

DIAGNÓSTICO MEDIANTE TÉCNICAS DE ULTRASONIDOS DEL FORJADO DE MADERA DEL REFECTORIO DEL CONVENTO DE SANTA CLARA EN CARMONA (SEVILLA)

(DIAGNOSIS THROUGH ULTRASONIC TESTS OF THE TIMBER ROOFS OF THE DINING ROOM OF MONASTERY OF SANTA CLARA IN CARMONA, SEVILLA)

Carmen Rodríguez Liñán, Dr. Arquitecto
Paloma Rubio de Hita, Dr. Arquitecto
Juan Carlos Gómez de Cózar, Dr. Arquitecto
Filomena Pérez Gálvez, Dr. Arquitecto

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla

Fecha de recepción: 23-III-04

ESPAÑA

467-5

RESUMEN

Los métodos de ultrasonidos son una técnica eficaz para el diagnóstico de elementos estructurales de madera en edificios antiguos. Esta técnica proporciona una gran ayuda a la hora de acometer una obra de rehabilitación. Se presenta una metodología de análisis y diagnóstico de forjados de madera mediante dicha técnica no destructiva.

El objetivo de este artículo es obtener el grado de deterioro y la capacidad resistente de la madera del alfarje del refectorio del Convento de Santa Clara en Carmona (Sevilla) utilizando la metodología propuesta.

Por extrapolación de los resultados obtenidos sobre la capacidad resistente de las vigas estudiadas se puede concluir que el conjunto del forjado no es capaz de soportar con seguridad suficiente el nuevo uso propuesto.

Teniendo en cuenta el valor histórico artístico del alfarje se propone y aporta como solución de rehabilitación la consistente en colgar el forjado existente mediante pernos de una losa de hormigón armado empotrada en los muros perimetrales. Esta solución garantiza, ajustando la distancia entre pernos, que el forjado prácticamente no trabaja.

SUMMARY

Ultrasonic tests are an effective technique of getting a diagnosis of timber structures in historical buildings. This technique is quite valuable to undertake a restoration job. A new methodology of analysis and diagnosis of timber roofs through this non destructive technique is presented.

The aim of this article is to get the state of damage and the bending strenght capacity of the timber roof of the Monastery of Santa Clara in Carmona (Seville) dining's room by using this technology.

From the results obtained about the bending strenght capacity of the studied beams, it can be affirmed that the timber roof is not able to support safely enough the new use proposed.

Considering the historic and artistic importance of this timber roof, we propose as a restoration methodology based on hanging the roof through bolts from a reinforced concrete platform built-in the perimeter walls. This solution guarantees that the timber roof does not work, just adjusting the distance between the bolts.

1. ANTECEDENTES

Actualmente las técnicas de ultrasonidos están resultando ser una herramienta útil y eficaz para diagnosticar elementos estructurales de madera. Así lo confirman los trabajos realizados (2-5) por el grupo de investigación (PAI TEP-205) “Análisis y evaluación de sistemas cons-

tructivos y estructurales en la Arquitectura” de la Junta de Andalucía formado por profesores del Departamento de Construcción de la Escuela de Arquitectura de Sevilla.

La labor de diagnóstico de forjados de madera en diversos edificios del casco histórico de Sevilla y la validez de los resultados obtenidos así lo pone de manifiesto, proporcio-

nando, en todos los casos, una información muy valiosa y rigurosa sobre el estado de deterioro de la madera así como de la capacidad portante de estos elementos estructurales. Estos datos han sido fundamentales para abordar con éxito las labores de rehabilitación de estos edificios.

A lo largo del tiempo, la metodología, elaborada en un principio con cada obra estudiada, se ha ido enriqueciendo, solucionando aspectos singulares para cada caso según los requisitos exigidos en esta labor de diagnóstico.

En cualquier caso, los trabajos realizados no concluyen con la labor de diagnóstico, sino que también se aporta, a la vista de los resultados obtenidos y con los requisitos de cada proyecto, la solución constructiva adecuada para la rehabilitación de los forjados.

En este artículo se expone el trabajo desarrollado mediante la aplicación de la metodología de ultrasonidos elaborada a un caso concreto, el diagnóstico del forjado del rectorio del Convento de Santa Clara en Sevilla¹.

El trabajo se realizó a instancias de la dirección facultativa de la obra, como parte de los estudios previos que sirvieron para determinar la actuación a llevar a cabo en las obras de rehabilitación.

2. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ULTRASONIDOS EMPLEADA

En este trabajo se ha aplicado una metodología de ensayos específica para la inspección in situ de forjados de madera (1). Este método se basa en las características de propagación de las ondas ultrasónicas en la madera de pino silvestre.

La aplicación de esta metodología permite obtener una estimación del grado de deterioro de la madera estudiada. Se utilizan las correlaciones obtenidas entre las medidas de velocidad de transmisión de ultrasonidos y la pérdida de densidad y resistencia del material. También permite obtener una estimación del valor de resistencia a flexión de la madera estudiada, a partir de las velocidades de transmisión de ultrasonidos y su correlación con valores de tensión de rotura. Estas correlaciones han sido realizadas para muestras de madera del mismo tipo de la estudiada.

2.1. Estimación del deterioro de la madera

A partir de las correlaciones obtenidas asociando a unos valores de pérdida de densidad y resistencia, valores de velocidad normal a la fibra de la madera, se han establecido tres intervalos para el diagnóstico de la madera:

- Velocidad normal > 1900 m/s: madera sana (pérdida de densidad menor al 20%).
- Velocidad normal > 1500 m/s y < 1900 m/s: madera con inicio de deterioro (pérdida de densidad entre el 20% y el 30%)
- $V_n < 1500$ m/s: madera deteriorada.

Para madera sana, además del criterio general establecido en el punto anterior, hay que aplicar un criterio particular para madera de alta densidad con valores de velocidad normal mayores de 3.000 m/s. Este criterio sirve para detectar variaciones de densidad superiores a la variación natural dentro del tronco (10% máximo) (8) y que corresponden a un inicio de deterioro. Utilizando las correlaciones de densidad y velocidad normal se establece un inicio de deterioro para un descenso de la velocidad normal superior a 300 m/s.

2.2. Obtención de valores de cálculo de las propiedades mecánicas de la madera

Actualmente las bases de cálculo de estructuras de madera están basadas en la Norma UNE EN 338 y su revisión en el proyecto de Norma europea, pr EN 338.

En esta norma -según la clase resistente de la madera- se le asignan a la misma unas propiedades de resistencia, rigidez y densidad.

En la investigación desarrollada, para determinar la resistencia de madera vieja (en lugar de asignar por defecto a la madera vieja una clase resistente con su valor de tensión característica de rotura asociado (X_k)) se le asigna, sin establecer en principio clase resistente alguna, el valor característico de tensión de rotura obtenido a partir de los valores de ultrasonidos.

Para poder determinar las correlaciones que existen entre el valor de tensión de rotura a flexión estática y las velocidades de transmisión de ultrasonidos, se han realizado una serie de ensayos que nos permiten obtener el valor X_k a partir del valor característico de tensión de rotura (σ_r) del ensayo de flexión estática en probetas de 2x2x30 cm, dividido por un coeficiente de seguridad que tiene en cuenta el tamaño de la probeta y la forma de realización del ensayo. Este coeficiente es de 3.43 (6).

$$X_k = \sigma_r / 3.43 \quad (E.1)$$

A partir del valor característico (X_k) se obtiene el valor de cálculo (X_d) mediante la expresión:

$$X_d = k \cdot \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (E.2)$$

Siendo:

- X_k : valor característico de la tensión de rotura a flexión estática. Generalmente corresponde al percentil 5º de la distribución estadística de los resultados de los ensayos.

¹ Actualmente en rehabilitación según un proyecto del Ministerio de Educación y Cultura del Instituto de Patrimonio bajo la dirección de arquitecto Pablo Díaz Rubio.

. γ_M : coeficiente parcial de seguridad para el material. Para los estados límite últimos en combinaciones fundamentales adoptamos el valor de 1,3.

. k_{mod} : factor de modificación que tiene en cuenta el efecto de la duración de la carga y del contenido de humedad para los estados resistentes. La duración de la carga corresponde a la combinación de hipótesis perteneciente a diferentes clases de duración de carga, permanente (con cargas) y media duración (sobrecarga de uso) según la norma el factor de carga será el correspondiente a la acción de más corta duración (media duración). En cuanto a la Clase de servicio se adopta la Clase I que se caracteriza por un contenido de humedad medio de equilibrio higroscópico del 12%. Las estructuras bajo cubierta y cerradas, pertenecen a esta clase de servicio. Con estas consideraciones obtenemos un valor de $k_{mod} = 0,80$

En el método que aplicamos se han obtenido las correlaciones entre tensión de rotura a flexión en probetas y velocidades de transmisión de ultrasonidos, que permiten obtener la tensión de rotura mediante la velocidad de transmisión (1).

. Para el caso de madera sana la estimación se realiza a partir de la velocidad longitudinal a la fibra con dos casos posibles:

$$\sigma_r = 0,173 VI - 74,54 \quad (E.3)$$

El valor de VI se determinará en vigas in situ a partir de:

1. $VI_{cruz.máxima}$ ² que no tiene en cuenta los defectos de la pieza.

2. $VI_{cruz.media}$ ² que lleva implícitos los defectos de la viga.

. En el caso de madera deteriorada la estimación de la tensión de rotura se realiza a partir de la velocidad normal a la fibra media de la sección, mediante la expresión:

$$\sigma_r = 0,747 Vn - 956 \quad (E.4)$$

El valor característico (X_k) se obtiene según la ecuación (E.1) a partir de la tensión de rotura y a partir del mismo según la ecuación (E.2) se determina el valor de cálculo (X_d) como se ha especificado anteriormente.

2.3. Obtención de cargas máximas para una viga biapoyada

Si analizamos el diagrama de momentos de una viga biapoyada, podemos decir que las tensiones de trabajo que se exigen a cada sección de la viga son diferentes. En el caso de un material de igual resistencia en todas sus secciones, madera sana, bastará comprobar la tensión de

trabajo en el centro del vano, ya que en este punto es donde se producen las tensiones normales máximas.

Sin embargo, en el caso de madera deteriorada habrá que comparar las tensiones de trabajo de cada sección con la tensión de cálculo, ya que la rotura puede producirse en cualquier sección de la viga dependiendo de su estado de deterioro.

La carga máxima mayorada que es capaz de soportar la viga se obtiene en función de la tensión de cálculo (X_d) de cada sección, mediante la ecuación (E.5):

$$\gamma_{F1} Q_s + \gamma_{F2} Q_c = \frac{X_d b h^2}{3e(Lx - x^2)} \quad (E.5)$$

Siendo:

Q_s : sobrecarga uniformemente repartida.

Q_c : con carga igual a la suma del peso propio de la estructura más el relleno y solería (cargas permanentes).

γ_{F1} : acciones variables = 1,50.

γ_{F2} : acciones permanentes = 1,35.

X_d : resistencia de cálculo a flexión.

b: ancho de la viga.

h: canto de la viga.

L: luz libre entre apoyos.

e: distancia entre ejes de viga.

x: coordenada de la sección estudiada.

Sustituyendo en esta expresión el valor de la coordenada x de la sección y de la tensión de cálculo a flexión (X_d) podemos obtener el valor de carga máxima ($\gamma_{F1} Q_s + \gamma_{F2} Q_c$) para cada sección de la viga.

La menor de las cargas máximas de todas las secciones estudiadas será la que limite la carga máxima admisible para toda la viga.

Carga máxima admisible para la viga: la menor de la ($\gamma_{F1} Q_s + \gamma_{F2} Q_c$) para cada sección.

De la misma manera, y tomando una actitud muy conservadora, podemos decir que la viga cuyo valor de carga máxima sea mínimo, limitará la carga máxima para el forjado.

Determinando la concarga (peso propio del forjado más relleno y solería) y restándolo del valor de carga máxima para la viga o del forjado, sabremos cuál es el valor de sobrecarga máxima para la viga o el forjado.

En el presente trabajo se dan como resultado las cargas máximas para cada viga estudiada en Kp/m y las cargas máximas admisibles para los forjados en Kp/m²

² Válida para viga biapoyada y sobrecarga uniformemente repartida.

Análogamente se estiman las cargas máximas para las viga teniendo en cuenta una limitación de la flecha de la misma en función de la expresión siguiente:

$$Q'/Q = (384 E h / 80 X_d L) 1/\alpha \quad (E.6)$$

Donde:

Q' : carga máxima por criterio de deformación.

Q : ($Q_s + Q_c$) : Carga máxima por criterio de rotura.

E : módulo de elasticidad del material. Para este caso $E = 105.940 \text{ Kp/cm}^2$ (obtenidos de los ensayos de roturas de vigas).

h : canto de la viga.

L : luz entre ejes de apoyo.

X_d : resistencia de cálculo.

α : factor limitador de la flecha $f < L/\alpha$; $\alpha = 500$.

En los cálculos para determinar las cargas máximas por viga no se ha considerado la comprobación de cortante.

Para madera sana la tensión máxima más desfavorable se produce en el centro donde los cortantes no tienen influencia. Para la madera deteriorada, cuando hay deterioro en las proximidades del empotramiento ($Vn \leq 1.500 \text{ m/s}$) se recomienda sanear el empotramiento y reforzarlo, por lo tanto no es necesaria la comprobación. En todo caso se puede realizar la comprobación a cortante tomando como resistencia característica a cortante f_{vk} la obtenida en la tabla de la norma (7) según la clase resistente determinada por el valor característico X_k (en la tabla se denomina f_{mk}).



Imagen 1.- Claustro del convento.



Imagen 2.- Vista general del techo del refectorio.

3. DESCRIPCIÓN DEL FORJADO ESTUDIADO

3.1. Aspectos históricos

Según la bibliografía existente (9), la fundación del convento de Santa Clara data del último tercio del S XV, época a la que corresponde parte de la Iglesia actual. El claustro mudéjar, de dos plantas, es de principios del S XVI (Imagen 1). La sala del refectorio cuyo forjado se estudia se ubica en la planta baja, con acceso desde la galería del claustro, podemos estimar, por la fecha de construcción del claustro y por las características decorativas del artesonado, que su construcción es, asimismo, de principios del S XVI.

Además del valor histórico de esta sala y de su artesonado hay un valor artístico añadido por la policromía del mismo (Imagen 2).

3.2. Descripción constructiva

El refectorio se encuentra en la planta baja del edificio y su entrada se realiza por el claustro del convento. Sobre el mismo existe una primera planta con cubierta de teja a un agua, como se muestra en la sección constructiva (Figura 1)

El forjado está compuesto por 27 vigas de 10 cm x 20 cm de sección y 4,40 m de longitud con un intereje de 70 cm, sobre ellas apoyan unos zoquetes de 6 cm x 4 cm. A su vez, sobre estos zoquetes, se disponen unos ladrillos por tabla, policromados en su cara inferior, de 20 x 30 x 4 cm (Figura 2).

El peso propio del forjado (sin contar relleno y solería, sino tan sólo los elementos descritos: vigas + zoquetes + entrevigado de piezas cerámicas) es de 1,0 KN/ml, sobre cada viga o bien 1,428 KN/m² como carga superficial uniformemente distribuida en el forjado.

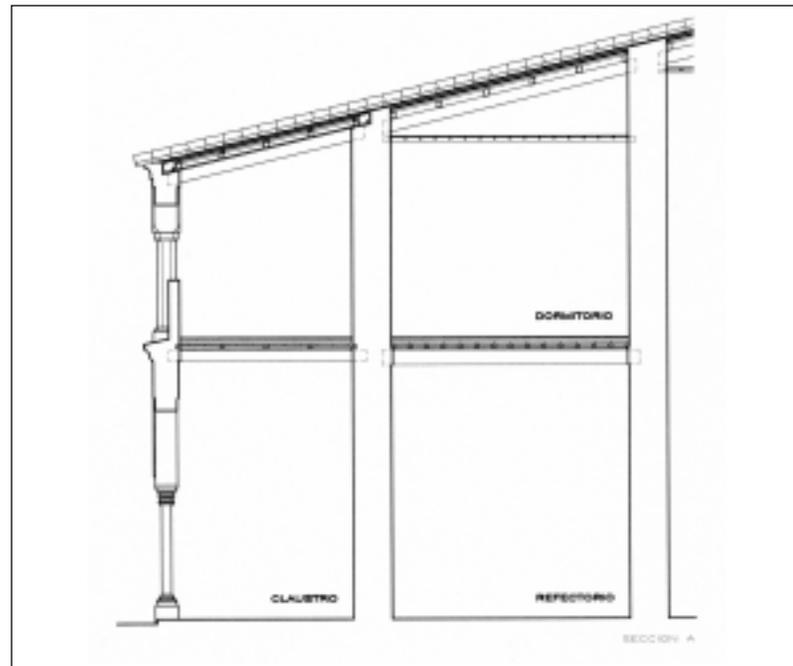


Figura 1.- Sección del refectorio.

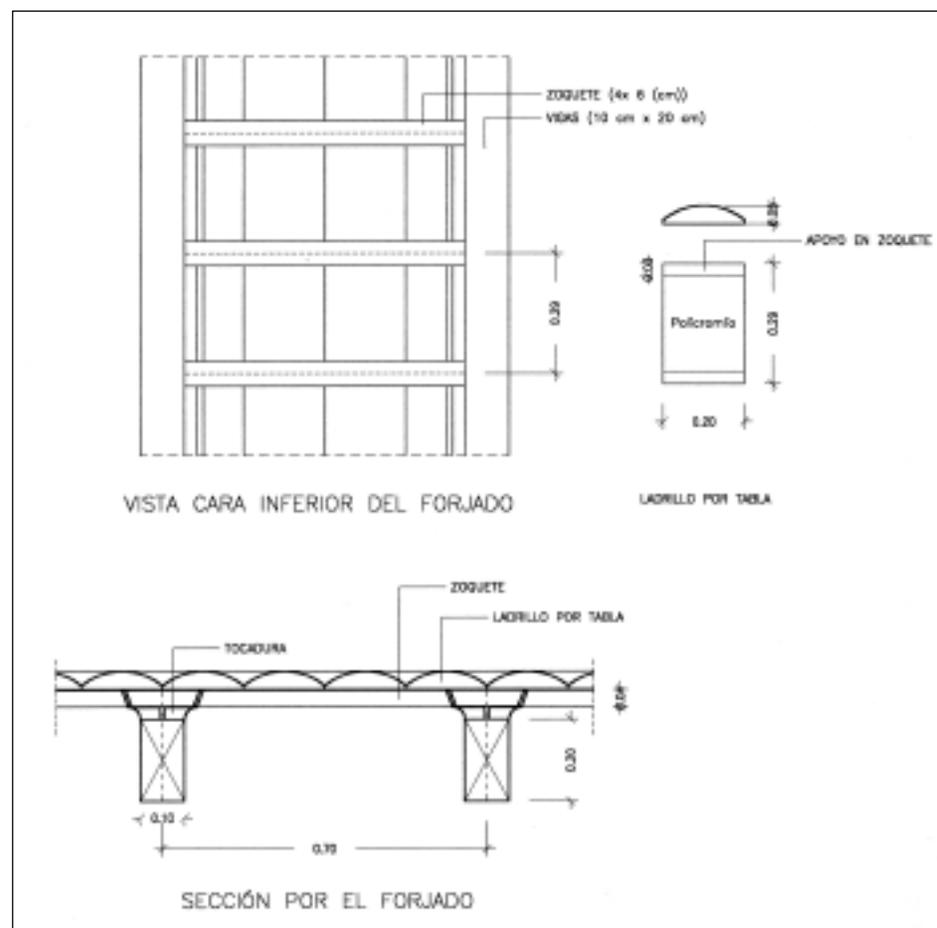


Figura 2.- Sección constructiva del forjado.



Imagen 3.- Refuerzo de las vigas mediante pletinas metálicas.



Imagen 4.- Rotura a flexión de una viga en el centro del vano.



Imagen 5.- Ataque de carcoma y pudrición parda.

3.3. Inspección visual de los daños

Al realizar la primera visita al edificio ya quedó de manifiesto el mal estado en que se encontraba el forjado. Éste presentaba una gran deformación por flecha y numerosas vigas ya habían sido reforzadas mediante pletinas metálicas (Imagen 3). Muestra de la desconfianza de la capacidad portante del forjado era que la mitad del mismo se encontraba apeada.

Los daños en esta zona se han producido por filtraciones de agua procedentes de la cubierta del piso superior, en mal estado. Debido a la flecha del forjado, el agua se ha acumulado justo en el centro del vano, el deterioro de la madera por humedad en este punto ha propiciado el ataque de distintos agentes xilófagos que han reducido notablemente la capacidad mecánica del material, por esta razón algunas vigas presentaban fisuras de rotura a flexión en el centro del vano (Imagen 4).

Tras realizar una inspección visual se constató que los distintos daños que mostraban las vigas eran las siguientes. En primer lugar todas mostraban una deformación por flecha apreciable a simple vista y grandes fendas longitudinales. En cuanto al ataque de agentes xilófagos se producía la combinación de un ataque de carcoma pequeña de manera generalizada para todas las vigas unido a un ataque de pudrición parda³ (Imagen 5). Por otro lado, un ataque de pudrición parda potencia la acción de la carcoma pequeña, ya que si éstas, en principio, sólo atacan a la albura perimetral de la madera, los hongos de pudrición facilitan a la carcoma la digestión de la madera del duramen y, por tanto, la profundidad de penetración del ataque de la carcoma es mayor. Por lo tanto es lógico que ante estos hechos se hayan producido pérdidas de material y de densidad notables que han afectado significativamente a la capacidad portante de las vigas produciéndose la rotura a flexión en algunos casos.

4. ENSAYOS DE ULTRASONIDOS

Del forjado se han ensayado un total de cinco vigas, Las que aparecen en la planta numeradas como 1-2, 1-6, 1-8, 1-20, y 1-25 (Figura 3).

El criterio de elección ha sido obtener datos de algunas vigas que aparentemente están en mejor estado (como referencia de los valores de madera más sana) y datos de aquellas otras que están aparentemente más dañadas.

Se han ensayado dos zonas, la más dañada y que aparece apeada, a la que pertenecen las vigas 2, 6 y 8, y la zona con menores daños aparentes a la que pertenecen las vigas 20 y 25.

³ Como es conocido, para que se produzcan estos dos ataques es necesario un contenido de humedad elevado en la madera.

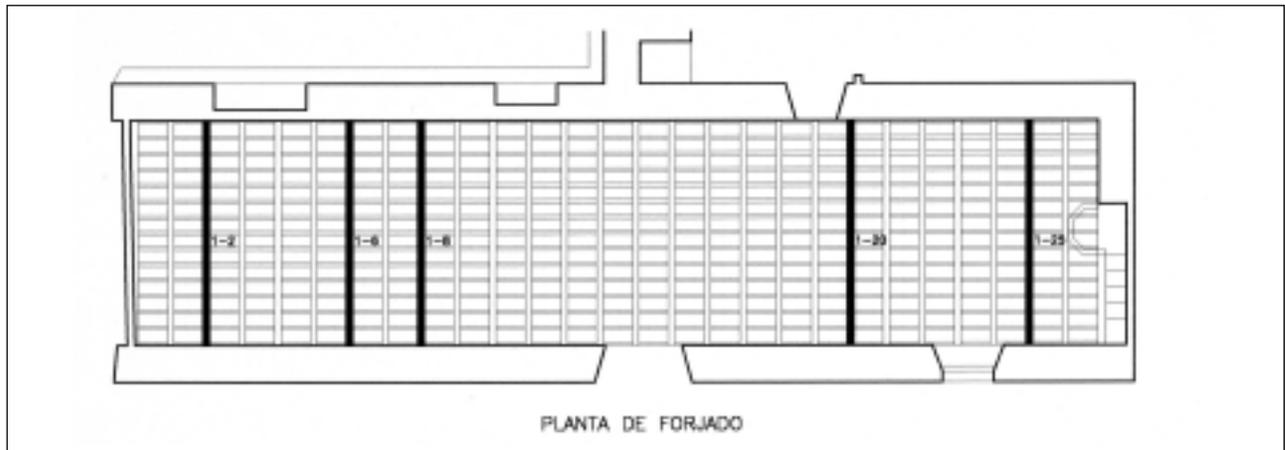


Figura 3.- Vigas estudiadas.



Figura 4.- Secciones estudiadas.

De cada viga se han ensayado 13 secciones, 4 próximas a los empotramientos y 5 en la zona central, la posición de las secciones de referencia se muestra en la Figura 4.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS ENSAYOS DE ULTRASONIDOS

Los resultados de los ensayos se muestran en mapas donde se representan con códigos de colores, para las vigas estudiadas, los intervalos de valores existentes para los distintos parámetros considerados: deterioro, contenido de humedad y cargas máximas.

De manera individualizada para cada viga, se obtienen unas fichas de resultados donde quedan representadas las medidas realizadas, tanto de velocidad de ultrasonidos como de contenidos de humedad, así como los valores de cargas máximas (Figura 5).

Mapa de deterioro

Con este mapa se refleja el estado de deterioro (pérdida de densidad) de la madera (Figura 6). Se genera mediante

la interpretación de las velocidades de transmisión de ultrasonidos según los criterios del apartado 2.1.

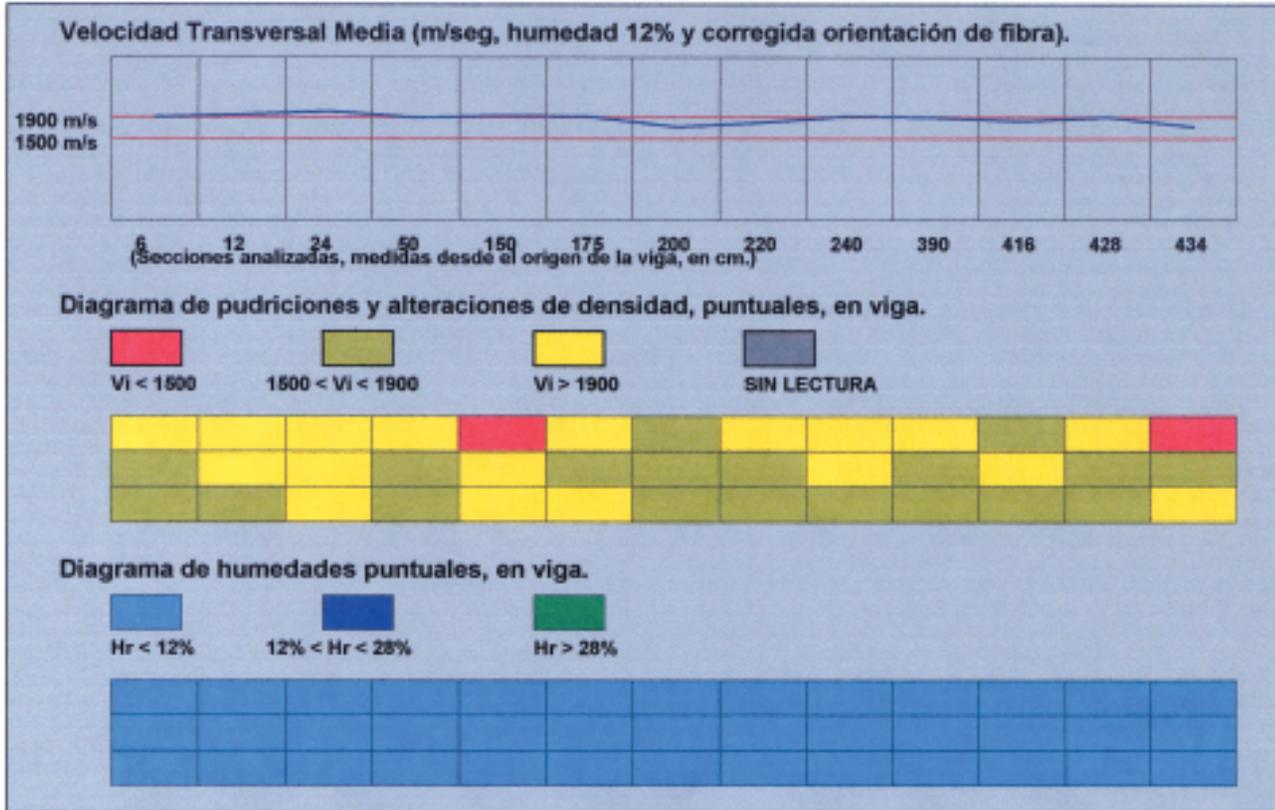
Para el forjado estudiado se obtienen los resultados siguientes:

Las vigas 1-2, 1-6 y 1-8, que se encuentran en la zona apuntalada, aparecen coloreadas en azul o en rojo, lo que nos indica que tienen un inicio de deterioro (azul) o un deterioro más severo (rojo), en ninguna de ellas la madera está sana. Las vigas 1-20 y 1-25, situadas en la zona no apuntalada, aparecen deterioradas, pero en un porcentaje inferior que las anteriores puesto que en ellas aparecen zonas donde la madera está inalterada (amarillo).

Mapa de contenido de humedad

En cuanto al contenido de humedad de las vigas, las lecturas obtenidas mediante higrómetro de resistencia, son, en general, bajas para todas las vigas (< 12%), excepto para la viga 1-8, donde se obtienen valores ligeramente superiores. Estos resultados no son compatibles con las condiciones necesarias para alcanzar el grado de deterioro observado en la madera. Se justifican teniendo en cuenta el hecho de que en el momento de realizar los ensayos ya se

OBRA: RESULTADOS, ELEMENTO: 1-25	19-11-03
---	-----------------



Humedad Real (%)													
Secc.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
H 1	9	10	9	10	9	10	9	10	10	11	10	11	10
H 2	9	10	9	10	10	11	10	10	10	10	10	11	10
H 3	9	10	10	10	10	11	11	10	10	10	10	10	10

Velocidad Transversal (m/seg, humedad 12% y corregida orientación de fibra).													
Secc.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
V 1	2093	2145	2193	2141	1154	2068	1571	1984	2119	2409	1607	2143	1293
V 2	1814	1956	1974	1780	2266	1825	1830	1651	1987	1688	2137	1884	1837
V 3	1870	1819	1944	1856	2264	1911	1780	1831	1746	1708	1749	1753	1986

Velocidad Transversal Media (m/seg, humedad 12% y corregida orientación de fibra).													
Secc.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Vm	1898	1941	2007	1888	1926	1909	1721	1797	1917	1887	1823	1893	1720

Tensión básica por sección estudiada (Kp/cm2).													
Secc.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
T.bas	236	242	259	230	238	230	195	210	237	226	217	226	193

CARGA MÁXIMA (con cargas + sobrecargas): 658 Kp/m
 CARGA MÁXIMA (con cargas + sobrecargas, pafa flecha < L/500): 162 Kp/m

Figura 5.- Ficha de resultados para una viga.

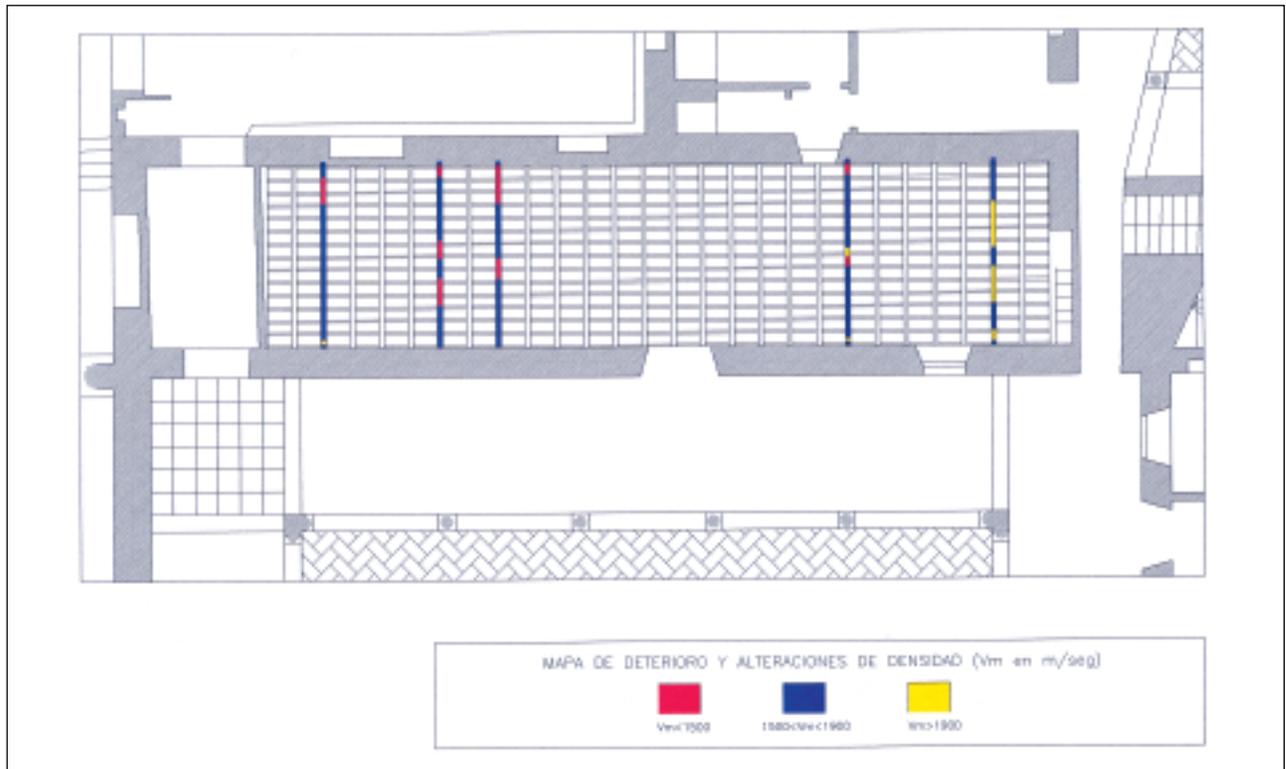


Figura 6.- Mapa de deterioro.

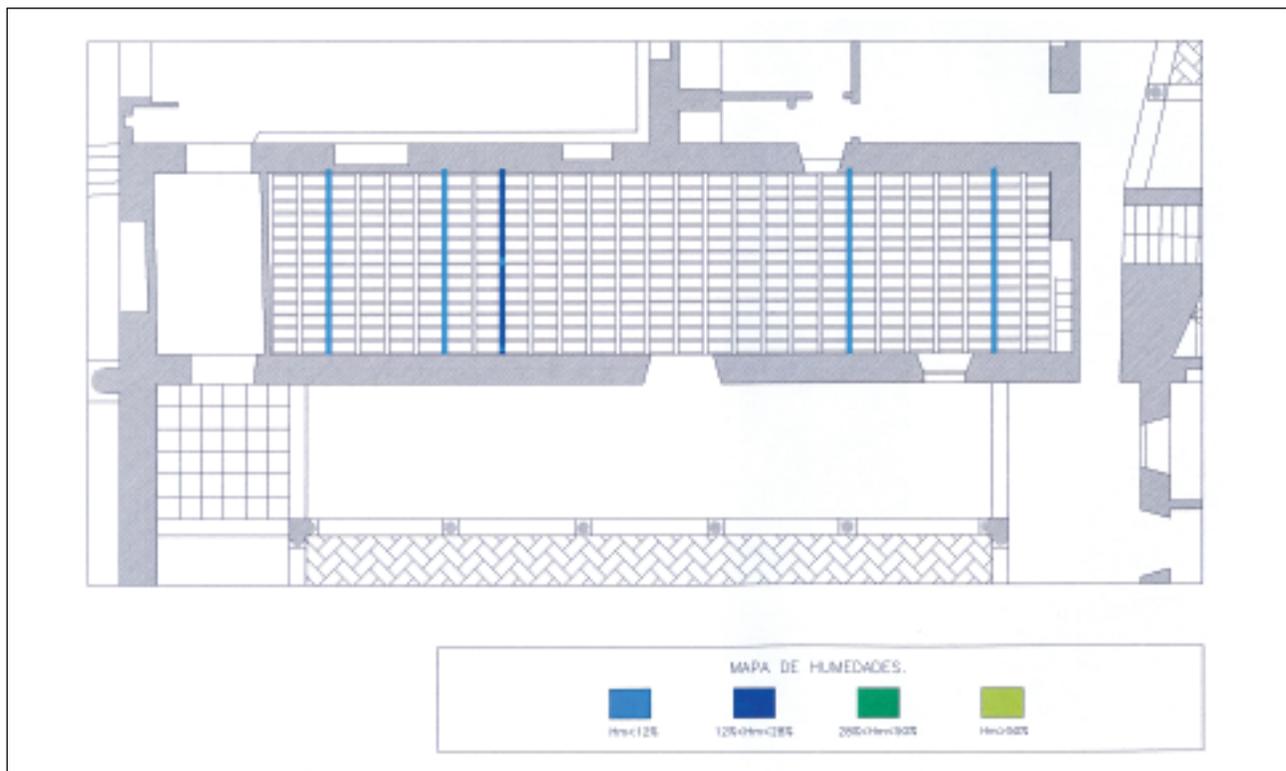


Figura 7.- Mapa de contenido de humedad.

habían acometido algunas intervenciones en el edificio para impedir las filtraciones de agua por las cubiertas. Por lo tanto, este deterioro se produjo anteriormente cuando las condiciones de contenido de humedad eran muy superiores a las detectadas actualmente (Figura 7).

Mapa de cargas máximas

Para la obtención de cargas máximas admisibles para cada viga, a partir de los ensayos de ultrasonidos, se utilizan las ecuaciones contenidas en el apartado 2.3.

Los valores obtenidos se representan en el mapa distinguiendo, para las vigas estudiadas, tres intervalos de cargas máximas admisibles que quedan identificados mediante códigos de color (Figura 8).

Aunque algunas de las vigas estudiadas pueden soportar valores de cargas mayores a 7 KN/m^2 , las cargas máximas que puede soportar el forjado vienen determinadas por los valores obtenidos en las vigas más deterioradas ($2,2 \text{ KN/m}^2$).

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos, consecuencia de la aplicación de la metodología de ensayos propuesta, a las vigas estudiadas, nos confirman el mal estado del alfarje. Existen algunas vigas que no son capaces de resistir las sobrecargas correspondientes a un uso previsible de local de exposición con acceso público ($3-4 \text{ KN/m}^2$), incluso otras sólo están en condiciones de resistir su peso propio, no pudiendo soportar el incremento de carga que supondría la colocación de una nueva solería.

Por extrapolación de los resultados de las vigas estudiadas al conjunto del alfarje, podemos decir que éste no es capaz de soportar con seguridad suficiente el nuevo uso propuesto.

7. PROPUESTA DE INTERVENCIÓN

En este caso estamos en una situación frecuente en obras de rehabilitación: existe un forjado de madera de gran va-

lor artístico, pero con tal grado de deterioro que resulta inviable mantenerlo en su estado original y, por otra parte, tampoco es adecuada la sustitución de los elementos más dañados, por la decoración pictórica original de los mismos. Por lo tanto es necesario recurrir a una solución de suplemento estructural.

Una de las reparaciones más extendidas es la utilización de losas de hormigón armado apoyadas en el contorno (muros de fábrica) y vinculadas al forjado de madera. Este tipo de propuesta, que evidentemente plantea la colaboración entre losa de hormigón y forjado de madera, no debe confundirse con un forjado mixto hormigón/madera, ya que en la mayoría de las ocasiones no es posible colocar la losa de hormigón sobre el forjado existente, porque sobre las vigas del forjado suelen existir una serie de elementos secundarios (rastreles, tocaduras, ladrillos por tabla, etc.) que separan una distancia apreciable las vigas del forjado de la losa (Figura 2). Además de estas condiciones geométricas que impiden la solución de un forjado mixto, existe otro condicionante que nace del propio deterioro de la madera y que limita la posibilidad de trabajar con valores de tracción elevados en una solución mixta.

Por las razones expuestas anteriormente, la solución más idónea para estas situaciones es colgar el forjado existente de una losa de hormigón armado empotrada en los muros perimetrales y que garantice que el alfarje trabaje muy poco ajustando correctamente la distancia entre pernos de cuelgue.

Por tanto la propuesta de actuación en el caso del forjado estudiado ha sido la ejecución la solución anterior que se muestra en la Figura 9.

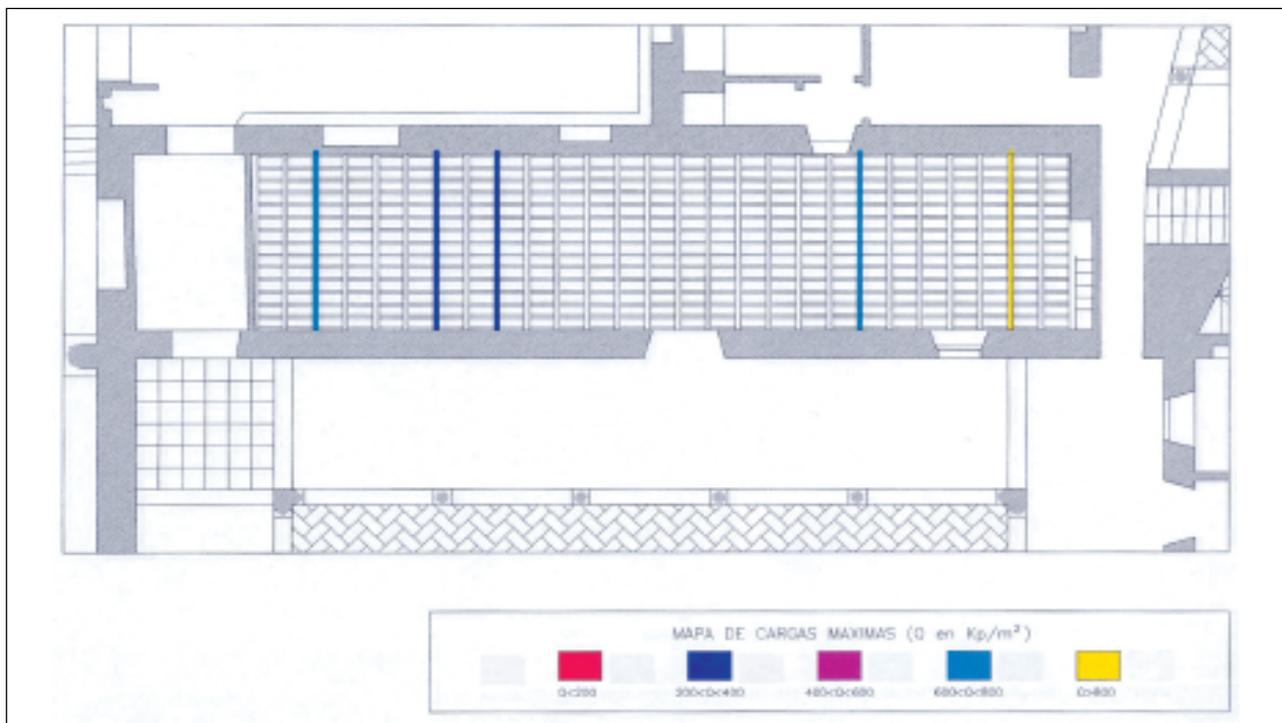


Figura 8.- Mapa de cargas máximas.

El desarrollo matemático de esta solución, admitiendo que la deformación vertical de la losa de hormigón y de la viga de madera colgada de esta es similar, nos permite determinar para las sobrecargas previstas la carga máxima sobre las vigas y la tracción máxima de los pernos.

Realizando el correspondiente análisis estructural de este caso se obtienen los siguientes resultados:

- LOSA DE HORMIGÓN ARMADO

HA-25 de 0,15 m de canto, con un armado superior e inferior de $\# \phi 12$ a 15,0 cm. Para esta solución el forjado de madera sólo soporta el 10% de la carga total y, en cualquier caso, la carga transmitida a cada viga (0,62 KN/m) es inferior a la que resisten cualquiera de las vigas del forjado.

- CONECTADORES (PERNOS)

Que trabajan a tracción o compresión según los casos con una carga que no supera los 0,72 KN/m. Se recomendó situarlos cada 30 cm con lo cual soportarían una carga máxima de 0,22 KN.

En el proceso constructivo de la losa de hormigón y para que el forjado de madera no reciba más cargas de las previstas es necesario que no se retiren los apeos de las vigas hasta que el hormigón de la losa alcance la resistencia adecuada para resistir su propio peso y todas las cargas actuantes. A fin de que el proceso sea similar para todo el alfarje, antes de hormigonar la losa superior es necesario अपार también la zona actualmente libre de apeos.

En el momento de la redacción de este artículo se encuentra en ejecución la solución propuesta, de cuyo proceso constructivo se muestran las imágenes 6, 7 y 8.

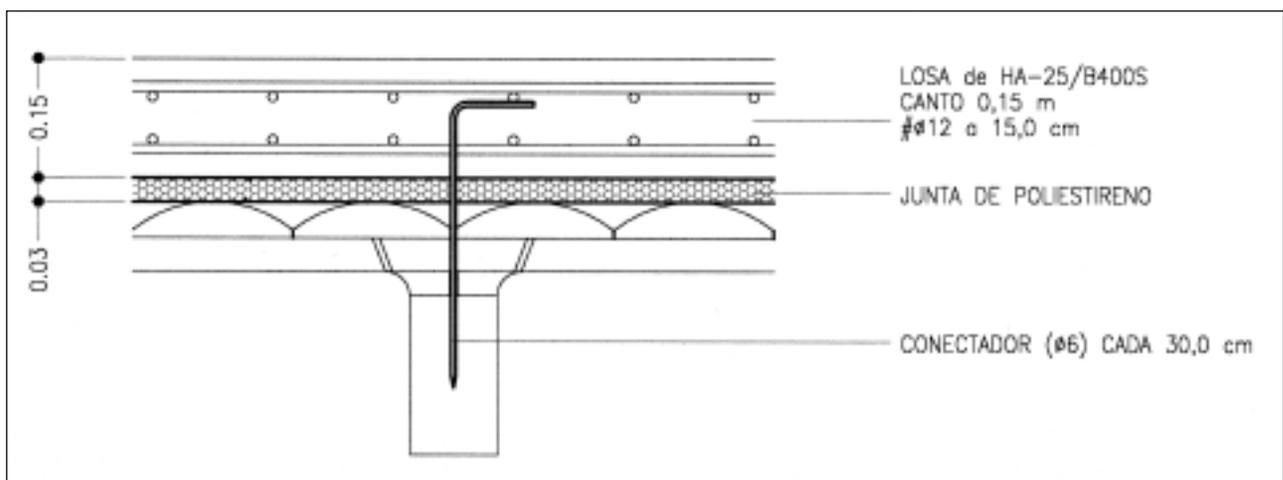


Figura 9.- Solución de rehabilitación del forjado.



Imagen 6.- Conector de acero inoxidable.



Imagen 7.- Forjado con conectadores y plancha de poliestireno extrusionado.



Imagen 8.- Armado de la losa de hormigón.

Bibliografía

- (1) Rubio de Hita, P. "Evaluación del estado de la madera, en obras de rehabilitación mediante técnicas de ultrasonidos". Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla. Sevilla, 1997.
- (2) Rodríguez Liñán, C., Rubio de Hita, P. "Evaluación del estado de la madera, en obras de rehabilitación mediante técnicas de ultrasonidos". Universidad de Sevilla. Secretariado de Publicaciones. Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción. Sevilla, 2000.
- (3) Rodríguez Liñán, C., Rubio de Hita, P. "Evaluación del estado de la madera en obras de rehabilitación mediante técnicas de ultrasonidos y obtención de parámetros resistentes". Informes de la Construcción. Vol. 47, nº 440. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, noviembre/diciembre, 1995.
- (4) Rodríguez Liñán, C., Rubio de Hita, P., Gómez de Cózar, J. C. "Aplicación de la técnica de los ultrasonidos en la evaluación del estado de la madera en el Palacio de los Marqueses de la Algaba de Sevilla". Neutra, nº 3. COOAAO, 1998.
- (5) Rodríguez Liñán, C., Rubio de Hita, P., Gómez de Cózar, J. C. "Study, diagnosis and rehabilitation of the wooden ceiling of two palace houses in Seville". 3^{er} Seminario Internacional sobre construcciones Históricas. Ed. Paulo B. Lourenco Pere Roca. Guimaraes. Portugal, septiembre, 2001.
- (6) Argüelles Alvarez, R., Arriaga Martitegui, F. "Normas de cálculo de estructuras de madera". A.I.T.M, 1987.
- (7) Norma UNE EN 338 y su revisión en el borrador, proyecto de Norma europea, pr EN 338.
- (8) Gutiérrez Oliva, A., Baonza Merino, V., Fernández-Golfín Seco, J. I. "Variaciones de la densidad de la madera de pino silvestre de los sistemas Central e Ibérico". Congreso Forestal "IBATI-97" Navarra, abril, 1997.
- (9) Hernández Díaz, J. et al. "Catálogo monumental arqueológico y artístico de la provincia de Sevilla" TII. Ed. Diputación Provincial de Sevilla, 1953.

* * *