



Estudios científico-técnicos

Eugenio Fernández Ruiz, Esther Ontiveros Ortega, Marta Sameño Puerto, Centro de Intervención del IAPH. Dpto. Análisis

Rosario Villegas Sánchez, Dpto. Ingeniería Química y Ambiental, ESI, Universidad de Sevilla

En este capítulo se recopilan todos los estudios realizados por medio de técnicas científicas para caracterizar los materiales constitutivos de la rueda, desde el punto de vista de su estado de conservación, para identificar los agentes biológicos de deterioro y para evaluar el comportamiento de los diferentes productos consolidantes y su interacción con los materiales existentes en la obra. El estudio material de la rueda se ha realizado con técnicas no destructivas, la radiografía y la gammagrafía, que ha puesto en evidencia la constitución de las piezas que la forman, y con técnicas de análisis como la Difracción de Rayos X, la Espectrometría Infrarroja y la Microscopía Electrónica de Barrido con Microsonda de Rayos X, técnica que se ha utilizado también para estudiar la interacción de los consolidantes con el sustrato. La identificación de los agentes microbiológicos se ha llevado a cabo por Microscopía Óptica.

Scientific-technical studies

This chapter brings together all the studies performed using scientific techniques to characterise the materials employed in the construction of the wheel, in terms of their state of repair, in order to identify the biological agents responsible for their deterioration and to evaluate the behaviour of the different consolidant products and their interaction with the materials used. The material study of the wheel was performed using non-destructive techniques, radiography and gammagraphy, which enabled the identification of the different constituent pieces of the wheel, as well as analysis techniques such as x-Ray Diffraction, Infra-red Spectroscopy and Scanning Electron Microscopy with x-Ray Microprobe, a technique that was also used to study the interaction of the consolidant products with the substratum or supporting elements. The microbiological agents were identified by means of Optical Microscopy.

Introducción

El estudio de un bien cultural por medio de las técnicas científicas se basa en su caracterización material. La investigación sobre los materiales presentes en la obra (ya sea los que originalmente la componían o los que se han ido adicionando por la acción del hombre o de los agentes externos) proporciona evidencias importantes que permiten reconstruir toda su historia, incluso desde antes de que fuera construida.

De esta forma se puede llegar a conocer la procedencia de los materiales (por ejemplo, canteras de extracción de piedra o especies arbóreas que proporcionaron la madera), las técnicas de ejecución de la obra, los factores externos a los que ha estado sometida y las transformaciones o alteraciones que han producido en ella (incluyendo aquí la intervención humana en forma de reparaciones o restauraciones).

Todos estos datos se pueden utilizar con diferentes finalidades, que se pueden englobar en dos grandes objetivos: conservación de la obra y conocimiento histórico, en ambos casos contemplándolo en el sentido más amplio posible. En la mayoría de los casos, una misma técnica de estudio puede cubrir ambos aspectos, la diferencia puede estar en la forma en que se analicen e interpreten los resultados.

En el primer grupo se pueden incluir todas aquellas determinaciones que proporcionan información sobre los materiales (originales o añadidos) que están pre-

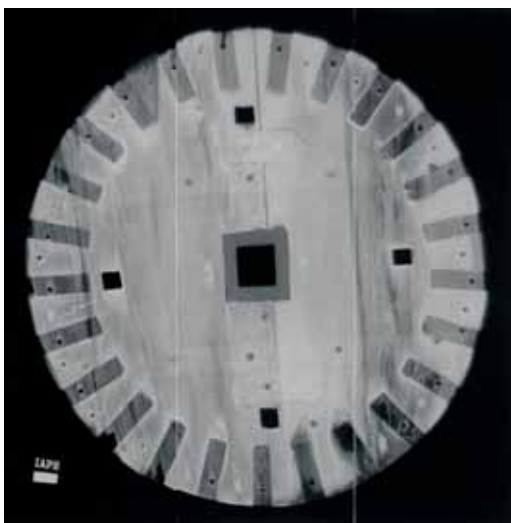
sentes en la obra en el momento del estudio y su estado de conservación, los agentes externos que actúan sobre ella, el comportamiento de los materiales o técnicas que se vayan a utilizar para la restauración y su compatibilidad con los que constituyen la obra y, por último, la evolución de la obra una vez finalizada su restauración.

El conocimiento histórico incluiría especialmente las técnicas de datación, que proporcionan la “edad” de la pieza, además de aquellas que hacen posible el estudio de su técnica de elaboración, la procedencia de los materiales, las transformaciones que haya sufrido como consecuencia del uso, las costumbres o el mismo abandono, ya que todos estos datos sirven para definir la historia de la pieza, pero más especialmente la historia de aquéllos que la han construido y utilizado.

Todas las técnicas de estudio se pueden dividir en dos grupos, según la relación que existe entre el instrumental que se utiliza para ello y la obra; de esta forma, se puede distinguir entre técnicas destructivas y no destructivas. En el primer caso es necesario tomar una muestra, es decir, un fragmento representativo de la obra y tan pequeño como sea posible, que se estudia con el método más adecuado a lo que se quiere determinar. En este grupo se incluiría la mayoría de las técnicas de análisis, entendiendo con este término la identificación de los materiales presentes en la obra y/o de su composición.

Las técnicas no destructivas se basan en la aplicación de energía a la obra (normalmente como radiación electromagnética, pero también como energía mecánica) y la “observación” de la forma en que esta energía interacciona con ella. Aquí se consideran los denominados métodos de examen, ya que, en la mayoría de los casos, se obtiene una imagen de la estructura física de la obra.

En el caso de la rueda, la aplicación de las técnicas científicas se ha realizado para dar respuesta a todos los objetivos planteados. De cara a la conservación de la obra, se ha estudiado la estructura física de las piezas que la componen por medio de la radiografía y la gammagrafía, técnicas de examen global no destructivas; también se han analizado por Espectrometría Infrarroja, Difracción de Rayos X y por Microscopía Electrónica de Barrido con Microsonda de Rayos X los compuestos cristalinos que se han ido depositando en los poros de la



1. Radiografía del disco central. Imagen: Eugenio Fernández Ruiz (IAPH)

madera durante el tiempo que la rueda ha estado enterrada en el interior de la mina, además de otros depósitos superficiales. Los agentes microbiológicos causantes de deterioro (varios tipos de hongos) se han identificado con Microscopía Óptica. Por último el efecto de los consolidantes de madera a aplicar durante la restauración sobre los minerales depositados en los poros se ha evaluado realizando aplicaciones controladas y estudiando las muestras con técnicas de microscopía.

La información de tipo histórico se ha incluido en otro capítulo, teniendo en cuenta su importancia dentro del Proyecto.

Estudio radiográfico y gammagráfico

La mayoría de los métodos de examen se basa en la aplicación de radiación electromagnética, que interacciona con la obra de distinta forma según sea la longitud de onda de dicha radiación. Las radiaciones de mayor longitud de onda (infrarrojo, visible y ultravioleta) se reflejan en su mayor parte, y la observación (bien directa, bien con instrumental específico) de esta radiación reflejada permite el estudio de la superficie de los objetos. Los rayos X tienen una longitud de onda menor que la radiación UV y coinciden en parte con los rayos gamma. Por su pequeña longitud de onda, en ambos casos tienen una altísima energía, por lo que son capaces de atravesar los objetos en distinta forma según la densidad de los materiales que estén presentes. La detección de esta radiación que atraviesa el objeto proporciona información de todo el volumen del mismo, no sólo de la superficie. Este es el fundamento de la realización de radiografías y gammagrafías. La diferencia entre ambas técnicas se debe a que los rayos gamma pueden alcanzar mayores energías que los rayos X producidos en los equipos convencionales, por lo que su uso es necesario en el caso de materiales muy absorbentes, como el metal o la piedra. En el caso de la rueda, el eje de bronce ha debido ser estudiado con radiación gamma, ya que los rayos X no podían atravesarlo e impresionar una placa; las piezas de madera sí se han estudiado con esta última técnica.

Cuando un haz homogéneo de rayos X o gamma atraviesa un objeto, la radiación va perdiendo intensidad a medida que va siendo absorbida por los materiales que constituyen dicho objeto; esta absorción es diferente en función de los materiales que encuentra, por lo que la radiación que sale ya no es homogénea, y lleva en ella

de forma latente la imagen del objeto. Cuando incide sobre la película radiográfica, esta imagen latente la impresiona y, tras el revelado, queda de manifiesto.

Por tanto, la radiografía se puede considerar como la imagen de la sombra de un objeto que ha sido interpuesto en el recorrido de un haz de radiación entre la fuente y la película. En la imagen radiográfica las zonas claras (reciben menos radiación) corresponden a las partes de mayor espesor o densidad y las más oscuras (reciben más radiación) a partes menos densas y/o de menor espesor. También hay que tener en cuenta para la interpretación de radiografías que el objeto es atravesado en su totalidad y esto da lugar a una imagen compleja por la superposición de las diversas partes que lo componen.

Estudio experimental

Los parámetros más importantes en la realización de una radiografía son la tensión de aceleración, la intensidad de la corriente y el tiempo de exposición. Todos ellos están relacionados entre sí y dependen de los materiales y las dimensiones de la pieza y de la distancia a la que se coloca ésta de la fuente.

En el caso de la gammagrafía, se utiliza un isótopo radiactivo que emite este tipo de radiación, en este caso en concreto Iridio 132. La energía de la radiación emitida es característica del isótopo utilizado, es decir, no puede variarse a voluntad como en el caso de los rayos X. En este tipo de estudio, sólo puede controlarse el tiempo de exposición, que debe ser el suficiente para conseguir que la radiación atraviese la pieza.

Normalmente se realiza la radiografía del objeto en una sola toma, para lo cual se utiliza película continua que puede cortarse y prepararse al tamaño requerido para obtener la imagen completa. Dado que el haz de rayos X o gamma que sale de la fuente en ambos casos sólo cubre un ángulo reducido, es necesario alejar el objeto a una distancia tal que entre por completo dentro del cono de radiación. Tras el objeto se coloca la película, que debe estar lo más próxima posible, siendo deseable que estén en contacto. De esta forma se consigue que la imagen radiográfica tenga el mismo tamaño que la pieza y que sea mucho más nítida.

En el caso de obras en madera, la radiografía permite poner en evidencia su estado de conservación, pudiendo-

se observar la existencia de pudrición o galerías de insectos, la orientación de la veta de la madera, la posición y dimensiones de los sistemas o piezas de unión y la presencia de otro tipo de materiales de diferentes características, especialmente los metales de puntillas, clavos, etc. Si la madera tiene algún tipo de revestimiento, también es posible determinar su estado, continuidad, lagunas, etc.

En el caso de piezas metálicas se puede estudiar el estado interno del mismo, si está hueco o presenta algún tipo de discontinuidad, o las características del metal: porosidad, fisuración, o la presencia de zonas con corrosión.

En el caso de la rueda, no era posible (por sus grandes dimensiones) ni tampoco necesario efectuar la radiografía de todo el conjunto montado, de manera que se ha llevado a cabo de forma independiente para las distintas piezas que la componen. Debido a las distintas dimensiones de cada parte, las condiciones de trabajo han debido adaptarse a cada caso; para los radios y piezas constitutivas de los cangilones, de mucho menor tamaño y espesor, se han aplicado una tensión de 80 kV y una intensidad de 32 mAs, colocando la película a 1 metro de distancia del foco-película y manteniendo 1,2 segundos de tiempo de exposición. Los discos centrales, de mayores dimensiones, han requerido una tensión de 100 kV y una intensidad de 40 mAs, a una distancia de 5,2 metros, exponiendo la obra durante 40 segundos.

En la figura 1 se muestra la radiografía de uno de los discos centrales. El primer hecho que llama la atención es el gran contraste que se observa en los poros de la madera, lo cual hace que se aprecie su veta mucho más de lo que es normal en este material. Ello se debe a la presencia de compuestos minerales en el interior de todos los huecos, los cuales son mucho más densos y absorbentes de la radiación que los componentes de la madera; por ello se distinguen en forma de puntos blancos dispersos en el interior de todo el disco. Esta observación se confirma con el estudio por microscopía electrónica y análisis por distintas técnicas instrumentales, que se explica en el apartado siguiente.

También se pueden determinar los diferentes aspectos constructivos de la pieza. Está constituida por dos partes de dimensiones semejantes, unidas con dos ensambles rectangulares tipo lengüeta colocados a contraveta y fijados con espigas de madera, de las que faltan algunas. En el montaje realizado en el Museo Provincial de Huelva

previamente a esta intervención, para reforzar esta unión se colocaron dos travesaños perpendiculares a la misma, que en la radiografía aparecen mucho más tenues ya que no presentan la mineralización de la madera original. Los huecos donde encajan los radios aparecen más oscuros, debido al menor espesor de la madera en esa zona; en cada uno de estos huecos se observan los orificios para las espigas de unión de los radios al disco, la mayoría de las cuales no están en su lugar, si bien en algunos casos sí se encuentran colocadas.

Originalmente no se utilizó ninguna pieza metálica para la construcción de la rueda, excepto el eje de giro; en la radiografía se aprecian algunas puntillas empleadas para la sujeción de las piezas en el montaje del Museo Provincial de Huelva. También se aprecian las piezas colocadas en el hueco central para reducir su tamaño, cuatro tacos de madera que se eliminaron posteriormente en la intervención. Puede apreciarse el aspecto completamente distinto de esta madera, que no se encuentra mineralizada.

No se ha encontrado ni se observa en la radiografía huecos del ataque de insectos xilófagos, posiblemente debido al ambiente en el que ha estado la rueda y a la existencia de estos compuestos minerales en los poros de la madera.

En la figura 2 se recoge un detalle de la radiografía de algunos de los radios. Igualmente se observa la mineralización presente en los poros de la madera, lo cual pone claramente de manifiesto la estructura de la misma. Están contruidos con la veta longitudinal en una sola pieza, aunque en este detalle se ha recogido una zona fracturada de uno de estos radios, fractura que se ha unido con puntillas para repararla.

En la figura 3 se recoge la imagen radiográfica de las piezas laterales de uno de los cangilones. El aspecto general de la madera es el mismo que en los fragmentos ya comentados, una presencia generalizada de

2. Detalle de la radiografía de algunos radios. Imagen: Eugenio Fernández Ruiz (IAPH)

3. Radiografía de pieza de cangilón. Imagen: Eugenio Fernández Ruiz (IAPH)

4. Aspecto de la costra desarrollada en la superficie de la madera. Imagen: Esther Ontiveros Ortega (IAPH)

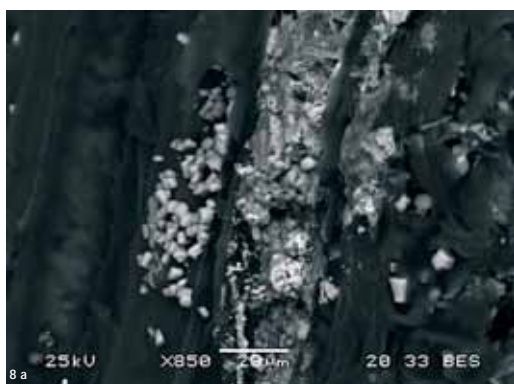
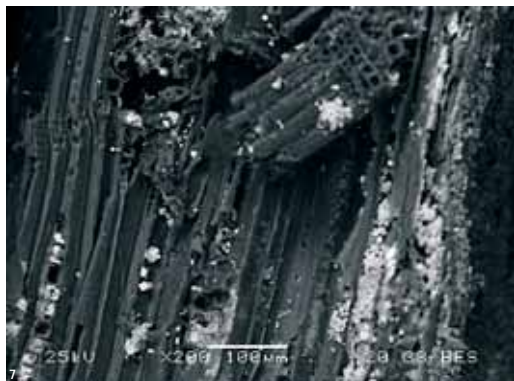
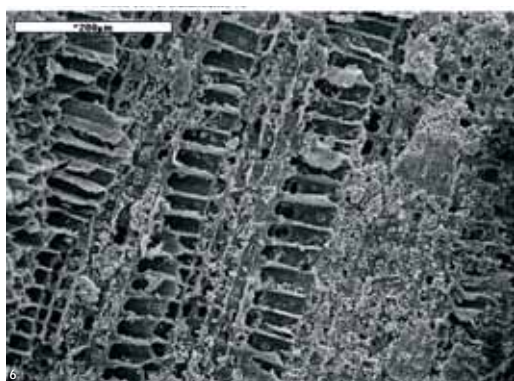
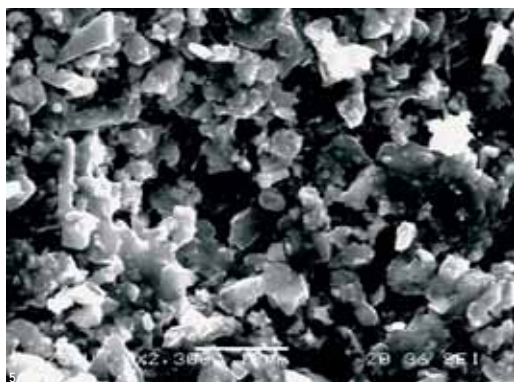
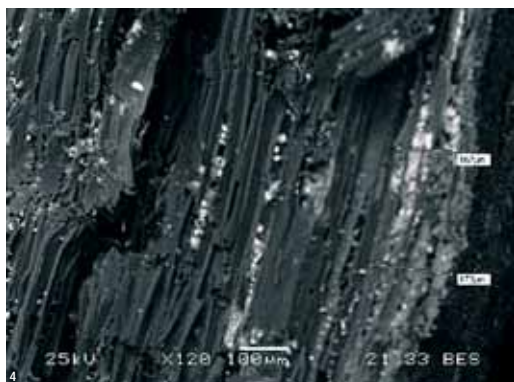
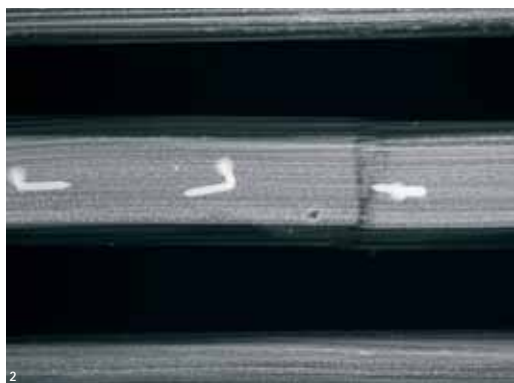
5. Aspecto superficial de la costra desarrollada sobre la noria. Imagen: Esther Ontiveros Ortega (IAPH)

6. Depósitos dispuestos paralelamente a la superficie de la madera. Imagen: Esther Ontiveros Ortega (IAPH)

7. Componentes inorgánicos dentro de los orificios de la madera. Imagen: Esther Ontiveros Ortega (IAPH)

8-a. Desarrollo de cristales de óxidos de cobre en el interior de la estructura de la madera. Imagen: Esther Ontiveros Ortega (IAPH)

8-b. Detalle de la figura 8. Imagen: Esther Ontiveros Ortega (IAPH)



MUESTRAS	DESCRIPCIÓN
Muestra 1	Muestra terrosa de color marrón extraída del eje de bronce
Muestra 2	Depósito superficial verdoso desarrollado sobre la rueda (madera). Cangilón C-25
Muestra 3	Costra verdosa desarrollada sobre el eje de bronce
Muestra 4	Costra extraída de la madera. Anverso del disco "trasero"
Muestra 5	Costra verdosa extraída de la madera. Reverso del disco "delantero"
Muestra 6	Depósito pulverulento extraído del interior del cangilón C-15
Muestra 7	Depósito superficial desarrollado sobre el eje de bronce
Muestra 8	Recubrimiento oscuro de la tabica del cangilón C-25

Tabla 1. Descripción de las muestras

MUESTRA	CUARZO	FILOSILICATOS	ÓXIDOS DE FE (Ilmenita + Hematites + Magnetita)	FELDESPATOS	CARBONATOS (magnesita+ malaquita+ siderita)	SULFUROS Y ÓXIDOS DE COBRE
Muestra 1	60%	25%	5%	Indicios	-	Indicios
Muestra 2	10%	10%	29%	Indicios	45%	Indicios
Muestra 6	60%	25%	5%	Indicios	-	Indicios
Muestra 7	10%	10%	30%	Indicios	50%	Indicios

Tabla 2. Composición mineralógica por difracción de rayos X

compuestos inorgánicos en los poros, que se han concentrado en los huecos dejados por las espigas que se emplearon para construir el cangilón. Esta mineralización permite apreciar perfectamente la morfología de la madera, como los nudos, y su estado de conservación, viéndose una fisura en el fragmento de la zona superior de la imagen.

Además de estas partes, se han radiografiado otros radios y varias de las piezas que componen los cangilones, con resultados semejantes a los aquí descritos.

La gammagrafía del eje se ha realizado con la intención de determinar su estado interno y la técnica de elaboración. En el eje se aprecia una hendidura en su perímetro en sentido transversal con una profundidad de unos 3 milímetros, que se encuentra sellada con plomo, reparación que parece original. Con la imagen gammagráfica se ha pretendido aclarar si esta hendidura afecta a todo el eje o es sólo superficial.

Se ha irradiado la pieza con Iridio 132 con un tiempo de exposición de 2 minutos. En la imagen se ha podido determinar que es una pieza maciza sin ningún cuerpo diferente en su interior. En el extremo del eje se observa una textura muy porosa e irregular, mientras que en la zona central el metal es mucho más homogéneo. Esto es explicable si se considera que, en la fabricación, el metal fundido se ha vertido desde la parte central del eje, de manera que al llegar al extremo se ha enfriado y

se producen burbujas y poros. No se aprecia que la fisura afecte a todo el espesor del eje, sino que es muy superficial, posiblemente debido al enfriamiento diferencial de la colada de metal.

Análisis de los depósitos desarrollados en la madera

Esta parte del estudio se ha centrado en el análisis de los depósitos y costras de alteración desarrolladas sobre el material base de la rueda. Mayoritariamente se trata de materiales inorgánicos procedentes del ambiente en el que ha estado, si bien se ha analizado también un recubrimiento superficial orgánico.

El hecho de que la rueda haya permanecido enterrada en el subsuelo de la formación minera hasta su descubrimiento, a principios del siglo pasado, ha favorecido la interacción con el material del entorno (estériles y residuos de la explotación minera) muy ricos en diversos minerales a base de cobre, cinc, plomo, antimonio, hierro, manganeso y azufre, con el consiguiente desarrollo de costras y depósitos superficiales, tanto sobre la madera de la rueda como en el eje metálico. El análisis de estos materiales ha permitido conocer su composición, cómo están interactuando con el sustrato y cómo están incidiendo dichos depósitos en su deterioro, tanto de la madera como del metal.

Material y método

Para el análisis de las costras y depósitos observados en la rueda, se ha extraído un total de 8 muestras cuya descripción se indica en la tabla 1.

Teniendo en cuenta las características de las muestras 1 a 7, depósitos superficiales disgregados o costras adheridas a los sustratos, las técnicas de análisis más idóneas para su estudio son la difracción de rayos X, microscopía electrónica (SEM) y microanálisis con EDX. La muestra 8, con apariencia de material orgánico, se ha analizado por espectrometría infrarroja (FTIR).

Difracción de rayos X. Con esta técnica se han identificado los componentes mineralógicos de los depósitos superficiales y costras de alteración desarrolladas sobre la rueda.

La técnica consiste en medir el ángulo de difracción de un haz monocromático de rayos X, que se hace incidir sobre la muestra (molida finamente y mezclada para obtener datos lo más representativos posibles). Los ángulos a los que se produce esta difracción son característicos de los compuestos cristalinos presentes en la muestra. Se ha empleado el método de polvo cristalino para muestra total, con el que se obtiene la composición mineralógica semicuantitativa.

Microscopía electrónica de barrido. Con la finalidad de conocer la morfología de los componentes mineralógicos que constituyen las costras de alteración y su interacción con el sustrato (madera y bronce) se procedió al análisis mediante el SEM y EDX.

Cuando se hace incidir un haz de electrones de elevada energía sobre un sólido, se produce una serie de interacciones que da lugar a la emisión de distintos tipos de radiaciones. Para el análisis cualitativo elemental se utilizan los rayos X producidos en la muestra, que se recogen en un detector de energía, obteniéndose el espectro característico de los átomos presentes en el sólido. De este modo, se tiene información sobre la composición elemental de la muestra.

Esta técnica presenta las siguientes ventajas:

* Es extraordinariamente sensible a la hora de captar componentes minoritarios.

	COLONIAS BACTERIANAS	COLONIAS FÚNGICAS
R.H1	+	-
R.H2	+	+
R.H3	+	-
R.H4	+	-
R.H5	-	-
R.H6	-	-
R.H7	-	+

Tabla 4. Presencia de microorganismos en las muestras

MUESTRAS	SITUACIÓN
R.H1, R.H2, R.H3, R.H4	Reverso tapas "trasero"
R.H5, R.H6	Anverso disco "delantero"
R.H7	Reverso disco "trasero"

Tabla 3. Localización de las muestras

* Es suficiente con disponer de una pequeña cantidad de sólido, siendo posible analizar distintas zonas de las muestras, lo que puede ser especialmente útil en el estudio de minerales en costras de alteración sobre materiales naturales o sintéticos de composición variable.

* Es posible analizar elementos pesados y/o ligeros, según la forma de preparación de la muestra que se use: recubrimiento con carbono u oro, respectivamente (en este caso las muestras se han preparado con carbono).

Espectrometría Infrarroja (FTIR). Esta técnica se basa en determinar la absorción de radiación de la zona infrarroja del espectro electromagnético por la muestra. La absorción se produce a determinadas longitudes de onda, que son características de diferentes compuestos, con lo cual el espectro de absorción de una muestra se utiliza para identificar sus componentes. Es una técnica muy empleada para el análisis de muestras orgánicas.

Resultados

Difracción de rayos X. Con esta técnica se han analizado los depósitos superficiales de aspecto pulverulento extraídos de la superficie de la rueda y del eje metálico; los resultados se indican en la tabla 2.

De los resultados se deduce que, dependiendo de la naturaleza del sustrato sobre el que se desarrollan

estos depósitos y costras, se pueden distinguir dos tipos de material:

a) Depósitos superficiales desarrollados sobre la madera. Se trata de material compuesto mayoritariamente por cuarzo y filosilicatos con indicios de óxidos de hierro y feldespatos.

b) Costras desarrolladas sobre el eje metálico. Se trata de material compuesto mayoritariamente por óxidos, sulfuros y carbonatos de hierro y cobre.

Debido a las limitaciones que presenta esta técnica, no se detectan los compuestos que se encuentren en una proporción por debajo del 10% o los de naturaleza poco cristalina, es posible que aparezcan otros compuestos que no se han podido identificar.

Microscopía electrónica de barrido (SEM-EDAX). Con esta técnica se ha llevado a cabo la observación morfológica y el análisis elemental de las costras de alteración desarrolladas sobre la rueda de madera y el eje metálico.

La costra de alteración observada sobre la madera presenta un espesor variable en torno a 150 μm , que incluye la franja de penetración y depósito de los componentes inorgánicos sobre dicho sustrato, como puede verse en la figura 4.

Estas costras aparecen formando capas más o menos continuas desarrolladas paralelamente a la estructura fibrosa de la madera, cuyo aspecto superficial puede observarse en la figura 5. El análisis elemental por EDX indica que está compuesta fundamentalmente por silicatos (cuarzo y filosilicatos) y en menor proporción por sulfuros, óxidos y carbonatos de cobre, confirmando los resultados obtenidos por difracción de rayos .

El análisis puntual del área examinada revela la presencia de partículas terrosas y metálicas. Las primeras están compuestas por silicio, aluminio, potasio, hierro, calcio, magnesio, titanio, cobre y azufre, atribuibles a cristales de cuarzo, filosilicatos, óxidos y sulfuros/sulfatos de cobre; junto a estos compuestos se detecta la presencia de esferas de contaminación (con hierro y algo de azufre y cobre). Las partículas metálicas están compuestas de estaño, hierro y cobre, con cantidades significativas de fósforo y azufre.

Estas partículas inorgánicas tienden a introducirse en la estructura de la madera, colmatando o semicolmatando sus orificios; las figuras 6 y 7 muestran la disposición de estos componentes mineralógicos vista en dos secciones diferentes.

Las figuras 8-a y 8-b muestran el desarrollo de cristales de óxido de cobre rellenando los orificios de la madera y la figura 9 el desarrollo de un cristal de sulfuro de cobre de gran tamaño formando parte de la costra superficial.

Espectrometría Infrarroja. Con esta técnica se ha analizado la muestra 8, como se ha indicado de aspecto aparentemente orgánico. Se ha preparado dispersando la muestra tal cual (en forma sólida) en una matriz de bromuro potásico y utilizando un rango espectral de 4000 a 400 cm^{-1} .

Se ha determinado que la muestra está formada por colofonia, resina natural extraída de algunas especies de coníferas. La colofonia es uno de los componentes de la brea (sustancia bituminosa de color oscuro con propiedades impermeabilizantes, obtenida de la destilación de ciertas maderas y de carbones), por lo que su presencia en la muestra sugiere un posible tratamiento a base de brea para impermeabilizar los cangilones de conducción del agua.

Conclusiones

El análisis de la costra desarrollada sobre el eje metálico indica altos contenidos en cobre y, en menor proporción, azufre, atribuibles a cristales de óxidos, sulfuros/sulfatos y carbonatos de cobre localizados en la zona de contacto entre la madera y el eje. Estos componentes pueden proceder de las tierras del entorno o ser productos de la oxidación del cobre procedente del eje de bronce.

En el proceso natural de transformación del cobre, la cuprita (de coloración rojiza) es el primer mineral que se forma; posteriormente ésta se transforma en óxido cúprico, de tonalidad marrón oscuro, que actúa como una patina de protección del metal. Los sulfatos o sulfuros de cobre junto con los carbonatos presentan tonalidades verdosas y se forman sobre los óxidos de cobre. Aunque no se observan macroscópicamente, no se puede descartar la posibilidad de que existan cloruros, ya que el análisis por áreas llevado a cabo sobre las costras en la madera detecta pequeñas cantidades de este elemento.

Factores biológicos de deterioro: análisis microbiológico

La madera, como cualquier material de naturaleza orgánica, está sujeta a una degradación natural que depende de varios factores y, principalmente, de las condiciones ambientales a las que está sometida. Aunque, en general, la madera no se degrada sino que lo que se modifican son sus características de resistencia en el transcurso del tiempo. Los elementos estructurales de la madera “antigua” mantienen sustancialmente la misma resistencia que tenían en el momento en que se realizó la obra si no intervienen factores de degradación como organismos xilófagos, variaciones de humedad, acciones mecánicas, vibraciones, fuego, etc.

Los fenómenos de biodeterioro de los materiales orgánicos son causados por diversos organismos con características metabólicas diferentes. Los principales responsables son organismos heterótrofos como hongos, bacterias e insectos. Pocos de estos agentes de degradación tienen la capacidad de atacar todos los tipos de materiales, debido a su diferente composición química.

Material y método

Para determinar la presencia de microorganismos o insectos causantes de un posible deterioro se realizó una inspección visual de la obra y se tomaron distintas muestras de zonas con pudrición para su posterior análisis en el laboratorio, las cuales se recogen en la tabla 3.

Las muestras se tomaron en tubos estériles, para su posterior análisis y determinación. En este caso concreto se trata de detectar la presencia de posibles microorganismos causantes del deterioro del soporte. Para ello se realizaron los cultivos necesarios para su estudio, empleándose tres medios de cultivo diferentes: específico para hongos y levaduras, específico para bacterias y para microorganismos en general.

La técnica utilizada para la identificación se basa en el aislamiento en cultivos, que se realizan según la metodología normalizada. El cultivo del microorganismo en estudio se lleva a cabo sobre medio agarizado distribuido en placas de Petri y los análisis se realizan por triplicado y en condiciones estériles. La incubación se efectúa a la temperatura de 28°C en ambien-

te aeróbico durante un tiempo mínimo de 48 horas, al finalizar el cual se procede a la lectura de los resultados. Para los cultivos en medio sólido la verificación se realiza mediante la observación directa de la colonia que se ha desarrollado. La lectura de los resultados se efectúa comparando los cultivos obtenidos con los controles (no inoculados) para descartar la posibilidad de contaminación accidental. Las especies presentes se identifican por medio de microscopía óptica.

Resultados y discusión

En la tabla 4 se recogen los resultados de la observación de las muestras, indicándose en cuáles se han detectado microorganismos.

Tras el desarrollo de las colonias en el medio de cultivo, éstas se observaron al estereomicroscopio y al microscopio óptico, encontrándose micelios de hongos.

En las muestras tomadas del Reverso de las Tapas del Disco “Trasero”, se observó la presencia de hifas y esporas de *Cladosporium sp.*, además de colonias bacterianas. No se detectó crecimiento de microorganismos en las muestras tomadas del Anverso del Disco Delantero, concretamente de la zona con pudrición parda.

Sin embargo, se observaron colonias fúngicas en la muestra R.H7, tomada del Reverso del Disco “Trasero”. En concreto se identificaron tres géneros de Hongos Imperfectos o Deuteromicetes (Hyphomicetes): *Alternaria*, *Penicillium* y *Aspergillus* (figuras 10, 11 y 12).

Alternaria sp.

Forma colonias grises, pardas o negras. Consta de micelio inmerso o parcialmente superficial, hifas incolores, pardo-oliváceas o pardas. Los conidióforos pueden ser macronematosos, mononematosos, simples, pardos, septados, y los conidios pueden ser encadenados o solitarios, de forma variable, septados transversal y longitudinalmente, pardos o pardo-oliváceos, lisos o verrucosos.

Penicillium sp.

Se caracteriza por poseer conidióforos (estructuras fructíferas o reproductoras), de los cuales, sus últimas ramas son filídes verticiladas (también llamadas esterigmatas). Las penúltimas ramas se denominan métulas. El pie o estipe, a veces, es llamado conidióforo. Los filídes forman cadenas de conidios (esporas). Los con-

dios de algunas especies forman en su superficie una ornamentación en la fase de maduración, tras separarse del conidióforo.

Aspergillus sp.

Posee colonias delimitadas, de coloración variada, a menudo verdosas o amarillentas, a veces marrones o negras. Micelio en parte inmerso, en parte superficial. Conidióforos macronematosos, mononematosos, incolores o con la parte superior parda, ápice terminado en una vesícula esférica o clavada, cuya superficie está recubierta por pequeñas ramas o filídes. En el caso de que posea ramas, éstas están en una o varias series, dependiendo de la especie, y la rama terminal siempre es una filíde. Conidios formando cadenas, esféricos, de coloración variada, lisos, rugosos, verrugosos, etc.

Los hongos son organismos microscópicos que destruyen la pared celular de la madera y la cohesión de los tejidos, reduciendo su resistencia mecánica. Además, causan un daño químico a los soportes en los que se desarrollan debido a las sustancias que excretan al exterior, así como una acidificación del material que colonizan. Por otro lado, debido a la emisión de pigmentos por parte de estos microorganismos, se observa también un deterioro estético de la obra. Un tipo de alteración de la madera causado por hongos (*Aspergillus*, *Penicillium*,...) es el desarrollo de manchas como consecuencia de la producción de pigmentos.

También se detectaron varios focos de pudrición parda en distintas estructuras de la Rueda. Tras la realización de los análisis microbiológicos se comprobó la presencia de colonias fúngicas responsables de esta alteración, en concreto Deuteromicetos del género *Alternaria*.

En el caso de este tipo de pudrición, los hongos atacan sólo la celulosa y las cadenas cortas de polisacáridos, dejando residuos pardos de lignina por lo que la madera se muestra más oscura. Por otro lado, el hongo ataca la estructura de la pared celular por lo que la madera se vuelve blanda y esponjosa y, cuando se seca, muestra una ruptura típica en forma de cubos.

Las obras de interés histórico-artístico y arqueológico realizadas en madera raramente están sometidas a un deterioro estructural causado por los hongos responsables de la pudrición. Se puede decir que esto sólo ocurre si las condiciones de conservación son muy

desfavorables durante un largo periodo de tiempo (humedad relativa elevada, contacto con el suelo y escasa ventilación).

Las bacterias y los actinomicetos son menos frecuentes que los hongos en el deterioro de la madera, puesto que estos microorganismos requieren para su desarrollo un alto contenido de agua en el material. Por tanto, juegan un papel importante en el deterioro de maderas enterradas o sumergidas. Las bacterias pueden dañar la estructura de la pared celular e incrementar la permeabilidad, así como favorecer la colonización de otros microorganismos deteriorantes.

Evaluación del efecto de los productos consolidantes

Al haber permanecido enterrada en la formación minera durante mucho tiempo, la madera, material constitutivo de la Rueda, ha sufrido procesos de deterioro importantes por lo que requiere la aplicación de un consolidante. Debe tenerse en cuenta que, debido a la presencia en las minas de minerales ricos en hierro, cobre, azufre o plomo, la rueda presenta productos de alteración en el interior de sus poros o como depósitos superficiales (materiales que deben conservarse como manifestación de la historia de la Rueda), por lo que es necesario determinar la posible interacción de éstos con el producto consolidante, así como la posible interacción de dicho producto con la propia madera que la forma. Esta interacción se ha determinado evaluando dos tipos de propiedades, como se recoge a continuación.

Interacción con las características físico-mecánicas de la madera

La madera es un material higroscópico que sufre contracciones y dilataciones por efecto de los cambios en su contenido de humedad. La aplicación de productos consolidantes, que van a permanecer en el interior de sus poros,

9. Aspecto que presentan los cristales de sulfuro de cobre desarrollados en las costras. Imagen: Esther Ontiveros Ortega (IAPH)

10. Esporas de *Alternaria*, 500X. Imagen: Marta Sameño Puerto (IAPH)

11. Conidióforos y conidios de *Aspergillus* sp., 500X. Imagen: Marta Sameño Puerto (IAPH)

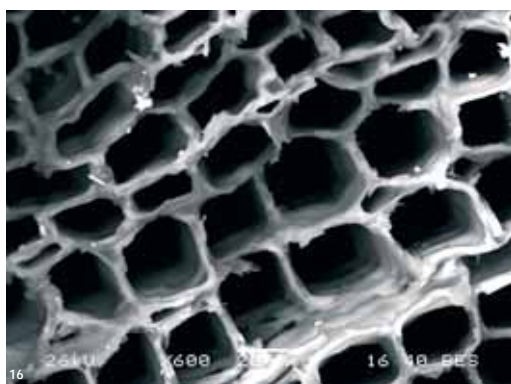
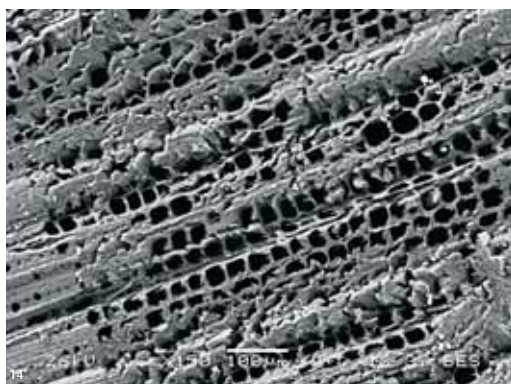
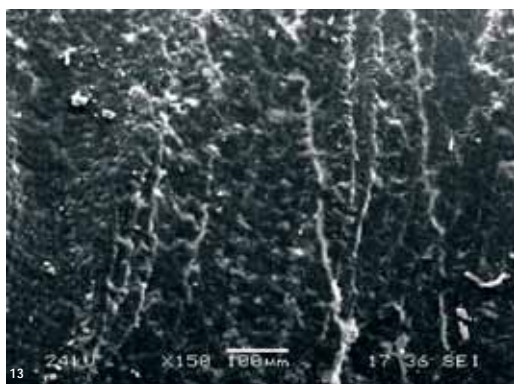
12. Conidióforos y conidios de *Penicillium* sp., 500X. Imagen: Marta Sameño Puerto (IAPH)

13. Control. Sección transversal, 150X. Traqueidas: células colapsadas. Imagen: Marta Sameño Puerto (IAPH)

14. Xilamón Doble. Sección transversal, 150X. Traqueidas consolidadas. Imagen: Marta Sameño Puerto (IAPH)

15. Paraloid. Sección transversal, 150X. Traqueidas consolidadas. Imagen: Marta Sameño Puerto (IAPH)

16. Xilamón Doble. Sección transversal, 600X. Imagen: Marta Sameño Puerto (IAPH)



PROBETA 1 (XD/T)			PROBETA 2 (PD/T)	
Situación inicial	Longitudinal	0,75 mm	Longitudinal	0,80 mm
	Radial	0,80 mm	Radial	0,81 mm
	Tangencial	0,80 mm	Tangencial	0,80 mm
	Volumen	$4,80 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3$	Volumen	$5,18 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3$
Inmersión en consolidante	Longitudinal	0,76 mm	Longitudinal	0,80 mm
	Radial	0,80 mm	Radial	0,81 mm
	Tangencial	0,79 mm	Tangencial	0,80 mm
	Volumen	$4,80 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3$	Volumen	$5,18 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3$
Equilibrio ambiente	Longitudinal	0,79 mm	Longitudinal	0,80 mm
	Radial	0,80 mm	Radial	0,81 mm
	Tangencial	0,79 mm	Tangencial	0,80 mm
	Volumen	$4,99 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3$	Volumen	$5,18 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3$
Estado anhidro	Longitudinal	0,76 mm	Longitudinal	0,80 mm
	Radial	0,80 mm	Radial	0,81 mm
	Tangencial	0,75 mm	Tangencial	0,79 mm
	Volumen	$4,56 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3$	Volumen	$5,12 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3$

Tabla 5. Características de las probetas consolidadas

puede provocar cambios en su comportamiento frente a las variaciones de humedad ambiental. Para la realización de este estudio se ha aplicado la Norma española UNE 56-533-77, que indica el modo de realizar el ensayo.

Los productos consolidantes estudiados se han seleccionado entre los más efectivos, teniendo en cuenta la experiencia de su uso en otros casos similares. Han sido: Xilamon Doble diluido al 50% en tolueno (XD/T) y Paraloid diluido al 50% en tolueno (PD/T).

Se han aplicado a probetas de madera de forma cúbica cuyas dimensiones en las distintas fases del ensayo se recogen en la tabla 5. La madera para la realización de las probetas provenía de piezas inconexas de la rueda y pertenecía al género *Pinus*.

El procedimiento que se ha seguido ha sido el que recoge la mencionada norma y se describe a continuación. Las probetas se sumergen en los dos consolidantes a temperatura ambiente hasta que se consigue la saturación, para lo que se estima en 24 horas el tiempo de inmersión necesario. Tras extraer las probetas de los productos, se miden sus dimensiones para calcular el volumen saturado V_s .

Se deja la probeta al aire a temperatura ambiente hasta que alcanza el estado de equilibrio higroscópico, lo cual

se comprueba realizando pesadas sucesivas con intervalos de 24 horas hasta que dos pesadas consecutivas difieren en menos de 1/200 de la primera de ellas. En este momento se miden de nuevo sus dimensiones, con las que se calcula el volumen a la humedad de equilibrio V_H . Posteriormente, la probeta se deseca en estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ hasta el estado anhidro, obteniéndose nuevamente sus dimensiones con las que se calcula el volumen anhidro V_0 . Los resultados obtenidos en cada fase se recogen en la tabla 5.

Con los datos obtenidos en las distintas etapas del ensayo se procede a la determinación de las contracciones lineal y volumétrica.

Contracción volumétrica total

$$C_v = \frac{V_s - V_0}{V_0} \times 100$$

C_v = Contracción volumétrica total en porcentaje
 V_0 = Volumen saturado en centímetros cúbicos
 V_0 = Volumen anhidro en centímetros cúbicos

$$C_l^{\oplus} = \frac{L_s^{\oplus} - L_0^{\oplus}}{L_0^{\oplus}} \times 100 = 0\%$$

$$C_l^{\text{②}} = \frac{L_s^{\text{②}} - L_0^{\text{②}}}{L_0^{\text{②}}} \times 100 = 0\%$$

Contracción lineal total

$$C_l = \frac{L_s - L_0}{L_0} \times 100$$

C_l = Contracción lineal total en la dirección que se considere, longitudinal, radial o tangencial, expresada en porcentaje

L_s = Longitud de la probeta en la dirección que se considere para la madera saturada, en centímetros

L_0 = Longitud de la probeta en la dirección que se considere para la madera anhidra, en centímetros

A) En la dirección longitudinal:

$$C_v^{\text{①}} = \frac{V_s^{\text{①}} - V_0^{\text{①}}}{V_0^{\text{①}}} \times 100 = 5,33\%$$

$$C_v^{\text{②}} = \frac{V_s^{\text{②}} - V_0^{\text{②}}}{V_0^{\text{②}}} \times 100 = 1,26\%$$

B) En la dirección radial:

$$C_l^{\text{①}} = 0\%$$

$$C_l^{\text{②}} = 0\%$$

C) En la dirección tangencial:

$$C_l^{\text{①}} = 5,33\%$$

$$C_l^{\text{②}} = 1,26\%$$

La contracción lineal sólo es significativa en la dirección tangencial, variación que es la que produce la variación volumétrica, por lo que ambos valores coinciden. Aunque ambos valores son bastante bajos, es aconsejable aplicar el consolidante que ocasiona una variación menor, es decir, Paraloid diluido en Tolueno.

Interacción con las características estructurales de la madera y con los productos de alteración

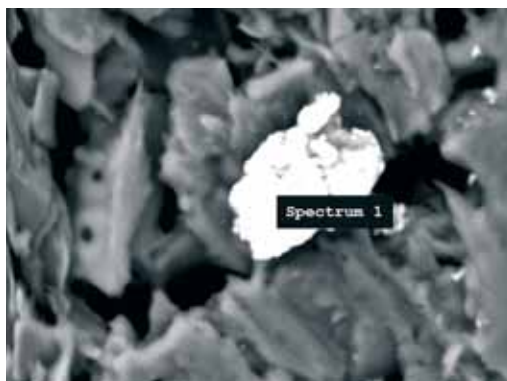
Esta parte de la investigación se ha centrado en determinar la posible interacción de ambos productos consolidantes con la madera y sus productos de alteración, especialmente por lo que se refiere a la variación en la morfología y la composición química de estos productos minerales y de la madera.

Se prepararon pequeñas probetas teniendo en cuenta los planos o secciones que interesan, principalmente la transversal, que es donde se observan mayores efectos. La sección transversal es perpendicular al eje longitudinal del árbol. Las probetas se sumergen en los dos productos consolidantes y en agua destilada (control) durante 48 horas y, posteriormente, se dejan secar a temperatura ambiente.

Las probetas se han observado al estereomicroscopio, al microscopio óptico y al microscopio electrónico de barrido (SEM) con sistema de microanálisis de energía dispersada de rayos X (EDAX). El microanálisis se realiza para obtener la composición elemental de los minerales hallados entre las fibras de la madera estudiada.

Tras la observación al estereomicroscopio y al microscopio óptico con luz reflejada, no se detectó ninguna diferencia importante a nivel microscópico entre la probeta control y las tratadas. Concretamente se observaron las traqueidas y los radios leñosos en la sección transversal sin ninguna diferencia en ambos casos.

En el microscopio electrónico de barrido (SEM-EDAX) se han observado las probetas según la sección transversal de cada una de ellas. En la probeta tratada con agua destilada (control), se pudo comprobar que las células



17. Xilamón Doble. Partícula superficial sobre sección transversal, 600X. Imagen: Marta Sameno Puerto (IAPH)

de las traqueidas estaban colapsadas, mientras que en las probetas tratadas tanto con Xilamon Doble como con Paraloid estaban intactas (figuras 13, 14 y 15). Este hecho pone de manifiesto la eficacia de los consolidantes, ya que las traqueidas se colapsan por efecto del vacío que se realiza en la cámara de muestras del microscopio y, si esto no sucede, se debe al aumento de resistencia producido por los tratamientos.

El microanálisis de las partículas observadas sobre la madera proporcionó los mismos resultados que los obtenidos en la madera sin tratar, detectándose la presencia de silicio, aluminio, azufre, cloro, hierro y cobre (figura 16).

Conclusiones

Con respecto a las características físico-mecánicas de la madera, se puede concluir que ninguno de los dos productos consolidantes ocasiona contracciones lineales o volumétricas significativas en las probetas ensayadas.

En el estudio al estereomicroscopio y microscopio óptico con luz transmitida de la sección transversal de las probe-

tas, no se detectó ninguna diferencia importante en las traqueidas y radios leñosos observados y tampoco en los minerales hallados entre estos elementos. No obstante sí se detectó un colapsamiento de las células parenquimáticas y las traqueidas de la sección transversal de la probeta control observada al microscopio electrónico de barrido (SEM), mientras que en las dos probetas tratadas se encontraban intactas, lo que pone de manifiesto el buen resultado consolidante de los tratamientos.

Del estudio de las probetas con el sistema de microanálisis de energía dispersada de rayos X (EDAX), se obtuvo la conclusión de que no se había producido ningún cambio en la composición química de los productos de alteración minerales presentes en la madera de la rueda.

Agradecimientos

Francisco Gutiérrez Montero, por la realización del análisis por espectrometría infrarroja, y Leonor Medina Romera, por la interpretación de la gammagrafía del eje.

Bibliografía

CANEVA, G.; NUGARI, M. P.; O. SALVADORI, (1994) *La biologia nel Restauro*. Firenze: Nardini

ELLIS, M. B. (1993) *Dematiaceous Hyphomycetes*. Oxon: CAB International

GILARDONI, A. (1994) *X-Rays in art. Italy*: gilar-doni SpA

ICR-CNR (1981) *Esame delle caratteristiche morfologiche al microscopio elettronico a scansione* (SEM). Normal 8/81

LANG, J.; MIDDLETON, A. (1997) *Radiography of cultural material*. Butterworth-Heinemann series in conservation and museology

NORMA ESPAÑOLA UNE 56-533-77

ROBBIOLA, L.; QUEIXALOS, I.; HURTEL L. P.; PERNOT, M.; VOLFOVSKY, C. (1998) Etude de la corrosion de bronzes archéologiques du fort-harrouard: alteration externe et mecanisme d'alteration stratifiée. *Estudies in conservation*. v. 33, nº4

SCHARFF, W.; HUESMANN I. A. (1997) *Accelerated decay of metal soil finds due to soil*

pollution, Metal 95 Proceeding of International Conference on Metals Conservation. James and James

VILLEGAS SÁNCHEZ, R. (2002) Métodos de examen no destructivos. En *Técnicas instrumentales y su aplicación al Patrimonio Histórico y Cultural*. Sevilla: Consejo Superior de Investigaciones Científicas

