

ESTUDIO NO DESTRUCTIVO DEL INTERIOR DE PIEZAS DE VALOR HISTÓRICO MEDIANTE GAMMAGRAFÍAS

Mariscotti M. A. J., Thieberger P., Ruffolo M. y Frigerio T.

THASA – Reclus 2017, Boulogne 1609, BA – 011-4719-5132 – info@thasa.com - www.thasa.com

RESUMEN

La tecnología de Tomografía de Hormigón Armado desarrollada por THASA ha sido aplicada al estudio de piezas ornamentales y otras de valor histórico con el objeto de examinar el interior de las mismas e investigar, en algunos casos, la existencia, configuración y condición de refuerzos metálicos y en otro caso, la existencia de huecos producidos por termitas en vigas de madera. En este trabajo se discuten detalles metodológicos y resultados alcanzados en los casos de las estatuas ubicadas en el coronamiento del Palacio de Tribunales en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, en dragones colgantes de las torres de la Basílica de Luján y en las vigas del techo de la Capilla Doméstica, construida en 1660 y declarada patrimonio de la humanidad por la UNESCO, ubicada en la manzana jesuítica en la Ciudad de Córdoba. El carácter pionero de la investigación de oquedades en madera realizada en este último caso hizo necesario la construcción de modelos de simulación que resultan de utilidad para otras aplicaciones similares.

INTRODUCCIÓN

La técnica denominada Tomografía de Hormigón Armado (THA) es un desarrollo de THASA aplicado principalmente a la determinación de posiciones y diámetros de barras de acero en estructuras de hormigón armado tales como vigas, columnas, losas y otras. Esta técnica, basada en el uso de radiación gamma para examinar estructuras, se caracteriza a) por la precisión (± 1 y 5 mm para diámetros y posiciones respectivamente) con que estas cantidades pueden ser determinadas; b) por la aptitud para resolver casos complicados de alta densidad de barras de acero y piezas de gran espesor usando una fuente radioactiva de baja energía y portable y c) por la posibilidad adicional que brinda de detectar defectos de corrosión en barras de acero y oquedades en el concreto.

El propósito de este trabajo es describir resultados obtenidos con esta técnica en aplicaciones de naturaleza diferente, es decir, en la determinación de estructuras metálicas en el interior de elementos ornamentales y en la detección de oquedades en vigas de madera de un edificio histórico, haciendo especial hincapié en este último caso por tratarse de un resultado reciente y hasta donde llega nuestro conocimiento pionero en su tipo.

CAPILLA DOMÉSTICA DE LOS JESUITAS EN CÓRDOBA

Esta Capilla está ubicada sobre la calle Caseros entre Vélez Sarfield y Obispo Trejo en la Ciudad de Córdoba, en la así llamada Manzana Jesuítica. Fue construida en 1660 y recientemente ha sido declarada Patrimonio Histórico de la Humanidad por UNESCO.

A raíz de la observación de humedad en un extremo del techo, se levantaron las tejas en este sector y se observó que las vigas de madera exhibían importantes huecos producidos por termitas.

La Foto A de la Figura 1 muestra parte del techo donde se levantaron las tejas, en la que se puede observar las vigas de madera con algunos de estos huecos.



Figura 1. A. Se muestra la sección del techo donde se removieron las tejas y tablones. Se señalan los huecos 1 y 2 de la viga de la cabriada #12. B. Medición #14 mostrando la ubicación de la fuente radiactiva.

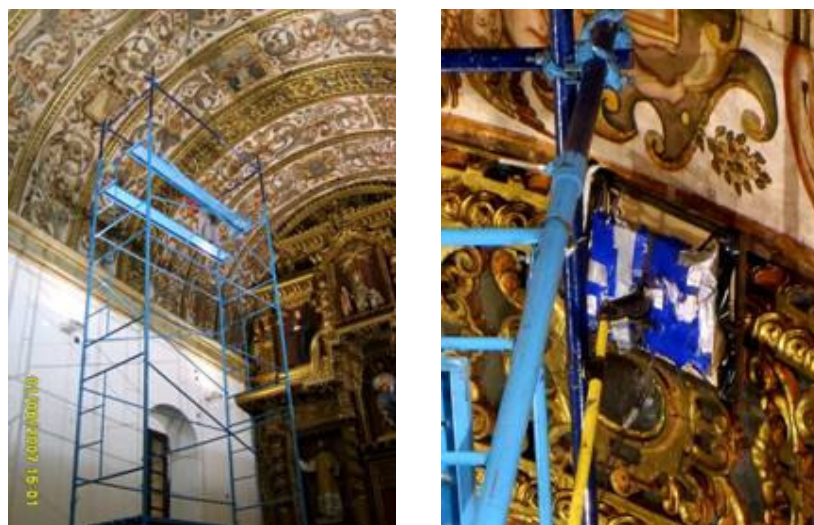


Figura 2. Cielorraso de la capilla con el andamio. En la foto de la derecha muestra el conjunto filtro-placa gammagráfica-gamómetro en el bastidor y soporte.

Con el objeto de investigar la posible presencia de este tipo de defecto en el resto del techo en forma no destructiva y sin perturbación alguna a la estructura original, se consideró la posibilidad de utilizar la THA, gammagrafiando varios sectores del techo. La Figura 1b muestra en la foto de la derecha la disposición de la fuente en una de estas mediciones y la Figura 2 muestra una vista del techo desde el interior de la capilla con el andamio para facilitar la ubicación de la placa.

Aspectos técnicos

Las gammagrafías guardan similitud con la radiografías de uso médico, salvo que se utiliza una fuente radioactiva en lugar de un generador de rayos X. En una radiografía o gammagrafía, los elementos más densos proyectan una imagen más clara y viceversa. Una oquedad o 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 el presente trabajo.

La densidad fotográfica D que se obtiene en una gammagrafía después de haber sido ésta expuesta a la radiación de una fuente de intensidad I_0 ubicada a una distancia d de la placa, que atraviesa un espesor ε de un material de densidad δ durante un tiempo T es proporcional a

$$D \sim I_0 \cdot T / d^2 \cdot \exp(-\mu \cdot \delta \cdot \varepsilon) \quad (1)$$

donde μ es un coeficiente de absorción de la radiación que depende de su energía (en este caso igual a 0,1 cm²/g).

De la Ec. (1) se puede deducir el contraste, es decir, la diferencia de densidades fotográficas que se obtiene entre dos puntos de una gammagrafía cuando los rayos atraviesan zonas de distintas densidades y espesores.

Para el caso de un bloque de material de densidad δ_1 y espesor ε_1 que contiene en su interior un elemento de densidad δ_2 y espesor ε_2 , se puede deducir de la Ec.(1) que el contraste entre un punto de la gammagrafía que corresponde a radiación que sólo ha atravesado el material 1 y otro que corresponde a radiación que ha atravesado el elemento 2, es proporcional a

$$D_2 - D_1 \sim I_0 \cdot T / d^2 \cdot \exp(-\mu \cdot \delta_1 \cdot \varepsilon_1) \{1 - \exp[-\mu \cdot (\delta_2 - \delta_1) \varepsilon_2]\}$$

O sea que, dados la densidad y el espesor del material 1 el contraste aumenta con la diferencia de densidades y el espesor del elemento 2 (pues disminuye la exponencial dentro del corchete).

La Figura 3 da un ejemplo del contraste que se obtiene en una gammagrafía de una botella de Coca Cola vacía dentro de un bloque de hormigón armado. El contraste en el centro de la botella (altura "c" en el gráfico de la parte inferior de la Figura 3a) es proporcional a la diferencia de densidades que en este caso, por ser $\delta_2 = 0$, es igual a la densidad del hormigón (2,5 g/cm³), por el espesor de la botella. La diferencia de contraste entre la Figura

3a y la Figura 3b se debe por lo tanto a la diferencia de espesores o sea del diámetro de la botella. En el primer caso el diámetro es unas 4 veces mayor que en el segundo y esa es también la relación entre contrastes como puede verse en los gráficos de la parte inferior de la Figura 3.

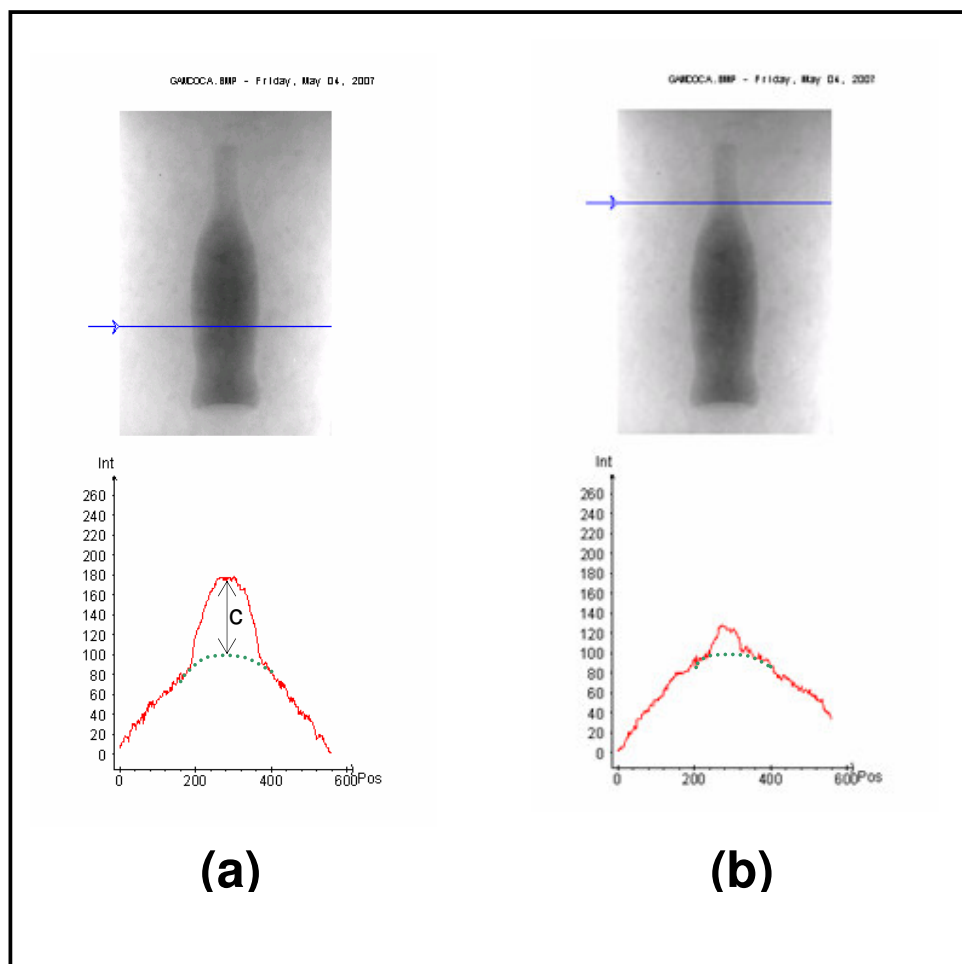


Figura 3. Ejemplo ilustrativo de detección de una oquedad simulada por la inclusión de una botella de Coca Cola vacía en una muestra de hormigón. La determinación de la extensión de la oquedad se realiza mediante el programa INSPEC que grafica el perfil de densidad fotográfica (nivel de ennegrecimiento) en diversos cortes de la gammagrafía. La extensión de la oquedad en el plano de la gammagrafía está definida por el ancho de la sombra mientras que su “profundidad” (en el sentido de la radiación) está dada por la magnitud c en el gráfico de la izquierda.

En el presente caso de “oquedades” en la madera la situación no es tan favorable por dos razones: a) la madera del techo de la capilla tiene una densidad de $0,7 \text{ g/cm}^3$, es decir 3,4 veces menor que la densidad del hormigón; b) la “oquedad” o hueco producido por las termitas no queda totalmente vacío sino que queda con un residuo cuya densidad no conocemos pero que es obviamente mayor que cero. Si el residuo que dejan las termitas lo

estimamos en $0,2 \text{ g/cm}^3$ la diferencia de densidades es menor que $0,5 \text{ g/cm}^3$, unas 5 veces menor que en el caso de una oquedad en el hormigón.

Por esta razón antes de decidir la realización de esta investigación se realizaron cálculos previos con el objeto de determinar la sensibilidad del método.

Cálculos previos

Se utilizó el programa GAMMASIM [1] de THASA para simular una situación como la del techo de la Capilla 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. 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. Debe tenerse en cuenta que los fotones que son dispersados dentro del material y no son absorbidos producen un fondo en la gammagrafía que afecta el contraste. Es principalmente por esta razón que es útil realizar este tipo de cálculo cuando se trata de predecir resultados de una dada medición.

La Figura 4 muestra los resultados obtenidos con un cálculo de este tipo. Para este cálculo se ha supuesto una fuente radioactiva de Ir^{192} , similar a la utilizada, de un lado de un bloque de un material de densidad $0,7 \text{ g/cm}^3$, en el interior del cual hay elementos cilíndricos de densidad $0,2 \text{ g/cm}^3$, atravesados perpendicularmente por la radiación, de diámetros 10 y 5 cm.

Lo que la Figura 4 muestra es una distribución de densidades fotográficas a lo largo de una línea de píxeles en la gammagrafía simulada perpendicular al eje de los cilindros atravesados por la radiación. Esta es una distribución similar a la mostrada en los gráficos inferiores de la Figura 3, pero correspondientes al caso de un bloque de madera similar al del techo de la Capilla, que contiene huecos de dos tamaños.

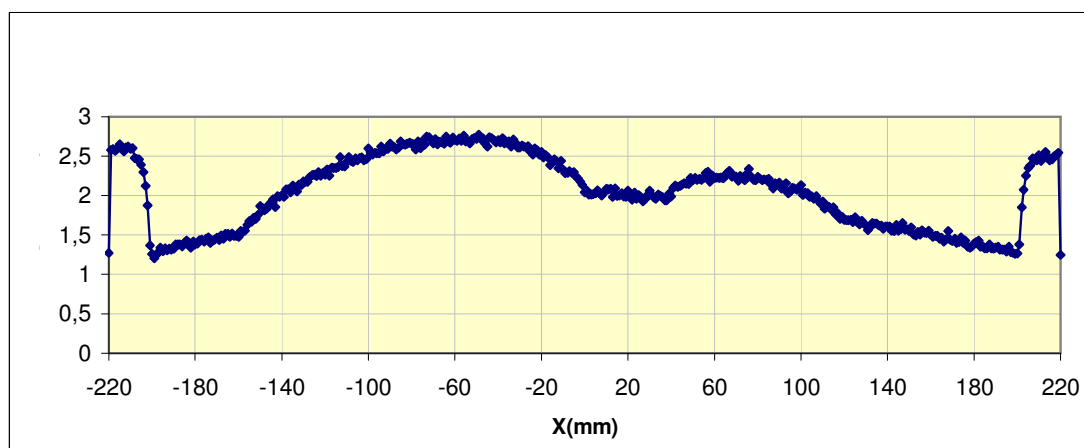


Figura 4. Distribución de densidades obtenidas con el programa Gammasim simulando un bloque de madera con huecos de 5 y 10 cm de diámetro.

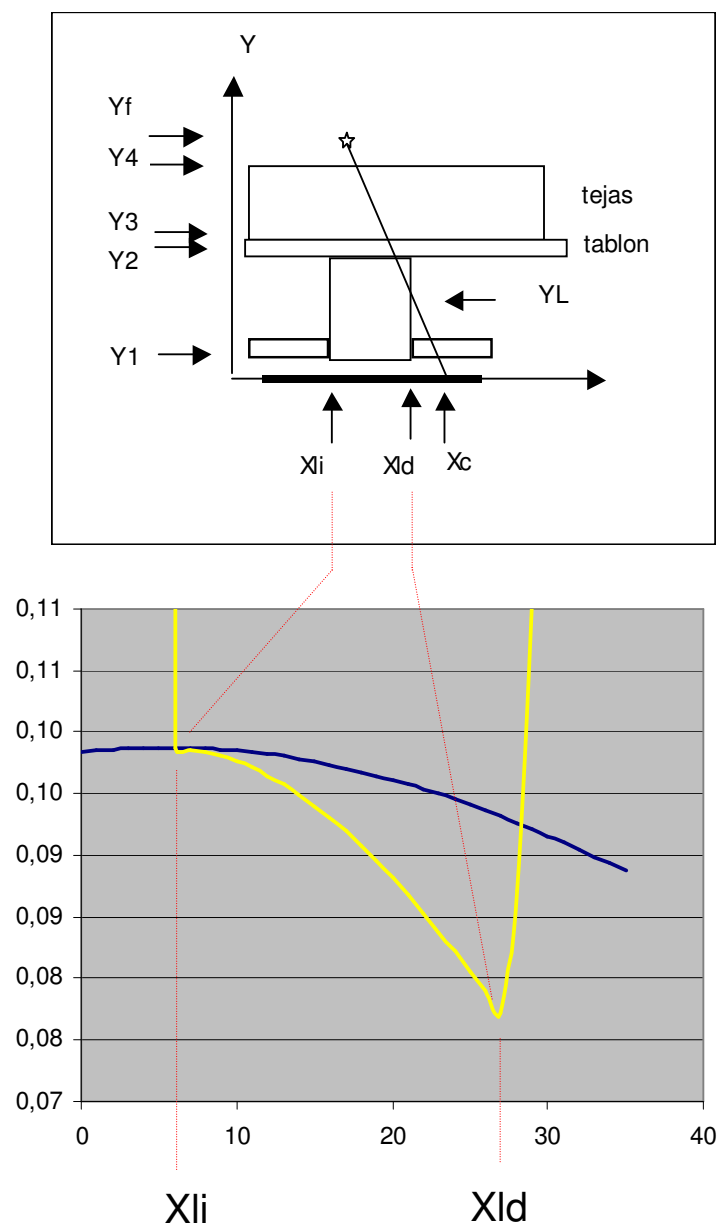


Figura 5. Ejemplo de cálculo de la distribución de fondo. El conocimiento del fondo mejora la sensibilidad del método para detectar huecos de dimensiones pequeñas. En el esquema superior se ilustran los parámetros variables incluidos en el programa. El gráfico inferior muestra los resultados para el caso en que la fuente está cerca de X_{li} , la posición de la cara vertical de la viga izquierda. Las líneas azul y amarilla corresponden al comportamiento esperado por la variación de la distancia fuente-placa y por el efecto combinado por el factor distancia y absorción en los materiales atravesados.

La distribución de densidades de la Figura 4 muestra cuatro “promontorios” sobre un “fondo” en forma de palangana invertida. Los promontorios más agudos en los extremos corresponden a zonas de mayor densidad fotográfica debidas a radiación que llega a la gammagrafía por el costado del bloque. Los otros dos promontorios de base más ancha con centros aproximadamente en $X = -60$ y 60 mm corresponden a los cilindros de menor densidad de 10 y 5 cm de diámetro, respectivamente.

El resultado de estos cálculos indica que huecos de más de 5 cm de profundidad en la madera del techo de la Capilla son detectables.

La detección de estos promontorios y la determinación de su ancho y altura, que son las magnitudes que nos interesa investigar, dependen de una buena determinación del fondo.

Para calcular la “forma” del fondo de un modo rápido sin tener en cuenta la radiación dispersa [2], se elaboró el programa LINEA DE BASE que permite definir todos los detalles de la geometría, incluyendo las tejas, tablón, cielorraso y vigas de los sectores a medir para distintas condiciones de posición de la fuente y de la placa gammagráfica y obtener resultados inmediatos.

La Figura 5 tiene, en la parte superior, un esquema que muestra los parámetros que se pueden definir en el programa, y en la parte inferior los resultados obtenidos para el caso de uno de los tres tipos de mediciones realizadas en este trabajo, en donde la fuente fue ubicada a 90 cm de la placa debajo del cielorraso en el interior de la Capilla, y próxima a la vertical de la cara lateral izquierda de la cabriada (vista del corte mirando hacia la cumbre).

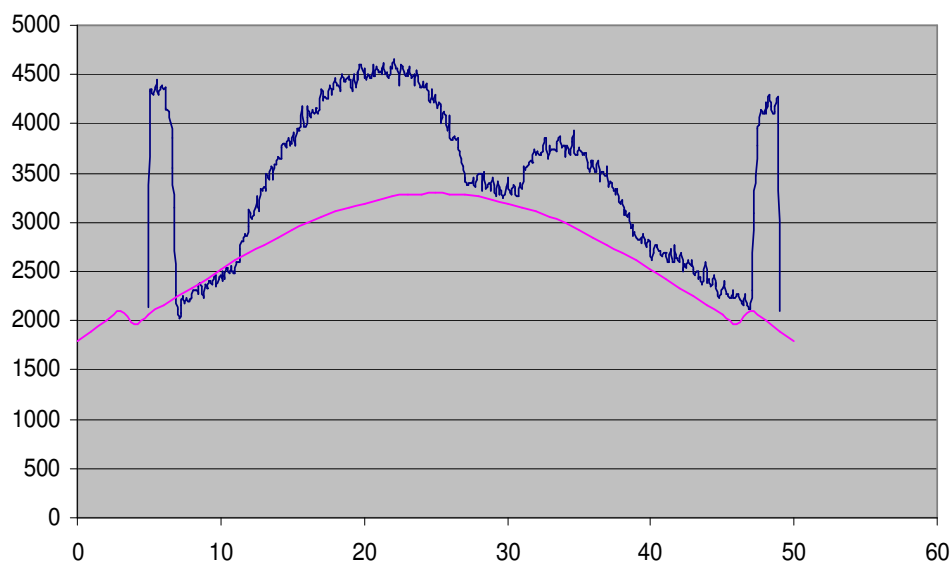


Figura 6. Los resultados mostrados en la Figura 4 (línea azul) combinados con el cálculo de la línea de fondo usando los mismos parámetros, mostrando buena consistencia.

Finalmente la Figura 6 muestra la consistencia obtenida entre la distribución de densidades fotográficas de la Figura 4 junto con la línea de fondo calculada con este segundo programa usando en ambos casos los mismos datos, lo que permite concluir en la confiabilidad de estas predicciones.

Sistema de coordenadas

En este trabajo se utilizó el siguiente sistema de coordenadas: Los ejes X e Y se definieron paralelo y perpendicular, respectivamente, a la cara superior de las vigas rectas con el origen de coordenadas a $X = 1,73$ m de la cumbre. El eje Z, perpendicular al plano (X,Y), se definió con origen en coincidencia con la cara lateral de la cabriada más alejada del frente de la Capilla. La Figura 7 ilustra el sistema de coordenadas utilizado.

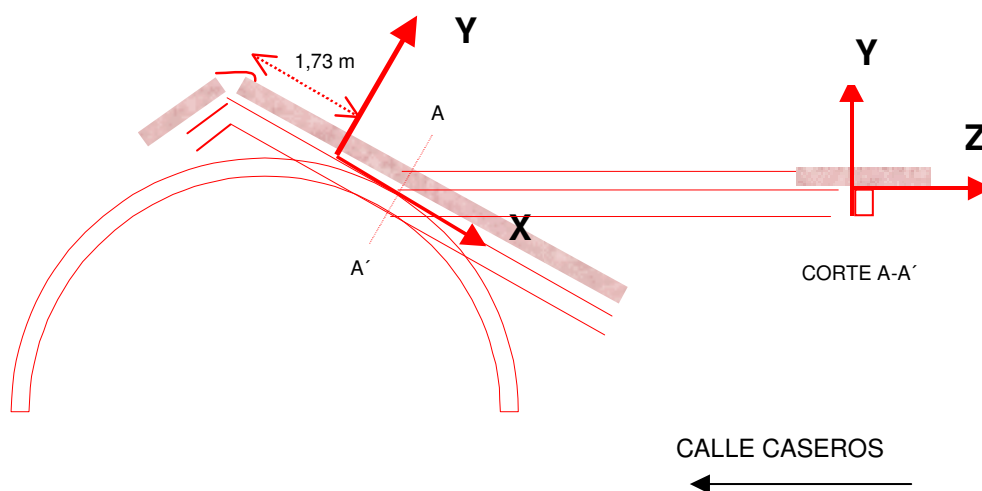


Figura 7. Ilustración del sistema de coordenadas utilizado en el trabajo.

Datos de las mediciones realizadas

En todos los casos la fuente fue ubicada por encima del techo de la capilla y las gammagrafías fueron ubicadas por debajo del cielorraso, opuestas a la fuente.

En cada cabriada se realizaron tres irradiaciones con la fuente ubicada en la vertical del: a) lateral izquierdo; b) centro y c) lateral derecho de la cabriada como lo ilustra la Figura 8.

La gammagrafía fue ubicada bajo el cielorraso procurando que su centro estuviera alineado con la fuente, es decir, que ésta estuviera en la vertical que pasa por el centro de la gammagrafía.

La distancia fuente-gammagrafía es igual al valor de la coordenada Y más los siguientes espesores:

tejas + mezcla		18 cm
tablón		4 cm
vigas		28 cm
distancia	cielorraso-	3 cm
gammagrafia		
TOTAL		53 cm

En la Tabla 1 se resumen los datos de las mediciones realizadas.

Tabla 1. Resumen de la mediciones realizadas.
Las coordenadas X_f , Y_f y Z_f son las de la fuente (*)

#	Fecha	cabriada	numeración de uso interno	X_f	Y_f	Z_f	T
				cm	cm	cm	min
1	1 Jun	12	2	44	21	0	45
2	1 Jun	12	3	44	21	10.5	60
3	2 Jun	12	4	44	21	0	20
4	2 Jun	12	5	44	21	10.5	30
5	2 Jun	12	6	44	21	21	30
6	3 Jun	12	7	44	21	21	90
7	3 Jun	12	8	51	46	17.5	70
8	5 Jun	10	1	30	58	0	50
9	5 Jun	10	2	30	58	10.5	40
10	5 Jun	10	3	30	58	21	35
11	5 Jun	8	4	33	59	0	35
12	5 Jun	8	5	36	59	10.5	35
13	5 Jun	8	6	37	59	21	35
14	6 Jun	6	1	33	58	0	35
15	6 Jun	6	2	33	57	10.5	35
16	6 Jun	6	3	33	57	21	35
17	6 Jun	4	4	37	58	10.5	35
18	6 Jun	4	5	32	58	0	35
19	6 Jun	4	6	32	58	21	35
20	6 Jun	2	7	38	59	10.5	35
21	6 Jun	2	8	38	59	0	35
22	6 Jun	2	9	38	59	21	35
23	7 Jun	12	1	50	58	17.5	45
24	7 Jun	12	2	50	58	17.5	45

* Las coordenadas del centro de la placa fueron: $X_p = X_f$; $Y_p = -30,5$ cm; $Z_p \sim 10,5 + d$, con $d = 2, 0, -2$ para $Z_f = 0, 10,5$ y 21 , respectivamente

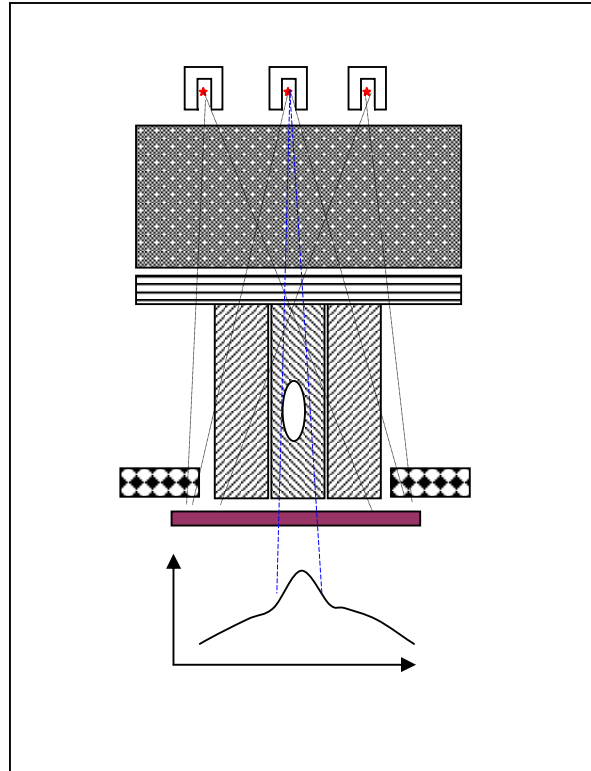


Figura 8. Esquema ilustrativo de mediciones realizadas en cada sector de punto tangente. Los bloques sombreados representan, de arriba a abajo, las tejas, los tablones y las cabriadas.

Resultados

En esta sección usamos el sistema de coordenadas (K,L) fijo a la gammagrafías donde K y L se refieren a los ejes paralelos al lado más corto y más largo de la gammagrafía.

Cabe recordar que las tres gammagrafías por cada cabriada corresponden a las mediciones hechas con la fuente en $Z_f = 0, 10.5$ y 21 cm, es decir sobre el borde izquierdo de la cabriada, el centro y el borde derecho. Por lo tanto en el primer y tercer caso se ve con claridad el correspondiente borde ya que la ausencia de vigas se manifiesta en una franja vertical oscura, salvo en la zona en donde está el tablón transversal que atraviesa las cabriadas y la traba vertical de fijación de ambos elementos. Algunas gammagrafías ilustrativas se muestran en las fotos 1 y 2 de la Figura 9.

En general una viga se distingue de la vecina pues se ve una línea vertical negra debido a que la unión entre una y otra viga no es perfecta y deja un espacio libre por donde pasa la radiación. En todas estas mediciones se usaron varillas delgadas de tungsteno de 1 mm para marcar la posición de los límites de las vigas que se observan en el cielorraso desde abajo. En todos los casos se observan clavos introducidos en la madera por la izquierda. Los diámetros son variables pero oscilan entre 4 y 7 mm. En las gammagrafías correspondientes a $Z_f = 0$ y 21 cm se ven dos grupos de clavos caracterizados por la coordenada K . Los clavos cuya cabeza exhibe un menor K se encuentran a $Y = -7 \pm 2$ cm,

es decir cercanos a la cara superior de las vigas, mientras que los que exhiben un K mayor se encuentran a $Y = 23 \pm 2$ cm del fondo de las vigas.

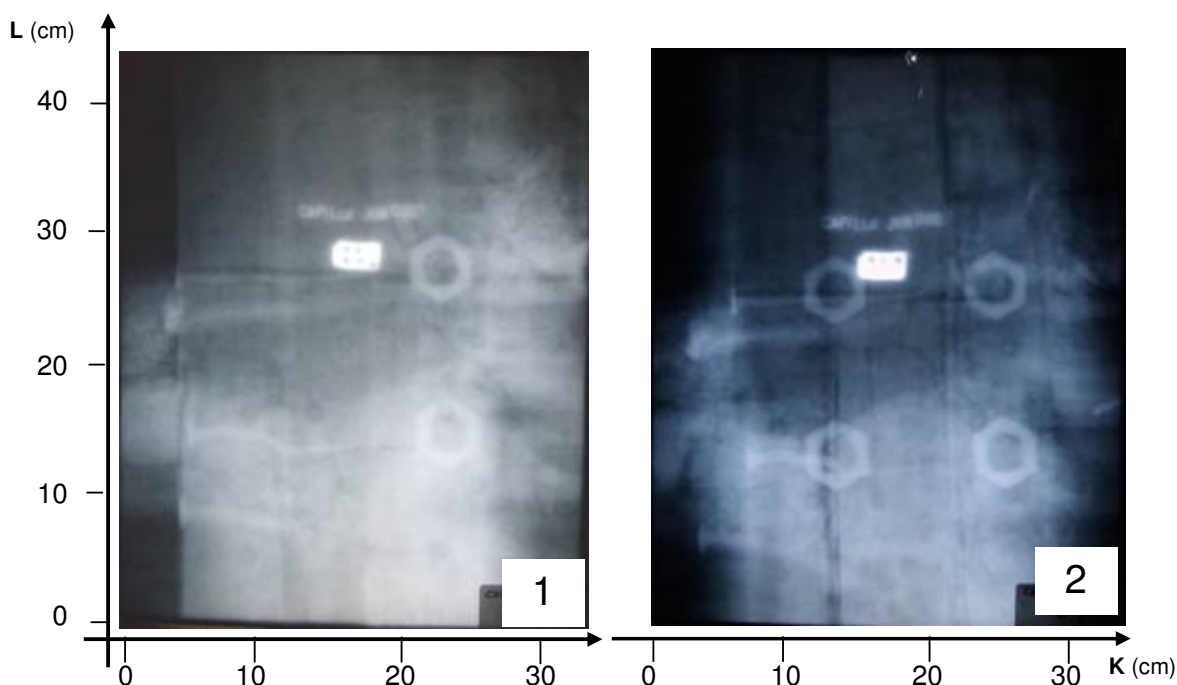


Figura 9. Fotos de las gammagrafías correspondientes a la cabriada#2.

Cabriada 2

Las gammagrafías 1 y 2 en la Figura 9 corresponden a las gammagrafías tomadas a $Z_f = 0$ y 10,5 cm respectivamente, en esta cabriada.

El rasgo más relevante en esta cabriada es una mancha oscura que se observa en todo el ancho de la cabriada para $L > 10$ cm y en especial en la viga izquierda.

La Figura 10 muestra las densidades fotográficas medidas a lo largo de un corte en $L = 35$ cm que atraviesa las 3 vigas en la zona superior de la mancha mencionada. La línea magenta es el fondo calculado con el programa LINEA DE BASE. Los puntos del extremo y del medio fueron usados como calibración con $F_c = 20$ y 0 cm, respectivamente¹. Se ve que las zonas de las vigas izquierda y derecha tienen mayor densidad indicando faltante de madera.

Los resultados son:

zona	F (cm)
viga izquierda	6 ± 1
viga derecha	4 ± 1

¹ F indica el faltante equivalente en cm de madera que resulta de las mediciones

Estos son faltantes *con respecto* a la zona de la viga central.

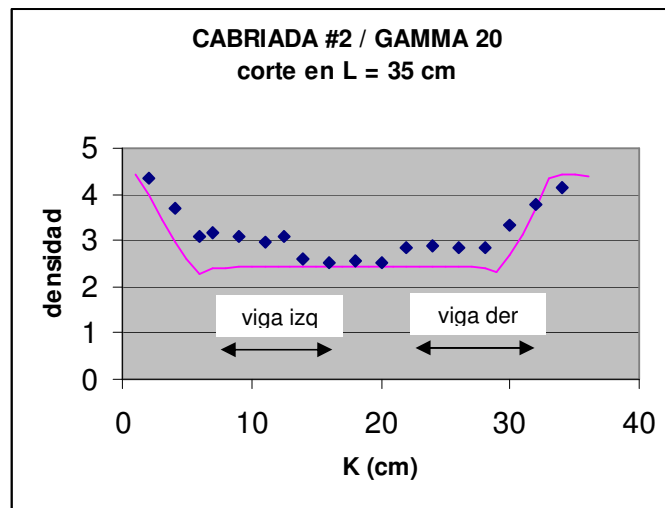


Figura 10. Densidades medidas (puntos azules) y fondo calculado (línea magenta).para la gammagrafía 20 en un corte a L = 35 cm (atravesando las 3 vigas).

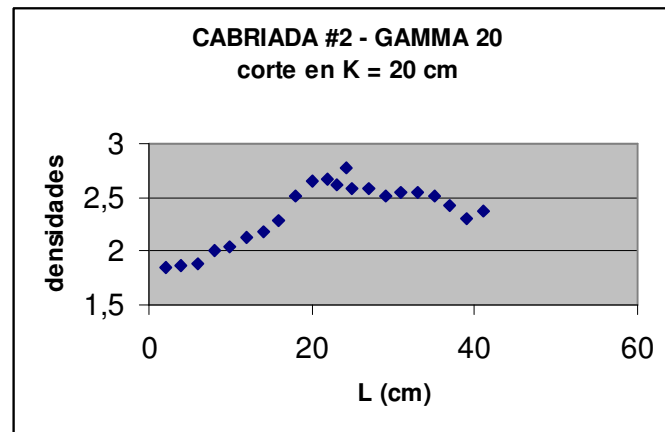


Figura 11. Densidades medidas (puntos azules) y fondo calculado (línea magenta) para la gammagrafía 20 en un corte para K = 20 cm (a lo largo de la viga central).

Como se puede ver en las fotos, la zona inferior de la gammagrafía es más clara. La densidad fotográfica en un corte a lo largo de la zona de la viga central se muestra en la Figura 11. El salto que hay entre L = 10 y L = 30 cm corresponde a una diferencia de espesores equivalente madera de 6 cm. La morfología de esta “mancha clara” en la parte inferior de la gammagrafía permite suponer que la misma se debe a una mayor cantidad de mortero en esta zona más que a un mayor espesor de madera.

Cabriada 4

En general no se observan defectos de consideración.

Como en los otros casos, también aquí se verifica la presencia de clavos introducidos en la madera desde la izquierda. Los pequeños círculos levemente más oscuros se deben a un efecto relacionado con el filtro utilizado y no deben ser interpretados como defectos en la madera.

Como fue explicado anteriormente las zonas oscuras a los costados de la gammagrafía indican las regiones donde no hay vigas. Estas zonas oscuras se interrumpen un poco debajo de la mitad de la gammagrafía y corresponden a la presencia del tablón transversal y traba vertical que ancla el tablón a las vigas.

Se observan líneas oscuras verticales. La más oscura es la brecha existente entre la viga central y la viga de la derecha cuya profundidad se ha calculado en 10 ± 2 cm. La gammagrafía 18 muestra otra ranura entre la viga izquierda y central en el intervalo $13 < L < 45$ cm de profundidad 4 ± 2 cm.

Cabriada 6

En este sector se observan ranuras de entre 1 y 1,5 cm de ancho que están en la parte inferior de las vigas y con una profundidad de 6 ± 2 cm.

Se observa también una ranura aproximadamente horizontal en el centro de la gammagrafía de profundidad semejante a las otras ranuras. Salvo por estas ranuras no se observan otros defectos de consideración. Se ven varios clavos.

Cabriada 8

La Figura 12 muestra las densidades fotográficas medidas a lo largo de un corte en $L = 23$ cm que atraviesa las 3 vigas en la gammagrafía 11 que corresponde a $Z_f = 0$ cm, o sea que la fuente está en línea con la cara lateral izquierda de la cabriada. La línea magenta es el fondo calculado con el programa LINEA DE BASE para este caso de fuente sobre el lateral izquierdo de la cabriada. Los puntos máximo y mínimo fueron usados como calibración con $F_c = 20$ y 0 cm, respectivamente. Por comparación de los puntos azules y la línea magenta se ve que en la zona de la viga izquierda hay mayor densidad fotográfica y por lo tanto debe haber faltante de madera. En particular para $K = 12$ cm se ve un “pico” en la distribución de densidades que se debe a una ranura.

Los resultados son:

zona	F (cm)
viga izquierda	7 ± 1
ranura en $K = 12$	9 ± 1

Estos son faltantes *con respecto* a la zona de la viga central y derecha.

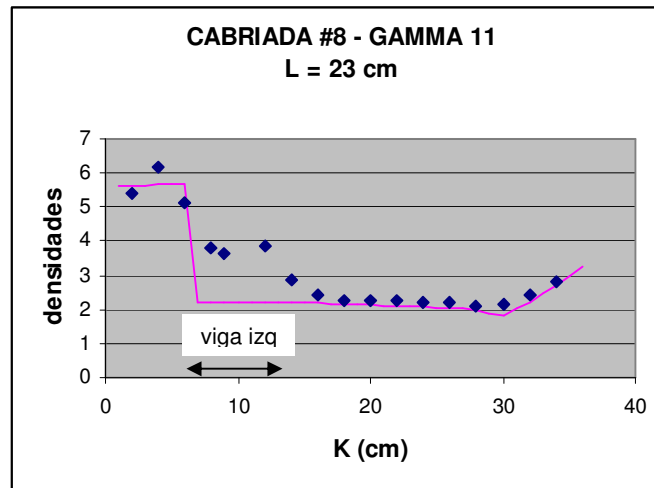


Figura 12. Densidades medidas (puntos azules) y fondo calculado (línea magenta) para la gammagrafía 11 en un corte para L = 23 cm (atravesando las 3 vigas).

Un análisis tomográfico de esta zona de mayor densidad fotográfica, combinando la información de las 3 gammagrafías obtenidas en esta cabriada muestra que la misma se debe a una ausencia de madera en la parte superior probablemente interesando al tablón que se encuentra por encima de las vigas.

La Figura 13 muestra la densidad fotográfica en el mismo corte anterior pero para la gammagrafía 12 que corresponde a $Z_f = 10,5$ cm, o sea con la fuente sobre el centro de la cabriada. En este caso no se observa la zona de mayor densidad fotográfica con en la Figura 12. Este hecho es interpretado como una confirmación de que la faltante de madera en la zona de la viga izquierda ocurre a la altura del tablón superior.

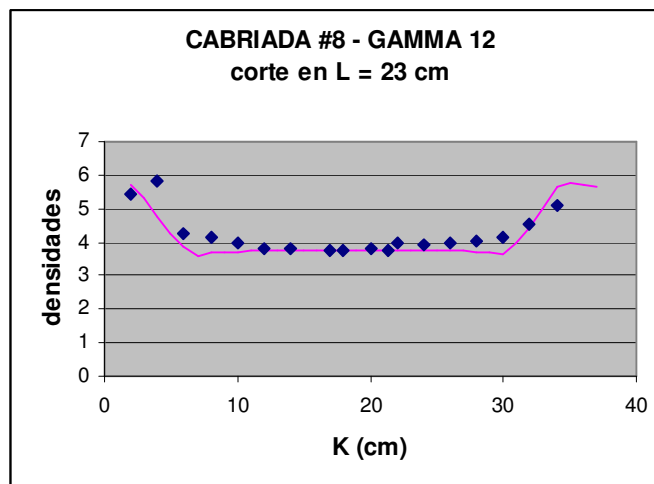


Figura 13. Densidades medidas (puntos azules) y fondo calculado (línea magenta) para la gammagrafía 12 en un corte para L = 23 cm (atravesando las 3 vigas).

Se ven varios clavos y como fue mencionado en el caso previo, los pequeños círculos levemente oscuros se deben a rasgos del filtro utilizado en la medición

Cabriada 10

La Figura 14 muestra las densidades fotográficas medidas a lo largo de un corte en $L = 35\text{ cm}$ que atraviesa las 3 vigas en la gammagrafía 9 que corresponde a $Z_f = 10,5\text{ cm}$, o sea que la fuente está en línea con el centro de la cabriada. La línea magenta es el fondo calculado con el programa LINEA DE BASE para este caso. Los puntos máximo y mínimo fueron usados como calibración con $F_c = 20$ y 0 cm , respectivamente.

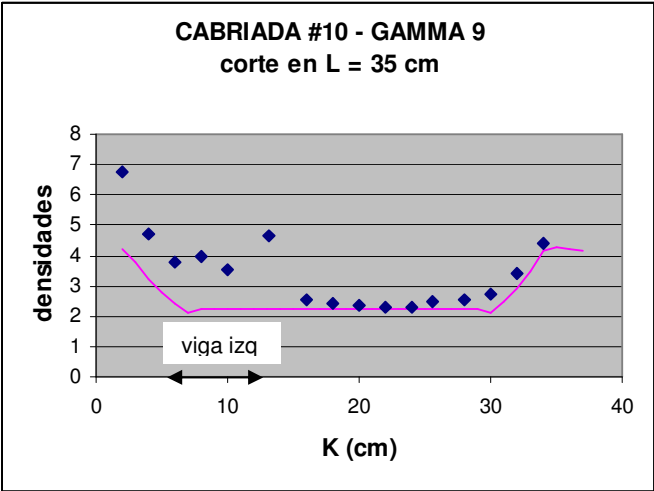


Figura 14. Densidades medidas (puntos azules) y fondo calculado (línea magenta).para la gammagrafía 9 en un corte para $L = 35\text{ cm}$ (atravesando las 3 vigas).

En esta gammagrafía se destaca una ranura en $K = 13\text{ cm}$ y además por comparación de los puntos azules y la línea magenta de la Figura 14 se ve que en la zona de la viga izquierda hay mayor densidad fotográfica y por lo tanto debe haber faltante de madera.

Los resultados son:

Zona	$F\text{ (cm)}$
viga izquierda	5 ± 1
ranura en $K = 13$	15 ± 2

Estos son faltantes con respecto a la zona de las vigas central y derecha.

Un argumento similar al presentado en el caso anterior, cabe en este caso. La densidad fotográfica en un corte similar pero en la gammagrafía 10 correspondiente a $Z_f = 21\text{ cm}$, o sea con la fuente en línea con la cara lateral derecha de la cabriada, no muestra un incremento con respecto al fondo en la zona de la viga izquierda. Esto confirma que el faltante de madera indicado anteriormente ocurre en la parte superior de la cabriada.

DRAGONES EN LA BASÍLICA DE LUJAN

En este caso el propósito fue determinar la existencia y condición de elementos metálicos de soporte en el anclaje y en el interior de figuras de dragones que cuelgan de las torres de la Basílica de Luján.

El trabajo se realizó colocando la fuente radioactiva en diversas posiciones de un lado del ornamento y una placa sensible a la radiación del otro lado de éste y opuesta a la fuente.

Con respecto a los trabajos convencionales en los cuales el tiempo de irradiación están tabulados dependiendo del espesor del hormigón, en este caso la no uniformidad de la superficie exterior del ornamento y el desconocimiento de la cantidad de material en su interior, hizo necesario desarrollar una herramienta que denominamos gamómetro.

El gamómetro es un instrumento similar a los fotómetros que años atrás se utilizaban como elementos auxiliares de la fotografía para determinar el tiempo de exposición adecuado a la intensidad de luz que llegaba del objeto a la película. El gamómetro consiste en una superficie plana del tamaño de una placa gammagráfica (35 x 43 cm) al cual se adhieren varios contadores Geiger. Durante las irradiaciones este dispositivo se coloca detrás de la placa (en el sentido de la radiación) y permite medir las dosis que llegan a la placa en diversos puntos y definir los tiempos de irradiación en cada caso.

La Figura 15 muestra los resultados en uno de estos casos. A la izquierda muestran las gammagrafías obtenidas en diversos sectores del ornamento, superpuestas a una figura del mismo ajustando las escalas respectivas de modo que haya coincidencia espacial entre los que se muestra en las gammagrafías y el esquema de la pieza.

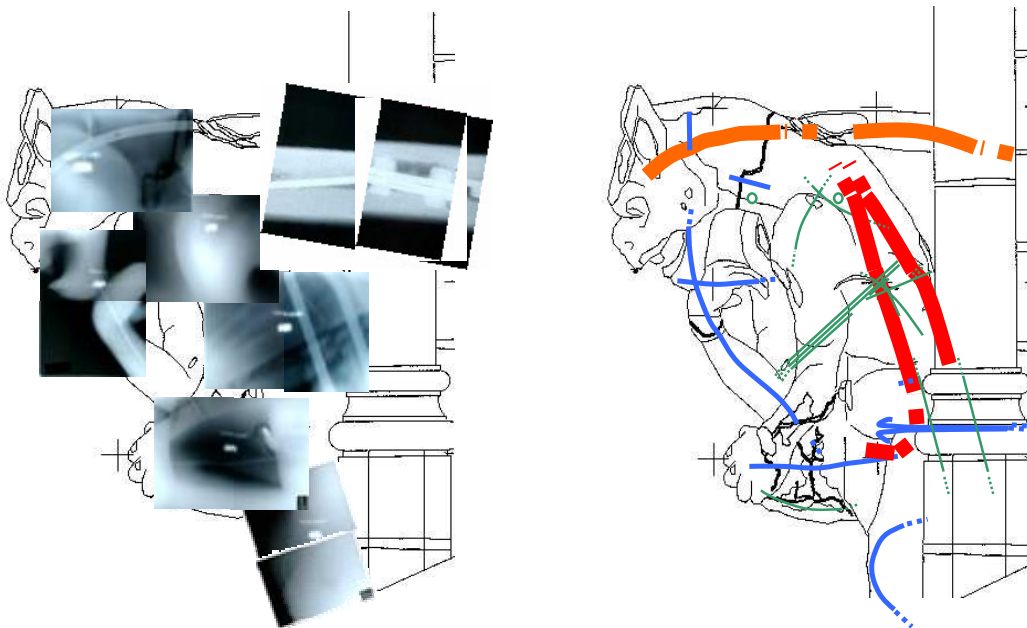


Figura 15. Las líneas rojas en el dibujo de la derecha corresponden a varillas cuadradas de 25 mm, la línea naranja a una planchuela de 20x11 mm, las líneas azules a fierros de 8-10 mm, y las verdes a fierros de 4-6 mm.

A la derecha de la Figura 15 se ve parte de los resultados obtenidos luego de analizar la información contenida en las gammagrafías. Los resultados incluyen la identificación de los elementos de soporte metálicos que existen dentro de la pieza, sus dimensiones y principalmente su estado de corrosión. La fidelidad fotográfica de esta técnica permite obtener resultados de una confiabilidad y completitud que no se alcanza con ninguna otra técnica.

ESTATUAS EN EL CORONAMIENTO DEL PALACIO DE TRIBUNALES

El Palacio de Tribunales frente a la Plaza Lavalle en Buenos Aires tiene cuatro estatuas en su coronamiento. El trabajo realizado por THASA en este caso tuvo una finalidad similar al anterior, o sea, identificar la estructura metálica de soporte en el interior de estas figuras.

Se estudiaron elementos particulares como cabeza y brazos y se realizó un mapeo general del tronco. Para el estudio del tronco se introdujo la fuente en el interior de la estatua a diversas alturas y se rodeó a ésta de placas flexibles.

La Figura 16 muestra la disposición para el estudio de la cabeza y del tronco de una de las estatuas.

La Figura 17 muestra a la izquierda una foto de la gammagrafía de un brazo donde se alcanzan a distinguir elementos muy pequeños como clavos. A la izquierda se muestra los resultados obtenidos para el caso del tronco de una de las estatuas.

El principal resultado de este estudio fue que no se identificó estructura metálica de importancia, sólo alambres de 4 y 6 mm constituyendo una formación irregular de grilla.



Figura 16. Disposición de las placas gammagráficas para el estudio de la cabeza y tronco de las estatuas del Palacio de Tribunales.

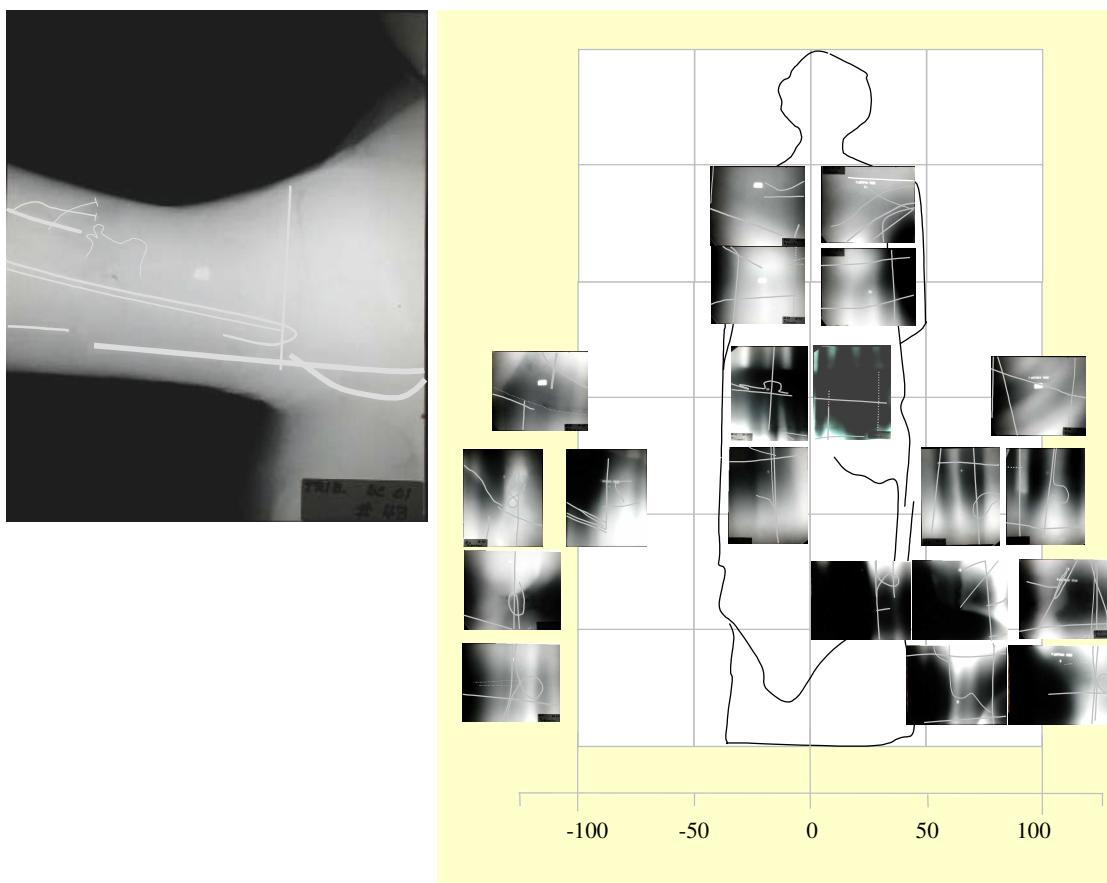


Figura 17. A la izquierda se muestra la gammagrafía de un brazo resaltando los elementos metálicos observados, y a la derecha se muestran los resultados correspondientes al tronco de una de las estatuas.

CONCLUSIONES

El presente trabajo se refiere principalmente a un estudio reciente realizado en la Capilla Doméstica de los Jesuitas en Córdoba con el objeto de investigar en forma no destructiva la presencia de huecos en la madera de las vigas del techo, producidos por termitas.

Adicionalmente se muestran resultados en la investigación de elementos metálicos en el interior de ornamentos en la Basílica de Luján y en el Palacio de Tribunales que confirman la aplicabilidad de la tecnología de THASA para el estudio en forma no invasiva del interior de piezas de valor histórico y patrimonial.

En el caso de la Capilla se gammagrafiaron una serie de cabriadas del techo y como resultado del mismo se puede concluir que el método del gammagrafiado es apto para mostrar huecos de importancia en la madera. En el presente caso en que la densidad de la madera es de $\delta = 0,7 \text{ g/cm}^3$, la sensibilidad del método es de más de 5 cm en el sentido de la radiación. Como hecho de particular interés se pudieron identificar y ubicar clavos (del siglo XVII) introducidos en las vigas de madera, comprobándose así que la noción prevaleciente entre los expertos hasta el inicio de este trabajo en el sentido de que en esta

obra no se habían utilizado clavos metálicos sino solamente trabas de madera, es equivocada. Por último en este trabajo también se ha podido en algunos casos observar las cañas que proveen el soporte del cielorraso.

REFERENCIAS

[1] THIEBERGER P., MARISCOTTI M.A.J. and RUFFOLO M. "SIMULATION PROGRAM FOR REINFORCED CONCRETE TOMOGRAPHY WITH GAMMA-RAYS". NDE Conference on Civil Engineering, American Society of Non- Destructive Testing, August 2006, St. Louis, MO

[2] La radiación dispersa para el cálculo de la forma del fondo tiene poca relevancia pues esta radiación contribuye de modo relativamente parejo en toda la longitud de la gammagrafía.

AGRADECIMIENTOS

Carlos Cravena S.J. y el Ing. José Luis Norens fueron los principales impulsores del trabajo de inspección no destructiva del techo de la Capilla Doméstica. Ellos además brindaron un soporte logístico que fue esencial para el éxito de este proyecto.

El trabajo en la Basílica de Luján contó con la colaboración del Arq. Fernando Mariscotti y Mariano Agote que llevaron a cabo los trabajos de campo, y del Dr. Pablo Tarela que contribuyó con el análisis de los resultados.

Los trabajos de campo en el Palacio de Tribunales fueron realizados por el Arq. Fernando Mariscotti y Mariano Agote.