

medidor ultrasónico portátil

J. M. TOBIO, Dr. en Química Industrial

sinopsis Como etapa final de una serie de experiencias sobre determinación de la «velocidad de propagación» de ondas ultrasónicas en el hormigón, se describe un nuevo aparato miniaturizado, a base de transistores, que puede servir para la auscultación en obra de espesores no superiores a 2 metros.

La frecuencia de recurrencia del equipo es de 100 Hz y la frecuencia de resonancia propia de los captadores o sondas se encuentra en la zona de los 40.000 Hz. Sus tres campos de medida abarcan los márgenes 250, 625 y 1.000 μ s, todos ellos fácilmente deducibles a partir de las indicaciones de un simple microamperímetro.

467-3

Las características más salientes del nuevo aparato son su poco peso y volumen y la independencia de las redes eléctricas normales.

1 Introducción

En un trabajo anterior* se consideraba la conveniencia de *transistorizar* los aparatos de auscultación ultrasónica destinados a medidas en el hormigón. Desde entonces, los laboratorios de Metrología del I.E.T.c.c. han construido dos aparatos, uno de ellos fundado en un sistema digital y con un peso total de 52 kg, destinado principalmente a experiencias de laboratorio.

Más tarde** se puso a punto otro más clásico, con tubo de rayos catódicos como instrumento indicador y un volumen de $44 \times 41 \times 25$ cm³ y un peso de 27 kg, lo que le hacía más asequible para las medidas en obra. Sin embargo, su elevado consumo (182 W) y su dependencia de la red eléctrica normal constituían, aparte de su peso, sendas limitaciones para el empleo in situ.

La experiencia adquirida en el proyecto y construcción de estos equipos hizo posible abordar la verdadera miniaturización de esta clase de aparatos, meta que nos habíamos trazado hace más de cinco años.

En el trabajo presente se da cuenta del proyecto, ejecución y manejo de un equipo que, por sus especiales características, colma por el momento nuestras aspiraciones, por entender que es el más pequeño y cómodo de cuantos se hayan construido hasta la fecha en nuestro país y en el extranjero.

Su volumen, 2.940 cm³, su peso, 3,5 kg, y su total independencia de cualquier fuente de suministro externa, le hacen ideal para el empleo en obra, especialmente en estructuras modernas de edificación que, por su elevado número de plantas y elementos de hormigón (vigas y soportes) en cada planta, hacen prácticamente inútil —o al menos de manejo incómodo— cualquier instrumento cuyo peso y dificultad de manejo sean superiores a los del nunca bien ponderado martillo Schmidt.

2 Descripción general

Para llevar a buen fin las ideas apuntadas en 1, fue necesaria una larga experimentación de laboratorio, unida al aprovechamiento de las técnicas más modernas en el campo de los elementos de estado sólido.

* TOBIO, J. M.: «Ensayos no destructivos en el hormigón». *Ion*, núm. 225, abril 1960.

** TOBIO, J. M.: «El aparato ultrasónico del I.E.T.c.c.». *INFORMES DE LA CONSTRUCCIÓN*, núm. 175, pág. 115, noviembre 1965.



Fig. 1. Vista exterior del aparato.

de manifiesto por Ribchester ** y otros. A este tipo pertenecen la mayoría de los aparatos comerciales en uso.

El parámetro más importante en los aparatos de impulsos es el tiempo tomado por la onda ultrasónica para viajar a través de un determinado espesor de hormigón. La deducción de la variable que se busca en estas medidas, la velocidad de propagación, es inmediata.

El problema se reduce, por tanto a la medida de pequeños intervalos de tiempo —del orden de los microsegundos— con la precisión suficiente. Esto solamente puede hacerse por medios electrónicos.

Para dicho fin, el aparato que estamos describiendo lleva un total de 23 transistores de germanio o silicio, 7 diodos, algunos de ellos de silicio y Zener, y un número muy elevado de resistencias, condensadores, transformadores y elementos auxiliares.

El sistema constructivo seguido fue el de unidades separadas, lo cual simplifica considerablemente el montaje y cualquier reparación que sea precisa en el futuro.

El principio general de funcionamiento puede comprenderse a la vista del esquema de bloques de la figura 2.

Un multivibrador astable produce impulsos rectangulares de una frecuencia de 100 Hz. Estos impulsos pasan al seguidor de emisor, donde se convierten en impulsos positivos de unos 5 V de amplitud de cresta, que pasan a excitar la etapa tiristor, que es un rectificador con-

* Material suministrado por Philips, Francia.

** RIBCHESTER, E.: *Nature*, 165, 970, 1950.

Se ha hecho amplio uso de los elementos usuales en las técnicas lógicas: multivibradores, puertas, básculas biestables, diferenciadores, integradores, circuitos Schmitt, tiristores, diodos Zener, etcétera, lo cual, unido al empleo de circuitos impresos y encapsulados, dio lugar al aparato que presentamos y cuyo aspecto final, baterías incluidas, puede verse en la figura 1.

Como novedad en esta clase de equipos puede citarse, además, el empleo de transductor de Ferrocube 7A2* para la sonda-emisor y de elemento de titanato de bario clásico para la sonda-receptor.

La energía ultrasónica puede introducirse como excitación elástica en los sólidos, bien como ondas continuas o sostenidas, o como impulsos recurrentes o *paquetes de ondas* (impulsos de energía).

El aparato en cuestión pertenece a este último tipo, cuyas ventajas de todo orden han sido puestas

trolado de silicio. En esta etapa se carga un condensador hasta la tensión de 250 V, que una vez cada 1/100 de segundo se descarga bruscamente sobre el transductor-emisor.

En él se produce una vibración amortiguada con frecuencia propia de 41.000 Hz que, convertida en onda elástica, penetra en el hormigón. Una pequeña fracción de este impulso pasa a la etapa *control* para convertirse en un breve impulso positivo que alimenta la báscula binaria.

La onda elástica, una vez atravesada la masa de hormigón, aparece sobre el transductor-receptor donde, gracias al cristal de titanato de bario, se convierte en un impulso eléctrico de sólo unos pocos milivoltios.

Esta tensión es insuficiente para excitar la báscula binaria —verdadero cerebro del aparato— por lo que debe pasar, a través de un atenuador variable desde el exterior, a un amplificador de alta frecuencia de tres etapas, sintonizado a 41 kHz.

La onda amplificada pasa a un separador de dos etapas y luego a un circuito de disparo Schmitt, que produce un impulso de ancho y altura constantes que, debidamente diferenciado en el separador, se introduce en la báscula binaria o circuito Eccles-Jordan.

Esta es un multivibrador biestable de alta velocidad, capaz de discriminar señales separadas entre sí sólo unos pocos microsegundos. La báscula permanece en un estado estable hasta que la etapa *control* envía otra señal que la hace bascular al otro estado.

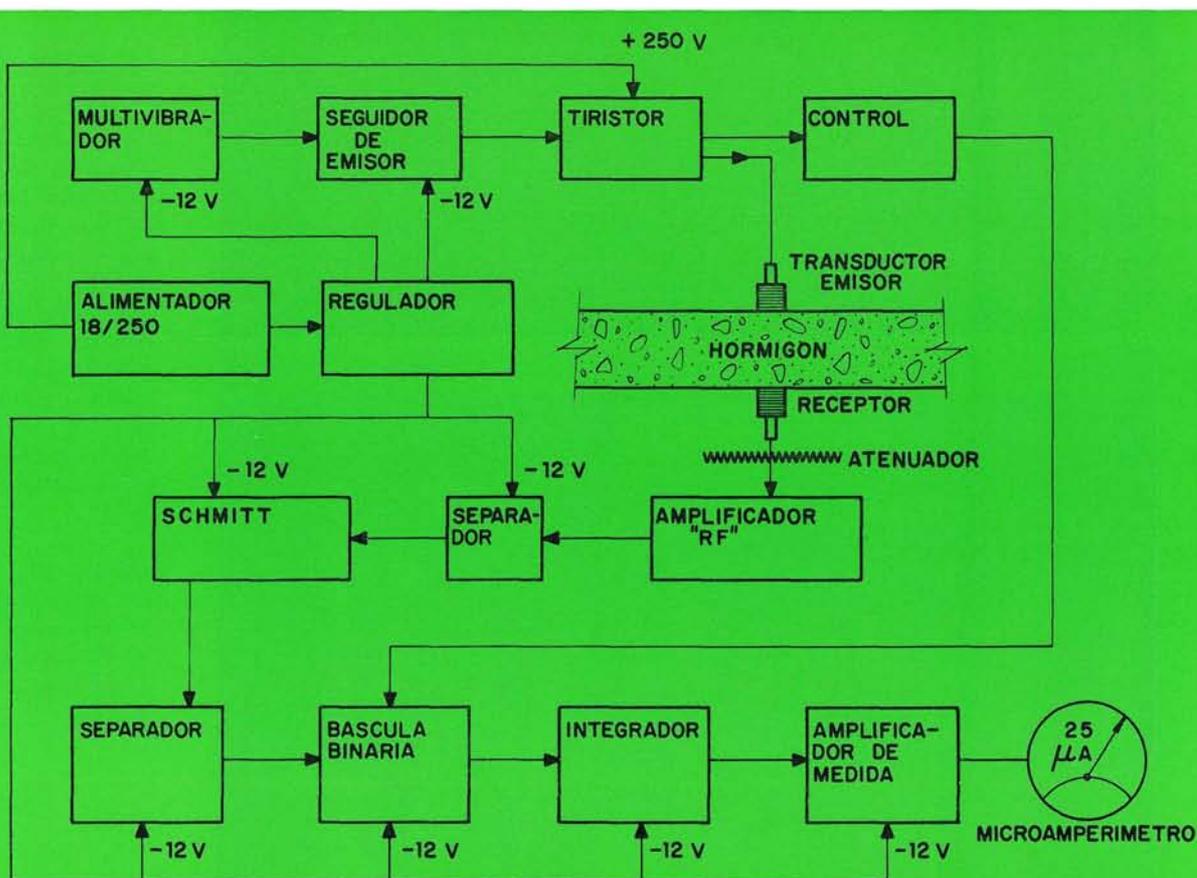


Fig. 2. Esquema de bloques.

El tiempo transcurrido entre las dos señales es, evidentemente, el que ha tardado la onda en atravesar el hormigón. Un circuito integrador permite convertir este tiempo en señal eléctrica proporcional al mismo que, convenientemente amplificada, pasa a un microamperímetro de medida común.

La alimentación de todas etapas, excepto el tiristor, se hace de una batería de pilas secas de 18 V que, una vez regulada por un circuito de cuatro etapas, se convierte en 12 V con polaridad negativa. Estos 12 V sirven a las diferentes etapas del equipo.

Los 250 V con polaridad positiva que cargan el condensador incluido en la etapa tiristor, se obtienen de la misma fuente, gracias a un convertidor continua-continua con transformador de impulsos, transistor de potencia y circuitos de rectificación y filtro.

impulsos, transistor de potencia y circuitos de rectificación y filtro.

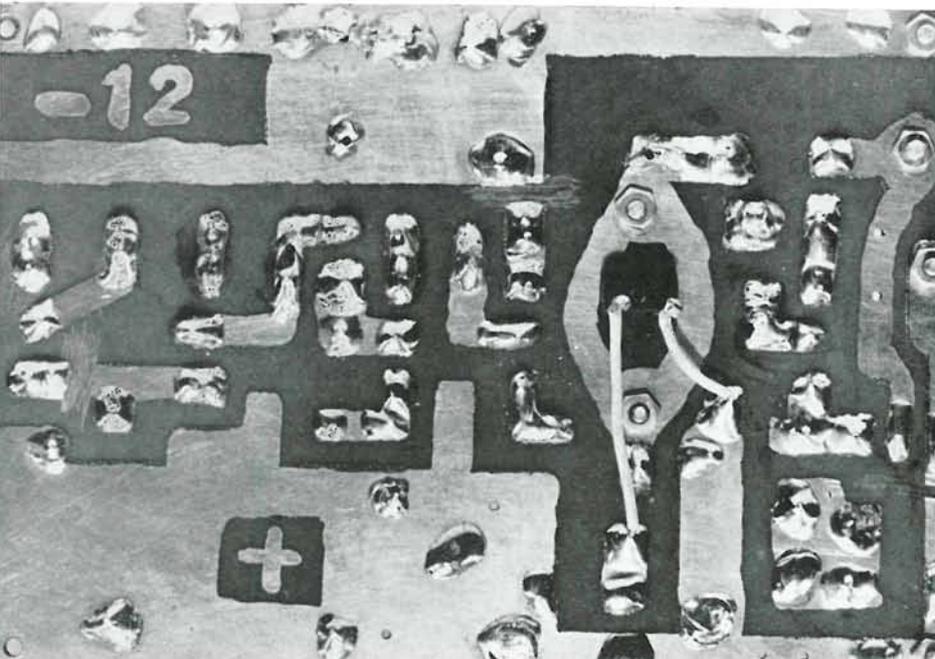
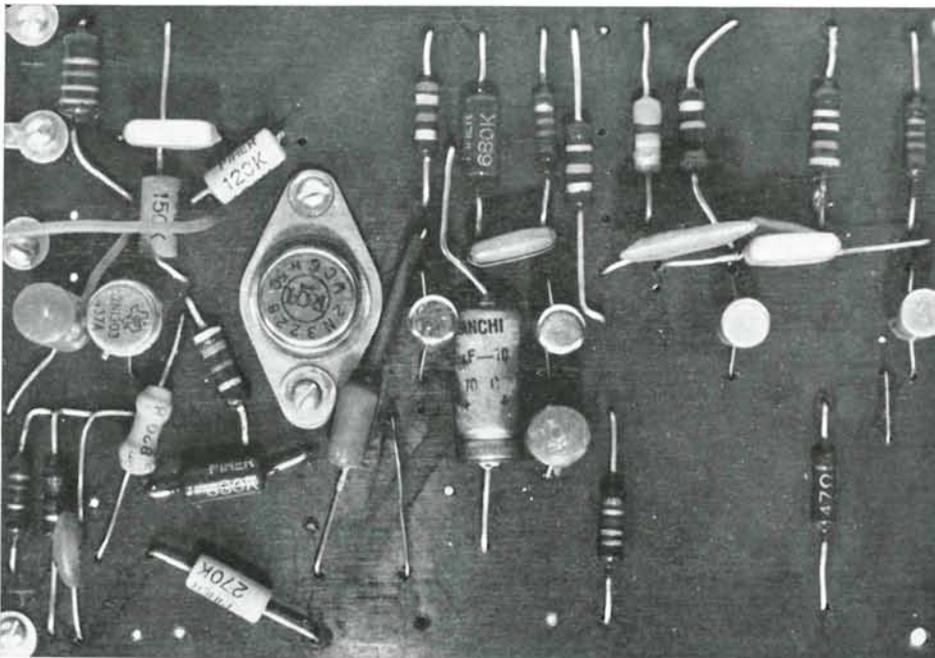
3 Detalles constructivos

3.1. Emisor

Las etapas multivibrador, seguidor de emisor y emisor, así como el control, van todas en la misma placa impresa de $12 \times 8,5$ cm, que contiene en total 5 transistores y un rectificador controlado de silicio. Todo ello puede verse en la figura 3.

El consumo total de esta parte del equipo es de 14 mA a 12 V y 1,2 mA a 250 voltios.

Fig. 3. a) Conjunto emisor; b) Conexiones.



a
b

Fig. 4. Formas de onda: emisor.

La secuencia de las formas de onda en esta etapa es tal como la indicada en la figura 4.

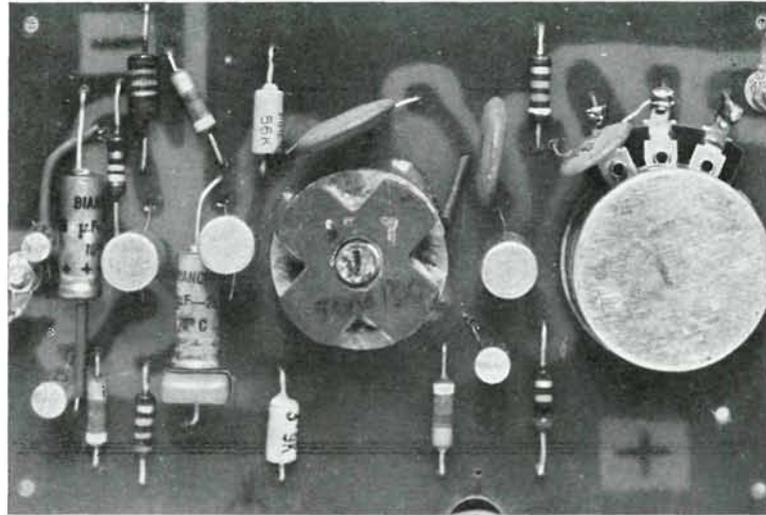
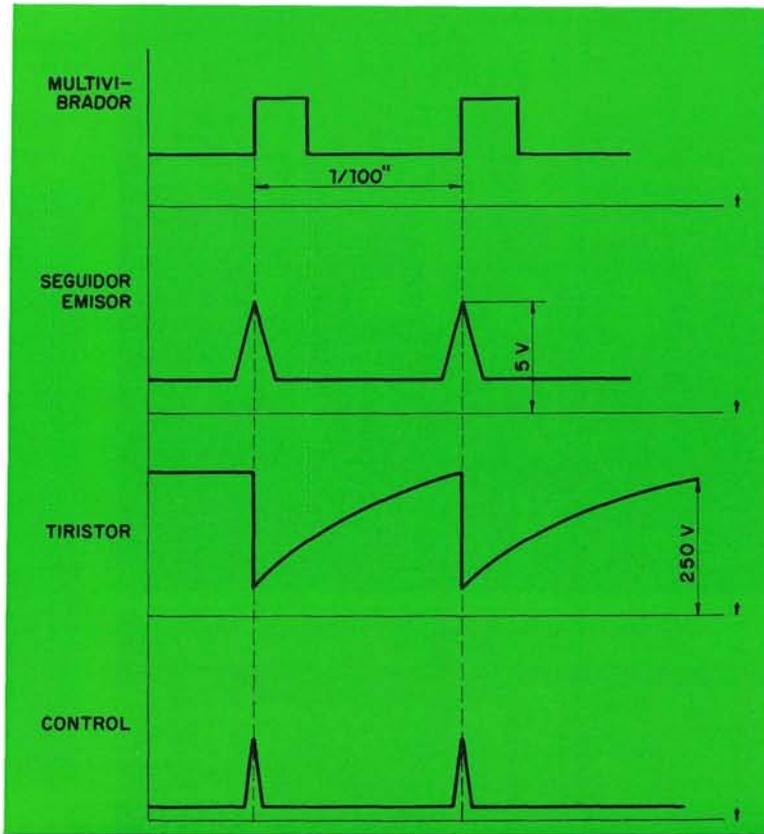
3.2. Amplificador de RF

Es un amplificador bastante clásico, de tres etapas, con atenuador de entrada y circuito sintonizado con pot-Ferroxcube en el primer colector.

La figura 5 muestra la placa impresa que contiene esta parte del equipo, cuyas dimensiones son 12×8 cm. El consumo de las tres etapas es de 5,5 mA a 12 V y la forma de las ondas a la entrada y salida puede verse en la figura 6.

3.3. Etapas complementarias del receptor

Las etapas de separación, detección y disparador de Schmitt, van incluidas en la placa impresa de la figura 7, que contiene, además, los circuitos de báscula e integración. Hay un total de 7 transistores y 5 diodos, todos ellos visibles en la figura 7. El consumo total es



a

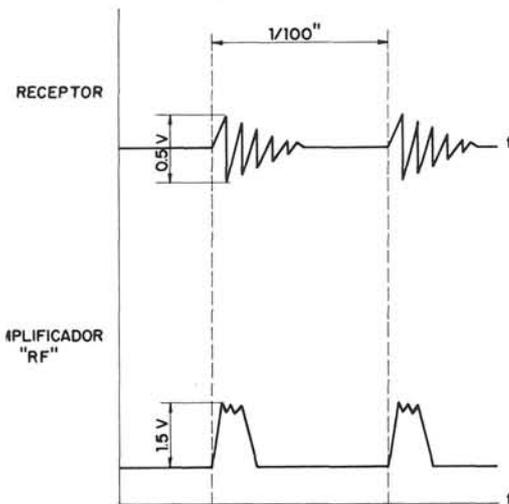
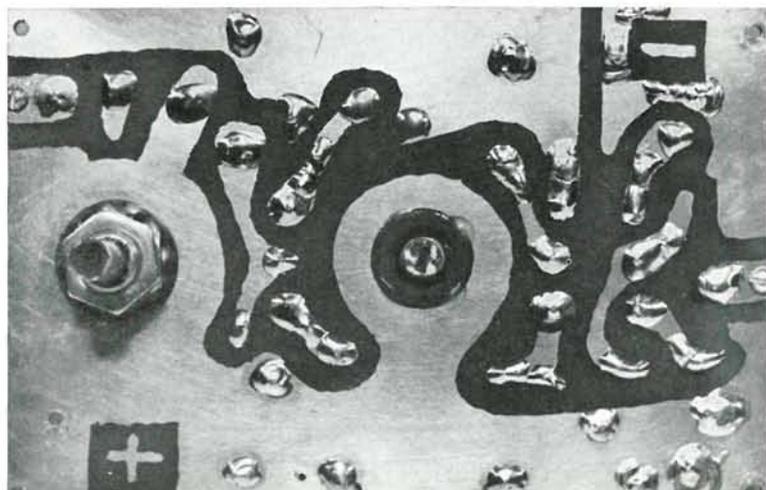
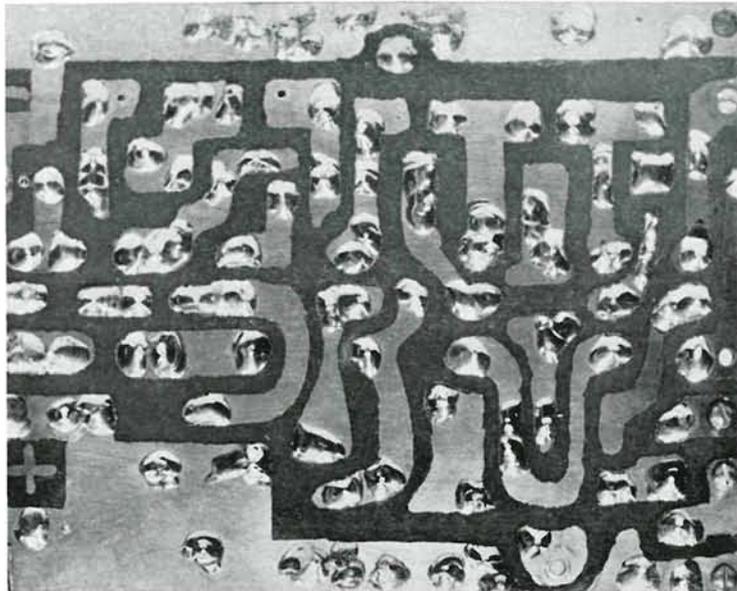
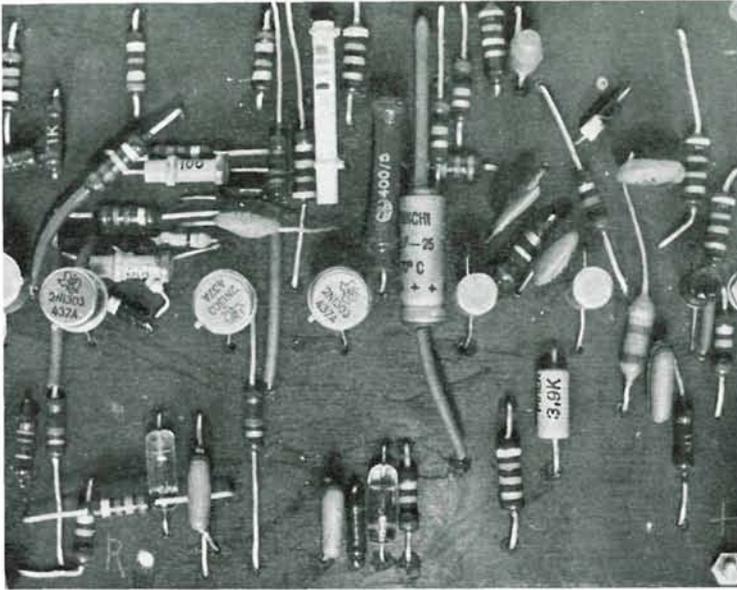


Fig. 6. Formas de onda: receptor.

Fig. 5. a) Amplificador de RF con atenuador; b) Conexiones.



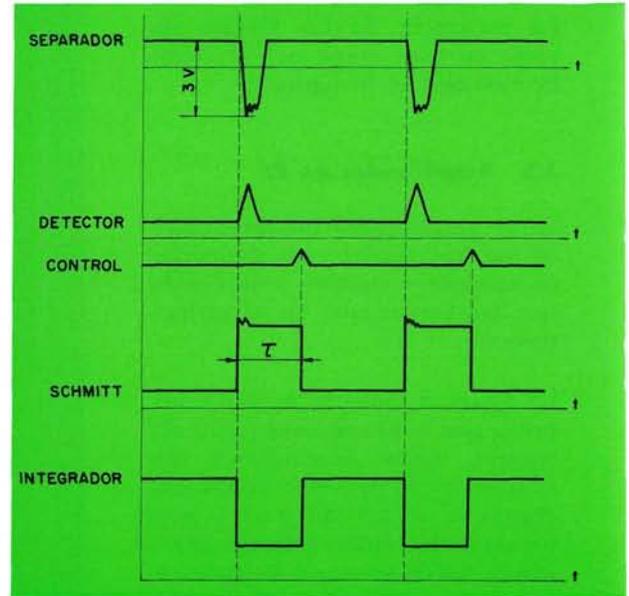
b



a

Fig. 7. a) Etapas complementarias; b) Conexiones.

Fig. 8. Formas de onda: medida.



de 14 mA a 12 V. Las dimensiones son 12×9 centímetros.

Las formas de onda en los diferentes pasos pueden verse en la figura 8. Como puede apreciarse, a la salida de la báscula aparece una onda cuadrada, cuyo ancho es proporcional al tiempo de propagación.

Dado que los tiempos son muy pequeños respecto al período de $1/100$ de segundo entre cada dos ondas, el integrador de medida debe ser capaz de discriminar muy pequeños anchos de onda en intervalos mucho mayores.

Por ello se hace preciso utilizar un amplificador previo, de corriente continua, entre el integrador y el aparato de medida propiamente dicho.

3.4. Amplificador de medida

Se trata de un amplificador de corriente continua clásico, a emisor común, simétrico y con una ganancia aproximada de 10. Su circuito impreso va en una placa de $7,5 \times 4,5$ cm y todo él encapsulado en resina epoxi, tipo Araldita, para asegurar su estabilidad.

Además, los dos transistores que contiene van en un pozo de calor común para garantizar su igualdad térmica. El aspecto de esta unidad puede verse en la figura 9. Su consumo es de 3,6 mA.

b

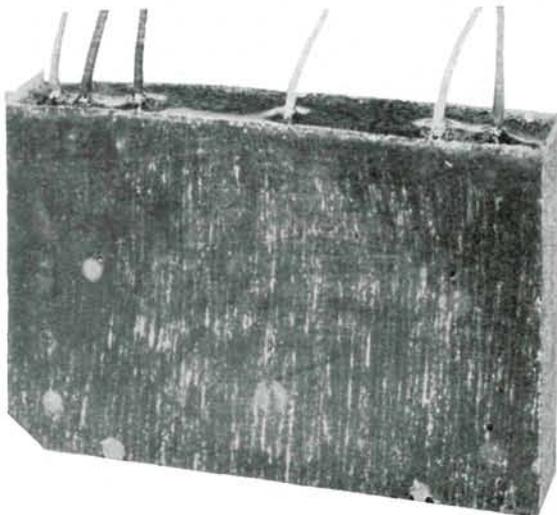


Fig. 9. Amplificador de medida (encapsulado).

3.5. Fuente de 250 V

Para obtener un impulso de onda a 41 kHz, de intensidad suficiente para atravesar un metro o más de hormigón, se precisa cargar un condensador de 0,01 microfaradios a unos 250 V. Esto impone un problema, pues la alimentación con baterías no se presta a tensiones tan altas.

La cuestión fue resuelta con un convertor CC/CC a base de un transformador de impulsos con núcleo de Hypercil, un transistor de potencia y los correspondientes rectificadores y filtros.

Se obtienen así en el secundario 250 V y 1,2 mA con un rendimiento en la conversión de 75 por 100. El consumo en baja tensión es de 320 mA. La estabilidad de este convertor estático es muy buena y su funcionamiento seguro. El aspecto del alimentador, en su placa de $8 \times 5,5$ cm, puede verse en la figura 10.

3.6. Regulador de tensión

Aun cuando el funcionamiento con pilas puede hacer que parezca superfluo el empleo de un regulador, la experiencia muestra que la constancia de tensión de las baterías secas ordinarias es muy deficiente. Experimentan, en efecto, una caída progresiva desde el momento mismo de su puesta en servicio, intolerable en un equipo de precisión de esta clase.

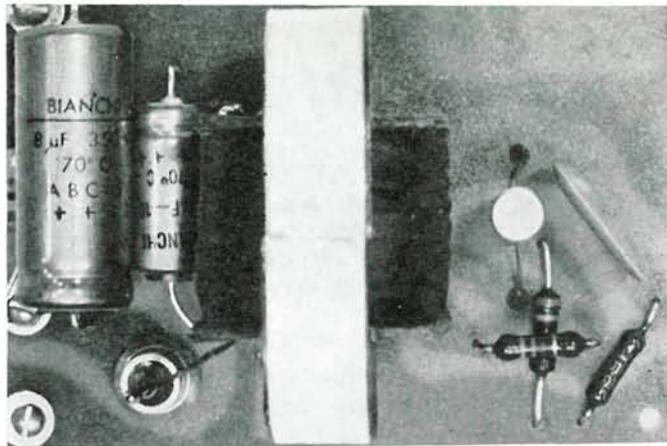
Se incluyó, por ello, un regulador a estado sólido, bastante elaborado, que contiene tres transistores PNP, uno NPN y un diodo Zener de silicio a 6,8 V. La tensión de salida de esta unidad se mantiene prácticamente constante ($\Delta E = \pm 0,1\%$) para tensiones de alimentación de 13 a 20 V y cargas desde cero a la máxima.

Con ello queda asegurada la alimentación a 12 V, aun cuando las pilas puedan pasar de 19,5 V (cuando nuevas) a poco más de 12 V (en el límite de su capacidad útil).

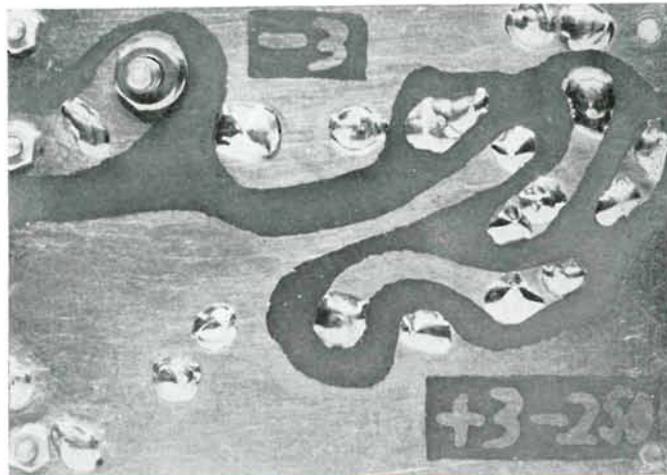
Esta unidad ocupa una placa de 10×7 centímetros y su aspecto puede verse en la figura 11.

Fig. 10. a) Generador de alta tensión; b) Conexiones.

Fig. 11. a) Regulador de tensión; b) Conexiones.



a



b



a



b

3.7. Aparato de medida y circuitos auxiliares

Las seis sub-unidades descritas anteriormente van eléctricamente unidas mediante un sistema de conmutación y ajuste que no precisa comentario. Se han establecido tres márgenes de medida, 0 - 250 μ s, 0 - 500 μ s y 0 - 1.000 μ s, suficientes para el trabajo con espesores normales de hormigón.

En efecto, si consideramos que los tiempos de propagación para un hormigón de buena calidad suelen ser de 250 μ s por metro, el último margen señalado permitiría trabajar hasta con 4 m de espesor.

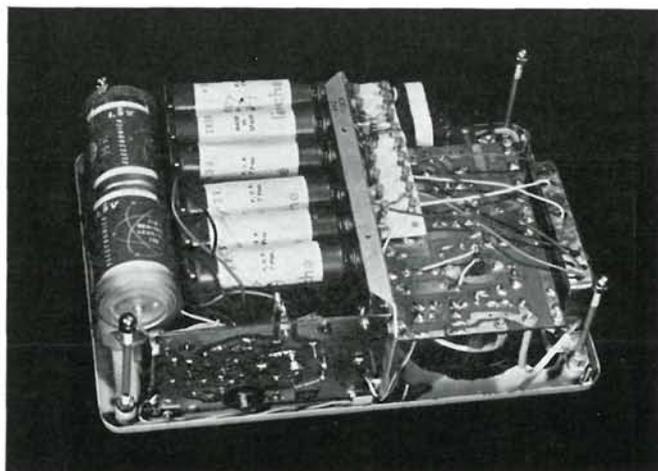
Para hormigones de calidad deficiente, con grietas, coqueras, fisuras, etc., estos tiempos pueden duplicarse, de tal modo que el margen más pequeño, 0 - 250 μ s, serviría para auscultar espesores de 50 cm, muy normales en elementos de estructuras de edificación.

El aparato de medida propiamente dicho es un microamperímetro comercial de alcance 0 - 25 microamperios, con escala de espejo de unos 10 cm y 2.116 ohmios de resistencia interna.

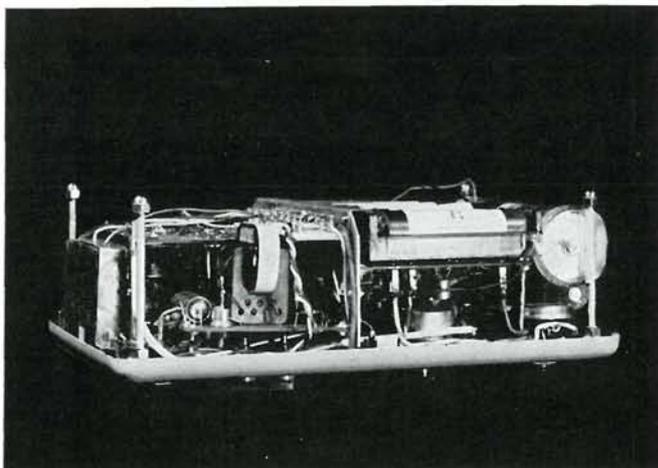
Dada la sensibilidad del aparato, se ha previsto un dispositivo de protección para el mismo,

que evita su posible deterioro. Este dispositivo queda desbloqueado durante las operaciones de medida. También lleva un circuito de conmutación que permite utilizar el aparato para controlar periódicamente el estado de las pilas.

La figura 12 muestra el aparato terminado, con todas sus unidades, y en ella puede apreciarse el sistema seguido para el anclaje de las diferentes partes del circuito.



a



b

4 Sondas

Las sondas o detectores empleados con este aparato son diferentes para el emisor y el receptor. La sonda-emisor es un núcleo de Ferroxcube 7A2, formado por una ferrita de Ni, Cu, Co y Fe*.

* Documentación cedida por COPR-IM, París, Hoja U.2101, París, 1961.

Fig. 12. a) Montaje de las unidades, incluso pilas; b) Vista lateral.

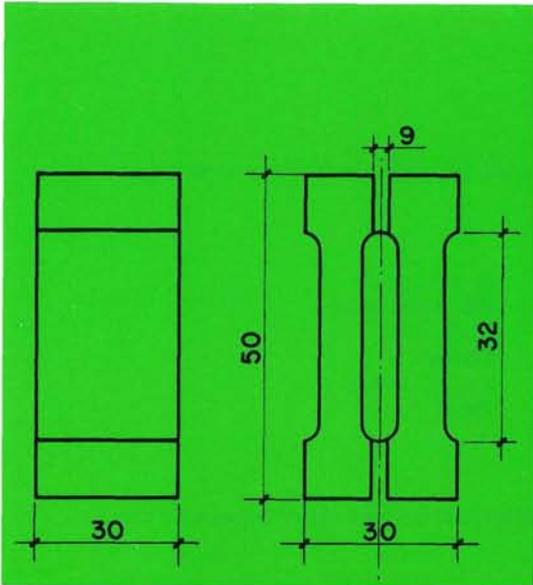


Fig. 13. Núcleo Ferrocube.

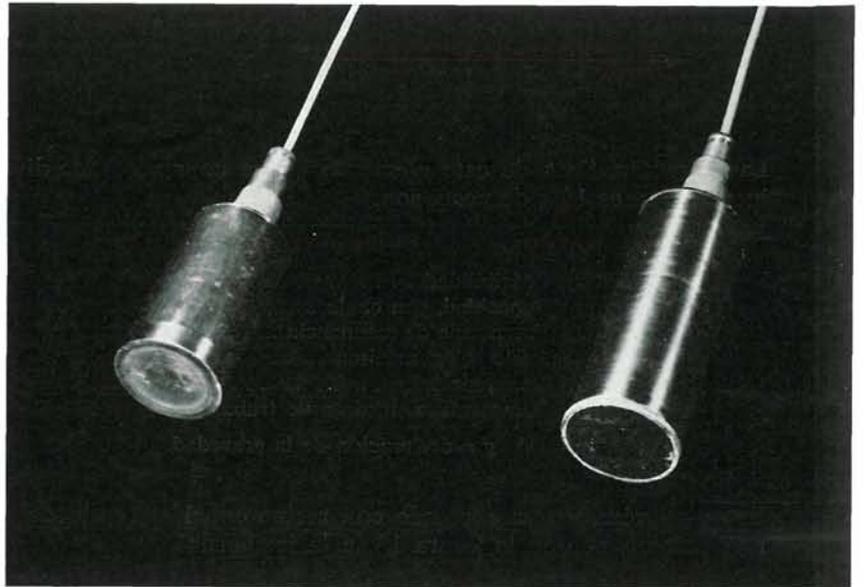


Fig. 14. Sondas emisora (derecha) y receptora (izquierda).

Las características más importantes de este material son:

| | |
|--|--|
| Punto de Curie | 530 °C |
| Magnetostricción (a saturación) | $\epsilon_s = -28 \times 10^{-6}$ |
| Factor piezomagnético de acoplamiento | 0,20 - 0,26 |
| Polarización | 12 - 16 Oe. |
| Coefficiente de calidad | $Q \cong 2.500$ |
| Coefficiente de temperatura | $10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ |
| Rendimiento máximo | 3 W/cm ² |
| Dilatación térmica | $\alpha = 7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ |

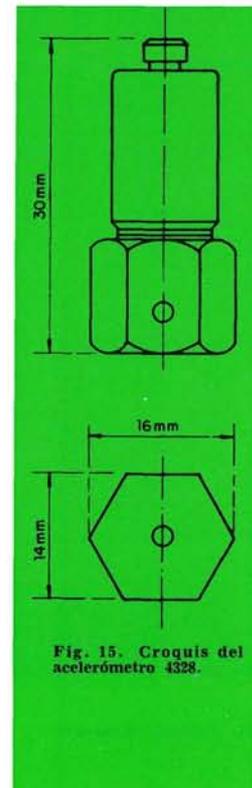
El núcleo empleado posee la forma y dimensiones indicadas en la figura 13. Lleva dos placas para la preimantación y un bobinado simétrico de 2×120 espiras de hilo de cobre de 0,5 mm de diámetro.

Una de las caras del núcleo va encolada con resina epoxi a la tapa exterior de la sonda, que es de latón, con un espesor de 0,5 mm. Una vez fijado el núcleo a la cara correspondiente del recipiente-sonda, el conjunto se ha rellenado con parafina fundida.

El objeto de este relleno es doble: Por una parte, hacer de amortiguador de las ondas ultrasónicas, acortando, por tanto, la duración del impulso elástico, y, por otra, proteger el conjunto de la acción de la humedad, riesgo que hay que prever cuando se trabaja en obra.

La figura 14 muestra, a la derecha, la sonda terminada con su conector coaxial de salida. La frecuencia de resonancia nominal es de 40 kc/s, en circuito abierto.

En condiciones normales de trabajo la frecuencia puede ser de 40,7 a 41,6 kc/s. La sonda-receptor es un acelerómetro de titanato de bario, Brüel & Kjaer, tipo 4328, cuyo croquis acotado se indica en la figura 15.



Las características de este elemento *, que consta de dos discos de titanato de bario y una masa inerte de unos 10 g de peso, son:

| | |
|--------------------------------------|------------------------|
| Sensibilidad | 20 mV/g (1) |
| Capacidad, con cable | 800 picofaradios |
| Frecuencia de resonancia | 25 - 35 kc/s |
| Aceleración máxima | 1.000 g (1) |
| Resistencia | 2×10^8 ohmios |
| Temperatura máxima de trabajo | 100 °C |

(1) g = aceleración de la gravedad.

Este acelerómetro va encolado con resina epoxi al fondo del recipiente-sonda, cuyo aspecto exterior puede verse en la figura 14 (a la izquierda).

* Folleto informativo Brüel & Kjaer núm. 4308/09, noviembre 1956.

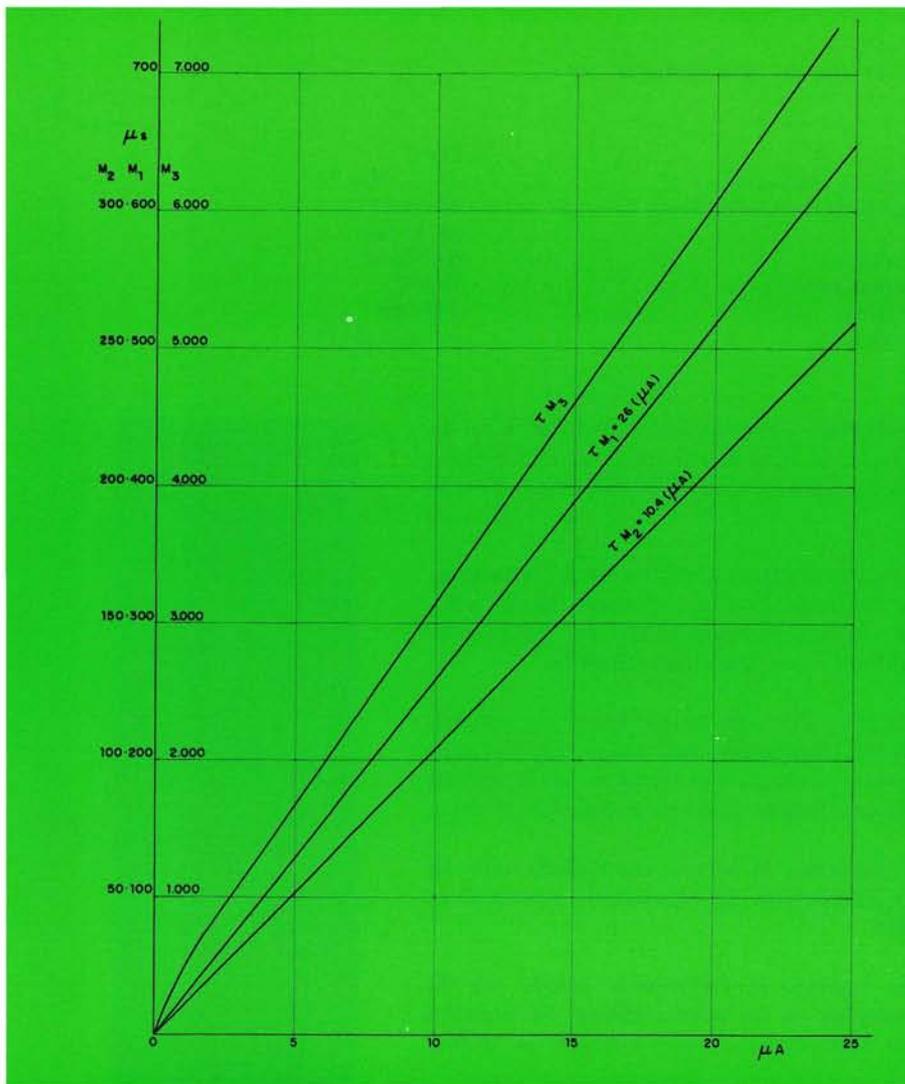


Fig. 16. Gráficas de tarado.

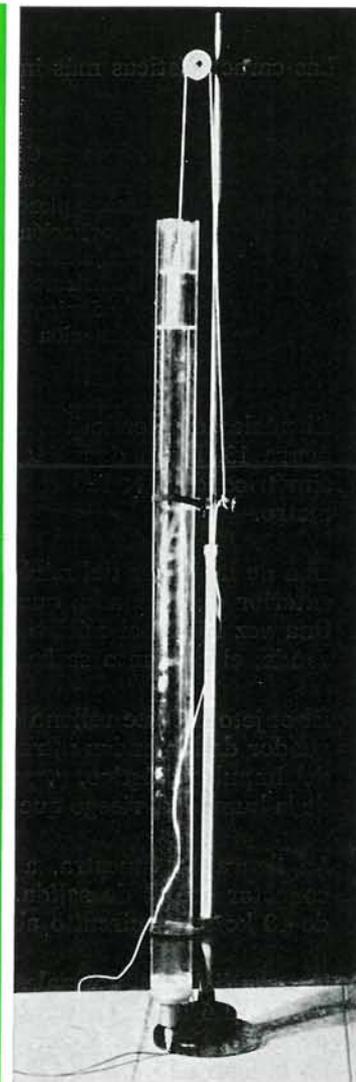


Fig. 17. Equipo experimental para el tarado.

Puesto que el sistema de excitación del transductor-emisor es, como hemos visto en 2, por descarga de un condensador sobre el devanado del núcleo de Ferroxcube, sin prejuzgar nada sobre la frecuencia, cualquier otro tipo de sonda de titanato o ferrita puede emplearse con este aparato. Estas consideraciones son aplicables tanto al emisor como al receptor.

5 Funcionamiento

Los controles exteriores (fig. 1) de que va provisto el aparato son: conmutador de encendido, conmutador de escalas, pulsador de medida, ganancia de RF, control de cero y control de alcance máximo de la escala.

Una vez puesto en marcha el aparato y sin período alguno de calentamiento previo, se ajusta el cero poniendo las dos sondas, emisora y receptora en contacto. Separándolas ahora, puede ajustarse el potenciómetro correspondiente hasta que la lectura del microamperímetro sea el máximo de la escala (25 microamperios).

Con ello ya queda el equipo en disposición de efectuar medidas sobre cualquier espesor de hormigón que no exceda del alcance máximo (unos 2 m). La aplicación de las sondas habrá de hacerse sobre superficies opuestas y paralelas de un elemento de hormigón que, aparte de estar enfrentadas, deben ser lo más lisas y limpias posible.

Es fundamental intercalar entre la superficie de la sonda y el hormigón una capa de vaselina. Con ello se aumenta la transferencia de energía al hormigón y se logra un acoplamiento máximo.

El tiempo, en microsegundos, de propagación de la onda a través del espesor considerado, se lee directamente en las gráficas de la figura 16, obtenidas como se indica a continuación.

5.1. Tarado del aparato

Dado que el hormigón, por su heterogeneidad y diferente composición de unos productos a otros, no puede ser tomado en cuenta como elemento de tarado, se hace preciso emplear otras sustancias de constantes conocidas.

Aun cuando sería posible utilizar sólidos, tal como el acero, la dificultad de lograr patrones de longitud diferente (para cada tiempo de propagación), hizo pensar en aprovechar la buena propagación de los ultrasonidos en el agua, empleando columnas de este líquido, de altura diferente.

El dispositivo representado en la figura 17 resulta sumamente práctico para el tarado. Un tubo de plexiglás de 72 mm de diámetro interior está cerrado por su extremo inferior con un sistema de junta roscada, con arandela de cierre de neopreno, que sirve para ajustar uno de los transductores, en este caso el receptor. La longitud total del tubo es de 1.500 milímetros.

Por el extremo abierto del tubo se introduce, debidamente centrado, el otro transductor —el emisor— que se deja caer, mediante una polea visible en la figura 17, hasta que el extremo de la sonda quede justamente sumergido en el agua. La altura de la columna de agua se mide exteriormente al tubo.

Se toma como velocidad de propagación del ultrasonido en el agua $V_{H_2O} = 1.500$ m/s a 20 °C.

Con los valores en microamperios obtenidos para cada una de las alturas de agua, se han construido las gráficas de la figura 16. El sistema de tarado empleado se ha mostrado sumamente práctico y eficiente. Una precaución que es preciso tomar es humedecer con una capa jabonosa la superficie activa de ambos transductores. Con ello se evita la formación de burbujas de aire entre las sondas y el agua, con la consiguiente posibilidad de error en las medidas.

5.2. Algunas experiencias con hormigón

Una vez tarado el aparato está listo para ser utilizado, frente a diferentes espesores de un hormigón cuya velocidad de propagación se quiere medir. Se determinó, en primer término, una probeta cilíndrica de 15×30 , obteniéndose $\tau = 91$ microsegundos. Esto da para la velocidad de propagación $V = 3.300$ m/s, lo que corresponde a un módulo de elasticidad dinámico $E_d = 197.000$ kg/cm². Se ha supuesto que el coeficiente de Poisson es 0,3 y el peso específico, 2.400 kg/m³.

La figura 18 muestra la auscultación de un bloque de hormigón en masa de $50 \times 40 \times 40$ cm, con vistas a determinar las diferencias de velocidad de propagación a lo largo de sus tres direcciones principales. Los valores hallados fueron:

$$\tau_1 = 4.080 \text{ m/s} ; \quad \tau_2 = 3.650 \text{ m/s} ; \quad \tau_3 = 1.720 \text{ m/s} ;$$

lo que muestra que, al menos en una de las direcciones, existe un estado de fisuración avanzada que ha hecho aumentar considerablemente el tiempo de propagación.

Veamos, finalmente, un ejemplo de medida en una estructura real (fig. 19) en la que se utilizaron combinadamente la técnica ultrasónica y la esclerometría, para determinar la resistencia media más probable de los diferentes elementos de la obra.

5.3. Relaciones útiles en el hormigón

Como ya se explicó en otro lugar *, los métodos ultrasónicos poseen importantes limitaciones en cuanto a su empleo práctico. No constituyen, pues, un método universal y deben ser manejados con cuidado, sobre todo cuando se intenta averiguar la calidad resistente del hormigón por procedimientos ultrasónicos.

Sin embargo, el conocimiento del tiempo de propagación del impulso ultrasónico y, por tanto, de la velocidad V , permite, sin más, hallar el módulo elástico dinámico E_d .

Las fórmulas más usuales son:

$$E_d = V^2 \rho \quad (\text{para probetas de laboratorio});$$

$$E_d = V^2 \rho (1 - \mu^2) \quad (\text{para losas});$$

$$E_d = V^2 \rho \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \quad (\text{para hormigón en masa});$$

en las que: E_d es el módulo dinámico; V , la velocidad de propagación; ρ , la densidad, y μ , el coeficiente de Poisson. Bien entendido que para que E_d venga dado en unidades usuales, kg/cm², será preciso que V vaya expresado en cm/s y la densidad bajo la forma $\frac{\text{kg} \cdot \text{s}^2}{\text{cm}^4}$ (= peso/g · volumen).

* Tobío, J. M.: «Ensayos no destructivos». Publicado por I.E.T.c.c., Madrid, 1967, pág. 67.

Si se desconoce el coeficiente de Poisson, puede utilizarse la fórmula:

$$E_d = 8,65 \cdot V^2 \cdot d \cdot 10^{-6},$$

en la que E_d viene en kg/cm^2 ; V , en m/s , y d , en kg/m^3 . (Se ha supuesto que el coeficiente de Poisson vale 0,24.)

Como norma general debe tenerse presente que, al aumentar el espesor del hormigón medido, es decir, la trayectoria del haz ultrasónico, y también cuando aumenta el volumen transversal de la pieza o estructura medida, la velocidad V disminuye. Asimismo, se ha visto que, cuando se miden espesores muy pequeños, las velocidades encontradas son anormalmente altas.

Las causas de estos fenómenos aún no han sido debidamente establecidas.

Si quieren obtenerse valores de resistencia a partir del valor E_d hallado, pueden utilizarse las fórmulas de L'Hermite:

$$E_d = K_1 \cdot f_c^{1/2},$$

en la que K_1 es una constante, y f_c , la resistencia a compresión del hormigón en kg/cm^2 ; o las de Chefdeville:

$$E_d = K_2 \cdot f_c^{1/3} \quad (\text{para hormigones de edad superior a 28 días});$$

$$E_d = \frac{K_3 \cdot f_c^{1/3}}{1 - \mu} \quad (\text{para hormigones de menos de 28 días}).$$

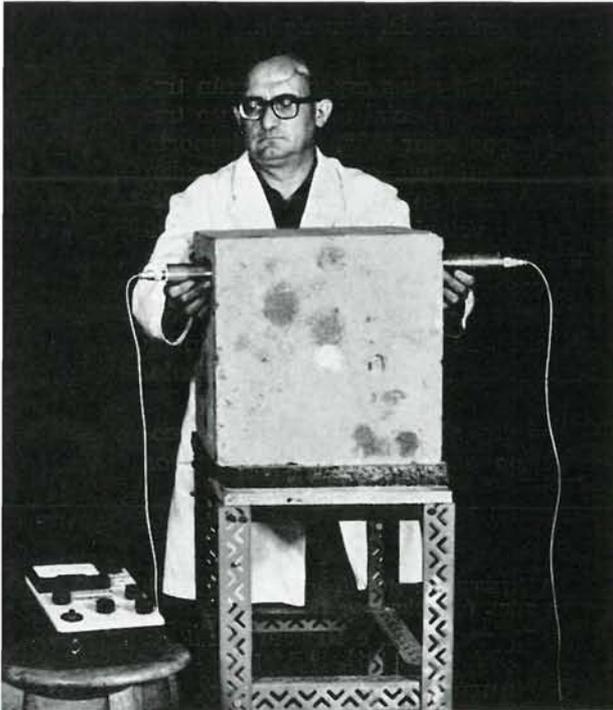


Fig. 18. Comprobando la fisuración de un bloque de hormigón.

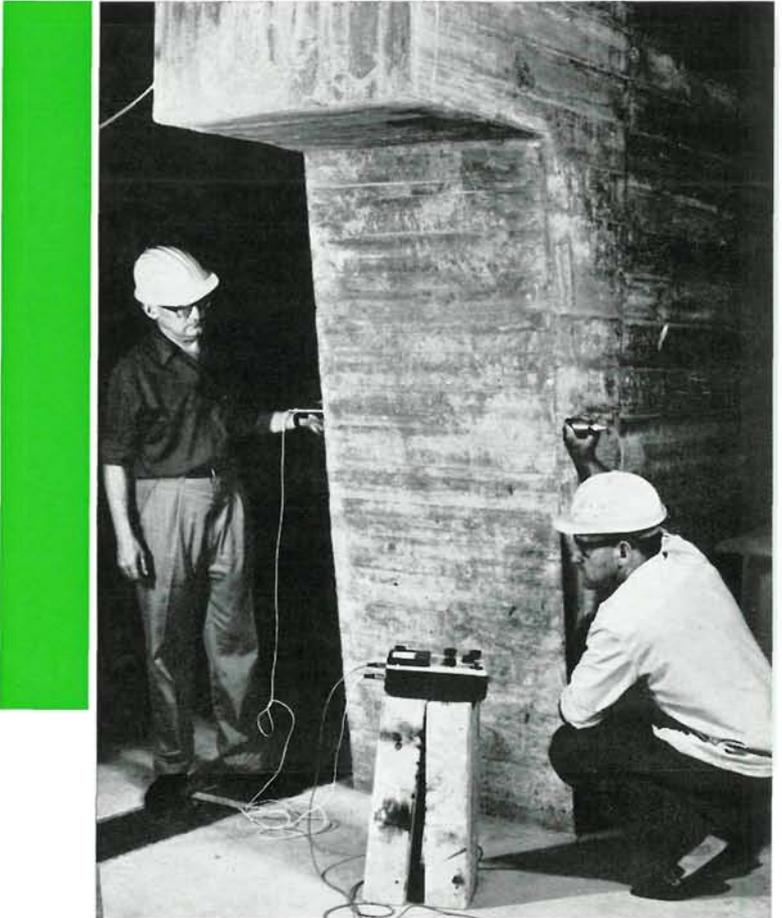


Fig. 19. Examen ultrasónico de un muro.

Fotos: B. GUTIERREZ

En las fórmulas anteriores K_1 , K_2 y K_3 tienen valores de 20.000 a 50.000, pero para lograr resultados aceptables deben ser determinados experimentalmente.

Klieger * ha mostrado que puede existir una buena correlación entre resistencia y módulo E cuando la relación pasta : árido en el hormigón se mantiene constante. Quizá los trabajos más prometedores en cuanto a relacionar la resistencia a compresión y las propiedades ultrasónicas de un hormigón, son los de Kesler y Higuchi **. Estos investigadores, trabajando con mezclas bien definidas de hormigón y con probetas cilíndricas, mostraron que era posible predecir la resistencia a partir de datos sónicos con un error no superior al 3 por 100.

Esta cifra es indudablemente optimista y, en el estado actual de la técnica ultrasónica, no puede pensarse en lograr correlaciones superiores a un 15 por 100.

En lo que se refiere a la resistencia a flexión o flexo-tracción, las conclusiones son muy similares a las expresadas, aun cuando en un principio se creyó que la relación podría ser mejor.

Las gráficas de la figura 20, que se refieren a tres tipos diferentes de mezclas, debidas a Whitehurst ***, parecen bastante alentadoras pero, tal como expresa el propio autor, «no debe esperarse ninguna relación general entre E_d y la resistencia a flexión».

5.4. Empleo del aparato ultrasónico para otros tipos de medidas

Si bien el número de propiedades del hormigón que pueden, teóricamente, ser evaluadas a partir de ensayos ultrasónicos es bastante reducido, existe la posibilidad de utilizar el método de impulsos para determinar el tiempo de fraguado, las características de fluencia, la uniformidad, la fisuración y la calidad general del hormigón.

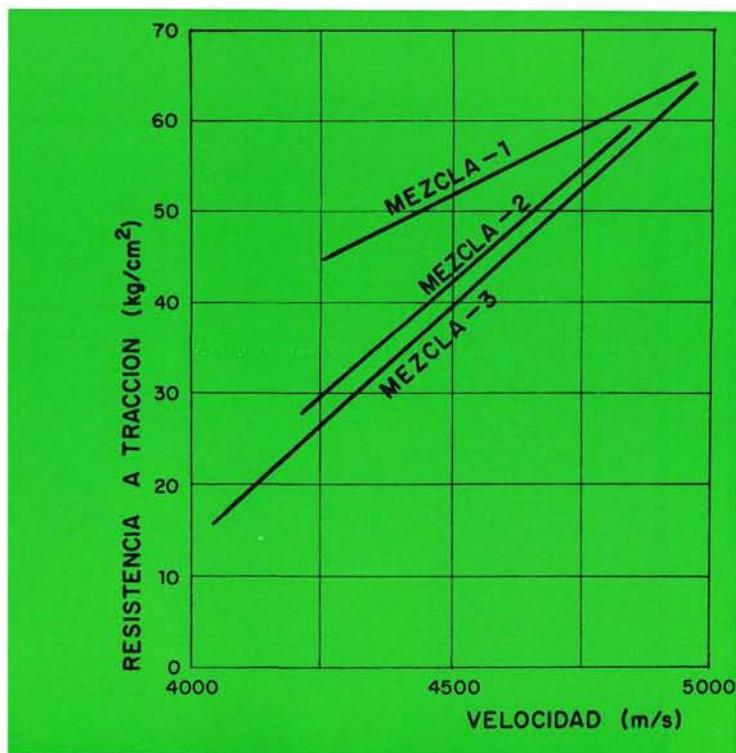


Fig. 20. Relación entre velocidad y resistencia a tracción.

Algunos de estos aspectos serán tratados con especial detalle en un trabajo posterior ****, pero importa decir aquí que, en general, pueden observarse, en las curvas que representan velocidad de propagación-tiempo, para pastas y hormigones en proceso de fraguado, unos puntos singulares y unos cambios de pendiente que no es difícil relacionar con el llamado *tiempo de fraguado*.

Respecto al comportamiento visco-elástico del hormigón, los ensayos

* KIEGER, P.: *ACI Journal Proc.*, V. 54, núm. 6, diciembre 1957.

** KESLER, C. E., e HIGUCHI, Y.: *Proc. ASTM*, 5, 53, 1044, 1953.

*** WHITEHURST, E. A.: *Highway Res. Board*, Bull. 206, 1959.

**** TOBÍO, J. M.: «Estudio ultrasónico de las pastas de cemento» (Trabajo en preparación).

realizados sobre probetas sometidas a carga constante, han mostrado que las variaciones ultrasónicas experimentadas (determinación del módulo dinámico), dieron muy buena correlación con los valores de las deformaciones lentas encontrados experimentalmente *.

Un campo donde la eficacia del ensayo ultrasónico es indiscutible es aquel que se refiere a la determinación de la uniformidad de un hormigón. Hasta el presente no existe un método mejor para evaluar la uniformidad tanto de probetas como de hormigón en obra.

Así es perfectamente posible detectar diferencias de velocidad de propagación en las caras inferior y superior, así como en el centro de una probeta, respecto a la forma en que fue hormigonada. Lo mismo puede decirse de la uniformidad en profundidad de los pavimentos de hormigón, pilares y vigas de una estructura, etc.

La técnica puede servir muy bien para delimitar o contornear, en un elemento de estructura aérea, zonas de posible deterioro **. La determinación de la trayectoria y profundidad de grietas en un macizo de hormigón es otra de las aplicaciones de la técnica ultrasónica. Los ensayos requieren una elaboración bastante cuidada, tal como se explica en ***, pero los resultados suelen ser bastante precisos.

No puede decirse lo mismo cuando se trata de microfisuras o de fisuras rellenas con agua, ya que, en este caso, la variación en la velocidad de propagación suele ser muy pequeña e incluso indetectable.

Sin que sea fácil expresarlo en cifras, existe la evidencia general de que un hormigón que posea una elevada velocidad de propagación del impulso ultrasónico, es generalmente bueno. Ello suministra un método cómodo para evaluar lo que podríamos denominar «calidad general o comparativa de un hormigón».

Un buen ejemplo es la determinación de la degradación de probetas sometidas a ciclos de congelación y deshielo. Existen incluso normas (ASTM, C-290-61.T y C-291-61.T) que admiten el ensayo sónico o ultrasónico para establecer el llamado *factor de durabilidad*:

$$DF = P \frac{N}{M},$$

en donde:

P es el porcentaje del módulo dinámico E_d al cabo de N ciclos [$100 \cdot (E_d)_N / (E_d)_0$]; N , el número de ciclos para el cual P alcanza el valor mínimo especificado, o un cierto número de ciclos prefijado, y M , el número de ciclos totales para destrucción completa de la probeta.

La conocida tabla de Leslie y Cheesman:

| Velocidad de propagación (m/s) | Calidad general del hormigón |
|--------------------------------|------------------------------|
| > 4.500 | Excelente |
| 4.500 - 3.600 | Bueno |
| 3.600 - 3.000 | Dudoso |
| 3.000 - 2.100 | Generalmente malo |
| < 2.100 | Malo |

* VAISHNAV, R. N., y KESLER, C. E.: *T. & A. M. Rep.* núm. 603, University of Illinois, septiembre 1961.

** BREUNING, S. M., y BONE, A. J.: *Proc. Highway Res. Board*, V. 33, 210, 1954.

*** TOBÍO, J. M.: *Loc. cit.*

es otro intento para relacionar la velocidad de propagación dada por el aparato ultrasónico y la calidad del hormigón.

Para ciertos tipos de estructuras se ha establecido en Inglaterra un *valor mínimo de velocidad* *, dado por la tabla siguiente:

| TIPO DE OBRA | Valor mínimo (V) (m/s) |
|---|---------------------------|
| Hormigón pretensado; secciones T | 4.570 |
| Hormigón pretensado; unidades de anclaje | 4.350 |
| Hormigón armado; estructuras | 4.120 |
| Losas de hormigón suspendidas | 4.660 |

En cualquier caso, debe tenerse presente que los datos dados anteriormente son siempre orientativos y pueden considerarse como satisfactorios desde el punto de vista de una generalización. Pero nada más.

El tipo de árido empleado en el hormigón ejerce una decisiva importancia sobre la velocidad de propagación ultrasónica. Esto es válido tanto para la arena como para el árido grueso. También tienen importancia otros factores tales como la dosificación en cemento, la relación agua : cemento, el asentamiento y, por supuesto, la edad del hormigón.

Incluimos, para terminar, la tabla siguiente ** que recoge algunos de los aspectos indicados anteriormente:

VELOCIDADES TÍPICAS PARA VARIOS HORMIGONES

| TIPO DE ARIDO | Contenido en cemento (kg/m ³) | Asentamiento (cm) | Relación a:c (agua:cemento) | Edad (años; días) | Velocidad (m/s) |
|--|--|----------------------|--------------------------------|----------------------|--------------------|
| Arena natural y granito triturado | 270 | 6,9 | 0,72 | 6,5 años | 4.200 |
| | 360 | 7,4 | 0,75 | 6,5 » | 4.550 |
| Arena natural y caliza triturada | 278 | 7,6 | 0,65 | 6,5 » | 5.200 |
| | 365 | 8,1 | 0,48 | 6,5 » | 5.370 |
| Arena natural y grava | 278 | 7,1 | 0,57 | 6,5 » | 4.680 |
| | 375 | 7,1 | 0,42 | 6,5 » | 4.830 |
| Arcillas expandidas y finos ligeros ... | — | 5,0 | 0,88 | 14 días | 3.400 |
| Pizarras expandidas y finos ligeros ... | — | 8,9 | 0,46 | 857 » | 4.000 |

Poco es lo que se ha experimentado el método ultrasónico en materiales distintos del hormigón (aparte metales). Merece especial mención, sin embargo, el trabajo de Jones ***, en el que se muestra cómo puede adaptarse la técnica de impulsos para estudiar la velocidad de endurecimiento de diferentes mezclas de suelo y portland, con o sin materia orgánica.

* JONES, R.: *Proc. Highway Res. Board*, V, 32, 258, 1953.

** WHITEHURST, E. A.: «Evaluation of Concrete Properties from Sonic Test». *Am. Conc. Institute*, Detroit, 1966.

*** JONES, R.: *J. Appl. Chem.*, 226, mayo 6, 1956.

Incluso ha deducido una fórmula para relacionar la resistencia a compresión de muestras de suelo-cemento y la velocidad de impulso, V :

$$R = a \cdot (V/1.000)^2,$$

donde a es una constante cuyo valor es 0,265; R , la resistencia a compresión en kg/cm², y V , la velocidad de propagación en m/segundo.

El método es, por supuesto, absolutamente no destructivo y válido para mezclas en las que V no sea superior a 2.700 m/segundo.

En el trabajo ya citado * sobre estudio ultrasónico de pastas veremos algunas interesantes aplicaciones de la técnica de impulsos a cuestiones no clásicas, tales como el estudio de suspensiones cemento en agua, efecto de aditivos a las pastas y otras.

Para muchos de estos ensayos se aprovecha la cualidad del aparato descrito en este trabajo, de poder efectuar medidas continuas gracias a la posibilidad de poder trabajar con un mili o microamperímetro externo (que puede ser un aparato de registro).

6 Resumen y conclusiones

El aparato ultrasónico descrito en el presente trabajo se diferencia de otros de su clase en una serie de características que podemos sumarizar así: *a)* su peso y volumen son muy reducidos y no precisa alimentación exterior; *b)* por hallarse totalmente transistorizado está prácticamente exento de periodo de calentamiento o puesta en régimen y las medidas pueden empezar a realizarse desde el momento de su puesta en marcha; *c)* no lleva indicador de tubo de rayos catódicos, sino un microamperímetro que suministra directamente una indicación numérica, fácilmente convertible en velocidad en m/s; *d)* los dispositivos reguladores electrónicos de que va provisto permiten trabajar con el aparato durante largos períodos de tiempo, e incluso en régimen continuo, sin que se presenten derivas molestas.

Por otra parte, el aparato es fácilmente transportable a obra, como se deduce de la característica *a)*, y para su manejo no se necesita un entrenamiento especial.

En cuanto a las limitaciones de este equipo, son las mismas inherentes al sistema ultrasónico en general. Unas derivan de la propia técnica de impulsos, tales como las diferentes ondas que pueden engendrarse durante el impacto elástico ultrasónico (y que poseen velocidades de propagación diferentes), y otras de la correcta interpretación de resultados.

En el ensayo ultrasónico, tal como ocurre con el esclerómetro, por ejemplo, la evaluación del ensayo es más difícil que el ensayo mismo. La velocidad de propagación hallada no dice, en general, nada al ingeniero de hormigones. Este parámetro debe convertirse en algún otro de mayor significado.

Uno de estos parámetros puede ser el módulo elástico dinámico que, en general, será diferente del obtenido mediante carga estática. Pero aún con este dato, si no se sabe nada de la historia del hormigón considerado: ingredientes, método de fabricación y puesta en obra, curado, etc., las apreciaciones de calidad que se hagan con los datos del ensayo ultrasónico *exclusivamente*, podrán venir afectadas de un considerable error.

* TOBÍO, J. M.: Loc. cit.

Por el contrario, los estudios sobre fisuración y agrietamiento, y especialmente los de uniformidad, podrán hacerse con gran precisión sirviéndose únicamente de los datos ultrasónicos.

No es de esperar que, en un próximo futuro, los ensayos ultrasónicos sustituyan a otros más clásicos en el hormigón. En nuestra opinión, los ensayos ultrasónicos (y sónicos) pueden y deben emplearse con preferencia a otros en algunos casos concretos: ensayos de durabilidad y agresividad (por ejemplo, probetas sumergidas en soluciones o terrenos agresivos), ciclos de congelación y deshielo, uniformidad de las diferentes partes de una estructura y observación de grietas invisibles por medios convencionales.

Para determinar la calidad del hormigón —especialmente in situ— los ensayos ultrasónicos deben considerarse como complementarios de los esclerométricos y otros más o menos clásicos. Empleados con todo cuidado y efectuando las debidas correlaciones, pueden prestar grandes servicios, pero, en ningún caso, deben ser considerados como una panacea.

résumé ● summary ● zusammenfassung

Mesureur portatif à ultra-sons

J. M. Tobío, Dr. en Chimie Industrielle

Comme étape finale d'une série d'expériences sur la détermination de la «vitesse de propagation» des ondes ultrasonores dans le béton, est décrit ici un nouvel appareil miniaturisé à transistors, qui peut servir à l'auscultation en chantier d'épaisseurs non supérieures à 2 mètres.

La fréquence de récurrence de l'engin est de 100 Hz et la fréquence de résonance propre des collecteurs ou sondes se trouve dans la zone des 40.000 Hz. Ses trois champs de mesure comprennent les marges 250, 625 et 1.000 microsecondes, tous de déduction facile à partir des indications d'un simple microampèremètre.

Les caractéristiques les plus remarquables du nouvel appareil sont ses faibles poids et volume et l'indépendance des réseaux électriques normaux.

Portable ultrasonic measuring instrument

J. M. Tobío, Dr. chemical engineering

As final stage after a number of tests to determine the propagation velocity of ultrasonic waves in concrete, a new miniaturized transistorised apparatus is described, which may serve to carry out auscultations at the working site, on concrete masses no thicker than 2 ms.

The recurrence frequency of the equipment is 100 Hz, and the resonating frequency of the receivers is in the region of 40.000 Hz. Its three recording bands encompass the magnitudes of 250, 625 and 1.000 microseconds. All these can be easily read from a simple microamperimeter.

The most significant features of this new apparatus are its small weight and volume, and its independence from the normal electricity supply.

Tragbares Ultraschallmessgerät

J. M. Tobío, Dr. Chem.

Als Endergebnis einer Reihe von Versuchen zur Bestimmung der Geschwindigkeit der Fortpflanzung von Ultraschallwellen in Beton wird hier ein neuer Miniaturapparat beschrieben, der mit Transistoren arbeitet und zur Auskultierung von Dicken nicht über 2 m an der Baustelle dienen kann.

Die Durchlauffrequenz des Gerätes beträgt 100 Hz und die Resonanzfrequenz der Erfasser oder Sonden befindet sich im Bereich von 40.000 Hz. Seine drei Messfelder erfassen die Grenzen von 250, 625 und 1.000 Mikrosekunden, die alle leicht herzuleiten sind durch die Angaben eines einfachen Ampèremeters.

Die bedeutendsten Eigenschaften dieses neuen Apparates sind sein geringes Gewicht und seine Unabhängigkeit vom normalen Stromnetz.