

FUNDAMENTOS DE LA RECUPERACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE MADERA DE LA CAPILLA DOMÉSTICA DE LA RESIDENCIA JESUÍTICA Y LA DECISIÓN DE PRESERVAR UNA PARTE EN ESTADO ORIGINAL

José Luis Gómez

Ingeniero; Prof. Titular de Estructuras IB y del Taller de Investigación de Diseño Estructural de la Fac. de Arquitectura (U.N.C.); investigador de SeCyt; delegado en Argentina de Alconpat Internacional; Córdoba

María Edel Ruata

Arquitecta; Prof. Adjunta de Estructuras IB y Prof. Asistente del Taller de Inv. y Diseño Estructural; Docente Investigadora de SeCyT; Córdoba.

Iván Edgardo Salgado

Arquitecto; Córdoba.

RESUMEN

Descubierta la estructura de madera de la Capilla Doméstica, al observar su grado de deterioro por la acción de termitas, se procedió a su relevamiento, análisis estructural y verificación de secciones; trabajo presentado en las Jornadas AIE 2006. El presente trabajo analiza los fundamentos del proyecto de recuperación como secciones mixtas agregando resinas epoxi y barras de acero zincadas, solución mirada con reservas por algunos especialistas en conservación patrimonial.

Durante esta recuperación, se observó que al avanzar hacia la zona de ingreso de la Capilla, los deterioros disminuían. Surgió entonces la posibilidad de preservar una parte del techo, del año 1668, en su estado original.

Para ello se realizaron ensayos de los tablones menos deteriorados que los de los primeros tramos, y se contó con el aporte de una empresa dedicada a tomografía de H¹A¹ mediante radiaciones gamma, la que aplicó esta técnica para detectar huecos en la madera.

Estos estudios permitieron inferir que si se asegura la desinfección necesaria para que no actúen los insectos sociales, ese sector del techo se podrá preservar intacto, quedando la estructura con un grado de seguridad adecuado, permitiendo a futuras generaciones apreciar la construcción original de este Patrimonio Cultural.

ABSTRACT

Once uncovered the wooden structure of the Domestic Chapel, when observing the damage because of the termites, it preceded its description, structural analysis and sections verification; this work was published at Jornadas AIE 2006.

The present work analyzes the basis of the project to recover it: compound sections, with epoxy resins and metallic bars of zinc-steel; this solution is regarded cautiously by some specialists in patrimonial conservation.

While the recovery, it was observed the damage diminished in the area of entrance of the Chapel. It arose the possibility to keep a part of the roof, dated 1668, in its original state.

It was accomplished a rehearsal of the less damaged planks in the first tracts, by a company specialized in tomography over H¹A¹ by means gamma rays, they applied this technique to detect holes in the wood.

The study allowed inferring that if it was assured necessary disinfections so that the social insects couldn't act, that area of the roof would be kept intact, remaining the structure with an appropriate safety condition, allowing the future generations to appreciate the original construction of this Cultural Patrimony.

INTRODUCCION

El presente trabajo surge como culminación de la intervención realizada en la Capilla Domestica de la Residencia Jesuítica, declarada Patrimonio Cultural de la Humanidad ubicada en la ciudad de Córdoba, y cuyas primeras acciones ya fueron presentadas en la Jornadas de la AIE en 2006.

En esta Capilla, cuya construcción finalizó en el año 1668, se cree que se verificó el método constructivo que luego se utilizaría en la Iglesia Principal. Fig. 1 y 2



Figura 1 – Vista interior



Figura 2 – Vista exterior

La estructura de madera del techo de la Capilla esta conformado por una bóveda semicircular de 6,50 m libre entre apoyos por 13,15 m en el sentido de la generatriz, la que está sustentada por muros de mampostería de piedra de 1,00 m de espesor. Fig. 3.

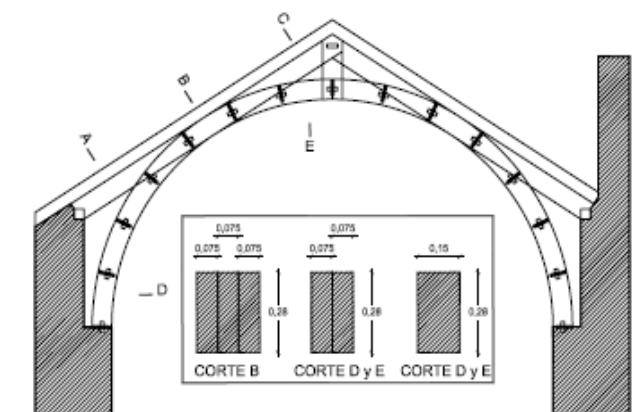


Figura 3 – Corte estructural de la bóveda

Los arcos de madera separados cada 65 cm. que constituyen la bóveda, se completan con vigas rectas que sirven para materializar los faldones planos, sobre los que se montan los tablones y capas de bovedillas que constituyen la cubierta externa. Fig. 4.

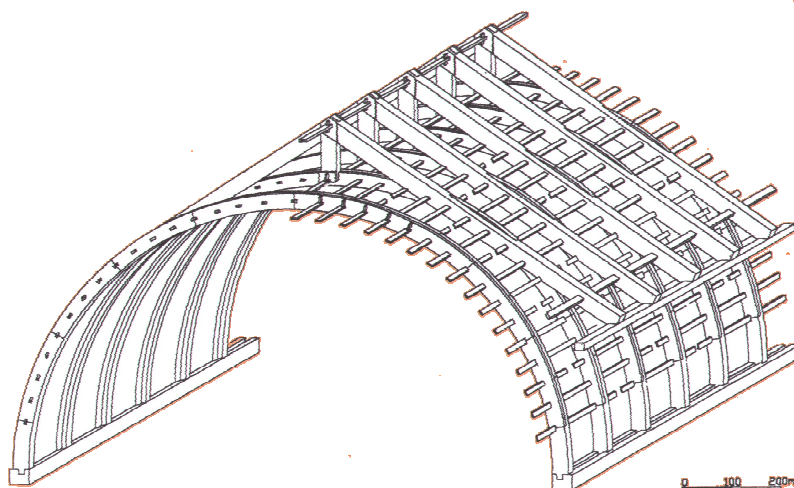


Figura 4 – Volumetría de la estructura de madera

PRIMERAS ACTUACIONES:

Las primeras actuaciones, descritas en el trabajo presentado anteriormente, consistieron en el relevamiento de los daños originados por la humedad y fundamentalmente por la acción de insectos sociales (termitas) en el entablado de 1 1/2 pulgadas y en los componentes de la estructura principal, cuyo método constructivo resultó similar al de la Iglesia principal. Se visualizó también la particular conformación del cielorraso, realizado con cañas tacuaras, mortero a presión con terminación interior alisado y pintado. Fig. 5 y 6.



Figura 5 - Unión entre viga y arco



Figura 6 - Sujeción del cielorraso

Posteriormente se procedió a la limpieza y desinfección con insecticidas de la madera de la estructura que quedó expuesta, donde se observó y relevaron los huecos por el faltante de material originado por las termitas, principalmente en la zona de intersección del arco con la viga recta del faldón. Fig. 7.



Fig. 7 - Ataque de las termitas

Otra etapa de la intervención consistió en la obtención de muestras a fin de identificar la madera, tarea que se realizó en la Facultad de Ingeniería Forestal (Sgo. del Estero). Las muestras fueron analizadas macro y microscópicamente, resultando todas de Algarrobo.

Finalmente, y de acuerdo a los detalles constructivos relevados se moduló la estructura principal, procesando computacionalmente la misma y obteniendo las solicitaciones máximas de las distintas barras que la conforman, lo que permitió realizar la verificación seccional de acuerdo a las prescripciones de la norma NBR 7190, resultando en todos los casos tensiones mucho menores a la resistencia de cálculo.

En el lugar de mayor daño, que es donde se monta la viga recta con el arco, la sección compuesta total (zona no rayada de Fig. 8) es de:

$$A = 105 + 105 = 210 \text{ cm}^2$$

$$W = 245 \text{ cm}^3 \text{ (un solo triángulo)}$$

Solicitación: $M = 2060 \text{ Nm}$; $N = 8700 \text{ N}$

Tensión de trabajo:

$$\sigma_{tr} = 8700 / 210 + 206000/245 = 882,2 \text{ N/cm}^2 < f_{cd} = 1210,0 \text{ N/cm}^2$$

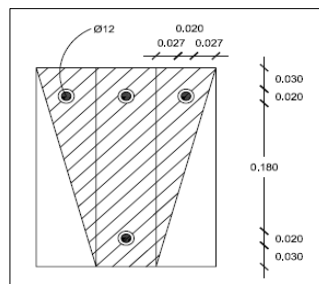


Figura 8 – sección más dañada

Evidentemente el sobredimensionado original de la estructura permite que las secciones actuales, aún con las reducciones, en algunos sectores muy importantes, ocasionadas por los insectos, continúen siendo suficientes para las cargas que deben soportar.

Sin embargo se temía una situación de mayor deterioro en la parte aún no investigada, que podría comprometer la seguridad de la estructura de esta obra de tan importante valor patrimonial.

TRABAJO DE REPARACIÓN:

Para la rehabilitación de la estructura la solución elegida, mirada con recelo por algunos especialistas en conservación del patrimonio histórico, fue la de transformar la sección en otra mixta de madera-mortero epoxi.

Se eligió esta solución ya que las sustituciones de las piezas dañadas eran imposibles y un incremento de las características mecánicas con escuadrías de madera o acero mediante operaciones de cocido o grapado quedaría impropio y con

muchas posibilidades de dañar el cielorraso y sus pinturas, obra tan delicada, y de enorme valor patrimonial.

Luego de limpiar bien la zona afectada, la unión entre el mortero epoxi y la madera sana se aumenta insertando varillas en perforaciones de un diámetro 3 mm mayor que las mismas, así se consigue que la resina epoxi ocupe dicho espacio. Así una vez perforada la madera sana una longitud de 15 cm. se rellenan dichos orificios con resina epoxi, allí se introducen varillas de acero galvanizado de un diámetro de 12 mm. Las varillas ocupan todo el desarrollo del nido que es posteriormente rellenado con mortero epoxi, hasta recuperar la sección original. Figuras 9 ,10 y 11.

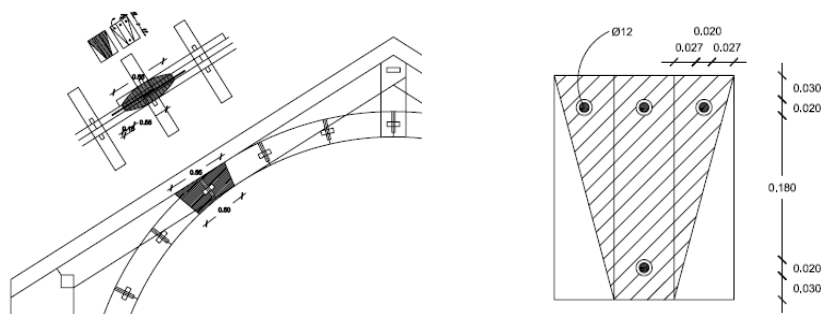


Fig. 9 – Reparación de la sección más dañada

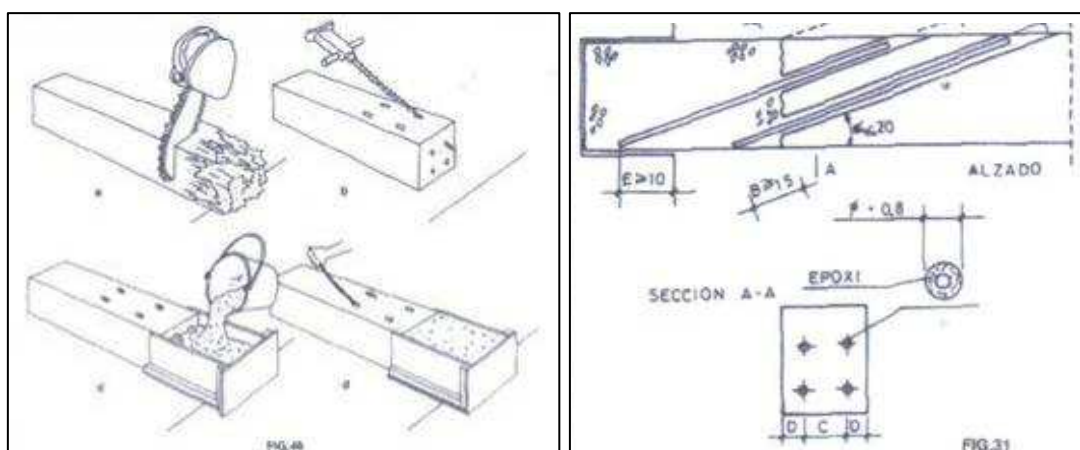


Fig. 10 – Método de reparación de secciones de madera con resina epoxi



Figura 11 – Reparación con resina epoxi terminada

El proceso de reparación con resinas epoxis, se basó en las indicaciones del trabajo de los Ings. Pigozzo y Rocco Lahr, quienes señalan que las resinas epoxis son claramente los adhesivos más adecuados para el refuerzo o anclaje de elementos de acero en piezas de madera.

Algunas resinas, como la resina epoxi Sikadur 32 utilizada en reparación de la estructura de la Capilla, liberan un fuerte calor como reacción entre sus componentes. Este calor aumenta rápidamente la viscosidad de la misma, dificultando su inyección, por lo que se debe trabajar con porciones posibles de ser aplicadas en el tiempo disponible.

La inyección se realiza por medio de un tubo con el mismo diámetro externo de la barra de acero, sujeto de la extremidad del aplicador y se inicia por el extremo interno de la perforación realizada en la madera. Dicha perforación debe tener un diámetro mayor a 1,2 veces el diámetro nominal de la barra de acero y menor a 1,5 veces dicho diámetro. Fig. 12

- a) Sellado en el extremo
- b) Perforación para eliminar el aire interno e indicar el término de la aplicación.
- c) Abertura para aplicación de resina.
- d) Aplicador sobre presión.

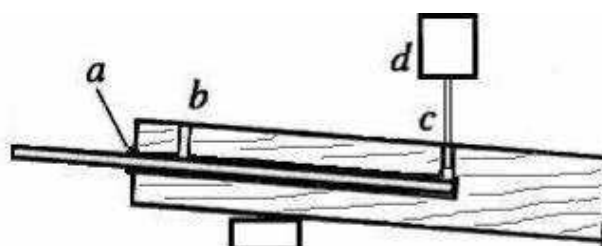


Fig. 12 – Unión barra de acero - madera con resina epoxi

La resina epoxi Sikadur 32, de consistencia pastosa, fue difícil de aplicar. El tiempo máximo para la aplicación de 250 grs. de la mezcla de los dos componentes A y B, fue cerca de 10 minutos.

El uso de esta resina epoxi fue verificado con ensayos de tracción del anclaje en laboratorio, no presentándose rotura frágil, y la misma se produjo con arrancamientos de pedazos de madera.

Se agrega un gráfico con valores comparativos de resistencia del anclaje para dos resinas epoxi en madera de Eucalipto y Pino, considerando un espesor de lámina de cola de 1,58 mm, Figura13

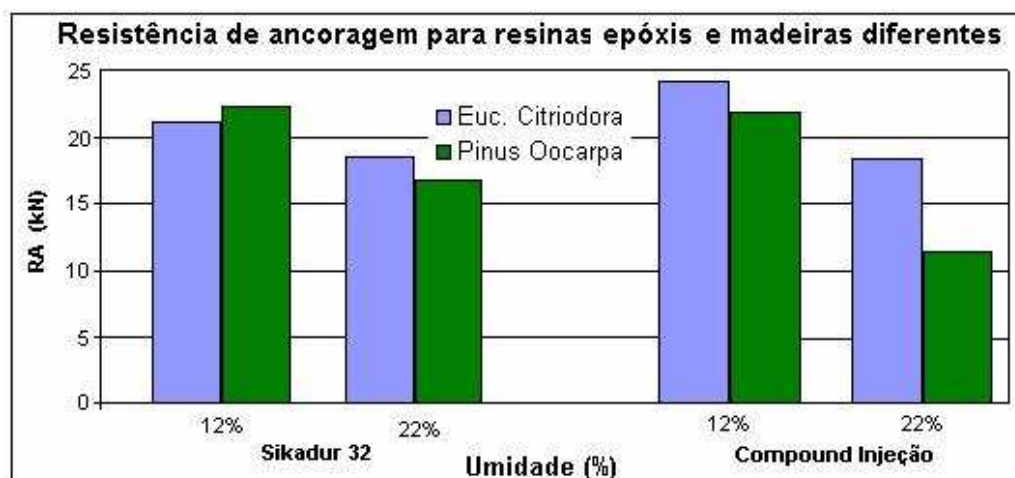


Fig. 13 – Resistencia de anclaje para resinas epoxis en maderas diferentes

Resistência de ancoragem

Legenda: Poliuretano (azul), Compound Injeção (marrom), Sikadur 32 (amarelo)

Y-axis: RA (kN) (0,00 a 30,00)

X-axis: e (mm) e U=12%, e (mm) e U=22%, Umidades (%) e=1,58mm

Condição	Parâmetro	Poliuretano (kN)	Compound Injeção (kN)	Sikadur 32 (kN)
(1) U=12%	e = 0,58	~1,5	~19,0	~17,5
	e = 1,08	~1,5	~22,0	~19,5
	e = 1,58	~1,5	~24,0	~21,0
	e = 2,08	~1,5	~23,0	~23,0
(2) U=22%	e = 0,58	~3,0	~14,5	~16,0
	e = 1,08	~3,0	~17,0	~18,0
	e = 1,58	~3,0	~19,5	~19,5
	e = 2,08	~3,0	~22,5	~21,5
(3) e=1,58mm	Umidade = 15%	~3,0	~23,5	~21,0
	Umidade = 20%	~3,0	~20,5	~19,5
	Umidade = 25%	~3,0	~18,0	~18,5
	Umidade = 30%	~3,0	~15,0	~17,0

DECISIÓN DE PRESERVAR EL ESTADO ORIGINAL EN UN SECTOR:

Durante el transcurso de los trabajos de relevamiento y reparación de los primeros tramos, se pudo observar que en los módulos siguientes de la estructura, los daños que se visualizaban eran sensiblemente menores. Esto llevó a pensar en la posibilidad de dejar intacto un sector, a fin de mantener una parte de la Capilla Doméstica tal como fue construida en 1668.

Para ello fue necesario verificar que realmente las condiciones patológicas del sector no alteraran las condiciones de seguridad requeridas.

Con este propósito, se extrajo un tablón de la cubierta que presentaba daños menores y se lo ensayó a flexión en el Laboratorio T.I.D.E. de la Facultad de Arquitectura para analizar su capacidad resistente. El tablón ensayado tenía aproximadamente 30 cm de ancho, 135 cm de largo y 3 cm de espesor. Figuras 15 y 16.





Fig. 16 – Daños provocados por termitas en tablón ensayado

Se adaptó el equipo para ensayo de flexión de manera de dejar la distancia entre apoyo en 65 cm, que es la luz entre las vigas rectas que conforman los planos resistentes de la estructura y sirven de apoyo a los tabloncillos de la cubierta.

Para el ensayo de flexión se siguió la normativa de la NBR 7190, aplicando una fuerza en el centro de la luz entre apoyos distribuida en el ancho del tablón.

El aumento de la carga se realizó en forma constante a razón de 10 Mpa/min y hasta la rotura.

Como la longitud del tablón lo permitía se realizaron dos ensayos utilizando ambos extremos sin cortarlo de modo de ensayarlo con la continuidad correspondiente, tal como se encuentra en obra. Figura 17.



Fig. 17 – Ensayo a Flexión del tablón

Resultados de los ensayos:

$$1^{\text{er}} \text{ ensayo: } \sigma_{\text{rot}} = \frac{M}{W} = \frac{146250 \text{ Ncm}}{42,92 \text{ cm}^3} = 3407,0 \text{ N/cm}^2$$

$$2^{\circ} \text{ ensayo: } \sigma_{\text{rot}} = \frac{138130 \text{ Ncm}}{45,30 \text{ cm}^3} = 3049,2 \text{ N/cm}^2$$

Al ser pocos ensayos se consideró el criterio de la Norma NBR 7190 de que la resistencia característica de esta madera será 0,7 de la tensión media:

$$f_{\text{cok}} = 0,7 \times 3228,1 = 2259,7 \text{ N/cm}^2$$

Por lo tanto, la resistencia de cálculo, aplicando los coeficientes modificadores resultó:

$$f_{cod} = k_{mod} \times f_{cok} / 1,4 = 0,6 \times 0,8 \times 0,8 \times 2259,7 \text{ N/cm}^2 / 1,4$$

$$f_{cod} = 619,8 \text{ N/cm}^2$$

Por otra parte, se calcularon las solicitaciones del tablón considerando la combinación reglamentaria de carga permanente más la sobrecarga variable de uso, resultando un momento flector máximo de:

$$M = \frac{1489,6 \text{ N} \times 0,65^2 \text{ m}}{8} = 78,6 \text{ Nm} = 7860 \text{ Ncm}$$

La tensión de trabajo resultó entonces:

$$\sigma_{tr} = \frac{7860}{42,92} = 183,1 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2} < f_{cod} = 619,8 \text{ N/cm}^2$$

Los ensayos y cálculos realizados permitieron determinar que el tablón ensayado aun con los defectos señalados, tiene seguridad satisfactoria para las acciones permanentes y variables de uso.

Por último, para corroborar el estado de seguridad satisfactorio en la estructura no descubierta, se requirió la realización de un gammagrafiado que permitiría detectar la cantidad de oquedades provocadas por los insectos sociales y el tamaño de las mismas en ese sector.

El trabajo se llevó a cabo en dos etapas. En la primera, a los fines del calibrado del equipo de gammagrafiado, se realizaron mediciones en la zona del techo de la Capilla que tiene las tejas y tabloncillos superiores removidos, con el propósito de probar la aplicabilidad de la técnica para detectar huecos en las maderas de los arcos. En particular en esta primera etapa se concentró en analizar un hueco de 14 cm de largo por 3,5 de ancho y 5 cm de profundidad cubriendo los arcos a la vista con un tablón y capas de tejas con mezcla de cal de modo de simular la situación del resto del techo.

Los arcos se enumeraron de 1 a 12 contando desde la entrada de la Capilla, siendo el 12 el que estaba descubierta y donde se trabajó en la primera etapa. Figuras 18 y 19.



Fig. 18 – Arco donde se probó el sistema de gammagrafiado



Fig. 19 – Simulación de las condiciones de la cubierta

Finalizada esta etapa, este método tomográfico basado en el uso de radiación gamma queda apropiado para inspeccionar el estado de los arcos del techo de la Capilla Doméstica y detectar oquedades de mas de 5 cm y otros elementos.

En la segunda etapa se realizaron mediciones, 3 gammagrafías por arco, siempre en los puntos tangentes del arco con la viga recta que conforma el faldón inclinado y en los arcos 2, 4, 6, 8 y 10. Figuras 20 a 24.



Fig. 20 – Toma de Gammagrafías desde el interior



Fig. 21 – Colocación de placa receptora



Fig. 22 – Equipo emisor ubicado sobre la cubierta

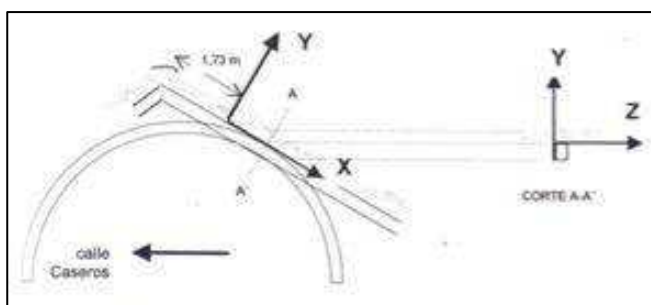


Fig. 23 – Sistema de coordenadas utilizado en el gammagrafiado

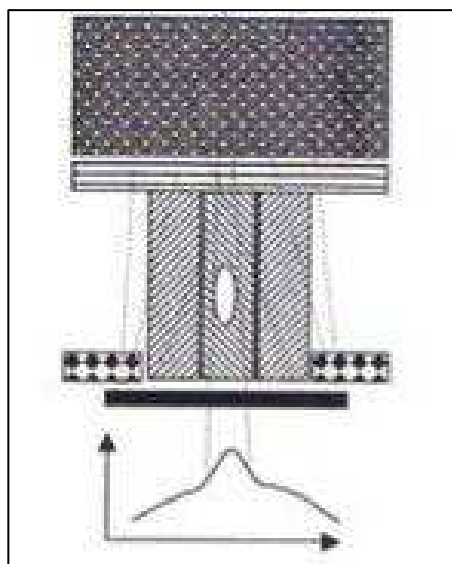


Fig. 24 – Esquema ilustrativo de mediciones realizadas en cada sector de punto tangente. De arriba abajo: tejas, tablones y arcos

En los arcos 2, 8 y 10 se observan manchas extendidas que implican defectos de espesor en las vigas y posiblemente en el tablón superior. Con respecto a las zonas en que las gammagrafías aparecen mas claras, estos defectos alcanzan entre 4 y 7 cm. Los arcos 4 y 6 parecen estar relativamente intactos.

En todos los casos se ven con claridad ranuras entre las tablas que conforman el arco de profundidad similar a la altura de la sección del arco y viga recta.

También en todos los casos se observan clavos introducidos desde la izquierda (según se miran las gammagrafías) que atraviesan la tabla izquierda y central. Un grupo de clavos se encuentra a unos 7 cm de la cara superior de la tabla, mientras que otro grupo está a una distancia similar del fondo de las mismas.

En algunos casos se ha llegado a observar las cañas que sirven de soporte al cielorraso estando espaciadas 2,5 cm teniendo un diámetro variable entre 8 y 13 mm. Figura 25

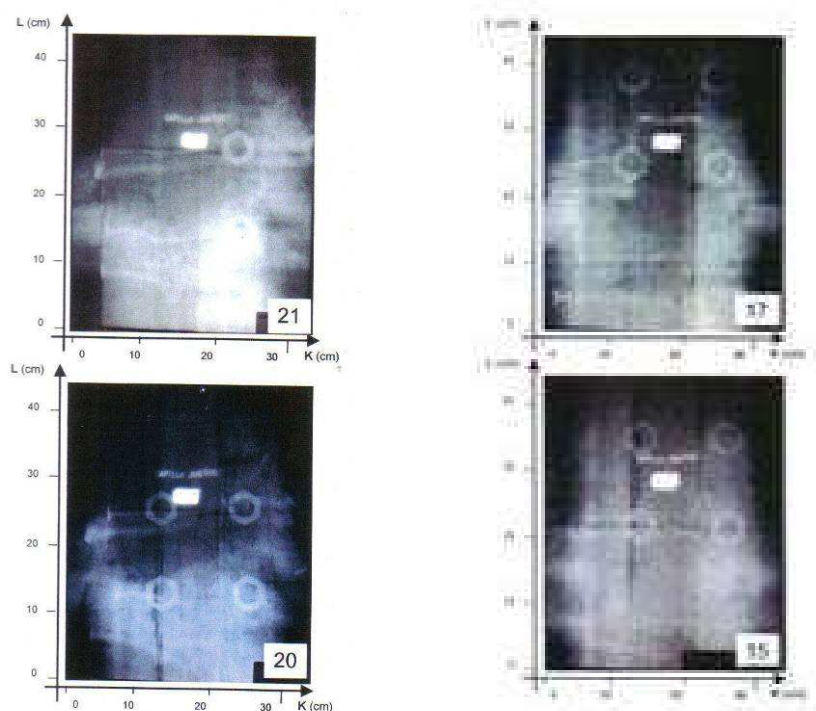


Fig. 25 - Gammagrafías del arco 2 (izq.) y de los arcos 4 y 6 (der.)

Consideraciones del Gammagrafiado

El trabajo fue realizado por TOMOGRAFIA DE HORMIGON ARMADO S.A. utilizando la técnica del gammagrafiado que la empresa emplea para el estudio de armaduras y oquedades en el hormigón armado.

Las gammagrafías guardan similitud con las radiografías de uso médico, salvo que se utiliza una fuente radioactiva en lugar de un generador de rayos X. En una radiografía ò gammagrafía, los elementos mas densos proyectan una imagen mas clara y viceversa. Una oquedad ó vacío en un volumen de cierto material se manifiesta como una mancha oscura de mayor densidad fotográfica que el resto. Este es el principio sobre el que se basa la gammagrafía.

En el caso de oquedades en el hormigón armado el contraste que se obtiene en una gammagrafía es proporcional a la diferencia de densidades $(2,5 - 0) \text{ gr/cm}^3$ por el espesor de la oquedad.

En el caso que nos ocupa, oquedades en la madera producidas por la acción de las termitas, la situación no es tan favorable por dos razones: a) la madera del techo de la Capilla tiene una densidad de $0,7 \text{ gr/cm}^3$, es decir 3,4 veces menor que la

densidad del hormigón ; b) la oquedad ó hueco producido por las termitas no queda totalmente vacío sino que queda un residuo cuya densidad no se conoce pero que obviamente es mayor que cero.

Si el residuo que dejan las termitas se estima en $0,2 \text{ gr/cm}^3$ la diferencia de densidades es menor que $0,5 \text{ gr/cm}^3$, una 5 veces menor que en el caso de una oquedad en el hormigón armado.

Por esta razón previo a las mediciones de la segunda etapa se realizaron cálculos para adaptar el programa GAMMASIM de THASA para simular una situación como la del techo de la Capilla Doméstica lo más realísticamente posible. Este programa está basado en el método Montecarlo y consiste en programar una computadora para que calcule trayectorias de cientos de millones de fotones gamma emitidos por una fuente puntual que atraviesan un volumen de cierta densidad donde hay elementos de otra densidad. Figuras 26 y 27.

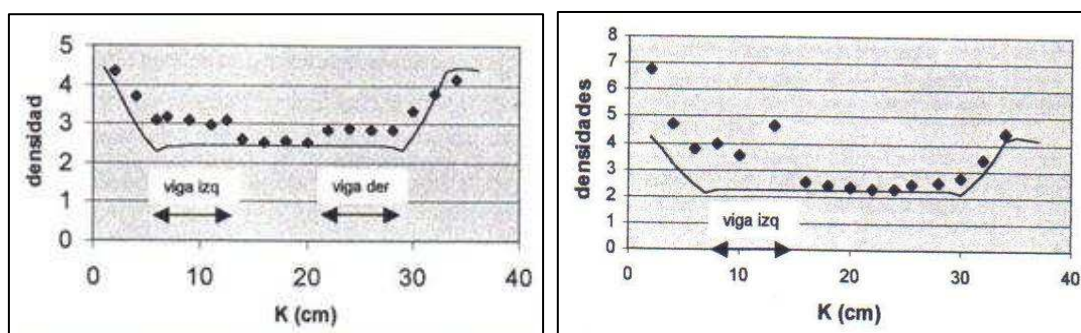


Fig. 26 - Densidades medidas (puntos) y fondo calculado (línea) para las gammagrafías 20 y 9 en un corte a $L = 35 \text{ cm}$ (atravesando tres vigas)

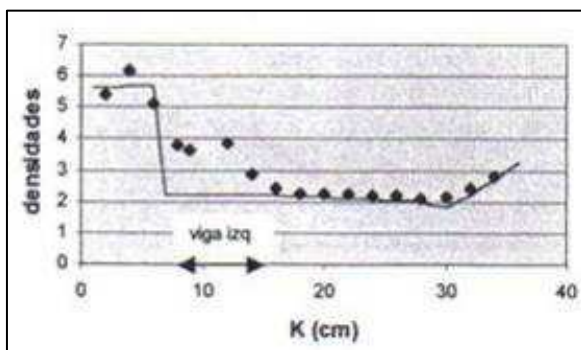


Fig. 27 - Densidades medidas (puntos) y fondo calculado (línea) para la gammagrafía 11 en un corte a $L = 23 \text{ cm}$ (atravesando tres vigas)

El programa utiliza las probabilidades conocidas de interacción de un fotón con la materia para calcular punto a punto estas trayectorias y determinar finalmente cuantos fotones y de que energía son registrados en cada punto de la placa gammagráfica.

Luego de estos cálculos previos se realizaron las mediciones de la etapa 1 con el objeto de determinar la sensibilidad del método.

CONCLUSIONES

Este trabajo debe considerarse complementario del presentado en las XIX Jornadas de Ingeniería Estructural donde se mostraban mas detalles del sistema estructural del techo de la Capilla Doméstica, su resolución y verificación de las secciones de los elementos.

En la primera parte se presentan los argumentos que nos impulsaron a elegir el método de recuperación de las secciones de madera dañadas por las termitas con el uso de resinas y mortero epoxi.

El análisis de la capacidad resistente del tablón a partir de los ensayos de laboratorio permite aconsejar que de no aumentar ese grado de deterioro pueden cumplir sus funciones estructurales con un grado de seguridad adecuado.

Cabe recordar que en la primera parte de la recuperación del techo de la Capilla los tabloneros fueron reemplazados en su totalidad.

Finalmente el uso de la gammagrafía como técnica no destructiva para obtener información sobre posibles daños producidos por las termitas en los arcos, vigas y tabloneros de madera, nos permite con sus resultados, comparar con los daños de los arcos y vigas anteriormente verificados y recuperados y aconsejar la preservación de este sector como muestra intacta desde su ejecución en 1668.

BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997). **NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeira**. ABNT. Rio de Janeiro.

APOLO G. L., MARTINEZ LUENGAS A. L. (1995), **REESTRUCTURACIÓN EN MADERA**. Madrid

PHILIBERT DE L'ORME (1591), **DES OEVRES ET NOUVELLES INVENTIONS POUR BIEN BASTIR**. Paris.

JULIO C. PIGOZZO; FRANCISCO A. ROCCO LAHR (2006). Univ. Estadual de Maringá y Univ. de São Paulo, **ANCORAGEM DE BARRAS DE AÇO EM PEÇAS ESTRUTURAIS DE MADEIRA**