

LA AUSCULTACION DINAMICA DEL HORMIGON EN OBRA

Por M. F. BOLLO,

Estudio con la colaboración de F. F. BOLLO

A. DEL PALACIO y D. MARTINEZ

Se trata de una descripción del procedimiento de llevar a cabo la auscultación dinámica del hormigón, dando cuenta de su aplicación a diversas obras, y comentar los resultados obtenidos en los años que se lleva aplicando el método.

Desde 1950 he realizado diversas series de medidas de auscultación dinámica sobre probetas de hormigón, con el grupo de colaboradores antes citado.

El equipo de aparatos siempre fué sencillo por razones económicas, y análogo, aunque menos importante, al empleado en los laboratorios franceses y americanos. Muchos datos interesantes para este trabajo me fueron proporcionados por el Laboratorio de la Región Garonne de Electricité de France, a cuyo Director, M. Dussel, debo también otros datos sobre el interés práctico del método.

1. Medidas de laboratorio.

Se han efectuado con equipos sencillos, análogos al instalado con este fin por la Empresa Nacional de Electricidad en la presa de Bárcena (fig. 1.^a). Poseen

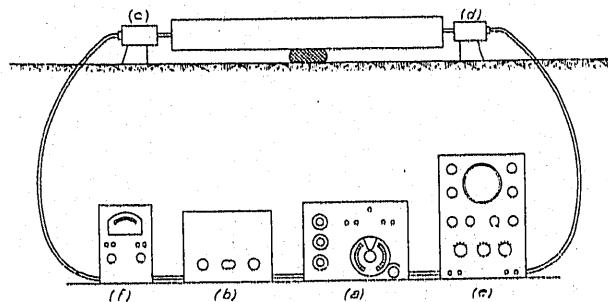


Fig. 1.^a.— Esquema del aparato.

un generador de vibraciones, motor aplicado sobre la probeta y un dispositivo de captación de estas vibraciones, que permite la observación de sus características.

La parte generadora de vibraciones a frecuencias audibles (20 a 20 000 Hz.) es un oscilador por el método heterodino (*a*), que excita un amplificador b. f. de 6 w. de potencia (*b*). Este actúa sobre un transductor (*c*), análogo a un altavoz, cuya parte móvil sea un resorte apoyado en un extremo de la probeta.

En el otro extremo se apoya un captor de tipo electrodinámico, análogo a un sismógrafo de los empleados en los reconocimientos geofísicos (*d*). (*f*) es un medidor de salida.

Cuando se envía una señal al excitador, ésta genera una onda elástica, que a través de la probeta, a una velocidad de algunos kilómetros por segundo, mueve el extremo donde se apoya el captor.

La señal eléctrica emitida por este captor se amplifica y lleva a un oscilógrafo de rayos catódicos (*e*), en el cual puede estudiarse.

Al ir variando la frecuencia de la señal, si *v* es la velocidad de transmisión y *l* la longitud de la probeta, se alcanzará una frecuencia tal que

$$f_a = \frac{v}{2l},$$

en la cual se sumarán en fase los impulsos emitidos y reflejados por el extremo opuesto de la probeta. En este momento se producirá una resonancia tanto más importante cuanto menor sea la absorción de energía por viscosidad interna o dinámica del material.

Como en una barra alargada:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\delta}},$$

se deduce:

$$E = 4 \delta l^3 f_a^2.$$

El coeficiente de absorción puede deducirse de las variaciones de amplitud con la frecuencia, que en general será:

$$A = \frac{1}{\sqrt{(1 - n^2) + 4 \eta^2 n^2}},$$

siendo:

$$n = \frac{f}{f_0} \sim \frac{f}{f_a} \quad (f_0 = \text{frec. de resonancia sin rozamiento}),$$

pudiendo deducirse η de la frecuencia de resonancia f_a y las de amplitud $\frac{1}{\sqrt{2}}$, f_1 y f_2 . Una sustitución en la fórmula de A y operaciones dan, despreciando la diferencia entre f_a y f_0 (absorción pequeña):

$$\eta = \frac{f_a - f_1}{2 f_a}.$$

Del coeficiente de absorción se puede deducir el específico de viscosidad interna (1):

$$\dot{\pi} = \frac{\eta f_a}{E}.$$

(1) Puede verse: M. F. Bollo: "Sobre la transparencia elástica de las rocas de la Península Ibérica". *Asoc. Prop. Ciencias*, Madrid, 1951.

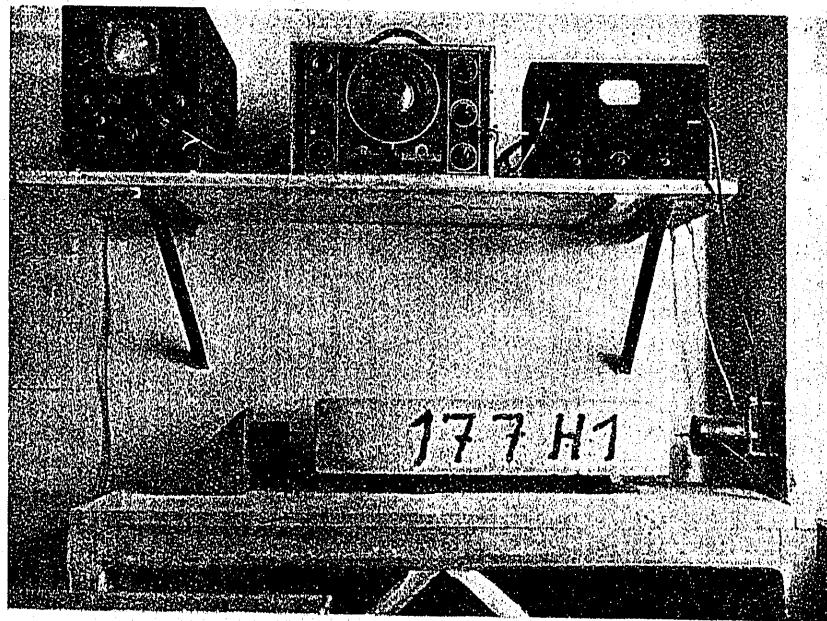


Fig. 2.^a.— Banco de ensayo en el laboratorio de la Presa de Bárcena.

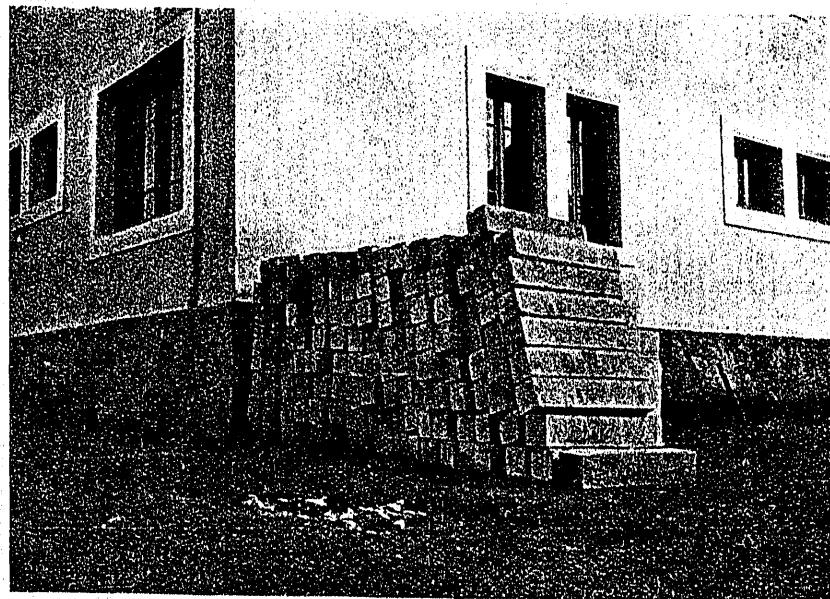


Fig. 3.^a.— Primeras probetas ensayadas en Bárcena

Estas determinaciones, o al menos la de E , las hemos realizado sobre probetas de hormigón de $15 \times 15 \times 60$, de mortero de $10 \times 10 \times 40$ y sobre numerosos testigos de sondeos. También sobre muestras de hormigón extraído con sonda del interior de varias presas y otras obras. Podemos citar, entre otras:

2. Instalación de obra.

En la presa de Bárcena (León), que construye el Departamento de Obras del Instituto Nacional de Industria para los Servicios Hidráulicos del Norte de España, hemos instalado un pequeño banco de ensayo dinámico, con posibilidad de vibrar probetas

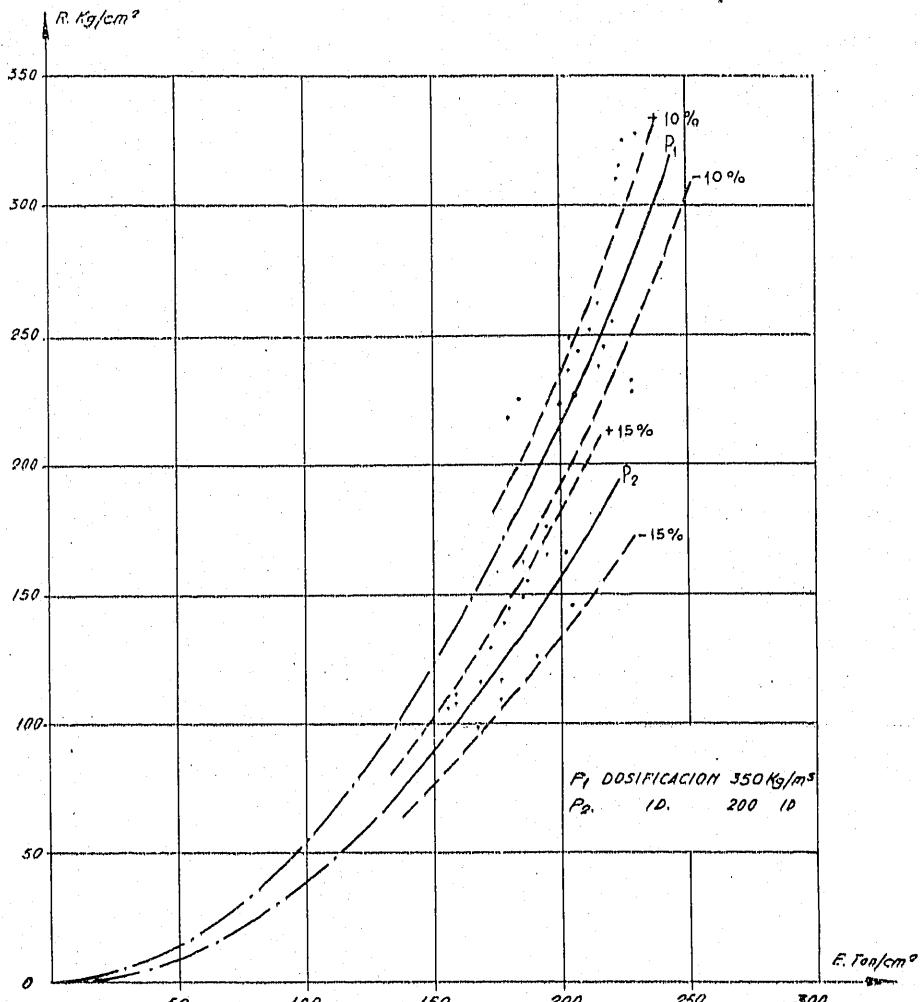


Fig. 4.a. — Curvas $R-E$.

Estructuras de la RENFE en Villaverde (Madrid).

Hormigón de la presa de Chandreja (Orense).

Hormigón de la presa de San Esteban (Orense).

Testigos de cuarcita de la cerrada de la presa de Bárcena (León).

Testigos de granito de Chandreja (Orense).

Testigos de granito de San Esteban (Orense).

Testigos de marga esquistosa de Saltos de Zadorra (Álava).

Hormigón de distintas obras del Salto de Picadas (Madrid).

de $20 \times 20 \times 80$. En la figura 2.a se puede observar la constitución del equipo, con un oscilógrafo que incorpora el amplificador previo y suprime el medidor de salida y utilizando para el barrido horizontal una señal captada al generador.

Su funcionamiento está a cargo del Sr. López Casado, Doctor en Química de la Facultad de Leeds.

Este equipo determina el valor de E . Se establece después una correlación (empírica) entre la resistencia a rotura a compresión en la prensa, índice de calidad habitual y este nuevo índice.

El valor práctico de esta correlación es conocido

por largas series de ensayos de varios laboratorios, entre otros el citado de Toulouse (E. d. F., Región de Garonne).

Para el caso de Bárcena resumimos a continuación el estudio matemático de la relación $E-R$ a partir de los primeros ensayos y una primera evaluación del proceso de endurecimiento:

3. Establecimiento de las relaciones $E-R$ y $E-t$.

Para los primeros estudios se pudo disponer de 121 ensayos, en los cuales hay dos series de 50 y 54, que son relativamente homogéneas.

La primera serie comprende 50 probetas de hormigón con 200 Kg. de cemento por m^3 y relación agua/cemento variable entre 0,52 y 1,10. La segunda corresponde a 350 Kg./ m^3 y relación agua/cemento de 0,50 a 1,12.

Los áridos empleados fueron, ciertamente, algo variables por las características de la cantera y por el sistema de explotación a que ésta obliga.

Prescindiendo de esta heterogeneidad, que no se puede considerar por falta de datos, se han tomado para las nubes de datos de una misma edad y de igual relación agua/cemento, los baricentros (fig. 4.^a).

Utilizando estos baricentros, se ha construido una parábola de segundo grado por mínimos cuadrados.

Cuadro núm. 1. — Para 350 Kg./ m^3 .

Abscisas	Cuadrados	Ordenadas
X ₁ 180	3,25 × 10 ⁴	Y ₁ 219
X ₂ 183	3,35 × 10 ⁴	Y ₂ 224
X ₃ 200	4,00 × 10 ⁴	Y ₃ 225
X ₄ 202	4,08 × 10 ⁴	Y ₄ 237
X ₅ 205	4,20 × 10 ⁴	Y ₅ 249
X ₆ 205	4,20 × 10 ⁴	Y ₆ 226
X ₇ 206	4,25 × 10 ⁴	Y ₇ 243
X ₈ 211	4,45 × 10 ⁴	Y ₈ 251
X ₉ 215	4,62 × 10 ⁴	Y ₉ 238
X ₁₀ 215	4,62 × 10 ⁴	Y ₁₀ 261
X ₁₁ 215	4,70 × 10 ⁴	Y ₁₁ 270
X ₁₂ 217	4,70 × 10 ⁴	Y ₁₂ 245
X ₁₃ 220	4,84 × 10 ⁴	Y ₁₃ 256
X ₁₄ 221	4,89 × 10 ⁴	Y ₁₄ 309
X ₁₅ 222	4,92 × 10 ⁴	Y ₁₅ 315
X ₁₆ 222	4,92 × 10 ⁴	Y ₁₆ 324
X ₁₇ 228	5,20 × 10 ⁴	Y ₁₇ 228
X ₁₈ 228	5,20 × 10 ⁴	Y ₁₈ 234
X ₁₉ 228	5,20 × 10 ⁴	Y ₁₉ 326
$\Sigma x_i^2 = 85,51 \times 10^4$		$\Sigma y_i = 4580$

$$a = \frac{\sum Y_i}{\sum X_i^2} = \frac{4580}{85,51 \times 10^4} = 5,35 \times 10^{-3}$$

Cuadro núm. 2. — Para 200 Kg./ m^3 .

Abscisas	Cuadrados	Ordenadas
X ₁ 158	2,50 × 10 ⁴	Y ₁ 108
X ₂ 158	2,50 × 10 ⁴	Y ₂ 145
X ₃ 159	2,53 × 10 ⁴	Y ₃ 109
X ₄ 159	2,53 × 10 ⁴	Y ₄ 113
X ₅ 169	2,85 × 10 ⁴	Y ₅ 97
X ₆ 169	2,85 × 10 ⁴	Y ₆ 117
X ₇ 172	2,95 × 10 ⁴	Y ₇ 129
X ₈ 173	3,00 × 10 ⁴	Y ₈ 110
X ₉ 178	3,16 × 10 ⁴	Y ₉ 108
X ₁₀ 178	3,16 × 10 ⁴	Y ₁₀ 116
X ₁₁ 178	3,16 × 10 ⁴	Y ₁₁ 139
X ₁₂ 180	3,24 × 10 ⁴	Y ₁₂ 146
X ₁₃ 185	3,42 × 10 ⁴	Y ₁₃ 149
X ₁₄ 185	3,42 × 10 ⁴	Y ₁₄ 164
X ₁₅ 186	3,45 × 10 ⁴	Y ₁₅ 155
X ₁₆ 192	3,70 × 10 ⁴	Y ₁₆ 126
X ₁₇ 192	3,70 × 10 ⁴	Y ₁₇ 164
X ₁₈ 192	3,70 × 10 ⁴	Y ₁₈ 173
X ₁₉ 198	3,90 × 10 ⁴	Y ₁₉ 164
X ₂₀ 205	4,20 × 10 ⁴	Y ₂₀ 109
X ₂₁ 205	4,20 × 10 ⁴	Y ₂₁ 145
$\Sigma x_i^2 = 70,88 \times 10^4$		$\Sigma y_i = 2786$

$$A = \frac{\sum Y_i}{\sum X_i^2} = \frac{2786}{70,88 \times 10^4} = 3,94 \times 10^{-3}$$

Se obtiene:

$$R = E^2 \times 53,5 \times 10^{-10}$$

para 350 Kg./ m^3 , y:

$$R = E^2 \times 39,4 \times 10^{-10}$$

para 200 Kg./ m^3 , con R y E en Kg./ cm^2 .

Dibujando las bandas de dispersión 10 y 15 por 100, se obtiene, del total de datos, un 58 por 100 en la primera y un 79 por 100 en la segunda. Para el tipo de ensayo efectuado parece satisfactorio.

La ley de endurecimiento con el tiempo sería:

$$E = 242 - \frac{1372,8}{t + 3,2}$$

para t en días y E en Tn./ cm^2 , que representa el gráfico de la figura 5.^a y que sólo se puede considerar como una idea previa, hasta poseer más ensayos.

4. Aplicación a las obras.

En los diez a quince años que el método lleva aplicándose, se ha empleado sistemáticamente en numerosas obras, como se hace actualmente en Bárcena. Siempre con resultados interesantes.

El laboratorio de Toulouse, antes citado, lo emi-

pleó en las obras de Cap-de Long y La Raviège. Actualmente vigila las obras Naguilhès y Gaulignac. En este último caso, la aplicación del método es contractual y se aplica de acuerdo con el pliego de condiciones, permitiendo a la administración la detención de la colocación del hormigón si los ensayos son desfavorables.

Para estudiar la evolución ulterior del hormigón

y juicios más interesantes sobre la cuestión, consultando las siguientes:

"Le contrôle de la qualité des bétons utilisées sur les chantiers des grands barrages", de M. Kilian, *Annales del Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, Febrero 1954, 7^{me} année, n° 74.

"Appareil universel pour l'essai des matériaux au moyen

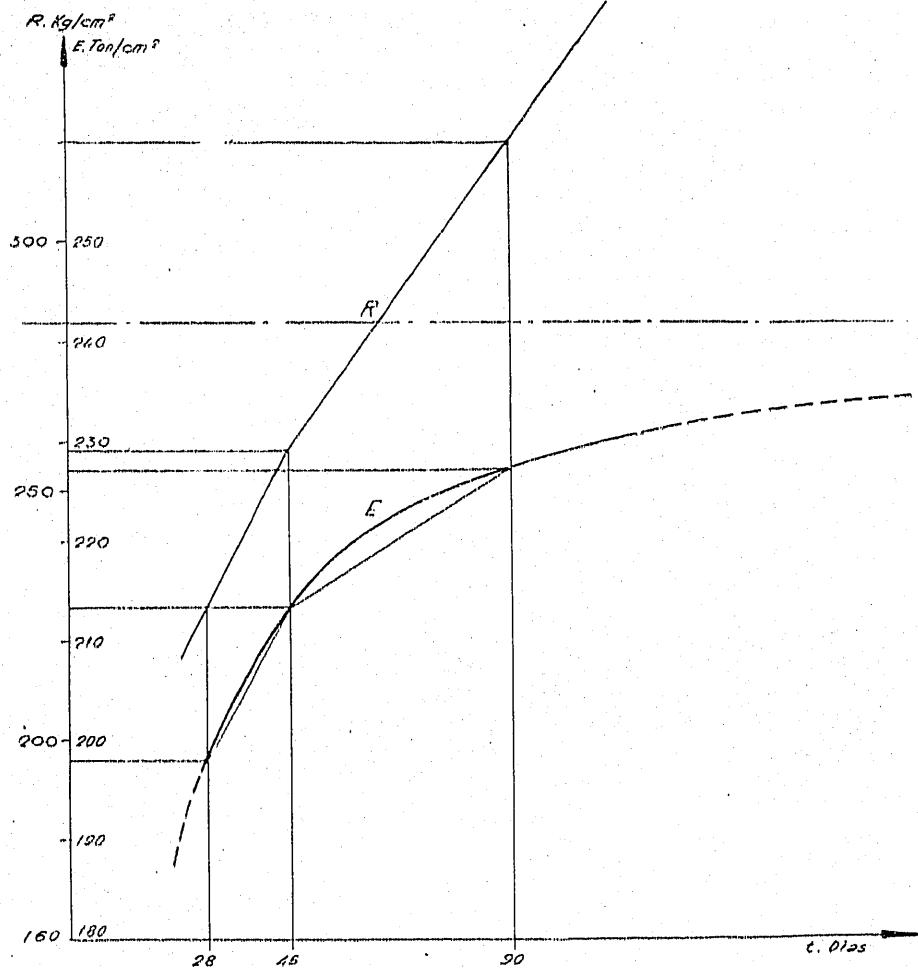


Fig. 5.1 — Variación prevista para E y R con la edad del hormigón en la presa de Bárcena.

es preciso establecer cámaras húmedas y mantenidas sobre 0° para las probetas. En esas condiciones, los ensayos son del mayor interés, ya que permiten reconocer en cada momento la calidad de todo el hormigón empleado en la obra.

Otra consideración esencial es la de dimensionar las probetas de acuerdo con el grosor de los áridos del hormigón. Una dimensión razonable suele ser la de $20 \times 20 \times 80$, pero muchas veces es preferible adoptar la de $30 \times 30 \times 120$ e incluso mayor.

Bibliografía.

Aunque las publicaciones sobre este tema son muy abundantes, puede obtenerse gran parte de las ideas

d'oscillations élastiques libres". Dr. Stephan Thyssen-Bornemisza, *Microtecnica*, nov.-déc. 1949.

"Improved sonic Apparatus for Determining the dynamic modulus of Concrete Specimens". C. E. Goodelle, *Journal of the A.C.I.*, septiembre 1950.

"Determination de la résistance d'un béton par un procédé non destructeur". C. Magnel G. Huyghe, *La Technique des Travaux*, julio-agosto 1954.

"La resistance à la compression du béton. Sa mesure par la méthode d'auscultation dynamique", de M. J. Chefdeville, *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, julio-agosto 1955.

"Saltos de agua y Presas de embalse. 3.^a edición, de Gómez Navarro, capítulo L, 2.^a tomo,