

## Diagnóstico estructural de estructuras de madera históricas: La sala diplomática del Palacio Real de Nápoles\*\*

Donato Calicchio, Mauro Bernabei, Michele Brunetti, Alan Crivellaro, Nicola Macchioni y Claudio Pollini\*



1. La Sala Diplomática antes de las obras de restauración.

**Palabras clave:** estructura, madera, diagnóstico, dendrocronología, resistencia mecánica

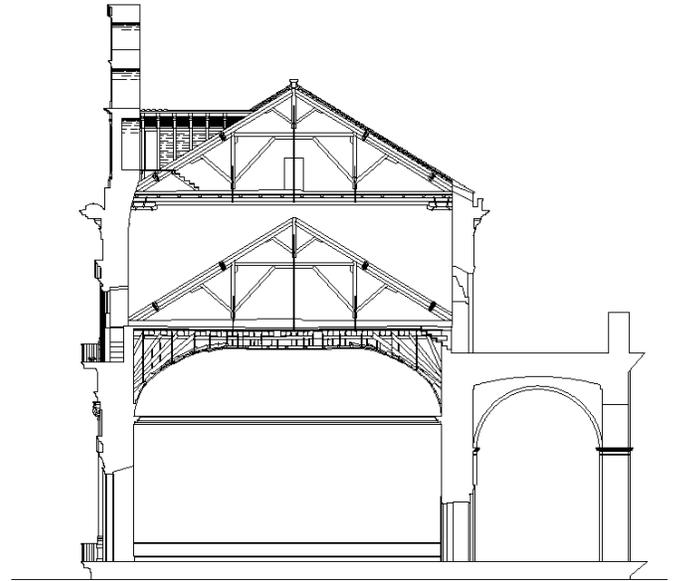
El objetivo de este artículo es describir el proceso diagnóstico realizado en la estructura de madera que sostiene la bóveda de la Sala Diplomática del Palacio Real de Nápoles (Italia). Tras una breve descripción histórica del Palacio Real y la Sala Diplomática, se detalla la metodología conforme a la normativa italiana, y los problemas específicos que surgieron durante las operaciones. Para completar el diagnóstico, se realizó un análisis dendrocronológico de los elementos de madera. Los resultados muestran las propiedades mecánicas residuales de cada elemento estructural así como los principales problemas que deben ser resueltos por los restauradores. Las conclusiones dendrocronológicas muestran que la datación de los elementos de madera es compatible con la de los frescos de la bóveda y, por lo tanto, demuestra que los elementos no han sido reemplazados.

*Keywords:* structure, wood, diagnosis, dendrochronology, mechanic strength

*Structural diagnosis of historic timber structures: the Diplomatic Room of the of Royal Palace of Naples.* The aim of this article is to describe the diagnosis process made on the timber structure that holds up the vault of the Diplomatic Room of the Royal Palace in Naples (Italy). After a brief historical description of the Royal Palace and the Diplomatic Room, it discusses the methodology according to Italian regulations and the specific problems that arose during the works. To complete the diagnosis, a dendrochronological analysis of the wooden elements was performed. The results show the residual mechanical properties of each structural element and the main problems to be resolved by the restorers. The dendrochronological conclusions yield that the dating of the elements is compatible with that of the frescoes on the vault and therefore demonstrate that the elements have not been replaced.

\*Todos los autores son investigadores del Consiglio Nazionale delle Ricerche – IVALSA, Trees and Timber Institute, Italy

\*\*Traducción al castellano de Maria Diodato



2. Sección del Palacio Real correspondiente a la Sala Diplomática

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La Sala Diplomática (fig. 1), antecámara de la Sala del Trono, es una de las estancias más relevantes en el Palacio Real de Nápoles debido a sus dimensiones y decoración. Su ubicación se refleja en el centro de la fachada histórica del edificio sobre la Plaza del Plebiscito que está considerada, a su vez, la plaza principal de Nápoles.

Las superficies interiores están enteramente decoradas con pinturas y tejidos fabricados durante la dominación de los Borbones por la famosa fábrica de seda de San Leucio en Caserta. La bóveda encamionada de la sala fue pintada en 1738 por Francesco De Mura (1696-1782) con la “Alegoría de las virtudes” de Carlos de Borbón y María de Sajonia. En las paredes, tapices gobelinos que representan las alegorías de los elementos, fuego y aire, celebran el poder del Rey de Francia, Luis

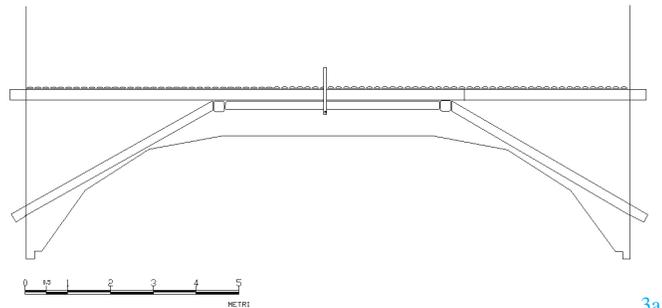
XIV. Las dimensiones de la sala son 16,60 x 14,20 metros con una altura de 12,00 m. Hace unos años la bóveda de la sala fue inspeccionada debido a la presencia de varias deformaciones visibles en su superficie. Estas deformaciones y grietas se atribuyeron a la sobrecarga generada por los apartamentos construidos en el siglo XIX que modificaron el esquema estructural original, causando una excesiva flexión en la estructura de madera que sostiene la bóveda (fig. 2). En concreto, se construyeron tres apartamentos dúplex con una superficie de 250 m<sup>2</sup>, con sus baños e instalaciones respectivas de aprovisionamiento y evacuación de aguas. Más adelante, se comprobará hasta qué punto esta situación contribuyó de manera relevante a la degradación de los elementos de madera.

A fin de proteger la sala y los frescos, se decidió cerrar el espacio a los visitantes y,

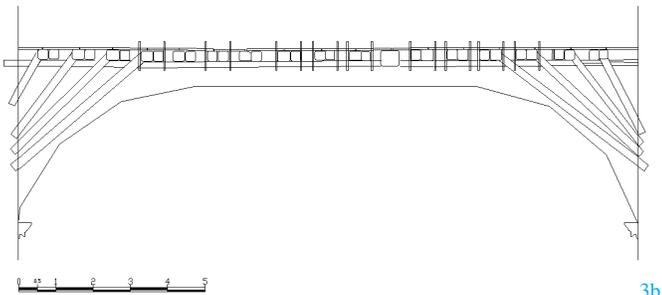
una vez protegidas las superficies pintadas e instalado un andamio específico de sujeción de la bóveda, demoler los apartamentos y restaurar la estructura de madera.

De acuerdo con las convenciones internacionales sobre la conservación y protección del patrimonio histórico que reclaman una atención específica a las características peculiares del edificio, incluyendo la artesanía, las técnicas y los materiales, el objetivo de la intervención fue emplear los sistemas de reparación menos invasivos para la estructura.

El primer problema a afrontar era la elaboración de un diagnóstico completo del estado y de las prestaciones residuales de la estructura de madera que sostiene la bóveda, incluido el estudio dendrocronológico de algunas piezas para comparar la datación de los diferentes marcos que componen la estructura general y la presencia de eventuales sustituciones.



3a



3b

Jácena n°	Sección estructural (b x h) (cm)	Sección AA' (cm)	Sección BB' (cm)	Sección CC' (cm)	Sección DD' (cm)	Longitud (cm)
1 A	34 x 31	23 x 26				964
2 A	41 x 39	23 x 28	D= 24	D= 21		919
3 A	33 x 31	26 x 28	D= 23	D= 23	D= 22	1123
4 A	37 x 33	27 x 25	D= 25	23 x 23		964
5 A	33 x 31	25 x 25	23 x 23	22 x 24		918
6 A	30 x 28	20 x 23	20 x 23	D= 20		911
7 A	31 x 18	23 x 23	D= 23	D= 22		881
8 A	33 x 23	20 x 27	20 x 23	20 x 25		971
9 A	33 x 31	D= 22	D= 20	D= 17		1040
10 A	33 x 31	D= 24	D= 22	22 x 24	D= 22	1031
11 A	58 x 40	56 x 35	35 x 36	57 x 42	54 x 37	1441
12 A	33 x 25	D= 23	D= 20	D= 18		934
13 A	33 x 26	20 x 27	19 x 22	16 x 23	15 x 21	1032
14 A	28 x 27	D= 22	17 x 22	17 x 23		964
15 A	30 x 23	21 x 22	19 x 24	16 x 24		964
16 A	26 x 24	D= 20	D= 20	D= 18	21 x 22	1032
17 A	31 x 26	D= 26	22 x 20	D= 22		896
1 B	28 x 26					991
2 B	33 x 31					963
3 B	36 x 34	18 x 22	21 x 24	D= 23	D= 23	1084
4 B	33 x 31	20 x 16	22 x 20	22 x 23	D= 27	994
5 B	33 x 31	17 x 18	18 x 24	22 x 27	D= 27	1031
6 B	29 x 27	16 x 20	D= 18	D= 21	D= 28	1033
7 B	35 x 33	17 x 25	D= 23	22 x 26	D= 29	1244
8 B	39 x 37	18 x 22	20 x 23	20 x 21	D= 30	1125
9 B	30 x 28	16 x 17	20 x 22	21 x 22	D= 25	1058
10 B	38 x 33		18 x 21	19 x 24	D= 26	873
11 B	43 x 40					
12 B	33 x 31		20 x 22	22 x 26	D= 26	955
13 B	36 x 34	16 x 23	D= 25	D= 24	29 x 22	1137
14 B	29 x 27		D= 20	20 x 22	D= 22	925
15 B	32 x 30	18 x 18	17 x 22	20 x 23	26 x 23	1009
16 B	29 x 27	16 x 16	D= 18	D= 18	20 x 21	1008
17 B	28 x 26		D= 19	D= 18	D= 21	955

Tabla 1. Longitud y secciones de cada elemento. Cuando la sección no está completamente escuadrada, se apunta el diámetro en vez de la base y la altura.

## CARACTERÍSTICAS DE LA LA ESTRUCTURA DE LA MADERA

La estructura de madera es un forjado formado por 17 jácenas horizontales compuestas de dos piezas de madera de castaño (*Castanea sativa* Mill.), de 14,5 m de longitud total. Sólo una de las jácenas de mayor sección (n° 11 en la tabla 1), de abeto europeo (*Abies alba* Mill.), cubre completamente la luz. Las dimensiones y secciones de cada elemento se detallan en la tabla 1.

Los rollizos de madera de castaño apenas escuadrados con hachuela (sólo la jácena de abeto es prismática) apoyan simplemente en los muros. Los dos componentes de cada jácena están acoplados lateralmente en aproximadamente 5 m de longitud de la parte central, solidarizados entre sí con ayuda de grandes clavos de forja antiguos.

Cada jácena posee un sistema de apoyo longitudinal formado por dos tornapuntas y un puntón horizontal a un tercio de la longitud que colaboran en la sujeción de las cargas y las transfieren a los muros de apoyo (fig. 3a). En sentido transversal las vigas más cercanas a los muros se sostienen con ayuda de tornapuntas laterales (fig. 3b). Durante la demolición de los apartamentos, se descubrió una cercha de madera de 6 m de altura ubicada a mitad del entablado, perpendicular a los ejes de las jácenas que colabora en el sostenimiento de la carga de las jácenas en su parte central, generando una estructura de gran complejidad (fig. 4a).

La estructura superior se conecta a la bóveda encamionada con ayuda de tirantes de madera diversa de baja calidad, que van clavados al armazón de arcos de la bóveda construido con tableros de madera de álamo (fig. 4b).

## MÉTODOS DIAGNÓSTICOS

### Estructura de madera

El objetivo del diagnóstico fue la evaluación de las propiedades mecánicas de cada elemento de la estructura de madera con el objeto de brindar a los ingenieros estructurales la información básica para el proyecto de restauración.

El diagnóstico in situ se realizó siguiendo el estándar italiano “UNI 11119- Beni culturali – Manufatti lignei – Strutture portanti degli edifici - Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera”<sup>1</sup>. El objetivo del análisis visual fue la clasificación y evaluación estructural de cada elemento de madera, y la deducción de sus características originales y las modificaciones que se produjeron en ellas durante el tiempo de servicio del armazón, teniendo en cuenta la decadencia desde el punto de vista estructural y biótico.

La inspección y la clasificación visuales requieren el mejor contacto posible con el elemento objeto de examen. Por esta razón, antes de la inspección, fue necesaria una limpieza integral de la estructura y la eliminación de las partes menos importantes de la misma. Por ejemplo, todos los tirantes fueron retirados temporalmente porque se habían convertido en puntones de compresión que empujaban la bóveda debido al peso de los apartamentos y de las deformaciones inducidas en la estructura de madera.

A fin de mejorar el conocimiento de las características de la madera y la historia de la estructura, se realizó un estudio dendrocronológico de múltiples elementos.

### Estándar aplicado en el diagnóstico

La normativa UNI 11119 es un estándar italiano que establece los objetivos, procedimientos y requisitos para el diagnós-

tico del estado de conservación y para la evaluación de la durabilidad y resistencia de los elementos de madera en las estructuras de carga, a través de inspecciones in situ y del uso de técnicas no destructivas y métodos para evaluar algunas características de los elementos de madera.

Esta norma es el resultado de una intensa actividad de investigación en este campo, llevada a cabo por varias instituciones durante los últimos 10-15 años. El objetivo de las inspecciones es obtener información acerca de:

- Las especies de madera.
- La humedad de la madera.
- La clase de riesgo biológico de los elementos según la EN 335-1/2: 1993.
- La geometría y morfología de los elementos donde se indique la posición y extensión de los defectos principales, deterioro o posibles daños.
- La posición, la forma y la dimensión de la zona crítica y la sección crítica.
- La clasificación de resistencia de los elementos de madera en su conjunto y/o en las solas zonas críticas.

El primer punto a considerar en una inspección para el diagnóstico de una estructura es la identificación de las especies de madera que la componen, dada la variación de las características según la especie de madera utilizada. La identificación de la madera permite recopilar mucha información, a saber: la durabilidad natural, las características físicas y mecánicas, el origen geográfico y el uso típico que se hace de ella. Asimismo, para los objetivos específicos del procedimiento diagnóstico es importante conocer la especie de madera porque es la clave para obtener el valor de resistencia a través de una clasificación visual de la resistencia aplicada a cada viga.

3a. Sección longitudinal de la estructura de madera a lo largo de la cercha.

3b. Sección transversal de la estructura de madera

4a. Estructura superior de las jácenas horizontales donde se puede observar claramente la cercha en la zona central de la estructura.

4b. Estructura bajo las jácenas horizontales donde aparece el armazón de arcos de álamo de la bóveda encamionada, muy cerca de los tornapuntas de apoyo en los muros.

4a



4b



El levantamiento, a continuación, debe obtener información sobre: dimensión y forma de cada elemento de madera, características geométricas como deformaciones y disminuciones de la sección, peculiaridades y defectos de crecimiento (posición de la médula, bifurcaciones y fendas), tipo, posición y longitud de los principales defectos, tipo de pudrición u otro eventual daño presente y la posición de las zonas críticas.

Las zonas críticas se caracterizan por la dimensión y la posición de defectos específicos que pueden influir en las características de resistencia y rigidez, así como en las propiedades mecánicas de los elementos de madera, con especial atención a aquellos que se consideran más relevantes en el análisis estático de la estructura y/o de la unidad estructural.

En caso de alteraciones que no sean visibles en la superficie de los elementos de madera, pero que se supone que estarán presentes en el interior, el levantamiento debe continuar con la ejecución de pruebas no destructivas. Se debe establecer la posición y extensión de cada alteración detectada en relación con la longitud de los elementos de madera y, si es posible, en relación con su sección transversal. En este último caso, se determinará la sección “eficiente”, que es el corte transversal menos las áreas dañadas. Por último, la clasificación visual de la resistencia debe llevarse a cabo teniendo en cuenta:

- a) La observación de todas las caras visibles y las extremidades de cada elemento.
- b) La aplicación de reglas de la clasificación.
- c) La asignación del elemento de madera a la peor categoría.
- d) Si el elemento no entra ni en la categoría más baja, debe definirse “no apto”.

Cada elemento de madera estructural debe ser clasificado conforme su resistencia. Generalmente la clasificación de resistencia en estructuras de madera en obra se basa en una inspección visual de los elementos de madera, en pruebas no destructivas para evaluar una o más propiedades físicas y mecánicas, o bien en una combinación adecuada de ambos métodos. La clasificación de la madera debe llevarse a cabo de acuerdo a los siguientes criterios y normas generales:

- Clasificar el elemento de madera entero y, si es necesario, identificar cada zona crítica por separado.

- Tener en cuenta las limitaciones que se derivan de las condiciones de acceso y la visibilidad de la superficie de los elementos de la madera.

- Si el número de caras laterales visibles de los elementos de madera es inferior a tres, debe ser mencionado explícitamente en el informe de inspección.

- Si se produce una alteración debido a daños mecánicos o la descomposición biológica localizada (podredumbre o ataques de insectos), la clasificación se debe referir sólo a la sección eficaz.

- Si la alteración se produce debido al ataque de insectos xilófagos y se ha extendido a toda la sección (ataque generalizado) se debe considerar la sección completa en el momento de la clasificación. En el análisis estructural, las propiedades mecánicas y físicas deben reducirse proporcionalmente a la superficie ocupada por galerías de insectos. La necesidad de esta reducción debe ser subrayada explícitamente en el informe de inspección que debería indicar el porcentaje de reducción que se aplicará.

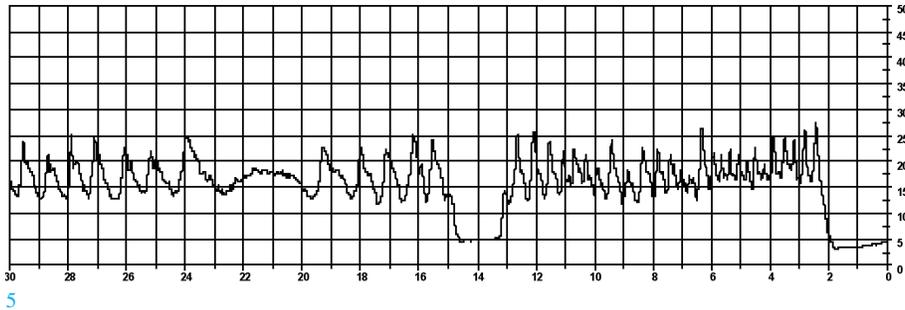
- A fin de asignar una categoría es necesario que todas las características o defectos

entren en las limitaciones especificadas; no se permite la asignación de categorías intermedias.

En algunos casos, la inspección in situ puede completarse con pruebas complementarias mediante el uso de uno o más métodos no destructivos con el fin de determinar los parámetros físicos y mecánicos que pueden ser claramente relacionados con la resistencia de la sección crítica. El sistema empleado en el caso de la Sala Diplomática del Palacio Real de Nápoles ha sido el resistógrafo. Una aguja de perforación, con un diámetro de 3,00 mm, penetra en el objeto de madera con una velocidad de avance constante y se mide la resistencia a perforación. Una impresora conectada imprime los datos al instante a escala 1:1 (fig. 5). Existen programas informáticos específicos que permiten crear perfiles de medición para analizar y catalogar rápidamente los datos recogidos.

Es importante saber el contenido de humedad en cada elemento de la estructura y cómo varía el contenido de agua en la madera según la dirección radial y longitudinal del mismo elemento. El contenido de humedad de la madera se determinó a través de un higrómetro eléctrico portátil. El conocimiento del contenido de humedad de la madera es importante porque es un factor limitante para el desarrollo de hongos e insectos xilófagos.

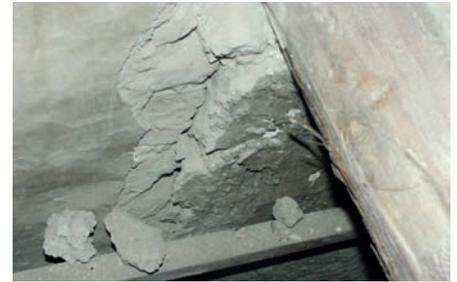
Esto significa que para cada situación de servicio, existen algunas condiciones termo-higrométricas favorables o desfavorables para descomposición biológica de la madera. A fin de establecer la clase de riesgo de ataque biológico, la normativa EN 335 identifica cinco tipos de ataque biológico y cada clase se define por su situación de servicio y las condiciones de humedad de la madera.



5

5. Ejemplo de tabla del resultado ofrecido por el resistógrafo en una jácena (en abscisas la amplitud en % y en ordenadas la profundidad en cm).

6. Lesiones por cizalladura en el muro debido a la reducida superficie de apoyo de la jácena.



6

### Dendrocronología

Las muestras para el análisis dendrocronológico se extrajeron de las jácenas horizontales y de la gran cercha central. Se utilizó una barrena de Pressler para obtener una muestra de forma no destructiva, al menos desde el punto de vista estructural, ya que esta herramienta puede extraer un testigo cilíndrico de sólo 0,5 cm de diámetro. En dos ocasiones se utilizó un taladro eléctrico. Al final del proceso de toma de muestras, muchos de los testigos se revelaron fragmentados en varios puntos a pesar de las precauciones tomadas. En algunos casos fue posible reconstruir completamente la muestra en el laboratorio; en otros, los anillos se midieron sólo en el área donde el testigo estaba intacto para excluir errores debidos a la pérdida de pequeños fragmentos de madera. En cualquier caso, las partes restantes de las muestras permitieron una estimación de la cantidad total de anillos medidos con el sistema LINTAB (Linear Positioning Digitizer Tablet).

Los datos se procesaron con los programas PAST4 y TSAPWIN. En total se recogieron 18 muestras de 12 vigas diferentes. Las muestras fueron analizadas en

el laboratorio y se generaron un total de 12 cronologías individuales. En algunos casos, las cronologías fueron promedios calculados a partir de más de un testigo. Se eligió este enfoque para limitar los problemas causados por el muestreo accidental de madera con tendencias anulares extrañas como la presencia de nudos, lesiones, madera de reacción, etc.

### RESULTADOS

Se analizaron 87 elementos estructurales tanto visual como instrumentalmente según la normativa UNI 11119.

### Defectos originales

El análisis visual de las anomalías que afectan sensiblemente a las prestaciones mecánicas de los elementos muestra que los antiguos carpinteros hicieron una buena elección del material utilizado: la presencia de nudos es más bien baja y, en su mayoría, sus dimensiones medias son bastante reducidas.

La madera de castaño empleada planteó a los carpinteros varios desafíos específicos a resolver. En primer lugar, los troncos son pequeños y no completamente rectos, con un importante estrechamiento

longitudinal, por lo que no se pudo cubrir todo el espacio y fue necesario acoplar dos vigas. De todos modos, éste era el material disponible y la estructura no estaba pensada para estar a la vista.

En segundo lugar, el defecto estructural más importante y recurrente en el castaño es la llamada acebolladura, que consiste de un agrietamiento tangencial de la madera que sigue la forma del anillo de crecimiento y que puede hacer que una sola viga se divida en dos cuando el agrietamiento sigue la totalidad de un anillo de crecimiento. En la estructura estudiada se han encontrado únicamente 9 elementos afectados por ese defecto (poco menos del 10% del total), y sólo en un caso el defecto invalida a la viga para usos estructurales.

### Defectos de diseño

El análisis de las cabezas de las vigas mostró un defecto de diseño de la estructura, no relacionado con los problemas de la madera. La superficie de apoyo de los elementos de madera en uno de los dos muros no era suficiente y por esta razón, debido a la sobrecarga de los apartamentos, el muro mostraba lesiones causadas por el esfuerzo concentrado (fig. 6).

### Problemas ocurridos durante la vida útil de la estructura

Durante la vida útil de una estructura de madera pueden surgir dos tipos de problemas: un ataque biótico de insectos y hongos con consecuente reducción de la sección de los elementos proporcional a la intensidad del ataque, y daños mecánicos como roturas, desconexiones, etc., causados por la mala elección de los elementos de madera, mal diseño, sobrecargas, etc. Desde el punto de vista de los ataques bióticos, se ha registrado la presencia de antiguos ataques en el pasado de insectos anópidos y termitas. En ambos casos destruyeron sólo la albura de los elementos de castaño, afectando menos de 1 cm en la superficie exterior (fig. 7). Además, en la mayoría de los casos la albura había sido previamente eliminada en el proceso de escuadrado de la madera. Aunque patentes, estos ataques de insectos no causaron ninguna reducción de las prestaciones mecánicas de los elementos de madera (fig. 8).

Por otra parte, durante la inspección se registraron importantes ataques de hongos. Los hongos pueden destruir madera sólo cuando el contenido de humedad de la madera está por encima del 18-20%, de modo que en estructuras de madera internas a los edificios se registran ataques de hongos sólo cuando la madera absorbe humedad a través de la infiltración de lluvia, la presencia de agua en el apoyo en los muros, la condensación de vapor, etc. Un caso típico son las cabezas de las vigas de madera insertadas en las paredes laterales, que son atacadas por hongos, debido a la presencia de humedad transportada por el mismo muro.

En la estructura de madera de la Sala Diplomática se descubrió en muchos elementos de madera un considerable antiguo ataque de hongos causado por la infiltración de lluvia cerca del muro

septentrional. En la cercha central, las cabezas del tirante y del par septentrional (fig. 9) quedaron completamente destruidas, anulando su función sustentante del área central de las jácenas horizontales. Además, dos de las jácenas horizontales cerca de la pared afectada estaban casi totalmente deshechas hasta el punto de no ser ya aptas para usos estructurales.

En las zonas de las vigas que se hallaban directamente debajo de las cocinas y los baños de los antiguos apartamentos se descubrieron ataques menos graves, pero todavía activos. Las infiltraciones de agua fueron absorbidas por la madera de modo que el ataque de hongos pudo comenzar. Sin embargo, la madera de castaño es bastante resistente, por lo que en la mayoría de los casos el ataque afectó sólo parcialmente la superficie de los elementos, sin causar una importante reducción de la resistencia mecánica. El contenido de humedad registrado en algunas cabezas de las vigas apoyadas en el muro occidental fue bastante alto debido a la presencia de un baño en la cara opuesta del muro. El problema debía resolverse a fin de evitar un futuro ataque de hongos sobre esos elementos (fig. 10).

Desde el punto de vista mecánico, se encontró una viga rota junto a una importante sobrecarga que actuaba en un punto con una cantidad anómala de nudos y cerca de una importante acebolladura. La resistencia, menguada por estos defectos, era probablemente suficiente para sustentar la carga limitada de la bóveda, pero no la sobrecarga de un apartamento dúplex. Por último, considerando las articulaciones y conexiones desde el punto de vista mecánico, se observó que muchos de los grandes clavos de forja se perdieron sin que se pudiera afirmar nada acerca de cómo y cuándo esto sucedió. Esta falta de clavos restaba eficacia al acoplamiento de las vigas en el medio del vano.

7. Indicios de ataques de insectos xilófagos en el pasado que afectaron a la parte más superficial de las vigas

8. En azul, las vigas atacadas por insectos.

9. Encuentro entre par y tirante de la cercha totalmente deshecho por un ataque de hongos.

10. En rosa, las vigas atacadas por hongos. A la izquierda, corresponden a la lluvia que cayó desde el techo, a la derecha, en la parte superior, corresponden con la cocina de los apartamentos y abajo con el baño.

### Evaluación global

La información recogida según lo descrito en los capítulos anteriores permite dos evaluaciones globales: la clasificación estructural de los elementos y la detección de algunos problemas generales de la estructura.

### Clasificación estructural

La evaluación de los defectos estructurales, de la intensidad de los ataques bióticos y de los daños mecánicos permitió la clasificación estructural de cada elemento de la estructura de madera aplicando la tabla de clasificación contenida en la norma italiana UNI 11119 (tabla 2).

La clasificación se realizó para cada jácena horizontal, que se consideraron como un único componente estructural a pesar de ser compuestas. Además, también se dividieron en tres diferentes sectores a tenor de las cargas recibidas y según lo que establece la norma UNI 11119 para la división de elementos estructurales en zonas críticas. De este modo, se clasificaron dos sectores desde cada muro hasta los tornapuntas y, por separado, la porción central entre los extremos de los tornapuntas.

Se ha considerado que el diseñador que concibió la estructura tuvo en cuenta la debilidad de la parte central, donde las secciones son más pequeñas, los defectos de la madera son mayores y donde se garantiza el acoplamiento de las dos partes sólo gracias a algunos clavos. Por esta razón decidió sostener esta zona central con una cercha perpendicular, cuyo tirante está cosido en muchos puntos con pletinas de hierro a las jácenas inferiores. Como consecuencia de este criterio, los 87 elementos originales se dividieron en 124 secciones que fueron objeto de clasificación. Sólo 9 elementos considerados (7,3%) fueron considerados no aptos para usos estructurales. El resumen de la clasi-

ficación estructural se detalla en la tabla 3. Los resultados de la clasificación confirmaron que la elección de los troncos adecuados para las jácenas fue correcta, porque la suma de elementos pertenecientes a los grados I y II constituía el 60% del total. Esto significaba que el material de base objeto de restauración poseía buena calidad y que la restauración podía adquirir un sesgo fundamentalmente conservativo. El proyectista obtendría todos los datos útiles para la restauración estructural de la tabla de clasificación de cada elemento y del perfil de resistencia de cada especie y categoría (tabla 4).

### Problemas generales

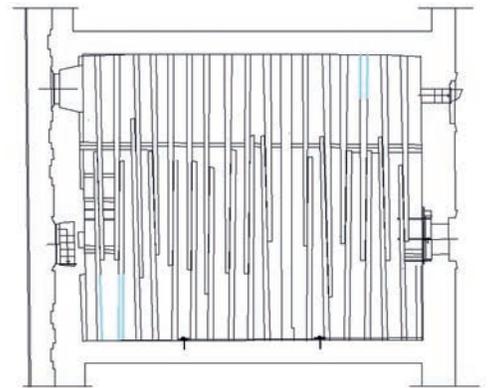
El conjunto de la estructura sufría una elevada deformación en la zona central de las jácenas debida tanto a la sobrecarga de los apartamentos como a la falta de apoyo de la cercha central.

Si desde un punto de vista se podía afirmar que la estructura, concebida para sostener exclusivamente la bóveda encajonada, estaba sobredimensionada, por otra parte está claro que no fue concebida para apoyar los dos apartamentos dúplex de carácter más reciente. Además, el ataque de hongos en la cercha central, antecedente a la construcción de los apartamentos, no sólo le restó eficacia anulando su función de sujeción, sino que también la convirtió en una sobrecarga para el sistema de jácenas horizontales.

La consecuencia fue una importante deformación de la parte central del sistema de jácenas (fig. 11), donde el esfuerzo de flexión es mayor. Esta deformación se vio agravada también por la pobre conexión con clavos de forja de los dos elementos que componen cada jácena. Por tanto, el mayor problema para la restauración del forjado consistió en la recuperación de esa deformación con el fin de devolver la horizontalidad al sistema de jácenas.



7

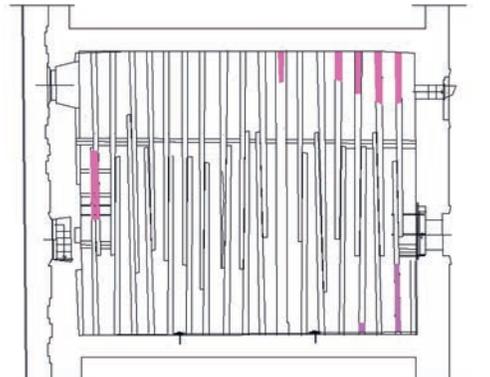


8

9



10



Características	Evaluación in situ		
	I	II	III
Reducción	1/8	1/5	1/3
Varios daños			
Grietas por heladicidad	ausente	ausente	Admisibles solo si son limitadas
Separación tangencial			
Nudos aislados	≤1/5 ≤50mm	≤1/3 ≤70mm	≤1/2
Grupos de nudos	≤2/5	≤2/3	≤3/4
Inclinación del grano en la sección radial	≤1/14 (-7%)	≤1/8 (-12%)	≤1/5 (20%)
Inclinación en % en la sección tangencial	≤1/10 (10%)	≤1/5 (20%)	≤1/3 (-33%)
Fendas	Admisibles si no atraviesan el núcleo		

Tabla 2. Tabla de evaluación in situ de los elementos de madera (from UNI 11119).

Código	Especies	Anillos medidos	Nº anillos totales estimados
7A	castaño	18	24
4B	castaño	10	26
10A	castaño	9	20
14B	castaño	25	27
2B	castaño	30	30
12B	castaño	26	27
13A	castaño	29	33
4A	castaño	26	30
7B	castaño	30	30
Tie	castaño	18	22
LBoard	castaño	11	12
11A	abeto	167	200

Tabla 5. El material investigado por dendrocronología.

Especies	Evaluación in situ	Esfuerzos máximos (N/mm <sup>2</sup> )					
		Compresión		Flexión	Tracción paralela a la fibra	Cortante paralelo a la fibra	Flexión MOE
		Paralela a la fibra	Perpendicular a la fibra				
Abeto europeo	I	11	2,0	11,5	11	0,9	13000
	II	9	2,0	10	9	0,8	12000
	III	7	2,0	7,5	6	0,7	11000
Castaño	I	11	2,0	12	11	0,8	10000
	II	9	2,0	10	9	0,7	9000
	III	7	2,0	8	6	0,6	8000

Tabla 4. Esfuerzos máximos permitidos en la aplicación del método de esfuerzos admisibles y módulo de elasticidad medio de las dos especies de madera encontradas en la estructura (aplicable para un contenido de humedad del 12%).

Grado	nº de elementos	%
I	29	23,4
II	47	37,9
III	39	31,4
N.S.	9	7,3

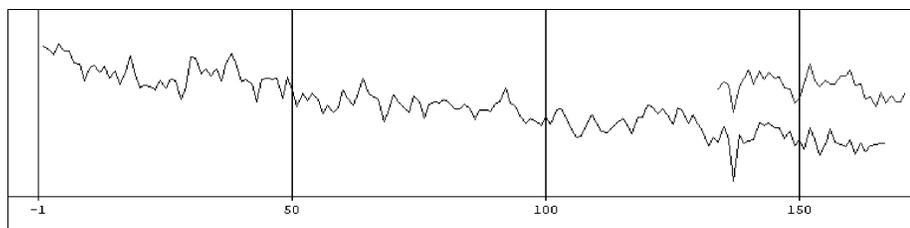
Tabla 3. Resumen de la evaluación estructural de los elementos.

Serie	Año	T <sub>BP</sub>	T <sub>HO</sub>	GIk
Abeto	1704	4,31	5,79	52,70*

Tabla 6. Parámetros de datación cruzados entre el abeto y el castaño.



11. El elemento horizontal en el fondo brinda una idea de la deformación del conjunto de jácenas en primer plano.



12. La serie más larga pertenece al abeto, la más corta al castaño. La comparación muestra una alta correspondencia en el crecimiento de los anillos de los árboles.

### Datación dendrocronológica

El trabajo de datación dendrocronológica fue bastante difícil a causa del escaso número de anillos presentes en las piezas de castaño que, como especie, se adaptaba poco a este tipo de estudios también por la falta de una cronología de referencia para el centro Italia (tabla 5). La investigación sobre las 11 vigas de castaño y la única viga de abeto se llevaron a cabo por separado. La cronología de la gran viga de abeto europeo fue construida usando la media de tres muestras y no hubo ningún problema para determinarla porque los tres testigos utilizados provenían del mismo árbol y no se observaron anomalías particulares como anillos faltantes o falsos anillos. Esta cronología se extendió por más de 167 anillos.

Las cronologías del castaño también se sincronizaron con éxito, obteniendo una media de sólo 38 años. Las vigas de castaño se obtuvieron de árboles de la misma edad, con la excepción de la rama utilizada como viga de refuerzo, que tenía sólo 12 años de edad. De todo ello se pudo deducir que el material provino probablemente de un cepo de castaño con una rotación de alrededor de 12 años, que fue cortado en su mayor parte después de 2 o 3 rotaciones, correspondientes a 24-36 años. La escasa fiabilidad estadística derivada del escaso número de anillos fue contrarrestada por la uniformidad general de las curvas, y confirmada también gracias a la buena sincronía visual observada en el material. Todo el material, incluyendo los elementos en la cercha, resultó ser de origen análogo. En particular, la trayectoria de la curva correspondiente al tirante de la cercha fue significativa y resultó bien sincronizada con la cronología media. También las cronologías del castaño y del abeto aparecían sorpren-

dentamente bien sincronizadas (tabla 6). La datación absoluta de la estructura (castaño + abeto) en 1708 fue significativa desde un punto de vista estadístico cuando se cruzó con la cronología de la haya en Italia central y del abeto europeo en el área de Monti della Laga en el sur de Italia.

La estrecha analogía entre las cronologías del castaño y del abeto condujo a la presunción de un contexto ecológico similar para ambas especies (fig. 12). Quizás los troncos provenían del mismo bosque. De hecho, en los Apeninos, los abetos tienden a descender hasta la base de la montaña, donde se mezclan con el roble de Turquía y el castaño. En particular, los bosques donde el abeto europeo crece espontáneamente a la sombra de castaños son típicos del sur de Italia. Así que el material podía provenir de cualquiera de los bosques de castaño con presencia de abeto que se encuentran en las montañas de las regiones interiores alrededor de Nápoles, lo que explicaría el crecimiento muy similar evidenciado en las dos cronologías.

El factor más incierto en este momento sigue siendo la fecha absoluta de la estructura, dada la falta de cronologías de referencia de larga duración para las dos especies en la zona considerada. Se podrían añadir algunos años a la fecha supuesta de 1708 para compensar los anillos perdidos cuando se procesó el material para la construcción o cuando se tomó la muestra dendrocronológica. También se debe sumar a la fecha un período de 1-2 años de antigüedad de la madera, años que pueden pasar desde el momento del corte del árbol hasta la ejecución del forjado.

Como resultado, los elementos de madera de esta estructura podrían ser de las primeras décadas del siglo XVIII. Estas deducciones confirmaron que las difere-

tes partes de la estructura eran concordes en el tiempo y que no se habían realizado importantes reparaciones en épocas sucesivas. La fecha resultante encaja bien con los frescos de la bóveda, pintados en 1738 por Francesco De Mura.

## CONCLUSIONES

El método diagnóstico descrito permite proyectar las intervenciones de restauración. Por un lado sería necesario reparar los pocos elementos no aptos para usos estructurales: la viga rota y las vigas masivamente atacadas por hongos con el fin de recuperar las características originales del material estructural. A continuación se deberían reforzar las conexiones menos eficaces en las jácenas compuestas. Otro aspecto sería la restauración de la cercha y su conexión con el forjado. La gran deformación en las vigas horizontales hará difícil esta operación.

El proyecto de restauración incluiría también un programa de mantenimiento a través de inspecciones visuales al menos dos veces al año y pruebas de la eficacia de las intervenciones. Estas inspecciones visuales controlarían la eventual presencia de insectos xilófagos, con especial atención a las peligrosas termitas, así como el contenido de humedad de madera cerca de los muros de apoyo, a fin de controlar y minimizar el ataque de hongos.

El caso que se ha descrito confirma que el diagnóstico es un requisito eficaz de la restauración y que puede mejorar la calidad de su diseño y, principalmente, la probabilidad de su éxito en el futuro ya que reduce los eventos inesperados durante las obras de restauración. 🏠

## NOTAS

1. UNI 11119 - Patrimonio Cultural - Estructuras de madera - Estructuras de carga de los edificios – Inspección in situ para el diagnóstico de los elementos en obra.

## BIBLIOGRAFÍA

- BERNETTI, G.: *Selvicoltura speciale*, UTET, Torino, 1995.
- BONAMINI, G.; UZIELLI, L.; CECCOTTI, A.: “Sulla valutazione della resistenza meccanica del legno antico”, en *L’Edilizia*, 1991, 5(12):771-777.
- BONAMINI, G.: “Restoring timber structures- Inspection and evaluation”, en *Lecture D3: Timber engineering STEP2 – Design – Details and structural systems*, STEP/EUROFORTECH, Centrum Hout, The Netherlands, 1995, pp.D3/1-9.
- FONTI, P.; MACCHIONI, N.; THIBAUT, B.: “Ring shake in Chestnut (*Castanea sativa* Mill.): state of the art”, en *Annals of Forest Science*, 2002, 59 (2): 129-139.
- MACCHIONI, N.: “Inspection techniques for ancient wooden structures”, en *Structural analysis of historical constructions II* de ROCA, P.; GONZÁLES, J.L.; ONATE, E.; LOURENÇO, P.B. Editors, Cimne, 1998, pp. 149-162.
- MACCHIONI, N. & PIAZZA, M.: “Italian standardisation activity in the field of diagnosis and restoration of ancient timber structures”, en *Structural analysis of historical construction*, de LOURENÇO, P.B.; ROCA, P.; MODENA, C.; AGRAWAL, S.; Eds., New Dehli, 2006, pp. 395-404.
- PIOVESAN, G.; BERNABEI, M.; DI FILIPPO, A.; ROMAGNOLI, M.; SCHIRONE, B.: “A long-term tree ring beech chronology from a high-elevation old-growth forest of Central Italy”, en *Dendrochronologia*, 2003, 21(1): 13-22.
- SCHWEINGRUBER, F. H.: “Data archived at the World Data Center for Paleoclimatology Boulder Colorado USA”, en <http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/ftp-treering.html>, 1980.
- TAMPONE, G.; MANNUCCI, M.; MACCHIONI, N.: *Strutture di legno. Cultura, conservazione e restauro*, De Lettera, Milano, 2002.
- EN 334-1/2: *Durability of wood and wood-based products. Definition of hazard classes of biological attack*, General, 1993.
- UNI 11119: *Cultural heritage - Wooden artefacts - Load-bearing structures - On site inspections for the diagnosis of timber members*, UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione), 2004.