

LA EXPERIENCIA DE DIEZ AÑOS EN EL CONTROL DE COMPACTACION POR METODO NUCLEONICO(*)

Por JOSE A. GARCIA-DIEGO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Los isótopos radiactivos se utilizan, formando parte de equipos de medida y control, en distintas ramas de la ingeniería civil. Se observa un apreciable crecimiento de la aplicación de estas técnicas. En el presente artículo se resume lo referente a medida, por procedimiento nucleónico, de la densidad y humedad de terraplenes y de la densidad de pavimentos asfálticos. Tras una breve referencia histórica, se resumen los perfeccionamientos recientes de los instrumentos, cuyas características ya habían sido descritas hace años en esta misma Revista. Se compara después este método con los gravimétricos, que hasta hace poco eran los únicos utilizados, tanto desde el punto de vista económico como técnico, haciéndose notar las limitaciones de ambos. Por último se indican otras aplicaciones de estos equipos, distintas del control de compactación; algunas de ellas permiten también obtener resultados interesantes en el campo de la construcción. El artículo proporciona una bibliografía suficiente para estudios más detallados.

Avec tant de ressources, l'atome se devait d'apporter dans la domaine des Travaux Publics quelques solutions élégantes à des problèmes embarrassants. — M. Duquesne.

1. CONSIDERACIONES PREVIAS

1.1. Todo método de control de calidad en la construcción tiene, en la mayoría de los casos, dos finalidades: Una, contractual; aceptación o rechazo por la Administración de la parte correspondiente de la obra. Otra, de intervención correctiva durante el desarrollo del trabajo.

Lo primero que debe exigirse a un ensayo es que sus resultados tengan la precisión nece-

saria para poder asegurar que el producto terminado cumple las condiciones especificadas en el proyecto. La elección del método debe hacerse con un criterio eminentemente práctico; no el mejor por su fundamento físico-matemático o por su comportamiento en un laboratorio de investigación, sino el que dé el máximo rendimiento en las condiciones, a menudo muy duras, de la ejecución de una obra.

Por otra parte, la segunda finalidad, de intervención correctiva para obtener un producto de la mejor calidad posible, impone que su ejecución dure un tiempo muy corto, para no reducir el ritmo de obra que el constructor, por razones económicas se ha fijado y que debe ser igual o menor que el contratado (1).

Por último, estos ensayos tienen un coste: de personal, amortización del equipo, materiales, etc. Y que repercute, como es lógico, en el de la unidad de obra. Cualquier reducción en

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 31 de octubre de 1970.

este precio — sea el ensayo por cuenta del constructor o de la Administración — mejorará la productividad.

1.2. Hemos trabajado en la aplicación de métodos nucleónicos a la ingeniería civil desde la introducción de estas técnicas en España. En lo que sigue resumiremos la experiencia adquirida en la especialidad de control de compactación (2), presentando además una bibliografía suficiente para los que pudieran desear estudiar el asunto con mayor detalle. Creemos que es éste un buen ejemplo de cómo es posible, cambiando el sistema de ensayo, obtener mejores resultados desde todos los puntos de vista anteriormente indicados.

2. HISTORIA

2.1. Los primeros instrumentos que emplean radioisótopos para medir la densidad y humedad de terrenos aparecen, aunque aún no en series comerciales, en los Estados Unidos hacia 1949-50. Ya estaban fundados en los mismos principios que los actuales. O sea, la utilización de la radiación gamma para determinar la densidad húmeda y de una fuente de neutrones para la humedad: la diferencia entre los dos valores obtenidos, densidad seca, es la que, en ingeniería, interesa. Las cabezas radiactivas pueden medir, bien en superficie, colocadas directamente sobre la capa recién compactada, bien en profundidad. En este último caso, el conjunto fuente-detector desciende dentro de un tubo de sondeo (3).

Algunos años después, modificando, aunque no sustancialmente, las cabezas de superficie, se comenzó a determinar, en frío o en caliente, la densidad de pavimentos asfálticos.

En cualquiera de estos casos, el número de impulsos que llegan de la cabeza nuclear en un tiempo predeterminado (en la práctica uno o dos minutos) se registra en un instrumento electrónico denominado escala (4).

2.2. En España este sistema comienza a emplearse en 1960. Los dos primeros usuarios — con diferencia de muy pocos días — fueron Unión Eléctrica Madrileña, en la construcción del canal de Castrejón y el Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, en el tramo experimental de la carretera CN-II de Madrid a Barcelona (5). Los resultados de los ensayos de esta

última obra, su comparación con los obtenidos por los procedimientos clásicos, así como un resumen del fundamento teórico del sistema nucleónico, han sido publicados en esta Revista por S. Uriel y J. M. Serratosa (6).

Desde entonces el número de usuarios ha ido aumentando regularmente, manteniéndose en niveles razonables dado el grado de industrialización del país. En 31 de diciembre de 1969 los equipos de toda procedencia que hemos podido localizar eran ochenta y uno con noventa y nueve (7) cabezas radiactivas; pueden existir algunos más, aunque no creemos que muchos. La figura 1 indica el ritmo con el

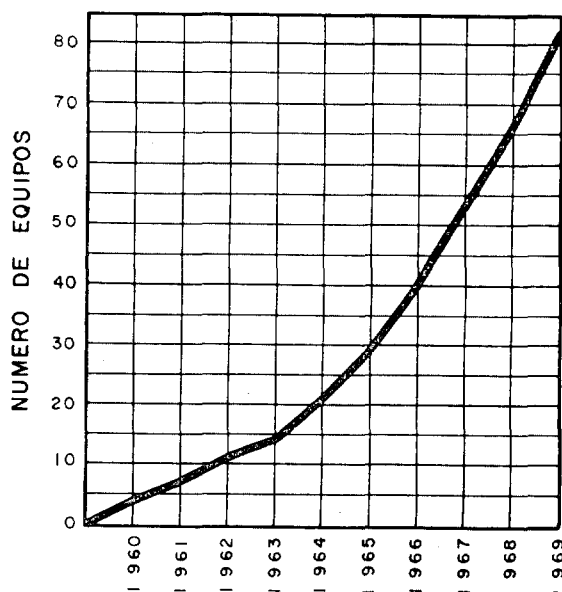


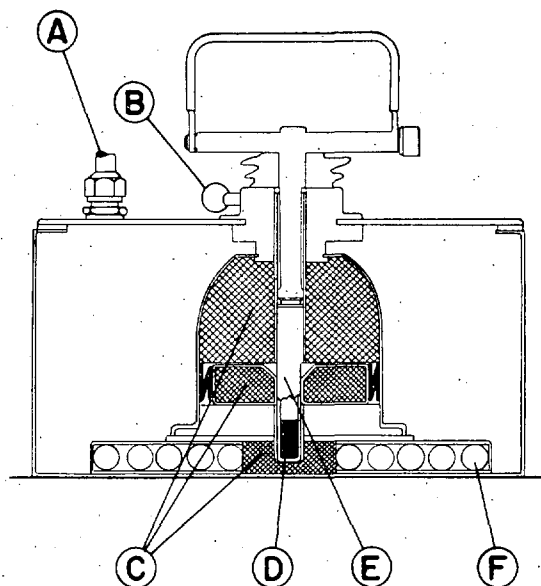
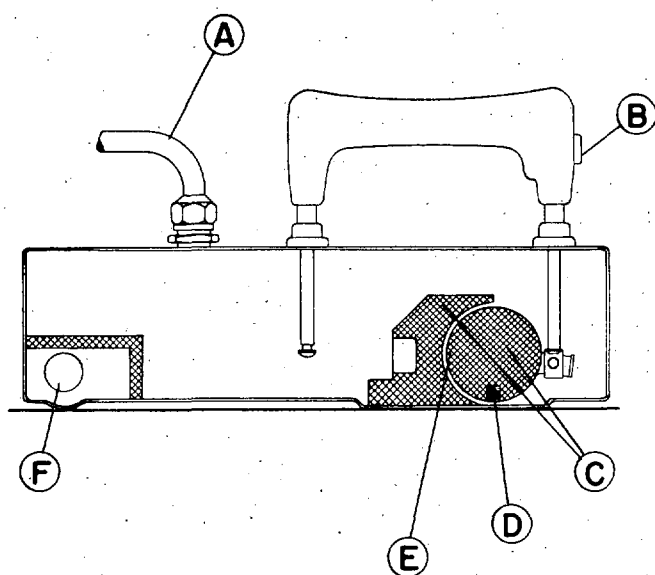
Figura 1.

que esta cifra se ha alcanzado durante el decenio.

Los usuarios se clasifican en la forma siguiente:

CLASE DE ACTIVIDAD	%
A) <i>Control de obra por la Administración:</i>	
1. Aeropuertos	4
2. Carreteras	30
3. Hidráulicas	19
4. Otras	2
B) <i>Empresas constructoras</i>	33
C) <i>Prospección</i>	3
D) <i>Enseñanza e investigación</i>	9

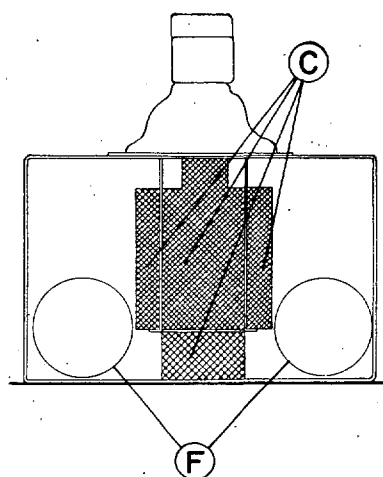
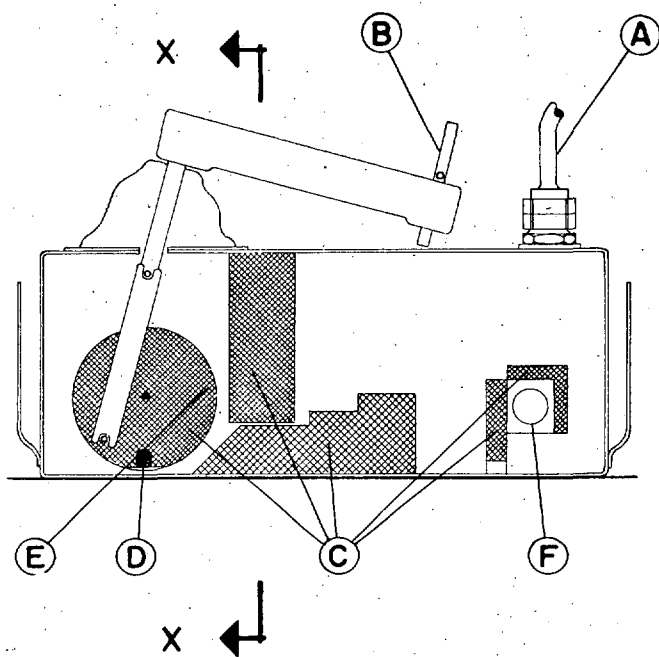
(A) CABLE DE CONEXION A LA ESCALA. **(B)** CERROJO DE SEGURIDAD. **(C)** BLINDAJE.
(D) FUENTE RADIOACTIVA EN POSICION DE USO. **(E)** LUGAR DE LA FUENTE EN POSICION DE TRANSPORTE. **(F)** DETECTOR.



DENSIDAD

HUMEDAD

Figura 2.



CORTE X-X

HUMEDAD / DENSIDAD

Figura 3.

Bajo el epígrafe "Administración" se incluye, desde luego, tanto el control ejercido por organismos del Estado como por sociedades privadas. La tendencia en el último período parece ser a aumentar el porcentaje de los equipos propiedad de empresas constructoras.

3. INSTRUMENTACION ACTUAL

3.1. Nos referimos al citado artículo de Uriel y Serratos para la descripción de los equipos de superficie. Sin embargo, desde la fecha de su publicación (1962) se han introducido algunas modificaciones que, no afectando a los principios básicos, mejoran el rendimiento (8).

La más importante ha sido la sustitución, por una sola cabeza radiactiva, de las dos que medían, respectivamente, la densidad y la humedad en superficie (figs. 2 y 3). Una sola fuente emite gammas y neutrones; el detector Geiger-Müller para gammas va en un extremo del instrumento y los dos detectores para neutrones, de trifluoruro de boro, se sitúan perpendicularmente, a

ambos lados del blindaje de la fuente. Con la cabeza única y el mando a distancia del cambio de uno a otro de los dos canales, el trabajo es más fácil y rápido. El tener que enchufar las dos cabezas a la escala en cada punto de medida, si el número diario de determinaciones era elevado resultaba bastante incómodo; tanto es así que algunos usuarios se resignaron a tener una escala con cada cabeza, a pesar del consiguiente aumento de coste.

En las escalas, además de las ventajas derivadas de los circuitos impresos y la electrónica transistorizada, hoy normales en cualquier instrumento de medida, ha sido también interesante la sustitución de las baterías de plomo (pesadas, siempre expuestas a verter el ácido y caras, por ser de modelo especial) por otras recargables de níquel-cadmio, del mismo tamaño que una pila corriente de linterna. También se ha pasado de la relojería mecánica a la electromecánica y automática, mejorando consiguientemente la exactitud.

3.2. En las cabezas de profundidad (fig. 4)



Figura 4.

algunos fabricantes han creado también modelos combinados de densidad y humedad, a veces con un cristal de centelleo como elemento detector. Otros continúan produciendo los dos instrumentos por considerar que muchas apli-

caciones — en ingeniería, agricultura, minería, etcétera — sólo exigen la determinación de una de las dos propiedades del terreno. Ha sido posible reducir fuertemente el blindaje y con ello el peso de los instrumentos; en efecto, utilizan-

do detectores de He-3, cuatro veces más sensibles que los de trifluoruro de boro, la radiación de la fuente puede ser bastante menor.

3.3. Las cabezas radiactivas para medida de la densidad de mezclas asfálticas (fig. 5) se basan en los mismos principios (9). El blindaje que separa la fuente del detector impidiendo la transmisión directa de la radiación entre ellos, tiene

su efecto de colimación ajustado para que la densidad se mida sólo en una capa de la profundidad, considerada como más apropiada con los métodos de compactación de empleo general, normalmente 2", o sea, 5,08 cm. No afecta a la exactitud de la medida el material situado debajo, como demuestra el gráfico de la figura 6; en él las curvas corresponden, respec-



Figura 5.

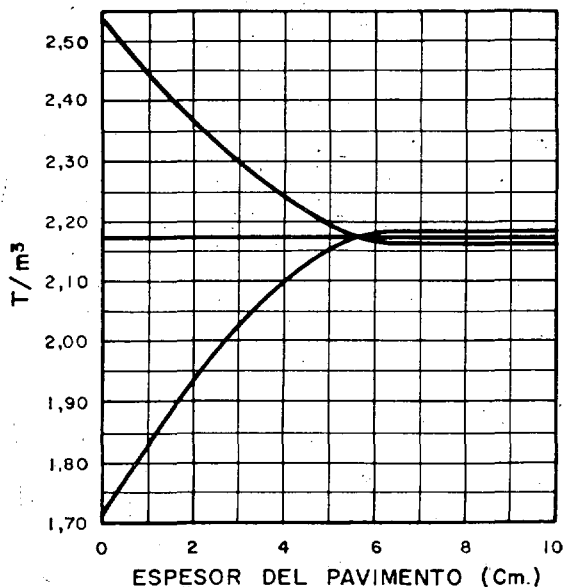


Figura 6.

tivamente, a densidades de la base de 2,53, 2,17 y 1,71 T./m.³. Vemos en él que a partir de una profundidad entre 5 y 6 cm. la densidad del pavimento — o lo que es lo mismo, el número de cuentas leído en la escala —, es constante. Como la capa de rodadura suele tener prácticamente la misma densidad que el *binder*, se emplea normalmente el valor dado por el aparato; si hubiera entre ambas diferencia apreciable, basta establecer el coeficiente de corrección único que resulte de la parte que cada una de las dos capas tiene en el intervalo de 2".

Una de las ventajas de estas cabezas nucleónicas es el poder medir en caliente. Están proyectadas para trabajar en un intervalo aproximado de temperaturas entre -20 y $+150^{\circ}$ C. Por último, diremos que se procura en ellas reducir en lo posible la dimensión transversal, para que quepan dentro de la huella producida por un neumático al compactar, actuando por tanto sobre una superficie lo más plana posible;

ya que, como es lógico, el volumen de los vacíos se mide como de densidad cero.

4. PROCEDIMIENTOS GRAVIMETRICOS DE CONTROL

4.1. La determinación de la densidad seca en terraplenes exige, en obras de volumen medio, las siguientes operaciones. Determinación de la densidad *in situ*, pesando una muestra cuyo volumen se ha determinado previamente, midiendo la cantidad de arena calibrada que se ha hecho rellenar el vacío por ella dejado en el terraplén. Y después, transporte de la muestra al laboratorio, donde se seca en estufa hasta peso constante, para obtener el grado de humedad.

Este sistema tiene imperfecciones graves que afectan al rendimiento de la obra. Proceden éstas, además de la posibilidad de acumulación de errores durante las distintas fases del proceso, fundamentalmente de la determinación de la humedad. Esta debe hacerse en laboratorio, lo que exige el transporte de las muestras, posible fuente de error y, lo que es más importante, el tiempo necesario para conocer los resultados es siempre largo, casi nunca inferior a las dieciocho horas y a veces superior a las veinticuatro.

Con tal espera sólo dos soluciones — ambas malas — son posibles: O bien fijar un ritmo de trabajo ajustado a la necesidad de recibir el resultado positivo del ensayo antes de colocar sobre una capa compactada la siguiente; ello es correcto, pero antieconómico con el grado actual de mecanización, incluso en obras relativamente pequeñas. O bien olvidarse gran parte de las veces de los ensayos y continuar colocando capas sin el debido control; lo que, aun suponiendo lo admitiera la Administración, deberá producir un terraplén de mala calidad.

En obras de gran volumen, para reducir el tiempo de transporte suelen emplearse laboratorios móviles, instalados en furgonetas; no es ello, sin embargo, mejora sustancial.

4.2. En cuanto al estudio del comportamiento de un terraplén a lo largo del tiempo — lo que puede tener mucho interés en los de altura importante, tanto en presas y canales como en carreteras — es muy difícil de realizar por los procedimientos clásicos; las cabezas nucleónicas

de profundidad parecen el único método sencillo y práctico (10).

4.3. La medida de la densidad de capas asfálticas se considera como el factor fundamental del control de éstas, pues el proceso de endurecimiento (aún no del todo bien conocido, pero en el que interviene mucho la interacción del aire y del asfalto en la mezcla) está con ella directamente relacionado.

Se lleva a cabo por dos sistemas: El primero (no gravimétrico) es la utilización de un permeámetro de aire, como el que aparece en las figuras 7 y 8 (11). El cilindro proyecta grasa por

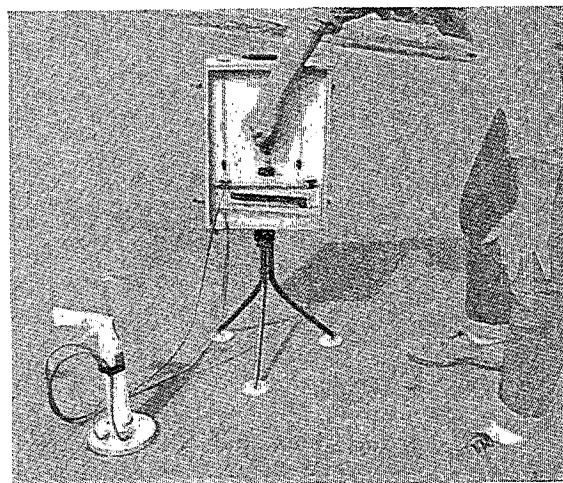


Figura 7.

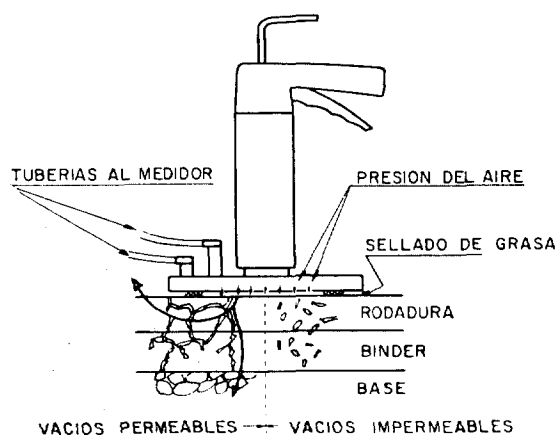


Figura 8.

un anillo poroso, produciendo un efecto de sellado en el pavimento. Dos tubos de goma, que parten de la placa inferior, se conectan, uno a un manómetro inclinado y, el otro a una pipeta

de aire calibrada. Si existen zonas vacías interconectadas, al establecer una presión controlada el aire pasará a través de ellas con relativa rapidez parte en dirección más o menos vertical y parte horizontal, hasta salir al exterior por fuera del anillo de grasa (ver figura 8). Desde luego, si casi no existen vacíos en el pavimento, la pérdida de aire será muy baja; pero también puede darse el caso y éste es uno de los inconvenientes del método, de que haya muchos vacíos, pero no conectados unos con otros. Y también de que la superficie de la capa no tenga poros, aunque el resto sea deficiente. Otro defecto es que, al pertenecer tanto la grasa como el asfalto a la misma familia de hidrocarburos, el residuo de la primera puede ablandar al segundo.

El otro procedimiento de control, destructivo, que es el más empleado, consiste en tomar muestras, a mano o con sonda, del pavimento ya endurecido y obtener sus características en el laboratorio.

Con cualquiera de estos métodos, si los resultados obtenidos no son buenos, la Administración no tiene otra opción que ordenar la destrucción de la zona de pavimento afectada; en la práctica, casi nunca se llega a una medida tan drástica, contentándose a veces con exigir de entrada al contratista, por ejemplo, una densidad Marshall de 97 ó 98 por 100 cuando la fijada en el pliego de condiciones es de 95. Ello con el consiguiente aumento innecesario de coste.

Estimamos que las ventajas del método nucleónico son por lo menos tan importantes en asfaltos como en terraplenes. Y ello porque además de las dificultades enumeradas de los sistemas clásicos, debe citarse otra aplicación de las cabezas radiactivas, que es la posibilidad de fijar el plan de obra, para que el equipo mecánico y la secuencia de las operaciones sean los económicamente óptimos.

Para ello se hacen distintas pruebas (por ejemplo, con un equipo de rodillos lisos de acero y otro de neumáticos) variando el número de pasadas y el orden de utilización de las diferentes máquinas. En cada caso se va midiendo con la cabeza nucleónica; recordemos que la determinación no dura más de uno o dos minutos. No es siquiera necesario, para buscar la mejor solución, calcular la densidad; basta ir anotando los resultados en un gráfico que tenga en abscisas el número de pasadas y en ordenadas las cuentas que dé la escala. También, en

la misma forma, puede medirse a distintas temperaturas, para una mezcla dada, hasta obtener la más apropiada.

Estas cabezas nucleónicas para asfaltos empezaron a utilizarse en España en 1966, o sea, mucho más tarde que las otras. El primer usuario fue Constructora Internacional (12). Actualmente su porcentaje dentro del total de instrumentos existentes tiende a aumentar.

5. OBJECIONES.

5.1. Todo procedimiento de ensayo tiene sus limitaciones. Vamos a estudiar las objeciones fundadas que hemos podido recoger de los usuarios, así como las soluciones más apropiadas en cada caso (13).

5.2. Las posibilidades de error en las determinaciones de densidad proceden de la influencia de la composición del material. Cada cabeza radiactiva tiene una curva de calibración (en realidad, una recta dentro del intervalo de utilización práctica) que relaciona directamente el número de cuentas por minuto con la densidad húmeda. Esta recta puede utilizarse siempre que la medida sobre un sólido estándar (generalmente un bloque de granito) no difiera en cifra superior a un ± 2 por 100 del valor especificado por el fabricante. Si no es así se emplea una segunda curva, que tiene también las densidades en abscisas, pero en ordenadas el cociente de las cuentas por minuto obtenidas en el terreno y en el bloque estándar. Ello no tiene más desventaja que el obligar en cada caso a dividir dos cantidades y elimina, aunque en ingeniería la precisión exigida muchas veces lo hace innecesario, los posibles errores pequeños procedentes de variaciones en la respuesta de los detectores y en la ganancia del preamplificador. Si de todas las maneras, se prefiriera la lectura directa, no habría más que dibujar otra nueva curva, partiendo de los resultados obtenidos en unos pocos puntos por los dos procedimientos, gravimétrico y nucleónico.

Lo anterior supone que, se calcule la densidad directamente o por cociente, existe una relación lineal única. Pero si la composición química o granulométrica del terreno varía muy fuertemente el error puede no ser aceptable.

Para resolver este problema existen dos soluciones:

A) Trabajar con una serie de rectas sensi-

blemente paralelas. Generalmente bastarán dos o tres para otros tantos tipos de terreno y se determinan por comparación con el resultado de ensayos gravimétricos. Así se ha hecho a menudo, con resultados satisfactorios, dentro del grado de exactitud exigido en obras de ingeniería de tipo corriente.

B) Utilizar el método denominado *air gap* (espacio de aire). Consiste en hacer una medida en la posición normal y otra a una distancia predeterminada (entre 1 y 3"), por encima de la superficie del terreno. Su inventor, S. H. Kühn (14) encontró que el cociente de los dos valores en tal forma obtenidos está relacionado con la densidad, haciendo desaparecer o al menos minimizando la influencia de la composición del terreno. El sistema es sencillo y puede emplearse con cualquier tipo de cabeza radiactiva existente en el mercado, sin más adición que un

marco con patas sobre el que se coloca para hacer una segunda lectura.

En el trabajo de Gardner y Roberts (15) se estudia detalladamente una calibración basada en un modelo matemático aún más perfecto que el de Kühn. Aparece en él también un ejemplo, que conduce al nomograma que reproducimos en la figura 9; en él puede verse se obtiene un valor de 1,79 T./m.³. Este hubiera sido de 1,76 con una única curva de calibración y lectura. R_1 y R_2 son cocientes de cuentas, como antes hemos explicado.

5.3. También las medidas de humedad se ven afectadas por la composición del terreno y, además, por su densidad. El fenómeno, salvo en los casos especiales citados a continuación, es mucho menos acusado que en las determinaciones de densidad, y esta afirmación teórica

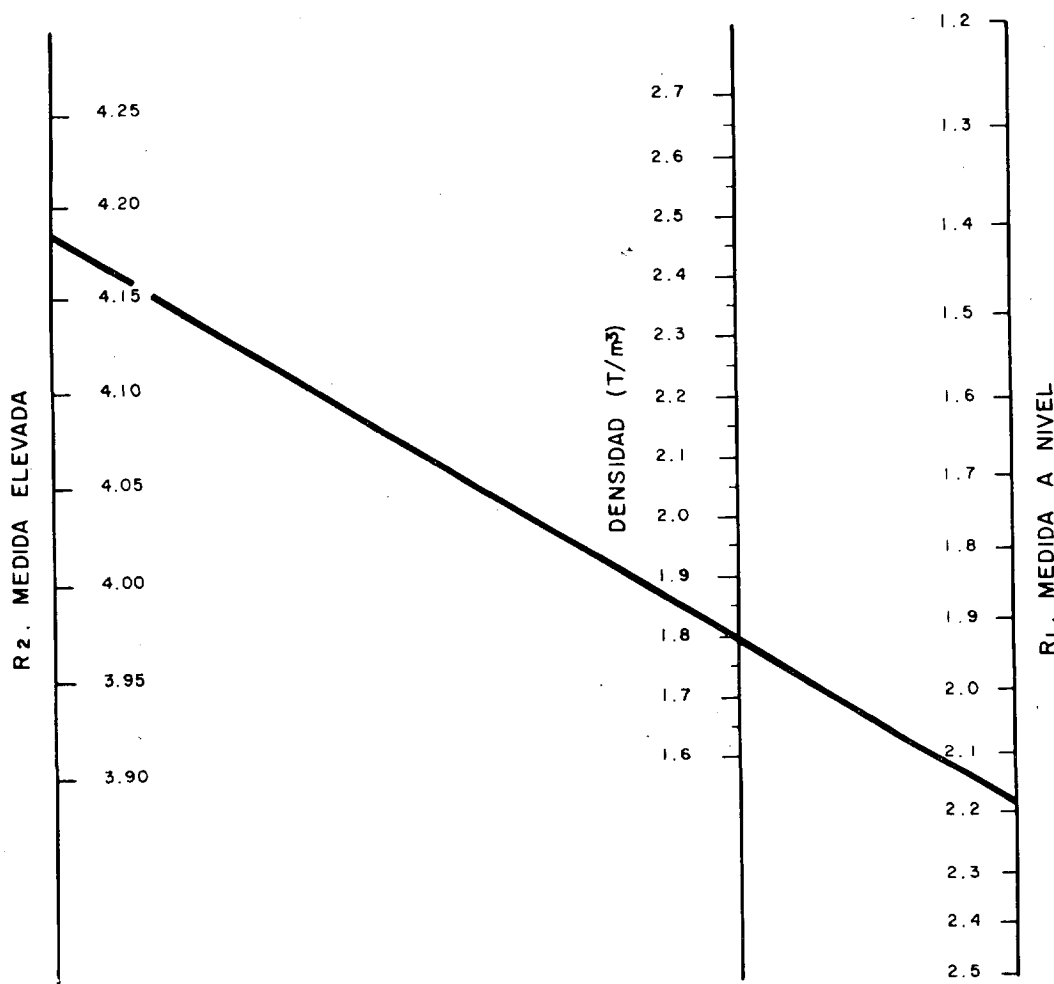


Figura 9.

ha sido comprobada por nuestra experiencia con los usuarios españoles.

Debe, sin embargo, tenerse esto en cuenta cuando se trabaje con materiales muy arcillosos, pues la medida comprenderá también el agua de composición o yesosos (agua de cristalización) y en ambos casos será superior a la obtenida por método gravimétrico. También aumenta el número de cuentas registrado por la escala la existencia de materia orgánica y en cambio lo disminuye el que el terraplén contenga cloro, elemento absorbente de neutrones.

Como los materiales suelen tener limitado el contenido de arcilla y yeso y la utilización de materia orgánica está proscrita, el problema no aparece la mayoría de las veces. En cuanto a terrenos con cloro, sí se utilizan a veces en construcción, en zonas de marismas.

Si en cualquiera de estos casos la composición del material afectara al grado de exactitud exigido, la única solución es el fijar experimentalmente una nueva recta de calibración (16). En efecto, no existe método de compensación parecido al *air gap* en las cabezas de densidad.

5.4. Para las cabezas de profundidad son válidas las consideraciones anteriores (17). Haremos notar, además, que los resultados varían si lo hace el diámetro o el espesor del tubo de sondeo (18), características que, por tanto, debe procurarse mantener constantes.

5.5. En cuanto a las cabezas para asfaltos, se ha objetado la dificultad de eliminar la influencia de las capas subyacentes; pero el problema creemos que está resuelto, como indica el gráfico de la figura 6. La densidad medida en caliente puede ser, en algunos casos, ligeramente inferior a la de la muestra extraída con sonda; pero basta multiplicar por un coeficiente correctivo único, obtenido por comparación en-

tre ambos métodos. En cuanto a las posibles diferencias con los valores obtenidos en el permeámetro, proceden de errores de este sistema y no del nucleónico. En efecto, el segundo mide la densidad y el primero — como su nombre indica — la permeabilidad, y ambas magnitudes no son equivalentes. Por ejemplo, un pavimento con un 8 por 100 de huecos tiene un 5 por 100 más de densidad que uno con 16 por 100; en cambio, la permeabilidad al aire se reduce en proporción muchísimo más fuerte. Si los huecos pasan del 8 por 100 al cero, tendremos el mismo aumento de la densidad; pero en este caso la permeabilidad casi no habrá cambiado (19).

5.6. Se ha escrito en esta misma Revista (20) que, en el futuro y para la construcción de carreteras, los ensayos puntuales, incluso los nucleares, serán insuficientes, lo que explica la tendencia a utilizar métodos de control continuo. La observación creemos sólo podría aplicarse, en nuestro caso, a obras de volumen realmente extraordinario. En cambio, nos da ocasión de citar la existencia de equipos nucleónicos de control continuo que operan, no en competencia con los que hasta ahora hemos descrito, sino complementándolos. Aún no se han empleado en España y no tenemos de ellos experiencia directa.

Uno de éstos (fig. 10) es el densímetro del Instituto de Carreteras (MADI), de Moscú (20): la especie de trineo arrastrado por el vehículo parece difícil pueda adherirse debidamente a la superficie y evitar errores por interposición de zonas vacías. Es, desde luego, un modelo antiguo y seguramente existen hoy otros de fabricación soviética más perfeccionados.

Actualmente en los Estados Unidos se produce comercialmente un equipo de este tipo.

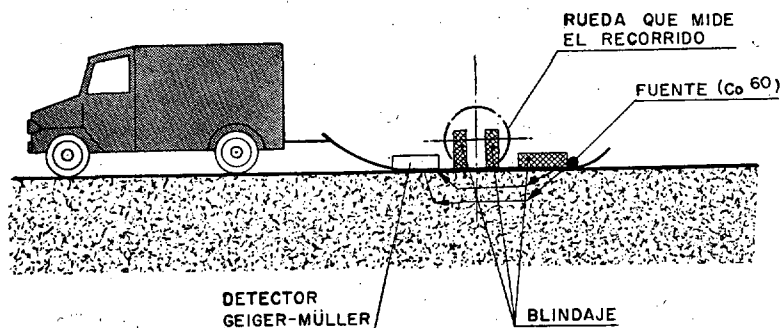


Figura 10.

Consiste (fig. 11) en un vehículo especialmente proyectado que contiene un registrador gráfico de dos canales y la instrumentación electrónica asociada. El conjunto de medida de humedad,



Figura 11.

cuyo fundamento es el mismo que el de los modelos portátiles, va montado detrás de las ruedas traseras. El correspondiente de densidad se sitúa en un remolque arrastrado por el vehículo. Utiliza un cristal de centelleo como detector; su electrónica incluye un discriminador de la radiación de baja energía, reduciendo así el efecto de la composición del terreno.

5.7. Finalizaremos este apartado indicando las investigaciones en curso para perfeccionar aún más estos instrumentos; los resultados de algunas de ellas creemos es posible se incorporen a los equipos usados a pie de obra; los de otras, aunque conduzcan a un grado de precisión verdaderamente notable, pueden aumentar demasiado su coste o la probabilidad de averías y, por tanto, utilizarse sólo en otras ramas de la técnica. En densidad y para eliminar la influencia de la composición del terreno se estudian otros métodos de doble medida (*dual gauge*), más elaborados que el *air gap*, que es sólo un caso particular, y también el uso de filtros de energía. En humedad los trabajos se encaminan a mejorar todavía los métodos de calibración.

6. COMPARACION DE LOS DOS SISTEMAS DESDE EL PUNTO DE VISTA ECONOMICO

6.1. El resultado final de la utilización de estos equipos puede resumirse en la obtención de un ahorro para el usuario; bien sea la Administración o el constructor. Ello es obvio y tal beneficio se cita en la mayor parte de las publicaciones sobre la materia, tanto científicas como comerciales. Sin embargo, con la excepción de una corta referencia a la que después haremos mención, no conocemos ningún intento de cifrar este ahorro. Intentaremos hacerlo a continuación.

6.2. Es necesario tener en cuenta que todos los valores que obtengamos en los siguientes apartados son sólo aproximados; si hemos logrado establecer órdenes de magnitud nos damos por satisfechos.

Para los costes de maquinaria y personal hemos utilizado un proyecto de tramo de autopista, en cuya redacción (1968) hemos intervenido. Para el resto nos apoyamos en nuestra experiencia directa de este tipo de control durante los últimos diez años.

6.3. Existen dos factores de ahorro. El pri-

mero es el obtenido por reducción en el personal del laboratorio de obra. El segundo, aún más importante, procede de la posibilidad de trabajar más rápidamente, con el mismo personal y maquinaria, al no tener que esperar el resultado de los ensayos gravimétricos. Un tercer factor, la posibilidad de controlar y, por tanto, corregir, si es necesario, de forma casi instantánea, los puntos dudosos del terraplén o del pavimento, influye también de modo importante en mejorar la calidad de la obra; lo que también es un beneficio, aunque éste no sepamos cifrarlo.

6.4. Consideremos el ahorro de personal. En obras de volumen medio, el equipo de control se compone, a pie de obra, de un conductor de la furgoneta, un laborante y un peón especializado, y en el laboratorio, un laborante dedicado principalmente al secado de muestras. Su coste horario lo estimamos en 222 pesetas.

En obras de gran volumen suele utilizarse una furgoneta más grande, dentro de la cual va instalado el laboratorio, reduciéndose así el tiempo de transporte. En ella van el conductor, un laborante y tres peones especializados; coste horario, 253 pesetas.

El material empleado cuesta aproximadamente 50 000 pesetas y debe calcularse se amortiza en cinco años.

Si en vez del procedimiento gravimétrico utilizamos el nucleónico, cualquiera que sea el volumen de obra basta con una furgoneta ligera. En ella van el conductor y un técnico auxiliar de obra. El conductor, en el sistema clásico de control, sólo realiza el trabajo de su especialidad y nunca el manual de hacer hoyos en el terraplén, etc. En el nucleónico colabora con el técnico en las medidas. El coste horario queda así reducido a 121 pesetas.

El equipo nuclear cuesta del orden de 380 000 pesetas, y consideramos se amortiza en siete años (23). Como importe de reparaciones suponemos 9 000 pesetas al año (24).

La rapidez de operación y el modo prácticamente automático de obtener los resultados, hacen que el personal provisto de instrumental nucleónico pueda realizar el trabajo de dos y medio equipos que utilicen el método clásico (25). Lo que en el caso de obras no muy grandes equivale a decir que el personal queda libre gran parte de la jornada para otros controles: de hormigón, asfalto, etc. Y en las de extraordinario volumen la relación de rendimien-

tos también la consideramos válida, pues las ventajas del laboratorio móvil quedan ampliamente compensadas por las del procedimiento nucleónico en el caso de trabajos importantes, por ejemplo de carreteras, en los que hay que controlar múltiples tajos y entre ellos, seguramente algunos de obras de fábrica. Los terraplenes cercanos a éstas se construyen con tongadas delgadas, del orden de 15 cm. Si en el resto suponemos una tongada media de 40 cm., vemos que en los tajos de obras de fábrica hay que hacer cerca de tres veces más ensayos, lo que es, en la práctica, imposible por sistemas gravimétricos.

De los datos anteriores (26) y por sencillas operaciones aritméticas, se deduce que los ahorros máximo y mínimo serán:

$$A_1 \text{ mín.} = 9\,460 K - 38\,300,$$

$$A_1 \text{ máx.} = 11\,250 K - 38\,300.$$

En donde K es el porcentaje anual de utilización; hemos supuesto que $K = 100$ corresponde a 275 días. Este ahorro por reducción de personal se representa gráficamente en la figura 12.

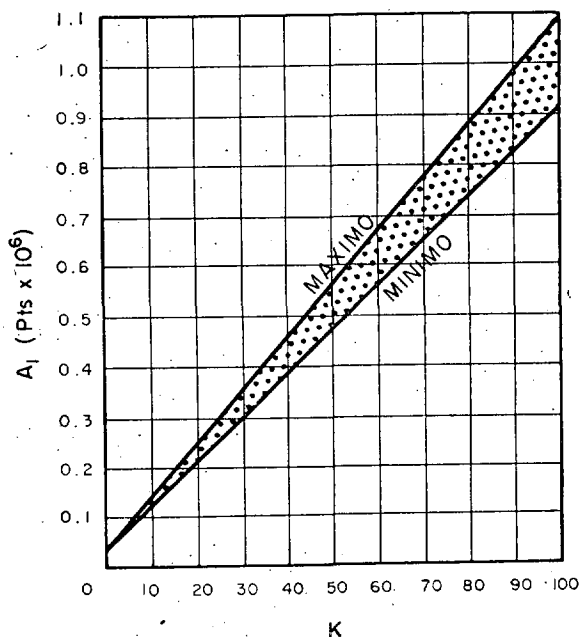


Figura 12.

Como ejemplo indicaremos que, según las fórmulas anteriores y únicamente por disminución en el coste de personal, si el equipo se

utiliza continuamente durante el año, se amortiza su valor en un período comprendido entre 4,2 y 5 meses. Si se emplea sólo la mitad de los días laborables, las cifras son 8,7 y 10,4 meses.

6.5. En las publicaciones que hemos podido consultar, sólo hemos encontrado una referencia a la magnitud del ahorro principal, obtenido por aumento en el rendimiento de las operaciones de compactación. Aparece en los resultados de la encuesta realizada en 1962-63 por la Agencia Internacional de Energía Atómica sobre las ventajas económicas derivadas del empleo de radioisótopos en la industria (27). Es la única vez en este libro que se trata de humedad y densidad de terraplenes y aparece en el informe presentado por España (28). Haciendo notar la ventaja de poder colocar otra capa inmediatamente sobre la recién compactada, sin tener que esperar todas las horas necesarias con los métodos clásicos, dice que es muy difícil hacer un cálculo de este ahorro, pero que lo estima entre el 5 y el 15 por 100 del coste total de la compactación. En la obra que estaban realizando este coste se elevaba a 20 000 000 de pesetas/año y el ahorro medio calculaban era de 2 000 000, o sea, el 10 por 100.

Este porcentaje de ahorro, entre el 5 y el 15 por 100 parece razonable, y así lo han considerado varios usuarios a los que hemos consultado. Intentaremos, sin embargo, a continuación, razonar esta afirmación empírica.

En el proyecto de autopista en que nos basamos, el precio del metro cúbico de terraplén se establece en 35 pesetas, que se descompone, aproximadamente, en la forma siguiente:

COMPONENTE DEL PRECIO	%
Maquinaria	57
Personal afecto a esta maquinaria.	19
Otro personal	10
Varios	14

El rendimiento del equipo es de 750 m.³/día. El coste de la maquinaria parada, durante ocho horas, 11 450 pesetas.

Supongamos entonces un caso límite. Con los medios antes descritos se construyen, en un día, 750 m.³ de terraplén y el día siguiente, en cambio, ninguno, por estar esperando los resultados del ensayo. Este segundo día cues-

ta la cifra citada por máquina parada; en cuanto al personal, sólo el no afecto a la maquinaria es aprovechable en otros tajos; tenemos así, por este último factor, un coste de $750 \times 35 \times 0,19 = 4\,990$ pesetas. Sumando las dos partidas llegamos a 16 440 pesetas, que añadidas a las $35 \times 750 = 26\,250$ del día en que se trabaja, nos da un coste total de 42 690 pesetas para 750 m.³. Como al trabajar de modo continuo el costo hubiera sido sólo de 26 250, el ahorro es de 16 440 pesetas, o sea, el 38,5 por 100.

Como es lógico, este caso límite no corresponde a la realidad, pues ningún constructor establecería un plan de obra tan desfavorable para sus intereses. Pero suponiendo una relación lineal entre la diferencia en costes y el tiempo parado esperando el resultado del ensayo, el intervalo de ahorro del 5 al 15 por 100 del precio del terraplén, a que antes nos hemos referido, corresponde a que en dos jornadas consecutivas de ocho horas, el procedimiento nucleónico sea capaz de eliminar un tiempo de parada comprendido entre 1,04 y 3,12 horas. Lo que parece no sólo razonable, sino incluso bastante inferior a la realidad.

Por ejemplo, en la obra de la que hemos tomado los costes y rendimientos citados en este apartado, el volumen de terraplén es de 606 000 m.³ y debe compactarse en 202 días hábiles. Con el precio unitario antes indicado, el ahorro por utilización del procedimiento nucleónico estaría comprendido entre 1 060 000 pesetas (5 por 100) y 3 180 000 (15 por 100).

6.6 Volviendo a repetir que se trata sólo de valores aproximados, podemos ya cifrar el ahorro total. Sumando el indicado en el apartado anterior el que tiene por origen la reducción de personal (ver 6.4), obtenemos:

$$A_{\min} = 9\,460 K + 0,05 P - 38\,300,$$

$$A_{\max} = 11\,250 K + 0,15 P - 38\,300.$$

Siendo P el importe de los terraplenes construidos durante un año.

Las dos fórmulas se representan en el nomograma de la figura 13.

6.7. Por parecidas consideraciones podría llegarse a una evaluación aproximada del ahorro en el caso de pavimentos asfálticos.

6.8. El que se logra por empleo de las cabezas de profundidad es, en cambio, muy difícil de cifrar; se trata — desde luego dentro del campo de la compactación — más bien de ins-

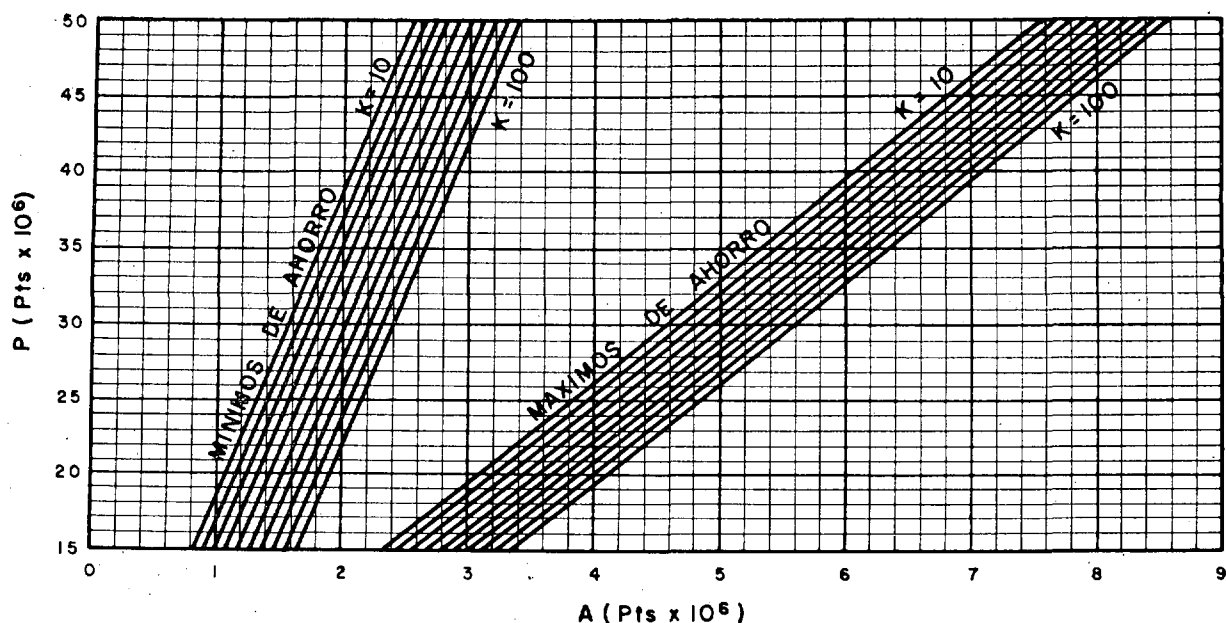


Figura 13.

trumentos de control a largo plazo; con la excepción del caso ya citado (nota 10) de capas de gran espesor, en el que el resultado económico sería sólo un poco inferior al obtenido con las cabezas de superficie.

7. OTRAS APLICACIONES

7.1. Finalizamos este estudio pasando revista a una serie de aplicaciones, distintas del control de compactación. La mayor parte de ellas aún no se practican en España.

7.2. Estudio, con cabezas de profundidad, de yacimientos de materiales. Técnica de marcado interés económico, tanto para el constructor como para la Administración. Ejemplo típico es la estimación de la calidad y cantidad de los componentes de zonas de préstamos en la construcción de carreteras, aeropuertos, canales o presas de tierra.

7.3. Con el mismo instrumental, control previo del terreno en que va a cimentarse una estructura. Por ejemplo, en presas pueden realizarse algunos sondeos nucleónicos en las laderas antes de la construcción y conservar los tubos. Después, si al recibir el terreno la carga de la estructura y del agua hubiera la menor indicación de peligro, se miden como mínimo dos ve-

ces por semana la densidad y humedad; parece que con este sistema podrían haberse evitado las consecuencias catastróficas de algunas roturas de presas.

En caso de fallo de las cimentaciones (de estructuras o pavimentos) atribuible al terreno subyacente, determinación de cambios en la capa freática o en la densidad. En muchos casos un solo sondeo por este método puede sustituir a muchos por el procedimiento clásico y, además, proporcionar información más exacta.

7.4. Medidas de calidad del hormigón. No tenemos sobre esta aplicación experiencia directa, pero hemos leído que es posible controlar, además de la densidad y humedad el curado y aireado, así como la eficacia y tiempo óptimo de utilización de los vibradores (29). Las cabezas de superficie permiten controlar la uniformidad del hormigón sin necesidad de tomar muestras; existe, sin embargo, la limitación de que el radio de la semiesfera de material medida disminuye con la densidad, y es, por tanto, bastante menor que en el caso de terraplenes. Los equipos de profundidad se han empleado en la cubierta de una central nuclear (Checoslovaquia), en el relleno de cajones de cimentación (Estados Unidos) y seguramente en otros muchos casos especiales.

7.5. Densidad de la nieve. Puede interesar

para la predicción del volumen a embalsar, en zonas de alta montaña.

Se han probado cabezas de profundidad, de retrodispersión y de transmisión, con resultados no del todo satisfactorios; creemos sería necesario modificar los modelos de serie (30). En cambio, en hielos profundos, como en el casquete ártico, se han utilizado normalmente en programas geofísicos.

7.6. Minería. En prospección geofísica de petróleo, carbón o criaderos metálicos se utilizan doce distintos métodos neutrónicos, entre ellos al que hemos hecho referencia en este artículo. Los aparatos con radiación gamma sirven principalmente para medir concentraciones y, por tanto, también para establecer las reservas

de una mina, cubicar depósitos industriales de carbón, etc.

En España conocemos una aplicación en minería del uranio (Junta de Energía Nuclear) y varias en prospección de petróleo; aunque en este caso el diseño de los equipos parte de los mismos principios básicos, pero es diferente (31).

7.7. Edafología. Campo muy importante y aún casi inédito en España (32). Las aplicaciones son, entre otras: estudios de balance hídrico, capacidad de acumulación de agua de los suelos, evapotranspiración, efecto de los cultivos sobre los perfiles de humedad de suelos, efecto de los abonos, estructura física y riego en el rendimiento de los cultivos, movimientos del agua y práctica del riego (33).

NOTAS

(1) La tendencia actual a que los ensayos sean en lo posible no destructivos, es otro factor, aunque secundario, importante, que debe tenerse en cuenta.

(2) Aunque los equipos a que se hace referencia en este artículo sean, en número, los más utilizados en nuestro país, existen otras y muy importantes aplicaciones de los radioisótopos a la ingeniería civil.

Entre ellas:

A) Estudio del desplazamiento de arenas en mares y ríos y aforo de estos últimos y de canales. Medida de la concentración de sedimentos y de la velocidad y dirección de corrientes extremadamente lentas. Localización de fugas de agua. Control del desgaste y dosificación del ligante en revestimientos asfálticos.

En todos estos casos se utilizan trazadores radiactivos.

B) Medida del espesor del pavimento de una carretera (incluso durante un período de años) sembrando bolitas radiactivas sobre la base.

C) Determinación de la edad de aguas de procedencia subterránea, utilizando un equipo de centelleo líquido para conocer el contenido de tritio.

D) Medida del peso de materiales en una cinta transportadora y del nivel de líquidos en depósitos. Controles de densidad y humedad de materiales ensilados. Determinación de la densidad de líquidos o semilíquidos que pasan por tuberías; y, como caso particular, añadiendo un contador de flujo magnético, del peso extraído por una draga de succión. Medida de espesores. Gammagrafía, tanto de materiales metálicos como de hormigón armado y pretensado.

Estas técnicas permiten economías importantes en procesos industriales: fábricas de cemento, centrales térmicas, estaciones de depuración de aguas residuales, etc.

Las aplicaciones enumeradas en los apartados B)

y D) — así como las que son objeto del presente artículo — no requieren más que la adquisición de equipos producidos en serie y además los resultados se registran automáticamente, o si no, pueden ser interpretados por personal no muy especializado (salvo en algunos trabajos de gammagrafía). En ciertos casos las unidades nucleónicas se acoplan a un servomecanismo que corrige automáticamente el proceso de producción.

Para una enumeración más detallada de estos métodos junto con otros aplicables a distintas ramas de la industria, pueden consultarse los libros siguientes:

L. G. Erwall, H. G. Forsberg y K. Ljunggren: *Industrial Isotope Techniques*. Munksgaard, Copenhagen, 1964.

Radioisotope Instruments in Industry and Geophysics, Viena, 1966. Actas del simposio celebrado en Varsovia en 1965, por la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA).

Y en español el artículo de M. del Val "Los isótopos en el control industrial", *Energía Nuclear*, julio-agosto 1967. También E. Baonza: "Los radioisótopos y sus aplicaciones a las obras públicas". Publicación IR-1 del Gabinete de Aplicaciones Nucleares a las Obras Públicas. Madrid, 1964.

(3) Esta exploración en profundidad, aplicada a la prospección de petróleo, es el antecedente de los métodos que describimos. Comenzó hacia 1940 y, por tanto, utilizando fuentes radiactivas naturales. Tal especialidad ha tenido un desarrollo importante, especialmente en los Estados Unidos y en la Unión Soviética.

(4) Este instrumento puede sustituirse por un integrador de impulsos en el que una aguja indica el número de éstos por segundo; la constante de tiempo puede variarse a voluntad. Ello es útil para varias aplicaciones. Pero en la que fundamentalmente estudiamos en este artículo, cuando se trata de equipos portátiles, sería necesario acoplar un registrador para obtener una indicación de precisión razonable, y ello daría lugar a un conjunto de transporte incómodo. Puede, en cambio, tener

interés en obras de gran volumen como equipo de reserva para caso de averías; en efecto, el integrador es más barato que la escala.

(5) Las dos obras han sido descritas en la REVISTA DE OBRAS PUBLICAS:

Luis Fedriani: "Obras de tierra del salto de Castrejón", agosto 1967.

José Luis Escario: "Tramo experimental de ensayo en la carretera R.II". Noviembre 1961.

(6) "Determinación de la humedad y densidad de un suelo por isótopos radiactivos". Marzo 1962. Mismo texto en la publicación 13 del Laboratorio del Transporte (1963).

(7) La diferencia entre el número de cabezas y el de equipos es debida a la tendencia, a la que volveremos a referirnos más tarde, a combinar en un solo instrumento los canales de densidad y humedad. Y también a que a veces se usa una sola escala con distintos instrumentos.

(8) La instrumentación a que nos referimos en este artículo está basada en el fenómeno de retrodispersión por efecto Compton, cuya probabilidad es proporcional a la densidad; ello porque son de este sistema prácticamente la totalidad de los equipos existentes en España. En estas cabezas la fuente y el detector están separados por un fuerte blindaje para impedir que la radiación llegue a este último de modo directo. Pero existe otro sistema, por transmisión, en el que la fuente gamma se hincan en el terreno y la radiación atraviesa éste, para llegar al detector.

En cuanto a la determinación de la humedad, el método empleado es siempre el mismo; una fuente de neutrones rápidos y un detector de neutrones lentos: el flujo de estos últimos está determinado, fundamentalmente, por el contenido de hidrógeno del material.

Para información sobre la base teórica de estos sistemas (parte todavía en curso de investigación) puede consultarse:

P. L. Olgaard: *Use of Theoretical Models for Neutron Moisture Gauge Calibration and Design*.

J. F. Cameron: *Nucleonic Soil Density and Moisture Gauges*.

Ambos trabajos están incluidos en el libro *Nuclear Techniques and Mineral Resources*. Viena, 1969. Actas del simposio celebrado en Buenos Aires en 1968 por la IAEA.

(9) O sea, que la radiación gamma reflejada y medida por el detector está relacionada con la densidad del pavimento. Y que, dentro del intervalo de valores útiles para el control de ésta, la relación es lineal; esta linealidad es la base de todos los procedimientos nucleónicos de medida de densidad y humedad (en la práctica ingenieril). Haremos notar que, en realidad, la relación antes citada es entre las cuentas por minuto que da la escala y la densidad de electrones. Pero esta última es, a su vez, directamente proporcional a la densidad del material; por ejemplo, una mezcla asfáltica está compuesta de elementos químicos de peso atómico 56 como máximo. En este intervalo el peso atómico es muy aproximadamente igual al doble del número de electrones orbitales.

(10) No hace mucho tiempo se ha encontrado una nueva aplicación a estos equipos en la construcción de carreteras y obras hidráulicas. El espesor de las capas compactadas ha tendido a elevarse; llega a veces a valores del orden de un metro, muy superiores a los que mide una cabeza nucleónica de superficie. La dificultad puede salvarse estableciendo una relación empírica entre valores obtenidos a los dos niveles. Pero a veces se prefiere usar una cabeza de profundidad, atravesando la

capa para hincar el tubo con una barrena de mano (cómo puede verse en la figura 4) o bien con una perforadora portátil pequeña, que puede ser alimentada por la batería del automóvil. Este método exige algo más tiempo para cada determinación; pero la diferencia con el retraso producido por los sistemas gravimétricos es tan grande que ello influye poco en el ahorro obtenido, como se indicará más adelante.

(11) Las dos figuras proceden del artículo de Jack Stephen, *Evaluation of Nuclear and Others Device Methods for Obtaining Bituminous Paving Densities. Sixth annual paving conference. Connecticut Bituminous Concrete Producers Association*, 1964.

(12) Nos referimos a un modelo de serie. El Laboratorio del Transporte había fabricado anteriormente un prototipo experimental.

(13) Para este apartado, aparte de nuestra experiencia, exclusivamente práctica, se han utilizado las publicaciones del *Highway Research Board* que aparecen a continuación. Como es lógico, sólo podemos resumir sus conclusiones; su nivel científico es muy alto y merecen ser estudiadas en su totalidad:

R. P. Gardner y K. F. Roberts: *Density and Moisture Content Measurements by Nuclear Methods. National Cooperative Highway Research Program. Report 43*. Washington D.C., 1967.

Y los tres artículos comprendidos en el número 290 del *Highway Research Record*. Washington D.C., 1969.

Robin P. Gardner: *Minimizing Nuclear Soil Density and Moisture Content Gage Errors*.

T. G. Williamson: *Embankment Compaction Variability-Control Techniques and Statistical Implications*.

James L. Jorgenson: *Measuring the Variability of Compacted Embankments*.

(14) *The Effects of Type of Material on Nuclear Density Measurements. Highway Research Record*, número 66, 1963.

(15) *Op. cit.*, págs. 11-15 y 33-35.

(16) Gardner y Roberts: *Op. cit.*, págs. 20-29 y 35-37.

(17) Salvo que en las de densidad no puede utilizarse el método *air gap*.

(18) Como sistema de calibración puede seguirse el descrito en el trabajo de E. W. Le Fevre y Phillip G. Manke, *A Tentative Calibration Procedure for Nuclear Depth Moisture/Density Gages. Highway Research Record*, núm. 248, 1968.

(19) Jack Stephen: *Op. cit.*

(20) Olegario Llamazares: "Evolución de la técnica de carreteras. Tendencias futuras". Enero 1970.

(21) *Radioisotopes, Bulletin de liaison des laboratoires routiers. Ponts et Chaussées*, pág. 24. Paris, 1966. De este libro se ha tomado también la cita de M. Duquesne que encabeza nuestro trabajo.

(22) Gardner y Roberts: *Op. cit.*, págs. 17-19.

Dale E. Peterson: *Field Determination of In-place Soil or Asphalt Density by Means of the Road Logger. Utah State Department of Highways. Materials and Tests Division*. S. f.

(23) En realidad, el desgaste de estos instrumentos electrónicos, bien protegidos y sin piezas móviles, es mínimo. Algunos de los adquiridos en 1960 están en buen orden de funcionamiento.

(24) La media del servicio electrónico requerido por un número representativo de equipos durante el pasado

año ha sido inferior a 7 000 pesetas. Hemos incrementado, sin embargo, esta cifra, para tener en cuenta las posibles necesidades de los instrumentos muy usados, en un próximo futuro.

(25) El número de ensayos que es conveniente realizar varía mucho con las características de la obra. Como indicación, en la construcción de una carretera de tipo normal, puede ser del orden de uno cada 250 m.³ de terraplén; de ellos, la mitad en puntos dudosos donde pueda pensarse en la necesidad de corregir la compactación. En cambio, en el núcleo impermeable de una presa de materiales sueltos puede hacer falta un ensayo cada 60 metros cúbicos (M. Sendín: "Presa de Portodemouros", REVISTA DE OBRAS PUBLICAS, agosto 1967).

(26) No hemos tenido en cuenta la diferencia en el coste horario de las furgonetas en la segunda hipótesis de control gravimétrico.

(27) *Industrial Radioisotope Economics*. IAEA, página 175, Viena, 1965.

(28) Lo redactó la Sección de Isótopos de la Junta de Energía Nuclear. Según se nos ha informado, el usuario que facilitó los datos fue el Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo. Hemos intentado localizar al técnico a cargo entonces de este trabajo; pero, por el tiempo transcurrido, ello no ha sido posible.

(29) J. F. Cameron: *Op. cit.*, pág. 81.

(30) Lloyd W. Gay: *Measuring Snowpack Profiles with Radioactive Sources*. US Forest Service. 1964.

L. Stowhas Borgetti: "Uso de radioisótopos en la me-

dición de la densidad de nieve". Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, 1968.

(31) Para mayor información pueden consultarse los dos trabajos siguientes, incluidos en el libro *Nuclear Techniques and Mineral Resources*, citado en la nota 8.

J. A. Czubek: *Neutron Methods in Geophysics*.

D. K. Donhoffer: *Determination of Ore Concentration in Exploration Holes by the Gamma-Ray Backscattering Technique*.

(32) R. E. Phillips, C. R. Jensen y D. Kirkham: *Use of Radiation Equipments for Plow-Layer Density and Moisture*. Soil Science, vol. 89, núm. 1, enero 1960.

H. Diehl y otros: *Observations on the Utilization of the Scattering of Gamma-Rays and Neutrons to investigate Underground Aquifers*. Radioisotope Instruments in Industry and Geophysics. Viena, 1966.

Compte rendu du séminaire sur l'emploi de l'humidité a neutrons en agronomie et en hydrogéologie. Commissariat a l'Energie Atomique. Département de Biologie. Service de Radioagronomie. 1967.

(33) Las opiniones que aparecen en este artículo son de la exclusiva responsabilidad de su autor. La mayor parte proceden de la experiencia continuada durante diez años en esta especialidad.

Queremos expresar nuestro agradecimiento a los que, durante su redacción, hemos consultado. Entre ellos: J. J. Díaz Navarro (INTECSA), A. Giner (Dragados y Construcciones), E. Paglieri (Constructora Internacional), F. Pérez Gil (Jefatura de Carreteras de Sevilla), M. del Val (Junta de Energía Nuclear), L. Valero (Laboratorio del Transporte).