

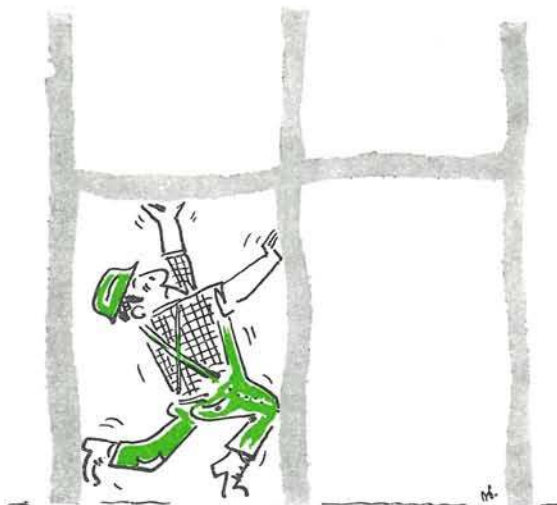
resistencia del hormigón en estructuras terminadas

J. M. TOBIO, Dr. en Química Industrial

682-12

sinopsis

Desde un punto de vista eminentemente práctico, se aborda el problema de la verdadera resistencia del hormigón terminado, con ciertas indicaciones respecto a la seguridad y las dispersiones. Se citan y comentan algunos métodos de ensayo, de especial aplicación en obra, y se muestran, con bastante detalle, las precauciones que es preciso tomar para que una auscultación no destructiva responda fielmente al estado resistente actual del hormigón.



1. Introducción

En el mejor de los casos —y esto, desgraciadamente, no es la regla general— el constructor trata de controlar la calidad de los hormigones que pone en obra, extrayendo periódicamente probetas de la hormigonera (o de cada partida de hormigón si se trata de hormigonado en central) y mandándolas a romper a los 28 días.

Aun en este caso y, repetimos, esto no suele darse con la debida frecuencia, el método no ofrece tal seguridad como para poder afirmar que la obra está garantizada contra cualquier fallo.

Aunque parezca extraño, el conocimiento de las relaciones entre la resistencia del hormigón acabado y la de las probetas, que es de fundamental importancia para dicha seguridad, no es todavía suficientemente profundo y exacto para fines prácticos.

El proyecto de las estructuras de hormigón armado se hace, hasta ahora, sobre la base de las tensiones permisibles. Debe suponerse que estas tensiones han sido estimadas de acuerdo con la experiencia que las relaciona con el comportamiento de las estructuras en condiciones de servicio.

En la determinación de las tensiones permisibles hay varios factores de incertidumbre que deben ser tenidos en cuenta, al menos de una forma cualitativa: el efecto de la dispersión en la resistencia, tal como se manifiesta en el ensayo con probetas; el efecto de la diferencia entre el valor límite de la tensión en el hormigón a rotura y la resistencia del propio hormigón, determinada de acuerdo con las especificaciones standard; la influencia de los defectos de puesta en obra; etc.

Todo ello nos lleva de la mano a la necesidad, cada vez más acuciante, de emplear sistemas para determinar la *resistencia actual* del hormigón en la estructura.

En el seno del Comité Europeo del Hormigón (C.E.B.) se están haciendo investigaciones para el proyecto de estructuras de hormigón armado basado en la carga de rotura o *carga-límite*. En la aplicación de tales métodos, que tienen en cuenta la capacidad de carga actual de la estructura, es de primordial interés conocer la resistencia a rotura del hormigón en la misma. Especialmente, este es el caso más directamente relacionado con ciertos elementos —muros, pilares, columnas, vigas muy armadas y otros— en los cuales la resistencia a rotura del hormigón es el factor primario que determina la capacidad portante o para soportar cargas de dichos elementos.

El C.E.B. ha propuesto que el proyecto de las estructuras se base en la *resistencia característica*, calculada por métodos estadísticos a partir de los datos suministrados por la rotura de probetas e incluyendo, además, un *coeficiente de seguridad* que representa la diferencia entre la resistencia del material en la estructura y la de las probetas.

II. El problema de la seguridad

Un tratamiento racional del problema de la seguridad presupone que no sólo son conocidas las cargas, sino también las propiedades de resistencia de la estructura. Si se conocieran mejor las variaciones de resistencia actual podría estimarse, de una manera más eficaz, la capacidad portante, y la precisión en los métodos de proyecto sería superior utilizando la teoría de la carga de rotura a que antes hemos aludido.

En proyectos en los cuales la finalidad de la obra no viene condicionada por otros factores, tales como la durabilidad, deformación, fisuración, impermeabilidad, porosidad y otros, se lograrían, evidentemente, soluciones más económicas.

Parece, pues, de gran interés, por varias razones, conocer la resistencia del hormigón en estructuras terminadas y también la relación entre esta resistencia y la de las probetas standard.

Sin embargo, la calidad del hormigón en estructuras finalizadas se ha estudiado sólo de una forma muy somera, especialmente en lo que respecta a los elementos estructurales más comunes, pilares, muros, vigas, si bien existe un conocimiento más profundo en otros tipos de obras, tales como carreteras y pavimentos de aeropuertos.

Para centrar el problema diremos: que para estudiar a fondo la relación R_t/R_p (resistencia a rotura del hormigón y resistencia a rotura de las probetas) sería preciso determinar la relación entre los parámetros que gobiernan las funciones de distribución de dichas variables R_t y R_p , expresando dicha relación en función de los métodos de puesta en obra del hormigón y de las condiciones de curado de la estructura.

Una investigación en gran escala, en este campo, es evidentemente cara y engorrosa. Requiere el estudio de construcciones reales, edificadas en localidades diferentes y en épocas climatológicas también distintas. Todo ello complementado con un estudio paralelo de probetas del mismo hormigón.

Un plan completo en este sentido llevaría consigo la rotura de elementos reales de construcción, especialmente de aquellos más influenciados por las cargas —muros y soportes—, la extracción de probetas de los mismos y la aplicación de diferentes métodos no destructivos, antes de la rotura. Luego hablaremos de esto.

III. Las dispersiones

Es un hecho comprobado que en una familia de probetas de la misma masa se acusan dispersiones durante los ensayos de rotura. No hay ninguna razón para suponer que el hormigón de la obra ha de estar exento de estas dispersiones.

He aquí algunos de los factores —no todos— que pueden influir en la dispersión:

TABLA I

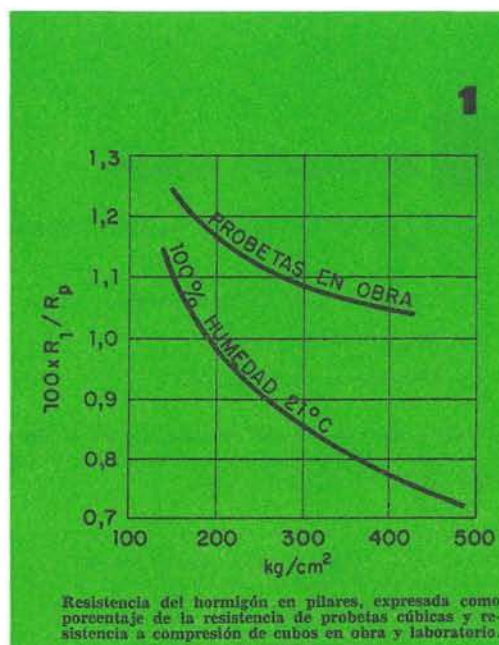
VARIABLES	Producen efecto sobre la dispersión		¿Son iguales los efectos?
	Estructura	Probetas	
a) Propiedades del cemento	sí	sí	sí
b) Propiedades de los áridos	sí	sí	sí
c) Dosificación (peso o volumen)	sí	sí	sí
d) Mezcla y amasado	sí	sí	sí
e) Transporte	sí	sí	no
f) Compactación (vibrado)	sí	sí	no
g) Conservación	sí	sí	no
h) Curado	sí	sí	no
i) Método de ensayo	sí	sí	no

La tabla muestra que, aun tomando las máximas precauciones, las dispersiones serán diferentes en la resistencia del hormigón de la estructura y el de las probetas. En general, la resistencia del hormigón de la estructura es más baja que la de las probetas.

Para fijar esto de algún modo, exponemos en la figura 1 las gráficas de Kaplan (1958). Este investigador fabricó una serie de pilares de los que halló su resistencia por métodos ultrasónicos contrastados con la extracción de probetas.

Al mismo tiempo conservó probetas standard cúbicas del mismo hormigón en dos condiciones diferentes: al lado mismo de los pilares y en el laboratorio a 100 por 100 de humedad relativa y 21° C.

Vemos que, en general, la resistencia de las probetas de obra viene a ser un 10 % inferior a la del hormigón de las columnas, mientras que las probetas curadas en el laboratorio dan valores un 25 % superiores a los de aquél. Todo ello complicado aún por el hecho



de que esta relación varía con la calidad resistente del hormigón ensayado.

Respecto a la influencia del método de ensayo [apartado i) de la tabla I], también aquí cabe acusar considerables diferencias.

Así, por ejemplo, cuando se extraen probetas con sonda de diamante, se ha comprobado que las dispersiones en las resistencias de los cilindros extraídos disminuyen al aumentar el diámetro de los mismos.

Si se usan métodos esclerométricos (Norma DIN 4 240), se ha visto que la dispersión en la obra es mucho mayor que cuando las medidas se hacen sobre probetas moldeadas al mismo tiempo que la estructura. Otro tanto puede decirse de los métodos ultrasónicos.

Para resumir, podemos decir que, en general, la resistencia real de un hormigón en obra es, por término medio, de 10 a 20 % menor que la de las probetas obtenidas con el mismo hormigón y que las dispersiones son también superiores en el hormigón acabado que en las probetas.

Esto tal vez pueda explicarse por el mayor cuidado que suele ponerse en la fabricación de las probetas.

A la hora presente puede decirse que «no existe ningún método capaz de darnos la verdadera resistencia del hormigón de una obra, sobre la base del ensayo standard verificado con probetas del mismo hormigón».

Tampoco son iguales las *velocidades de ganancia de resistencia* para ambas clases de hormigón. Entre otros, los factores siguientes pueden ser responsables de esta diferencia de valores:

- 1) Homogeneidad de las mezclas.
- 2) Transporte del hormigón.
- 3) Compactación, vibrado y consolidación.
- 4) Condiciones de curado

}	Temperatura.
	Humedad.
- 5) Condiciones de curado en las primeras 24 horas después del vertido.
- 6) Efectos de la diferencia de dimensiones de estructura y probetas sobre:
 - a) Compactación.
 - b) Humedad.
 - c) Secado.
- 7) Métodos de ensayo.

IV. Métodos de ensayo

La técnica solamente dispone de tres métodos para hallar la verdadera resistencia actual del hormigón de una obra:

- 1.º Carga y rotura de la estructura.
- 2.º Extracción de probetas.
- 3.º Métodos no destructivos.

La carga, en condiciones reales, de un elemento o de una estructura completa para calcular la contribución del hormigón a la capacidad para soportar cargas en la estructura, no es tan eficaz como pudiera parecer a primera vista.

El ensayo puede venir afectado por errores en el método de cálculo empleado para fijar dicha contribución. Por ejemplo, las excentricidades iniciales que tal vez existan en el ensayo a rotura de columnas o soportes pueden ser superiores a las fijadas en el proyecto. Las excentricidades reducen la capacidad portante, y esto, aparentemente, da una indicación falsa, por defecto, de la resistencia del hormigón.

Por otra parte, este ensayo no suministra ninguna información respecto a cómo varía la resistencia del hormigón en la estructura ni qué tipo de dispersión existe.

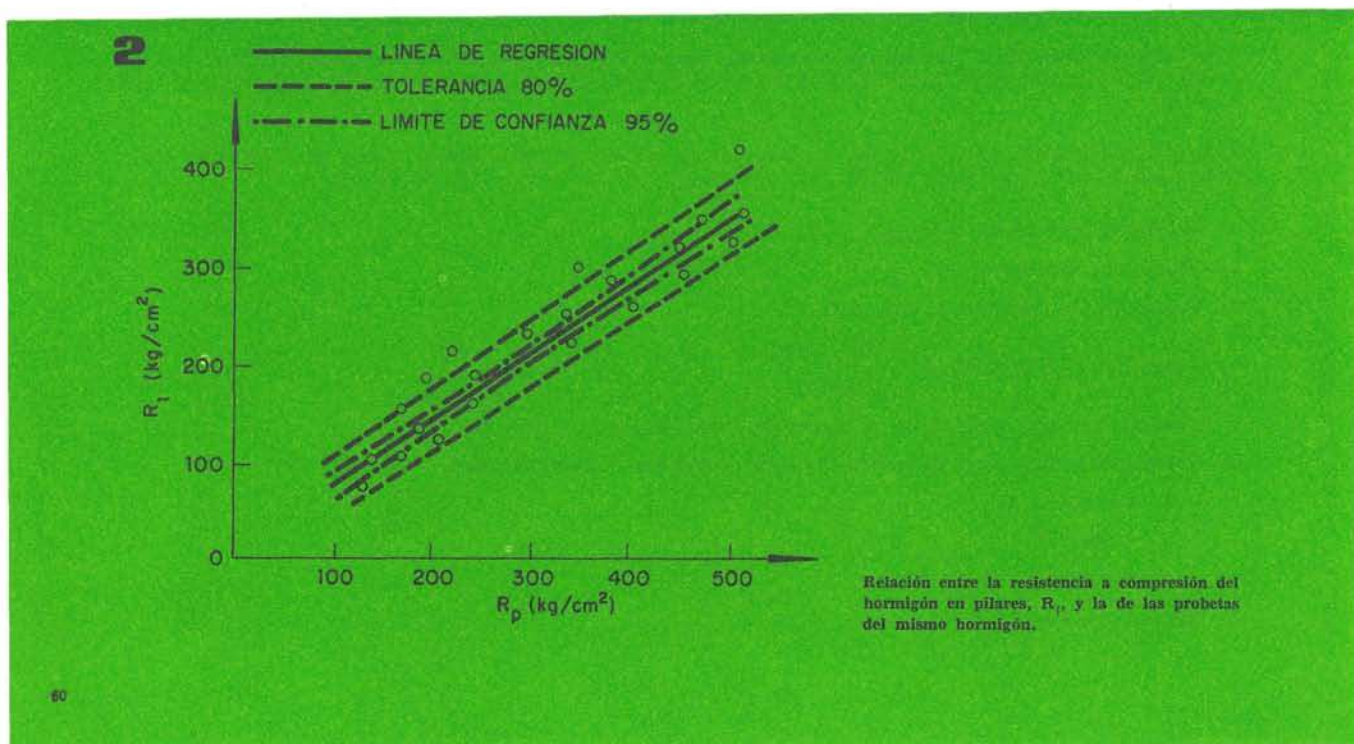
No obstante, y con fines de orientación, la figura 2 muestra los resultados estadísticos de una serie de roturas verificadas con soportes de hormigón concéntricamente cargados y su relación con la resistencia de probetas cúbicas de 15 cm moldeadas al mismo tiempo que las columnas.

La recta central representa la línea de regresión cuya ecuación es:

$$R_t = 0,66 \cdot R_p + 7, \quad [1]$$

que parece válida para hormigones de 120 a 480 kg/cm².

Los cálculos basados en numerosas roturas de columnas concéntricamente cargadas muestran que su resistencia-límite viene a ser, por término medio, un 68 % de la resistencia de rotura de las probetas cúbicas y, en algunos casos, solamente un 56 % de este valor (Petersons, 1964).



Cuando la carga es excéntrica y el total de la sección transversal está sujeto a compresión, el efecto predominante sobre la seguridad contra el fallo se produce por la desviación standard en la excentricidad.

Hay, finalmente, otro efecto a tener en cuenta cuando se trata de las dispersiones de resistencias en elementos verticales. Generalmente, las porciones superiores de las columnas y muros ofrecen una resistencia más baja —y una dispersión más alta— que el resto del elemento (ver V.2).

Estas diferencias, aun con hormigones que no presenten segregación aparente, pueden alcanzar fácilmente valores del 10 %.

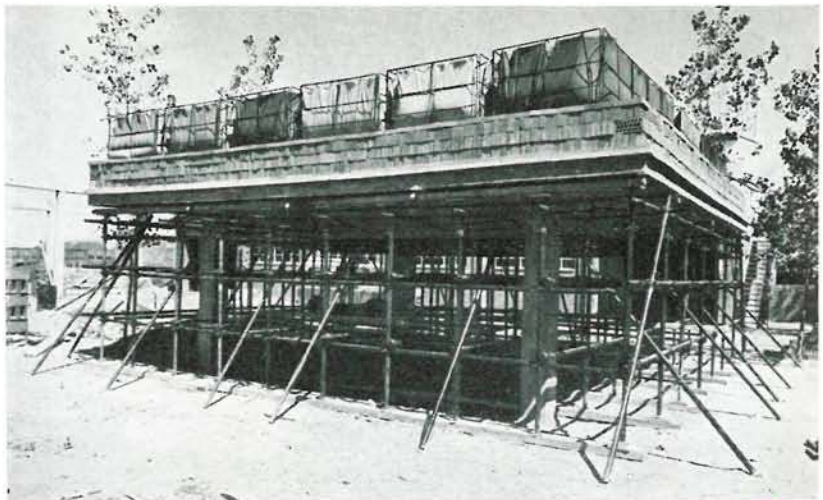
IV.1. Ensayos de deformación

Ya hemos indicado que los ensayos a rotura —carga límite— de piezas naturales son complicados e incómodos y, por supuesto, antieconómicos. Pero no lo son tanto cuando de lo que se trata es de comprobar el comportamiento elástico in situ de una viga, un forjado o cualquier otro elemento horizontal.

El Instituto dispone de equipos portátiles para la comprobación de deformaciones de compresión, tracción, torsión, flexión o flechas, empleando comparadores mecánicos de gran precisión, bandas extensométricas eléctricas, dispositivos ópticos y otros, cuya misión específica es determinar la función carga-deformación para diversos casos prácticos.

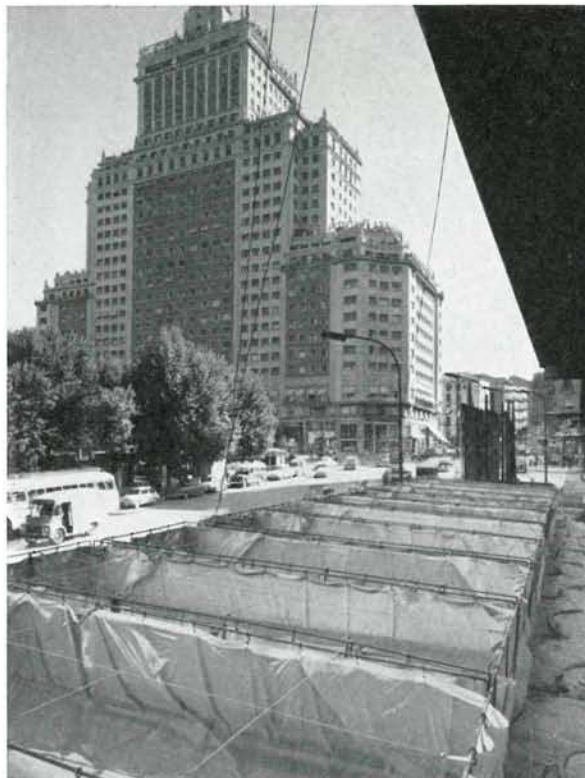
La figura 3 muestra las balsas utilizadas por nosotros para cargar uniformemente, por medio de agua, una superficie. En la figura se está cargando un voladizo existente en un edificio madrileño.

La figura 4 es el ensayo de carga de un forjado experimental de edificación, donde pueden apreciarse las precauciones adoptadas y la disposición general del mismo.



4

Carga uniforme de un forjado experimental.



3

Balsas para cargar, por medio de agua, una superficie.



5

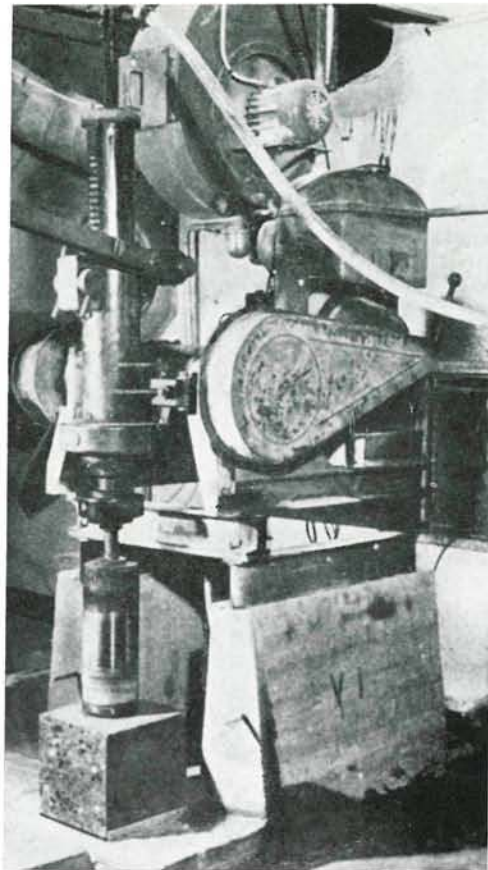
Máquina portátil para la extracción de testigos.



6

Corona o broca de diamante.

Estos ensayos son de carácter no destructivo y muchos de ellos han sido llevados a cabo en anfiteatros de salas de espectáculos y lugares análogos.



7

Máquina para extraer cilindros de probetas cúbicas.

IV.2. Extracción de testigos

Es el sistema más práctico —mucho más que el de cortar cubos con sierra— para extraer probetas del hormigón terminado. La figura 5 muestra una de las máquinas de extracción empleadas en el Instituto, con todas sus variantes de movimiento: motor de gasolina, eléctrico y de aire comprimido.

Puede trabajar en cualquier posición y en casi cualquier entorno. Su peso es de solamente 75 kg.

Las máquinas portátiles que usan brocas de diamante concrecionado, como la de la figura 6, llevan motores de 3 a 5 CV. y pueden extraer un testigo de 15×30 cm en unos 15 minutos, si bien esto es función de la calidad del hormigón, presencia de hierros, etc.

La velocidad de giro debe ser de 800 a 1.000 r.p.m. y el agua que se inyecta como lubricante-refrigerante debe suministrarse a una presión de unos 5 kg/cm².

Durante la perforación, la corona debe presionar con firmeza contra el hormigón, porque, si no es así, los diamantes pueden quedar pulidos en unos pocos minutos y perder rápidamente su poder de corte.

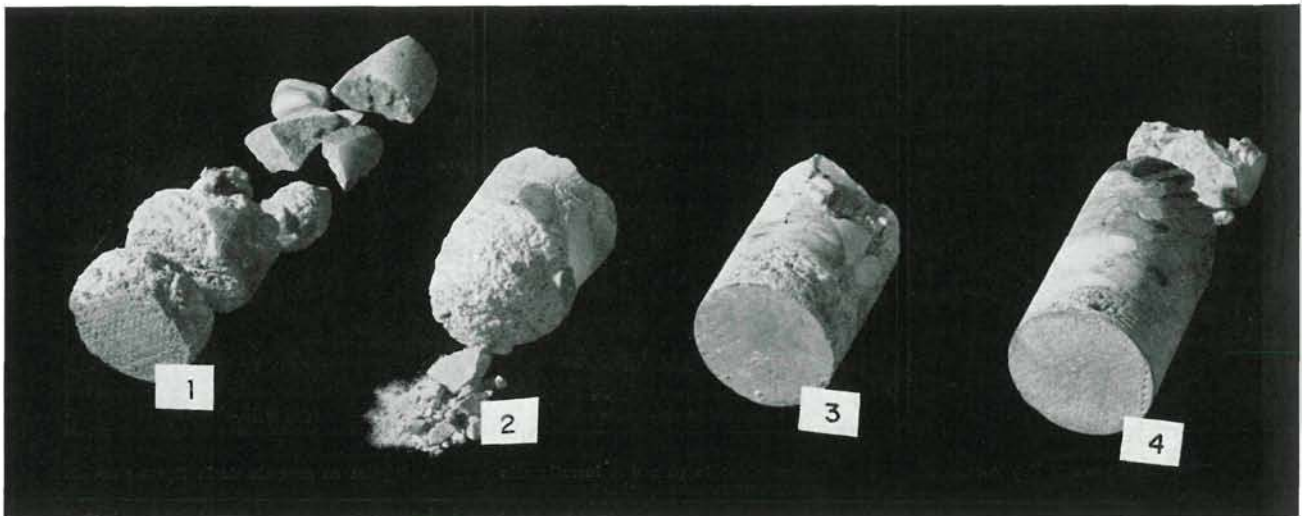
Cuando se quiere hacer una correlación entre la resistencia de probetas cúbicas y cilindros extraídos de las mismas, se utiliza una máquina fija como la de la figura 7.

Una máquina sencilla, como la de la figura 5, y unas brocas o coronas de diamante, como la presentada en la figura 6, son suficientes para obtener testigos de hormigón de unos 10 cm de diámetro a cualquier profundidad.

Una vez en posesión de estos testigos hay muchas posibilidades. Pueden tallarse con disco de diamante y refrentar sus caras para obtener probetas, de las cuales la prensa nos dará la resistencia.

Se pueden estudiar juntas de carretera o de otra clase. Pueden trocearse en rajás, como el salchichón, para estudiar la variación de la densidad en profundidad, reparto de áridos, granulometría, porosidad, insuficiencia de vibrado, armaduras que no corresponden al proyecto y otros trucos.

En cerca de 10 años de actividad de la División de Metrología hemos tenido ocasión de explorar hormigones de las más diversas procedencias y de las calidades más nefastas. Unas veces en el fondo de unos trujales de aceite, a 10 m de profundidad, o en la planta 20 de una estructura.

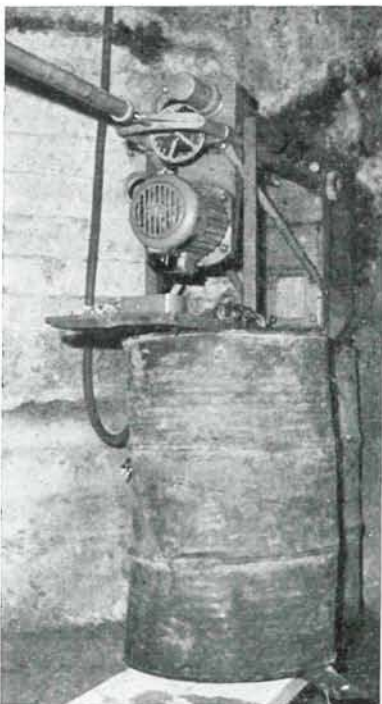


Testigos obtenidos en una misma losa. **8**

La figura 8 muestra los diferentes testigos que pueden encontrarse en una misma losa de hormigón, a distancias relativamente próximas. Desde una probeta casi normal, hasta un montón de piedras sin coherencia alguna. Obsérvese la probeta número 2 con una zona carente en absoluto de grava.

Resulta increíble que puedan pertenecer al mismo elemento. Esto nos confirma, una vez más, cuanto decíamos antes de la dispersión.

Otras veces nuestras máquinas descienden al fondo de un depósito de aceite (fig. 9) para intentar descubrir el origen de unas filtraciones o fugas. Los testigos obtenidos en este ensayo fueron altamente elocuentes (fig. 10).



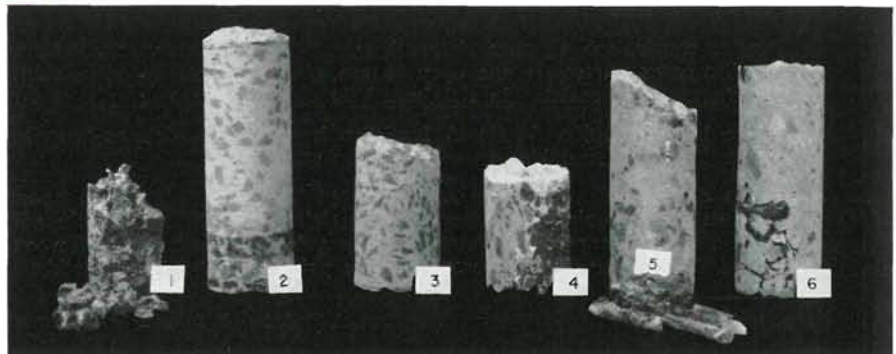
Emplazamiento de la máquina en el fondo de unos depósitos.

9

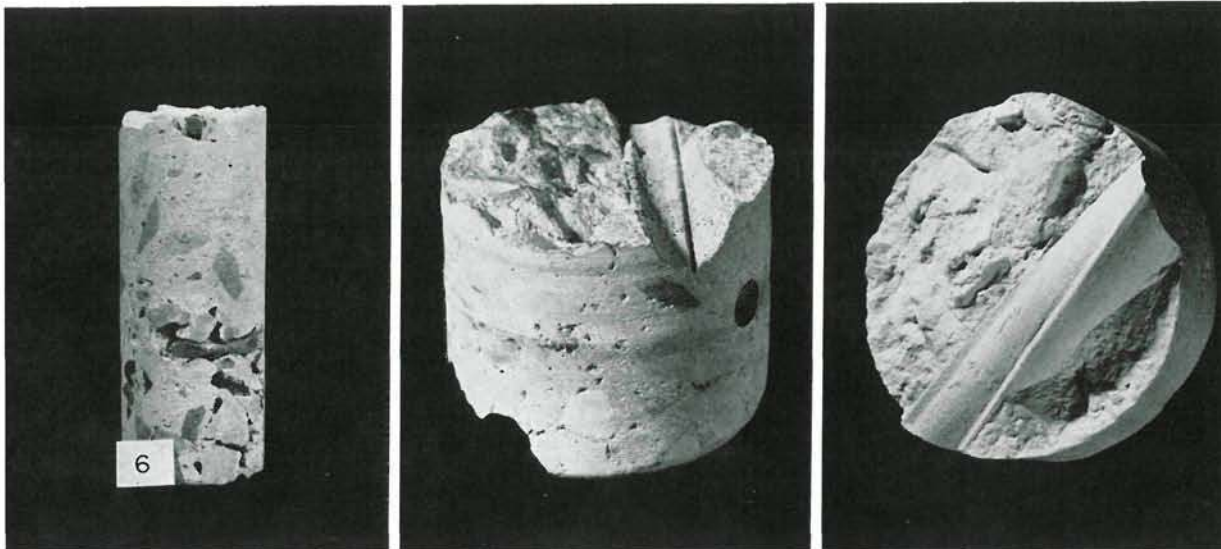
Revelaron un fuerte ataque del hormigón por el aceite, provocando una destrucción parcial del mismo, con la formación de jabones calcáreos de apariencia ccrea.

Veamos en un primer plano uno de los testigos. El aceite, penetrando como un verdadero cáncer (fig. 11), alcanzó la zona de armaduras, ocasionando cavidades recubiertas interiormente de jabones. El resto del testigo estaba sano.

10



Diferentes testigos en los que se revela el ataque del hormigón por el aceite.



11 Detalle de un testigo corroído.

12 Testigo obtenido para una investigación de armaduras.

13 Réplica en escayola de la figura anterior.

En otras ocasiones, la labor es de tipo policíaco. Un proyectista sospechaba que las barras colocadas en una obra totalmente terminada no correspondían a las condiciones de proyecto. Una perforación hasta alcanzar la zona de hierros permitió obtener el testigo de la figura 12.

Mediante vaselina y un contramolde de escayola pudo obtenerse la «huella digital» en relieve de la figura 13, que constituyó la prueba fehaciente de que las armaduras habían sido trucadas.

Puede decirse, *sin duda*, que el método de extracción de testigos, cuando se realiza con todo esmero, es el único procedimiento que puede considerarse como «patrón» y utilizarse como medio para el tarado de otros métodos.

Por otra parte, cuando los resultados de la exploración esclerométrica, del ultrasónico, la gammagrafía y la rotura de probetas no satisfacen plenamente al usuario, no hay otra solución que penetrar en el alma del hormigón para arrancarle sus secretos. Resulta sorprendente la cantidad de cosas que pueden descubrirse y de las que no vamos a hablar ahora.

IV.3. Ensayos no destructivos

El otro grupo de métodos de ensayo para hormigones en obra es el de los típicamente no destructivos, cuyo tratamiento «in extenso» se ha hecho en otro trabajo (1).

La determinación de la velocidad de un impulso ultrasónico, los métodos esclerométricos y el empleo de radiaciones nucleares son los más importantes para hormigones en obra, y los dos primeros, los más utilizados.

No obstante, es de advertir que, tanto los métodos superficiales (esclerómetro) como los ultrasónicos, se emplean para medir las *propiedades elásticas* del hormigón y no su resistencia. De ahí su más importante limitación.

Pueden servir, eso sí, para determinaciones cualitativas y para estimar las *variaciones de resistencia* en las diferentes partes de una obra (o sea, para estudiar la dispersión), pero su utilidad para obtener *directamente* la resistencia del hormigón en obra debe ser puesta en duda.

Desde la publicación de (1) el Instituto ha realizado algunas contribuciones en este campo, muchas de las cuales están recogidas en un libro reciente (2).

En lo que se refiere a los *ensayos ultrasónicos*, la más reciente aportación del I.E.T.c.c. es la puesta a punto de un equipo transistorizado portátil (3), cuyo peso es de solamente 3,5 kg y su volumen de 2.950 cm³, y que permite determinar la velocidad de propagación en macizos de hormigón de hasta 70 cm de espesor (aunque esto depende principalmente de la calidad del hormigón estudiado).

(1) TOBÍO, J. M.: *Ensayos no destructivos. Métodos aplicables a la construcción*. Editado por el I.E.T.c.c., febrero 1967, 383 págs.

(2) ARTEAGA, R.: *El hormigón en la construcción*. Valencia, 1967.

(3) TOBÍO, J. M.: *Medidor ultrasónico portátil*. INFORMES DE LA CONSTRUCCIÓN, núm. 198, marzo 1968.

La figura 14 muestra, juntamente con sus dimensiones, el aspecto final del aparato. El funcionamiento del mismo puede comprenderse a la vista del diagrama de la figura 15.

El equipo descrito, que puede servir como ejemplo de un aparato de esta clase, permite determinar, en la obra, la velocidad de propagación de la onda elástica (V) en m/s, en una sección transversal de hormigón.

Este parámetro puede usarse directamente para calcular el *módulo elástico dinámico* (E) del hormigón, mediante la conocida fórmula:

$$E = 1,02 \cdot V^2 \cdot \gamma \cdot \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \times 10^{-3}, \quad [2]$$

en la que γ es el peso específico, en kg/m³, y μ el módulo de Poisson.

El paso del valor E a la resistencia es siempre un compromiso y presenta las limitaciones señaladas anteriormente al hablar de propiedades elásticas y resistencia.

Una vez determinado E por la fórmula [2] pueden utilizarse expresiones tales como las siguientes, todas ellas empíricas, para pasar a valores de resistencia:

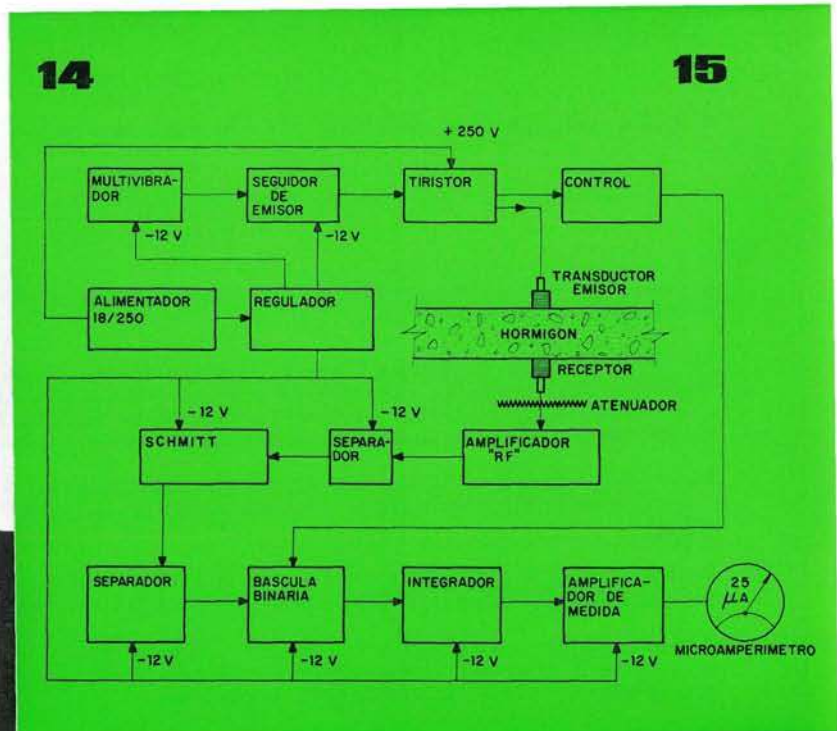
$$\left. \begin{aligned} E &= 52.100 \cdot R^{0,342} \text{ (para cemento portland).} \\ E &= 49.900 \cdot R^{0,346} \text{ (para cementos de alta resistencia inicial).} \\ E &= 55.000 \cdot R^{0,363} \text{ (para cementos de alto horno).} \end{aligned} \right\} [3]$$

Si se hace intervenir la relación agua/cemento (a/c), pueden valer las fórmulas:

$$\begin{aligned} E &= [1,9(a/c) + 1,3] \cdot 10^4 \sqrt{R_c} \text{ (para hormigones curados en atmósfera húmeda).} \\ E &= [1,3(a/c) + 1,7] \cdot 10^4 \sqrt{R_c} \text{ (para hormigones conservados al aire).} \\ E &= [3,4(a/c) + 0,5] \cdot 10^4 \sqrt{R_c} \text{ (para hormigones conservados en atmósfera saturada).} \end{aligned}$$



Aparato portátil para la exploración ultrasónica.



Esquema funcional del aparato de la figura anterior.

Para pasar de valores de velocidad a resistencia en probeta cúbica de laboratorio pueden utilizarse las fórmulas:

$$\left. \begin{aligned} \log R_c &= 8,737 \cdot \log V - 29,5 \text{ (hasta } 400 \text{ kg/m}^3\text{)}, \\ \log R_c &= 9,444 \cdot \log V - 32,2 \text{ (hasta } 300 \text{ kg/m}^3\text{)}, \\ \log R_c &= 6,413 \cdot \log V - 21,1 \text{ (hasta } 200 \text{ kg/m}^3\text{)}, \end{aligned} \right\} \quad [4]$$

que tienen en cuenta tres dosificaciones en cemento.

Hansen (1960 y 1962), entre otros, estudió detalladamente la relación entre el módulo E y la resistencia a compresión y mostró que no era posible obtener una relación directa real entre ambos parámetros.

Las propiedades elásticas de los áridos y el porcentaje de pasta de cemento ejercen un gran efecto sobre las propiedades elásticas del hormigón, mientras que sus efectos sobre la resistencia a compresión son mucho menores.

La relación deducida por Hansen

$$E = \frac{600.000}{0,6 \sqrt[2,5]{\frac{R_c}{1.160} + 0,7}} \quad [5]$$

juntamente con la ecuación [2], conduce a la relación:

$$R_c = \frac{322}{\left(\frac{K}{V^2} - 0,7\right)^{2,5}}, \quad [6]$$

en la que $K = 600.000/K_1$, y K_1 es la constante de la ecuación:

$$E = K_1 \cdot V^2, \quad [7]$$

donde el parámetro K_1 engloba los valores $\gamma = 2.400 \text{ kg/m}^3$; $\mu = 0,2$; $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, que intervienen en la [2]. Su valor es:

$$K_1 = 22 \times 10^{-3}. \quad [8]$$

Para este caso particular, $K = 27,2 \times 10^6$, y llevando este valor a la [6]

$$R_c = \frac{322}{\left(\frac{27,2 \times 10^6}{V^2} - 0,7\right)^{2,5}}, \quad [9]$$

tenemos otra fórmula para relacionar la resistencia a compresión (kg/cm^2) en probeta cúbica con la velocidad de propagación V (m/s).

No hay que esperar, sin embargo, que los valores obtenidos por la relación [9] estén de acuerdo con los resultados de los ensayos experimentales. En realidad, el módulo E viene influenciado por factores tales como el porcentaje de pasta de cemento, el método de amasado, las condiciones de curado, el tamaño (y tipo) de partículas de árido, la relación agua/cemento y la edad del hormigón.

Puesto que el hormigón se compone de diversos materiales, los cuales difieren en sus propiedades elásticas, el módulo E es, en realidad, un valor medio de los módulos elásticos de los diferentes constituyentes.

Cuando se mide la velocidad V a lo largo de una trayectoria dada de hormigón, puede suponerse que el haz ultrasónico encuentra a su paso un 75 % de árido y un 25 % de pasta de cemento.

Hay que esperar, por ello, que el módulo E , cuando se mide ultrasónicamente, debe ser muy sensible a las propiedades del árido, mientras que los cambios en la pasta de cemento deberán tener un efecto más importante sobre la resistencia a compresión.

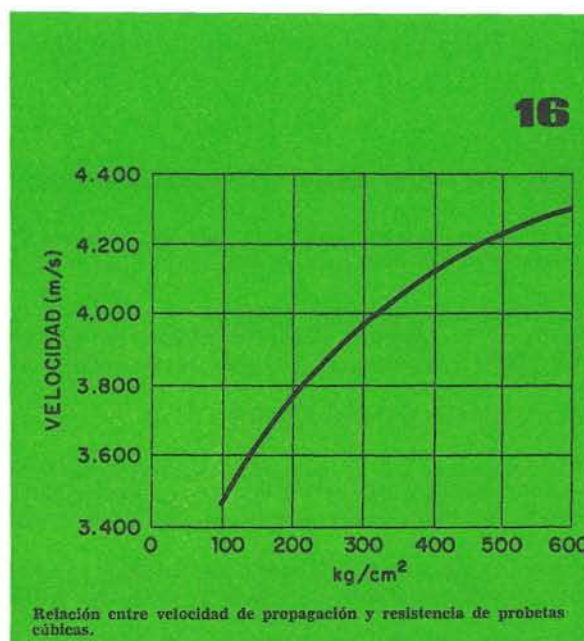
De cualquier modo, la ecuación [9] representada en la curva de la figura 16 puede valer como una primera aproximación.

Otros factores estudiados en los últimos tiempos se refieren a la influencia que las condiciones de curado, los áridos, la relación a/c y la dosificación del hormigón poseen sobre la velocidad de propagación. Se ha visto así que, en general, V aumenta cuando aumenta el tamaño del árido grueso, cuando disminuye el porcentaje de pasta de cemento, cuando baja la relación agua/cemento y cuando aumenta el contenido en humedad.

También se ha visto que un cambio del 1 por 100 en la velocidad ultrasónica de propagación corresponde a un cambio del 10% en la resistencia del hormigón. Se ha comprobado, igualmente, que la velocidad medida perpendicularmente a la dirección de vertido del hormigón (caso de un pilar, por ejemplo) es inferior a la velocidad en sentido vertical.

Ello nos muestra que, para una eficaz representatividad de los testigos obtenidos en un pilar, la dirección de perforación debería ser vertical, cosa que, en general, es prácticamente imposible. Puede afirmarse, de la experiencia, que los testigos obtenidos normalmente al eje del pilar darán una resistencia un 12% más baja que los extraídos verticalmente. Y que la resistencia «vertical» viene a equivaler a la resistencia del hormigón de una viga confeccionada con la misma masa.

Todo ello deberá tenerse en cuenta al tratar de juzgar la resistencia verdadera del hormigón y al establecer comparaciones entre unos métodos de ensayo y otros. Más detalles sobre estas particularidades pueden verse en el capítulo siguiente.



V. La resistencia in situ

En última instancia, el conocimiento lo más exacto posible de la resistencia real del hormigón de una estructura resulta imprescindible al director de obra, en gran número de casos.

Analizando esto con más detalle vemos que, por ejemplo, cuando hay que estimar el comportamiento en carga de una estructura o saber cuál es el coeficiente de seguridad real que estamos empleando, es de supremo interés conocer la relación entre la resistencia actual de los elementos de la obra y la de las probetas a 28 días, o las resistencias supuestas obtenidas por los ensayos no destructivos.

Otras veces este conocimiento se hace preciso cuando se trata de someter una estructura a cargas superiores a las de proyecto, tal como ocurre en el caso de un recrecimiento posterior.

Sin embargo, el caso más frecuente, al menos desde el punto de vista de un laboratorio como el nuestro, es dictaminar, en base a los datos suministrados por las técnicas de la Metrología, si una estructura resulta adecuada a la finalidad prevista *aun cuando las resistencias de las probetas obtenidas del mismo hormigón hayan resultado anormalmente bajas.*

No puede ocultarse la grave responsabilidad que entraña una decisión de esta índole por cuanto la disyuntiva que se presenta: demolición de la obra o continuación de la misma, puede llevar consigo graves repercusiones económicas.

En este capítulo trataremos de exponer las consideraciones, la mayoría de orden práctico, que en nuestro trabajo habitual hemos de tener en cuenta para que un dictamen de este género, avalado por una profusión de datos experimentales, se aproxime lo más posible a la realidad.

Todo ello no puede lograrse, en general, con una sola técnica de trabajo. Es preciso poner a contribución la acción combinada de dos o más procedimientos, ponderando, combinando y analizando cuidadosamente los resultados.

V.1. El contraste esclerométrico

Ya hemos mencionado que el esclerómetro, en sus diversas formas, no permite encontrar la resistencia a compresión del hormigón de una obra. Pero es una gran ayuda para ello.

Imaginemos una estructura formada por centenares de elementos —soportes y vigas— que deba ser explorada en su totalidad. Cualquier sistema de medida (ultrasónico, por ejemplo) resultaría extremadamente largo y costoso, no sólo en su realización, sino en el tratamiento posterior de los datos obtenidos.

En una palabra: no sería práctico.

El esclerómetro, por el contrario, permite obtener una visión de conjunto con poco esfuerzo y en un tiempo razonable. Agrupando los índices esclerométricos medios en tres clases: altos, medios y bajos, siempre es posible elegir uno (o varios) elementos que pertenezcan a una de estas tres clases.

Escogidos éstos, es posible concentrar en ellos una serie de técnicas «más finas», más costosas y elaboradas, tendentes a hallar su verdadera resistencia mediante los métodos citados anteriormente.

La correlación resistencia real-resistencia esclerométrica puede, ahora, hacerse extensiva al resto de los elementos considerados, con lo que se obtendrá una visión resistente de conjunto de la totalidad de la obra.

El llevar a buen fin esta operación es el objeto principal del ensayo.

V.2. Elementos verticales y horizontales

La experiencia ha mostrado que, siendo todas las demás condiciones iguales, un incremento en el contenido de agua del hormigón fresco origina, primeramente, una reducción en la resistencia a compresión y, además, una disminución en la densidad (o peso por unidad de volumen) del hormigón endurecido.

Una compactación insuficiente produce también los mismos efectos. Un aumento del 1 % en el volumen de huecos del hormigón corresponde, aproximadamente, a una reducción del 7 % en la resistencia, siendo esta reducción independiente de la edad y de la composición del hormigón (Kaplan, 1960).

Si pensamos en lo que ocurre en un soporte recién fabricado es fácil comprender que, después de que el hormigón ha sido puesto en el encofrado y después de efectuada la compactación-vibración, toda la masa actúa ejerciendo una *presión hidrostática*.

Comienza el fraguado y se forman los componentes del gel de cemento, al principio como una estructura fibrosa gruesa (Grudemo, 1959). Los elementos en forma de bastones o cilindros o los de estructura fibrosa gruesa, comienzan a crecer y llenar los intersticios. Hay entonces un aumento de los puntos de contacto entre partículas (resistencia).

La formación de la estructura de gel requiere algún tiempo. Si la humedad puede ser eliminada de la superficie del hormigón, el agua fluye hacia la superficie debido a la presión hidrostática. Este flujo puede distorsionar la formación de los componentes del gel, modificando la resistencia final del hormigón endurecido.

Claro que este fenómeno no ocurrirá si se mantiene saturada de humedad la superficie del hormigón fresco.

En elementos horizontales, vigas por ejemplo, los efectos de la presión hidrostática son mucho menores y no darán lugar, en general, a estas variaciones de resistencia.

Las diferencias de resistencia encontradas entre las partes bajas y altas de un pilar pueden alcanzar fácilmente valores del 10 %.

Estas circunstancias deben tenerse muy presentes cuando se trata de establecer correlaciones entre lecturas esclerométricas, resistencia de testigos, probetas y datos ultrasónicos.

V.3. La humedad en los ensayos

Cuando el experto en auscultación del hormigón en obra es llamado a estudiar una estructura, ésta no se encuentra, en general, en condiciones óptimas para la medida.

Muchas partes del hormigón estarán húmedas, recién desencofradas o, sencillamente, mojadas. Otras aparecerán como superficies no planas, fisuradas o desconchadas. En ocasiones, el hormigón está recubierto de una capa de algunos milímetros de una sustancia blanquecina, harinosa y deleznable.

Es entonces cuando han de extremarse las precauciones en la ejecución de las medidas, ya que, en caso contrario, los errores cometidos pueden ser de tal envergadura como para dar al traste con el más elaborado plan de ensayos.

Como regla general, *el esclerómetro no debe aplicarse a superficies húmedas*. Sus indicaciones serían erróneas por defecto.

Por el contrario, las lecturas ultrasónicas serán más altas de lo debido en un hormigón húmedo y, puesto que el módulo elástico es proporcional al cuadrado de la velocidad (fórmula [2]), los errores que pueden cometerse son enormes.

Si es posible extraer un testigo de longitud suficiente (basta que tenga unos 50 mm de diámetro) puede servir, una vez seco en estufa, como contraste para el ensayo ultrasónico. No hay más que medir en el testigo la velocidad de propagación.

Puede afirmarse que, trabajando con hormigones húmedos, el único ensayo capaz de inspirar confianza es la extracción de testigos, cuyo tratamiento, hasta la rotura, ha de hacerse luego en el laboratorio.

V.4. Probetas cilíndricas, cúbicas y prismáticas

Cuando en la obra existen probetas, sacadas de las masas del hormigón empleado, lo cual es siempre recomendable, las cosas se pueden complicar mucho. Pueden encontrarse variaciones de resistencia considerables debido a diversas causas.

El tratamiento de las caras de las probetas, el método de confeccionarlas, la dirección de la carga (en prensa), la fricción con los platos de la máquina, el tamaño, y muchos otros factores, pueden dar origen a diferencias considerables de resistencia entre un cilindro y un cubo del mismo material.

Se ha visto, por ejemplo, que el refrentado de las probetas con diversas sustancias: mortero, escayola, azufre, cartón, etc., puede ocasionar diferencias de resistencia de ¡hasta el 30%! (Werner, 1958). Y estas diferencias varían con la geometría de la probeta y con su resistencia absoluta. *Cuanto mejor es el hormigón, más grandes pueden ser las diferencias.*

La conservación y curado también afectan de forma diferente a las distintas clases de probetas.

Generalmente suele emplearse un simple coeficiente para pasar de resistencia en probeta cúbica a probeta cilíndrica. Pero la relación no es lineal y depende, principalmente, de las condiciones de curado y de la resistencia del hormigón.

Si se comparan cilindros de 15×30 y cubos de 15 cm de arista, las fórmulas siguientes pueden ser empleadas:

$$\left. \begin{aligned} R_{cil} &= R_c \left(0,853 - 0,213 \cdot \frac{R_c}{1.000} \right) \text{ (para probetas conservadas al aire).} \\ R_{cil} &= R_c \left(0,844 - 0,117 \cdot \frac{R_c}{1.000} \right) \text{ (para probetas conservadas en agua).} \end{aligned} \right\} [10]$$

Las diferencias, entre otras cosas, pueden derivar del «efecto lubricante del agua» en las caras sometidas a compresión.

Dado que estas diferencias pueden alcanzar hasta el 25 %, deberán tenerse muy presentes al establecer la verdadera resistencia de una obra. Pueden, en algunos casos, significar la recepción o el rechazo de una estructura.

La conversión cubo-cilindro es de excepcional importancia cuando se manejan resistencias dadas por el esclerómetro. No hay que olvidar que el tarado del mismo está hecho con probetas cúbicas de 20 cm de arista.

Generalmente se cree que, a igualdad de forma, la resistencia aumenta al disminuir las dimensiones de la probeta. Esto es cierto con materiales homogéneos. Con el hormigón puede ocurrir esto o lo contrario, dependiendo del tamaño del árido grueso.

Vemos, por ejemplo, en la figura 17 que, para convertir a resistencia de cubos de 20 cm de arista la de cubos de dimensiones más pequeñas, hay un factor de corrección que varía según el tamaño del árido.

Cuando se extraen testigos con broca de diamante, tal como se explicó en IV.2, es frecuente que su esbeltez, relación h/d , sea diferente de 2. Debe aplicarse entonces un factor de corrección. La gráfica de la figura 18 permite hallar este factor para distintas esbelteces. La curva es aplicable, igualmente, a probetas prismáticas.

En realidad, este factor de corrección también es función de la resistencia nominal del hormigón. Para hormigones de alta resistencia la curva de la figura 18 vendría por debajo de la expresada, en el margen $h/d < 2$, mientras que sucedería lo contrario para hormigones blandos.

V.5. La ganancia de resistencia

En obras bien controladas y adecuadamente vigiladas, la alarma suele surgir en los primeros días después de la puesta en obra del hormigón o, en todo caso, alrededor de los 28 días, fecha clave para la rotura de probetas.

El constructor piensa que su hormigón, que sólo ha alcanzado a los 28 días (en probetas) una resistencia mitad de la prevista, no resulta adecuado a la finalidad perseguida. Esto no siempre es cierto.

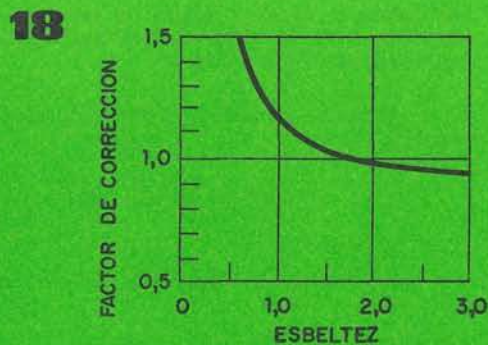
Innumerables estructuras pueden salvarse por una ponderación juiciosa e inteligente de los datos de los ensayos no destructivos ejecutados sobre ellas.

Se olvida —a menudo— que no todos los cementos poseen igual *velocidad de ganancia de resistencia* y que esta velocidad puede venir considerablemente influenciada por factores climatológicos, humedad, soleamiento y otros. También es muy importante el curado durante las primeras 24 horas (ver III).

En ocasiones, un eficaz regado de la estructura durante unas semanas hace aumentar la resistencia del hormigón en un 50 % o más. Otras veces es suficiente esperar a que se desarrolle el endurecimiento que, por las razones que sean, viene con retraso en ciertos tipos de hormigón.



Corrección de resistencias en cubos en función de la arista.



Corrección de resistencias por relación altura : diámetro.



Factor de corrección para la resistencia del hormigón en función de la edad.

punto indicado en la gráfica corresponde a la resistencia a 28 días.

La gráfica mostrada es puramente de orientación. En la práctica, su hábito puede ser muy diferente de acuerdo con el tipo de cemento, finura, clase de árido, relación agua/cemento, compactación, temperatura durante el amasado, tiempo de éste, condiciones climatológicas diurnas y nocturnas, humedad, etc.

Con todo ello queremos indicar que unas probetas malas a 28 días no significan *necesariamente* la demolición de la estructura. A esta conclusión sólo puede llegarse, por supuesto, después de un estudio profundo en el que se ponderen debidamente los resultados de los análisis y ensayos realizados por un laboratorio de garantía, y las circunstancias particulares de la obra.

VI. Ensayos no resistentes

En todo lo mencionado hasta ahora, la preocupación constante ha sido la resistencia del hormigón. Esto es lo que suele ocurrir en la mayor parte de los estudios de este tipo.

Hay, sin embargo, ocasiones en las que la finalidad principal del ensayo no tiene nada que ver con la resistencia en sentido estricto, sino más bien con el estado general (incluido el estado resistente) de una estructura o parte de ella.

Tal ocurre, por ejemplo, cuando se pretende averiguar, sobre la obra, el estado de fisuración de un hormigón, la presencia de coqueas, cavernas, grietas, discontinuidades, fallos, armaduras, juntas frías y otros defectos.

Un ejemplo de esta clase de ensayos, llevado a cabo por la División de Metrología, lo constituye el realizado sobre un macizo de hormigón muy armado, de unos 1.200 m³, destinado a soportar un turboalternador de gran potencia, propiedad de una importante firma eléctrica nacional.

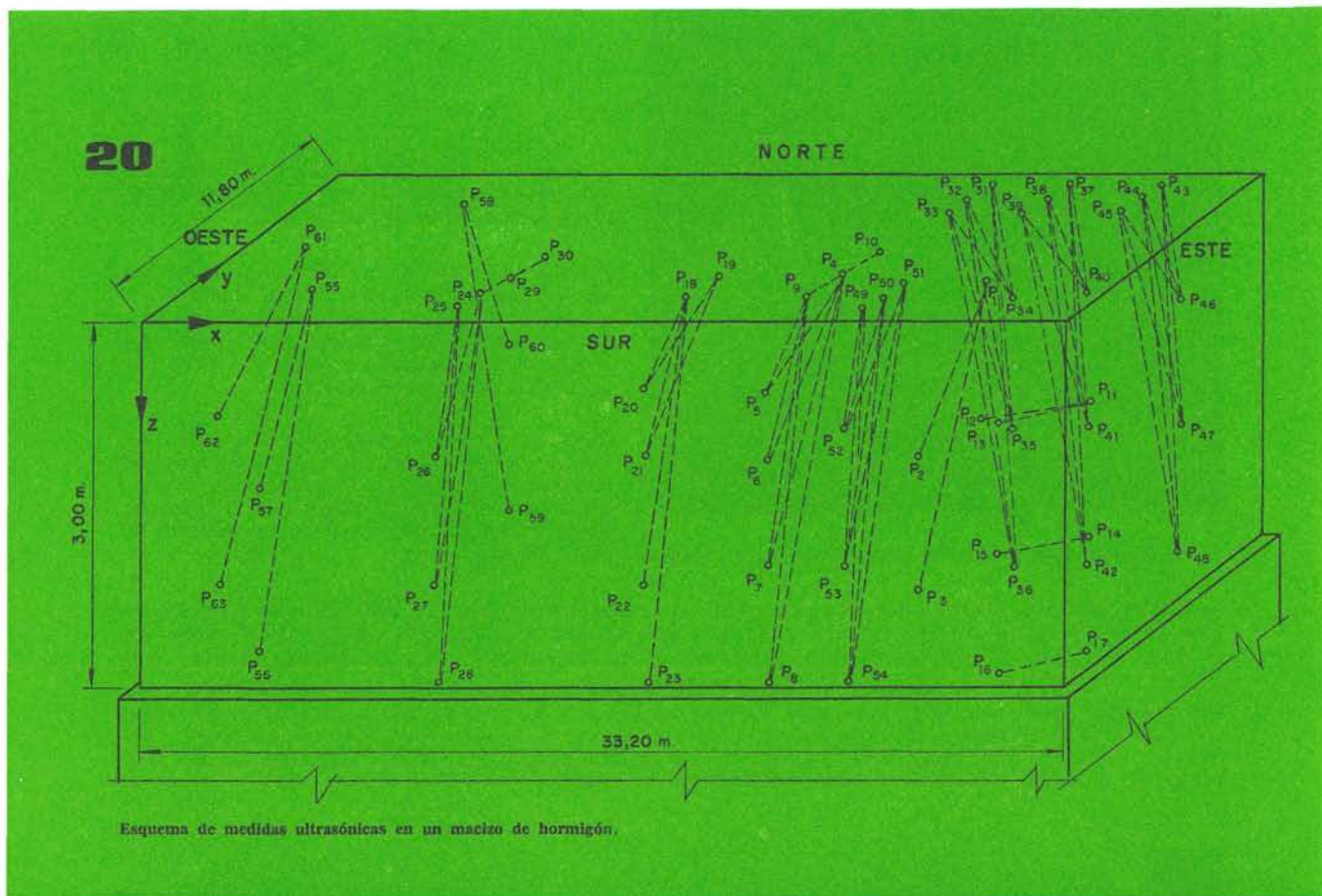
Dadas las condiciones en que se realizó el vertido de una cantidad tan grande de hormigón, existía la sospecha de que pudiera haber alguna junta fría, con los consiguientes peligros frente a las sollicitaciones dinámicas impuestas por el alternador durante su funcionamiento.

Aparte de un estudio completo del hormigón del macizo, a base de extracción de testigos, determinación de módulos elásticos por resonancia (en el laboratorio), esclerómetro, etc., la parte más saliente del ensayo consistió en la determinación de las velocidades de propagación ultrasónica a lo largo de una serie de trayectorias.

El esquema de la figura 20 da una idea del trabajo realizado. Entre cada par de puntos de los señalados en el croquis se hizo una medida de tiempos de propagación con un equipo ultrasónico.

Se fijaron 63 puntos de medida (P_1 a P_{63}), y entre cada pareja de puntos (casi siempre colocados en las caras de un diedro) se hizo una medida de tiempo de propagación, con un total de 74 determinaciones.

Los valores de las coordenadas tridimensionales de cada par de puntos ($X_i, Y_i, Z_i; X_j, Y_j, Z_j$), juntamente con los tiempos, en segundos, hallados para cada medida, se introdujeron como datos en un ordenador NCR 803 para su proceso.



Se obtuvieron así las velocidades, en metros/segundo, correspondientes a cada trayectoria y, mediante la fórmula [9], se pasó a valores de resistencia, si bien esto, como decíamos al principio, era una cuestión secundaria.

La distribución estadística de velocidades (de 4.000 a 3.000 m/s) y resistencias puede verse en el gráfico de la figura 21, que es suficientemente elocuente.

Puede observarse, en efecto, que la calidad del macizo es estadísticamente buena, puesto que un elevado porcentaje de velocidades se encuentra entre 4.000 y 3.000 m/s. Esto da idea de que no existen juntas frías y que, globalmente, la estructura puede considerarse como aceptable.

VII. Consideraciones finales

En este trabajo hemos querido hacer resaltar la complejidad de los ensayos en obra —que casi siempre resultan costosos—, al mismo tiempo que llevar al ánimo del lector que, en la mayoría de los casos, no es difícil establecer un plan de ensayos adecuado.

La técnica dispone de potentes herramientas de trabajo, cuyo empleo conjunto puede esclarecer muchas dudas al constructor. Los fracasos que a menudo se encuentran son debidos, principalmente, a un empleo insuficiente de medios y a un tratamiento inadecuado de los datos de los análisis.

No es posible, en general, condenar o aprobar una estructura de hormigón como consecuencia de los controles de obra, pues no siempre éstos reflejan el verdadero y actual estado resistente de la misma.

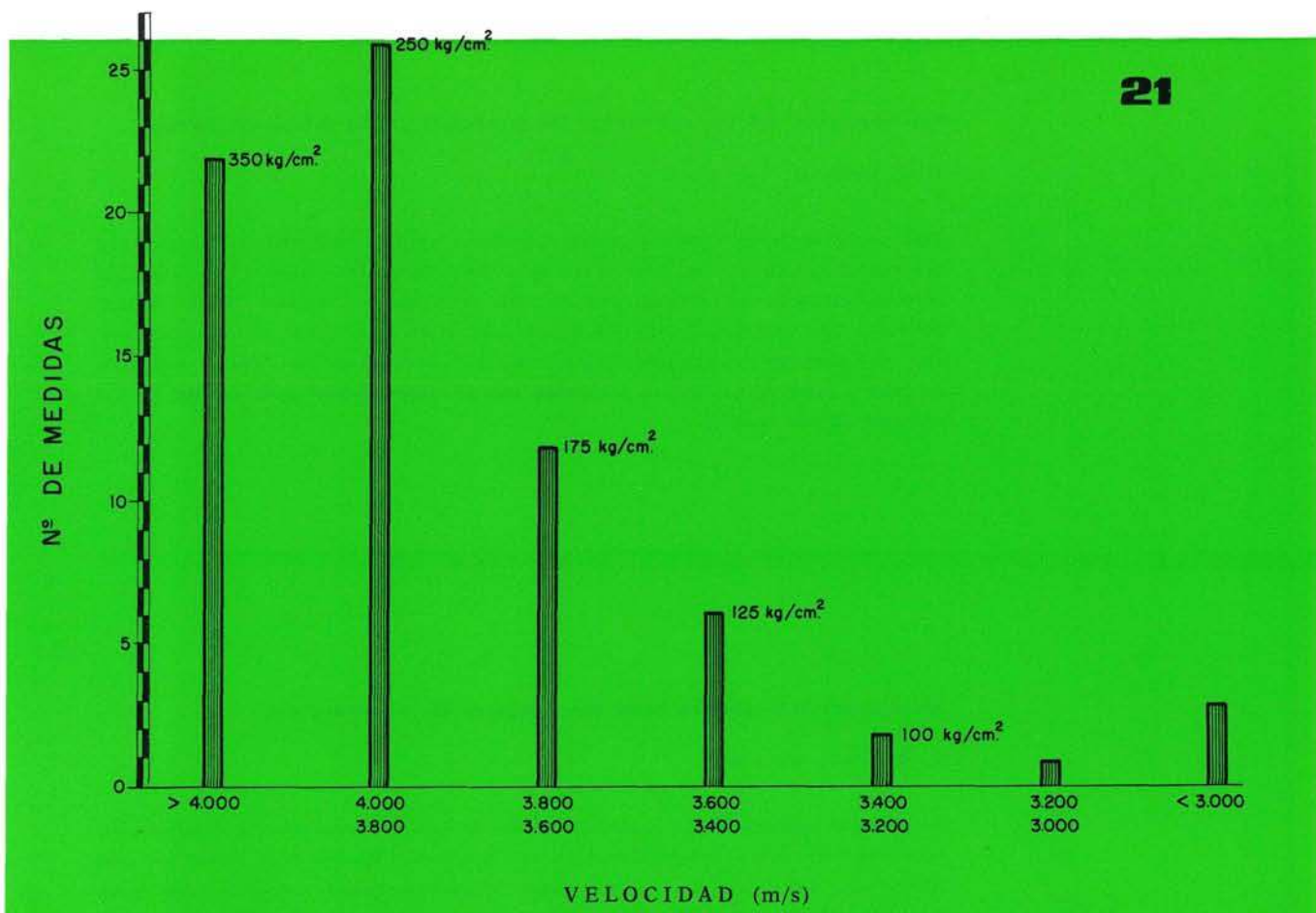
Estos datos son de suma importancia —esto no puede dudarse—, pero resultan, en muchos casos, insuficientes.

Los avances producidos en la técnica de ensayo, al alcance de cualquier laboratorio bien equipado en material y personal, permiten ensanchar los límites impuestos a la auscultación del hormigón armado, más allá de las simples operaciones de control.

En suma, puede afirmarse que si no hay limitaciones de tiempo y dinero, pueden descubrirse las anomalías, los fallos, las imperfecciones de una obra terminada, e incluso averiguar sus posibles causas.

Corresponde al proyectista, al constructor o al director de obra, valorar la conveniencia de estos ensayos in situ y decidir si su realización ha de compensar los perjuicios que, eventualmente, resultarían de la no realización de los mismos.

Fotos: BENJAMIN GUTIERREZ



21

Reparto estadístico de velocidades en el macizo de la figura anterior.

Résistance du béton aux structures terminées

J. M. Tobío, Dr. en Chimie Industrielle

D'un point de vue éminemment pratique, le problème de la véritable résistance du béton terminé est abordé avec certaines indications quant à la sécurité et les dispersions. Quelques méthodes d'essai, spécialement applicables en chantier, sont citées et commentées. Finalement, l'auteur énumère, en détail, les précautions à prendre pour qu'une auscultation non destructive réponde fidèlement à l'état actuel de résistance du béton.

Strength of concrete in completed structures

J. M. Tobío, Dr. Ind. Chem.

This paper deals, in a highly practical manner, with the question of determining the true strength of concrete in its final functional state, and it also contains recommendations on safety, and on the dispersal of results. Some testing methods are mentioned and discussed, which are applicable to working site use, and detailed information is given on the precautions that should be taken so that a non destructive auscultation should give reliable data on the actual strength of the concrete.

Betonfestigkeit bei fertigen Strukturen

J. M. Tobío, Dr. Chem.

Von einem ausgesprochen praktischen Gesichtspunkt aus wird das Problem der wirklichen Festigkeit des Fertigbetons, mit gewissen Angaben über Sicherheit und Streuungen behandelt. Es werden einige Versuchsmethoden angeführt und kommentiert, die besonders für Baustellen geeignet sind, und es werden die notwendigen Vorsichtsmaßnahmen ziemlich genau erörtert, damit eine nicht destruktive Prüfung genau dem gegenwertigen Festigkeitszustand des Betons entspricht.