

IDENTIFICACIÓN MICROSCÓPICA, UNA HERRAMIENTA FUNDAMENTAL EN LA INVESTIGACIÓN DE ESTRUCTURAS HISTÓRICAS DE MADERA: CASOS PRÁCTICOS

Maria Diodato¹ y Stefania De Gregorio²

¹ Instituto de Restauración del Patrimonio, Universitat Politècnica de València, Edificio 8B, Acceso L, Nivel 0, Camino de Vera s/n - 46022 Valencia, España

² Department of Architecture, University "G. D'Annunzio" Chieti-Pescara, Viale Pindaro n°4, 65127 Pescara, Italia

Autor de contacto: Maria Diodato, m.diodato@hotmail.com

RESUMEN: *La diferenciación del material leñoso en distintas especies arbóreas está a la base del análisis de objetos y estructuras de madera. El primer acercamiento a la identificación de la madera es macroscópico y tiene en consideración sus características organolépticas, es decir: color, sabor, olor, grano, textura, brillo y vetado. Dando un paso más a través de la utilización de lupas, la identificación macroscópica alcanza a ver algunas características microscópicas como por ejemplo forma, distribución y tamaño de las células.*

En el caso de estructuras antiguas, la aplicación de dichas técnicas es difícil en cuanto los elementos de madera casi siempre presentan una capa de suciedad o de barniz que altera y uniforma las características visivas. Asimismo, para el reconocimiento macroscópico a través de la lupa es preciso poder examinar el material según los tres planos significativos, es decir transversal, tangencial y radial y raras veces es posible hacerlo en elementos en obra. Por estas razones la identificación microscópica de la madera se convierte en la solución más fiable y de fácil ejecución.

Este artículo tiene como objeto demostrar la eficacia y simplicidad de la identificación microscópica de la madera profundizando en el método y aportando casos concretos en los que ha sido clave para diversos aspectos del análisis de estructuras y elementos de madera. Por ejemplo: desde el punto de vista histórico la utilización de pino laricio o de yellow pine americano en el contexto valenciano puede ayudar a establecer la época de la construcción, desde un punto de vista constructivo el uso de múltiples especies en una misma estructura puede indicar diferentes fases constructivas o reflejar una clara voluntad del carpintero y finalmente, y más importante, desde un punto de vista mecánico diferentes especies, según la categoría, corresponden a diferentes valores de resistencia así que es fundamental conocer el tipo de madera especialmente en elementos antiguos que necesiten consolidación.

PALABRAS CLAVE: Anatomía de la madera, estructuras históricas, identificación microscópica

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de las estructuras de madera que vertebran la arquitectura histórica, como forjados y cubiertas, tiene su fundamento en el análisis del material que las compone, sea el objetivo final de tal estudio la pura investigación o la restauración. Desde un punto de vista general, en el abanico de informaciones que es oportuno recolectar están: un análisis histórico para conocer las intervenciones y modificaciones realizadas con anterioridad, un análisis constructivo para deducir el comportamiento de la estructura bajo esfuerzo y un análisis diagnóstico para evaluar su estado de conservación y los eventuales tratamientos curativos y preventivos a aplicar. Sin embargo, haciendo un paso atrás, a la base de cada uno de estos análisis debería estar el reconocimiento del tipo de madera empleada, es decir la identificación de la especie.

Una primera observación macroscópica de la madera, con la ayuda de una lupa, es solamente el primer paso para realizar una identificación fiable porque examinar el material exclusivamente desde el exterior no es suficiente para alcanzar una identificación a nivel de especie o

grupos de especies. Asimismo, a menudo las capas decorativas y la pátina de suciedad reducen la visibilidad del material y se interponen en la lectura de las características organolépticas de la madera. Aun teniendo una buena visibilidad de la superficie y de la sección de los elementos estructurales, la variabilidad intrínseca de la madera hace que factores externos como el clima y el terreno, así como factores internos dependientes de la edad y la altura del árbol del que procede el material, produzcan variaciones en la estructura interna de la madera haciendo poco fiable su reconocimiento macroscópico.

Por estas razones, con el fin de obtener la identificación de la especie o grupos de especie a la que pertenece un determinado elemento de madera, es fundamental recurrir a la identificación microscópica, es decir, al análisis de los caracteres microscópicos de una muestra recogida del elemento a estudiar.

La técnica se basa en la observación, bajo el microscopio, de láminas finas de madera y en el reconocimiento de los caracteres distintivos de las células porque son las diferentes variantes de estos caracteres las que

discriminan la pertenencia a una u otra especie, o grupos de especies, de la madera. Así que el proceso de identificación empieza con el estudio de los tipos de células presente en el material y su variabilidad.

2. LA MADERA Y SUS CÉLULAS

El material conocido como "madera" procede de árboles pertenecientes a la sección de las gimnospermas, coníferas, así como de la clase de las dicotiledóneas de la sección de las angiospermas, frondosas. En cuanto a la otra clase de la sección de las angiospermas, las monocotiledóneas, a ésta pertenecen pocas plantas de porte arbóreo, entre las cuales se encuentran las palmeras que tienen una estructura interna del tronco completamente diferente de los otros árboles, o plantas leñosas, en cuanto se pueden considerar como plantas herbáceas de grandes dimensiones.

A pesar de sus diferencias, las coníferas y las frondosas tienen la misma estructura general: una de las características comunes más relevantes es la manera en que los árboles crecen. Este crecimiento, ambos en altura y en anchura, se produce por la superposición de nuevas capas de células por encima de las existentes. El estrato de células responsable por la producción de nuevas células es el cámbium que se encuentra en posición intermedia entre la corteza y la madera interior del tronco. Este cámbium produce hacia el interior células de xilema secundario, las cuales a su vez se diferenciarán para producir los varios tipos de células que componen la madera, y hacia el exterior células de floema secundario, las cuales a su vez se transformarán en corteza. Las células del cámbium no solo se dividen y crecen ambos hacia el interior y el exterior sino también en sentido lateral para acoplarse al aumento del diámetro del tronco.

Las células formadas por el cámbium son inicialmente de forma redondeada más o menos alargada e iguales entre ellas, luego se especializan y varían su tamaño también según el tipo de madera, coníferas o frondosas, y finalmente mueren. Lo que se considera madera entonces está hecho en su mayoría de células muertas de las cuales queda exclusivamente la pared celular y varias sustancias atrapadas y pegadas a ella.

Este proceso de crecimiento microscópico por añadido de capas de células tiene diversas implicaciones macroscópicas; por ejemplo las ramas que se forman en la época juvenil del árbol, con el tiempo, no se mueven en altura y se encontrarán en la parte baja del árbol adulto. Este hecho lleva a la presencia de anillos pequeños en la madera correspondiente a la parte más baja del tronco, madera que será de mejor calidad en comparación con la parte más alta donde las ramas del árbol adulto tienen una sección mayor.

Otra consecuencia fundamental de la presencia del cámbium es que éste, siendo la única parte del tronco que "crece" porque tiene células con la capacidad de dividirse y duplicarse, no puede ser sustituido o reemplazado. Esto significa que, cualquier daño sufrido por esta capa de células, producirá una cicatrización pero también la parada definitiva del crecimiento en la zona interesada por el daño. Este daño y el proceso de cicatrización suele reflejarse en la madera como un defecto.

La parte del tronco utilizando como material de construcción, comúnmente llamado "madera", es el xilema. Las funciones de las diferentes partes de este material son múltiples: la conducción de los líquidos, la resistencia mecánica a las fuerzas verticales y horizontales y la acumulación de sustancias nutritivas para el árbol.

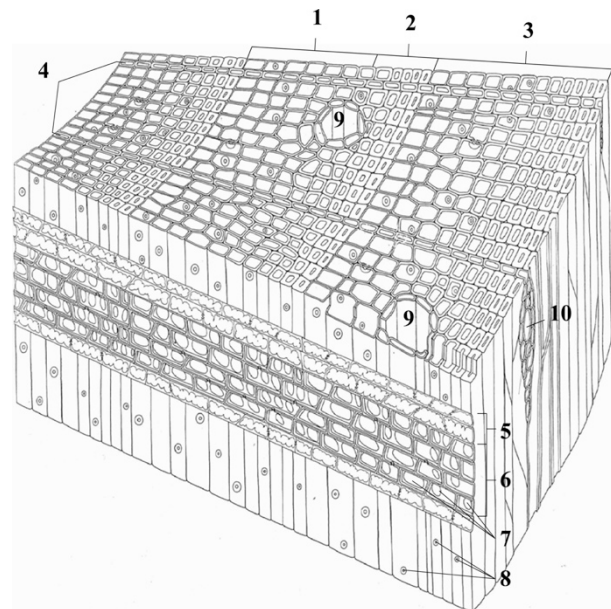


Figura 1. Madera de conífera. 1. Traqueidas, madera de primavera. 2. Traqueidas, madera de verano. 3. Anillo de crecimiento. 4. Parénquima radial. 5. Traqueidas radiales. 6. Células parenquimatosas. 7. Punteaduras en los campos de cruces. 8. Punteaduras areoladas. (Giordano 1971, p. 211)

2.1. Coníferas

En el caso de la madera de coníferas existe una uniformidad en el tipo de células que componen el material (Figura 1).

Las traqueidas: constituyen alrededor del 95% del volumen y peso del material y tienen ambas funciones de conducción de la linfa y de sujeción mecánica del tronco. Estas células se desarrollan principalmente en sentido longitudinal respecto al eje del árbol y el espesor de su pared celular, así como del lumen celular, distinguen las fases vegetativas del árbol diferenciando el material en madera de primavera y madera de verano.

La reproducción periódica de estos dos tipos de madera crea los anillos de crecimiento que son visibles a ojo y corresponden, en los climas templados, a un año de calendario.

Parénquima o células parenquimatosas: son las únicas células vivas del xilema, en la albura, y son el lugar donde se conservan las sustancias nutritivas, principalmente almidones. La mayoría se desarrolla de forma radial disponiéndose una encima de otra en grupos, radios, aunque existe el parénquima longitudinal que se desarrolla paralelo a las traqueidas de la que se distingue fácilmente por estar relleno de sustancias nutritivas de color oscuro.

Para que los líquidos fluyan a través de toda la madera, estos dos tipos de células alargadas longitudinalmente y radialmente están conectadas entre ellas a través de numerosos agujeros de varios tipos y geometría, llamados punteaduras, en las respectivas paredes celulares. Las variantes morfológicas de las punteaduras de conexión entre las células parenquimatosas radiales y las traqueidas longitudinales, los campos de cruce, es uno de los caracteres que sirven para reconocer los diferentes tipos de coníferas. Con la misma función, pero conectando las traqueidas entre ellas existe otro tipo de punteaduras, de morfología areolada.

Otro carácter distintivo es la presencia de canales resiníferos. Alrededor de estos canales, a veces tan grandes que resultan visibles a ojo, se disponen las células epiteliales que producen la resina. Estos canales se desarrollan ambos longitudinalmente y radialmente y en este segundo caso se encuentran rodeadas por células parenquimatosas. La presencia o ausencia de canales resiníferos y las características de las células epiteliales sirven para discernir el tipo de coníferas.

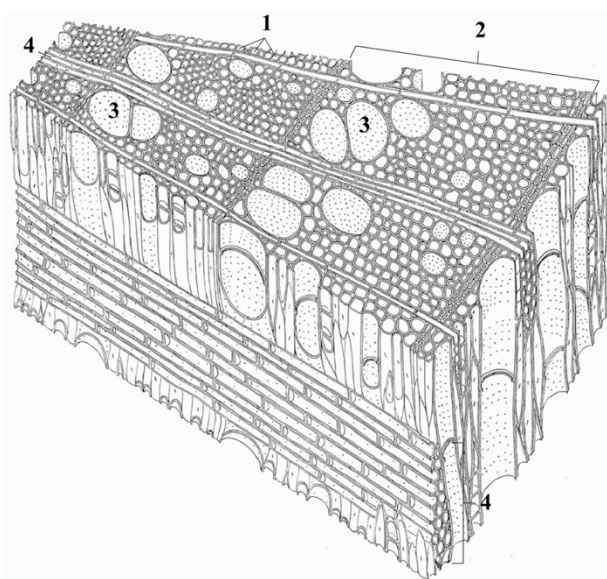


Figura 2. Madera de frondosas. 1. Fibras. 2. Anillo de crecimiento. 3. Vasos. 4. Parénquima radial, radio multiseriado. (Giordano 1971, p. 215)

2.2. Frondosas

Comparada con las coníferas, la madera de las frondosas tiene un aspecto más complejo por la variedad de células presentes en ella, lo cual es debido a una mayor especialización de esas células (Figura 2).

Las fibras: son células alargadas longitudinalmente con paredes celulares espesas y reducido lumen que al no tener punteaduras tienen la función principal de asegurar una resistencia mecánica al material.

Los vasos: claramente distinguibles por su mayor lumen sirven para la conducción del agua así que su pared está agujereada para conectarlos o a otro vaso o a una células parenquimatosas radiales. La dimensión y distribución de estos vasos pueden variar mucho y es uno de los caracteres para identificar la madera de frondosas. Por ejemplo en algunas especies los vasos son de tamaño grande y están más concentrados en la madera de primavera tanto que esta porosidad, anillo poroso, es visible también a ojo.

Parénquima o células parenquimatosas: son presentes en número mayor que en las coníferas, y su cantidad y distribución ambos longitudinalmente y radialmente es otro importante carácter para la identificación de la madera. Estas células parenquimatosas pueden estar agrupadas también en grandes números tanto que a menudo son visibles a ojo como pequeñas pinceladas lúcidas en el corte radial de la madera.

3. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Las muestras se recogen *in situ* de varios elementos de las estructuras históricas a analizar, los que, a una primera inspección visual, pueden parecer diferentes entre ellos. Para que el análisis sea cómodo de realizar, las muestras son de madera en buen estado de conservación y tienen, en la sección transversal, un mínimo de 3 anillos de crecimiento.

Para la extracción de la muestra no son necesarios instrumentos específicos, en la mayoría de los casos bastan un cuchillo o una navaja para incidir transversalmente en la esquina de la viga y retirar un fragmento de madera o aprovechar unas fendas para cortar una porción de material de manera completamente no detectable.

Con el fin de facilitar las operaciones de corte de las lámina finas a partir de la muestra recogida, pero sobre todo para que el aire salga de las cavidades interiores de las células de madera y mejorar así la claridad de las imágenes microscópicas, se hierve en agua la muestra durante cierto tiempo hasta que, en vez de flotar, se quede en el fondo del recipiente. Ésta es una indicación de que el agua ha penetrado dentro de las cavidades de

las células en cuanto ha habido un aumento de la densidad del material. La madera normalmente flota porque su densidad es menor de la del agua por la presencia de aire en el entramado de sus células, en el caso de sustituir este aire con agua durante el proceso de ebullición, la densidad específica de las paredes celulares es mayor de la del agua y por consiguiente la muestra se hunde.

En la elaboración de las muestras no se ha utilizado ningún tipo de coloración para evidenciar las características de las estructuras celulares de la madera como la safranina que colorea de rojo intenso los tejidos de la madera.

Para realizar las láminas finas a partir de las muestras de madera, se suele utilizar un micrótopo, un instrumento de laboratorio que sirve para cortar "rebanadas" finas, pero considerado que no siempre está disponible y que la preparación de la muestra puede ser más compleja, se puede también realizar cortes a mano.

Las características de las células de madera que sirven para la identificación microscópica se analizan tradicionalmente según tres planos de corte característicos y perpendiculares entre ellos. Estos tres planos son: el plano transversal, es decir un corte perpendicular al eje del tronco del árbol, longitudinal radial, es decir un corte paralelo al eje del tronco del árbol y que pase por el centro, longitudinal tangencial, es decir paralelo al eje del tronco del árbol pero no pasante por el centro. Se puede ver que los dibujos de las figuras 1 y 2 reflejan las características de las células según estos tres planos característicos.

Antes de extraer las láminas finas, es oportuno entonces recortar macroscópicamente la muestra según dichos planos de corte obteniendo un fragmento aproximadamente cúbico. Luego, con un poco de habilidad, se sujeta la muestra con una mano y se practican cortes muy finos con una cuchilla en la otra. Para realizar esta tarea se utilizan ambas cuchillas de tipo industrial, más rígidas, así como las comunes cuchillas para afeitarse, más flexibles, y sin grandes dificultades es posible obtener láminas finas cortadas según los tres planos característicos mencionados.

Considerando los problemas que el corte manual de la madera puede originar, es decir secciones no suficientemente finas o secciones ligeramente inclinadas respecto los tres planos característicos, se realizan varios cortes paralelos, de esta manera, una vez pasadas las láminas finas al porta con un pincel, se tienen tres grupos de especímenes a observar con el microscopio.

Para una observación momentánea es suficiente añadir, entre porta y cubre, unas gotas de agua que, por otra parte, evaporan muy rápidamente haciendo que la muestra ya no se pueda observar después de unos pocos

minutos. Por esta razón se realizan las preparaciones microscópicas con una solución de agua y glicerina que, además de durar más, mejora la claridad de la observación ya que la glicerina tiene un índice de refracción mayor que el agua.

El procedimiento de preparación de las muestras se desarrolla entonces con la recogida del material, el hervido de la madera, el corte de láminas finas según los tres planos característicos y finalmente el montaje de la preparación microscópica (Figura 3). A este punto se examinan, a través de un estereomicroscopio que tenga un factor de magnitud máxima de 400x, los caracteres distintivos de las células para alcanzar la identificación de la madera.



Figura 3. Ejemplo de preparación microscópica.

4. IDENTIFICACIÓN MICROSCÓPICA

La observación de la muestra según cada uno de los tres planos de corte característicos desvela la presencia y morfología de unos u otros caracteres específicos de las células de madera. Sólo raramente, uno solo de estos caracteres es tan típico que por su sola presencia lleva directamente a la identificación de la especie, normalmente es la combinación de varios caracteres que, por exclusión, lleva al resultado. En este sentido son de gran ayuda las claves dicotómicas que, según un diagrama de árbol, relacionan los caracteres con los grupos de especies.

En el caso del examen microscópico de la madera de coníferas éstos son los caracteres analizados:

Tabla 1. Caracteres de la madera de conífera analizados según los tres planos de corte característicos

Sección transversal	
Traqueidas longitudinales	Transición entre madera de primavera y madera de verano
Canales resiníferos	Presencia o ausencia Disposición Espesor de las paredes celulares
Parénquima longitudinal	Presencia o ausencia Disposición
Sección longitudinal radial	
Punteaduras areoladas	Disposición
Traqueidas longitudinales	Presencia de engrosamientos helicoidales sobre la pared celular

Traqueidas radiales	Presencia o ausencia Tipo de pared celular: lisa o dentadas
Punteaduras de los campos de cruce	Tipo Número Disposición
Sección longitudinal tangencial	
Traqueidas	Presencia de engrosamientos helicoidales sobre la pared celular
Parénquima radial	Altura Morfología
Canales resiníferos radiales	Presencia o ausencia Espesor de las paredes celulares

En el caso del examen microscópico de la madera de frondosa éstos son los caracteres analizados:

Tabla 2. Caracteres de la madera de frondosa analizados según los tres planos de corte característicos

Sección transversal	
Vasos	Morfología de la sección Dimensión y distribución Presencia de thyllos o tílides
Parénquima radial	Número y disposición de las células (radios uniseriados o multiseriados) Presencia de cristales en las células
Parénquima longitudinal	Presencia o ausencia Disposición
Sección longitudinal radial	
Vasos	Tipo de perforación que conecta dos vasos (uno encima del otro) Tipo y disposición de las punteaduras Presencia de engrosamientos helicoidales sobre la pared celular
Parénquima radial	Morfología de las células parenquimatosas (radios homogéneo o heterogéneos) Presencia de cristales en las células
Sección longitudinal tangencial	
Vasos	Tipo de perforación que conecta dos vasos (uno encima del otro) Tipo y disposición de las punteaduras Presencia de engrosamientos helicoidales sobre la pared celular
Parénquima radial	Número y disposición de las células (radios uniseriados o multiseriados) Morfología de las células parenquimatosas (radios homogéneo o heterogéneos) Presencia de cristales en las células

El análisis estos caracteres microscópicos llega a la identificación de la madera, pero no siempre a través de éstos es posible detallar esta identificación a nivel de especie. Muchas veces se reduce sólo a grupos de especies que por otra parte tienen características macroscópicas y mecánicas también muy parecidas.

Para hacer unos ejemplos, una muestra de conífera que presente canales resiníferos con células epiteliales de pared celular gruesa y que tenga engrosamientos helicoidales en la pared celular en las traqueidas se identifica unívocamente como Abeto de Douglas

(*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). Por otra parte una muestra que presente canales resinífero con células epiteliales de pared celular delgada, que tenga las punteaduras de los campos de cruce en forma de ventana y la pared celular de las traqueidas radiales dentada, pueden corresponder a las especies de pino laricio o salgareño (*Pinus nigra* Arnold), de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) y de pino negro o de montaña (*Pinus mugo* Turra). Si bien el tercero, por su porte rastrero y por su reducida distribución en la península ibérica (se encuentra en montañas entre los 1500 y 2500 m de altitud), puede casi siempre descartarse como material para la construcción, en el caso de los pinos laricio y silvestre, sus hábitat en la península ibérica coinciden a menudo y además tienen también características macroscópicas parecidas así que finalmente no es posible distinguirlos con estas técnicas.

5. APLICACIÓN A LAS ESTRUCTURAS HISTÓRICAS

Establecer la especie o grupo de especies al que pertenecen unos elementos estructurales de madera lleva a poder deducir múltiples datos.

La primera consideración a tener en cuenta es que las distintas características microscópicas de las especies se reflejan después en diferentes características y comportamientos macroscópicos que finalmente se traducen en valores característicos distintos relativos a sus características físicas y mecánicas.

Un segundo paso, que supera la relación entre especie y características mecánicas, es la información non estructural que se puede sacar de la identificación de la especie de madera y que por un lado puede ser constructiva y, por el otro, histórica. Diferentes especies pueden corresponder a diferentes fases constructivas o pueden haber sido elegidas por sus características para funciones diferentes dentro un mismo entramado de madera.

Por último, la aplicación de los eventuales tratamientos curativos y preventivos, importantes para la conservación de elementos históricos, debe ser adecuadamente evaluada tanto según la clase de uso de la especie. Esta última, de hecho, se caracteriza por su propia durabilidad natural ante el ataque biológico y por una clase específica de impregnabilidad de la albura y el duramen.

Analizando primeramente la información relacionada a las características mecánicas de la madera, es fundamental alcanzar la identificación de la madera en el caso de proyectos de restauración de estructuras históricas porque el punto de partida es el desconocimiento sobre ambos el tipo y calidad de la madera empleada.

Tomando como ejemplo elementos de madera maciza de sección rectangular, la norma europea EN 14081-1:2005+A1:2011 “Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section. Part 1: General requirements.” define los principios de clasificación visual y a máquina de la madera estructural de acuerdo con las clases de resistencia establecidas en la norma europea EN 338:2009 “Structural timber. Strength Classes.”, donde se establecen los requisitos mínimos de cada clase de resistencia y se reenvía a la norma europea EN 1310:1997 “Round and sawn timber. Method of measurement of features.” para el método de evaluación de las características del elemento (nudos, chaflanes, fendas, anchura de los anillos, etc.) con excepción de lo que se prescribe en la legislación nacional con arreglo a las especies predominantes y técnicas constructivas y labrado locales. La misma legislación exige el marcado “CE” de todos los elementos de madera y la designación de la especie y clase de resistencia ya que la designación de la clase de resistencia, que proporciona las propiedades de resistencia, rigidez y densidad de la madera, está estrechamente relacionada con las especies.

Para la madera española la norma UNE 56544:2011 “Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas” y la norma UNE 56546:2013 “Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de frondosas”, aun teniendo en cuenta las mismas características, éstas se evalúan de manera diferente. Para toda la madera de conífera, la clasificación visual se basa en criterios únicos que permiten la identificación de tres categorías ME-1, ME-2 e MEG (base > 70mm). Estas categorías corresponden a clases resistentes diferentes en función de las especies, identificables a través de la norma europea EN 1912:2012 “Structural Timber. Strength Classes. Assignment of visual grades and species”, que pretende relacionar las categorías visuales definidas en relación a las especies y origen, con las categorías de resistencia establecidas en la norma europea EN 338:2009.

Por otra parte, en el caso de frondosas, en España, la clasificación visual se basa en criterios diferentes, dependiendo de la especie y permite identificar la categoría MEF en caso de madera de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill.) y MEF y MEF-G en el caso de madera de castaño (*Castanea sativa* Mill.). La misma legislación establece una relación entre las categorías visuales y las propiedades físicas y mecánicas según la mencionada norma EN 338:2009 y la EN 1995-1-1:2004/A1:2008 “Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-1: General. Common rules and rules for buildings.”

Si, por otro lado, hay una necesidad de conocer los valores característicos de un elemento de sección rectangular de madera de una especie que no está

incluida en el ámbito de las reglas anteriores, se deberá saber la procedencia de la madera y de acuerdo con ella, localizar los patrones de referencia para la clasificación visual.

Si el elemento de madera es nuevo y se coloca desde cero, el productor abastecerá la obra con elementos acordes a cuanto establecido por el diseñador según el certificando el origen, la especie y la clase de resistencia. En cambio, cuando se trabaja en edificios históricos, en la mayoría de los casos, no está disponible la información relativa a la resistencia de los elementos colocados en obra, pese a ser conscientes de las condiciones de carga que fue capaz de soportar la estructura. En los proyectos de restauración, con el fin de implementar medidas de adaptación o mejora estructural adecuadamente calculadas según el rendimiento real de los elementos de madera, la identificación de la especie es, por tanto, el primer paso para encontrar la categoría de resistencia a través de la clasificación visual.

Comparando, por ejemplo, tres elementos de madera española de tres especies: pino rodeno o marítimo (*Pinus pinaster* Ait.), pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) y pino laricio (*Pinus nigra* Arn. var. *Salzmanii*) que a través de clasificación visual con la norma UNE 56544:2011 pertenecen todos a la categoría ME-1, mediante el uso de la norma UNE EN 1912:2012 se pueden adscribir a diferentes categorías resistentes, es decir, respectivamente C24 (pino rodeno o marítimo), C27 (pino silvestre) y C30 (pino laricio) y en consecuencia, los valores característicos serán diferentes. Sin embargo, si los mismos elementos pertenecieran a la categoría ME-2, es decir si tuvieran una mayor presencia de defectos, habría una disminución de la clase resistente, identificable en C18 para todas las tres especies mencionadas anteriormente. Es, por lo tanto, clara la estrecha dependencia entre el origen, la especie, el tipo y cantidad de defectos, la categoría visual y la categoría de resistencia.

Del mismo modo, en el caso de la investigación sobre los valores característicos y las propiedades mecánicas y la densidad de la madera a través de pruebas experimentales, la muestra para el ensayo debe incluir como mínimo 40 probetas y debe ser representativa de la población, que viene definida por parámetros tales como la especie, procedencia y calidad resistente (UNE-EN 384:2010 “Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.”). La uniformidad de las especies es, por tanto, uno de los requisitos para fiabilidad de estos análisis.

El límite de la clasificación visual así como propuesta es la necesidad de tener optima visibilidad de tres caras del elemento, difícilmente alcanzable con estructuras en obra. En Italia la norma europea EN 14081-

1:2005+A1:2011 ha sido especificada por la UNI 11035 "Classificazione a vista dei legnami secondo la resistenza meccanica" (Clasificación visual de las maderas según resistencia mecánica) y se aplica cuando la visibilidad es de al menos tres de sus caras más una cabeza. Esta norma proporciona la clase de resistencia del elemento y los valores para el cálculo con el método de los estados límite. Además, también existe la UNI 11119:2004 "Beni culturali - Manufatti lignei - Strutture portanti degli edifici - Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera" (Bienes culturales, elementos de madera, estructuras de los edificios, inspección in situ para el diagnóstico de los elementos en obra) que según la especie y las características del elemento de madera (chaflanes, lesiones, nudos, inclinación de las fibras etc.) define las tensiones máximas para la aplicación del método de tensiones admisibles y el módulo de elasticidad a flexión.

Además de ser fundamental para la determinación de las características mecánicas del material, la identificación de la madera tiene repercusiones más amplias. Concretamente, de las numerosas muestras recogidas en la zona valenciana, se ha podido confirmar que la madera que tradicionalmente se utilizaba para las estructuras de forjados y cubiertas pertenecía al grupo de especies del pino laricio (*Pinus nigra* Arnold) y del pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.). Junto a elementos pertenecientes a este grupo de especies se encuentran estructuras en la que se ha utilizado madera de pino de tipo diferente. Esta madera se ha identificado como

perteneciente al grupo de especies correspondiente a lo que se conoce en Estados Unidos como Southern Yellow Pine que incluye las especies de: loblolly pine (*Pinus taeda* L.), longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.), shortleaf pine (*Pinus echinata* Mill.) y slash pine (*Pinus elliottii* Engelm), es decir la madera que tradicionalmente en el área valenciana se conoce como "madera de mobila" (Figura 4). A través de esta identificación en se pueden discernir claramente dos momentos constructivos en las estructuras históricas porque, considerando que la importación del sur de los Estados Unidos a España y en general a la Europa mediterránea se intensificó en los siglos XIX y XX, las estructuras en las que se identifique este tipo de madera claramente no podrán ser anteriores.

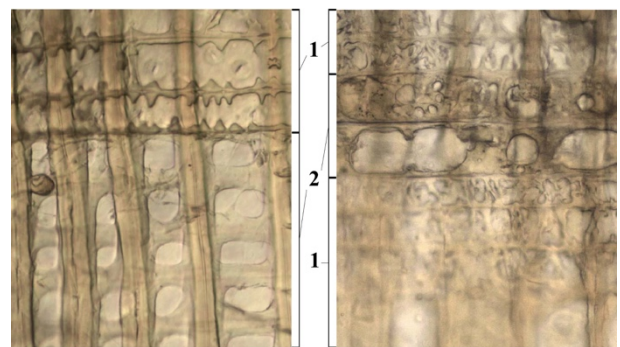


Figura 4. Secciones radiales de madera del grupo *Pinus nigra-Pinus sylvestris* (dcha.) y de madera de Yellow Pine (izq.). 1. Traqueidas radiales. 2. Células parenquimatosas, punteaduras de los campos de cruce

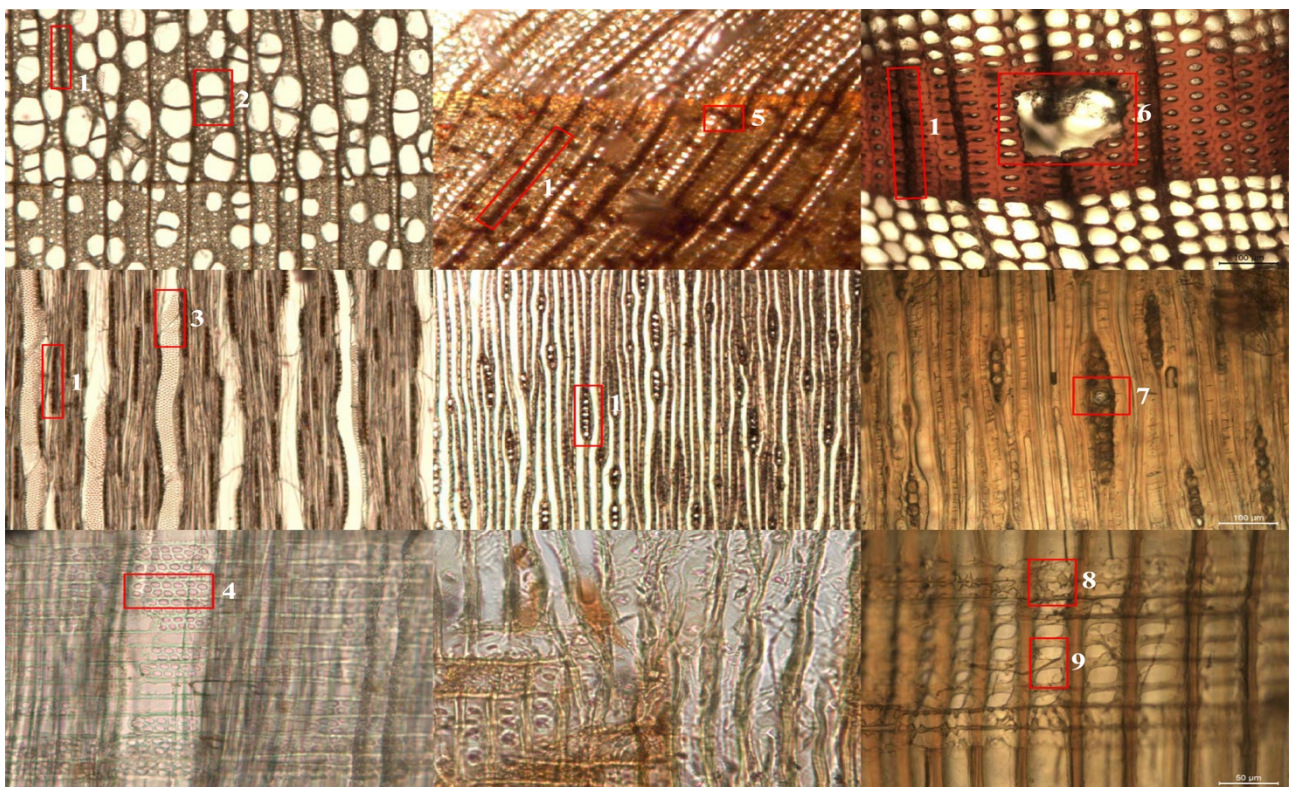


Figura 5. Secciones características de madera de álamo, enebro y pino. 1. Parénquima radial. 2. Vasos. 3. Conexión entre dos vasos. 4. Punteaduras en campos de cruce. 5. Parénquima longitudinal. 6. Canal resinífero longitudinal. 7. Canal resinífero radial. 8. Traqueidas radiales. 9. Punteaduras de los campos de cruce.

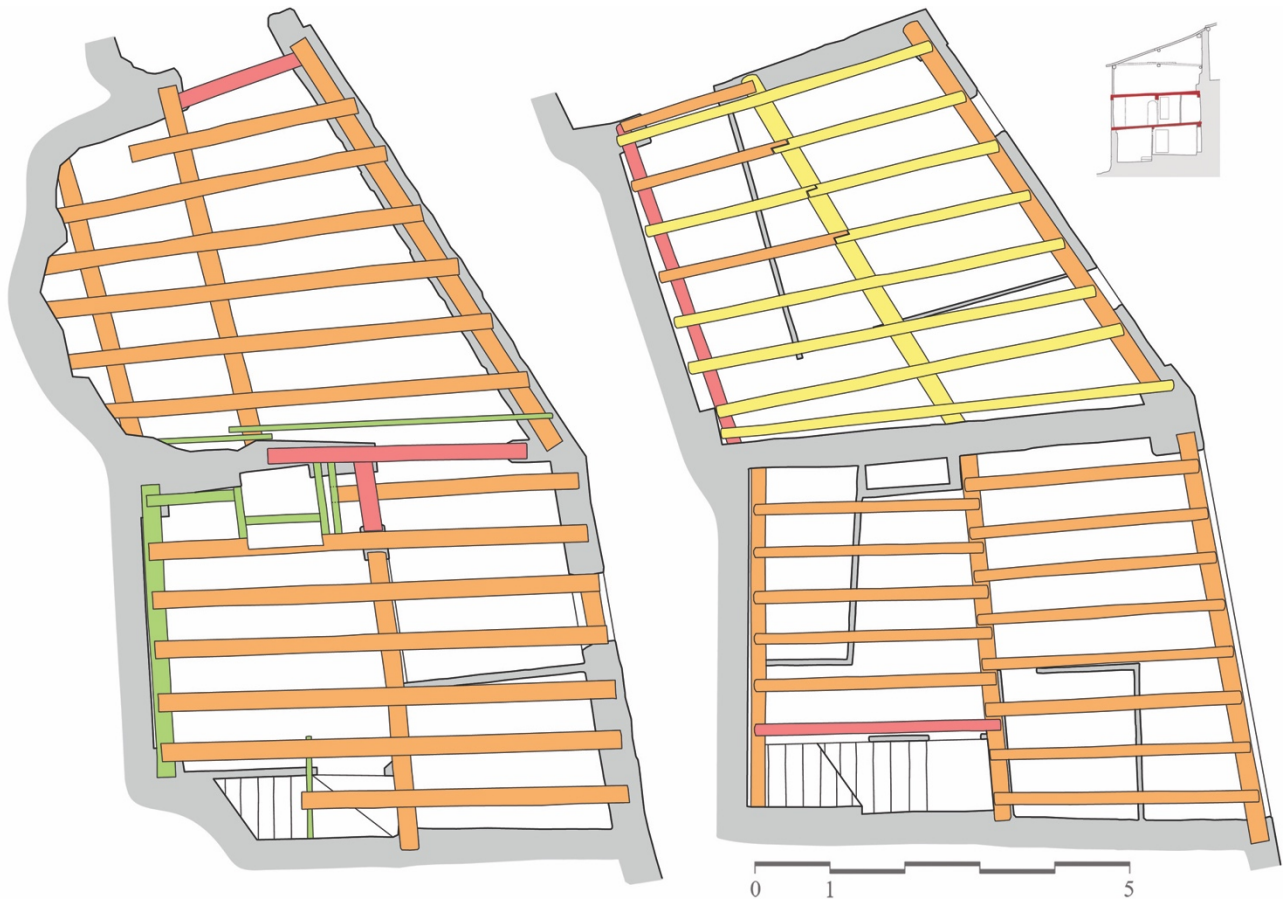


Figura 6. Ejemplo de arquitectura vernácula. Amarillo, género *Populus*. Naranja, *Pinus nigra* - *Pinus sylvestris*. Rojo, familia *Cupressaceae*, género *Juniperus*. Verde, desconocido.

Por otra parte, la información deducida del análisis de las especies de maderas puede interesar también los aspectos constructivos de un edificio como por ejemplo la selección de los materiales y las fases constructivas.

En un ejemplo concreto de arquitectura vernácula de la Comunidad Valenciana se ha podido reconocer el uso de tres tipos diferentes de madera en la misma estructura. Parte de los elementos de esta estructura se identificó como perteneciente al grupo de especies del pino laricio (*Pinus nigra* Arnold) y del pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.), otra parte perteneciente a los álamos (género *Populus*) y unos pocos elementos pertenecientes a la familia de las cupresáceas (*Cupressaceae*); esta familia incluye, entre otros, los géneros de los enebros y cipreses, *Juniperus* y *Cupressus*, y considerada la presencia de enebros en la zona es muy probable que la madera pertenezca a ese género (Figura 5).

Desde un punto de vista constructivo, considerado la distribución de viguetas pertenecientes a diferentes especies en el primer y segundo forjados del edificio se nota como la zona donde mayoritariamente está presente la madera de álamo se encuentra separada del resto de la vivienda indicando dos fases constructivas o dos maestros de obra diferentes. Por otra parte se puede

ver como los elementos de enebro tienen, con más frecuencia, función de dinteles y vigas principales, hecho que puede estar ambos influenciados por las características mecánicas de la madera y por la dificultad de encontrar troncos rectos de suficiente longitud y sección para ser parte de la estructura del edificio (Figura 6).

5. CONCLUSIONES

La identificación microscópica de la madera es un instrumento fundamental para el estudio de las estructuras históricas porque la información que se puede obtener a partir de las especies utilizadas en la arquitectura es muy valiosa.

Las implicaciones de este conocimiento pueden ser amplias e interesar tanto las características mecánicas de la estructura como su historia. Por ejemplo, el cambio de una especie a otra dentro de una misma serie de elementos estructurales de madera puede indicar la presencia de dos fases constructivas. Por otra parte, la elección consciente por parte de los constructores de tipos diferentes de madera con funciones diferentes, no solamente en arquitectura sino también en la elaboración de utensilios y artefactos tradicionales,

puede indicar un conocimiento profundo por parte de dichos constructores de las características del material que se seleccionaba por su dureza, flexibilidad o resistencia a los ataques bióticos. Igualmente, desde un punto de vista exclusivamente estructural diferentes tipos de madera tienen valores característicos de resistencia diferentes, lo que influye directamente, junto con la calidad de la madera y su estado de conservación, en la resistencia general del entramado estructural.

El simple hecho de saber de qué tipo de madera está hecha una viga u otro objeto incluye en sí mucha más información que simplemente el nombre latino de la especie, de la misma manera que la fecha de construcción de un edificio incluye mucha más información que un simple número.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar un sincero agradecimiento al Servicio de Microscopía Electrónica de la Universitat Politècnica de València y a los técnicos que trabajan allí por facilitarnos el acceso a sus instalaciones y en particular al estereomicroscopio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

García Esteban, L., Guindeo Casasús, A., Peraza Oramas, C. y de Palacios de Palacios, P., (2003) *La madera y su anatomía, anomalías y defectos, estructura microscópica de coníferas y frondosas, identificación de maderas, descripción de especies y pared celular*. Madrid, Fundación Conde del Valle de Salazar, Ediciones Mundi-Prensa, AiTiM.

Giordano, G., (1971) *Tecnologia del legno, Volume I, La materia prima*. Torino, Unione Tipografica – Editrice Torinese.

Hoadley, R. B., (1990) *Identifying wood, accurate results with simple tools*. Newton (CT) The Taunton Press.

Nardi Berti, R., (2006) *La struttura anatómica del legno ed il riconoscimento dei legnami italiani di più corrente impiego*. Trento, CNR-IVALSA.

Richter, H. G., Grosser, D., Heinz, I. y Gasson, P. E. (2004) "IAWA list of microscopic features for softwood identification" en *IAWA Journal*. Volumen 25 (1). Leiden. International Association of Wood Anatomists.

Schweingruber, F. H., (1990) *Anatomy of european woods, an atlas for the identification of European trees, shrubs and dwarf shrubs*. Bern, Stuttgart, Ruth Landolt.

Normativas:

EN 1995-1-1:2004/A1:2008 "Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-1: General. Common rules and rules for buildings."

EN 1310:1997 "Round and sawn timber. Method of measurement of features."

EN 14081-1:2005+A1:2011 "Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section. Part 1: General requirements."

EN 338:2009 "Structural timber. Strength Classes."

EN 1912:2012 "Structural Timber. Strength Classes. Assignment of visual grades and species",

UNE 56544:2011 "Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas"

UNE 56546:2013 "Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de frondosas",

UNI 11035 "Classificazione a vista dei legnami secondo la resistenza meccanica"

UNI 11119:2004 "Beni culturali - Manufatti lignei - Strutture portanti degli edifici - Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera"

