

666.971.001.4 = 60

614 - 24

empleo del bloque de yeso en la determinación de humedad en las pastas de cemento.-(II)

J. M. TOBÍO

Dr. en Química Industrial
Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento

I. Introducción

En anteriores trabajos (1) se hizo una puesta a punto bastante completa sobre el método del bloque de yeso para la determinación de humedad en el seno de pastas de cemento.

En todos los casos expuestos se trataba de experiencias a corto plazo, no más de veintisiete días, y siempre operando con pastas de portland. En esta ocasión trataremos de ensayos más completos—pastas puras, morteros y hormigones—y, al mismo tiempo, de mayor duración (cerca de dos años).

Como es natural, la larga duración de los ensayos obligó a adoptar ciertas precauciones experimentales, como luego se detallará, tanto en lo que se refiere a la conservación de las probetas como a los sistemas de medida.

Aunque, tal como afirma Nielsen (2), la medida de la humedad en el hormigón es un problema muy delicado, principalmente a causa de la dificultad en definir qué se entiende por "humedad" en dicho material, no parece que las dificultades sean tan grandes cuando se trata de observar la evolución de la humedad en función del tiempo.

Cierto es que aún no se conoce exactamente el mecanismo mediante el cual se produce la difusión de la humedad en el hormigón. La desecación de la masa—o la autodesecación en probetas herméticamente cerradas—es un fenómeno de larga duración, complicado por otros fenómenos periódicos que, en gran parte, son función de la temperatura (6).

Es posible que las técnicas de trabajo por retrodifusión de neutrones por los átomos de hidrógeno del agua (3) ayuden a resolver el problema, tal como han sugerido L'Hermite, Janik y Szkatula (4). También es curioso el aparato descrito por L'Hermite (4) y debido a M. Berthier, basado en la aparición del punto de rocío sobre un pequeño espejo introducido en el hormigón.

La medida de humedad en materiales porosos—y el hormigón es uno de ellos—es de gran interés en relación con los fenómenos de retracción e hinchamiento que acompañan a las variaciones de humedad. Esto también influirá, indudablemente, sobre las propiedades mecánicas.

La estructura de poros de un material sólido como el hormigón es el principal factor de otra de las características de este material: la durabilidad. Honeyborne y Harris (5) han estudiado extensamente cuestiones similares a ésta, estableciendo claramente cómo el "coeficiente de saturación", o sea, la relación entre el volumen de agua absorbida en condiciones normales al volumen de poros accesibles, es una medida indirecta de la durabilidad.

Una información más específica sobre las características estructurales puede obtenerse midiendo la relación entre el contenido en agua y la "succión", término que ya fué enunciado en (1) (ver II). La succión se mide en unidades pF, siendo este valor el logaritmo decimal de la succión, expresada por la altura de la ascensión capilar (en centímetros) del agua en los poros.

Pero este asunto merece ser tratado con cierto detalle, puesto que el hormigón va adquiriendo resistencia durante un cierto número de años (7) siempre que exista agua disponible, bien sea agua externa de curado o el propio agua de la masa si se impide su salida al exterior.

II. Parte teórica

II-1. Relación teórica entre la succión y la humedad relativa.

En general, cuando se observa el flujo de agua en un conducto cualquiera, sabemos que dicho flujo ocurre porque existe una diferencia de presión hidráulica. Del mismo modo, cuando se produce una ascensión capilar en un fino conducto, la elevación del menisco se debe a una dife-

rencia de presiones; y si suponemos que la presión en la base del capilar es cero, la presión debajo del menisco será negativa (1).

Cuando el agua es absorbida por el hormigón seco, el flujo hacia el interior continuará en tanto que exista una presión hidrostática negativa dentro de la masa, respecto a la presión cero en la superficie externa del hormigón. En este caso, la absorción se debe más a la dispersión del agua sobre una enorme superficie interna (del orden de 60 millones de metros cuadrados para un metro cúbico de hormigón), que a los meniscos, pero el efecto es el mismo.

La magnitud de la presión negativa en una región no saturada del hormigón, respecto a la presión cero en una región saturada, es función del grado de saturación de la pasta de cemento en la región no saturada. Es máxima cuando la pasta en la región seca está totalmente desecada, y cero cuando la pasta endurecida se encuentra saturada de humedad. Por ello, se producen presiones potenciales negativas siempre que los poros de la pasta endurecida se encuentren vacíos o parcialmente vacíos.

Generalmente así ocurre en las masas de hormigón. Aun cuando las pastas se encuentren cerradas herméticamente y aisladas totalmente del aire—no perdiéndose agua por evaporación—, el proceso químico de hidratación del cemento reduce el volumen de agua más rápidamente que aumenta el volumen del sólido. De este modo, huecos o poros que antes estaban ocupados por el agua van quedando parcialmente vacíos. A este proceso se le conoce como autodesecación de la pasta (8).

La cantidad de agua extraída de los poros por autodesecación es función del grado de hidratación del cemento. Según cifras dadas por Powers (9), dicha cantidad viene a ser un 28 % aproximadamente de la cantidad de agua que se combina químicamente. Después de un prolongado periodo de hidratación, la cantidad de agua químicamente combinada vendrá a ser un 22 % del peso del cemento. El 28 % de esto es 6,2 %.

En un hormigón que lleve 225 kg de cemento por metro cúbico, la cantidad de agua extraída de los poros por autodesecación viene a ser de unos 14 litros por metro cúbico. Esta sería la cantidad de agua que debería ser añadida al hormigón para mantenerlo saturado. Como esto no se hace en masas confinadas, las presiones hidrostáticas en el interior de la masa serán negativas.

No es difícil, teóricamente, relacionar la succión con el contenido en humedad relativa. Si la succión viene dada en dinas/cm², con valores de *cero* para el material poroso saturado y cifras muy elevadas para el material seco o casi seco, resulta práctico adoptar la notación logarítmica de Schofield (10) de la escala de pF, definido este parámetro como "el logaritmo decimal de la succión, o altura de agua, en centímetros, *h*":

$$pF = \log h. \quad [1]$$

Una succión de una atmósfera, o sea, 1.032 cm de agua, equivale a $pF = 3,014$.

En un cuerpo poroso formado por un conjunto de capilares en los cuales el agua está retenida, al reducirse el contenido en agua, la interfase aire/agua se retrae progresivamente, alcanzando los capilares o canales más finos, distribuyéndose en las fases líquido y vapor de tal modo que, bajo las condiciones de equilibrio, la curvatura eficaz del menisco sea mínima.

Cuando existe una diferencia de presión entre una interfase curva aire/líquido, que proviene de las fuerzas creadas por la tensión superficial en un tubo capilar, la altura de la columna de líquido que asciende por el mismo es una medida de la diferencia de presión y es directamente proporcional a la curvatura de la superficie.

Esto se puede expresar por la relación:

$$P = h \cdot g \cdot \rho = \frac{2\sigma \cos \theta}{r}, \quad [2]$$

en la que *P* es la diferencia de presión (en dinas/cm²); *h*, la altura del líquido en el capilar (en cm); ρ , la densidad del líquido (en g/cm³); σ , la tensión superficial (en dinas/cm); θ , el ángulo de contacto entre el sólido y el líquido; *r*, el radio del capilar (en cm), y *g*, la aceleración de la gravedad (en cm/seg²).

Suponiendo que el ángulo de contacto es cero:

$$P = h \cdot \rho \cdot g = \frac{2\sigma}{r}. \quad [3]$$

La diferencia de presión interfacial también está relacionada con la presión de vapor, con la cual se encuentra en equilibrio la superficie curva. Esta relación se expresa por la ecuación de Kelvin:

$$P = \frac{RT}{M} \log_e \frac{p_0}{p_1}, \quad [4]$$

donde P es la diferencia de presión en la interfase; M , el peso molecular del agua; p_0 , la presión de vapor del agua en superficie libre; p_1 , la presión de vapor de la interfase curva; R , la constante de los gases, y T , la temperatura absoluta.

La ecuación [4] puede expresarse en la forma:

$$P = \frac{RT}{M} \log_e \frac{100}{H}, \quad [5]$$

siendo H la humedad relativa con la cual está en equilibrio la interfase curvada.

Con las ecuaciones [2] y [5] se puede escribir, teniendo en cuenta [1]:

$$h = \frac{P}{\rho g}$$

$$pF = \log \frac{P}{\rho g} = \log \left(2,3 \frac{RT}{M \rho g} \right) + \log (2 - \log H) \quad [6]$$

La ecuación [6] nos permite calcular los valores de la succión (pF) en función de H (humedad relativa) y viceversa, puesto que R , M , ρ y g son magnitudes conocidas y T es la temperatura absoluta. En III-4 veremos esto con más detalle.

II-2. Teoría del detector de bloque de yeso.

Los detectores de bloque de yeso, contruidos tal como se explica en (1), presentan la propiedad de modificar su resistencia óhmica en función de su contenido en humedad. Cuando un detector absorbente de este tipo se introduce en un sólido poroso húmedo se alcanza un equilibrio de tal modo que las succiones en el detector y en el sólido tengan el mismo valor (en pF), aunque, en general, los contenidos en humedad de ambos materiales serán diferentes.

Las variaciones de resistencia eléctrica del bloque con la humedad del sólido—pasta, mortero u hormigón—incluyen tres relaciones que pueden determinarse experimentalmente; a saber:

- a) Relación entre la succión en el bloque y el contenido en humedad del mismo.
- b) Relación entre el contenido en humedad del bloque y su resistencia eléctrica.
- c) Relación entre la succión en el sólido y su contenido en humedad.

Es evidente que la combinación de a) y b) nos da la relación entre la resistencia eléctrica del bloque y la succión en el mismo, que es también la succión del sólido. Combinando esta última relación con la c), tendremos la relación entre la resistencia eléctrica del detector y el contenido en humedad del material sólido.

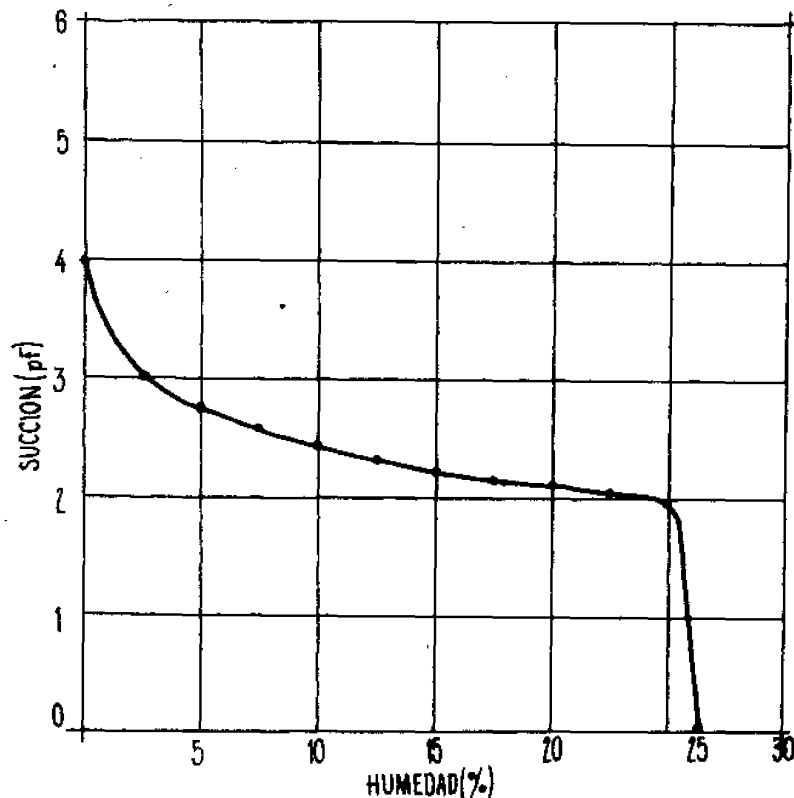
Veamos cada una de éstas separadamente.

II-3. Relación entre la succión en el bloque y su contenido en humedad.

Estas relaciones dependen de la calidad del bloque detector y del método seguido en su fabricación. Sería muy deseable normalizar estos detectores para que esta relación fuese invariable; pero, en la práctica, esto resulta sumamente difícil, lo cual limita el poder conseguir resultados cuantitativos.

Sí se expresa el contenido en humedad del bloque como porcentaje de agua respecto a su peso seco, la relación entre los valores de pF y % de humedad presenta, para nuestros bloques, la forma indicada en la figura 1.

Fig. 1. — Relación entre succión y humedad del bloque.



Existen diversos métodos experimentales para obtener las curvas succión-humedad %, tales como la placa de succión, la centrifuga y el desecador de vacío. El primer método resulta práctico para valores de pF de 0 a 3. El de la centrifuga para pF 3 a pF 4,5 y, finalmente, el desecador de vacío cubre el margen pF 4,5 a pF 7,0.

II-4. Relación entre el contenido en humedad del bloque y su resistencia eléctrica.

Esta relación es de la forma indicada en la figura 2. Experimentalmente es muy fácil de obtener, puesto que no hay más que saturar con agua el bloque detector e irlo luego desecando paulatinamente, hasta sequedad total, midiendo cada vez la resistencia eléctrica del mismo. Es muy difícil, tal como se dijo en II-3, lograr una uniformidad de fabricación en los bloques tal que se obtengan detectores con características idénticas.

II-5. Relación entre la succión y la resistencia eléctrica del bloque.

Por deducción, y utilizando los valores dados por las gráficas de las figuras 1 y 2, se puede hallar una curva como la de la figura 3.

La succión del bloque, que en el equilibrio es idéntica a la succión del sólido en el cual está "enterrado" el detector, aumenta al aumentar la resistencia eléctrica, pero no proporcionalmente.

Vemos que, para valores de pF bajos, hasta pF = 2, la variación con la resistencia es muy pequeña. Luego aumenta bruscamente hasta más allá de cuatro unidades de pF. En esta región es, pues, donde entra o sale la mayor parte de la humedad en el detector, destinada a saturarlo.

Para succiones superiores a pF 4, el bloque de yeso está ya muy seco y su resistencia eléctrica asciende muy de prisa con la succión.

II-6. Relación entre la succión y el contenido en humedad del material poroso.

Esta relación es evidentemente típica para cada material poroso, y depende de un conjunto de propiedades que podríamos definir como "calidad capilar" del sólido. Además, en el caso concreto del mortero u hormigón, la estructura física, y por tanto capilar, va cambiando durante los procesos de fraguado y endurecimiento. La relación succión-humedad también irá cambiando con el tiempo, puesto que cualquier modificación de estructura influirá sobre ella.

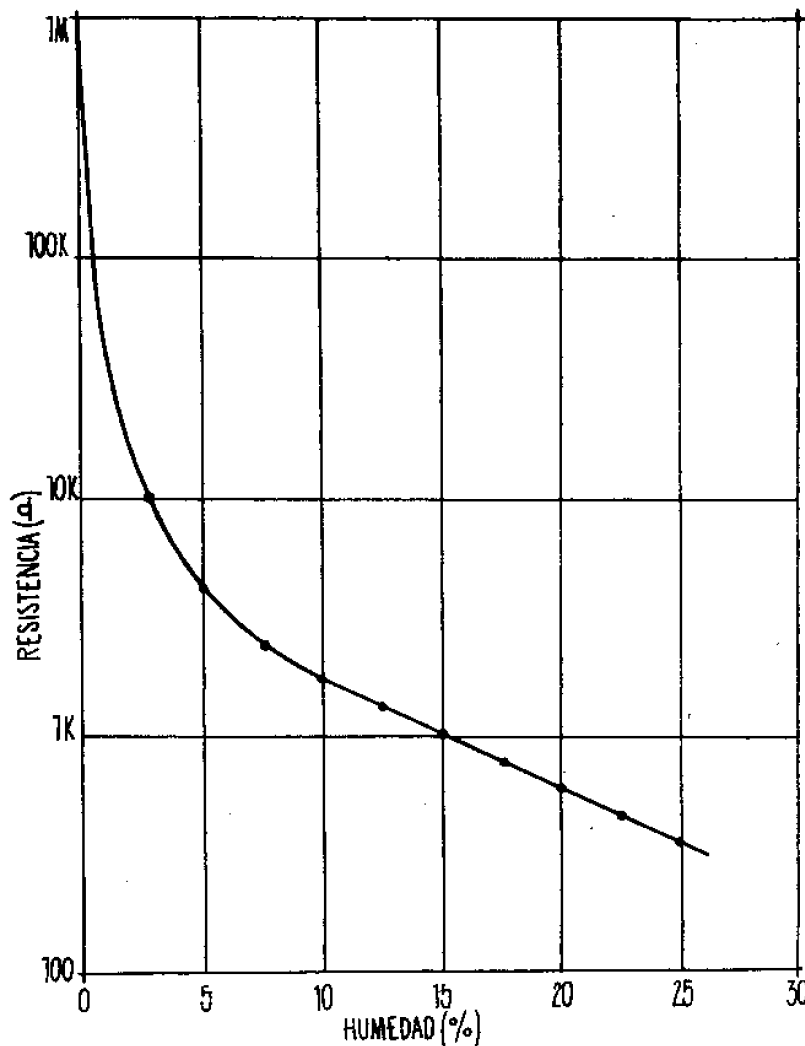


Fig. 2. — Relación entre la humedad y la resistencia eléctrica del bloque.

Por estas razones, la determinación experimental de dicha relación es muy difícil, sobre todo para probetas que no están suficientemente envejecidas. En todo caso existe siempre la duda de si las sucesivas humectaciones y secados a que habría que someter la probeta para hacer el calibrado influirían sobre la estructura, en virtud de fenómenos de hinchamiento, retracción o reorientación de partículas.

Como regla general, al aumentar el contenido en humedad disminuye la succión, según una ley parecida a la representada en la figura 4.

II-7. Relación entre la resistencia del bloque y el contenido en humedad del material poroso.

En el caso de que sea posible determinar experimentalmente la relación II-6, es decir, hallar la curva de la figura 4 para un material poroso dado, la combinación de las curvas de las figuras 3 y 4 permitirá encontrar una nueva relación.

Esta será la dependencia entre los valores de resistencia eléctrica del bloque detector (que es lo que se determina experimentalmente) y el contenido en humedad del material que se está midiendo. En los párrafos anteriores ya hemos hablado de las dificultades que se oponen a este tipo de medidas.

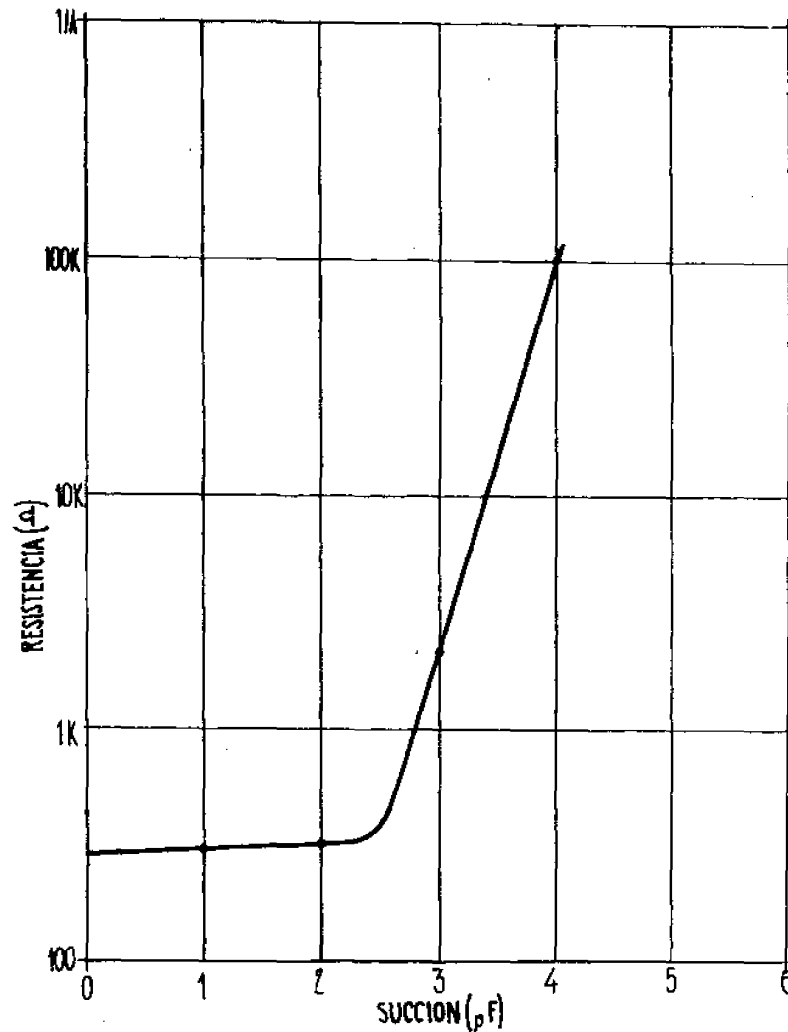
III. Parte experimental

Se trató en esta ocasión de determinar la evolución de la succión con el tiempo en cuatro probetas fabricadas con el mismo cemento. El cemento era portland con 30 % de agua normal de amasado.

La composición de cada probeta es la siguiente:

Probeta A:	Cemento	300 g	Probeta B:	Cemento	300 g
	Agua	90 g		Agua	96,3 g
Probeta C:	Cemento	300 g	Probeta D:	Cemento	300 g
	Arena	500 cm ³		Arena	250 cm ³
	Agua	116 g		Gravilla	250 cm ³
				Agua	116 g

Fig. 3. — Relación entre succión y resistencia eléctrica del bloque.



Las probetas A y B son de pasta pura de cemento, con 30 y 32,1 % de agua de amasado, respectivamente.

La probeta C corresponde a mortero 1:3, y la D a un hormigón de grava.

Las mezclas, una vez amasadas, se introdujeron en recipientes cilíndricos, de hojalata, de 7 cm de altura y 7,2 cm de diámetro, recubiertos interiormente de parafina. En cada recipiente se colocó un detector de bloque de yeso de 20 mm de diámetro y 30 mm de altura, fabricado según (1).

La salida de las conexiones del bloque se hace por un tubo de latón de 12 mm de diámetro y 90 mm de longitud, soldado a la tapa del recipiente. La misión de este tubo es rellenar, con parafina fundida, el conducto de salida a través del cual salen las conexiones eléctricas. De este modo se evita todo contacto de la pasta con el exterior.

Un recubrimiento de pintura en la parte externa de los recipientes, tuvo por misión evitar la oxidación de la hojalata durante la larga duración de las experiencias.

III-1. Control de la temperatura.

Con objeto de evitar la corrección de resistencia con la temperatura, los cuatro recipientes se mantuvieron en un termostato de agua, en el que se procuró mantener la temperatura lo más próxima posible a 20°C.

III-2. Valores de la resistencia eléctrica.

Al comienzo de la experiencia se efectuaron lecturas de resistencia de hora en hora hasta las veinticuatro horas. A partir del primer día se hizo una determinación cada veinticuatro horas hasta los veintiocho días. Luego se hicieron medidas semanales hasta los ciento cincuenta y cuatro días y, finalmente, sólo se verificó una lectura cada mes.

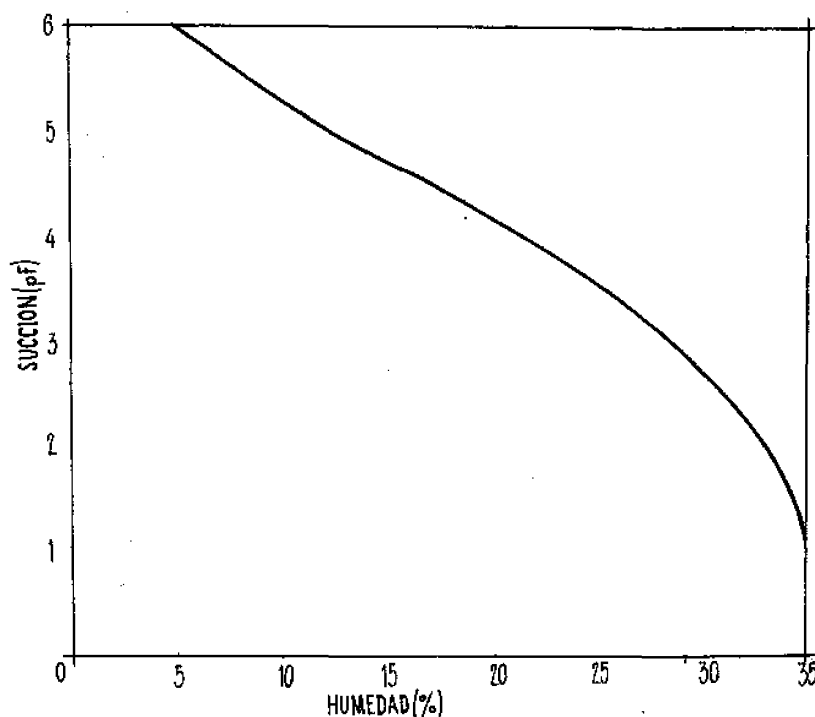


Fig. 4.—Relación entre succión y humedad para un material poroso (arcilla).

En todos los casos se empleó para el ensayo un puente de medida Philips GM.4144, alimentado a 1.000 c/s con el aparato GM.4260. Por razones obvias se evitó emplear dispositivos de registro, tal como se utilizaron en (1).

Los valores de la resistencia eléctrica para las cuatro probetas pueden verse en las gráficas de la figura 5, trazadas a escala doble logarítmica.

Las diferencias que pueden observarse entre las resistencias para las pastas A y B, así como entre éstas y las gráficas de la figura 12 de (1), deben achacarse a la imposibilidad mencionada en II-3 de obtener bloques idénticos, y a que, en el caso de (1), las pastas no estaban totalmente aisladas del aire como en las experiencias presentes. De todos modos, puede apreciarse un cierto parecido entre ambos tipos de curvas, especialmente en aquellas que corresponden a pasta pura de cemento (gráficas A y B).

III-3. Succión de las pastas.

Los valores de resistencia eléctrica dados por las gráficas de la figura 5, no dicen nada respecto a la evolución de la succión o presión hidrostática negativa que experimentan las pastas.

Para pasar de los valores *resistencia* a los valores *succión* hay que utilizar las curvas de calibrado de los bloques mencionadas en II-5. Estas curvas serán, en general, diferentes para los distintos bloques. Como, por otra parte, para los fines de nuestro trabajo no interesan valores absolutos de la succión, sino la evolución de ésta con el tiempo, utilizaremos una "curva media" (figura 6) que se adapta muy bien para los fines propuestos.

Con los valores dados por las curvas de la figura 5 y la gráfica de la figura 6 se han dibujado las curvas de la figura 7, que muestran los cambios en la succión, expresados en valores pF, en función del tiempo. La escala de tiempos se ha hecho logarítmica, con objeto de poder observar los valores de la succión en las primeras edades de las pastas.

III-4. Humedad relativa de las pastas.

Ya se ha indicado en II-6 y II-7 la dificultad experimental para esta medida. Por otra parte, según se anunció en II-2, el equilibrio de succión entre el bloque de yeso y el material poroso en que está incluido no supone necesariamente un equilibrio análogo para los contenidos en humedad, expresado este contenido en peso de agua respecto al peso del material poroso seco.

Pero existe otro tipo de medida que podemos realizar y es la determinación de la "humedad relativa" de la pasta, aprovechando la relación teórica dada por la ecuación [6].

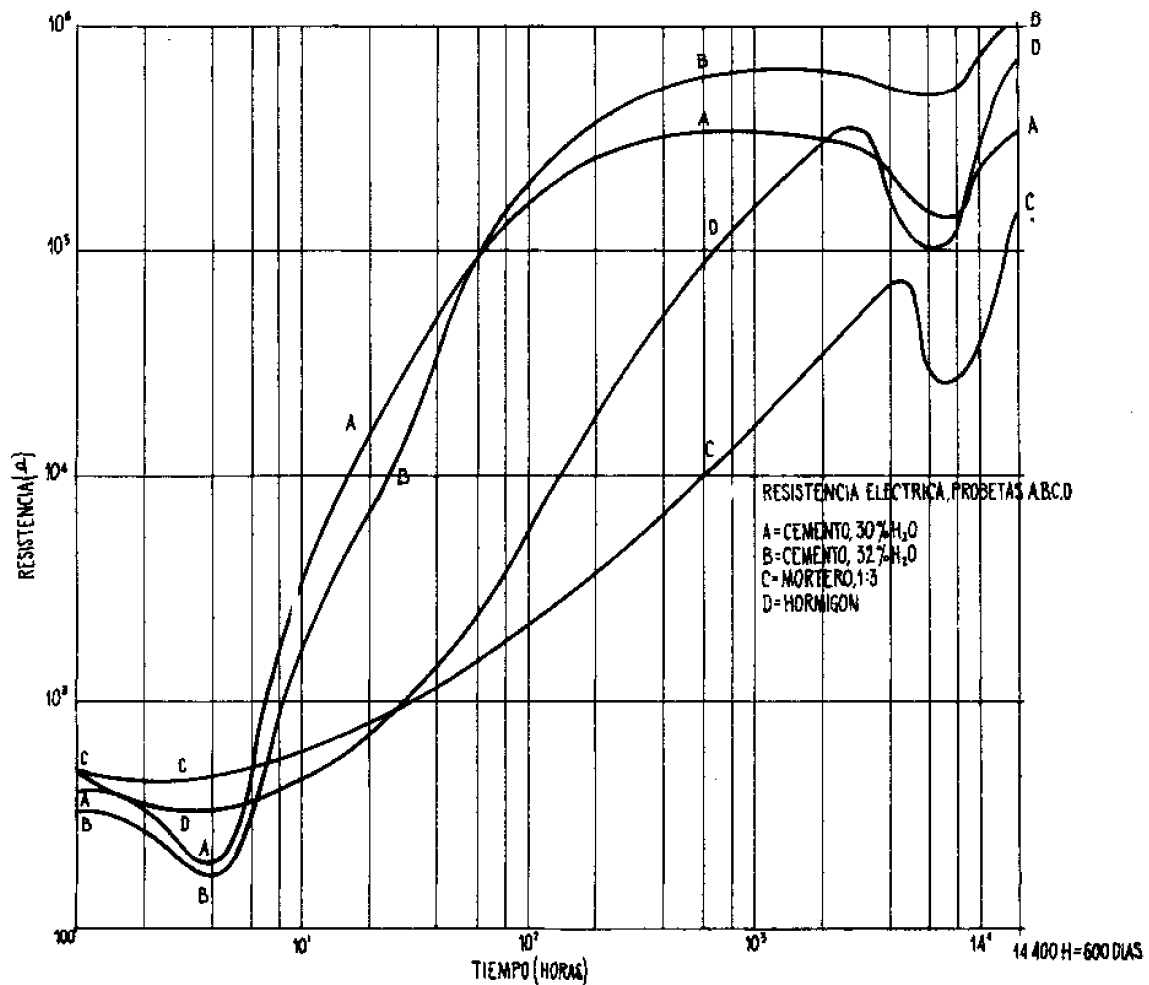


Fig. 5.—Resistencia en función del tiempo.

Este concepto de humedad relativa (H) se refiere a la provocada por el agua libre en el hormigón (o en la pasta de cemento). Una parte de este agua se encuentra retenida en los capilares. El resto está en forma de vapor en los espacios vacíos. Ello lleva al establecimiento de un equilibrio entre la succión y la tensión de vapor parcial, que, a su vez, depende de la humedad relativa en el conjunto.

La ecuación de Kelvin [4] da cuenta de esta relación. Por ello es lícito obtener unos valores teóricos de H basados en la ecuación [6]. Para ello es preciso dar valores numéricos a los parámetros de [6], en donde:

$$R = \frac{1.030 \times 22.400}{273} \text{ g. cm}^{-1} \cdot \text{K}$$

$$T = 273 + 20 = 293 \cdot \text{K}$$

$$M = 18 \text{ g}$$

$$\rho = 1 \text{ g/cm}^3$$

$$g = 980 \text{ cm/seg}^2$$

Con ello la ecuación [6] se transforma en:

$$pF = 3.508 + \log (2 - \log H) . \quad [7]$$

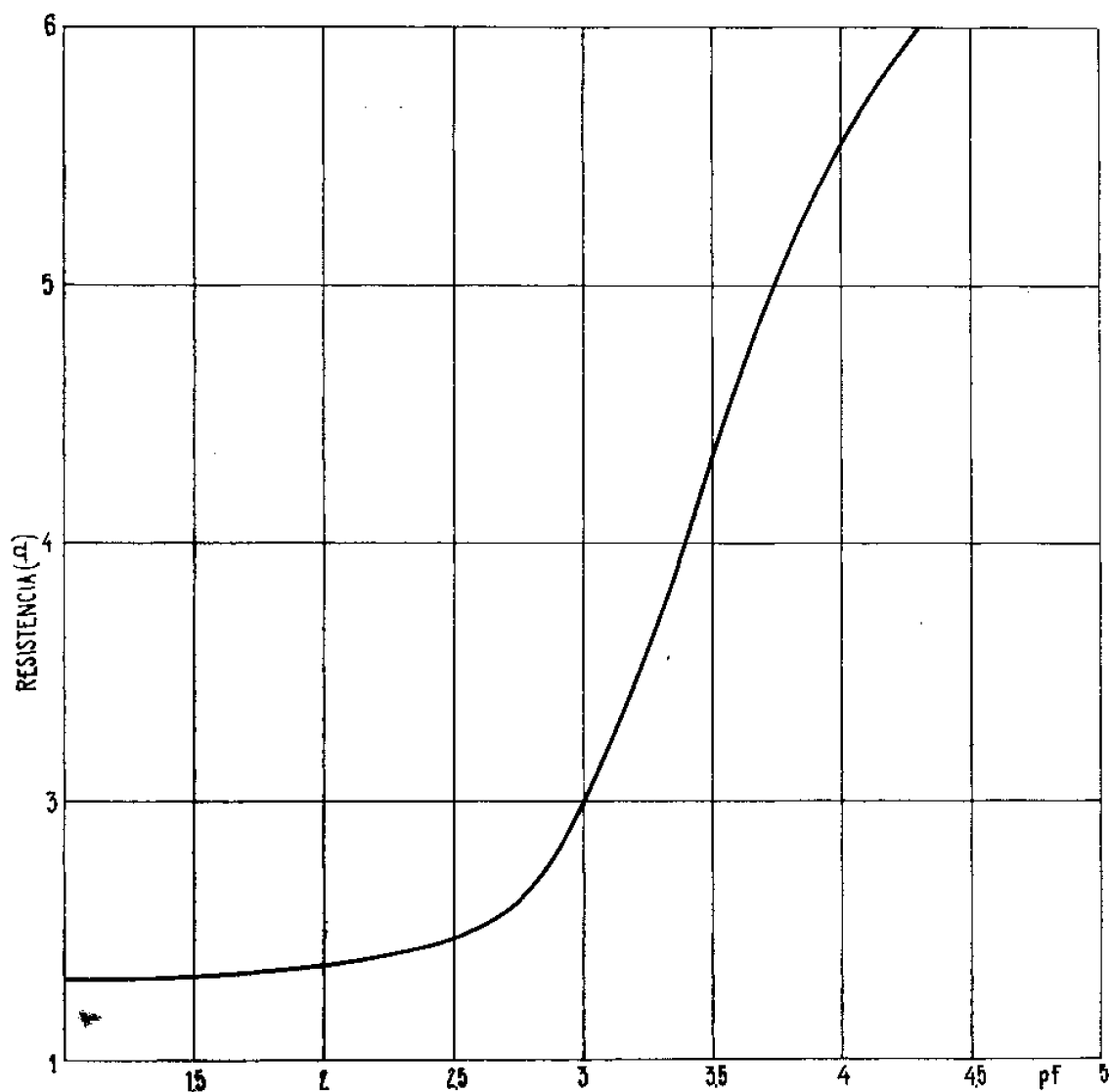


Fig. 6.—Paso de resistencia (—) a valores pF.

Conocidos los valores de pF para las cuatro probetas, gracias a las curvas de la figura 7, la ecuación [7] permite despejar los valores de H. Para ello se ha hecho la representación gráfica de dicha ecuación (fig. 8).

Mediante las curvas de las figuras 7 y 8 se pueden hallar los valores de la humedad relativa H para las distintas probetas. El resultado puede verse en las gráficas de la figura 9, que, como las anteriormente indicadas, abarca hasta una edad de las probetas de 600 días.

IV. Interpretación de resultados

Las curvas de la figura 5, que representan los valores de resistencia eléctrica hallados en casi dos años de experiencias, muestran que los mínimos encontrados entre una y diez horas, que también aparecen en las gráficas de la figura 12 de (1), y que suponemos corresponden al punto de fraguado, son mucho menos ostensibles para las probetas de mortero (C) y hormigón (D).

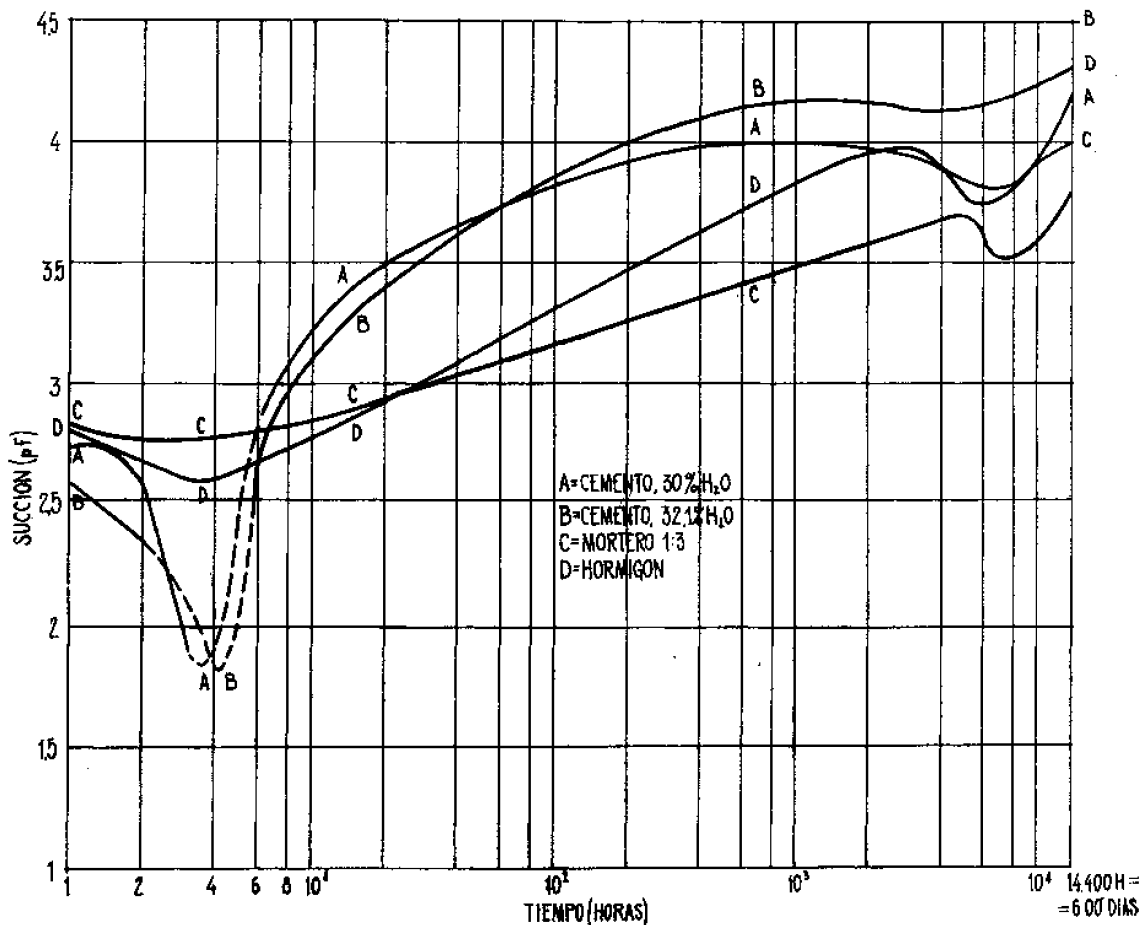


Fig. 7.—Succión de las pastas.

Veamos ahora qué es lo que ocurre con la succión. Las gráficas de la figura 7 muestran claramente la evolución de los valores de pF a lo largo del tiempo. Las probetas A y B correspondientes a la pasta pura de cemento presentan unas zonas de valores de pF muy bajos (líneas de puntos) que no han podido ser determinadas con la curva de calibrado (fig. 6). Estas zonas deben corresponder, seguramente, al fraguado del cemento, puesto que tienen lugar antes de las diez horas.

En las cuatro probetas, las dos de pasta pura y las de mortero (C) y hormigón (D), la marcha de la succión con el paso del tiempo es siempre ascendente, salvo un pequeño descenso entre las 4.000 y 8.000 horas, que, por el momento, no podemos explicar.

A partir de los 600 días, los valores de resistencia continúan aumentando y, con ello, la succión. Pero la curva de calibrado (fig. 6) muestra que, para valores de pF superiores a 4-4,5, los detectores de bloque de yeso utilizados ya no resultan convenientes. Sería preciso emplear otros sistemas de medida, tal como los detectores de cemento aluminoso o el método de desecación en vacío, que sirven hasta valores de pF 7 (11).

Finalmente, observemos las curvas de la figura 9. En ellas se muestra la evolución de la humedad relativa (H) en las pastas, definida en II-1 y relacionada con la succión por la ecuación [7].

Las pastas puras de cemento (A y B) presentan una zona, entre 1 y 10 horas (líneas de puntos), en la cual H alcanza valores muy altos que se aproximan a 100 % de humedad. Esta zona no es medible con nuestros detectores de bloque de yeso, pero parece razonable que pueda ser extrapolada.

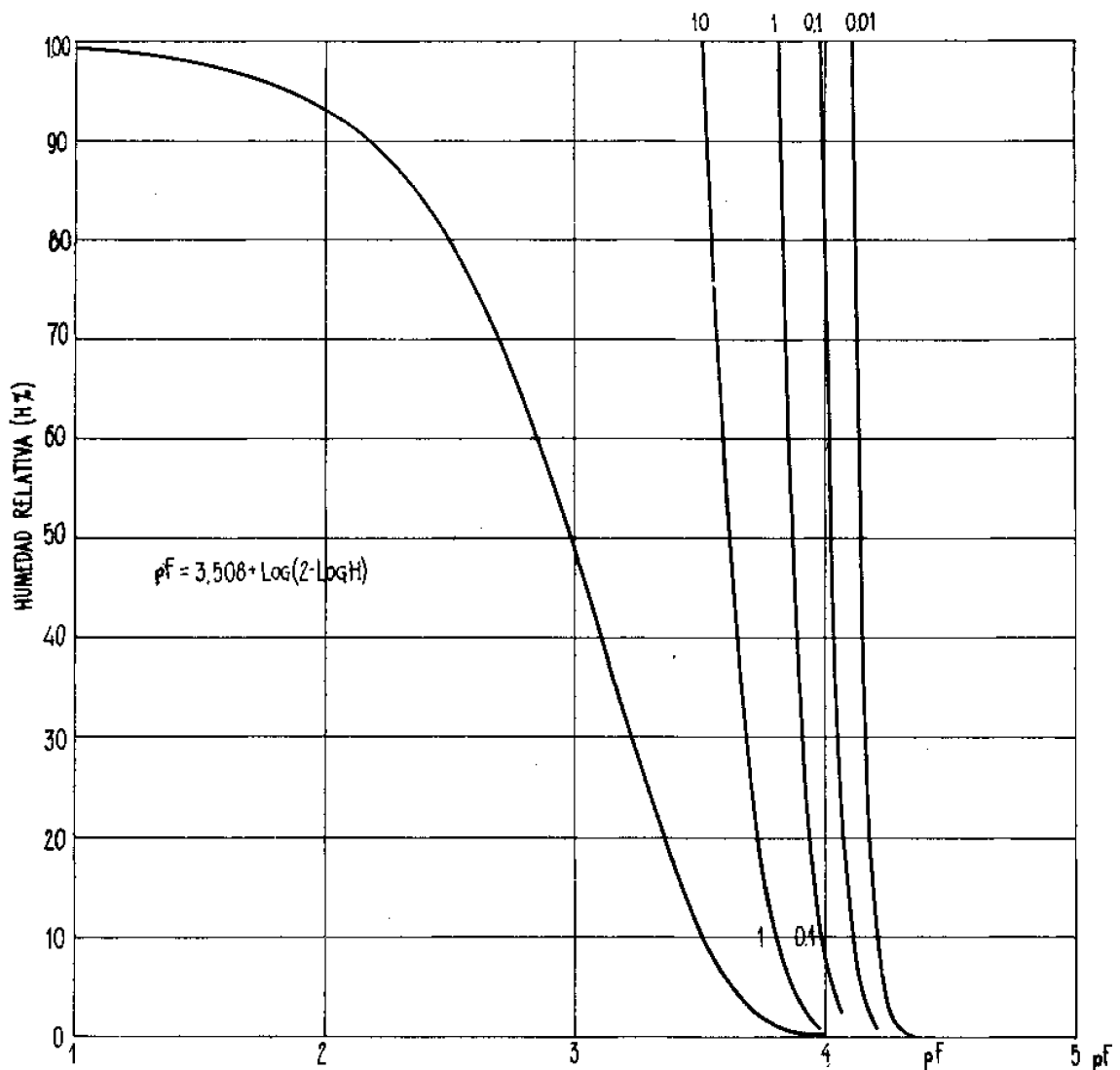


Fig. 8.—Relación entre pF y humedad relativa (%).

Respecto a su interpretación surgen varias hipótesis, pero parece verosímil pensar en un efecto iónico (o de intercambio iónico) entre el bloque de yeso y el medio en que se encuentra sumergido. En efecto, en ese período de 1 a 10 horas (en el cual se produce el fraguado), hay una disolución más o menos completa de los componentes del cemento y una abundancia de iones. Algunos de éstos pueden pasar al bloque de yeso haciendo aumentar su conductividad, no por efecto del aumento de humedad, sino por concentración iónica.

En el caso de las probetas de mortero (C) y hormigón (D), por la menor proporción relativa de cemento, este efecto es menos acusado (fig. 9).

A partir de las 10 horas y hasta aproximadamente 500 horas (unos veinte días), las pastas de cemento se van desecando (o autodesecando) hasta alcanzar muy bajos valores de humedad relativa (0,01 a 0,1 %), como era de esperar.

Pero a partir de este punto, las curvas de humedad, que deberían ser como las de trazos de la figura 9, se distorsionan como si se produjese un incremento en la humedad relativa entre las 1.000 y 7.000 horas (40-280 días), muy difícil de explicar.

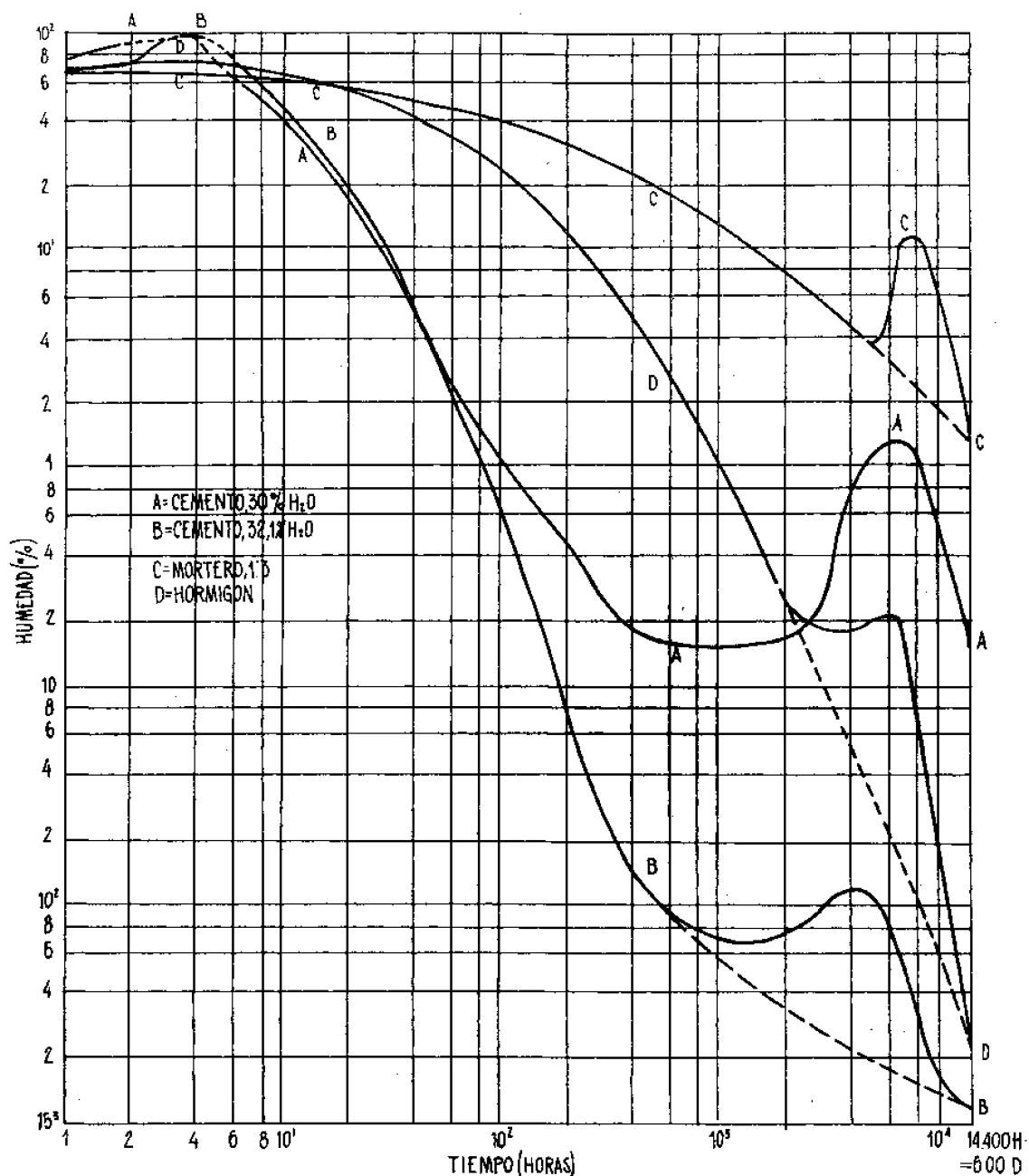


Fig. 9.—Humedad relativa (%) en función del tiempo.

A los 600 días, por el contrario, los valores de humedad parecen corresponder bastante bien con los que se producirían siguiendo el hábito normal de las curvas.

Con las probetas de mortero y hormigón (C y D) ocurre algo similar. Mucho más tarde que con las pastas puras, se producen dislocaciones en las curvas, hacia las 2.000-5.000 horas (83-200 días), reveladoras de un aparente (o real) aumento de la humedad relativa.

No parece que pueda haber ninguna causa química de acción diferida—si se exceptúa tal vez la acción lenta del β -S₂C—capaz de explicar estas anomalías.

Por otra parte, cabe pensar en errores de tipo experimental—siempre posibles—, pero la regularidad y sistematización observadas no parecen abonar esta suposición.

También es posible que, de acuerdo con las experiencias de Klock y Sheridan (12) sobre retracción a largos periodos de tiempo, haya que achacar a alguna causa mecánica las anomalías antes citadas. Puede ocurrir que una retracción de la pasta influya sobre la adherencia pasta-bloque de yeso o ejerza una compresión triaxial sobre el bloque incrementando su conductividad.

En todo caso, lo que sí puede observarse es que, hasta los 600 días, la humedad en el hormigón evoluciona ininterrumpidamente alcanzando valores inferiores al 1 %.

Refiriéndonos concretamente al hormigón (gráfica D, fig. 9), podemos observar que hasta las 24 horas la humedad relativa se mantiene prácticamente constante entre 54-64 %. Desde 1 a 28 días, la humedad desciende considerablemente hasta alcanzar el valor de 2 %. De los 28 días a los 3 meses, la humedad desciende hasta 0,1 %, alcanzándose el insignificante valor de 0,002 % a los 20 meses.

Expresando en porcentajes y llamando 100 a la humedad inicial (entre 0 y 24 horas), la pérdida de humedad relativa sigue la ley siguiente:

t	H %
Inicial	100
14 días	10
52 "	1
160 "	0,1
420 "	0,01

O sea, que en solamente 14 días se pierde un 90 % de la humedad inicial, necesitándose luego 38 días más para hacer decrecer H en un 9 % más, respecto al valor inicial, y así sucesivamente.

Para hormigones de la composición indicada en III, y a la vista de la curva D de la figura 9, puede afirmarse que existe una relación entre la humedad relativa H y el tiempo t.

Partiendo de una simplificación, que consiste en suponer que el agua total de la pasta (agua de amasado) se reparte entre agua de hidratación de los componentes del cemento, agua del gel y agua capilar, se puede llegar a la ecuación:

$$dH = K(1 - K_1 H)(1 - K_2 H) dt, \quad [8]$$

que resuelta se convierte en:

$$\frac{1 - K_1 H}{1 - K_2 H} = K_2 \cdot e^{Kt} \quad [9]$$

Las constantes K_1 a K_2 pueden determinarse experimentalmente para cada caso particular.

La ecuación [9] muestra que para $t = \infty$ la humedad relativa no baja a cero, sino a un valor de equilibrio: $H_{\infty} = 1/K_2$.

En pastas puras (curvas A y B, fig. 9) resulta curioso comprobar que la probeta B, que ha sido amasada con 32,1 % de agua, da una humedad relativa final más baja que la A, que se amasó con 30 % de agua.

Esto puede parecer una anomalía. Pero hay que tener en cuenta que el contenido en humedad lo hemos deducido en función del pF, mediante la fórmula [7], es decir, de la succión capilar. Como la pasta B lleva más agua de amasado que la A, puede suponerse que el exceso de agua dará lugar a una mayor densidad de capilares en la masa endurecida y, por ello, a una succión mayor. Es tanto como decir que el valor de K_2 de la fórmula [9] es mayor para la pasta B que para la A. La constante K_2 da cuenta, por tanto, de la calidad capilar de la masa.

V. Succión y durabilidad

Algunos autores (5) se han preocupado de investigar la dependencia entre la *durabilidad* de algunos materiales de construcción (principalmente piedras naturales) y la *succión*, tal como ha sido tratada en este trabajo.

Parece lógico suponer que la estructura de poros y capilares de un hormigón, una vez endurecido, sea uno de los más importantes factores de que dependa la durabilidad del material. La resistencia a las heladas, por ejemplo, parece una de las características que más directamente han de ser afectadas por la estructura capilar, es decir, por la succión del hormigón.

Aquellos hormigones que posean una succión mayor deben ser, "a priori", menos durables que los de succión baja.

Aunque esto parece constituir un buen camino para esclarecer el problema de la durabilidad, las dificultades experimentales que pueden presentarse para las determinaciones hacen poco probable que, por el momento, pueda encontrarse una relación sencilla entre succión y durabilidad.

VI. Resumen y conclusiones

1.^a La finalidad de este trabajo, que complementa a otro del mismo autor (1), es exponer los resultados de la aplicación del bloque de yeso a la determinación de humedad en probetas de pasta de cemento, mortero y hormigón.

2.^a Después de explicar detalladamente la técnica de las medidas, incluyendo datos sobre la fabricación de los elementos detectores, se exponen las curvas resistencia eléctrica-tiempo, para distintos tipos de probetas.

3.^a En la parte teórica se establece la relación entre la humedad relativa y la succión de una pasta endurecida y se expresa la teoría del detector de bloque de yeso.

4.^a Dentro de la parte experimental, se indica la composición y forma de preparar las probetas para el ensayo a largo plazo, mostrando, en forma gráfica, las relaciones resistencia eléctrica-tiempo, succión-tiempo, y humedad relativa-tiempo, todas ellas referidas a un plazo máximo de 600 días.

5.^a Finalmente, se hacen algunas consideraciones sobre ciertas anomalías encontradas en las curvas experimentales y sobre la posible relación entre la succión y la durabilidad de un hormigón.

bibliografía

- (1) TOBÍO, J. M.: "Materiales de Construcción", 3, julio-agosto (1958); "Ion", núm. 209, diciembre (1958).
- (2) NIELSEN, K. E. C.: "Symposium sur l'observation des ouvrages", pág. 159, vol. I, Lisboa (1955).
- (3) TOBÍO, J. M.: "Informes de la Construcción", núm. 84, 682-10, octubre (1956).
- (4) L'HERMITE, JANIK, J.), y SZKATULA, A.: "Symposium sur l'observation des ouvrages", págs. 158 y 159, vol. I, Lisboa (1955).
- (5) HONEYBORNE, D. B., y HARRIS, P. B.: "The Structure & Properties of Porous Materials", pág. 343, Butterworths Scientific Publications, Londres (1958).
- (6) HABIB, P., y SOEIRO, F.: "Les mouvements de l'eau dans les sols sous l'influence de la temperature" Ass. Franç. Recherches Essais Mat. Constr. París (1957).
- (7) PRICE, W. H.: "J. A. C. I.", 417, febrero (1951).
- (8) POWERS, T. C.: "Proc. Highway Res. Board", 27, 178 (1947).
- (9) — "Am. Soc. Civil Eng. Proceedings", núm. 742, 81 (1955).
- (10) SCHOFIELD, R. K.: "Trans Third Intern. Cong. Soil Sci.", 39, Oxford (1935).
- (11) KRONEY, D.; COLEMAN, J. D., y CURRER, W. H.: "Britt. J. Appl. Sci.", 2, 85 (1951).
- (12) KLOCK, M. B., y SHERIDAN, R. R.: "J. A. C. I.", 791, febrero (1957).