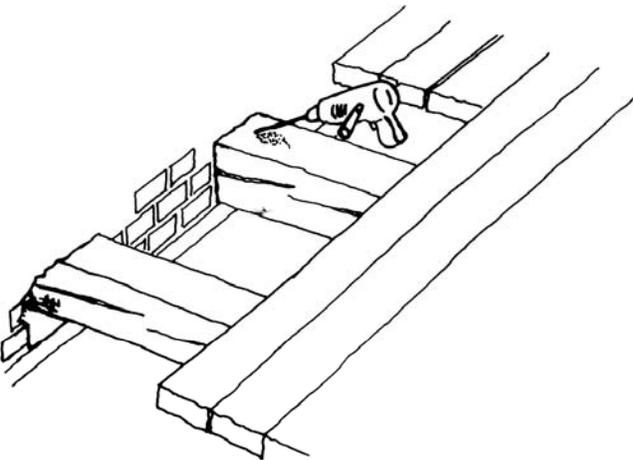


Figura 2.7e Taladro para explorar la parte oculta de la cabeza de la viga o la apertura de catas laterales.

Cámara fotográfica:

A la hora de reflejar los daños existentes, la toma de fotos de las zonas afectadas tiene bastante importancia.

Ropa y guantes:

Para la realización de la inspección se recomienda llevar ropa adecuada (cómoda y fuerte) y guantes. En algunos casos especiales también se recomienda el uso de casco, de mascarilla y de gafas protectoras.

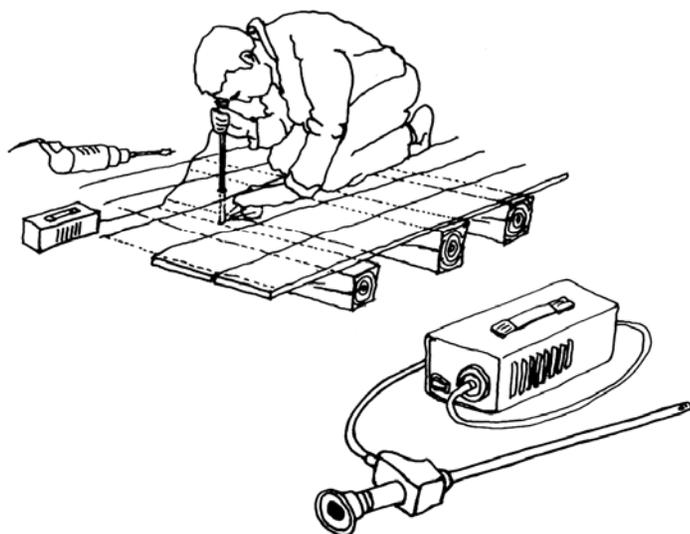


Figura 2.7f Endoscopio para explorar zonas de difícil acceso.

Endoscopio:

Este dispositivo permite acceder a zonas ocultas por medio de un tubo que incorpora espejos, lupa y linterna. El tubo se introduce a través de las tablas de madera del suelo o del techo y nos permite analizar lo que hay detrás de los mismos. Su funcionamiento es similar al del periscopio de los submarinos, pero en este caso es tubo es más flexible y admite su curvado, figura 2.7f. Algunos equipos tienen un tubo flexible de fibra óptica de 2 mm de diámetro y 1 m de longitud.

Otras herramientas:

Estas herramientas incluyen, entre otras, pie de cabra, mazo, escoplo, martillo neumático, etc. Se utilizan para levantar solados, abrir falsos techos, descubrir zonas ocultas de madera como las cabezas de vigas o soportes recubiertos con morteros o yesos, etc.

Medios auxiliares:

En muchos casos para realizar la inspección será preciso contar con medios auxiliares como escaleras y andamios; que pueden incluir apeos y apuntalamientos, cuando el estado de la estructura esté cerca de la ruina.

2.4.2 Técnicas especiales de exploración

En este apartado se recogen las técnicas que se pueden emplear en la exploración de las piezas estructurales de madera. La mayoría de estas técnicas se utilizan para la estimación de las propiedades mecánicas mediante la medición de la velocidad de propagación de los ultrasonidos o de ondas de esfuerzo causadas por impactos que hacen vibrar la pieza (ultrasonidos y vibraciones). Otras se dirigen a la determinación de la densidad de la madera como el resistógrafo, el pilodyn y la densitometría mediante rayos gamma. La dendrocronología y el método del carbono 14 sirven para la datación de la edad de la madera y finalmente la técnica de detección acústica para determinar la presencia y actividad de insectos xilófagos.

Algunas técnicas son ya habitualmente utilizadas en algunos países y otras están en proceso de investigación. También son empleadas para la evaluación del estado de los árboles en pie.

La utilización de estas técnicas no evita la inspección visual y la utilización de herramientas tradicionales junto con la experiencia del técnico y de hecho la mayoría de las investigaciones prácticas aconsejan estas técnicas como una herramienta auxiliar o complementaria de la experiencia.

2.4.2.1 Ultrasonidos:

La utilización de los ultrasonidos en los ensayos no destructivos de materiales es empleada en la madera además de en otros materiales como el acero o el hormigón. El objetivo principal es la determinación del módulo de elasticidad dinámico deducido a partir de la velocidad de propagación de las ondas y de la densidad del material. A partir de este módulo se puede deducir el módulo de elasticidad estático y estimar la resistencia.

También se ha empleado en la evaluación del estado de la madera relacionando la velocidad de transmisión transversalmente a la pieza para estimar la pérdida de capacidad de resistencia debida a daños de origen xilófago como las pudriciones.

Los ultrasonidos son ondas acústicas de la misma naturaleza que las ondas sónicas pero con frecuencias que se encuentran por encima de la zona audible. De esta forma se consigue un haz muy concentrado que permite la localización de los defectos con precisión.

Métodos de evaluación por ultrasonidos:

Los ultrasonidos pueden aplicarse mediante alguno de los tres métodos siguientes:

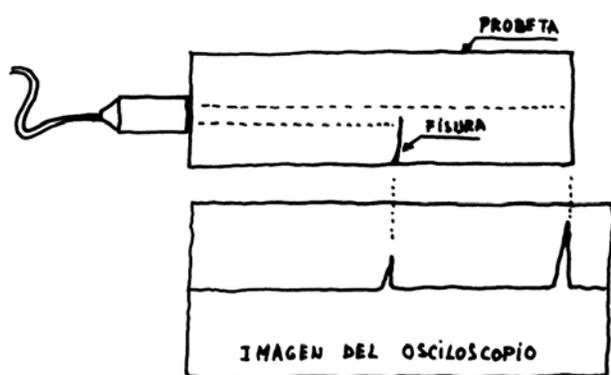
a) Método de ecos:

Es el más utilizado en los ensayos no destructivos de metales y otros materiales homogéneos. Este sistema sólo precisa un palpador que sirve como emisor y receptor. Emite ondas ultrasónicas que son reflejadas en la pared opuesta; en el caso de encontrar en su camino una fisura se producirá un eco que se representa gráficamente en un osciloscopio, figura 2.8.

El sistema de ecos no resulta adecuado en los materiales heterogéneos con estructura basta, como el hormigón o la madera. Las ondas ultrasónicas se reflejarían en las superficies límites y en los poros y grietas del material, produciéndose una dispersión en todas las direcciones.

b) Método de transmisión:

Este método es adecuado en la verificación de materiales heterogéneos como la madera y el hormigón. Utiliza dos palpadores, un emisor y un receptor. La frecuencia debe ser mucho más baja que en el método de ecos, para conseguir un alcance mayor de los impulsos y poder sortear las irregularidades del material. Las ondas ultrasónicas más largas rodean más fácilmente los obstáculos que las ondas más cortas.



Al reducir la frecuencia, la concentración del haz de ondas disminuye. En la práctica puede considerarse como un haz esférico. Una longitud de onda de 10 cm es relativamente grande comparada con el diámetro de los palpadores, de unos 3 cm (palpadores cilíndricos), figura 2.9.

La presión sonora es máxima para la dirección axial del palpador y disminuye para las direcciones

Figura 2.8 Método de ecos en ultrasonidos.

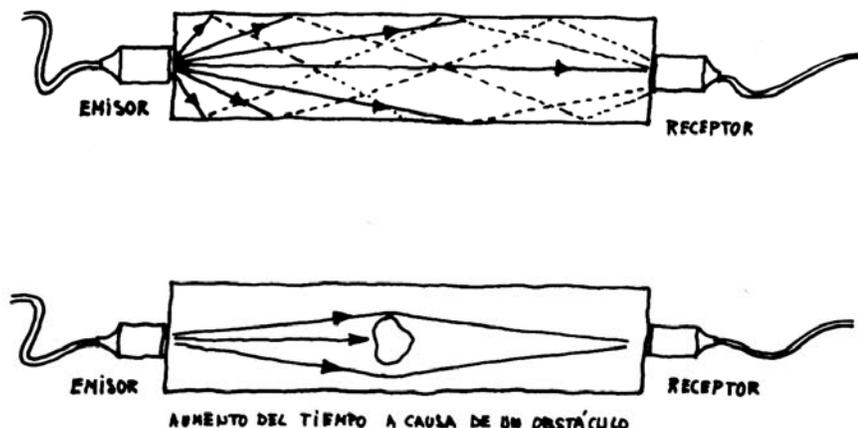


Figura 2.9 Método de transmisión en ultrasonidos. Los obstáculos como huecos o zonas degradadas aumentan el tiempo de transmisión.

oblicuas según aumenta el ángulo. En este sistema, una discontinuidad en el material, como una grieta o un nudo, tienen por efecto un aumento del tiempo transcurrido hasta llegar al receptor. El camino seguido por las ondas ultrasónicas es mayor al tener que sortear el obstáculo.

c) Método de resonancia:

Exige un equipo mucho más complejo y únicamente es aplicable en laboratorio a probetas de ciertas dimensiones. La probeta se excita en su frecuencia propia mediante un emisor electrodinámico de oscilaciones. Por el fenómeno de resonancia se produce un fuerte aumento de la amplitud de la oscilación. A partir de la frecuencia de resonancia, la densidad y las dimensiones de la probeta se determinan las constantes elásticas (módulos de elasticidad longitudinal de cortante).

Fundamentos físicos:

Existe una relación entre la velocidad, v , de propagación del sonido en un medio elástico con forma de barra, su densidad ρ y el módulo de elasticidad E , que se expresa de la forma siguiente:

$$E = v^2 \cdot \rho$$

El módulo de elasticidad obtenido se denomina módulo de elasticidad dinámico que tiene un valor ligeramente diferente al módulo de elasticidad estático, obtenido por ensayo mecánico. También se denomina impedancia acústica al producto de la densidad por la velocidad de la onda ultrasónica ($\rho \cdot v$ en $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y rigidez acústica al producto de la impedancia por la velocidad de la propagación ($\rho \cdot v^2$ en $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$).

En el caso de un cuerpo de gran tamaño cuyas dimensiones transversales son mayores que la longitud de onda, esta relación es más compleja. En realidad se producen dos tipos de ondas: la onda longitudinal o de compresión y la onda transversal o de cizallamiento, con velocidad

inferior. En estas relaciones interviene el coeficiente de Poisson, ν . Las expresiones de las velocidades longitudinal, v_l y transversal v_t , son las siguientes,

$$v_t^2 = \frac{E}{\rho} \cdot \frac{1 - \nu}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}$$

$$v_l^2 = \frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1 + \nu)} = \frac{G}{\rho}$$

La velocidad de propagación de la onda transversal puede emplearse para deducir el coeficiente de Poisson con la ayuda de un osciloscopio.

Si la frecuencia de las ondas ultrasónicas es elevada, el flanco del impulso es más vertical y permite una mayor precisión en la medida del tiempo de recorrido. Pero por otro lado, en los materiales heterogéneos se precisan bajas frecuencias para conseguir grandes penetraciones. La frecuencia a considerar estará comprendida en el intervalo de los 20 a 220 kHz. Los mejores resultados se obtienen para las frecuencias entre 40 y 50 kHz. En el caso de la madera con velocidades de propagación longitudinales del orden de 4,5 km/s, y perpendiculares de unos 1,5 km/s, suponen unas longitudes de onda de 10 y 3,3 cm, respectivamente ($\lambda = v/f$).

La velocidad de transmisión de varias especies españolas se ha determinado en probetas libres de defectos obteniéndose altas correlaciones entre las propiedades mecánicas y la rigidez acústica (Laffarga, 1992).

Factores que influyen en la velocidad de propagación:

Además de la densidad y el módulo de elasticidad de la madera en la velocidad de propagación influyen otros factores como el contenido de humedad, la temperatura y el nivel de tensión, de manera menos significativa que han sido estudiadas en varios trabajos de investigación de los que se incluyen las referencias siguientes.

El contenido de humedad influye ligeramente en la velocidad de propagación de los ultrasonidos de tal manera que por cada incremento de un 1 % de humedad se produce una disminución de la velocidad de aproximadamente un 0,8 %, siguiendo una relación lineal entre el 5 y el 30 % de contenido de humedad (Sandoz, 1989). La temperatura también influye ligeramente en la velocidad de transmisión de forma que un aumento de la temperatura reduce la velocidad. A su vez esta influencia de la temperatura es más importante cuanto mayor es el contenido de humedad, por lo que algunos aparatos incluyen sondas de temperatura y humedad para tener en cuenta estos dos factores.

La velocidad de propagación de los ultrasonidos a través de un material varía ligeramente en función de la tensión aplicada (Bucur, 1979). Esta dependencia se ha aprovechado para estimar la distribución de las tensiones de flexión (Sasaki, 1998). En los ensayos realizados sobre probetas pequeñas y libres de defectos sometidas a compresión y a tracción axial con tensiones del orden de 20 N/mm² se deducían variaciones de la velocidad del 0,08 al 0,06 %. La transmisión de las ondas se realizaba en dirección transversal a la fibra y a la tensión aplicada. La variación es muy pequeña y no parece viable su aplicación práctica en la obra (Arriaga et al. 1992). También se cita que la variación de la velocidad en dirección paralela a la tensión es mayor que en la dirección transversal (Bergman et al., 1958, Pao et al., 1984).

La correlación existente entre la velocidad de propagación y sus propiedades mecánicas en piezas sometidas a tensión comparada con la obtenida en piezas sin carga es similar. Para ello se han empleado los ultrasonidos en la medición de piezas sometidas a elevadas tensiones con el fin de determinar su correlación con el módulo de elasticidad en niveles de tensión fuera de la zona lineal obteniéndose resultados similares a la situación sin tensión (Peterson et al., 1998).

Las propiedades acústicas de la madera varían ligeramente cuando el material ha estado sometido a cargas estáticas durante un tiempo prolongado y terminan por estabilizarse al cabo de un tiempo. Este fenómeno ha sido estudiado para la madera utilizada en la fabricación de instrumentos musicales como los violines (Bucur, 1980). Bajo solicitaciones longitudinales del orden de un 20 % de la tensión de rotura se observan disminuciones de la velocidad de propagación de los ultrasonidos de 0,6 a 6,6 %. En el caso de solicitaciones radiales y tangenciales las velocidades longitudinales disminuyen, mientras que las velocidades radiales y tangenciales aumentan de un 3 a un 5 %.

Metodología:

Las lecturas pueden efectuarse situando los palpadores enfrentados (método directo) o no enfrentados (métodos semidirecto e indirecto), figura 2.10. Para la determinación del módulo de elasticidad de la pieza lo adecuado es utilizar el método directo aplicando los palpadores en las testas de la pieza. Como generalmente las testas quedan ocultas en los muros se recurre a una lectura oblicua colocando los palpadores en las caras de la pieza inclinados un ángulo de unos 45 °, figura 2.11. Los palpadores más apropiados para las mediciones en piezas de madera son los de tipo cónico que no requieren material de acoplamiento. Para garantizar el contacto es preciso realizar una pequeña perforación o incisión donde se aloja la punta del palpador. Esta disposición no enfrentada da lugar a una pérdida de señal mayor y el alcance será menor.

Entre algunos de los aparatos disponibles en el mercado que han sido aplicados en la madera se encuentran los siguientes:

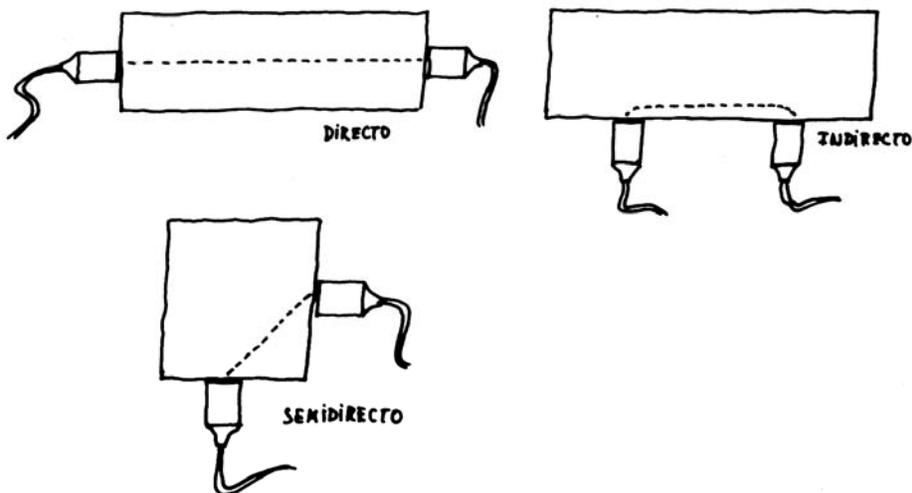


Figura 2.10 Procedimientos de medición con ultrasonidos: directo entre las testas de la pieza, indirecto sobre una cara de la pieza y semidirecto sobre caras distintas.

Sylvatest aparato portátil para medición de tiempos de transmisión de ultrasonidos con palpadores cónicos y sonda de temperatura y contenido de humedad específicamente desarrollado para madera. Puede medir tiempos en piezas con longitud de hasta 5 metros e incluye programa de proceso de datos para estimar el módulo de elasticidad, resistencia a flexión y calidad de la madera, para lo que necesita una calibración previa del material a ensayar.

PUNDIT (Portable Ultrasonic Non destructive Digital Indicating Tester) aparato portátil con generador de impulsos con una frecuencia de 54 kHz que mide el tiempo con precisión de décimas de microsegundo. Tiene dos palpadores de forma cilíndrica con una superficie de contacto de 5 cm de diámetro. Para el acoplamiento de los palpadores sobre la superficie de la madera se emplea una capa delgada de vaselina.

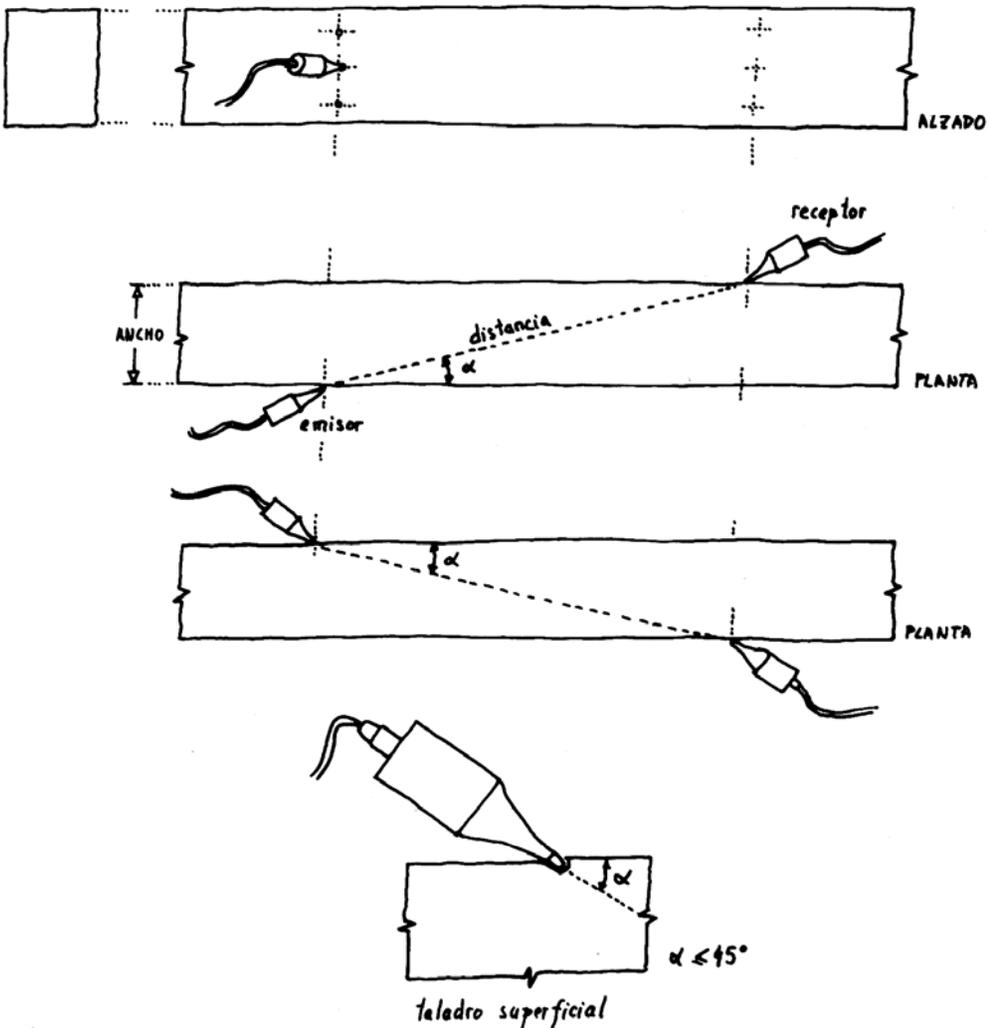


Figura 2.11 Medición oblicua colocando los palpadores en las caras de la pieza.

Resultados que se obtienen con esta técnica:

Las correlaciones que se obtienen entre la velocidad de propagación en la dirección longitudinal con las propiedades mecánicas de la madera dan coeficientes del orden de 0,63 a 0,85, aproximadamente (Sandoz 1989, Machado et al., 1998).

En las secciones de gran escuadría los resultados de correlación son también del mismo orden, como se indica en los trabajos de investigación que se citan a continuación. Además, lo más notable es que la correlación existente es mejor que la que se obtiene a través de la evaluación de la nudosidad según una norma de clasificación visual.

En piezas de cierta escuadría (100 x 120 y 120 x 240 mm) el coeficiente de correlación entre la velocidad de transmisión y la tensión de rotura a flexión está entre 0,67 y 0,79 y con el módulo de elasticidad entre 0,56 y 0,88 (Kessel et al., 1998). La predicción de las propiedades mecánicas de la madera es más precisa por este método que la relación que se obtiene por la nudosidad y la densidad definidas en la norma DIN 4074.

En secciones de 100x120 y 100x150 mm se han obtenido coeficientes de correlación de 0,75 a 0,87 entre módulo de elasticidad dinámico y resistencia y de 0,81 a 0,87 con el módulo de elasticidad estático (Kuklík et al., 1998).

La utilización de las medidas por ultrasonidos alcanzan una precisión mayor cuando se emplean conjuntamente con los parámetros de clasificación visual. De este modo se ha llegado a obtener coeficientes de correlación de 0,80 combinando la clasificación visual según la norma DIN 4074 y el módulo de elasticidad obtenido por ultrasonidos, mediante un análisis de regresión múltiple (Ceccotti y Togni, 1996).

Por otro lado, la medición de la velocidad de propagación de los ultrasonidos en la dirección transversal a la pieza se ha utilizado para detectar la existencia de madera deteriorada, obteniendo velocidades inferiores a las que se dan en la madera sana (Rodríguez et al., 1998). Los palpadores se disponen en las caras de la viga, tal y como podría hacerse en el caso de madera puesta en obra. Sin embargo, los resultados que se obtienen pueden predecirse con una simple inspección visual o con herramientas sencillas, aunque no con tanta precisión.

2.4.2.2 Métodos de vibraciones inducidas:

Este método está basado en los mismos principios que la técnica de ultrasonidos, relacionando la velocidad de propagación de una onda (en este caso provocada por un impacto) con el módulo de elasticidad y la densidad. Además suelen añadir un análisis de la amortiguación de la vibración mediante un osciloscopio.

La forma de trabajo es la siguiente, se introduce en la madera una onda de esfuerzo mecánico mediante un golpe con martillo u otro medio similar; esta onda se propaga y se detecta en dos puntos a lo largo de su camino; cuando la onda alcanza el primer acelerómetro se pone en funcionamiento un contador de tiempo; y cuando la onda llega al segundo acelerómetro el contador se detiene reflejándose en el visor el tiempo transcurrido en microsegundos.

En algunos aparatos el mismo elemento con el que se realiza el impacto tiene incorporado un acelerómetro, como ocurre en el denominado martillo electrónico o martillo de impulsos. Este dispositivo ha sido empleado para la inspección de árboles en pie (Bethge et al., 1996) y

detectan pudriciones o defectos internos mediante la pérdida de velocidad de transmisión comparada con la madera sana. Emplean un instrumento denominado martillo electrónico, que consiste en un equipo que permite medir la velocidad de transmisión de una onda de sonido que es provocada por el impacto del martillo sobre un emisor que hace pasar la onda en dirección perpendicular a la fibra y es recogido por un receptor.

Lógicamente si en una pieza de madera existen degradaciones interiores u oquedades de galerías la velocidad de propagación será diferente y el tiempo medido reflejará esta perturbación respecto a la madera sana. Estos sistemas se emplean en la inspección de estructuras de hormigón y acero, y también se comercializan para la madera. Sus aplicaciones se orientan a la evaluación de las características mecánicas, clasificación, control de calidad de productos derivados de la madera y detección de la degradación en estructuras de madera (madera laminada, postes, apeas de minas, etc.).

En Norteamérica se emplea de manera frecuente la técnica de vibraciones para la determinación de la capacidad resistente de los postes de tendidos de telecomunicaciones. El dispositivo se coloca en la zona cercana a la línea de tierra y se emiten ondas transversales de las que se analiza la frecuencia y los factores de atenuación (Anthony, Lee et al. 1998).

La técnica de vibraciones inducidas ha sido utilizada para la determinación de la longitud de pilotes de puentes en Estados Unidos (Anthony et al. 1998). En la parte superior del pilote se provoca un impacto con un martillo y se genera una onda que viaja hasta el pie del poste y se refleja volviendo a registrarse. El tiempo de reflexión de la onda está relacionado con la frecuencia de resonancia del poste. La longitud del poste se deduce de la frecuencia de resonancia y de la velocidad de transmisión de la onda. La precisión que se obtiene es de $\pm 15\%$.

Entre los dispositivos que existen en el mercado pueden citarse los siguientes:

Metriguard 239A: aparato portátil para medir la velocidad de propagación de ondas de esfuerzo en el material. Consta de dos acelerómetros que se colocan en dos puntos de la

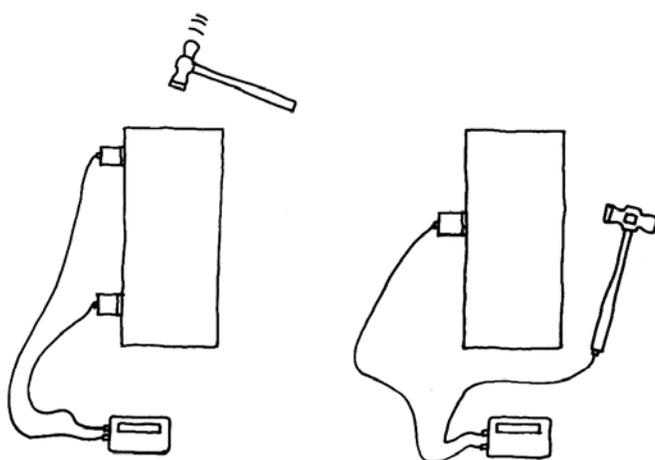


Figura 2.12 Medición de la velocidad de propagación de ondas de esfuerzo: a) con dos acelerómetros; b) con uno de los acelerómetros en el útil de impacto.

pieza. Se provoca un impacto en la pieza y los acelerómetros miden el tiempo que tarda en recorrer la distancia que los separa, figura 2.12. En función de la velocidad y la densidad puede obtenerse el módulo de elasticidad. Además permite detectar defectos en el interior de la pieza al disminuir la velocidad de transmisión. Se ha utilizado en postes, apeas de minas y otras piezas estructurales.

Metriguard 340: aparato portátil diseñado para determinar el módulo de elasticidad de vigas

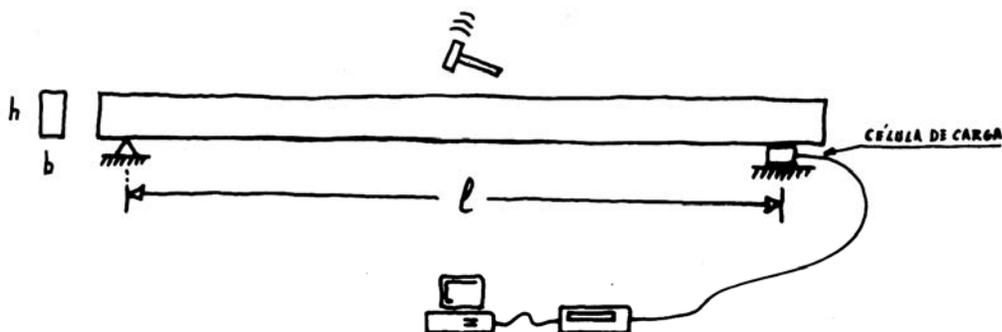
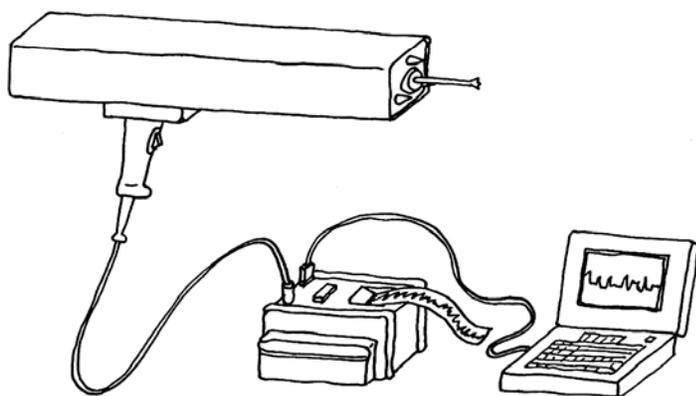


Figura 2.13 Determinación del módulo de elasticidad mediante análisis de vibraciones.

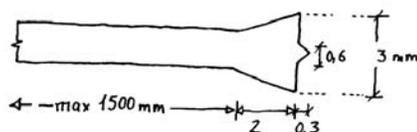
biapoyadas. En uno de los apoyos se coloca una célula de carga que tras aplicar un impacto en el centro del vano envía la señal a un procesador que analiza la vibración. A partir de la frecuencia de vibración, el peso de la pieza y las dimensiones (luz, ancho y canto) se deduce el módulo de elasticidad del material, figura 2.13. El análisis de la atenuación de la vibración permite estimar la resistencia. Se ha empleado en madera aserrada, laminada y otros productos derivados de la madera. La pieza debe ser suficientemente larga para que la vibración tenga una amplitud registrable por la célula de carga (generalmente la frecuencia de vibración deberá ser menor que 32 Hz).

2.4.2.3 Resistógrafo:

El resistógrafo consiste en un taladro mecánico que realiza una perforación de 3 mm de diámetro en la dirección radial de la sección de la pieza y que evalúa la resistencia que ofrece a la perforación. El aparato es portátil y tiene una broca con un diámetro de 1,5 mm en el fuste y 3 mm en la punta, figura 2.14, que avanza a una velocidad constante. La resistencia a la



penetración se mide mediante el consumo de potencia. Su origen se remonta al año 1985 cuando fue utilizado en Alemania para detectar la degradación en postes (Rinn, 1996). Posteriormente evolucionó a un dispositivo diseñado por Rinn que se denominaba «Densimat» y en 1993 se renombró como resistógrafo.



La resistencia que ofrece a su avance se relaciona con la densidad de la madera y es capaz de detectar los anillos de crecimiento al encontrar

Figura 2.14 Resistógrafo.

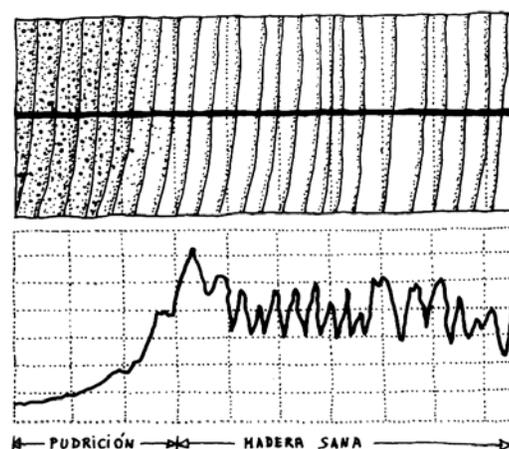
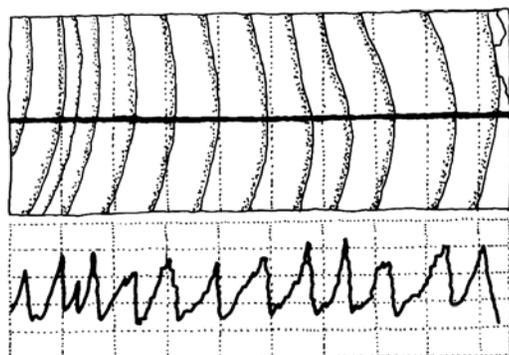


Figura 2.15 Gráficas de la medición con el resistógrafo: en la figura superior se observa como se detecta la mayor dureza correspondiente a cada anillo de crecimiento y en la inferior se detecta la zona degradada por una pudrición.

posibilidades que ofrece este dispositivo es la inspección de la zona oculta de las cabezas de las piezas que entran dentro de los muros, así es posible detectar pudriciones interiores.

Existen variantes de los resistógrafos diferenciadas principalmente en la longitud de perforación y en sus características. La longitud de la broca de perforación puede tener un mínimo de 280 mm, una longitud estándar de 410 mm y un máximo de 950 mm. La longitud menor es adecuada al caso de madera en estructuras donde se necesita un aparato de dimensiones reducidas para poder introducirlo en espacios pequeños entre las piezas. Las longitudes superiores se utilizan en la inspección de árboles.

La velocidad de rotación es continua a razón de 1.500 rpm y la velocidad de avance puede ser variable en alguno de los aparatos con los siguientes límites: 50 mm/min para maderas muy densas como por ejemplo el azobe (*Lophira alata*); 700 mm/min para maderas muy blandas como el chopo.

diferencias de densidad entre la madera de verano y de primavera. La salida de resultados en una gráfica en papel (o en valores numéricos directa a ordenador), figura 2.15, permite detectar pérdidas de densidad debida a pudriciones u oquedades. El área bajo la curva representa un índice de evaluación de la densidad. La correlación con la densidad de la madera seca es muy elevada ($r^2 = 0,8$).

El resistógrafo se utiliza en la detección de daños internos en árboles con la finalidad de ayudar en la toma de decisiones para su conservación o eliminación por razones de seguridad (Bethge et al., 1996).

También tiene aplicaciones en la inspección de piezas de madera de estructuras antiguas (Rinn, 1994). Ha sido utilizado en la inspección de pilas de puentes de madera en los Estados Unidos (Anthony et al., 1998) como lecturas complementarias a las mediciones por ultrasonidos. En la inspección de edificios históricos también ha sido empleado como técnica complementaria a otros procedimientos (Bertolini et al. 1998); una primera fase consiste en la inspección visual de la estructura incluyendo la evaluación de los defectos de las piezas y la identificación de la especie, y en la segunda fase se realizan mediciones con el resistógrafo en los lugares donde interese un conocimiento más detallado. Una de las

2.4.2.4 Medición de la densidad superficial:

Existe un dispositivo para la estimación de la densidad en la superficie de la madera denominado «pilodyn». Consiste en un cilindro metálico en cuyo interior se aloja un muelle que se comprime mediante un mecanismo de accionamiento manual que acumula una energía de 6 julios. Se coloca sobre la superficie de la madera y al soltar el muelle se dispara una barra circular de 2,5 mm de diámetro que se clava sobre la superficie. Se mide la penetración en la madera en una escala graduada que llega a un máximo de 40 mm y este valor se relaciona con la densidad de la madera.

En algunos trabajos de investigación se ha empleado este aparato bariendo la longitud de la pieza tomando varias lecturas en secciones a intervalos regulares. La correlación obtenida con la resistencia de la pieza no es significativa (Bonamini et al., 1992). Parece que la utilidad de este aparato se limita a evaluar el estado de la superficie de la pieza, lo que puede deducirse de manera más sencilla mediante un instrumento como el punzón.

2.4.2.5 Gamma-densitometría:

Esta técnica se utiliza para medir la densidad de un material emitiendo una radiación a través de la pieza de la que se conoce el coeficiente de absorción y se mide la energía recibida al otro lado.

Se ha empleado para la evaluación del estado de postes de madera de líneas de telecomunicaciones, como técnica complementaria de una inspección visual (Taras, 1998). El dispositivo empleado consistía en un aparato portátil con una fuente radioactiva encapsulada dentro de una caja de acero para proteger al operario. Este dispositivo se acopla a un carro con ruedas que se desplaza a lo largo del poste y lleva un detector en el lado opuesto unido firmemente mediante un brazo al carro. La densidad se relaciona con la resistencia y el coeficiente de correlación que se obtiene es del orden de 0,60 si únicamente se aplica esta técnica. Pero si se combina con los resultados de una inspección visual (nudosidad, humedad, localización del punto más débil y edad del poste) el coeficiente de correlación alcanza un valor de 0,85.

2.4.2.6 Fractómetro:

Se trata de un equipo portátil desarrollado en Alemania (Bethge et al., 1996) que mide la tensión de rotura y el módulo de elasticidad en flexión radial y la energía de rotura, en una probeta cilíndrica de 5 mm de diámetro extraída en la dirección radial. En los últimos equipos desarrollados también se puede obtener la tensión de rotura a compresión paralela en la misma probeta cilíndrica (Bethge et al., 1996). Este equipo es empleado en la inspección de árboles y no se conocen referencias a su utilización en madera de estructuras. El equipo está pensado para un ensayo rápido al pie del mismo árbol que se está inspeccionando y con la madera en verde, figura 2.16. Su aplicación en estructuras podría ser posible, pero en principio los resultados que se obtienen están referidos a madera libre de defectos y en pequeñas dimensiones, con lo que su utilidad práctica no sería muy alta. En todo caso permitirá detectar pudriciones incipientes en la madera.

2.4.2.7 Datación de la madera:

Para la datación de la madera pueden aplicarse dos técnicas diferentes en metodología y precisión de los resultados como son la dendrocronología y el carbono 14. Su interés práctico se orienta a la datación de bienes histórico-artísticos como un dato para la intervención y rehabilitación de edificios (Rodríguez T. et al., 1985).

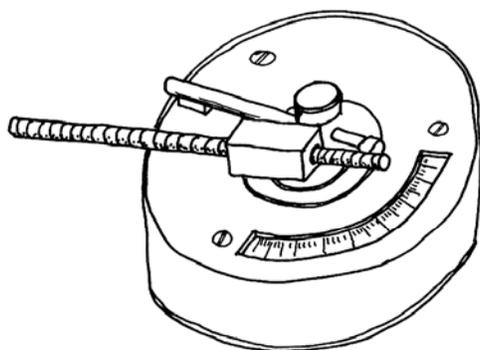


Figura 2.16 Fractómetro: la probeta cilíndrica se somete a un esfuerzo de flexión perpendicular a la fibra para obtener la tensión de rotura mediante un dispositivo mecánico.

La respuesta del árbol es similar en ejemplares más o menos distantes entre sí. La gráfica que representa la espesor de los anillos en ordenadas con respecto a los años en abcisas se denominada curva dendrocronológica, figura 2.17, y se compara con otras curvas de edad conocida hasta lograr una sincronización que resulte significativa.

El conjunto de diferentes curvas sincronizadas y solapadas permite contar con una cronología absoluta (desde el presente) que en España supera los 1.000 años con la madera de pino, figura 2.18. En Estados Unidos se dispone de una cronología absoluta para una especie conífera del Sureste que llega a los 8.685 años. También es posible realizar dataciones relativas mediante la utilización de cronologías flotantes (de edad desconocida) que tienen gran utilidad en los estudios arqueológicos.

Una limitación del método es que no puede ser aplicado a cualquier especie. Para poder registrar los anillos es preciso que sean patentes en la madera como ocurre con la madera de

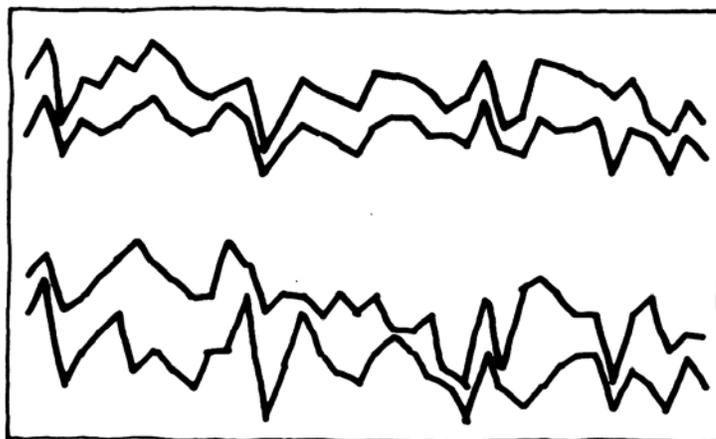


Figura 2.17 Dendrocronología y sincronización de curvas: ambas parejas de curvas dendrocronológicas se representan haciendo coincidir los anillos de igual edad. Las curvas quedan así sincronizadas y se observa un mayor grado de similitud en las dos curvas superiores.

conífera o en las frondosas de anillos poroso como el roble, no siendo aplicable a las maderas de anillo difuso como el chopo.

La radiodatación es un método físico-químico que se aplica a cualquier resto orgánico y las muestras necesarias para el análisis son inferiores a las precisadas en la dendrodatación. Su precisión es menor, aunque también pueden ser complementarias ambas técnicas (Rodríguez T., 1997, 2000).

Esta técnica se comenzó a aplicar a partir de 1950 mediante la medición de la radiactividad del carbono 14 de los restos biológicos como medio de estimar el tiempo transcurrido desde que cesó su actividad vital. La concentración de carbono 14 en los seres vivos es similar a la atmosférica y a partir del cese de la vida su concentración comienza a disminuir por desintegración. El tamaño de la muestra que se precisa para la medición de la radiactividad era de unos gramos hasta que en 1977 se introdujo la técnica de espectrometría de aceleración de masas con la que se precisan muestras del orden de miligramos y el tiempo de medida es de 15 a 120 minutos en lugar de las 48 horas que se necesitaban anteriormente. El límite de la edad de datación por razones técnicas es de 45.000 años.

La coordinación de los resultados de la datación por carbono 14 y la dendrocronología permite que una datación de tipo flotante obtenida por la dendrocronología se concrete gracias al método del carbono 14; también los resultados de la dendrocronología se han utilizado para la calibración del carbono 14.

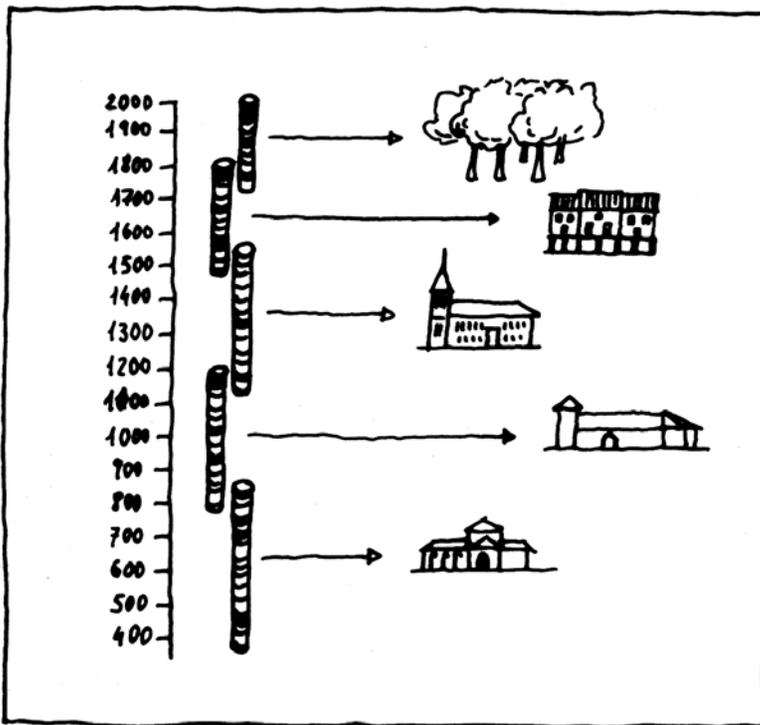


Figura 2.18 Solapamiento de curvas dendrocronológicas que permite enlazar una cronología que parte de árboles vivos hacia el pasado mediante las muestras extraídas de varios edificios o excavaciones.

2.4.2.8 Detección acústica de insectos xilófagos:

Esta técnica tiene como objetivo la detección de la presencia de insectos xilófagos dentro de la madera en fases iniciales en las que todavía no existen signos externos visibles. Se comenzó a trabajar en este campo en la década de los 80 y principios de los 90. Los primeros estudios mostraban la utilidad para detectar la actividad de las termitas cuando las obreras se encontraban trabajando e incluso podía localizarse la zona donde se encontraba el frente de las galerías (Fujii et al., 1990).

En la década de los 90 se ha desarrollado un aparato portátil dentro de un proyecto Europeo en el que participaron dos centros de investigación (CIDEMCO y CTBA) junto con varias empresas francesas y españolas del sector (Serment et al., 1996).

El estudio denominado INADEC (Insect Acoustic Detection) consiste en la colocación de captadores acústicos que funcionan en el dominio audible (100 Hz-25 kHz) que transmiten la señal a un módulo de recepción amplificación y filtrado que limitan la banda a frecuencias comprendidas entre 1 kHz y 20 kHz. La señal se digitaliza y puede almacenarse en un DAT (Digital Audio Tape) o enviarse directamente a un ordenador portátil para su procesado. La señal se compara con otras señales patrones en condiciones controladas. Por el momento está disponible para la detección de la actividad de las termitas y de los cerambícidos. Puede detectar la actividad hasta distancias de 2 metros dentro de una misma pieza y dispone de aparatos que permiten tomar lecturas a través del yeso. Uno de los campos donde puede tener una gran utilidad es como sistema complementario en los tratamientos contra las termitas mediante el sistema de cebos, con el objetivo de detectar y controlar su actividad después del tratamiento. El análisis de la señal es capaz de diferenciar la actividad de los insectos de otros ruidos como por ejemplo la presencia de los roedores.

Referencias bibliográficas:

- Anthony, R. W., Pandey, A. K. y Arnette, C.G.. (1998).** Inspection and assesment of timber piles. Proceedings of 5 th World Conference on Timber Engineering, Montreaux, Switzerland, aug. 1998. Vol. 1. Pp. 432-439.
- Anthony, R.W., Renforth, L. y Nelson, R. F. (1998).** Nondestructive strength evaluation of *Pinus sylvestris* poles in the U.K. Proceedings of 5 th World Conference on Timber Engineering, Montreaux, Switzerland, aug. 1998. Vol. 1. Pp. 642-648.
- Arriaga, F., García, L., Gebremedhin, K.G. y Peraza, F. (1992).** Evaluación de la capacidad portante de forjados antiguos con vigas de madera. AITIM. n° 161 (Pags. 51_62).
- Bergman, R.H. y Shahbender, R.A. (1958).** Effect of statically applied stresses on the velocity of propagation of ultrasonic waves. Journal of Applied Physics, vol. 29.
- Bertolini, C., Brunetti, M., Cavallero, P. y Macchioni, N. (1998).** A non destructive diagnostic method on ancient timber structures: some practical application examples. Proceedings of 5 th World Conference on Timber Engineering, Montreaux, Switzerland, aug. 1998. Vol. 1. Pp. 456-463.
- Bethge, K. Mattheck, C. y Hunger, E. (1996).** Equipment for detection and evaluation of incipient decay in trees. Arboricultural Journal 1996, Vol. 20, pp. 13-37.
- Bonamini, G., Ceccotti, A. y Montini, E. (1992).** Indagini non distruttive per la verifica strutturale di travi di legno antico. Dipartimento di Ingegneria Civile. Universita di Firenze. Legno, materiale per l'ingegneria civile. Raccolta Monografica. Sezione strutture n° 16/90. 118 págs.
- Bonamini, G. Togni, M. Y Uzielli, L. (2000).** The next step in the assessment of ancient timber beams: deriving characteristic values. COST Action C5. Workshop «Restrengthening of material and structures». Zurich, 31 ag. - 1 sept.
- Bucur, V. (1979).** Le comportement a la rupture du bois massif estudie para la methode ultrasonique d'impulsion. Communication présentée au 4e Congres Francais de Mecanique, Nancy, 4-7 sept. 1979.
- Bucur, V. (1980).** Modifications des propriétés acoustiques du bois de résonance sous l'effet de sollicitations de longue durée. Ann. Sci. forest., 1980, 37 (3), pp. 249-264.
- Ceccotti, A., Togni, M. (1996).** NDT on ancient timber beams: assesment of strength/stiffness poperties combining visual and instrumental methods. Porceedings 10 th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Lausanne.
- Fujii, Y., Noguchi, M., Imamura, Y. y Tokoro, M. (1990).** Using acoustic emission monitoring to detect termite activity in wood. Forest Products Journal, January 1990, Vol. 40, N° 1. Pp. 34-36.

Kessel, M.H., Plinke, B., Augustin, R. y Huse, M. (1998). Strength grading of construction timber with large cross sections. Proceedings of 5 th World Conference on Timber Engineering, Montreaux, Switzerland, aug. 1998. Vol. 1. Pp. 557-562.

Kuklik, P. y Dolejs, J. (1998). Nondestructive evaluation of structural timber. Proceedings of 5 th World Conference on Timber Engineering, Montreaux, Switzerland, aug. 1998. Vol. 1. Pp. 692-699.

Laffarga, J. (1992). Aplicación de la programación de ondas ultrasónicas para el estudio de las maderas. Revista de Edificación RE nº 11, mayo 1992. Pp. 21-28.

Machado, J.S., Sardinha, R. y Cruz, H. (1998). Evaluation of lengthwise variation of mechanical properties by ultrasounds. Proceedings of 5 th World Conference on Timber Engineering, Montreaux, Switzerland, aug. 1998. Vol. 2. Pp. 304-311.

Pao, Y. H., Sachse, W. y Fukuoka, H. (1984). Accoustoelasticity and ultrasonic measurements of residual stresses. In: Mason WP, Thurston RN (eds) Physical Acoustics. XVII. Academic Press, San Diego.

Peterson, M.L., Gutkowski, R.M., Srinath, S. y Mittlestadt, C. (1998). A method for prediction of in-situ strength of timber beams based on higher order elastic coefficients. Forest Products Journal, Vol. 48, Nº 10. Pp. 89-93.

Ramírez, F. et al. (19??). Introducción a los métodos de ensayos no destructivos de control de la calidad de los materiales. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial «Esteban Terradas». Madrid.

Rinn, F. (1994). Resistographic inspection of building timber. Proceedings of the Pacific Timber Engineering Conference, Gold Coast, Australia. July 1994, Vol. 2. Pp. 469-478.

Rinn, F. (1996). Resistographic visualization of tree-ring density variations. Radiocarbon 1996. Pp. 871-878.

Rodríguez, C., Rubio, P. y Gómez, J.C. (1998). Application of ultrasonic techniques, as a non destructive method, for the evaluation of timber structures. Proceedings of 5 th World Conference on Timber Engineering, Montreaux, Switzerland, aug. 1998. Vol. 2. Pp. 806-807.

Rodríguez Trobajo, E. y Richter, K. (1985). Datación de edificios históricos mediante la dendrocronología. La madera en la conservación y restauración del Patrimonio Cultural. Ministerio de Cultura. Págs. 101-110.

Rodríguez Trobajo, E. (1997). La dendrocronología y el carbono 14 en la datación de bienes culturales. AITIM nº 188. Págs 52-57.

Rodríguez Trobajo, E. (2000). Datación dendrocronológica y restauración de bienes culturales. 2ª Reunión Científica: Calidad y nuevas tecnologías en la madera de uso estructural. ETSIIAA de Palencia, 21 y 22 de noviembre de 2000. Universidad de Valladolid e ITAGRA.

Sandoz, J.L. (1989). Grading of construction timber by ultrasound. *Wood Science and Technology*, 23:95-108.

Sasaki, Y. y Ando, K. (1998). Acoustoelastic phenomena of wood. *Proceedings of 5 th World Conference on Timber Engineering*, Montreaux, Switzerland, aug. 1998. Vol. 2. Pp. 296-303.

Serment, M.M. y Winkel, O. (1996). Inadec: détection automatique des insectes dans le bois. *CTBA INFO n° 59*, Paris. Págs. 16-18.

Taras, A. y Iordanescu, M. (1998). NDE of wood utility poles integrating results of gamma densitometrie and of visual inspection. *Proceedings of 5 th World Conference on Timber Engineering*, Montreaux, Switzerland, aug. 1998. Vol. 1. Pp. 626-633.

Capítulo 3

Diagnóstico

3.1 Evaluación de los daños de origen abiótico

Las causas de origen abiótico que pueden producir daños en las piezas de madera son los agentes atmosféricos (radiación solar y la lluvia) y el fuego.

Acción de la radiación solar:

La madera expuesta a la luz solar sufre un cambio de la coloración que inicialmente tiende al oscurecimiento hacia un tono marrón; posteriormente toma un color grisáceo. La radiación ultravioleta del espectro de la luz solar degrada los componentes de la madera comenzando por la lignina. Esta acción se traduce en un oscurecimiento superficial. Al incidir el agua de lluvia, los productos resultado de la degradación son eliminados por el agua y queda la celulosa, menos sensible a las radiaciones, adquiriendo la superficie un color blanquecino.

Las células externas pueden recubrirse lentamente de mohos, que viven de la humedad de la madera y de los productos de la fotodegradación, dando a la superficie una coloración grisácea o negruzca. En la práctica, el agua y el sol actúan de forma combinada y se potencian entre sí multiplicando sus efectos.

No obstante el deterioro de la madera expuesta a la intemperie es muy lento. La pérdida de madera en la capa superficial es muy pequeña. Esta pérdida varía en función del clima, la especie y la orientación. Diversos autores citan valores que varían desde 1 hasta 13 mm por siglo. La pérdida de 1 mm/siglo fue observada en madera expuesta en climas nórdicos (Kühne et al. 1972). En madera de Cedro rojo del Pacífico expuesta durante ocho años al Sur se dedujeron pérdidas de 13 mm/siglo (Feist y Mraz, 1978). En ese mismo estudio se detectaban valores del orden de 6 mm/siglo para maderas de pino silvestre, pino Oregón, abeto Engelmann y pino Ponderosa en ensayos de envejecimiento acelerado. Este valor coincide con los resultados que obtuvo Browne de 6,4 mm/siglo (Browne, 1960).

En resumen el efecto depende de la cantidad de radiación solar, intensidad de la lluvia, viento y grado de exposición.

Acción del agua:

El agua de lluvia que moja la superficie de la madera sin protección es absorbida rápidamente por capilaridad por la capa superficial de la madera seguida por la adsorción en las paredes de las células. El vapor de agua es recogido directamente por adsorción en las paredes de las células. La diferencia de humedad entre el interior y la capa superficial que tiende a hinchar, provoca un estado de tensiones en la pieza que si no está equilibrado de manera simétrica, origina la combadura de la pieza.

El efecto del agua de lluvia combinado con la insolación constituye la principal causa de deterioro superficial de la madera.

Como conclusión final sobre el efecto del agua de lluvia y de la radiación solar, como fenómenos conjuntos de la exposición a la intemperie, debe considerarse como una degradación superficial que no afecta a las propiedades mecánicas de manera significativa (Borgin et al., 1975).

Acción del fuego:

Una estructura que haya sufrido un incendio puede ser recuperable o reutilizable si la pérdida de sección no es muy elevada. La acción del fuego en una sección de una pieza de madera produce una lenta combustión con una velocidad de carbonización del orden de 0,6 a 0,7 mm/min, dependiendo de la especie de madera (UNE ENV 1995-1-2). Debajo de la capa carbonizada existe una profundidad de madera que se encuentra en pirólisis. En la superficie de la madera bajo la línea de carbonización existe una temperatura de 300 °C. Al cabo de 20 minutos el régimen de avance de la temperatura en la madera se hace constante, de tal forma que la temperatura es la ambiental (20 °C normalmente) a tan sólo 30 mm de profundidad (Hartl, 1995, Argüelles et al. 2000).

De lo anterior se deduce que la parte interna de la pieza (a partir de 30 mm de profundidad) no ha sufrido ningún cambio significativo. En la franja de 30 mm hay parte de la madera que ha quedado prácticamente destruida y en general con propiedades mecánicas disminuidas. El efecto global en la disminución de la capacidad portante de la pieza se evalúa como equivalente a una pérdida de grueso de 7 mm en cada cara expuesta.

En resumen, para la determinación de la capacidad portante de las piezas de madera después del incendio puede seguirse el siguiente planteamiento. Se procederá a la limpieza de la superficie carbonizada hasta dejar vista la superficie de la madera y sus defectos naturales. Conocida la especie puede clasificarse para determinar la calidad estructural y por tanto su resistencia. Hay que tener en cuenta que la pérdida de sección puede modificar la calidad estructural, ya que el tamaño relativo de los nudos en relación a las dimensiones de la sección puede aumentar y obligar a bajar un grado la calidad respecto a la original. Finalmente, con la sección residual, descontando además los 7 mm de pérdida equivalente perimetral, puede comprobarse la capacidad portante.

Los puntos más críticos de una estructura de madera en caso de incendio son las uniones y principalmente aquellas que utilizan elementos metálicos. Los elementos de fijación de tipo clavija, como los pernos, clavos, tirafondos y pasadores, constituyen caminos de fácil entrada del calor al interior de la sección. También las aristas en las zonas de encuentro entre piezas pueden sufrir un avance más rápido del fuego. Por tanto, las uniones serán objeto de una inspección detallada para conocer su estado.

Efecto de la edad de la estructura:

Una cuestión que se plantea con frecuencia en la intervención para la restauración de estructuras de madera es si el paso del tiempo implica una reducción de las propiedades mecánicas de la madera. Los estudios recientes que se han realizado sobre este tema no han detectado ninguna variación en la resistencia de la madera como material (ASCE 1982, Jessome 1965, Kuipers 1986, Cristelli, F. 1986, Ehlbeck and Görlacher 1987, Rug y Seeman 1991).

La pérdida de capacidad portante que se puede encontrar en algunos casos está originada por otras razones muy distintas como es el deterioro producido por los agentes bióticos, o el aumento de las fendas si está expuesta a la intemperie. No obstante, a lo largo del tiempo la madera sufre cambios químicos como la disminución de la cantidad de celulosa cristalina (Borgin et al. 1975).

Hay estudios de hace casi 50 años que llegan a conclusiones diferentes. Por ejemplo, el realiza-

do con madera de ciprés con una antigüedad de 300 a 1.300 años (Kohara, 1953, 1954); el estudio se efectuó sobre piezas que probablemente se han encontrado protegidas de la exposición directa a la intemperie y se encontró un incremento de alguna propiedad mecánica (compresión) durante la primera etapa de envejecimiento. Sin embargo, la resistencia al impacto y la hienda disminuían. La mayor reducción se daba en la resistencia al impacto alcanzando un 50 % al cabo de 1.300 años. Se concluía que la madera de ciprés se volvía más dura y resistente con la edad, pero perdía flexibilidad, haciéndose más frágil.

Otro criterio que se ha seguido por algún autor (Suter, 1982) consiste en aplicar un coeficiente de modificación de la resistencia y de la rigidez de 0,90 en la madera antigua. Este valor lo aplica para todas las propiedades sin diferenciar entre ellas y está basado en la comparación de los resultados de ensayo de piezas antiguas con los valores de la norma CSA 1976. El número de ensayos realizado y el mismo fundamento no parecen suficientes para demostrar la pérdida de resistencia de la madera y menos evaluarla, pero el autor citado utiliza este criterio como un margen de seguridad ante la incertidumbre de que exista alguna reducción de las propiedades mecánicas de la madera con el tiempo. También hace referencia a otro trabajo experimental (Attar-Hassan, 1976) en el que se comparaban los resultado de ensayo sobre probetas pequeñas de madera nueva y con 141 años de antigüedad.

3.2 Evaluación de los daños de origen biótico

La determinación de la gravedad de los daños producidos por los agentes bióticos en la madera de un edificio se basa en el conocimiento del modo de vida de los organismos xilófagos que han causado el deterioro. Es preciso conocer la extensión y la intensidad propias del agente xilófago, así como el modo de ataque.

La extensión del ataque en general, es mayor o menor dependiendo del tipo de agente xilófago. Algunos quedan limitados a las zonas próximas a las humedades y otros se pueden extender con facilidad a todo un local o todo el edificio.

La intensidad y el modo de ataque de cada agente xilófago es diferente y resulta de gran interés para poder estimar la gravedad del daño en las piezas de madera.

En este apartado se exponen los modos de actuación de cada tipo de agente xilófago y el tipo de deterioro que produce y sus consecuencias en la estructura. También se incluyen algunos criterios para evaluar la pérdida de capacidad portante producida.

3.2.1 Hongos de pudrición

Como ya se ha comentado anteriormente los hongos de pudrición necesitan un contenido de humedad en la madera superior al 20 % aproximadamente. Por tanto, la extensión de estos ataques se reduce a las zonas en las que la humedad supera dicho valor de tal manera que lo habitual es encontrar daños por pudrición en las zonas de las piezas que se encuentran en contacto con la fábrica que retiene la humedad, o en zonas cercanas a las conducciones sanitarias defectuosas. No son ataques que se generalicen o se extiendan a grandes superficies del edificio sino que afectan a partes localizadas de un local o locales.

Las consecuencias de sus efectos son la destrucción de la madera en la zona afectada. La pudrición comienza por la destrucción de la albura de la pieza y posteriormente termina por afectar también al duramen. En el caso de vigas o pares apoyados sobre muros de fábrica se traduce en la pérdida de superficie de apoyo y el fallo se origina por la caída de un grupo de 3 o 4 piezas que se desprende del resto del forjado. Es un problema de pérdida de estabilidad que no se detecta previamente salvo por la presencia anterior de la humedad en la zona. En la práctica, su efecto es la disminución de la longitud de la pieza, figura 3.1. Por este motivo, no es posible en la práctica estimar la pérdida de capacidad portante de la estructura, ya que simplemente se trata de una pérdida de estabilidad.

Otro lugar donde la pudrición suele presentar daños típicos es en los ensambles de las piezas, generalmente en los nudos de las armaduras de cubierta. En estos casos el nudo se debilita por la acción de la pudrición provocando la pérdida de estabilidad de la estructura. Las filtraciones de cubierta humedecen la estructura y el agua tiende a retenerse en las zonas de los ensambles de los nudos.

Es muy frecuente que junto con los hongos de pudrición parda se encuentre la actividad de insectos de ciclo larvario de la familia de los anóbidos, como se comenta al tratar los daños que originan estos insectos.

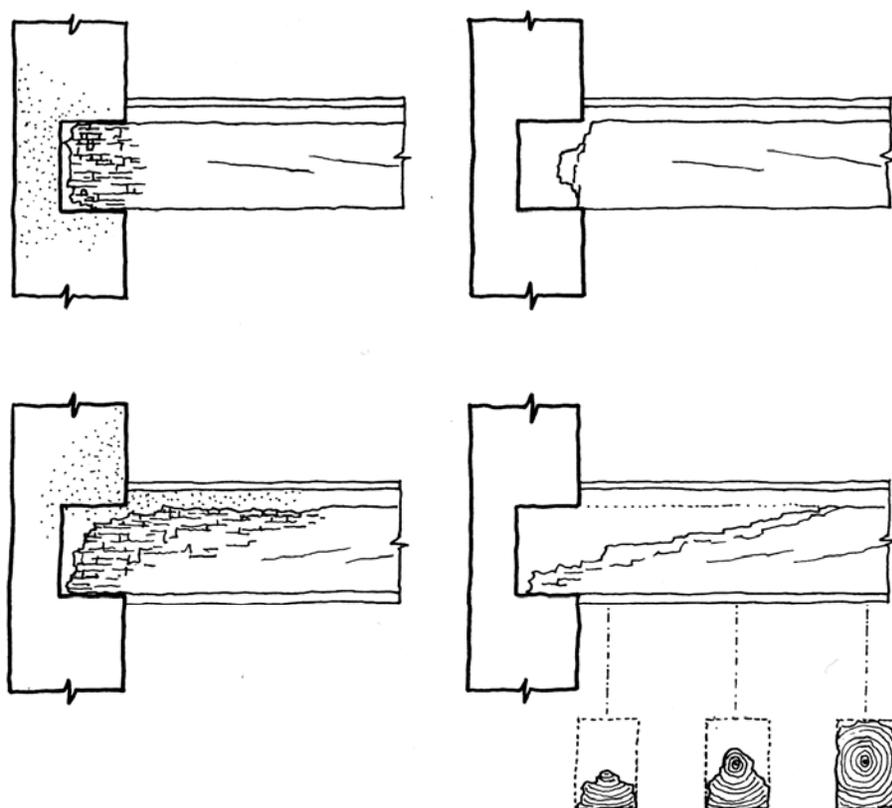


Figura 3.1 Efecto de los hongos de pudrición en cabezas de vigas de forjado. Arriba la humedad procedente del muro ha permitido la pudrición dejando una parte degradada y una parte sana claramente diferenciadas. Abajo, la humedad procede del muro y de la capa superior del forjado por lo que los daños dejan un perfil «apuntado» con pérdida de sección variable.

3.2.2 Insectos de ciclo larvario

Los insectos de ciclo larvario producen los daños durante la fase de larva en la que se alimentan de la madera realizando galerías en su interior. De manera general, su actuación se limita a la parte de albura de la pieza, y rara vez se introducen en el duramen. Cuando se observan orificios de salida en la superficie de las piezas se puede afirmar que al menos ha vivido en su interior una generación de los insectos. Si el número de agujeros es muy elevado se puede esperar que hayan sido más de una las generaciones que han actuado.

Líctidos:

Estos insectos sólo atacan a la albura de algunas especies de frondosas, como ya se ha comentado anteriormente. Es característico de los pavimentos de madera de roble (tarimas y parquet). Su extensión afecta al pavimento de un local o a las habitaciones de una misma vivienda. Generalmente, la infestación de la madera se origina durante el almacenamiento.

Si la madera está compuesta de albura en su mayor parte, los daños pueden llegar a la destrucción total del pavimento en un plazo corto de tiempo debido a la duración breve de su ciclo de vida, lo que permite una sucesión rápida de generaciones y reinfestación de la madera.

Anóbidos:

El ataque de anóbidos suele extenderse en locales del edificio y generalmente donde el contenido de humedad es algo elevado. No es habitual que el ataque se extienda a todo el edificio. Normalmente aparecen ligados a locales del edificio que mantienen una humedad relativa del aire elevada, por ejemplo en los sótanos. También es muy frecuente que estén ligados a pudriciones previas, ya que la acción del hongo facilita la digestión de la madera para el anóbido.

Los daños originados por este insecto no suelen ser de mucha gravedad para la estructura debido a que las galerías que practican son de pequeño diámetro (2 a 4 mm) y se alimentan de la albura de la madera. Por tanto, la parte deteriorada de la pieza sólo puede afectar a la zona de albura perimetral. Si existe pudrición su actuación se puede extender también al duramen. Si la pieza carece de albura, como puede ocurrir en un entablado, la destrucción llega a ser prácticamente completa.

Son causantes de daños típicos en el mobiliario y en los entablados colocados en los entrevigados, que pueden ser destruidos por completo si carecen de duramen. En las piezas de gruesa sección estructurales aparecen con frecuencia en las zonas de apoyo con previa pudrición y se extienden hasta un metro de distancia aproximadamente del apoyo, figura 3.2.

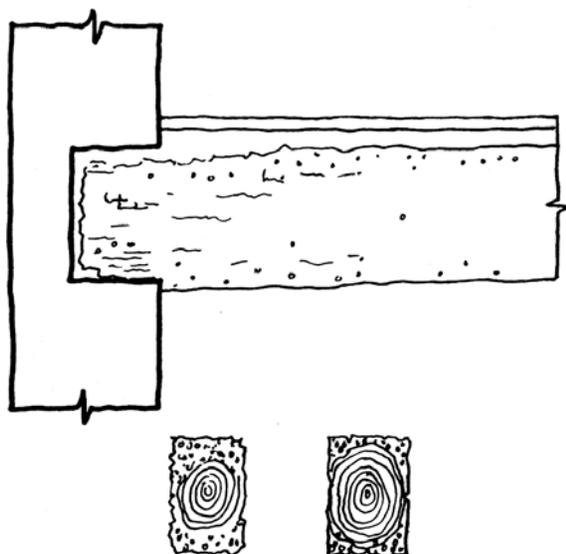


Figura 3.2 Daños originados por anóbidos en una cabeza de una viga. Con frecuencia acompañan pudriciones previas. Generalmente se extienden perdiendo intensidad hasta una distancia del orden de 1 m desde el muro.

Curculiónidos:

Sus efectos son similares a los de los anóbidos pero tienen una característica específica que consiste en que siempre están ligados a una pudrición anterior. Esto es debido a que los curculiónidos se alimentan fundamentalmente de los hongos de pudrición o de la madera ya degradada por los hongos, ya que no poseen enzimas capaces de descomponer la celulosa.

Cerambícidos:

El ataque de los insectos pertenecientes a la familia de los cerambícidos puede presentar una extensión algo mayor que la habitual en los ataques de anóbidos. Actúan en madera seca y no se introducen en zonas de madera con contenido de humedad elevado. Por este motivo es frecuente encontrar ataques en espacios bajo cubierta que se encuentran ventilados y secos.

Sólo se alimentan de la albura de la pieza. Las galerías practicadas en la madera son de un diámetro del orden de 6 mm, por lo que los daños en las piezas llegan a presentar cierta gravedad siempre que la proporción de albura en la sección sea grande y que el ataque tenga

antigüedad suficiente. Orientativamente, para que sus efectos sean significativos deberán haber transcurrido al menos una generación en el interior; es decir, deben estar actuando al menos, durante 7 o 10 años.

El efecto que producen en las piezas estructurales es la debilitación de la sección por efecto de la perforación de las galerías. Como generalmente en una sección enteriza la madera de duramen se encuentra en el interior, la pérdida de sección se produce en las zonas externas. Estos daños se extienden longitudinalmente a lo largo de la pieza con uniformidad, dependiendo del corte de la pieza, figura 3.3.

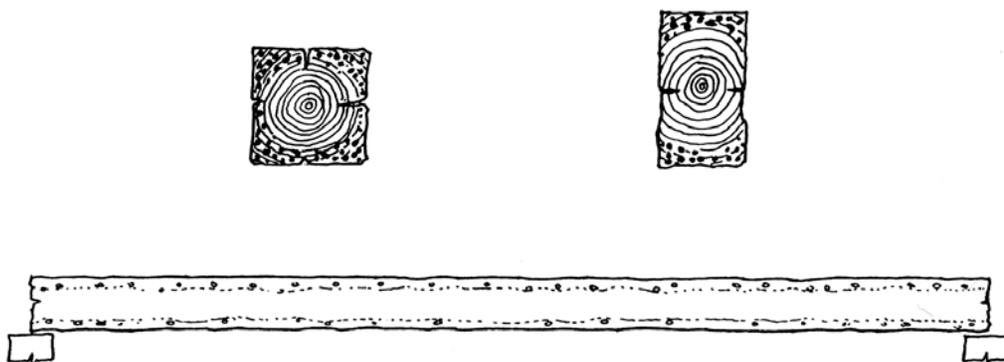


Figura 3.3 Daños originados por cerambícidos. Afectan a la albura de la pieza. En vigas es frecuente que se extiendan longitudinalmente por la zona de albura.

Estimación de la pérdida de capacidad portante:

Como se trató en la descripción de los insectos xilófagos de ciclo larvario su actividad dentro de la pieza se limita a la zona de albura. La inspección con un punzón o herramienta similar permite conocer la profundidad afectada en la sección. Normalmente las zonas con mayor profundidad corresponden a las aristas de la sección, ya que es donde más cantidad de albura puede existir. Tampoco inciden de igual manera en todas las caras de la pieza.

Un criterio conservador para estimar su efecto consiste en descontar la profundidad afectada a las dimensiones reales de la sección de la pieza. Como el deterioro de la zona afectada no es completo, ya que los insectos realizan galerías dejando zonas de madera intacta, puede descontarse una profundidad menor, en función de la intensidad del ataque.

3.2.3 Insectos sociales: termitas

La extensión de un ataque de termitas puede llegar a ser muy grande, si las condiciones de humedad lo permiten. Normalmente la forma de avance del ataque es piramidal con la base en el suelo; los daños se inician en la madera que se encuentra en la planta baja y tiende a disminuir según se asciende hacia las plantas altas. Es frecuente que la subida a las plantas superiores se realice exclusivamente afectando al entorno de una bajante que facilite humedades por fugas. En caso de que la infestación tenga su origen en edificios contiguos esta forma de avance descrita puede variar sensiblemente.

En relación a la intensidad de los daños producidos debe tenerse en cuenta que las termitas se alimentan principalmente de la albura de la madera de la mayoría de las especies coníferas y frondosas. La destrucción de la parte de albura en estados avanzados llega a ser prácticamente

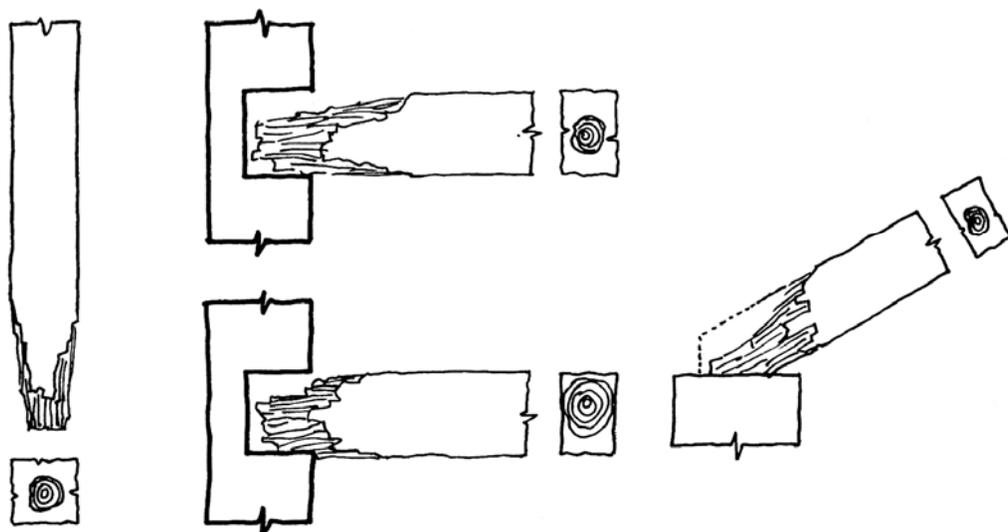


Figura 3.4 Daños originados por las termitas en estados iniciales del ataque (pilar, vigas de forjado y par de cubierta). El perfil de la pieza queda «apuntado» por un ataque de profundidad variable que respeta el duramen.

completa. Es frecuente que algunas piezas queden internamente destruidas en su totalidad, al lado de otras piezas que se encuentran intactas. Esto es debido a que las termitas han seguido una ruta sólo en esa pieza y no modifican su estrategia hasta que terminan de explotar esa fuente de alimentación.

En cierta manera la evaluación de los daños en las zonas afectadas por las termitas debe hacerse inspeccionando cada una de las piezas de la estructura, debido a la gran variabilidad que puede darse.

En estados de ataques poco avanzados pueden encontrarse daños en las cabezas de las piezas que apoyan sobre los muros, como las vigueta de forjado y los pares de cubierta, con el mayor deterioro al principio disminuyendo su efecto hacia el vano de la pieza, figura 3.4. La estimación de la pérdida de capacidad portante puede realizarse de forma similar al caso de los insectos de ciclo larvario. En muchos casos como se ha comentado anteriormente, la profundidad e intensidad del daño en la pieza es tan elevada que no tiene capacidad residual.

3.2.4 Xilófagos marinos

Los daños provocados por los xilófagos marinos y la evaluación de sus efectos no es objeto principal de esta publicación que está enfocada a la edificación. No obstante se pueden dar las ideas básicas para el caso de construcciones en contacto con el agua de mar.

Dentro de los xilófagos marinos se puede diferenciar entre las dos categorías siguientes: moluscos (en España principalmente el género *Teredo*) y los crustáceos (principalmente el género *Limnoria*).

Los orificios de entrada de los teredos tienen un diámetro pequeño, del orden de 1 a 3 mm y ya en el interior práctica galerías que según avanza su ciclo de vida aumentan de diámetro. Por

esta razón, los daños internos pueden ser mucho mayores que lo que manifiesta la superficie de la pieza. Las galerías se realizan generalmente en dirección paralela a la fibra aunque pueden girar para evitar obstáculos como pueden ser los nudos, en todo caso sin salir a la superficie.

El ataque de los crustáceos es muy diferente. Los ataques del género *limnoria* son superficiales. Actúan conjuntamente un número muy elevado de individuos realizando galerías finas y de reducida longitud (1 a 2 mm) justo debajo de la superficie de la madera. Con el impacto del agua sobre la superficie se rompen los delgados tabiques de separación entre galerías y con la superficie, provocando una pérdida de sección. Los crustáceos vuelven a realizar galerías en la superficie de la madera, haciendo que el daño avance al interior. El avance del daño producido por una infestación grave de *limnoria* se ha estimado en unos 12,5 mm al año. Es decir, en un pilote de sección circular representa una pérdida de diámetro de 25 mm al año (Richards, 1982).

3.3 Evaluación de la capacidad resistente de la estructura

3.3.1 Introducción

En principio, la estimación de la capacidad portante no debería diferir del proceso por el que se define la resistencia de las piezas de madera nuevas. Conociendo la especie de madera y su calidad, es inmediata la asignación de una determinada clase resistente (con los valores de las propiedades mecánicas correspondientes).

Sin embargo, en la práctica esta labor es más complicada debido al hecho de que la estructura ya está colocada y no siempre es fácil de inspeccionar. Resulta sencilla la identificación de la especie, pero dudosa la determinación de la calidad; las piezas suelen estar parcialmente ocultas lo que dificulta la inspección visual y además las normas de clasificación actuales están pensadas para escuadrías mucho más delgadas que las utilizadas habitualmente en edificios antiguos.

Pero no todo son inconvenientes; normalmente el edificio a inspeccionar tiene una edad suficientemente elevada, como para que su historial de cargas, a lo largo de su vida, represente una prueba de carga de gran interés y fiabilidad. El tiempo depura, con paciencia, todos los errores constructivos y estructurales que pudieran haber existido. La estructura que nos llega presenta una garantía de su validez, sin entrar a considerar los posibles daños de origen biótico. Pero el problema vuelve a aparecer cuando aplicamos la normativa actual de clasificación y de acciones a la estructura y se constata que no es válida, en clara contradicción con la realidad.

El enfoque de la clasificación estructural de la madera para el proyecto de una obra nueva pretende definir el dimensionado de la estructura contando con un material nuevo a introducir en la obra. La utilización de los valores característicos de las propiedades mecánicas del material limitan la probabilidad de fallo a valores considerados razonables. Por el contrario, en una estructura existente sería posible, al menos en teoría, conocer con precisión la calidad y por tanto la resistencia de las piezas; es decir, la incertidumbre en el conocimiento del material desaparecería por lo que parece lógico que el planteamiento para la evaluación de la capacidad portante de la estructura difiera respecto al caso del proyecto de obra nueva.

En este apartado se exponen los pasos necesarios para la determinación de la capacidad resistente teniendo en cuenta estas particularidades. Evidentemente, este trabajo de reconocimiento se realizará únicamente en el caso de que los daños debidos a los organismos xilófagos no sean tan graves como para descartar la estructura.

3.3.2 Metodología basada en la clasificación visual

a) Identificación de la especie de madera

La resistencia de una pieza de madera depende de varios factores, entre los que, lógicamente, se encuentra la especie de madera de la que está constituida. En construcciones antiguas es frecuente encontrar principalmente las siguientes especies:

Coníferas: pino silvestre, pino pinaster, pino laricio, pino canario.

Fronchosas: roble, castaño, olmo, haya, chopo.

Las coníferas están presentes, prácticamente en toda España (salvo el pino canario), mientras que las frondosas como el castaño son frecuentes en Galicia, el roble en el País Vasco y Navarra, el chopo en Navarra.

A simple vista o con lupa de 10 aumentos, es posible identificar alguna de las especies frondosas, pero en el caso de las coníferas sólo es posible identificarla como tal. Para la determinación de la especie en los casos en los que no sea posible su identificación con lupa, es preciso recurrir a un laboratorio especializado que realice preparaciones microscópicas a partir de muestras de madera, con forma de prisma de dimensiones mínimas aproximadas de 2 x 2 x 4 cm.

En la práctica las especies de pino silvestre, pinaster y laricio, para una misma calidad presentan propiedades mecánicas similares, lo que simplifica en parte el problema. Las variaciones de resistencia debidas a la calidad de la madera son de un orden muy superior a la variación que puede existir en función de la especie.

b) Calidad de la madera

La calidad de la madera desde el punto de vista resistente se evalúa en función de la cantidad y tamaño de los defectos presentes en las piezas (nudos, fendas, desviación de la fibra, etc). Esta evaluación se efectúa mediante una inspección visual de acuerdo con una norma de clasificación y aquí radica uno de los problemas antes comentados. Las normas de clasificación resistente que se emplean en la actualidad están, generalmente, pensadas para escuadrías que pueden encontrarse en el mercado. Estas escuadrías suelen abarcar gruesos de 35 a 100 mm y a un canto máximo de unos 300 mm. Si bien es cierto que algunas normas de clasificación incluyen o, al menos no descartan, las grandes escuadrías no existe suficiente experiencia en la asignación a una clase resistente. Un ejemplo claro de la dificultad de aplicación de estas reglas de clasificación se encuentra en la limitación de las fendas en la madera estructural: generalmente la aplicación de este criterio a la madera de grandes escuadrías provoca el rechazo de las piezas, debido a la gran magnitud de las fendas.

Este inconveniente detectado en la aplicación de las normas de clasificación actuales a la madera de gran escuadría ha sido estudiado en Francia, deduciendo la necesidad de modificar las especificaciones de la norma para su empleo en grandes escuadrías (Salomón, 2000).

Suponiendo que se pudiera salvar este inconveniente, una vez que se conoce la especie y la calidad, se puede asignar a las piezas una determinada clase resistente. Por tanto, es recomendable actuar con prudencia o de manera conservadora al emplear este procedimiento. Incluso es normal que dentro de un mismo local aparezcan calidades diferentes, lo cual hace más difícil la toma de decisiones.

En el Anexo B «Normas de clasificación» se resume el contenido de las principales normas europeas que podrían ser utilizadas para la clasificación estructural de las piezas. En él se realiza una comparación entre ellas.

En el Anexo D «Reglas de clasificación visual de madera de gran escuadría» se exponen las reglas de clasificación propuestas para las especies o grupos de especies siguientes: coníferas, roble y chopo; y además la madera de conífera en rollizo. El objeto de este anexo es incluir aquellas que parecen más adecuadas para la clasificación o, en algunos casos, se proponen por ser las únicas en su campo de aplicación.

Del análisis de estos procedimientos de clasificación se puede deducir que las líneas propuestas por la norma DIN 4074 para la clasificación visual de la madera son las que aportan unos resultados más ajustados a las características de la madera de gran escuadría. Basándose en

estos resultados se pueden establecer tres calidades para la madera de coníferas y una asignación aproximada de las clases resistentes:

Calidad S13: Clase resistente C18 a C22.

Calidad S10: Clase resistente C16.

Calidad S7: Clase resistente C14.

Esta norma, para la madera de pino silvestre y la píceas en madera nueva asigna las clases resistentes C30, C24 y C16, para las calidades S13, S10 y S7, respectivamente. Como puede comprobarse las clases propuestas para madera antigua son más bajas, dada la gran dispersión que muestran las poblaciones de piezas que se encuentran en estas obras.

Para la madera de frondosa y en particular para el roble la única referencia existente es el anexo de la norma francesa NF B 52-001, en la que se indican, con carácter informativo, dos calidades:

Calidad 1: Clase resistente D35

Calidad 2: Clase resistente D30

La madera de chopo según la clasificación de la norma francesa NF B 52-001 (y sólo para determinados clones) define dos calidades que corresponden a las siguientes clases resistentes:

Calidad ST-II: Clase resistente C24

Calidad ST-III: Clases resistente C18

En obras antiguas la madera de chopo pertenecerá probablemente a las especies *Populus alba* o *Populus nigra*, y no a los clones actuales. Al no existir un conocimiento comparativo de las propiedades mecánicas de las especies citadas con respecto a los clones, será prudente no adoptar clases superiores a la C18 para el chopo.

Finalmente, la madera de coníferas en forma de rollizo podría clasificarse de acuerdo con la norma DIN 4074, parte 2 con las tres calidades siguientes:

Calidad 1: Clase resistente C30

Calidad 2: Clase resistente C24

Calidad 3: Clase resistente C16

Las investigaciones recientes sobre el empleo estructural de la madera de rollizo (Ranta-Maunus, 1999), proponen unas reglas de clasificación, también incluidas en el citado anexo, con dos calidades:

Calidad A: Clase resistente C30 (Píceas abies de Finlandia y Pino silvestre de Finlandia y Reino Unido).

Calidad B: Clase resistente C18 (Pino silvestre de Finlandia).

3.3.3 Otros métodos de evaluación de la capacidad portante de la estructura

A la vista de los resultados poco alentadores de la clasificación visual para el objetivo práctico de evaluar la capacidad resistente de la madera antigua puesta en obra se pueden plantear otros métodos no destructivos de más fácil aplicación que en principio algunos de ellos presentaran resultados similares o mejores. Estos métodos son los siguientes:

Determinación del módulo de elasticidad mecánico:

Consiste en realizar un ensayo no destructivo de la pieza mediante la aplicación de una carga y la determinación de la flecha en obra. Requiere un dispositivo complejo para su ejecución, pero puede plantearse algún sistema portátil. Las correlaciones que se obtienen entre módulo de elasticidad y resistencia son las más elevadas de los métodos no destructivos. A título informativo en madera de conífera se pueden establecer los siguientes rangos de módulo de elasticidad y sus correspondientes clases resistentes:

$$E_{\text{bajo}} = 4.600 \text{ a } 9.000 \text{ N/mm}^2: \text{Clase resistente C14 a C16}$$

$$E_{\text{medio}} = 9.000 \text{ a } 11.000 \text{ N/mm}^2: \text{Clase resistente C18 a C22}$$

$$E_{\text{alto}} = 11.000 \text{ a } 13.000 \text{ N/mm}^2: \text{Clase resistente C24 a C27}$$

Mediciones con ultrasonidos:

La medición de la velocidad de propagación de los ultrasonidos se efectúa con facilidad en obra y permite conocer el módulo de elasticidad dinámico si se determina la densidad de la madera. Como esto último es difícil en la práctica en madera colocada en obra, se puede plantear la relación entre velocidad de transmisión y capacidad portante con los rangos siguientes, de manera aproximada:

$$V_{\text{baja}} = 4.100 \text{ a } 4.900 \text{ m/s}: \text{Clase resistente C14 a C16}$$

$$V_{\text{meda}} = 4.900 \text{ a } 5.100 \text{ m/s}: \text{Clase resistente C18}$$

$$V_{\text{alta}} = 5.100 \text{ a } 5.400 \text{ m/s}: \text{Clase resistente C22}$$

En estudios experimentales realizados con 341 piezas de píceas se proponían los siguientes intervalos de velocidad (Sandoz 1989) para establecer tres calidades por ultrasonidos y sus correspondientes módulos de elasticidad y resistencias características a flexión:

$v \leq 5.250 \text{ m/s}$:	$E = 10.500 \text{ N/mm}^2$;	$F = 22,7 \text{ N/mm}^2$ (aprox. C22)
$5.250 \text{ m/s} < v \leq 5.600 \text{ m/s}$:	$E = 12.450 \text{ N/mm}^2$;	$F = 30,3 \text{ N/mm}^2$ (aprox. C30)
$v > 5.600 \text{ m/s}$:	$E = 14.100 \text{ N/mm}^2$;	$F = 38,4 \text{ N/mm}^2$ (aprox. C35)

Se trataba de madera nueva con escuadrías de $100 \times 140 \text{ mm}$ hasta $100 \times 220 \text{ mm}$. Los valores de las propiedades mecánicas asignadas en la propuesta previa son más conservadores que estos últimos.

Anexos relacionados con este capítulo:

Anexo B: Normas de clasificación.

Anexo C: Propiedades mecánicas de la madera asignadas en la antigüedad.

Anexo D: Reglas de clasificación visual para madera de gran escuadría.

Anexo E: Cálculo de estructuras de madera.

Referencias bibliográficas:

Argüelles, R., Arriaga, F y Martínez, J.J. (2000). Estructuras de madera. Diseño y cálculo. AITIM, Madrid, 663 páginas.

ASCE- American Society of Civil Engineers (1982). Evaluation, Maintenance and upgrading of wood structures. ASCE, N.Y..

Attar-Hassan, G. (1976). Aging effect on eastern white pine. Bull. Assn. Pres. Tech. 8(3): 64-73.

Bonamini, G.. (1996). Restoring timber structures - Inspection and evaluation. Timber engineering Step 2. Centrum Hout, Holanda.

Borgin, K., Parameswaran, N.Y Liese, W. (1975). The effects of aging on the ultrastructure of wood. Wood Sci. Technol. 9(2): 87-98.

Browne, F.L. (1960). Wood siding left to weather naturally. So. Lbrmn. Págs. 141-143.

Cristelli, F. (1986). Caratteristiche fisico-meccaniche di legni antichi variamente degradati ed influenza dell'impregnazione con una resina sintetica. Dissertation n° 112. Università degli Studi di Firenze, Facoltà di Scienze Agrarie e Forestali, Corso di Laurea in Scienze Forestali, Florence, Italy.

Ehlbeck, J.Y Görlacher, R. (1987). Erste Ergebnisse von Festigkeitsuntersuchungsbereich 315, Universität Karlsruhe, Jahrbuch 1987, Ernst & Sohn, Berlin, págs. 235-247.

Feist, W.C. (1982). Weathering of wood in structural uses. Structural uses of wood in adverse environments. Ed. Robert W. Meyer and Robert M. Kellog. Society of Wood Science and Technology. Pp. 156-178.

Feist, W.C. y Mraz, E.A. (1978). Comparison of outdoor and accelerated weathering of unprotected softwoods. Forest Products Journal 28(3):38-42.

Hartl, H. (1995). Behaviour of timber and wood-based materials in fire. STEPI, Timber Engineering (A13). Centrum Hout, Holanda.

Hartl, H. (1995). Fire resistance of timber members. STEPI, Timber Engineering (B17). Centrum Hout, Holanda.

Jessome, A.P. (1965). Strength tests on specimens from wood trusses in service for 97 years. Report of the Forest Products Laboratory, Dept. Of Forestry, Ottawa, Canada.

- Kohara, J. (1953).** Studies of the durability of wood. V. Shrinkage and swelling of old timbers, about 300-1.300 years old. *Scient. Rep. Saikyo Univ.* 5:81-88 (Kyoto).
- Kohara, J. (1954).** Studies of the durability of wood. VI. The change of mechanical properties of old timbers. *Scient. Rep. Saikyo Univ.* 6:164-174 (Kyoto).
- Kühne, H., U. Leukens, J. Sell t O. Wälchli (1972).** Outdoor weathering tests on wood and exterior wood finishes. *Eidgenössische Materialprüfungs und Versuchsanstalt (EMPA) Dübendorf, Bericht 198, pp.1-51.*
- Kuipers, J. (1986).** Effect of age and/or load on timber strength. International Council for Building Research Studies and Documentation, Working Commission W18 - Timber Structures, XIX Meeting September 1986, Florence, Italy.
- Ranta-Maunus, A. et al. (1999).** Round small-diameter timber for construction. Final report of project FAIR CT 95-0091. Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 383.
- Richards, B.R. (1982).** Marine borers. Structural uses of wood in adverse environments. Ed. Robert W. Meyer and Robert M. Kellog. *Society of Wood Science and Technology.* Pp. 265-273.
- Rug, W.Y Seeman, A. (1991).** Strength of old timber. *Building Research and Information*, 19(1): 31-37.
- Salomon, B. (2000).** Charpente traditionnelle: qualité et classement des bois de forte section. *CTBA Info n° 85.* Pp.9-14.
- Sandoz, J.L. (1989).** Grading of construction timber by ultrasound. *Wood Science and Technology.* 23:95-108.
- Suter, G.T. (1982).** Evaluation of in situ Strength of aged timber beams. Ed. Robert W. Meyer and Robert M. Kellog. *Society of Wood Science and Technology.* Pp. 472-479.

Normativa:

- DIN 4074. Parte 1 (1989).** Clasificación estructural de la madera aserrada de conífera.
- DIN 4074. Parte 2 (1958).** Especificaciones de calidad para la madera de rollizo (coníferas).
- NF B52-001 (1998).** Règles d'utilisation du bois dans les constructions. Classement visuel pour l'emploi en structure des principales essences résineuses et feuillues.
- Normes CEE recommandées pour le classement des sciages résineux selon la résistance et sur les aboutages à entures multiples pour les sciages résineux de construction. *Bulletin du bois pour l'Europe.* Vol XXXIV, Sup. 16. Genève, nov. 1982.
- NS-INSTA 142 (1997).** Nordic visual strength grading rules for timber.

UNE 56.544 «Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural: madera de coníferas»

UNE ENV 1995-1-2. Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-2: Reglas generales - Cálculo en situación de incendio.

prEN 14081-1 (Draft dec. 2000). Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section. Part 1: General requirements.

Capítulo 4

Medidas de carácter constructivo

4.1 Introducción

Para disminuir el riesgo de deterioro de la madera pueden aplicarse tres tipos de medidas de protección: las que afectan al diseño arquitectónico y constructivo, la elección del material adecuado y la protección artificial. Hasta bien entrado el siglo XIX únicamente se empleaban los dos primeros sistemas y su eficacia queda demostrada por la pervivencia de numerosas construcciones de la antigüedad. La protección artificial, que aparece con el desarrollo de la química y de los métodos de tratamiento, permite aumentar la vida de servicio de las piezas de madera en situaciones de elevado riesgo. Las importantes mejoras que aportan los tratamientos artificiales pueden conducir al olvido de las medidas de protección constructiva y de elección del material; esto sería un error ya que nunca deberían dejarse de aplicar las medidas de protección pasiva.

En una construcción antigua los defectos de diseño constructivo, que pudieran haberse cometido, difícilmente llegan a nuestros días debido a una lógica depuración con el tiempo. El defecto desencadena una patología que provoca su corrección o destrucción. Sin embargo, los defectos que son adquiridos durante la vida del edificio, generalmente por falta de mantenimiento, generan humedades en la construcción que facilitan la actuación de los agentes xilófagos. En capítulos anteriores se ha descrito la fuerte relación que existe entre la humedad y los hongos de pudrición, las termitas y parte de los insectos xilófagos de ciclo larvario.

La correcta solución de las distintas fuentes de humedad que se pueden presentar en un edificio es una condición necesaria, y en muchos casos suficiente, para garantizar la pervivencia de la estructura de madera. El origen de las humedades que desencadenan patologías en las piezas de madera se puede resumir en los siguientes problemas:

Instalaciones sanitarias defectuosas

Normalmente las instalaciones sanitarias de las edificaciones antiguas se han introducido con posterioridad al origen del edificio y con soluciones constructivas en las que una fuga leve de agua es fácilmente absorbida por los muros de fábrica o el forjado. La reparación o renovación de las conducciones de agua y bajantes debería realizarse con diseños más adecuados (independencia del muro o forjado), de manera que se evite la posible acumulación del agua en la masa de la obra gruesa.

Red de saneamiento horizontal

Las fugas en los albañales constituyen una fuente frecuente de humedad que afecta a los muros de la planta baja. La renovación de la red de saneamiento es algo más compleja que la anterior, pero tampoco presenta problemas de difícil solución.

Humedades procedentes del terreno

El proceso de envejecimiento de los muros de fábrica junto a su carácter poroso facilita la ascensión de las humedades del terreno por capilaridad. Constituye uno de los tipos de humedad más difíciles de reparar. Las soluciones se pueden agrupar en los tres grupos siguientes: drenajes, barreras impermeables y ventilación.

Humedades procedentes de la cubierta

La falta de mantenimiento de la cubierta se traduce en fallos de la impermeabilización con aportes continuados de humedad a las piezas de madera. Dentro de las actuaciones de

mantenimiento con carácter periódico, se encuentra el retejado de la cubierta y la limpieza o sustitución de los canalones y bajantes de pluviales.

Humedades en apoyos en muros de fachada

Existe una típica patología de las zonas de apoyo de las vigas en el muro de fachada. El agua procedente de la lluvia es recogida en parte por la fachada, y de manera más fácil cuando existen repisas de balcones o cornisas. Las piezas de madera que apoyan en el muro de fachada pueden alcanzar contenidos de humedad peligrosos, aunque sea sólo en determinadas épocas del año, y desencadenar una pudrición.

Una buena práctica es dejar ventilado el apoyo de la viga para evitar la elevación del contenido de humedad de la madera. Pero esta medida es difícil de adoptar en la práctica.

Como puede esperarse las medidas preventivas están relacionadas directamente con la humedad. Cuando se modifique la configuración de la construcción y se introduzcan piezas de madera nueva, deberán tenerse en cuenta las recomendaciones constructivas siguientes, para acercarse en lo posible a su cumplimiento:

- Mantenimiento de una separación al suelo de las piezas que arrancan de planta baja.
- Ventilación y separación entre madera y fábrica en las piezas que entran en los muros.
- Colocación de la madera con el contenido de humedad lo más cercano al valor medio que tendrá por equilibrio higroscópico en el edificio. Generalmente, no se empleará madera con contenido de humedad superior al 20 %.
- La estructura de madera de la cubierta debe comenzar donde ha terminado la coronación del muro de fábrica, evitando que las piezas queden rodeadas por la fábrica.

Todas estas medidas se desarrollan con mayor amplitud a lo largo de este capítulo.

4.2 Las humedades procedentes del suelo

La humedad del suelo se debe al propio nivel freático que exista, pero muchas veces la humedad proviene de pérdidas de la red de saneamiento horizontal (alcantarillado o albañales). Lógicamente, la primera medida es la revisión y en su caso renovación de la red de saneamiento. Si las humedades ascienden por capilaridad existen varios sistemas para su eliminación, que no son objeto de esta publicación, pero que se citan a continuación como información general:

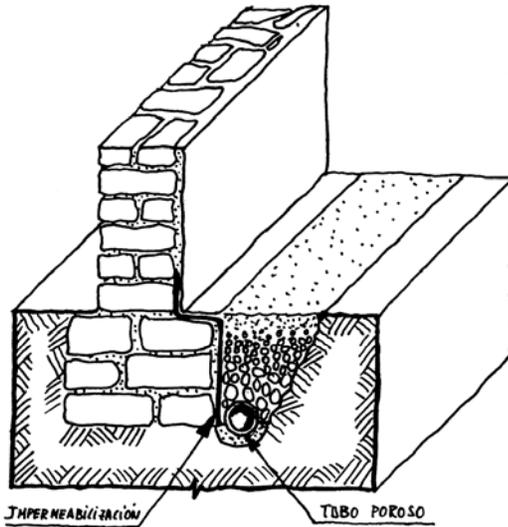


Figura 4.1 Zanja de drenaje.

Drenaje

El drenaje sigue como estrategia la reducción del nivel freático en el suelo. Existen varias posibilidades cuya adecuación será función de las condiciones particulares de la edificación.

Una zanja de drenaje adosada a los muros exteriores de la edificación con la necesaria recogida del agua en un tubo poroso conectado a la red de saneamiento, que se dispone a unos 15 cm por debajo de la base. El material drenante se dispone colocando el más grueso en la base y según se sube en altura se coloca el material más fino. Normalmente se aprovecha para realizar una impermeabilización de la cara exterior del muro enterrado o de la cimentación, figura 4.1.

Las ataguías constituyen barreras contra las corrientes freáticas que se sitúan separadas de la base del muro y con una profundidad en función de la cimentación del edificio y de la presión del agua. Pueden estar formadas por tablestacados de madera o de piezas metálicas o por

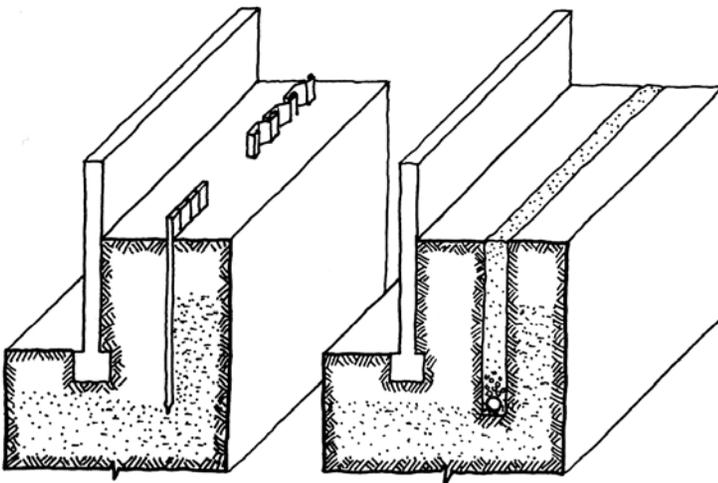


Figura 4.2 Ataguía mediante tablestacado o zanja drenante.

zanjas rellenas de material suelto con tubo poroso para la recogida del agua y su evacuación a la red de saneamiento, figura 4.2.

Otra posibilidad es la ejecución de pozos drenantes que se disponen en función de la planta del edificio y del nivel freático. Son pozos de cierta profundidad que recogen el agua y se bombea para conducirla a la red de

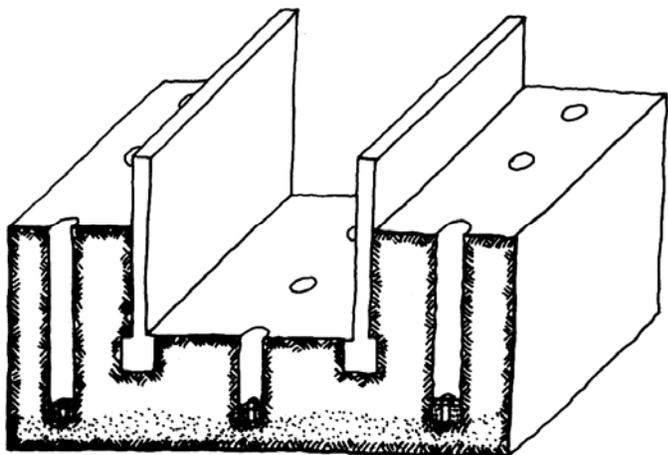


Figura 4.3 Pozos de drenaje.

agua que contiene sales y que atraviesa una membrana semipermeable mantiene diferentes concentraciones de sales a ambos lados de la misma y se origina una diferencia de potencial. En este caso el muro hace de membrana. Si se invierte la polaridad creando un diferencial de potencial se puede forzar el paso del agua desde el muro hasta el terreno. Para ello se disponen unas picas conductoras en el arranque del muro (ánodos) que se conectan mediante una cable conductor a otras picas clavadas (cátodos) en el suelo, figura 4.4. Hay sistemas que utilizan una conexión permanente a la red eléctrica y otros que aprovechan la diferencia de potencial creada entre el muro y el terreno, que constituyen una pila electrolítica. Presenta el inconveniente de que la humedad sigue presente en la base del muro y que la corrosión de los conductores obliga a un mantenimiento. Recientemente se está empleando el titanio para evitar esta desventaja.

Estos sistemas se denominan de electro-ósmosis. Cuando se añaden productos que taponan los capilares se denominan sistemas de electro-ósmosis-forésis.

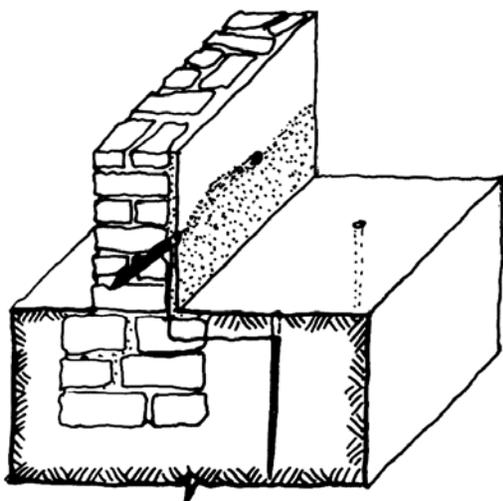


Figura 4.4 Drenaje eléctrico.

saneamiento. Su carácter puntual permite su colocación en el interior del edificio, lo que mejora su eficacia. El conjunto forma una red que logra disminuir el nivel del agua para evitar el contacto con la cimentación, figura 4.3. Su ejecución es sencilla, pero el funcionamiento en servicio se encarece.

Sistemas eléctricos

Se trata de un drenaje que utiliza la electricidad para contrarrestar las fuerzas de ascensión por capilaridad. El

Barreras impermeables físicas

En este caso se trata de interponer una barrera impermeable en el arranque del muro que interrumpa el paso de la humedad. Puede realizarse mediante la colocación de una barrera de material plástico, metálico o bituminoso o mediante la inyección de líquidos capaces de taponar los poros.

La lámina impermeable se introduce en la base del muro por bataches solapando los tramos consecutivos. Las láminas pueden ser de PVC o bituminosas y en el caso de las metálicas serán de materiales inoxidable-

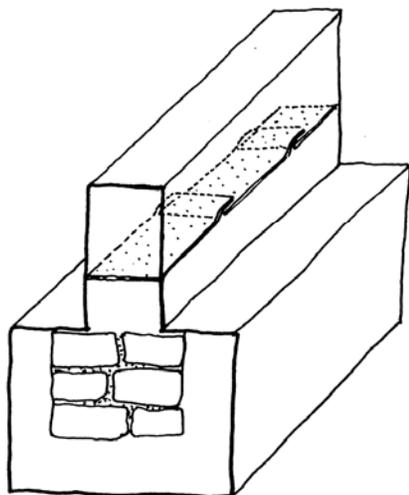


Figura 4.5 Barrera impermeable física.

repelente al agua. Estos sistemas tienen resultados eficaces siempre que se realicen con profesionalidad.

Algunos procedimientos consisten en la difusión lenta del producto mediante la realización de perforaciones en el muro a 15 cm de altura, con un diámetro de 22 mm sin llegar a atravesar el muro, y distanciadas a 15 cm. Se colocan difusores de celulosa prensada y la formulación se dispone en bolsas colgadas de perchas a un nivel superior conectadas a los difusores, figura 4.6.

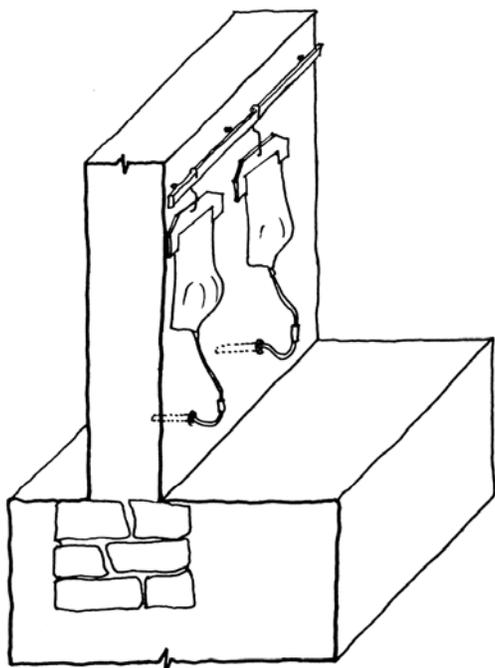


Figura 4.6 Hidrofugación en masa.

bles (acero inoxidable, cobre, aluminio, plomo), figura 4.5. Estos últimos resultan más adecuados cuando el muro debe transmitir cargas. En general el principal inconveniente que presenta este sistema es la necesidad de cortar el muro para la introducción de la barrera. No es recomendable para espesores de muro superiores a 40 cm.

Barreras impermeables químicas

El sistema de inyecciones consiste en la introducción, a través de taladros en el muro, de soluciones de productos químicos que mediante un proceso físico-químico consiguen la obstrucción de los poros utilizando productos mineralizadores (silicatos, siliconatos), o bien la hidrofugación de las paredes de los capilares mediante productos repelentes al agua. En el primer caso se forma una barrera impermeable y en el segundo una barrera

Aproximadamente en 24 horas el producto ha penetrado y constituye una barrera que impide el ascenso de la humedad en el muro. A continuación sólo hay que dejar secar el muro por evaporación.

Hace 40 años se comenzó a realizar barreras químicas en los muros utilizando polímeros silicónicos en base acuosa. Durante el proceso de polimerización se originan sales residuales que pueden dañar las superficies pintadas o los revestimientos de piedra. Desde hace unos 15 años se fabrican polímeros hidrofugantes que no producen estas sales residuales. Además, se emplean disolventes alifáticos o alcoholes.

Sifones atmosféricos

La estrategia que sigue este sistema es el aumento de la superficie de evaporación. Para ello se introducen en el muro unos tubos de cerámica porosa que tienen un diámetro interior de unos 3 cm y una profundidad de 15 a 30 cm. Su longitud es

función del espesor del muro, de manera que deben entrar una profundidad comprendida entre el 50 y el 75 % del grueso del mismo, figura 4.7. Normalmente se colocan tres sifones por metro lineal de muro, inclinados ligeramente hacia el exterior y a una altura del nivel del suelo de 15 a 20 cm. Existe una variante del sistema que incorpora unos electrodos de cobre para añadir un efecto de electro-ósmosis pasiva.

Presentan el inconveniente del aspecto estético desde el exterior y la formación de puentes térmicos. En la actualidad apenas se utilizan.

Revestimientos difusores

Se trata de la colocación de un revestimiento de elevada porosidad que facilita la evaporación de la humedad al ambiente. Para ello se utilizan morteros aplicados en varias capas (normalmente tres) cuya red capilar es mas fina en la capa exterior de manera que el agua se succiona y se facilita la evaporación.

Impermeabilización superficial

La simple impermeabilización superficial del muro no es ninguna solución en la mayoría de los casos. La humedad de capilaridad es un fenómeno físico en el que la tensión capilar debe equilibrarse con la presión atmosférica, para lo cual se precisa una determinada superficie del muro. Si se recurre a un simple producto que impermeabiliza la superficie del muro, la humedad seguirá ascendiendo hasta recuperar la superficie de evaporación.

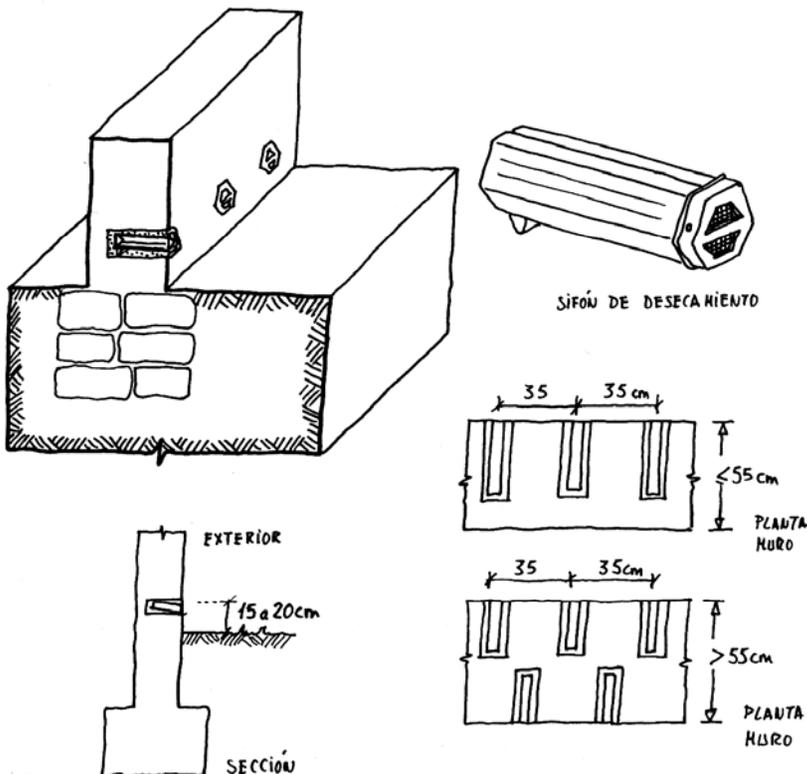


Figura 4.7 Sifones de desecación.

4.3 El arranque de la estructura desde el terreno

Las piezas de madera que transmiten las cargas a la cimentación siempre deben quedar separadas o aisladas del contacto con el suelo. Normalmente un pie derecho descansa sobre una basa de piedra que lo aísla del terreno. La separación entre el suelo y la madera debe tener un valor mínimo del orden de los 20 a 30 cm, sobre todo si la pieza queda expuesta al exterior como en los pies derechos de los soportales. El encuentro entre la basa y la testa de la pieza, puede hacerse con una caja y espiga, preferiblemente colocando la espiga en la piedra con el fin de evitar que el agua de lluvia se acumule en la cavidad interior. También la superficie de encuentro deberá permitir el desagüe hacia fuera, figura 4.8.

En las soluciones nuevas los apoyos de los pilares mantienen la misma filosofía, sustituyendo en ocasiones la basa de piedra por un dado de hormigón o por un herraje metálico. En estas soluciones, cuando la pieza queda al exterior se afinan los detalles hasta el punto de que el pie derecho sobresale con respecto a la pieza de apoyo para evitar que el agua se detenga en la repisa que existiría en caso contrario, figura 4.9.

4.4 Los apoyos de las vigas en los muros

El encuentro de las vigas con los muros siempre ha constituido un punto débil para la durabilidad de la estructura, debido a la posibilidad de retención de la humedad. En los tratados de construcción ha sido un motivo de atención constante.

El apoyo más sencillo desde el punto de vista estructural se realiza sobre el eje del muro y la cabeza de la viga queda encerrada y acodalada por la fábrica del muro. Para facilitar la misión de arriostamiento entre los muros, a veces en alguna de las vigas (normalmente una de cada cuatro y en

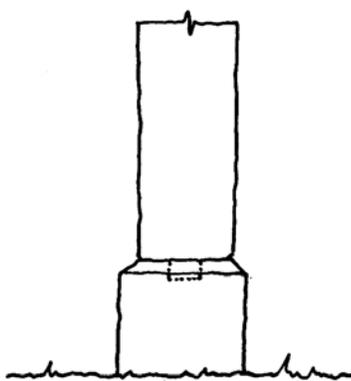


Figura 4.8 Basa de piedra de pie derecho.

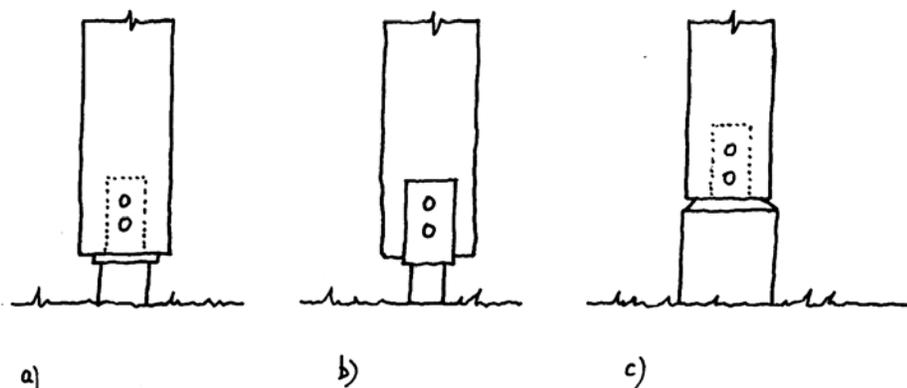


Figura 4.9 Arranque de pilares de madera: a) Base metálica retranqueada y oculta, b) Base metálica en forma de U, con el inconveniente de permitir cierta acumulación de agua en la base y c) Basa de hormigón con herraje oculto y retranqueo en la zona de contacto.

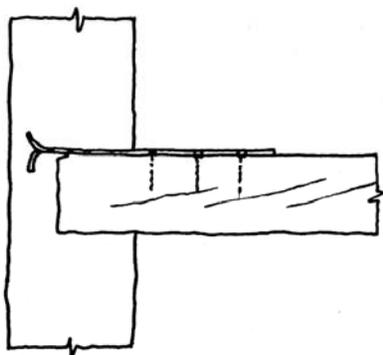


Figura 4.10 Herraje para el anclaje de la fachada al forjado.

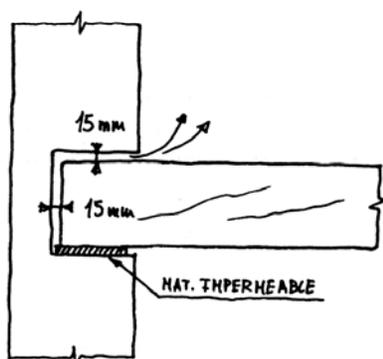
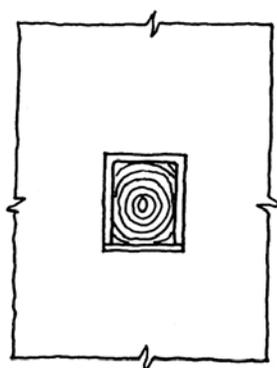


Figura 4.11 Apoyo de viga ventilado.



de asiento que sea impermeable (capa asfáltica, cartón embreado o chapa metálica) y mantener una separación de al menos 15 mm (en algunas fuentes se recomiendan 25 o 30 mm), en toda la superficie de la pieza que queda dentro de la fábrica, ventilada al interior del local, figura 4.11. Sin embargo esta solución es difícil de llevar

zonas que no coincidan con los huecos de fachada) se fija una grapa o gancho de hierro que se recibe en el muro, de tal forma que la viga puede llegar a trabajar como un tirante, figura 4.10.

La solución anterior con la cabeza encerrada en el material del muro presenta el inconveniente de un alto riesgo de acumulación de humedad, principalmente si son muros de fachada o están cerca del paso de instalaciones. Por este motivo en los manuales técnicos se presentan numerosas soluciones para ventilar la zona de apoyo, aunque luego en la práctica no sean tan frecuentes. El apoyo ideal debería contar con una pieza

a la práctica en muchas ocasiones, ya que el muro quedaría más debilitado a causa de las amplias cajas que se efectuarían, además de la propia dificultad de ejecución.

Una solución propuesta en la literatura sobre carpintería consiste en que la testa de la pieza deja una holgura con respecto a la fábrica y la ventilación se hace directamente al exterior mediante un orificio protegido con una rejilla, figura 4.12, o al interior mediante unos huecos en la parte superior de la viga, figura 4.13.

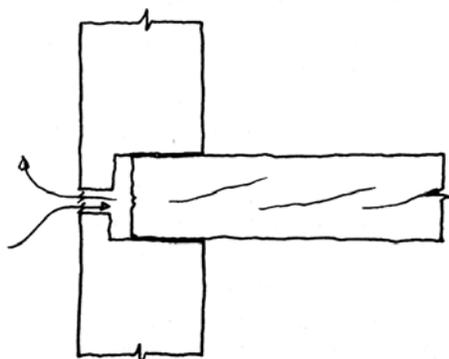


Figura 4.12 Apoyo de viga, ventilado al exterior

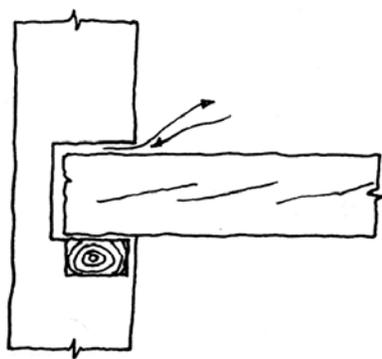


Figura 4.13 Apoyo de viga ventilado al interior.

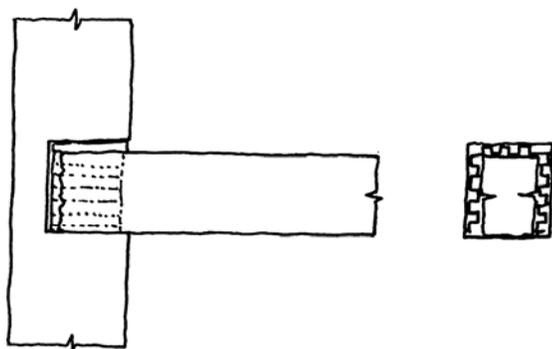


Figura 4.14 Aireación de un apoyo de una viga mediante la envoltura de chapa grecada.

Otra posibilidad para permitir la ventilación de la testa y a la vez acodalar la cabeza de la viga contra el muro es el empleo de chapas plegadas en forma de greca colocadas rodeando la cabeza de la viga, figura 4.14.

En un caso extremo llega a proponerse que el apoyo se realice fuera del muro a través de una carrera de madera que discurre pegada a la pared y que descansa sobre ménsulas o canchillos de piedra, figura 4.15.

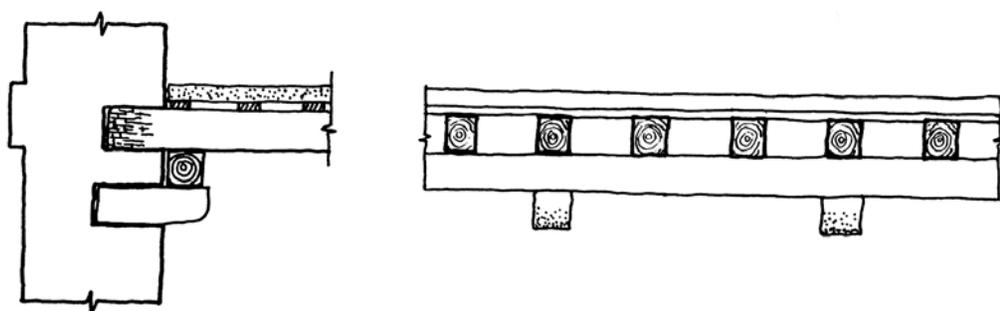


Figura 4.15 Refuerzo del apoyo perdido por pudrición de las cabezas, mediante una carrera de madera adosada al muro y apoyada en ménsulas de piedra.

Cuando el muro tiene gran espesor, puede recurrirse a una solución acertada que consiste en disminuir el grueso del muro formando un escalón donde apoya un durmiente de madera que recibe las cabezas de las viguetas, figura 4.16. En este caso quedan ventiladas las cabezas y en gran parte el durmiente.

Existen otras posibilidades de protección que pretenden más una impermeabilización que una ventilación. En algunos tratados de construcción (Barberot, E. 1921) se recomienda la aplicación de pintura de minio en la cabeza, embrear toda la superficie, rellenar con piedras secas el hueco holgado de la cabeza, etc; pero a pesar de todo, la falta de ventilación y el posible riesgo de que la madera tenga un contenido de humedad alto y cuya evacuación quede impedida por la impermeabilización, hacen que su eficacia sea dudosa.

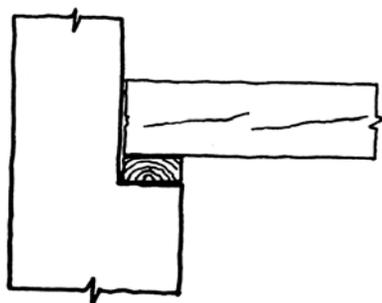


Figura 4.16 Apoyo de viga sobre escalón en el muro.

En la actualidad se siguen algunas prácticas para luchar contra este problema de la pudrición de las cabezas que siguen la estrategia anterior (impermeabilización de la zona de entrega de la cabeza). Un sistema consiste en envolver la cabeza con una lámina impermeable de plástico, que evita la entrada de humedad desde el

exterior, pero tiene el grave inconveniente que no deja pasar el vapor de agua del interior al exterior si la presión de vapor es mayor en el local. Esto podría corregirse con el empleo de una lámina transpirable. En otras ocasiones se han dejado planchas de espumas de poliestireno expandido en los laterales, cara superior y testa de la cabeza. Esta solución añade un aislamiento térmico que dificulta la condensación y sirve de acodamiento de la cabeza, pero no permite la ventilación en el caso de que la humedad alcance a la madera.

En el Tratado de Arquitectura Civil de Benito Bails (1796) (Navascués, P. 1983, Arriaga, F. 1998), se exponen dos sistemas para la construcción de los suelos. La práctica antigua utilizaba dos órdenes para la estructura: las piezas principales o vigas maestras que se disponían apoyadas sobre los muros a distancias del orden de 3,30 a 3,90 metros; y la estructura secundaria formada por las viguetas o maderos de suelo que salvan el vano entre vigas, figura 4.17c. La ventaja de este sistema es que las vigas maestras apoyan en zona maciza del muro y puede cuidarse la ejecución de los apoyos en lo relativo a la aireación de las cabezas. La práctica moderna, denostada por Bails, dispone un único orden de viguetas que apoyan de muro a muro y se oculta la estructura mediante un cielo raso. Además de emplear maderas de menor calidad, por su mayor contenido de albura, se encuentra más expuesta al peligro de pudrición en las cabezas, figura 4.17a. Bails expone algunos consejos para mejorar esta disposición que parecen más teóricos que prácticos. La entrega de las viguetas en el muro sólo se produce cuando lo hacen sobre una zona ciega, sin huecos, mientras que las restantes viguetas cojas apoyan sobre un brochal paredero. Esta solución evita las cargas sobre los dinteles de los huecos y reduce las cajas en el muro, pero concentra las cargas en las viguetas que reciben los brochales, figura 4.17b.

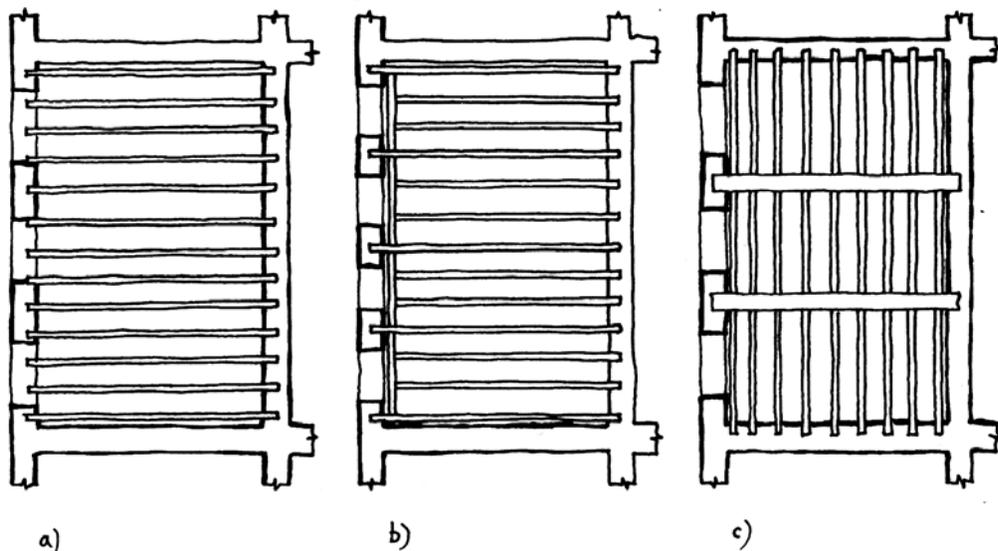


Figura 4.17 Disposición de viguetas de forjado: a) Viguetas en un sólo orden apoyadas sobre el muro en parte ciega y de huecos, b) Sólo las viguetas que entran en parte ciega son las que apoyan en el muro y c) Sistema con dos órdenes, el principal de las vigas y el secundario de las viguetas. Las cabezas de las vigas apoyan en la parte que no tiene huecos del muro.

4.5 Los aleros y la protección mediante vuelos

La protección de la zona de apoyo de las piezas de la estructura de cubierta se garantiza con el alero. La solución tradicional de un alero permite mantener el apoyo de la estructura centrado con el muro volando los canecillos para la protección del agua de lluvia, figura 4.18.

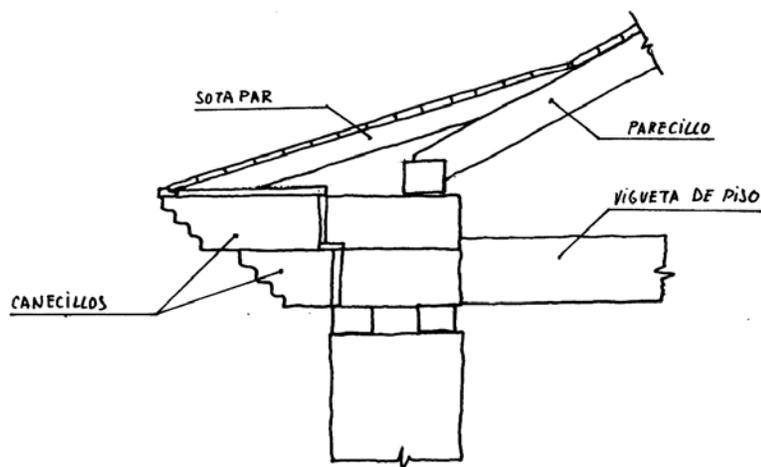


Figura 4.18 Alero tradicional.

El alero es capaz de proteger la fachada, pero en una medida limitada que depende lógicamente de la relación entre el vuelo y la altura de la edificación. Es decir, un vuelo del orden de 60 cm puede proteger una altura inferior a los 3 metros. La altura mínima del zócalo debe ser de 40 cm con el fin de evitar las salpicaduras del agua de rebote, figura 4.19a. Para proteger la fachada de un edificio de varias plantas puede plantearse repetir el alero en cada nivel, figura 4.19b, con el inconveniente del riesgo de retención de agua que puede producirse en caso de fallo de la impermeabilización de esos puntos. Otra opción es el vuelo sucesivo de la fachada como era frecuente en la construcción medieval con muros entramados expuestos al exterior, figura 4.19c.

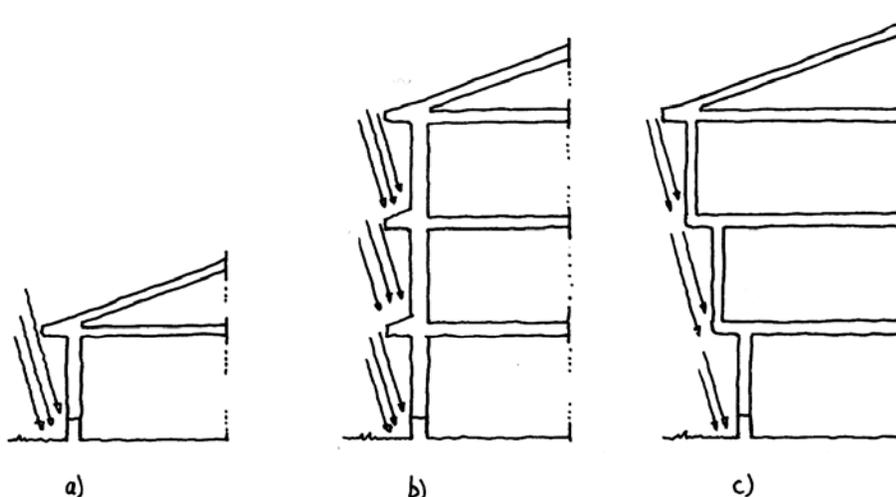


Figura 4.19 El empleo del alero como protección: a) Edificación de una planta, b) Solución con aleros en cada planta y c) Solución de volados sucesivos.

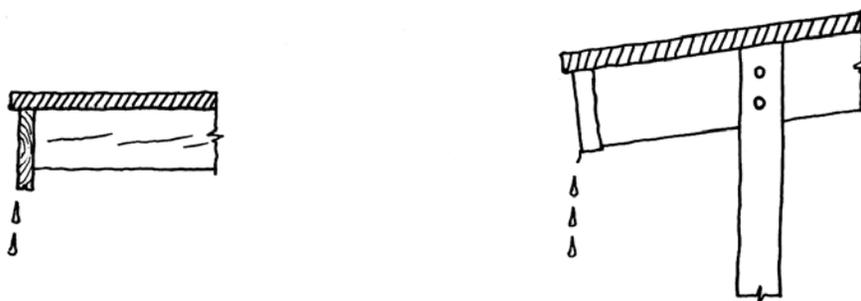


Figura 4.20 Protección de las testas de las piezas voladas: izquierda) Tabla en la testa para evitar la absorción de agua y derecha) Protección de la testa mediante un forro de chapa metálica.

Las testas de las piezas voladas suelen protegerse con otra pieza de madera o baberos de chapa para evitar que el agua empape el corte transversal de las piezas, figura 4.20a. Esta medida se aplica igualmente en la construcción actual con madera mediante procedimientos similares a los indicados en la figura 4.20 derecha.

La existencia de los canalones se justifica por la recogida del agua en la línea de vertido para evitar su caída directa al suelo, que provoca una cortina de agua y salpicaduras. Sin embargo, presenta el inconveniente de que su obstrucción o su inevitable deterioro implica una fuente de humedad que facilita la degradación del alero.

En algunos casos, el empleo de chapas de protección puede resultar contraproducente si no existe posibilidad de evacuación del agua que pueda entrar al interior, en caso de deterioro. Por ejemplo, en una cornisa protegida con una chapa, como se indica en la figura 4.21, el agrietamiento y deterioro de la misma permite la entrada de agua que perjudica las cabezas del forjado.

Cuando se utilizan chapas de cinc o de cobre hay que tener la precaución de separar las chapas de la madera mediante arandelas de plástico u otro tipo de material neutro, para evitar que se produzcan reacciones entre el cinc y la resina de la madera (principalmente en maderas de coníferas muy resinosas). No se recomienda colocar chapas de cinc sobre tableros derivados de la madera resistentes a la humedad porque se pueden producir reacciones químicas entre el cinc y el adhesivo de los tableros.

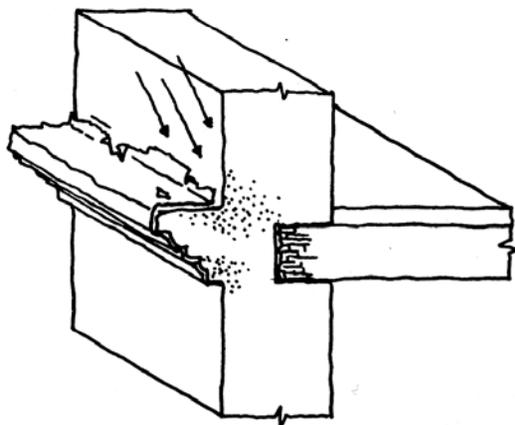


Figura 4.21 Cornisa protegida con una chapa de cinc, que tras su deterioro permite una retención de agua todavía más perjudicial.

4.6 Humedades accidentales en la cubierta y las instalaciones

La posibilidad de humedad accidental en la cubierta debe reducirse mediante un mantenimiento periódico adecuado y con soluciones constructivas que permitan apreciar rápidamente el origen de la gotera. Un fallo en un punto superior de la cubierta puede llegar a provocar problemas de pudrición en la madera en zonas cercanas al alero gracias al escurrido del agua en el plano del faldón. También puede juzgarse como potencialmente peligrosa la práctica de proyectar el aislamiento térmico sobre la cara inferior del entablado o el tablero de la cubierta, ya que dificultaría la ventilación de la madera en caso de goteras.

4.7 Las condensaciones

En los muros de fachada deberá tenerse la precaución de comprobar que no existe posibilidad de condensación en el interior del muro, de manera que la humedad pueda afectar a la cabeza de las viguetas y desencadenar un proceso de pudrición.

4.8 Medidas específicas para cada tipo de ataque

Las medidas de carácter constructivo que deben tomarse para combatir los daños de origen biótico, parten de las recomendaciones anteriores tendentes a la eliminación de las humedades. Este proceder es eficaz contra los hongos de pudrición, contra las termitas y en cierto grado contra algunas especies de anóbidos, por su dependencia de la humedad.

Además, se recomiendan medidas para la limpieza de las piezas dañadas como las que se indican a continuación. En el caso de ataques de pudrición deberá eliminarse toda la madera afectada o con síntomas de pudrición, así como descubrir las zonas que quedan ocultas.

Las acciones a adoptar para evitar el ataque o la propagación de las termitas son similares a las de los hongos. Dentro de las medidas posibles se citan las siguientes:

a) Interrupción de todo contacto del maderamen del edificio con el suelo, mediante las operaciones siguientes:

- Seccionado de los extremos inferiores de pies derechos que estén en contacto con el suelo y apoyo sobre zapatas de materiales duros como el hormigón o la piedra.
- Rejuntado con mortero de cemento de los intersticios, grietas y juntas de la mampostería de los muros que estén por debajo del maderamen. Esta última operación debe hacerse después del trata-miento químico de los arranques de muros.

El objeto de estas medidas es evitar que las termitas alcancen la madera sin ser vistas, al obligarles a la construcción de chimeneas visibles sobre los paramentos de los elementos verticales.

b) Eliminación de las galerías terrosas o «chimeneas» externas que se observen en los paramentos de los muros interiores o exteriores. Estas galerías, como se ha comentado anteriormente, permiten que el ataque progrese y llegue a zonas más alejadas.

c) Extracción y eliminación (quema) de los tocones, raíces y trozos de madera de árboles muertos que se encuentren sobre el terreno de los alrededores del edificio, con el fin de que no quede madera en el suelo que pueda servir de alimento a las termitas.

Anexos relacionados con este capítulo:

Anexo F: Terminología de la construcción con madera.

Referencias bibliográficas:

Arriaga, F. (1998). La carpintería en el Tratado de Arquitectura Civil de Benito Bails. Boletín de Información Técnica de AITIM nº 191. Madrid, ene-feb 1998. Pág. 33-48.

Barberot, E. (1921). Tratado práctico de edificación. Editorial Gustavo Gili S.A., Barcelona.

Barberot, E. (1946). Tratado práctico de carpintería. Editorial Gustavo Gili S.A., Barcelona.

Cassinello, F (1973). Construcción. Carpintería. Editorial Rueda. Madrid.

Hoffmann, Kurt y Griese, Helga (1967). Construcciones con madera. Editorial Blume. Barcelona.

Knöll, Frick (1953). Construcción en madera. Construcción de edificios II. Editorial Labor, S.A. Argentina. Buenos Aires. 272 páginas.

Lasheras Merino, F. (1993). Tratamientos: Clasificación general, descripción de técnicas y productos y de los principios en los que se basan. De la publicación: La humedad como patología frecuente en la edificación. Edita Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Madrid. Madrid. Págs.: 231-242.

Levi, C. (1920). Tratado de Construcciones Civiles. Tomo I, Materiales de construcción. Edificios. Editorial Gustavo Gili. Barcelona.

Monjo Carrió, J. (1993). Lesiones frecuentes en estructuras enterradas. De la publicación: La humedad como patología frecuente en la edificación. Edita Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Madrid. Madrid. Págs.: 135-145.

Moya, L. (1925-25). Cuaderno de apuntes de construcción de Luis Moya, Curso 1924-1925. Edición a cargo de Javier García- Gutiérrez Mosteiro. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Madrid, 1993. 250 págs.

Navascués, Pedro (1983). Estudio crítico de la obra de Benito Bails: De la Arquitectura Civil. 1796. Dos tomos. Ed. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Murcia.

Rodríguez Barreal, J.A. y Arriaga, F. Patología, tratamiento y consolidación de la madera puesta en obra. AITIM.

