

TOMOGRAFIA DE HORMIGÓN ARMADO

Mario A.J. Mariscotti, Martín Morixe, Pablo A. Tarela y Peter Thierhormer

Tomografía de Hormigón Armado S.A.
Reclus 2017 - (1609) - Boulogne - Buenos Aires - Argentina
e-mail: mariscot@mail.retina.ar



AR9800020

En este trabajo se describe la técnica de tomografía de hormigón armado, sus antecedentes, recientes desarrollos y aplicaciones más importantes. Esta técnica se basa en el uso de radiación gamma para penetrar piezas de hormigón. Placas gammagráficas son sensibilizadas con la radiación que atraviesa la pieza bajo estudio y luego procesadas para revelar la presencia de armadura e inhomogeneidades en la densidad del concreto. La reconstrucción tridimensional, o tomografía, de la armadura a partir de una sola gammagrafía es un desarrollo original alternativo a los métodos convencionales. Diámetros y posiciones de los hierros existentes en el interior de columnas, vigas y losas pueden ser determinados con precisiones de ± 1 mm y 0.5-1 cm, respectivamente. La condición de no destructiva hace que esta técnica sea particularmente apreciada en los casos de edificios habitados y sea insustituible para el diagnóstico de balcones.

In this paper we describe the technique of reinforced concrete tomography, its historical background, recent technological developments and main applications. Gamma radiation sensitive plates are imprinted with radiation going through the concrete sample under study, and then processed to reveal the presence of reinforcement and defects in the material density. The three-dimensional reconstruction, or tomography, of the reinforcement out of a single gammagraphy is an original development alternative to conventional methods. Re-bar diameters and positions may be determined with an accuracy of ± 1 mm and 0.5-1 cm, respectively. The non-destructive character of this technique makes it particularly attractive in cases of inhabited buildings and diagnoses of balconies.

I. INTRODUCCIÓN

Radiaciones penetrantes como los rayos gamma o neutrones brindan la posibilidad de examinar el interior de piezas gruesas y opacas. Para el caso del hormigón estas radiaciones han sido aplicadas al estudio de "microcracking"¹ o al estudio del tipo y calidad del concreto². También han sido usadas para la determinación de la posición y tamaño de la armadura en el interior de una estructura a partir del trabajo pionero de Mullins y Pearson³ y otros⁴. Sin embargo esta última aplicación parece haberse desarrollado sólo en forma limitada hasta ahora⁵.

Las técnicas no destructivas para el estudio de estructuras son siempre deseables, especialmente cuando se trata de edificios habitados. Sin embargo en general estas técnicas tienen limitaciones y no brindan toda la información necesaria para un diagnóstico preciso. El uso de rayos gamma para obtener imágenes del interior de una estructura es una alternativa interesante que no obstante no ha sido desarrollada hasta hace poco en todo su potencial y es poco conocida en el mundo de la ingeniería civil. El desarrollo de la computación y de métodos de digitalización permite hoy día obtener datos con una precisión no alcanzada con otras técnicas sobre la posición y tamaño de los hierros, de su estado de corrosión y de la inhomogeneidad del concreto.

A partir de una aplicación nuclear exitosa para detectar concreto en un túnel bajo tierra⁶, se comenzó con el desarrollo de tecnología para convertir a la tomografía de hormigón armado en una alternativa práctica y competitiva en relación a otras herramientas utilizadas por el profesional estructuralista.

Desde 1992 se han realizado medio centenar de trabajos en edificios públicos, viviendas, establecimientos indus-

triales, autopistas, túneles de hormigón, puentes, estructuras afectadas de corrosión, fundaciones, etc.

II. ASPECTOS TÉCNICOS GENERALES

La Tomografía de Hormigón Armado (THA) se basa en el uso de una



Figura 1. Toma de gammagrafía en un departamento habitado. La fuente está dentro de un colimador sobre un soporte ubicado debajo del cuadro. Frente al colimador contra la pared hay un marco de Pb para disminuir la radiación Compton rasante. El alojamiento permanente de la fuente se puede observar al costado de la mesa redonda sobre el piso.

fuente de rayos gamma y en la detección y análisis de la radiación que atraviesa la estructura investigada. En su aspecto instrumental la THA es similar al uso de rayos X para la Tomografía Computada en medicina. Los rayos gamma presentan dos ventajas con respecto a los rayos X para su aplicación al examen de estructuras de hormigón. En primer lugar son más penetrantes, lo que es un requisito para atravesar piezas de la densidad del hormigón. En segundo lugar son emitidos en forma espontánea por radioisótopos y no requieren como los equipos de rayos X de fuente de energía externa algu-

na; los equipos son por lo tanto más portables y más adecuados para trabajo de campo.

El gammagrafiado de estructuras se realiza con un equipo relativamente sencillo. Una fuente radioactiva y una placa radiográfica se colocan a ambos lados de la pieza a examinar. El espacio que estos dispositivos ocupan no es significativo, no es necesario remover revestimientos y en general gammagrafías pueden ser tomadas sin siquiera desplazar muebles. La figura 1 muestra el caso de un estudio realizado en el estar de un departamento habitado donde sólo hizo falta mover un sillón unos centímetros. La figura 2 es la gammagrafía de un tabique ubicado detrás de una biblioteca llena de libros.

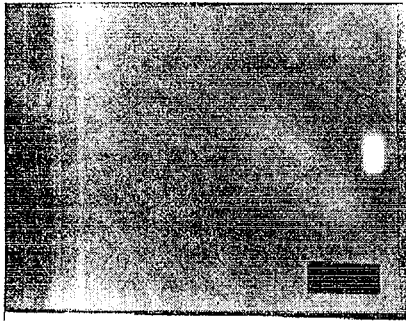


Figure 2. Gammagrafía de un tabique detrás de una biblioteca con libros. La franja vertical más oscura a la izquierda corresponde a mampostería. Se observan 3 hierros verticales de 8 mm, otro que corresponde al anclaje del tabique con la pared y un estribo horizontal de 4mm. El rectángulo blanquecino es un numerador y el oscuro es una etiqueta.

Elementos de distinta densidad o regiones de distinta densidad poseen un poder de atenuación distinto y estas diferencias se reflejan en la intensidad de la radiación transmitida a través de ellos. Así es posible observar sobre la gammagrafía contraste entre hierros y concreto o detectar defectos tales como oquedades, corrosión del hierro u objetos espurios, no visi-

bles al ojo humano ni observables con rayos X

El objeto de la tomografía es la reconstrucción tridimensional de la armadura de una pieza de hormigón. La figura 3 muestra la gammagrafía de una columna y su correspondiente tomografía. Se trata de una armadura consistente

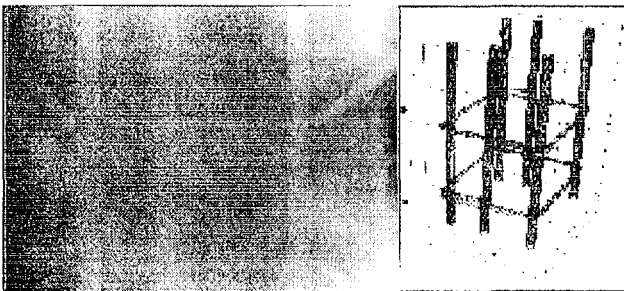


Figure 3. Gammagrafía de columna y su correspondiente tomografía.

en 6 hierros principales de ϕ 16 mm, 3 sobre la cara de la columna cercana a la placa y 3 sobre la cara opuesta del lado de la fuente. La relativa cercanía de la fuente con respecto a la columna le da a la gammagrafía una marcada perspectiva. Los estribos son hierros de ϕ 8 mm. La gammagrafía muestra también la presencia de alambres que quedaron (indebidamente) durante el trabajo de hormigonado.

La gammagrafía de hormigón armado es también apta para mostrar defectos como oquedades (figura 4) o detalles como caños dentro de una estructura y los cables dentro de ellos (figura 5), como también efectos de corrosión en la armadura (figura 6).

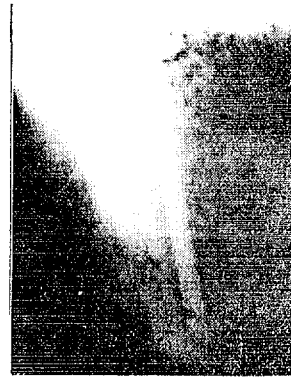


Figure 4. Gammagrafía de una columna inclinada mostrando graves defectos de llenado (oquedades)

Las oquedades mostradas en la figura 4 corresponden a una columna inclinada en el primer piso de un edificio de departamentos con importantes fisuras en su estructura. La gammagrafía de la figura permitió identificar una de las más graves causas de estos problemas como no se podría haber hecho con ninguna otra técnica disponible y con un mínimo de molestias.

En el detalle de la figura 5 se ve el resultado de digitalizar una gammagrafía de una losa. Las franjas claras aproximadamente perpendiculares son los hierros de la losa de ϕ 8 mm. En el caso de un caño sólo los bordes de éste se ven en la gammagrafía mientras que el interior aparece más oscuro que el resto de la placa. En este caso la gammagrafía alcanza a mostrar los cables que corren por el interior del caño.

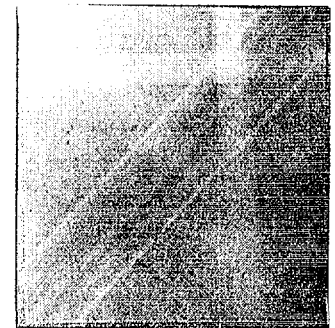


Figure 5. Detalle de caño de luz con cables en su interior cruzando hierros de una losa.

La detección de corrosión en la armadura de una estructura de hormigón armado es una de las principales aplicaciones de esta técnica. El problema de la corrosión es especialmente importante en las zonas cercanas al mar donde el efecto del salitre se hace notar. La tragedia de Pinamar de 1992 (caída de un balcón ocasionando la muerte de 4 personas) es un ejemplo dramático de esto. El material utilizado

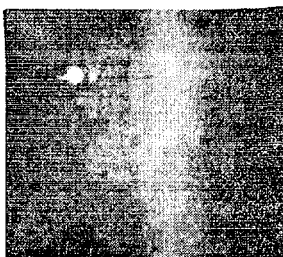


Figure 6. Detalle mostrando corrosión de un hierro de una losa. La figura muestra la digitalización de una gammagrafía con mucho aumento. El diámetro original del hierro es de 8 mm. Los puntos blancos son defectos de revelado.

contenía mucho salitre lo que produjo severa corrosión en la armadura. La detección a tiempo de la corrosión en las armaduras es pues una cuestión de alto interés y hasta ahora no existía otro modo de hacerlo a no ser picando. Puesto que el óxido de hierro tiene una densidad intermedia entre el hierro y el concreto, es posible usar la gammagrafía como método de detección. El caso mostrado en la figura 6 es un ejemplo de corrosión muy avanzada en el hierro de una losa. No tenemos conocimiento de resultados previos refe-

rentes a esta aplicación que hayan sido publicados.

III. MÉTODOS DE TRABAJO Y ANÁLISIS

Los radioisótopos que se utilizan en estos trabajos son ^{192}Ir , ^{137}Cs y ^{60}Co , siendo el primero el más común pues tiene aplicación casi exclusiva en los trabajos de inspección por gammagrafiado de soldaduras y piezas de hierro fundido. Estos radioisótopos emiten radiación gamma de distinta energía, creciente en el orden en que han sido mencionados. El ^{192}Ir es el más liviano de transportar pero el menos penetrante y de menor vida media ($T_{1/2} = 74$ días). Debe reponerse con mucha más asiduidad que el Co ($T_{1/2} = 5.2$ años) y que el Cs ($T_{1/2} = 30$ años). Si bien el contraste es una función decreciente de la energía de la radiación, no se observa en la práctica notorias diferencias entre el uso de una fuente y otra. La gammagrafías de la figuras 2, 3 y 6 fueron obtenidas con ^{192}Ir , ^{137}Cs y ^{60}Co , respectivamente.

Las placas utilizadas en general son de 35 x 43 cm del tipo industrial. Sin embargo se han probado placas ultrarápidas⁷ que permiten reducir los tiempos de irradiación de 20 a 50 veces, aunque al precio de una significativa reducción del contraste.

El uso de pantallas reforzadoras de plomo a ambos lados de la placa tienen un efecto multiplicador de eficiencia de aproximadamente el doble.

Un problema particularmente severo en el caso del hormigón armado (piezas gruesas y densas) es el incremento de la radiación Compton que llega a la placa. Esta se puede reducir en términos relativos mediante el uso de blindajes de plomo pero en este caso es necesario agregar otros elementos más livianos para reducir la influencia de la radiación X proveniente del propio plomo (80 keV).

Como es bien sabido la radiación gamma se absorbe en un medio de espesor e según la ley

$$I = I_0 \exp(-\mu e)$$

donde I_0 e I representan la intensidad incidente y transmitida y μ es un coeficiente de absorción característico del material y de la energía de la radiación.

Para obtener una cierta "densidad de placa", es decir un cierto nivel de exposición, es necesario irradiar un determinado tiempo T inversamente proporcional a I . Por lo tanto el tiempo de irradiación para obtener una gammagrafía adecuada es una función exponencial del espesor de la pieza. Este es un factor mucho más significativo en el caso del hormigón que en las otras aplicaciones convencionales de la gammagrafía. Una pieza de hormigón de 20 cm de espesor puede demandar del orden de 10 min. (dependiendo de distancia e intensidad de fuente), mientras que una pieza de 40 cm requiere, en las mismas condiciones, del orden de 20 horas.

Por esta razón, en muchos casos es necesario o bien usar placas ultrarápidas o bien recurrir a la utilización de pequeñas perforaciones para situar la fuente en lugares apropiados en el interior de las piezas que se estudian. Mediante este recurso se han podido estudiar vigas y columnas de grandes dimensiones. Un ejemplo es el mostrado en la figura 7 de una columna con 46 hierros que se pudo resolver en forma completa con las combinaciones fuente-placa indicadas en la misma figura.

RESULTADOS COLUMNA 14 (2¹⁰⁰ SUBSUELO)

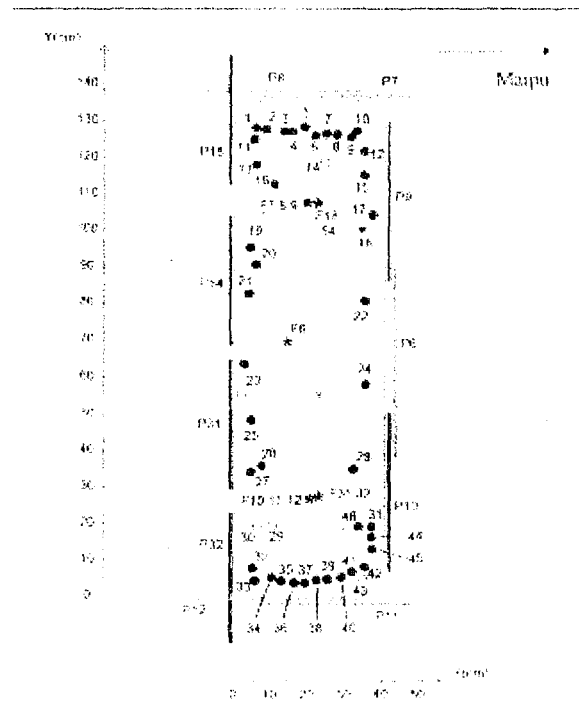


Fig. 7. Resultados de un estudio de una columna de 40 x 135 cm.

Figure 7. Resultados de un estudio de una columna de 40 x 135 cm.

Otro ejemplo es el mostrado en la parte inferior de la figura 8 correspondiente a una viga de 55 cm de espesor.

Para el análisis tomográfico de los datos se ha desarrollado un paquete de programas que ha permitido incrementar la productividad en forma sustantiva. Uno de ellos, denominado THACALC permite ingresar las posiciones de las "sombras" de los hierros referidas a un determinado sistema de coordenadas, obtenidas de la (o las) gammagrafía(s) hechas para el estudio de un determinado sector de una pieza de hormigón. El programa facilita la manipulación de estos datos y su compatibilización a fin de mejorar la precisión de los resultados. En la parte superior de la figura 8 se ve el aspecto que presenta una de las pantallas de este programa. Las posiciones se ingresan en la planilla de la derecha. La segunda columna de la tabla permite asignar un peso a la medición y la última, una estimación del diámetro. En el espacio de la izquierda el programa muestra el perfil de la pieza, la posición de las distintas combinaciones fuentes-placa referidas al estudio del sector, cada una con un color diferente, y la ubicación de los hierros. Las teclas en colores debajo de la tabla de valores permiten seleccionar la combinación fuente-placa de interés y trabajar sobre los datos correspondientes. Una vez finalizada esta etapa el programa promedia los diferentes resultados independientes para obtener el resultado final óptimo con sus respectivos errores. El programa tiene también otras pantallas que permiten realizar distintos tipos de pruebas y ensayos de posibilidades cuando se presentan ambigüedades.

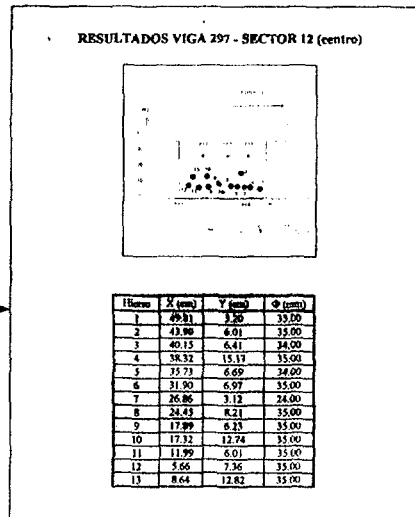
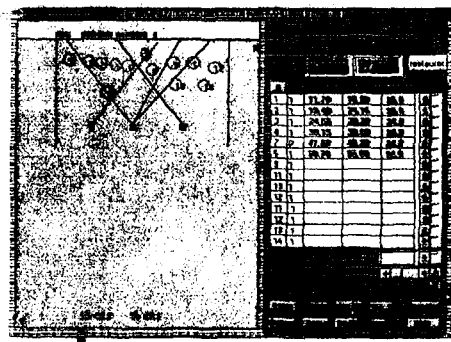


Figure 8. Pantalla del programa THACALC y página del informe técnico producido por THAINF (ver texto).

Un camino alternativo de resolver el problema tomográfico, basado en una patente propia, se describe en la próxima sección.

Una vez resuelto el problema tomográfico se plantea la cuestión de la presentación de los resultados en forma adecuada para su uso por el profesional estructuralista. En general es conveniente presentar un gráfico de la sección de la pieza estudiada con la posición y tamaño de los hierros (más que una figura en perspectiva como en la figura 3), acompañado de una tabla de valores y un breve texto con observaciones particulares tales como la existencia de estribos, la separación entre éstos (cosa que es de especial interés para la verificación de la aptitud de una cierta estructura para soportar una cierta carga), la presencia de oquedades o fisuras u otro elemento de interés.

Mientras que para un trabajo académico la tarea de realizar el informe, en particular el tiempo que insume, puede ser una consideración menor, cuando se trata de procesar centenares de datos y resultados, la cuestión del tiempo insumido en la elaboración del informe merece atención.

Por esta razón se ha desarrollado el programa THAINF que tiene la finalidad de producir en forma casi automática las páginas del informe técnico. Este programa lee un archivo preparado por THACALC, el operador indica de que tipo de pieza se trata (sección de viga, o columna, o losa), sus dimensiones y la posición del sistema de coordenadas utilizado en THACALC con respecto a la ubicación de la pieza.

Con estos datos el programa elabora el gráfico y la tabla tal cual se muestra en la parte inferior de la figura 8, en este caso referida a la determinación de la armadura del sector

inferior de una viga de 55 cm de espesor, indicando la posición de 3 combinaciones fuente-placa utilizadas.

IV. TOMOGRAFÍA CON UNA SOLA PLACA

El problema de la tomografía de hormigón armado referida a la reconstrucción tridimensional de la armadura es más sencillo que el de la tomografía computada usada en medicina, debido a que en el primer caso la forma geométrica de los objetos del estudio es conocida, o al menos puede darse por conocida. En general los hierros tienen sección circular aunque se han encontrado casos de hierros con sección cuadrada y alabeados. En cualquier caso es posible conocer esto ya sea porque es información disponible o porque la propia gammagrafía lo pone en evidencia.

El conocimiento de la forma geométrica de los objetos del estudio simplifica el análisis hasta el punto que en realidad son sólo dos las incógnitas a resolver (diámetro y distancia del objeto a la placa) y por lo tanto basta dos mediciones independientes para resolver el problema (en lugar de un alto número de mediciones como en el caso médico donde la forma del órgano u objeto de interés es desconocida).

El modo clásico de resolver este problema como ya ha sido mencionado⁸ es el de obtener dos gammagrafías con la fuente en dos posiciones distintas y medir la posición de las "sombras" en ambos casos.

Una alternativa aplicable al caso de objetos de forma conocida es utilizar el concepto de penumbra. Así como la "sombra" proyectada de un hierro sobre la placa gammagráfica es una función de su tamaño y de su distancia a la placa (para una dada posición de la fuente naturalmente), la penumbra es sólo una función de la distancia; no depende del tamaño del hierro.

Haciendo uso de este concepto es posible obtener tomografías a partir de la información contenida en una sola placa. Para ello es necesario un adecuado tamaño relativo de la fuente (relativo a la distancia fuente-placa) pues cuando mayor sea éste mayor será el efecto de penumbra pero menor será la nitidez de la gammagrafía. El objetivo es pues poder medir la penumbra sin perjudicar significativamente la claridad de la imagen sobre la placa.

Las fuentes disponibles comercialmente tienen una extensión de 2-3 mm (las fuentes de Cs suelen ser más grandes). La extensión de la penumbra es de ese mismo orden (es igual al tamaño de la fuente cuando la distancia fuente-objeto es igual a la distancia objeto-placa).

Para un objeto de sección circular semitransparente (como es el caso de los hierros de una armadura con respecto a la radiación gamma) la penumbra y la sombra no son tan fácilmente distinguibles como en el caso de un objeto plano totalmente opaco, por lo que la medición de la penumbra en el primer caso requiere especial cuidado.

Los datos de interés para medir la penumbra son los valores de la densidad de placa a lo largo de un corte perpendicular al eje principal de la "sombra" proyectada por el hierro cuya posición y tamaño se desea determinar.

La figura 9 ilustra un corte de este tipo en una gammagrafía de 4 hierros iguales ubicados a distinta distancia de la placa. Los valores en rojo corresponden a la densidad de placa o grado de exposición que ha tenido la placa en cada punto a lo largo del corte elegido. Los hierros producen valo-

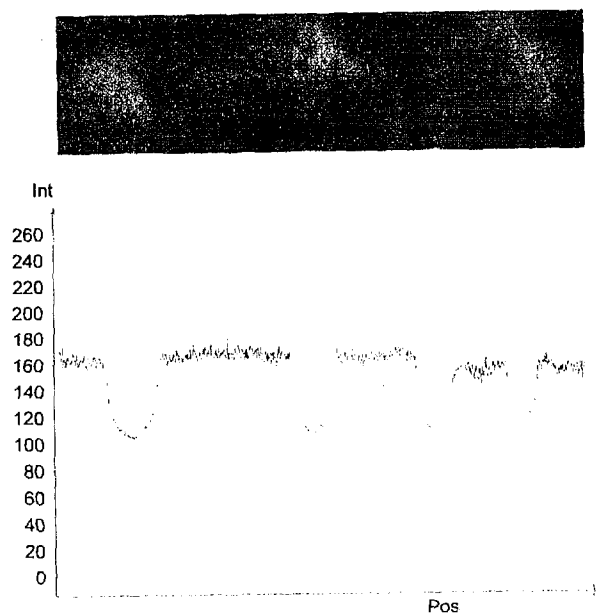


Figure 9. Resultado del programa INSPECT que permite, a partir de una gammagrafia digitalizada, seleccionar un corte y obtener los datos (en rojo) para obtener la tomografía con el método de la penumbra. El corte (no fácilmente discernible en la foto) está indicado con una línea horizontal por encima del rectángulo con agujeros (utilizado para identificar la placa)

res de densidad de placa menores que en el caso del hormigón y estos tienen una distribución en forma de taza. La penumbra influye principalmente en los valores correspondientes a los flancos de esta distribución y para realizar una medición significativa de la penumbra es necesario contar con un número

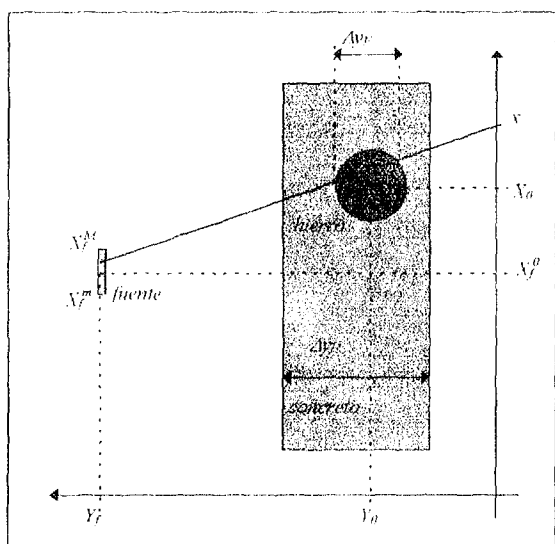


Figure 10. Sistema de coordenadas y significado de las letras utilizadas en la expresión teórica de la distribución de valores de exposición proyectados por un hierro.

ro de datos en los flancos. En general una digitalización con

una resolución de 100-300 micrones es adecuada para obtener 5-10 valores en la zona del flanco.

La forma más precisa de resolver el problema no es medir la penumbra para determinar la posición de un hierro y luego obtener su tamaño midiendo la extensión de la "sombra", pues sombra y penumbra en este caso de objeto de sección circular y semitransparente a la radiación, no tienen límites claramente diferenciados. La forma más precisa es realizar un ajuste de cuadrados mínimos de los datos de un hierro con la función "teórica" correspondiente. Esta es una función de x , la posición a lo largo del corte y su valor depende de (ver sistema de coordenadas en figura 10):

- la posición (X_s^0, Y_s^0) de la fuente
- la extensión (X_d^m, X_d^m) de la fuente
- el coeficiente de absorción μ del material atravesado por la radiación

y, además los siguientes parámetros correspondientes al hierro:

- la posición X_0
- la posición Y_0
- el radio R

Los 3 primeros son conocidos y deben ser ingresados en el cálculo por el operador, mientras que los siguientes 3 constituyen las incógnitas del problema. El método de cuadrados mínimos consiste en probar con diferentes conjuntos (X_0, Y_0, R) hasta encontrar el que mejor ajusta los datos obtenidos de la gammagrafia. La fácil disponibilidad de gran capacidad de computación hoy en día hace posible lo que en el pasado constituía una dificultad importante.

Las figuras 11 y 12 muestran resultados obtenidos para el primer hierro de la figura 9 contando desde la izquierda. Ambas figuras tienen dos partes. La parte superior exhibe los datos obtenidos de la digitalización de la gammagrafia, mostrados en puntos azules (cuadrados vacíos), y dos curvas,

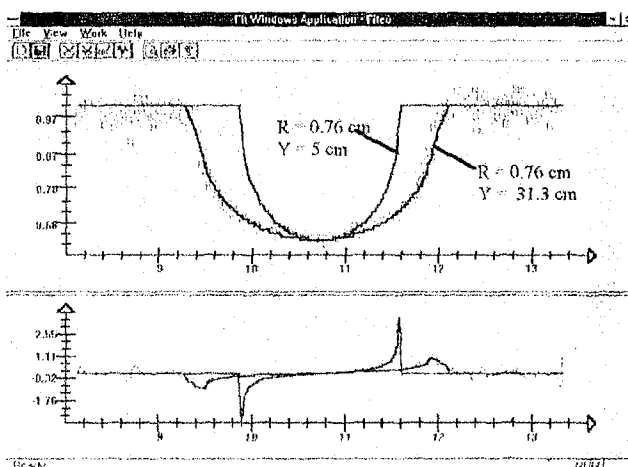


Figure 11. Resultados del ajuste de cuadrados mínimos (curva negra) a los datos obtenidos de digitalizar la gammagrafia (cuadrados azules) y de un cálculo suponiendo que el mismo hierro está a solo 5 cm de la placa (curva roja).

una negra y otra roja. La curva negra es el resultado del mejor ajuste de los datos con la función teórica. Corresponde a los valores $X_0 = 20.5 \pm 0.5$ cm, $Y_0 = 31 \pm 3$ cm y $R = 0.77 \pm 0.03$ cm. La curva roja corresponde a la función obtenida para un hierro del mismo radio ubicado a sólo 5 cm de la placa (en lugar de 31 cm) y ha sido incluida en la figura para ilustrar la diferencia en la penumbra en ambos casos y sus efectos sobre la pendiente de los flancos de la distribución.

Una forma de magnificar el efecto de la penumbra, que además puede eventualmente ser usado como método práctico (menos preciso) para su determinación, es examinar la función primera derivada de la función original. Puesto que la consecuencia de la penumbra es "aplanar" los flancos, es decir, disminuir la pendiente de la distribución en los bordes de la sombra, la derivada es un instrumento adecuado para medir este efecto. La función derivada es prácticamente nula en todos lados menos en la zona donde la penumbra es importante. La función derivada de las 3 distribuciones en la parte

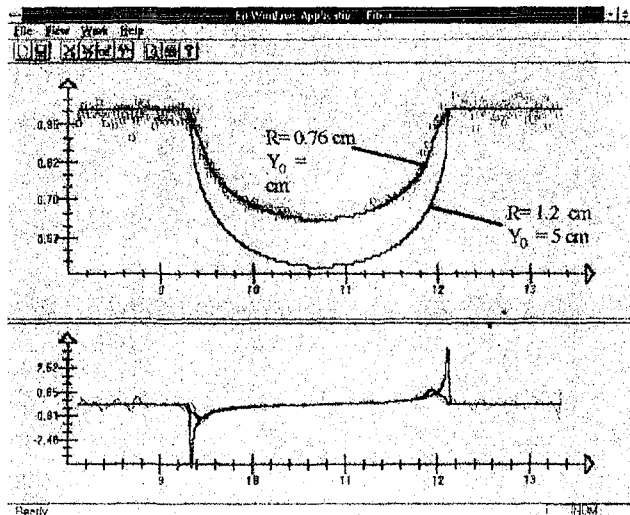


Figure 12. Idem figura 11, excepto que la curva roja corresponde ahora a un hierro cercano a la placa (como antes) pero de mayor radio ($R = 1.2$ cm en lugar de 0.76 cm), de modo de ajustar el ancho de la sombra. Se puede ver que el cambio del radio tiene el efecto adicional de aumentar la "profundidad" de la distribución, lo que implica una nueva condición de contorno que mayor precisión en los resultados.

superior de la figura 11, se muestran en la parte inferior de la misma. La línea azul corresponde a los datos medidos y por esa razón refleja las fluctuaciones originadas en las imprecisiones propias de toda medición. La línea roja que exhibe los mayores valores de la derivada corresponde al caso de hierro próximo a la placa y por lo tanto con menor penumbra. La línea negra corresponde al mejor ajuste de los datos medidos. El valor máximo de la derivada es pues una medida de la distancia Y_0 entre el hierro y la placa.

La figura 12 merece similares comentarios. En este caso se ilustra el efecto de la penumbra para un caso en donde dos hierros de distinto radio y distinta distancia a la placa (5 cm para la línea roja) proyectan una sombra de igual extensión. Nuevamente el efecto de la penumbra es visible, tanto en los datos originales como en su función derivada.

La figura 12 además muestra otro efecto importante que merece ser destacado. El radio del hierro no sólo tiene efecto en la extensión de la sombra sino también en la "profundidad" (o valor mínimo) de la distribución. Efectivamente un hierro de mayor radio absorbe más radiación gamma y esto disminuye el valor de la densidad de placa o exposición en el centro de la sombra. Este efecto agrega una condición de contorno adicional al cálculo ayudando a disminuir la incerteza de los resultados. Indica también el camino hacia un método práctico (menos preciso que el ajuste por cuadrados mínimos) para una determinación independiente del radio del hierro.

V. ALGUNOS RESULTADOS DE LA THA

Como fue mencionado en la introducción, la THA se ha aplicado al estudio de medio centenar de estructuras a través de la obtención de centenares de gammagrafías.

Las aplicaciones más importantes son:

- edificios (especialmente habitados) con problemas y sin planos
- estructuras a reciclar o ampliar
- balcones
- control de calidad
- hormigón pretensado
- aplicaciones especiales (caños, redes, etc.)

Algunos resultados de la aplicación de esta técnica han sido:

YCA - Observación de la armadura de las primeras estructuras de hormigón armado hechas en la Argentina con una configuración de estribos muy particular. Estudio de columnas, vigas y mampostería. Se probó la ausencia de perfiles de hierro en el interior de las paredes.

Edificio de departamentos habitados - Estudio global de la estructura incluyendo bases, troncos, columnas, losas, vigas y tabiques. Ejemplo, localización de viga cinta en losa bajo living.

Anexo del Senado - Estudio de losas, bovedillas y balcones.

Ex-Caja Nacional de Ahorro y Seguro - Estudio de vigas y columnas en centro de cómputos. La aplicación de esta técnica, de acuerdo al cliente, significó un ahorro de costos igual a 20 veces el costo del servicio.

Complejo edificio Piedrabuena - Determinación del estado de los anclajes de placas de revestimiento exterior. Observación de fisuras sistemáticas en ciertas partes de la estructura.

Varios edificios de empresa telefónica - Incluyendo estudio de bases además de columnas y vigas.

Edificio de Clarín - Localización de espacios libres para realizar perforaciones en nodos de cabriadas con alta densidad de hierros.

Autopista Bs. As. - La Plata - Detección de fisuras internas en vigas y cabezales.

Establecimientos industriales - Estudio estructurales diversos.

Edificio histórico ex-Bco. Español - Examen de grandes columnas de mampostería para determinar existencia de perfiles de hierro.

Tesoros bancarios - Prueba de existencia de armadura según especificaciones para tesoros en varios bancos de Capital y Prov. Bs. As.

Puentes - Estudios de armadura en pilotes y cabezales y anclajes entre ambos.

Balcones - Esta es una aplicación particularmente importante de la THA pues no existe otro medio para determinar la aptitud de la armadura de un balcón en la zona más comprometida que no implique la destrucción del balcón.

VI. RESUMEN

Si bien la posibilidad de reconstruir espacialmente la armadura de estructuras de hormigón armado en forma no destructiva por medio de radiación gamma se conoce desde mediados de los años 50, esta técnica sólo recientemente se ha desarrollado como una herramienta efectiva y útil para el estructuralista.

Los resultados de la aplicación de la técnica que denominamos THA (Tomografía de Hormigón Armado) descritos en este trabajo tienen la finalidad de mostrar su utilidad y sus alcances para resolver problemas previamente sin solución. Estos se extienden más allá de la reconstrucción espacial de armaduras e incluyen observación de corrosión en los hierros, oquedades y otro tipo de defectos.

El método de la penumbra presenta una posibilidad novel para resolver el problema de la tomografía que explota la disponibilidad actual de la herramienta informática.

VII. AGRADECIMIENTOS

Los trabajos de campo referidos en esta publicación han sido realizados por el equipo técnico de THASA integrado por M. Agote, F. Mariscotti, M.E. Mariscotti y A. Tichno. La organización de los servicios descritos de THASA ha contado además con la especial participación de J.M. Boselli, G. Gaspari y M.E. Sanguinetti.

Desearnos agradecer el estímulo inicial para el desarrollo de esta técnica del Ing. Civil H. Fernández Long, el permanente apoyo y entusiasmo del Ing. Civil J. M. Cardoni, y los valiosos aportes del Dr. L. Trabb y del Ing. J. Vago.

¹ F.O. Slate y Olsefski, *ACI Journal*, Proc. **60**, No. 5, 575 (1963)

² E.E. Smith and A.C. Whiffin, *The Engineer* (London) 194 (Aug. 1952) 278; E.de Hass, *ACI Journal*, Proc. vol. 50, no. 10 (June 1954) p. 890; J.P. Fackler, *Proc. Int. Symp. on Nondestructive Testing of Material and Structures*, vol. 2 (Rilem, Paris, 1954) p. 375

³ I. Mullins and H.M. Pearson, *Civil Engineering and Public Works Review* (London) 44(515) (May 1949) 256.

⁴ A.C. Whiffin, *The Engineer* (London) 197 (June 1954) 887; J.A. Forrester, *Cement and Concrete Association, Technical Report TRA/274* (Aug. 1957) y *The Engineer* **295**, 314 (1958).

⁵ V.M. Malhotra, *Testing hardened concrete: Non destructive methods*, *ACI*, capítulo 7, (1976); T. Tassios y Ch. Oeconomou, *Materials and Structure* **4**, 20 (1971) 101.

⁶ M. A. J. Mariscotti, *Aplicación gammadétrica al estudio de una canalización subterránea*, Informe técnico THASA (1992).

⁷ 3M Plus, XDA; Orto Agfa con pantallas Curix.

⁸ *ibid* 4; *Recommendations for Non-Destructive Methods of Test for Concrete*, Part 3. Gamma radiography of concrete. BS 4408: Part 3 : 1970, British Standards Institution; *Estudios de Tomografía Computadorizada em Peças de Concreto Armado*, P.J. Melaragno Monteiro, *Revista IBRACON*, Año II, 1992.

