

DETERMINACION DE LA POSICION DE LOS PASADORES EN JUNTAS DE PAVIMENTOS DE HORMIGON MEDIANTE MARCADO CON FUENTES RADIOACTIVAS (*)

Por ENRIQUE BAONZA DEL PRADO

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

ANTONIO PLATA BEDMAR

Licenciado en Ciencias Químicas.

Los firmes de hormigón, frente a las ventajas conocidas por todos, presentan también algunos inconvenientes. Uno de los más conocidos, "cara al público", es su discontinuidad, consecuencia de las juntas de dilatación, que se traduce en incomodidad de la marcha.

Para reducir esta incomodidad es necesario fijar la posición relativa de unas losas respecto a otras, permitiendo solamente los movimientos de dilatación paralelos al eje del trazado. Con este fin, se sitúan pasadores metálicos en las juntas, con separaciones del orden de 50 cm, siendo condición imprescindible que los pasadores queden instalados paralelamente al eje de la carretera.

La comprobación de dicho paralelismo es sencilla mediante "ensayos destructivos". Pero los "no destructivos" no dan resultados de gran precisión. Marcando los extremos de los pasadores con una fuente radiactiva, es posible conocer exactamente y sin muestreo alguno su posición.

En el artículo se describen los ensayos llevados a cabo con este objeto y los resultados logrados. Estos pueden considerarse muy satisfactorios no sólo técnicamente, sino también desde un punto de vista económico, aspecto que es necesario tener muy presente para poder llevar a pie de obra los ensayos efectuados en el laboratorio.

Conviene señalar, finalmente, que la fuente radiactiva utilizada puede manejarse sin ningún riesgo y no precisa protección de ninguna clase.

1. Introducción.

Los pasadores metálicos que se utilizan en las juntas de dilatación de los pavimentos de hormigón suelen colocarse habitualmente en éstos por medio de cunas. Recientemente se han desarrollado máquinas del tipo especial ABG, por ejemplo, que introducen los pasadores en el hormigón fresco mediante vibración. En ambos casos, tanto si se emplea un procedimiento como otro, los pasadores deben quedar en su posición definitiva, paralelos al eje del firme y a la profundidad deseada, tal como se muestra en la figura 1. La longitud normal de los pasadores es de 50 cm y su diámetro de 25 mm. Cuando se utiliza el método del vibrado, que es un procedimiento muy simple, quedan dudas sobre este paralelismo.

Es fácil determinar la posición exacta de los pasadores *a posteriori* por métodos destructivos. Pero, a efectos prácticos, interesa llevar a cabo

dicha localización de una forma no destructiva y rápida.

En una primera fase de la investigación se han estudiado las posibilidades ofrecidas por el pacómetro. La auscultación con este aparato no proporciona resultados completamente satisfactorios. El espesor de la capa de recubrimiento se obtiene con un error, ligeramente, por exceso, y el paralelismo con relación al eje de la carretera no puede verificarse con suficiente garantía. Por esta razón, el Laboratorio de Radioisótopos del Gabinete de Aplicaciones Nucleares, en colaboración con el Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, ha tratado de poner a punto una técnica basada en el marcado de los pasadores, con fuentes radiactivas situadas en ambos extremos. Con un sistema de detección adecuado, se determinan las posiciones ocupadas por dichas fuentes en la losa de hormigón, con lo cual el pasador queda situado en el espacio. Los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio llevados a cabo se resumen en el trabajo presente.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de octubre de 1972.

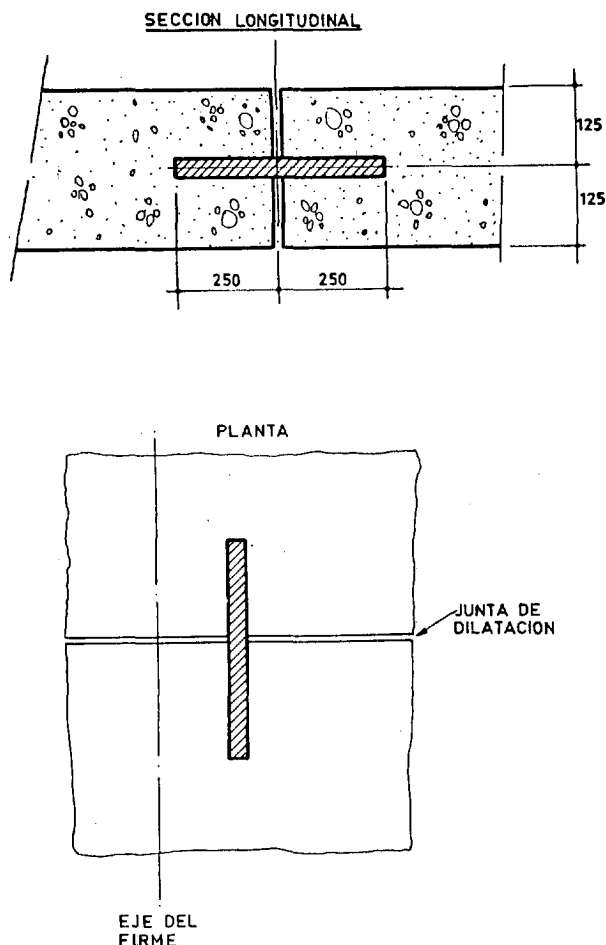


Fig. 1. — Posición correcta que deben tener los pasadores dentro del firme de hormigón.

2. Técnica experimental.

2.1. Marcado de los pasadores.

En ambos extremos del pasador se realiza un taladro axial roscado, de unos 6 mm de diámetro y 5 ó 6 mm de profundidad. En el fondo de cada taladro se introduce una fuente radiactiva de un emisor de rayos gamma apropiado. Los taladros se llenan de un cemento tipo Araldite y se cierran con un tornillo. Las fuentes radiactivas son trozos de alambre de iridio irradiado, de 0,3 mm de diámetro, con una actividad de unos 100 $\mu\text{Ci}/\text{cm}$ de ^{192}Ir . La actividad de cada fuente es de unos 200 μCi , es decir, se emplean 2 cm de alambre irradiado. La técnica experimental se facilita si las dos fuentes de un mismo pasador tienen igual actividad. Para ello,

se cortan trozos iguales de alambre, y las sucesivas fuentes así obtenidas se calibran con un detector adecuado, agrupándose, a continuación, en parejas que den igual actividad.

2.2. Situación de los pasadores con respecto a un plano vertical paralelo al eje del firme.

Para comprobar la posición del pasador con relación a un plano vertical paralelo al eje del firme, se utiliza un detector de centelleo colimado, según se muestra en el esquema de la figura 2. El colimador consiste en un recipiente de acero inoxidable, relleno de plomo, que ac-

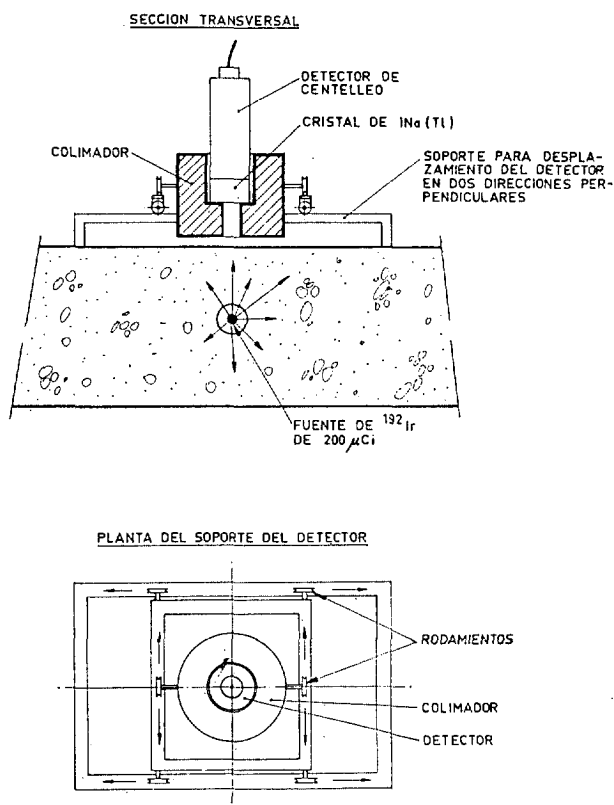


Fig. 2. — Esquema del sistema utilizado para determinar el eje vertical en que se encuentra la fuente.

túa de blindaje, permitiendo únicamente el paso de las radiaciones a través de un orificio cónico de 10-14 mm de diámetro. El conjunto formado por el detector y el colimador va montado sobre un soporte, especialmente construido al efecto

(figura 3). Merced a unos rodamientos dispuestos convenientemente, dicho conjunto puede deslizarse sobre el soporte en dos direcciones perpendiculares entre sí.

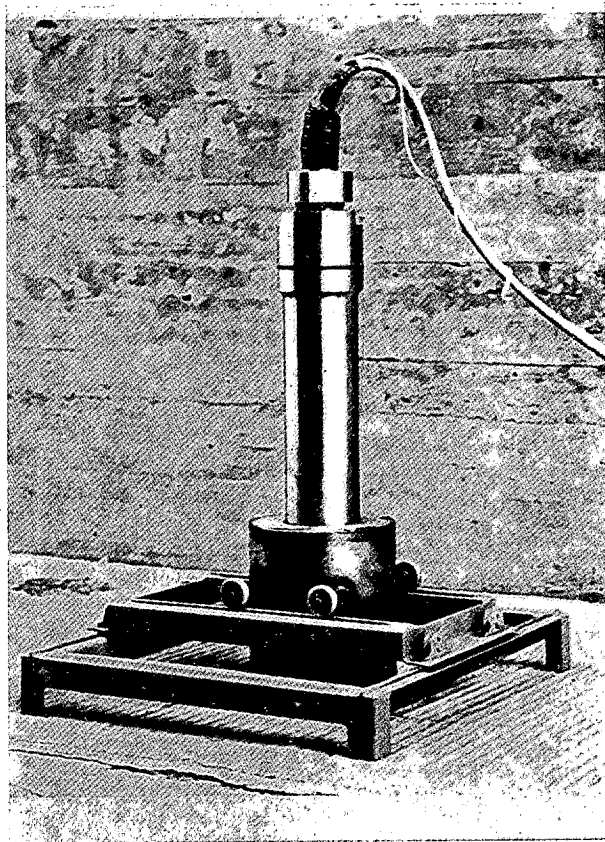


Fig. 3. — Dispositivo utilizado para desplazamiento del detector a través de un plano paralelo a la superficie del firme.

En primer lugar, se lleva a cabo una localización aproximada de cada una de las fuentes radiactivas del pasador. Ello se hace desplazando el detector (desprovisto de colimador) por la superficie del firme. Cuando el detector se encuentra situado sobre la vertical de la fuente, su respuesta tiene un valor máximo. Esta posición se marca en el firme. A continuación se centra en esta zona el soporte indicado anteriormente, y se coloca el detector sobre el colimador. El conjunto detector-colimador se desliza a lo largo de una línea que pase por el centro de dicha zona, en saltos sucesivos de 5 ó 10 milímetros. Se anota la respuesta del detector en cada posición de medida, obteniéndose,

como antes, un valor máximo cuando el orificio del colimador se encuentra en el punto más cercano a la vertical de la fuente. Seguidamente se hace un nuevo barrido en dirección perpendicular a la anterior y a lo largo de una línea que pase por el punto de máxima respuesta encontrado anteriormente. En este barrido se obtiene, nuevamente, un punto de máxima respuesta, el cual se encuentra ya sobre la vertical de la fuente. En algunos casos puede ser necesario realizar un tercer barrido en dirección normal a la del segundo para fijar mejor dicha posición.

Una vez determinados los dos puntos, en cuyas verticales se encuentran ambas fuentes radiactivas, es decir, los extremos del pasador, la posición de éste en un plano horizontal puede dibujarse sobre el propio firme. Se obtiene así el ángulo formado por el pasador con un plano vertical paralelo al eje del firme.

2.3. Situación de los pasadores con respecto al plano de la superficie libre del pavimento.

Para conocer el ángulo que forma el pasador con la superficie de rodadura del firme es preciso hallar la profundidad h a que se encuentra cada una de las dos fuentes radiactivas. La determinación se lleva a cabo situando el detector de centelleo (desprovisto de colimador) sobre la superficie del firme, y centrado en la vertical de la fuente radiactiva antes (figura 4). Puesto que las dos fuentes de cada pasador tienen la misma actividad, las respuestas del detector, centrado sobre ambas, deben ser iguales si el pasador se encuentra paralelo a la superficie del firme. En cambio, si no existe paralelismo se obtendrán dos respuestas diferentes. La relación entre ambas respuestas proporciona el ángulo buscado.

La respuesta dada por el detector, una vez situado sobre la vertical de la fuente, disminuye al aumentar la distancia h por dos razones diferentes. Por una parte, interviene la ley llamada del inverso del cuadrado de la distancia, según la cual el ángulo sólido abarcado por el detector y, por tanto, su respuesta varía en razón inversa al cuadrado de la distancia fuente-detector. Si designamos por h_1 y h_2 a las distancias respectivas a que se encuentran del centro geométrico del detector las dos fuentes de un

pasador (fig. 4), las respuestas R_{h1} y R_{h2} , dadas por el mismo se relacionan con dichas distancias por la expresión:

$$\frac{R_{h1}}{R_{h2}} = \frac{h_1^2}{h_2^2} \quad (1)$$

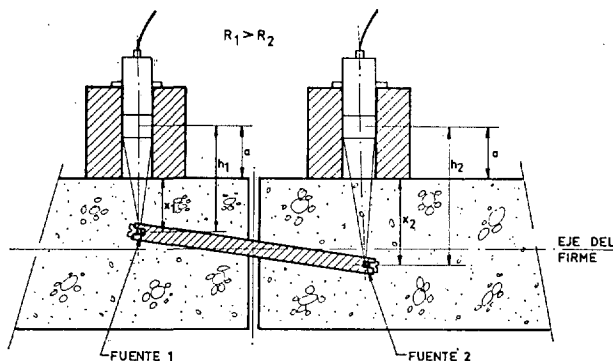


Fig. 4. — Esquema del procedimiento utilizado para determinar la profundidad de las fuentes.

Por otra parte, interviene también la ley exponencial de atenuación de la radiación gamma. Cualquier cambio de la profundidad h lleva consigo un cambio en el espesor x de la capa de hormigón que han de atravesar los rayos gamma para llegar al detector. Para una misma distancia fuente-detector, las respuestas de éste varían en función de x , según la ecuación:

$$R_x = B \cdot R_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (2)$$

expresión en la que representan:

R_x = respuesta correspondiente a un espesor x de hormigón.

R_0 = respuesta correspondiente a un espesor nulo de hormigón.

μ = coeficiente lineal de atenuación de los rayos gamma emitidos por el ^{102}Ir , en hormigón.

B = coeficiente de acumulación o de *build-up*.

El coeficiente de atenuación μ tiene un valor constante, aproximadamente igual a $0,266 \text{ cm}^{-1}$.

El factor de acumulación B se debe a la radiación dispersa que incide sobre el detector. Su valor aumenta con el producto μx , pero, en cualquier caso, es sólo algo mayor de la unidad.

Designando por los subíndices 1 y 2 a las magnitudes de la ecuación (2), correspondientes a cada una de las fuentes del pasador, la

influencia de la atenuación de los rayos en la relación de las respuestas proporcionadas por el detector puede expresarse por la proporción:

$$\frac{R_{x1}}{R_{x2}} = \frac{B_1 \cdot R_0 \cdot e^{-\mu \cdot x_1}}{B_2 \cdot R_0 \cdot e^{-\mu \cdot x_2}} = \frac{B_1 \cdot e^{-\mu \cdot x_1}}{B_2 \cdot e^{-\mu \cdot x_2}} \quad (3)$$

Los términos B_1 y B_2 son muy parecidos, y su relación es, aproximadamente, 1. Por otra parte, si consideramos el esquema de la figura 4:

$$h_1 = x_1 + a \quad \text{y} \quad h_2 = x_2 + a \quad (4)$$

y la expresión (1) se convierte en:

$$\frac{R_{h1}}{R_{h2}} = \frac{(x_2 + a)^2}{(x_1 + a)^2} \quad (5)$$

Multiplicando entre sí las expresiones (3) y (5) se obtiene la influencia conjunta de las dos variables en la relación de respuestas del detector en las condiciones experimentales de medida. Si dicha relación se expresa por R_1/R_2 se tiene:

$$\begin{aligned} \frac{R_1}{R_2} &= \frac{R_{h1}}{R_{h2}} \cdot \frac{R_{x1}}{R_{x2}} \\ &= \frac{(x_2 + a)^2 \cdot B_1 \cdot e^{-\mu \cdot x_1}}{(x_1 + a)^2 \cdot B_2 \cdot e^{-\mu \cdot x_2}} = \\ &= \frac{(x_2 + a)^2 \cdot B_1 \cdot e^{-\mu \cdot x_1}}{(x_1 + a)^2 \cdot B_2 \cdot e^{-\mu \cdot x_2}} \end{aligned} \quad (6)$$

Para determinar la sensibilidad del método veamos con un ejemplo numérico cómo varían las respuestas del detector, o sea, las lecturas R_1 y R_2 , al dar una pequeña inclinación al pasador.

En las condiciones experimentales en que se verificaron los trabajos, a vale, aproximadamente, 25 mm. Haciendo, por ejemplo, $x_1 = 127 \text{ mm}$ y $x_2 = 123 \text{ mm}$, y tomando $B_1/B_2 = 1$ se obtiene $R_1/R_2 = 0,85$.

Para esta diferencia de 4 mm entre las profundidades de los extremos del pasador, que tiene 500 m de longitud, equivalente a una inclinación del pasador 4/500, el ángulo correspondiente es $0^\circ 27'$.

Vemos en este ejemplo que para la pequeña inclinación de $27'$ la relación entre R_1 y R_2

es 0,85, es decir, la diferencia de lecturas es apreciable.

Análogamente, para $x_1 - x_2 = 2$ mm resulta $R_1/R_2 = 0,94$.

Si consideramos que la técnica experimental permite determinar, en sólo unos minutos de medida, valores de dicha relación del orden de 0,95 con un error estadístico inferior a $\pm 0,005$, se comprende la extrema sensibilidad del procedimiento.

Los errores más importantes pueden derivarse de la falta de homogeneidad del hormigón y de las consiguientes variaciones de densidad media en el volumen cónico de hormigón definido por la superficie circular del cristal del detector y la fuente radiactiva.

En la práctica interesa determinar la profundidad o distancia x a que se encuentran de la superficie del firme cada una de las fuentes radiactivas. La determinación se lleva a cabo basándose en una medida de referencia, o calibrado, realizado en el laboratorio, con una probeta de hormigón, en condiciones geométricas conocidas. Se determina así la respuesta R dada por el detector para un espesor x de hormigón conocido y una fuente de igual actividad que la que se desea localizar en el firme (en realidad basta conocer la relación de actividades entre ambas fuentes). Estos datos se sustituyen en la ecuación (6), permitiendo así la determinación de la profundidad a que se encuentra esta última fuente en función de la respuesta correspondiente a la misma. A idéntico resultado se llega calculando en el laboratorio la función que define la variación de la respuesta del detector con la profundidad de la fuente, según se verá más adelante.

3. Resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio.

3.1. Generalidades.

Las técnicas experimentales descritas se han ensayado en el laboratorio, utilizando probetas de hormigón, especialmente fabricadas con este fin por el Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Las probetas o losas de hormigón tenían diversos espe-

sores, con objeto de hacer combinaciones con ellas y variar las condiciones de medida. En algunas de las losas se dispusieron alvéolos para alojamiento de los pasadores, los cuales han sido marcados en uno solo de sus extremos utilizando fuentes de ^{192}Ir , de unos 200 μCi de actividad. Se han utilizado dos tipos distintos de hormigón, que se designan por las letras A y B, cuyas características son:

Hormigón tipo A.

Dosificación:

Gravilla gruesa (12 a 40 mm)	980 Kg
Gravilla fina (2 a 20 mm)	430 Kg
Arena de machaqueo (0,08 a 7 mm)	530 Kg
Agua	155 lts
Cemento	350 Kg

Dimensiones de las probetas:

Medidas comunes: 30 x 30 cm.

Espesores variables: 5,19, 6,58, 7,54, 7,55, 10,09 y 7,75 centímetros (esta última con alvéolo para alojar el pasador).

Hormigón tipo B.

Dosificación:

Gravilla gruesa (12 a 40 mm)	850 Kg
Gravilla fina (2 a 20 mm)	405 Kg
Arena de machaqueo (0,5 a 5 mm)	405 Kg
Arena de machaqueo (0,08 a 1,2 mm)	365 Kg
Agua	122 lts
Cemento	202 Kg

Dimensiones de las probetas:

Medidas comunes: 30 x 30 cm.

Espesores variables: 5,05, 5,56, 7,35, 7,65, 9,86 y 7,50 centímetros (ésta con alvéolo).

3.2. Localización del eje vertical que pasa por la fuente radiactiva.

Para la localización del eje vertical que pasa por la fuente, interesa que el cambio de respuesta del detector al alejarse de dicho eje sea lo más brusco posible. A pesar de utilizar el colimador, la respuesta del detector en puntos alejados de este eje se mantiene elevada debido a la dispersión de los fotones (efecto Compton). Hubiera sido más indicado para este

tipo de ensayo un radioisótopo que emita rayos gamma monoenergéticos, tal como el ^{137}Cs . Pero, como luego veremos, la precisión que proporciona el ^{192}Ir es satisfactoria, por cuya causa fue utilizado este radioisótopo, que, por otro lado, ofrece ventajas con respecto a su manipulación, período de semidesintegración, precio, etcétera.

El detector de centelleo se ha utilizado en conexión con un espectrómetro monocanal. Las condiciones más favorables de medida se han determinado mediante espectrometría gamma. La figura 5 muestra tres espectros obtenidos

^{192}Ir . En los espectros 2 y 3 se observa una importante elevación de la curva en la zona correspondiente al efecto Compton, tal como era de esperar. En el espectro 3 apenas se aprecian los fotopicos del ^{192}Ir , lo que demuestra la eficacia del colimador. Las mayores diferencias de altura entre ambas curvas corresponden al intervalo de energía comprendido entre 0,22 MeV y 0,52 MeV, siendo éste, por tanto, el intervalo elegido para las medidas.

Los resultados obtenidos mediante desplazamientos laterales del conjunto detector-colimador, pasando por la vertical de la fuente, se

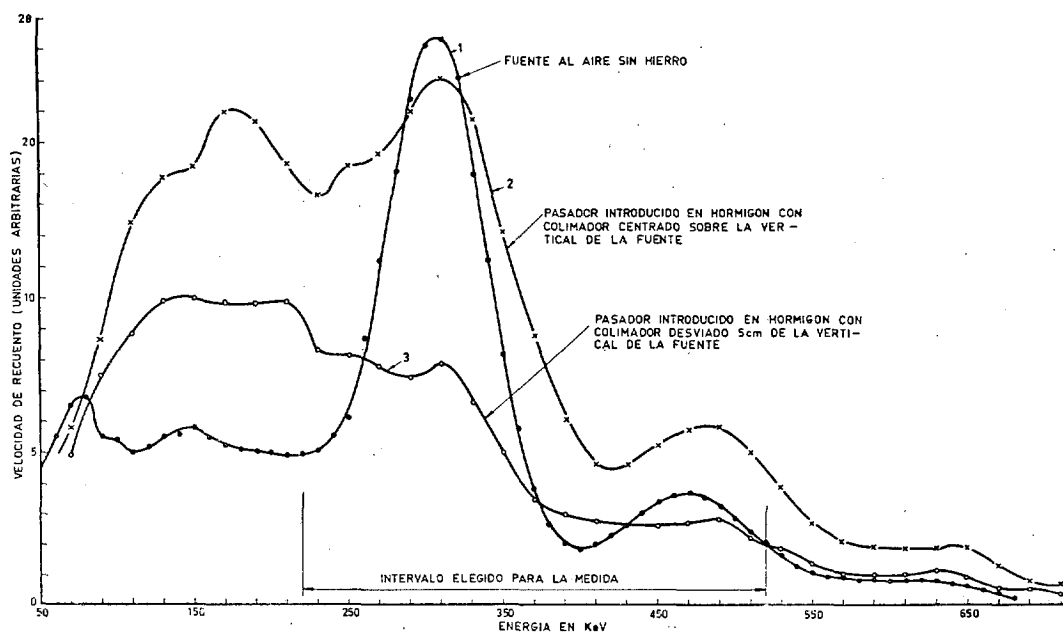


Fig. 5. — Espectros de ^{192}Ir obtenidos con y sin hormigón.

con la fuente de ^{192}Ir . El espectro 1 se ha obtenido con la fuente situada al aire. Los espectros 2 y 3 se han obtenido con la fuente alojada en el pasador, e introduciendo éste en el centro de una losa de hormigón de 25 cm. de espesor. El espectro 2 corresponde a una posición del orificio del colimador centrado sobre la vertical de la fuente. El espectro 3 responde a una desviación entre ambos (orificio y eje) de 5 cm. En el espectro 1 se observan, con toda claridad, los fotopicos correspondientes a los rayos gamma de 0,31 MeV y 0,47 MeV emitidos por el

muestran en las figuras 6 y 7 para los dos tipos de hormigón utilizados. Como era de esperar, las curvas son, satisfactoriamente, simétricas, lo que demuestra la homogeneidad de las probetas de hormigón. La posición del máximo de la curva puede obtenerse a partir de los puntos medios de los segmentos definidos en la propia curva para diferentes ordenadas. El error máximo que puede cometerse es del orden de ± 2 mm, excepto cuando el hormigón presente heterogeneidades, circunstancia que se pondría de manifiesto por la asimetría de la curva.

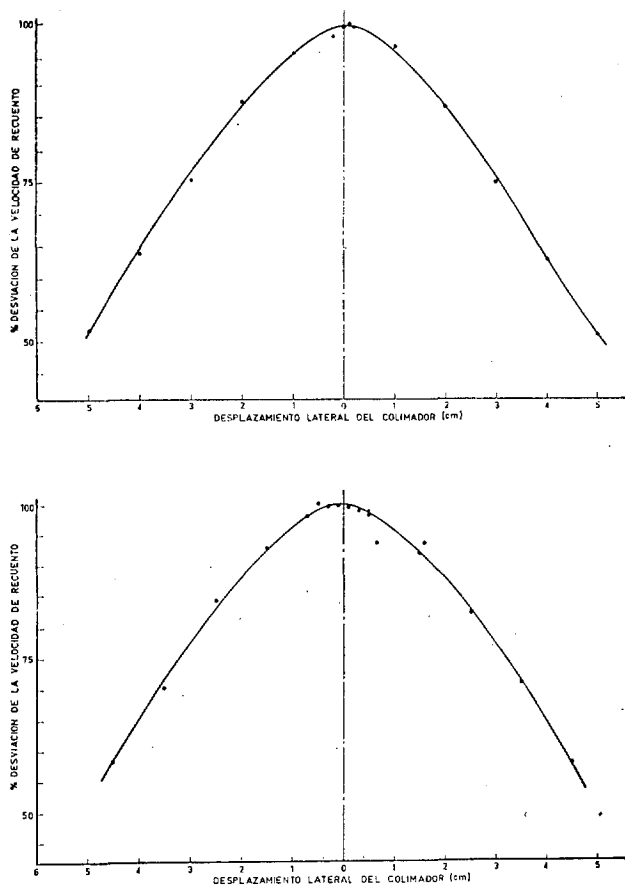


Fig. 6. — Variación de la respuesta del detector en función de la desviación del orificio del colimador con respecto a la vertical de la fuente (hormigón "tipo A").

3.3. Profundidad de la fuente en la losa de hormigón.

Tal como se ha indicado en el apartado 2.3., la respuesta obtenida, cuando el detector está situado sobre la superficie del hormigón, centrado con respecto al eje vertical en que se encuentra la fuente, varía con la profundidad x por efecto de la ley del inverso del cuadrado de la distancia y de la ley exponencial de atenuación de la radiación gamma. El efecto de la primera de estas leyes es matemáticamente exacto, debido a lo cual no precisa comprobación experimental. La ecuación (1) puede aplicarse sin más para la evaluación de este efecto.

La atenuación de los rayos gamma emitidos por el ^{192}Ir en el hormigón se ha investigado situando la fuente a una distancia fija del detec-

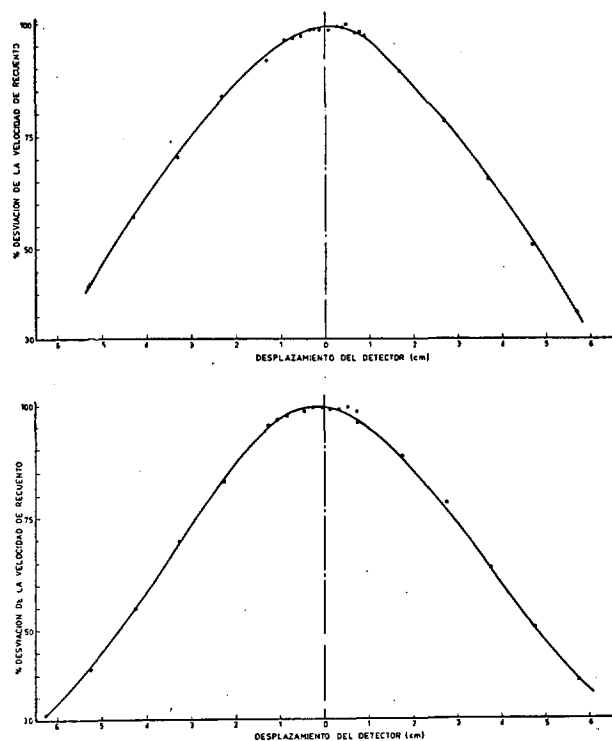


Fig. 7. — Variación de la respuesta del detector en función de la desviación del orificio del colimador con respecto a la vertical de la fuente (hormigón "tipo B").

tor, e interponiendo, entre ambos, probetas de hormigón de espesor variable. La ventana del analizador de impulsos se situó en el intervalo comprendido entre 0,22 MeV y 0,52 MeV, con objeto de eliminar la mayor parte de los fotones dispersados. Las curvas de atenuación obtenidas para los dos tipos de hormigón utilizados se muestran en la figura 8. La ley exponencial de atenuación se cumple satisfactoriamente, a partir de un espesor de hormigón de unos 5 cm. Para el hormigón del tipo B se obtiene una pendiente mayor que para el del tipo A, debido a su mayor densidad.

En una nueva serie de ensayos se analizó la respuesta del detector en las condiciones experimentales previstas para los trabajos de campo. La disposición de medida utilizada se

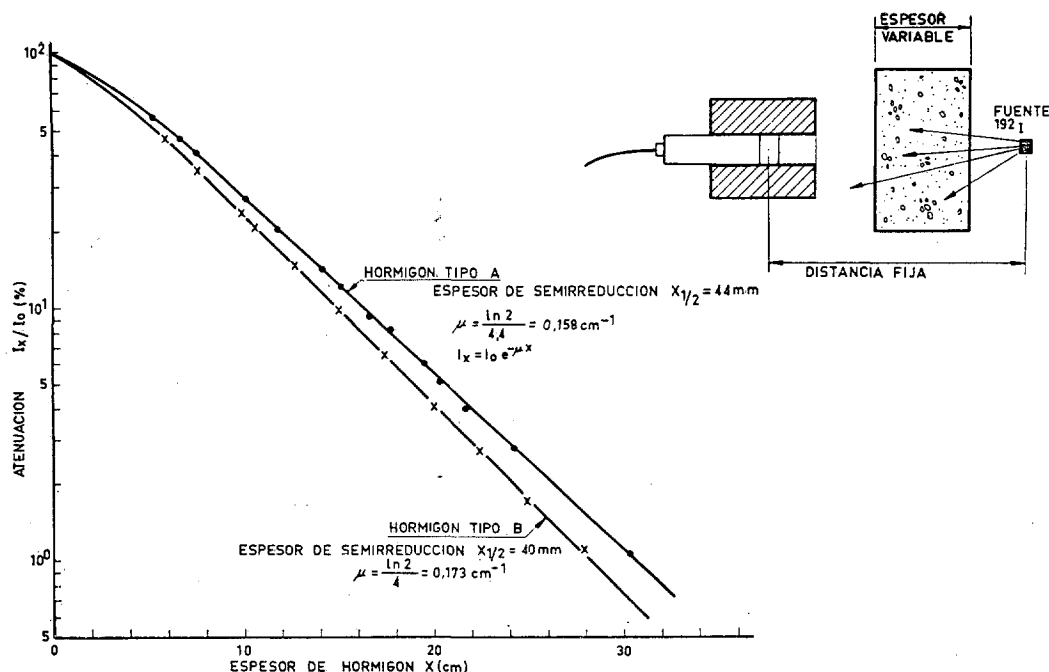


Fig. 8. — Curvas de atenuación del ^{192}Ir en hormigón obtenidas experimentalmente.

muestra en la figura 9. El detector se introduce dentro de un recipiente cilíndrico de plomo que no afecta a la eficacia de su respuesta, una vez centrado sobre la vertical de la fuente. En cambio, el blindaje de plomo impide que rayos gamma parásitos afecten a las medidas. Estos rayos parásitos pueden proceder:

- De las fuentes próximas.
- De la propia fuente en estudio, pero retrodispersados (efecto Compton).

En dicha figura 9 la curva 1 expresa la ley que rige las respuestas del detector en función del cuadrado de la distancia, de acuerdo con la expresión (1) de la página 568. Según se ve, $I_{13} = 2,3 \times 10^6$ es la lectura correspondiente a la distancia de 13 cm.

La curva 2 representa la ley exponencial de absorción de radiaciones gamma por el hormigón, expresión (2) de la página 568. El recipiente de plomo descansa siempre sobre la superficie de la losa del hormigón, por lo que la respuesta del detector, curva 3, viene definida por el efecto conjunto de las dos leyes anteriormente citadas. Los resultados obtenidos con ambos

tipos de hormigones se muestran en las figuras 9 y 10. En ellas, se representan también la curva teórica correspondiente a la ley del inverso del cuadrado de la distancia y la curva que refleja la atenuación del haz de rayos gamma, basada en datos experimentales. A partir de estas dos curvas se han determinado diversos puntos de la curva teórica para el efecto conjunto que, como se observa en ambas figuras, coinciden satisfactoriamente con los valores experimentales obtenidos.

Con una fuente de ^{192}Ir de 200 μCi de actividad y la disposición geométrica indicada, la respuesta del detector al centrar la fuente sobre la losa de hormigón, a 125 mm de la superficie, asciende a $5,8 \times 10^5$ cuentas/minuto. Si se realiza un recuento de dos minutos de duración se tiene una desviación estadística 3σ (99 por 100 de probabilidades) de unas 1.600 cuentas/minuto, que corresponde a un cambio de profundidad de la fuente de sólo 1 mm. En este caso, la respuesta del detector se modifica en esta zona en, aproximadamente, 10.000 cuentas/minuto. Estos datos demuestran la extraordinaria sensibilidad del procedimiento. Lo mismo que ocurría en la localización de la fuente en un

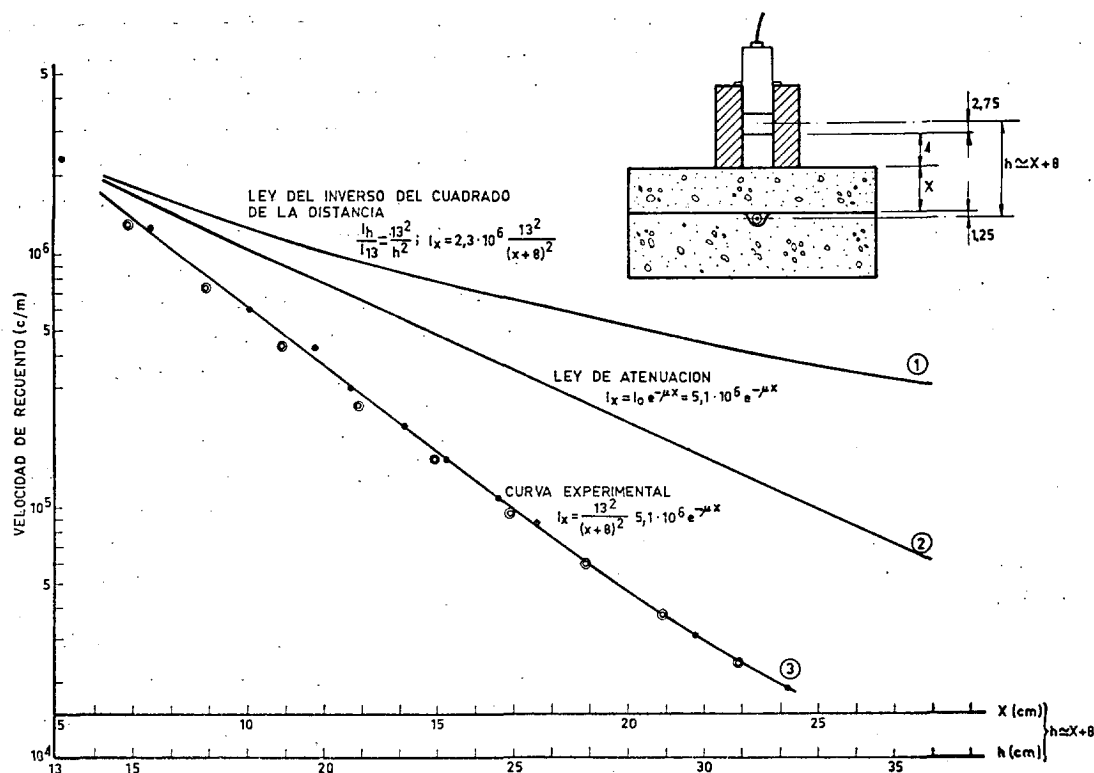


Fig. 9. — Variación de la respuesta del detector en función del espesor x de hormigón (tipo A) existente sobre el pasador (curva 3). Los puntos @ corresponden a valores teóricos deducidos como combinación de las curvas ① y ②. Los puntos • corresponden a lecturas experimentales.

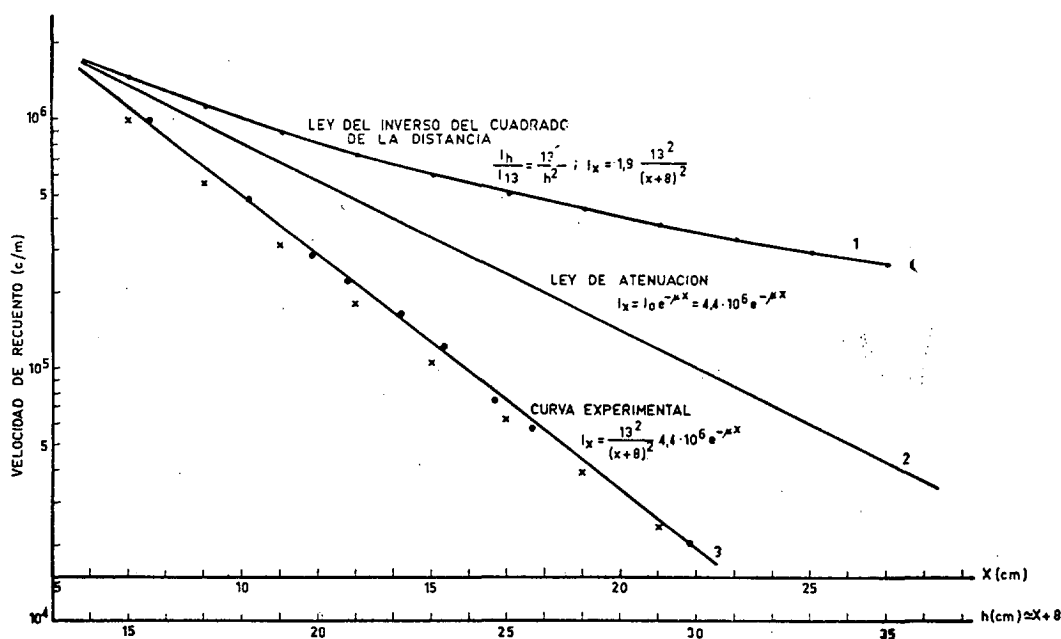


Fig. 10. — Variación de la respuesta del detector en función del espesor x de hormigón (tipo B) existente sobre el pasador (curva 3). Los puntos en forma de aspa indican los valores teóricos deducidos de las curvas 1 y 2. La disposición de medida fue idéntica a la mostrada en el esquema de la figura anterior.

plano horizontal, los mayores errores que pueden cometerse se derivan de las posibles heterogeneidades de la masa de hormigón existente sobre la fuente, o por no ser plana la superficie del firme.

Para los trabajos de campo, la respuesta del detector obtenida con la fuente cuya profundidad se desea obtener, puede compararse *in situ* con la respuesta correspondiente a una probeta, en la que la fuente se encuentre a una distancia exactamente conocida. Con estos datos, y sabiendo la pendiente de las curvas de efecto global de las figuras 9 y 10, se obtiene fácilmente la profundidad buscada para aquella fuente. Por otra parte, comparando entre sí las respuestas obtenidas para las dos fuentes de cada pasador se obtiene una indicación precisa del ángulo formado por el eje de los pasadores con la superficie.

4. Conclusiones.

Los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio para determinar la posición de los pasadores dentro de la masa de hormigón han sido muy satisfactorios.

La posición de los extremos de los pasadores, tanto con relación a la superficie del firme como con respecto a un plano perpendicular que pase por el eje del firme, puede obtenerse con un error del orden de 1 ó 2 mm, siempre que la superficie del firme sea plana y que la masa de hormigón situada sobre las fuentes tenga una densidad uniforme y conocida. Para determinar el paralelismo en relación con un plano vertical no es preciso conocer la densidad del hormigón con tal de que sea uniforme. Para determinar la profundidad a que se encuentran las dos fuentes radiactivas de cada pasador se precisa conocer tal densidad. Un error en el cálculo de la densidad del hormigón del orden de 0,1 gr/cm³ ocasionaría otro error en la determinación de la profundidad de la fuente, que puede oscilar entre 3 y 5 mm, según sea dicha profundidad. Puesto que el error afectaría igualmente a las dos fuentes del pasador, ello se traduciría en un desplazamiento paralelo de dicho pasador en sentido vertical. Su ángulo de inclinación respecto al plano de la superficie del firme apenas se vería afectado por tal causa de error.