

Permeabilidad del hormigón a los gases y líquidos. Nuevo método de determinación

S. ALEGRE, Ingeniero Industrial y J. A. LECHUGA, Ingeniero Químico
CABI, S. A. (Barcelona)

RESUMEN

Se presenta un nuevo método de medición de la impermeabilidad del hormigón a gases y líquidos, de ejecución muy sencilla. Se desarrolla su fundamento teórico y se correlacionan algunos resultados obtenidos con la resistencia a compresión del hormigón y con los componentes empleados en su dosificación.

De todo ello, se deduce la conveniencia de replantear los criterios actualmente empleados para cuantificar las prestaciones del hormigón.

SUMMARY

A new measurement system is presented for impermeability of concrete to liquids and gas, of very easy execution. It's technical basis is developed, and some of the results obtained are related with the components used in it's dosification.

Therefore, the judgments actually used for the quantification of concrete's utilities must be restated.

INTRODUCCION

Podría entenderse por permeabilidad, de forma genérica, el grado de dificultad que ofrece el hormigón a que los fluidos penetren en su interior. Esta dificultad está ligada a su compacidad, entendiéndose por tal la fracción de volumen hueco del hormigón. A su vez, estos huecos pueden ser accesibles (si están comunicados entre sí y con el exterior), o inaccesibles (sino lo están). Son los huecos accesibles los que condicionan la penetración de fluidos en el hormigón. Los conductos capilares que los unen son los caminos para esta penetración. El diámetro de estos capilares condiciona el fenómeno de la capilaridad del hormigón (como hormigón se entiende árido y pasta). Los poros del árido correcto no deben influir en la permeabilidad del hormigón. Por todo ello, cabe plantearse lo siguiente: como la compacidad del hormigón puede determinarse fácilmente (por pesos específicos real y aparente), y si asimilamos poros inaccesibles a aire ocluido (que también se mide con facilidad), el disponer de un método de medición de la permeabilidad (que también sea sencillo), puede ampliar sensiblemente el conocimiento de la estructura interna del hormigón, lo que debe permitir prever con mayor conocimiento de causa su comportamiento en distintas circunstancias.

Una de estas circunstancias sería la resistencia que oponga el hormigón a la penetración de fluidos agresivos externos, como por ejemplo el agua de mar. La permeabilidad, pues, condicionaría su durabilidad frente a ellos. Lo mismo sucedería con los agresivos que se encuentren ya en el interior del hormigón, pero que para desarrollar sus efectos precisen de la concurrencia de algún elemento ajeno al hormigón, y que por tanto deba penetrar en él, como por ejemplo el oxígeno para los sulfuros.

Otra circunstancia podría ser la penetración de elementos que, sin ser agresivos, pudieran llegar a serlo si cambian las condiciones de conservación. Por ejemplo el agua, en caso de que se congele.

De otra parte, suele admitirse que las propiedades del hormigón (en especial su resistencia) dependen esencialmente de su relación agua-cemento y de su compacidad. De los extensos

estudios realizados (de los que después se darán algunos ejemplos) se induce la buena correlación existente entre Resistencia y Permeabilidad (concepto ligado al de compacidad), pero se evidencia también la incoherente dependencia entre la Resistencia y la Relación Agua-Cemento, en los hormigones con adiciones (tanto si ésta se incorpora al cemento como al propio hormigón). Ello da pie a reflexionar sobre la vigencia de los criterios actualmente empleados para cuantificar las prestaciones del hormigón, y a tenor de los datos experimentales deducir que, algunos de ellos, podrían considerarse obsoletos para hormigones que incorporan adiciones en su dosificación.

De cualquier forma la justificación del empleo de relaciones, entre varios componentes del hormigón para prever algunas prestaciones, parece ser precisamente la de no poderlas medir directamente. Pues bien, si dichas prestaciones pudieran medirse (o bien alguna variable ineludiblemente ligada a ellas), tales relaciones quedarían situadas en inferioridad con respecto a dicha nueva medición. Tal puede ser el caso de la Permeabilidad, con respecto a las circunstancias ya apuntadas.

FUNDAMENTO DEL METODO PRESENTADO

Se ha puesto a punto un método novedoso con importantes ventajas de tipo práctico. Se emplean los moldes cilíndricos de 15 × 30 cm habituales en el control de resistencia del hormigón, con lo que la muestra es suficientemente representativa; el instrumental empleado en la ejecución es muy sencillo, y casi todo lo suelen ya poseer los laboratorios de control; las probetas no necesitan de ningún tratamiento superficial; las condiciones de los ensayos son compatibles con la jornada laboral.

En la figura 1 se indica el tipo de probeta empleada para los ensayos de resistencia y permeabilidad que, al proceder del mismo hormigón, permiten correlacionar ambos resultados, realizados a una edad y tras una conservación iguales.

PROBETAS PARA CORRELACIONAR PERMEABILIDAD Y RESISTENCIA A COMPRESION

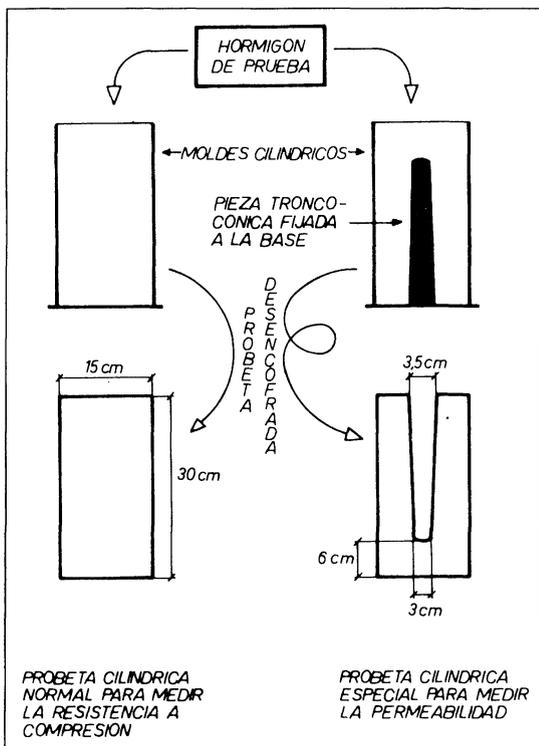


Fig. 1

SIMBOLOGIA EMPLEADA EN LA DESCRIPCION DEL METODO "DEL CALE"

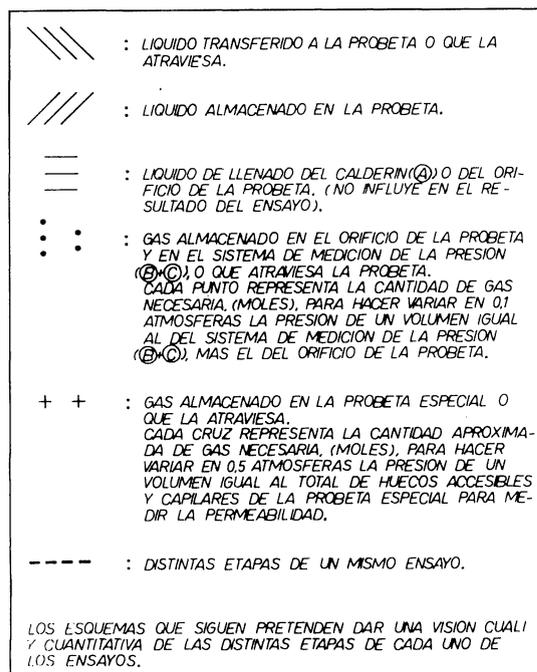


Fig. 2

El utillaje empleado en la medición de la permeabilidad se indica en la figura 3. En los ensayos con líquidos se emplean las tres partes (A), (B) y (C), mientras que en los ensayos con gases sólo dos (B) y (C), tal como indican las siguientes figuras. (La parte A) puede desmontarse en cualquier momento para pesarla).

El método se basa en hacer circular un fluido desde el orificio de la probeta al exterior, impulsado por una sobrepresión en dicho orificio. En el caso de líquidos lo que se mide es la cantidad que atraviesa la probeta en un tiempo dado, manteniendo constante la presión en dicho orificio. En el caso de gases, lo que se hace es dar una cierta presión en el orificio, y medir el tiempo que tarda en descender dicha presión hasta otra, fijada en las condiciones experimentales. Un tercer ensayo que puede realizarse (absorción de líquidos) se lleva a cabo midiendo la cantidad de agua que penetra en la probeta (sin atravesarla), en un tiempo dado, a la presión de trabajo.

Como la humedad de las probetas influye en todos los ensayos comentados, se han tomado dos situaciones extremas y fáciles de lograr: la saturación total (a presión de trabajo), y la sequedad total (tras un presecado de al menos un día a 70° C y un secado total a 115° C).

En la figura 3 se indican los símbolos adoptados en las siguientes, para dar una idea gráfica de todo lo indicado.

En la figura 4 se indican las distintas etapas a seguir en la medición de la permeabilidad a los líquidos, cuyo resultado depende del tipo de hormigón ensayado.

En la figura 5 se esquematiza el ensayo de permeabilidad a los gases, dando una idea gráfica (que intenta ser cuantitativa) del trasiego de gas, durante el ensayo, distinguiendo la procedencia de cada cantidad parcial del gas. Se da una justificación (sobre la que después se profundizará) de que cada cantidad parcial de gas trasegado es constante, por lo que el tiempo empleado en ello depende del tipo de hormigón ensayado.

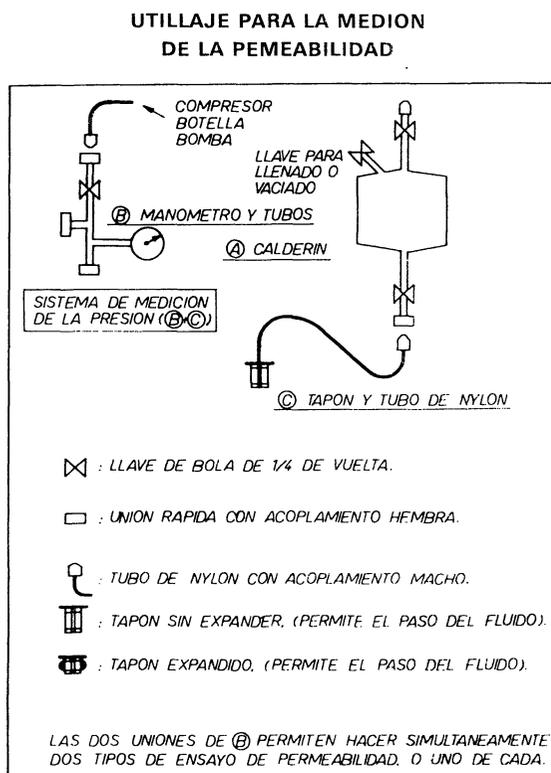


Fig. 3

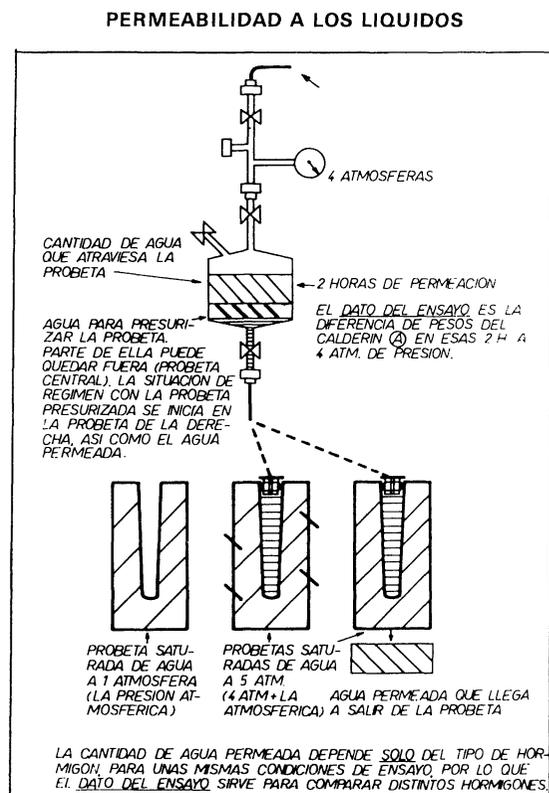


Fig. 4

ABSORCION DE LIQUIDOS

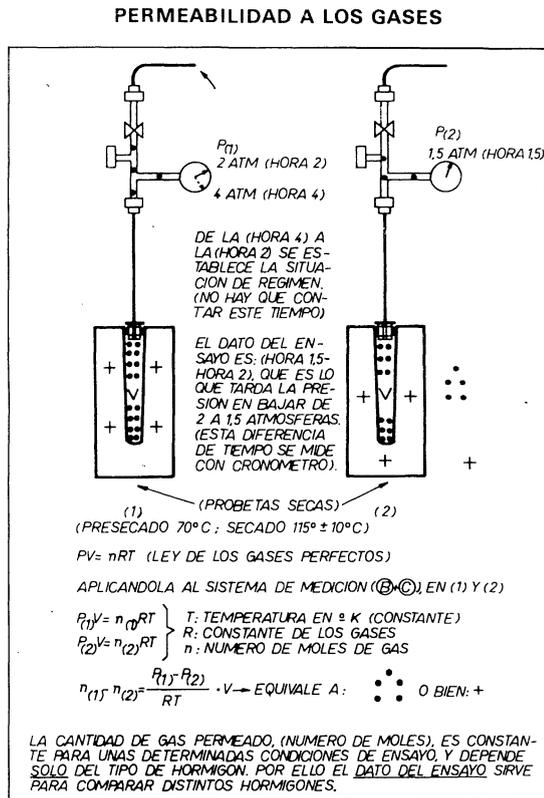


Fig. 5

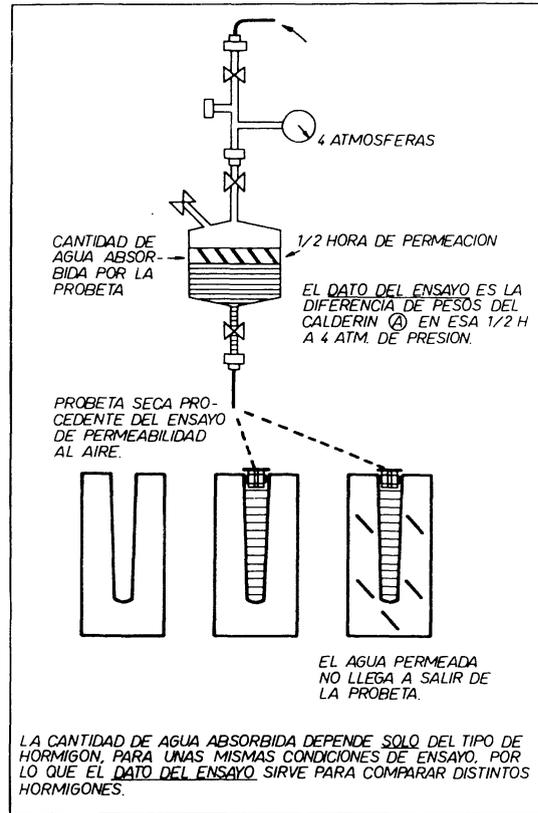


Fig. 6

En la figura 6 se indica la forma de realizar el llamado ensayo de absorción de líquidos, en el que la cantidad trasgada a la probeta, en un tiempo dado, debe ser menor que la máxima que ésta pueda absorber. Como el tiempo de permeación es constante, dicha cantidad depende del tipo de hormigón ensayado.

Es interesante recalcar que en este ensayo no se miden caudales, sino cantidades en un tiempo dado, o viceversa. Ello simplifica muchísimo el diseño del permeabilímetro.

Las condiciones experimentales, ya indicadas en las figuras anteriores, son las siguientes:

	Presión de trabajo (*)	Presión ensayo		Tiempo	Líquido permeado	Secado 70° C 115° C	
		Inicial	Final			SI	SI
Perm. liq.	4 Atm.	—	—	2 horas	(DATO)	(Saturada a 4 Atm.)	
Perm. gas.	4 Atm.	2 Atm.	1,5 Atm.	(DATO)	—	SI	SI
Absor. liq.	4 Atm.	—	—	1/2 hora	(DATO)	SI	SI

(*) Sobre la atmosférica.

Como al referenciar los datos habría que mencionar todas las condiciones experimentales, se ha preferido dar un nombre al método, lo que ya implica dichas condiciones. Se denominó método "del cale" por similitud del vocablo que se emplea en las obras de túneles, cuando se finaliza la perforación: se dice que se ha hecho "el cale". (En los ensayos los fluidos calan el hormigón a través de los capilares).

La precisión del método habría podido ser aumentada por varias vías: permeando mayores

cantidades de fluidos y/o empleando menores diferencias de presiones. Ello conllevaría mayor tiempo de dedicación a los ensayos (hasta el punto de sobrepasar la jornada laboral), y emplear instrumental de mayor precisión. El carácter pragmático que se ha pretendido dar al método, y el extenso plan de ensayos en curso (que supone el ensayo de varios miles de probetas), ha conducido a las condiciones experimentales indicadas.

Se han realizado repeticiones, en una misma probeta de la permeabilidad al agua, y al aire (en este caso humedeciéndolas tras el ensayo), obteniéndose datos similares, por lo que se dieron por buenas las condiciones experimentales.

Un mismo tipo de hormigón se ha ensayado haciendo las amasadas con varios días de intervalo, obteniéndose permeabilidades muy parecidas, por lo que la metódica se consideró repetitiva.

El método se experimenta haciendo amasadas de laboratorio para varios tipos de cemento; dosificado en distintas cantidades; con distintos tipos de áridos, conos y TM; varios tipos de cenizas volantes, en cantidades variables y molidas o no; empleo o no de varios aditivos plastificantes; adición o no de cantidades controladas de arcilla a la arena; variación de la proporción de arena respecto al total de áridos. (El producto de todas estas variables arroja los miles de probetas mencionado).

Al disponer de todos los datos, a todas las edades del ensayo (hasta 1 año), se procesarán los resultados permitiendo cuantificar las correlaciones enunciadas, así como intentar establecer algunas nuevas con otras relaciones entre los componentes del hormigón que reflejen mejor, que las ya comentadas, el comportamiento de los hormigones con adiciones.

Circunstancias comunes en todos los ensayos han sido las siguientes:

- Los fluidos empleados en estos estudios han sido: agua y aire.
- La conservación de las probetas ha sido la normalizada.

Las limitaciones encontradas al método han sido las siguientes:

- Para tamaños de árido de 32 mm salen ya datos erráticos, por lo que cabe pensar que una primera limitación de tamaño sería la ya ensayada de 25 mm. (Con probetas de dimensiones mayores que las empleadas no debieran presentarse estos datos, o con tapones menores, aunque aumentaría el tiempo de secado).
- Al cerrar el orificio con el tapón expansivo, se origina una tensión en la parte superior de la probeta, que puede llegar a romper por tracción, si el hormigón es de baja resistencia. Puede evitarse zunchando esa zona con las bridas adecuadas. Si el hormigón fresco exuda mucha agua, también puede fisurar por esa zona, al fraguar.

GENERALIZACION DEL METODO “DEL CALE”

Como ya se indicó al dar datos obtenidos por este método, había que hacer referencia a toda una serie de condiciones experimentales que se presuponían en el nombre del método. Si se pueden generalizar estos datos, de forma que no dependieran del tipo de probeta ni de las condiciones experimentales, podría dejarse de hacer referencia al método de ensayo, ya que se habrían obtenido parámetros inherentes al propio hormigón, dependiendo en teoría sólo del tipo de conservación a que se le hubiera sometido.

Un camino para la generalización se pormenoriza en las leyendas 1 a 8.

VARIABLES EMPLEADAS EN LA GENERALIZACION DEL METODO DEL "CALE"

SE HACE REFERENCIA A LOS FLUIDOS EN GENERAL, AUNQUE LOS ENSAYOS SE REFIEREN A AIRE Y AGUA.

P_{AG} : PESO DE AGUA PERMEADA, (DATO DEL ENSAYO), EN GRM ó cm^3 (7200 Seg = 2 Horas).

t_{AR} : TIEMPO DE PERMEACION DE AIRE, (DATO DEL ENSAYO EN Seg.).

P_{AB} : PESO DE AGUA PERMEADA, (DATO DEL ENSAYO), EN GRM ó cm^3 (1800 Seg = 1/2 Hora).

Q : VOLUMEN DE GAS QUE ATRAVIESA LA SUPERFICIE DE LA PROBETA AL VARIAR LA PRESION 0,5 Atm. ($V_g + V_0 = 220 cm^3$).

A : SUPERFICIE EXTERIOR DE PASO DEL FLUIDO, ($1,76 \cdot 10^3 cm^2$).

A_0 : SUPERFICIE DEL ORIFICIO INTERIOR DE PASO DE FLUIDO, ($231,7 cm^2$).

G : DIFERENCIA DE PRESIONES QUE IMPULSA EL FLUIDO.

P : PRESION DEL GAS, (cm columna de agua).

P_a : PRESION INICIAL, ($4+1 = 5 Atm = 5 \cdot 10^3 cm c. a.$).

P_b : PRESION FINAL, ($1 Atm = 1 \cdot 10^3 cm c. a.$).

P : PRESION INTERMEDIA.

EN EL CASO DEL AIRE LAS PRESIONES SERIAN: 2 Y 1,5 ATM.

e : ESPESOR INTERMEDIO, (cm).

e' : ESPESOR INTERMEDIO CONTADO DESDE EL BORDE DEL ORIFICIO DE LA PROBETA, (cm).

D_G : DENSIDAD DEL FLUIDO, (GAS).

v_G : VELOCIDAD DEL FLUIDO, (GAS), $v_G(a)$: Inicial, $v_G(b)$: Final.

P_s : PESO DE AGUA PERDIDO DURANTE EL SECADO DE LA PROBETA, (GRM).

T_{AB} : FRACCION DEL VOLUMEN DE LA PROBETA, SATURADO DURANTE EL ENSAYO DE ABSORCION.

K_{AB} : COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD POR ABSORCION, (CAPILARIDAD A PRESION).

K_{AG} : COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD AL AGUA; HORMIGON SATURADO, (cm/Seg).

K_{AR} : COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD AL AIRE; HORMIGON SECO, (cm/Seg)

El significado físico de K , es el caudal de fluido que atraviesa la unidad de superficie de una sección de hormigón de espesor unidad, impulsado por una diferencia de presiones igual a la unidad (tiene las dimensiones de una velocidad). La correlación de las cuatro últimas variables con la resistencia, permiten la generalización del método, haciendo abstracción del tipo de probeta utilizada, lo que permite comparación con otros tipos de ensayos. (La conservación de probetas ha sido la normalizada; por ello los resultados obtenidos dependen sólo del tipo de hormigón y permiten pues comparar los distintos tipos de dosificaciones ensayadas)

Leyenda 1

DATOS INTERMEDIOS NECESARIOS PARA EL CALCULO DE COEFICIENTES

ESTOS DATOS HACEN REFERENCIA AL TIPO DE UTILLAJE Y DE PROBETA EMPLEADOS. EL TENERLOS EN CUENTA EN LOS CALCULOS DE COEFICIENTES, PERMITE COMPARAR LOS RESULTADOS CON LOS OBTENIDOS POR OTROS METODOS.

	ESPESOR	ALTURA	% ALTURA	ESPESOR PONDERADO	
	5,75	2	6,7%	0,4	(ZONA NO-MOJADA)
	5,9	22	73%	4,3	
	6,0	6,0	20%	1,2	

ESPESOR PROMEDIO = 5,9 cm.

Datos en cm

ABSORCION DE AGUA EN PROBETA SECA: PERFIL EXPERIMENTAL ENCONTRADO.

$e = e' + \frac{3,25}{2}$ $\left\{ \begin{array}{l} \leftarrow e' \text{ (cm)} \\ \leftarrow e \text{ (cm)} \end{array} \right.$

LA ZONA PUNTEADA, CORRESPONDE APROXIMADAMENTE AL AGUA PERMEADA EN EL ENSAYO DE ABSORCION.

VOLUMEN DEL HORMIGON DE LA PROBETA:

$$V = \pi \cdot \left(\frac{15}{2}\right)^2 \cdot 30 - \pi \cdot \left(\frac{3,25}{2}\right)^2 \cdot 24 = 5102 \text{ cm}^3$$

AREA DEL ORIFICIO INTERIOR DE PASO DE FLUIDO:

$$A_0 = 2\pi \cdot \left(\frac{3,25}{2}\right) \cdot 22 + \pi \cdot \left(\frac{3}{2}\right)^2 = 231,7 \text{ cm}^2$$

SUPERFICIE EXTERIOR DE PASO DE FLUIDO:

$$A = \pi \cdot 15 \cdot 30 + \pi \cdot \left(\frac{15}{2}\right)^2 + \pi \cdot \left(\frac{15}{2}\right)^2 - \pi \cdot \left(\frac{3,5}{2}\right)^2 = 1,76 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$$

VOLUMEN DEL SISTEMA DE MEDICION (⊕+⊙). (ES UNA CONSTANTE DEL APARATO EMPLEADO):

$$V_s = 37 \text{ cm}^3$$

VOLUMEN UTIL DEL ORIFIO DE LA PROBETA: $\left. \begin{array}{l} V_s + V_s \oplus \opl� = 220 \text{ cm}^3 \\ V_0 = \pi \cdot \left(\frac{3,25}{2}\right)^2 \cdot 22 = 183 \text{ cm}^3 \end{array} \right\}$

Leyenda 2

Estas deducciones se han segregado del texto de este escrito, para orillar más fácilmente su lectura por las personas no interesadas específicamente en el tema y, a la vez, para tratarla con suficiente detalle, de forma que pueda ser seguido paso a paso por las que sí les interese, en la confianza de que lo puedan contrastar con sus propios criterios y, en su caso, enriquecer o matizar lo expuesto, lo que de antemano agradecen los autores. No obstante conviene hacer las aclaraciones indicadas a continuación.

En las deducciones se recurre a la Ley de Gases Perfectos; a la Ecuación de Continuidad del transporte de fluidos y a la Ecuación de Darcy. Con ellas, y algunos datos experimentales, se da el mismo enfoque al cálculo de Coeficientes, tanto si el fluido es líquido como gas.

Esta última se aplica a la propagación de fluidos en medios porosos (por ejemplo: agua en los suelos). Puede enunciarse diciendo que el caudal del fluido es igual a la superficie de paso multiplicada por el gradiente de presiones que impulsa al fluido, multiplicando, a su vez, por una Constante llamada Coeficiente de Permeabilidad que depende de las características del medio poroso. (En nuestro caso del tipo de hormigón).

A lo largo de la exposición se ve que juega un papel importante la forma de cómo se propaga el fluido en el interior de la probeta. Esto se ha podido comprobar sólo para líquidos, inyectando a las probetas agua coloreada y rompiéndolas al ensayo brasileño; se admite que los gases tendrán similar tipo de propagación, por lo que la resolución de la integral que queda afectada por este perfil se hace extensiva a cualquier fluido.

En el caso de gases, el planteamiento se complica al ser la presión inicial variable, en función del tiempo de ensayo. Se ha encontrado una fórmula empírica que satisface esos datos, y se ha

**PERMEABILIDAD A LOS FLUIDOS
DATOS AUXILIARES**

- DENSIDAD DE UN GAS. (LEY DE LOS GASES PERFECTOS):

$$D_G = \frac{\rho}{V} = \frac{M}{RT \cdot P}$$

a. PESO DEL GAS; M; PESO MOLECULAR; n; N° DE MOLES.
V: VOLUMEN (A LAS P. Atm.); R: CONSTANTE; T: TEMPERATURA (°K).
(EN LOS ENSAYOS, D_G VARIA CON LA DISTANCIA, e, RECORRIDA POR EL GAS).

- VELOCIDAD APARENTE DEL FLUIDO A CUALQUIER DISTANCIA, (e), DEL ORIFICIO DE SALIDA; v_G (SECCION ATRAVESADA=A)

POR LA "ECUACION DE CONTINUIDAD" PARA FLUIDOS INCOMPRESIBLES CIRCULANDO POR DOS PUNTOS DE UNA TUBERIA DE SECCION, (A), VARIABLE, DURANTE UN TIEMPO, (t), SE TIENE:

$$A_1 \cdot v_1 \cdot t = A_2 \cdot v_2 \cdot t; \text{ O SEA: } A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad (A)$$

ES DECIR, EL VOLUMEN QUE ATRAVIESEA A₁ Y A₂ ES EL MISMO, MULTIPLICANDO POR LA DENSIDAD, LO QUE SE HARIA CONSTANTE SERIA EL PESO. ESTO ULTIMO ES DE APLICACION A UN GAS; POR LO QUE:

a) v_G · D_G = A₀ · v_{G(a)} · D_{G(a)} (SIENDO a EL INTERIOR DE LA PROBETA).
DE AQUI Y CON LA ECUACION DE LA DENSIDAD DE UN GAS, SE TIENE:

$$v_G = \frac{P_a}{P} \cdot v_{G(a)} \cdot \frac{A_0}{A} \quad (B)$$

- RESOLUCION DE LA INTEGRAL: $\int \frac{de}{A}$

ATENDIENDO AL PERFIL "EXPERIMENTAL" ENCONTRADO EN LOS ENSAYOS DE ABSORCION, SE TIENE:

$$A = 2 \cdot \pi \cdot e \cdot (20,38 + e) + 2\pi \cdot e^2 \cdot \pi \left(\frac{3,25}{2}\right)^2 - 4\pi(e^2 + 10,2 \cdot e - 0,66)$$

$$\int \frac{de}{A} = \frac{1}{4\pi} \int \frac{de}{e^2 + 10,2 \cdot e - 0,66} = -\frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1}{10,32} \cdot \ln \left[\frac{e + 10,26}{e - 0,0643} \right] \quad (C)$$

DANDO A LOS LIMITES LOS VALORES, 3,25 Y 7,5; RESULTA:

$$\int_{\frac{3,25}{2}}^{7,5} \frac{de}{A} = -\frac{1}{4\pi \cdot 10,32} \cdot \ln \left[\frac{e + 10,26}{e - 0,0643} \right]_{\frac{3,25}{2}}^{7,5} = \frac{1}{4\pi} \cdot 0,11235 \quad (D)$$

Leyenda 3

**PERMEABILIDAD A LOS GASES (AIRE)
DATOS AUXILIARES**

- LA TEMPERATURA DEL GAS DEL ORIFICIO DE LA PROBETA, SE COMPROBABA QUE SE MANTIENE CONSTANTE DURANTE EL ENSAYO.

- LA PRESION REAL (P_a) DE ESTE GAS, VARIA DE 3 A 2,5 ATM., EN EL TIEMPO DE ENSAYO t_{AR}. EXPERIMENTALMENTE SE MIDEN LAS PRESIONES PARA TIEMPOS MENORES (t), OBTENIENDOSE CURVAS QUE SE GENERALIZAN EN UNA SOLA CONSIDERANDO t COMO % DE t_{AR}. DE ESTA FORMA LOS DATOS EXPERIMENTALES RESPONDEN A LA ECUACION:

$$P_a = \frac{C_1}{\% t_{AR}} + C_2; \quad \% t_{AR} = \frac{t}{t_{AR}} \cdot 100$$

PARA CALCULAR LAS CONSTANTES SE DESPLAZA LAS ABCISAS UNA CANTIDAD ARBITRARIA, (SE HA TOMADO 100), Y SE DA VALORES A P_a. (3 · 10⁻³ Y 2,5 · 10⁻³), PARA LOS QUE SE CONOZCA t. (EN ESTE CASO: 0 Y t_{AR}).

$$P_a = \frac{C_1}{100 + \% t_{AR}} + C_2 \rightarrow P_a = \frac{t_{AR}}{t_{AR} + t} + 2$$

LA PRESION PROMEDIADA DEL ENSAYO (P_{a(M)}) SERA LA ORDENADA MEDIA DE LA INTEGRAL DE LA ANTERIOR ECUACION, ENTRE LOS LÍMITES 0 Y t_{AR}.

$$P_{a(M)} = \frac{1}{t_{AR}} \int_0^{t_{AR}} P_a \cdot dt = \frac{1}{t_{AR}} \int_0^{t_{AR}} \left(2 + \frac{t_{AR}}{t_{AR} + t} \right) \cdot dt$$

$$P_{a(M)} = \int_0^{t_{AR}} \frac{1}{t_{AR} + t} dt + \frac{1}{t_{AR}} \cdot 2 \cdot \int_0^{t_{AR}} dt; \quad P_{a(M)} = 2,7 \cdot 10^{-3} \quad (\text{cm c.a.})$$

(PODRIA HACERSE LA INTEGRAL NUMERICAMENTE CON LOS DATOS EXPERIMENTALES, EN EL CASO DE NO ENCONTRAR UNA ECUACION QUE LOS SATISFAGA).

Leyenda 4

calculado la presión promedio. Se ha aceptado también que la temperatura del gas es constante, ya que la variación de la del gas contenido en el orificio, a lo largo del ensayo, es del orden de 1° C, por lo que no influye en el planteamiento.

La absorción de líquidos (leyenda 6), se ha subtitulado "capilaridad a presión". En la leyenda 5, y tras el cálculo del coeficiente de permeabilidad al agua, se ha introducido un nuevo concepto (T_{AB}) definido en función del dato del ensayo de absorción de líquidos. (Parece interesante el contemplarlo, por lo que tiene de singular en los resultados experimentales, ya que no parece depender de la consistencia y del tamaño máximo, aunque sí de la resistencia y de los componentes del hormigón).

En la leyenda 9 se hace una estimación de los parámetros que parecen poder llevar a estimar un radio promedio de los capilares en el hormigón. Si ello es así, la singularidad apuntada para T_{AB} podría relacionarse con dicho radio, ya que para un mismo T_{AB} podría haber distintas permeabilidades, puesto que éstas están influidas por la superficie de paso, que incluiría este radio elevado al cuadrado. Todo ello parece inducir a pensar que, el tamaño de los capilares formados, puede estar influido por los materiales empleados, esencialmente el radio capilar a igualdad de longitud de los que componen el hormigón, siendo menores cuanto menores sean los coeficientes de permeabilidad —relación ésta sugestiva— por las implicaciones de todo tipo que tiene para prever las prestaciones del hormigón, en función de sus componentes. Datos recientes apuntan que T_{AB} depende sólo de conglomerante (cemento + adición), independiente incluso del tipo de arena ensayada.

En la leyenda 9 se hace también un esbozo de enfoque de la penetración de líquidos en el hormigón seco, por capilaridad, al objeto de intentar sugerir nuevas aplicaciones con ensayos basados en los principios expuestos.

De cualquier forma conviene recalcar que una cosa son los datos de los ensayos y otra la

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD Á LOS LIQUIDOS (AGUA)

SE ENSAYA EN PROBETA SATURADA, A LA PRESION DE TRABAJO APLICANDO LA ECUACION DE DARCY PARA EL TIEMPO DE ENSAYO:

$$\frac{P_{AG}}{7200} = -K_{AG} \cdot A \cdot \frac{dP}{de} = -K_{AG} \frac{dP}{de} \cdot \frac{P_{AG}}{7200 \cdot A} = v_e \quad \boxed{-K_{AG} \cdot dP = v \cdot de}$$

(LAS VARIABLES TIENEN EL MISMO SIGNIFICADO QUE ANTERIORMENTE) CON LA ECUACION (A) DE LA HOJA DE DATOS AUXILIARES DE LOS FLUIDOS:

$$A \cdot v = A_0 \cdot v_a \quad v = v_a \cdot \frac{A_0}{A}$$

COMO $v_a = \frac{P_{AG}}{7200 \cdot A_0}$

$$LUEGO: \int -K_{AG} \cdot dP = \int \frac{P_{AG}}{7200} \frac{de}{A} = -K_{AG} \int \frac{P_{AG}}{7200} \frac{de}{A} = \frac{P_{AG}}{7200} \int_{3,25}^{7,5} \frac{de}{A}$$

EL VALOR DE LA INTEGRAL DEL SEGUNDO MIEMBRO ES EL VALOR (D) DE LA HOJA ANTES MENCIONADA.

LUEGO: $K_{AG} = \frac{0,11235}{4\pi \cdot 7200 \cdot (P_a - P_b)} \cdot P_{AG}$

DANDO VALORES: $K_{AG} = 3,10 \cdot 10^{-10} \cdot P_{AG}$

**ABSORCION DE AGUA (PROBETA SECA)
FRACCION DEL VOLUMEN SATURADO**

SE HA ENTENDIDO POR TAL LA FRACCION DEL VOLUMEN DE HORMIGON DE LA PROBETA SATURADO TRAS EL ENSAYO DE ABSORCION (ADIMENSIONAL):

$$f_{AB} = \frac{P_{AB}}{5102}$$

COMO COMPLEMENTO DE f_{AB} , PODRIA CALCULARSE EL VALOR DE e' CON LOS DATOS DE LA "TABLA EXPERIMENTAL" INDICADOS POSTERIORMENTE Y LA ECUACION:

$$e' = e - \frac{3,25}{2} \quad (\text{DATOS EN cm})$$

Leyenda 5

PERMEABILIDAD POR ABSORCION CAPILARIDAD A PRESION (AGUA)

SE ENSAYA EN PROBETA SECADA, EN LAS CONDICIONES DEL METODO, SE CALCULA ADMITIENDO QUE LA PENETRACION DE LIQUIDO SIGUE UNA PROPAGACION TAL COMO EL "PERFIL EXPERIMENTAL" ENCONTRADO PARA EL AGUA, ESTE PERFIL ORIGINA UN VOLUMEN DE HORMIGON SATURADO DE AGUA QUE LLAMAREMOS v_{FE} .

EL ESPESOR DE HORMIGON DEL "PERFIL EXPERIMENTAL" SE DA EN FUNCION DEL DATO DE ESTE ENSAYO, (P_{AB}), Y DE LA PERDIDA DE PESO EN EL SECADO (P_S), SE DAN VALORES TABULADOS, CON LO QUE PUEDE INTERPOLARSE DATOS INTERMEDIOS, POR SER LABORIOSO EL CALCULO ANALITICO, LA TABLA SE CALCULA EN VIRTUD DE LA SIGUIENTE PROPORCIONALIDAD:

$\frac{P_{AB}}{P_S} = \frac{v_{FE}}{5102}$	$\frac{P_{AB}}{P_S}$	0	0,05	0,10	0,15	0,25	0,40
e (cm)		1,63	2,47	3,07	3,55	4,33	5,25

APLICANDO LA ECUACION DE DARCY, PARA EL TIEMPO DE ENSAYO:

$$\frac{P_{AB}}{1800} = -K_{AB} \cdot A \cdot \frac{dP}{de} = -K_{AB} \frac{dP}{de} \cdot \frac{P_{AB}}{1800 \cdot A} = v \quad \boxed{-K_{AB} \cdot dP = v \cdot de}$$

(LAS VARIABLES TIENEN EL MISMO SIGNIFICADO QUE ANTERIORMENTE) CON LA ECUACION (A) DE LA HOJA DE LOS DATOS AUXILIARES DE LOS FLUIDOS:

$$A \cdot v = A_0 \cdot v_a \quad v = v_a \cdot \frac{A_0}{A}$$

COMO: $v_a = \frac{P_{AB}}{1800 \cdot A_0}$

$$LUEGO: \int -K_{AB} \cdot dP = \int \frac{P_{AB}}{1800} \frac{de}{A} = -K_{AB} \int \frac{P_{AB}}{1800} \frac{de}{A} = \frac{P_{AB}}{1800} \int_{3,25}^e \frac{de}{A}$$

SE ADMITE QUE $P = P_b = 1 \text{ atm}$ (PRESION ATMOSFERICA), EL VALOR DE LA INTEGRAL DEL SEGUNDO MIEMBRO, ES EL VALOR (D) DE LA HOJA ANTES MENCIONADA.

LUEGO: $K_{AB} = \frac{-P_{AB}}{1800 (P_a - P_b)} \cdot \frac{1}{4\pi \cdot 10,32} \cdot \ln \left[\frac{e + 10,26}{e - 0,0643} \right] \cdot \frac{e}{3,25}$

DANDO VALORES: $K_{AB} = -1,07 \cdot 10^{-9} \cdot \left(\ln \frac{e + 10,26}{e - 0,0643} - 2,030 \right) \cdot P_{AB}$

EL VALOR DE e SE INTERPOLA EN LA TABLA.
EL VALOR DE K_{AB} HA DE ESTAR INFLUIDO POR LA CAPILARIDAD DEL HORMIGON, POR ELLO SE DA EL SUBTITULO A ESTE COEFICIENTE.

Leyenda 6

PERMEABILIDAD A LOS GASES (AIRE)

SE ENSAYA EN PROBETA SECADA, EN LAS CONDICIONES DEL METODO, AL SER EL FLUIDO COMPRESIBLE EL GRADIENTE DE PRESION ES VARIABLE:

$$\frac{Q}{A \cdot R} = -K_{AR} \cdot A \cdot \frac{dP}{de} = -K_{AR} \frac{dP}{de} \cdot \frac{Q}{A \cdot R} = v_G \quad (1)$$

EL SIGNO MENOS SE DEBE A QUE EL GRADIENTE DISMINUYE EN LA DIRECCION DE PASO DE GAS, SIENDO Q , A Y v_G : EL VOLUMEN, (MEDIDO A LA CORRESPONDIENTE PRESION), LA SUPERFICIE DE PASO, Y LA VELOCIDAD APARENTE, DEL GAS, A UNA DISTANCIA e DEL ORIFICIO DE SALIDA. (LA VISCOSIDAD NO INFLUYE, AL NO DEPENDER DE LA PRESION Y ADMITIRSE TEMPERATURA CONSTANTE, YA QUE SU VARIACION ES DEL ORDEN DE 1°C).

LA ECUACION (A) DE LA HOJA ANTERIOR DE DATOS AUXILIARES, PUEDE APLICARSE AL PUNTO DE SALIDA DEL ORIFICIO, (a), SE CALCULA $v_{G(a)}$ CONSIDERANDO COMO PRESION LA PROMEDIADA: $P_{a(M)}$.

$$v_G = \frac{P_{a(M)}}{P} \cdot v_{G(a)} \cdot \frac{A_0}{A} \quad (B')$$

APLICANDO (B') EN (1), SE TIENE:

$$-K_{AR} \cdot P \cdot \frac{dP}{de} = P_{a(M)} \cdot v_{G(a)} \cdot \frac{A_0}{A}$$

$$-K_{AR} \int P \cdot dP = P_{a(M)} \cdot v_{G(a)} \cdot A_0 \cdot \int \frac{de}{A} \quad (2)$$

LA ECUACION (2) PUEDE INTEGRARSE PARA LIMITES CONOCIDOS, PARA de , ENTRE 3,25 Y 7,5; PARA P , ENTRE LA PRESION INTERIOR PROMEDIO DEL ORIFICIO Y LA PRESION EXTERIOR (P_b), QUE VALE 1000.

$$-K_{AR} \int_{P_a}^{P_b} P \cdot dP = P_{a(M)} \cdot v_{G(a)} \cdot A_0 \cdot \int_{3,25}^{e=7,5} \frac{de}{A} \quad (3)$$

EN LA HOJA ANTERIOR DE DATOS AUXILIARES SE RESOLVIO LA INTEGRAL $\int \frac{de}{A}$ QUE ENTRE LOS LIMITES INDICADOS DA UN VALOR (D). SIGUE...

Leyenda 7

PERMEABILIDAD A LOS GASES (AIRE)

EL LIMITE INFERIOR DE LA PRIMERA INTEGRAL DE (3), SE ACEPTA QUE EQUIVALE A $P_{a(M)}$, CUYO VALOR, YA CALCULADO, ES DE $2,7 \cdot 10^3$ PARA CALCULAR $v_{G(a)}$, SE CALCULA EL VOLUMEN TOTAL DEL GAS, (Q), QUE SALE POR LA SUPERFICIE A , EN EL SISTEMA DE MEDICION, ($\odot + \odot$), DONDE SU PERDIDA ORIGINA UN DESCENSO DE PRESION DE $(2 - 1,5) = 0,5 \text{ ATM}$, Y PARA CONDICIONES NORMALES, (20°C Y $760 \text{ mm Hg} = P_b$), SE TIENE:

$$Q_1 = \frac{0,5 \cdot \text{VOLUMEN} (\odot + \odot)}{R \cdot (273 + 20)} \cdot (\text{VOLUMEN MOLAR})$$

$$Q_1 = \frac{0,5 \cdot 220}{0,082 \cdot (273 + 20)} \cdot 24,0 = 110 \text{ cm}^3 \quad (\text{EN ESTE APARATO})$$

ADMITIENDO COMO PRESION PROMEDIO EN EL INTERIOR DE LA PROBETA LA MEDIA ENTRE P_a Y P_b TANTO AL PRINCIPIO COMO AL FINAL DEL ENSAYO, EL DESCENSO DE PRESION ES DE $1/4 \text{ ATM}$, SI EL VOLUMEN OCUPADO POR EL GAS ES P_S EL VOLUMEN DEL GAS QUE SALE ES: $P_S/4$, CON ELLO QUEDA CONOCIDO EL VALOR:

$$v_{G(a)} = \frac{Q_1 + P_S/4}{A \cdot R \cdot A_0}$$

INTEGRANDO LA (3) SE TIENE:

$$K_{AR} \frac{P_a(M)^2 - P_b^2}{2} = P_{a(M)} \cdot \frac{Q + P_S/4}{A_0 \cdot A \cdot R} \cdot A_0 \cdot \frac{1}{4\pi} \cdot 0,11235$$

LUEGO:

$$K_{AR} = \frac{(Q + P_S/4) \cdot P_{a(M)} \cdot 0,11235}{2\pi \cdot (P_a(M)^2 - P_b^2) \cdot A \cdot R} \quad (4)$$

DANDO VALORES EN (4):

$$K_{AR} = \frac{7,68 \cdot 10^{-6} (110 + P_S/4)}{A \cdot R}$$

Leyenda 8

**OTRAS VARIABLES A ESTUDIAR
(POSIBLES ENFOQUES)**

**PRESION POR CAPILARIDAD (Pc), Y RADIO
PROMEDIO DE LOS CAPILARES (r)**

Siendo S la tensión superficial del agua; θ el ángulo de contacto agua-hormigón, y r el radio promedio de los capilares, se tendría:

$$P_c = \frac{2\pi \cdot r \cdot S \cdot \cos \theta}{\pi r^2}$$

Siendo h la altura del agua en el orificio de la probeta, podría considerarse que la presión hidrostática promedio que ayuda a la propagación del agua sería $h/2$. La acción de la gravedad podría compensarse apoyando un cierto tiempo la probeta sobre sus caras paralelas, alternativamente, de forma que durante el ensayo permaneciera el mismo tiempo apoyada en cada cara. Quizás la altura h debería ser menor de 22cm, para que el agua no saliera al exterior de la probeta durante el ensayo por la zona más estrecha. (Implicaría diseñar un tapón de mayor altura que el actual).
Con el mismo planteamiento que en K_{AB} , se tendría, siendo t el tiempo de ensayo:

$$\int_{P_b}^{P_0} -K_{AB} \cdot dP_c = \int_{\frac{3,25}{2}}^e \frac{P_{AB}}{t} \cdot \frac{de}{A}; \text{ Integrando, resulta:}$$

$$S \cdot \cos \theta = -\frac{r}{2} \cdot \frac{P_{AB}}{K_{AB} \cdot t} \cdot \frac{1}{4\pi \cdot 10,32} \cdot \left[\ln \left(\frac{e+10,26}{e-0,0643} \right) - 2,0307 \right] - \frac{r}{2} \cdot h$$

Determinando K_{AB} por el método ya indicado, las variables P_{AB} , t y e , pueden ser medidas experimentalmente. Como S está tabulada puede conocerse r , si se midiera θ , podría llegarse a conocer una variable, (r por ejemplo), determinando las otras.
La anterior ecuación puede quedar simplificada haciéndolo suficientemente grande, (t_s), como para que $P_{AB} = P_s$, y $e = 7,5$, con lo que:

$$S \cdot \cos \theta = -\frac{r}{2} \left(\frac{P_s}{K_{AB} \cdot t_s} \cdot \frac{0,11235}{4\pi} \right) - h; \text{ o bien } r = \frac{8\pi \cdot K_{AB} \cdot t_s (S \cdot \cos \theta + h)}{0,11235 \cdot P_s}$$

En estos cálculos influirán las mismas circunstancias que en los de K_{AB} .

El poder estimar el espesor de hormigón mojado por capilaridad, (e), en un hormigón superficialmente seco, (caso que se da en la práctica), daría pie a intentar estimar los efectos nocivos de tal penetración, (por ejemplo al congelarse este agua).

Leyenda 9

**ECUACIONES PARA EL CALCULO
DE LOS COEFICIENTES**

SE RESUMEN LAS ECUACIONES ENCONTRADAS, SE RECUERDA EL SIGNIFICADO DE LAS VARIABLES QUE INTERVIENEN Y SE DAN ACLARACIONES DE LAS FORMULAS EMPLEADAS.

P_{AG} : PESO DE AGUA PERMEADA (GRM: cm³)
 t_{AR} : TIEMPO DE PERMEACION DE AIRE (SEG).
 P_{AB} : PESO DE AGUA PERMEADA EN LA ABSORCION (GRM: cm³).
 e : ESPESOR DE HORMIGON PERMEADO EN LA ABSORCION (cm).
 P_s : PESO PERDIDO EN EL SECADO (GRM: cm³).
 K_{AG} : COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD AL AGUA, HORMIGON SATURADO (cm/Seg).
 K_{AR} : COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD AL AIRE, HORMIGON SECO (cm/Seg).
 K_{AB} : PERMEABILIDAD POR ABSORCION: CAPILARIDAD A PRESION (cm/Seg).
 t_{AB} : ABSORCION DE AGUA, HORMIGON SECO. (DATO ADIMENSIONAL)

$$K_{AG} = 3,10 \cdot 10^{-10} \cdot P_{AG}$$

$$K_{AR} = \frac{2,68 \cdot 10^{-6} (P_s / 4 + 110)}{t_{AR}}$$

$$K_{AB} = -1,07 \cdot 10^{-9} \cdot \left(\ln \frac{e+10,26}{e-0,0643} - 2,0307 \right) \cdot P_{AB}$$

$$t_{AB} = \frac{P_{AB}}{5 \cdot 102}$$

- LAS CONSTANTES DE LAS ECUACIONES HACEN REFERENCIA AL UTILLAJE Y METODO DE ENSAYO EMPLEADO, EN ESPECIAL t_{AB} Y K_{AB} , YA QUE NO SE MIDEN EN SITUACION DE REGIMEN ESTACIONARIO. EL CASO DE K_{AR} ES INTERMEDIO, YA QUE SE PROMEDIA LA PRESION; ADEMAS INFLUYEN LAS CONSTANTES DEL APARATO.
- LOS COEFICIENTES OBTENIDOS DEPENDEN DE LOS MATERIALES EMPLEADOS; EL DATO DE UN ENSAYO VARIA SI CAMBIA ALGUN COMPONENTE.
- EN CUALQUIER CASO INFLUYE LA CONSERVACION DE LAS PROBETAS.
- EL DATO K_{AG} PARECE EL MAS GENERALIZADO, LOS DEMAS CONVIENE REFERIRLOS AL METODO EMPLEADO, (DEL CALE), MIENTRAS NO HAYA EXPERIENCIAS DE COMPARACION CON OTROS METODOS.
- EN CUALQUIER CASO LOS DATOS DE LOS ENSAYOS COMPARAN POR SI MISMOS DISTINTOS TIPOS DE HORMIGONES.

Leyenda 10

generalización de éstos. En cuanto a los datos, su validez para comparar distintos tipos de hormigón es evidente. Y en cuanto a la generalización de los coeficientes obtenidos en la leyenda 10 (que es un resumen de las fórmulas a aplicar) se indica la conveniencia de comparar con otros —encontrados por otros métodos—, para comprobar si realmente sólo depende del tipo de conservación a que se haya sometido al hormigón. (A este respecto, podría pensarse hacer ensayos de información extrayendo testigos de 15 cm de diámetro, perforándolos con orificio de 3,5 cm de diámetro, que se taponaría con dos tapones expansivos, con lo que se conformaría una probeta sobre la que efectuar ensayos de permeabilidad).

ALGUNOS DATOS EXPERIMENTALES

En los gráficos del 1 al 4 se indican los resultados experimentales obtenidos para los hormigones descritos en el encabezamiento. En los n.os 2, 3 y 4, las resistencias se han acotado a 125 y 375 kg/cm², y se ha puesto una escala auxiliar en MPa. Se han representado los cuatro datos que se obtienen con las fórmulas de la leyenda 10.

La curva de áridos se mantuvo en todos los ensayos, y era de tipo continuo.

A título comparativo, y empleando en las abscisas una escala totalmente arbitraria, se indican en el gráfico 1, los resultados obtenidos para los hormigones con 250 kg/m³ de un cemento PA-350, con consistencias plástica y fluida, y tamaños máximos de áridos 25 y 12 mm (este último suele ser el menor de los tamaños máximos empleados en la elaboración de hormigón). Los datos correspondientes a este último hormigón pueden servir de pauta para contrastar las permeabilidades, con la correspondiente al hormigón referenciado en la normativa, como adecuado para ciertos elementos de obras. En los gráficos 2, 3 y 4 se evidencia que cualquiera de los hormigones contemplados no llegan al umbral deducido anteriormente.

PERMEABILIDAD DEL HORMIGON DE DOSIFICACION
250 kg/m³ DE PA-350

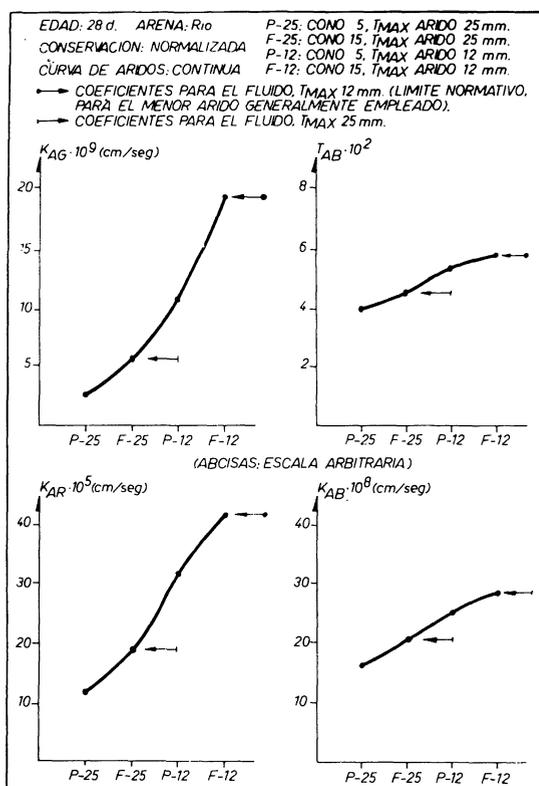


Gráfico 1

PERMEABILIDAD FRENTE A RESISTENCIA A COMPRESION

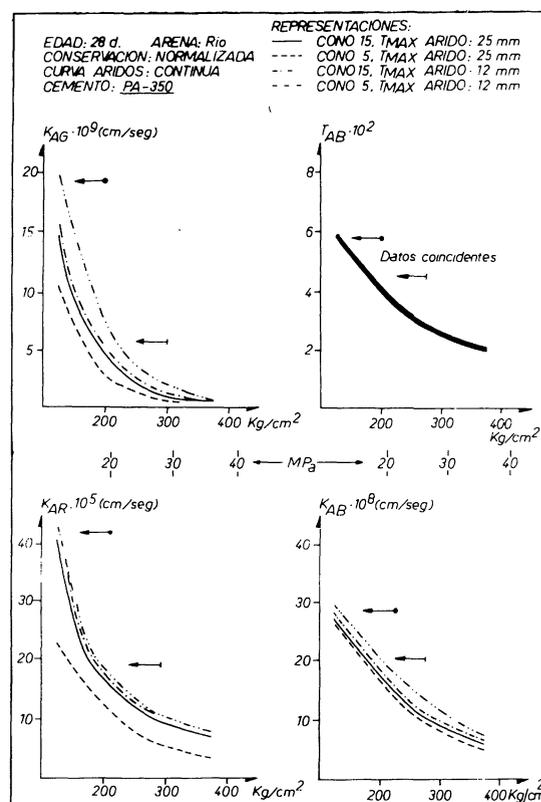


Gráfico 2

Es remarcable la concordancia entre los gráficos 1 y 2 en cuanto a que la influencia en la permeabilidad de la variación en el tamaño máximo del árido y de la consistencia se mantiene, para el margen de resistencias considerado, con la excepción de la singularidad de T_{AB} , ya comentada.

En el gráfico 3 se detecta una curiosa circunstancia: es la distinta permeabilidad de un P-450 y un PA-350 elaborados con el mismo clínker con la diferencia de la incorporación en fábrica de una adición. Las permeabilidades, para hormigones de la misma resistencia, son mayores para el cemento con adición.

Con el mismo P-450, pero adicionando directamente en la hormigonera otra adición (cenizas de Cercs), se obtuvieron los datos del gráfico 4, que se comparan con los correspondientes al PA-350 del gráfico 3, encontrándose aún más diferencia de permeabilidades en el gráfico 4 que en el 3.

Estas tendencias en las variaciones de la permeabilidad se confirman con muchos otros datos de hormigones, con otros tipos de áridos, con y sin varios tipos de plastificantes habituales en la industria del hormigón para otros tamaños máximos y otras consistencias. No mejora, sino al contrario, el efecto relativo de las adiciones contempladas en los gráficos 3 y 4 al molerlas previamente.

Otro parámetro que afecta a la permeabilidad es la curva granulométrica de conjunto de áridos. Se ha ensayado variar el porcentaje de las arenas ensayadas, respecto al total de áridos, encontrándose un óptimo que corresponde al empleado en los ensayos. Porcentajes menores hacen aumentar la permeabilidad, y porcentajes mayores también, y en mayor cuantía; todo ello

**PERMEABILIDAD FRENTE A RESISTENCIA
A COMPRESION**

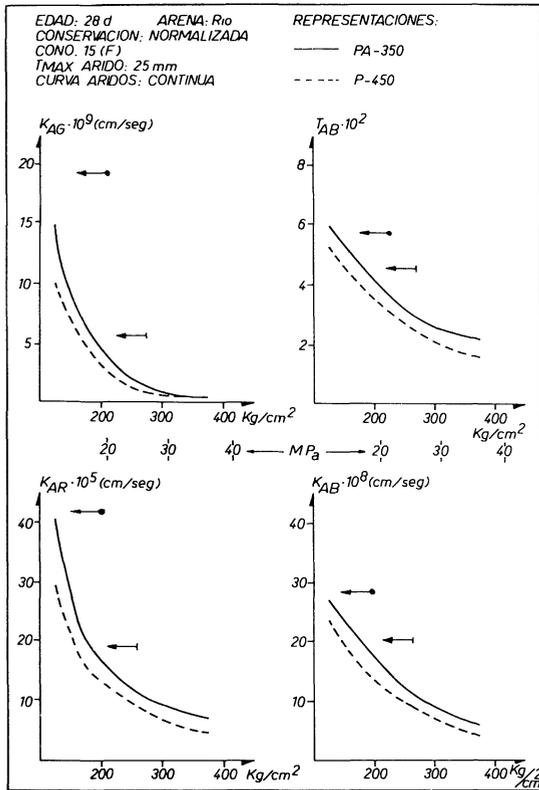


Gráfico 3

**PERMEABILIDAD FRENTE A RESISTENCIA
A COMPRESION**

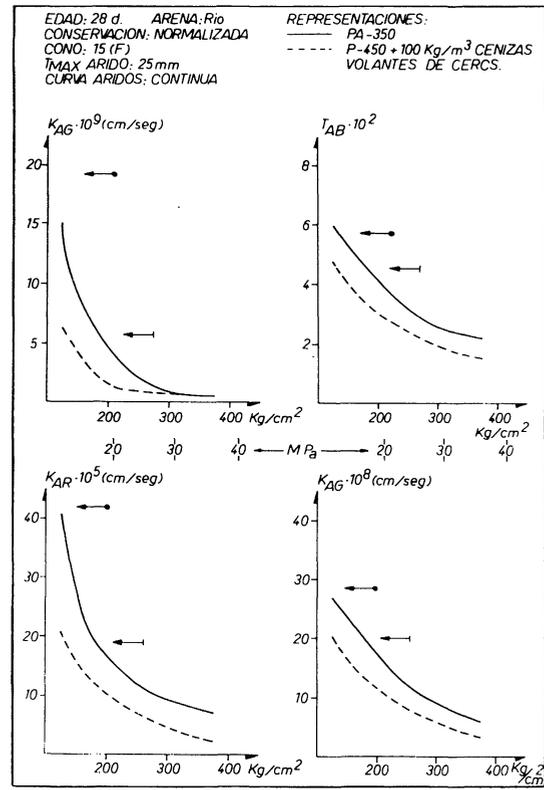


Gráfico 4

para la potencia de compactación empleada al elaborar las probetas. (Picado con barra, según norma).

Otra circunstancia que se da en la práctica es la presencia de arcilla en los áridos. Para comprobar si influye en la permeabilidad se añadieron proporciones conocidas de arcilla a la arena empleada, observándose que disminuye apreciablemente la resistencia pero que, partiendo de este último dato, la permeabilidad obtenida era la previsible por las correlaciones provisionales de que se dispone.

El comportamiento de los aditivos plastificantes en la impermeabilidad es muy positivo, en especial en hormigones con las adiciones ensayadas.

CRITERIOS PARA CUANTIFICAR LAS PRESTACIONES DEL HORMIGON

En la actualidad, el hormigón se especifica por su Resistencia, Consistencia y Tamaño Máximo de Arido. Cuando se quiere acotar alguna otra característica que no puede medirse directamente (impermeabilidad, durabilidad...) suelen ampliarse estas especificaciones a otras tales como: el contenido de cemento, o la relación entre la cantidad de algún compuesto químico presente en el hormigón y alguno de sus componentes, generalmente el cemento.

De lo indicado hasta ahora se deduce que las tres especificaciones actuales afectan a casi todas las propiedades del hormigón. Junto con la impermeabilidad (que tienen en cuenta sus distintos componentes) se le adicionan, prácticamente, todas las que pueden alterarlas por causas exógenas al hormigón.

La más clásica de las relaciones entre componentes es quizás la relación agua-cemento. Pues bien, en los hormigones que llevan adición, tanto si ésta se incorpora en la fábrica de cemento, como en la planta de hormigón, deja de tener validez, ya que no refleja el comportamiento de dichos hormigones.

Se indican las relaciones agua-cemento de los hormigones dados, como ejemplo de estas experiencias, donde se ve la incoherencia entre dicha relación y la resistencia: para una misma resistencia, las relaciones entre el agua y el cemento de cada amasada de prueba debería ser la misma. (Se dan las relaciones respecto a la del hormigón tomado anteriormente como patrón de comparación, el D-250-F-12, para hacer patente el error proporcionalmente a ella).

Los datos se dan referidos al hormigón de 200 kg/cm² de resistencia a 28 días.

PA-350				P-450	
F-12	P-12	F-25	P-25	F-25	F-25 (Con Cenizas)
1	1,00	1,09	1,13	1,35	1,72

Las diferencias debidas a la consistencia y al tamaño máximo del árido, con PA-350, no son definitorias, pero sí empiezan a serlo cuando se pasa a P-450 y más aún con el empleo de adición.

El caso es peor cuando pretende resumirse el comportamiento del hormigón con la relación de algún componente químico y algún componente del hormigón, en general el cemento. En el caso de los hormigones con adición suele cometerse el error siguiente: si la adición se añade en la fábrica de cemento, se cuenta como cemento, con lo que el denominador de la fracción tiene un cierto valor. Si la adición se añade en la planta de hormigón, no se cuenta como cemento, con lo que dicho denominador tiene otro valor. (En ambos casos la composición química del hormigón es idéntica, a igualdad de las adiciones). Al ser las premisas falsas, son falsas las conclusiones que de ellas se deduzcan, haciendo prever prestaciones distintas para hormigones similares, lo que evidencia que se plantea un sofisma.

Para dar nueva luz al tema podría recordarse, como causa primigenia generalmente aceptada, el parámetro que parece incidir más en las propiedades del hormigón, y que es el agua sobrante tras la hidratación.

Sabido es que el hormigón debe amasarse con mucha más agua de la estrictamente necesaria para hidratarse, permitiendo su puesta en obra. El agua sobrante acaba evaporándose y creando la red de capilares que hace permeable al hormigón. La singularidad señalada, respecto a los datos de T_{AB} , indican la buena correlación que parece haber entre el volumen de dicha red capilar y la resistencia del hormigón.

Se están recopilando datos experimentales los cuales parecen apuntar que, por este camino, podrían encontrarse relaciones que satisficieran mejor las características del hormigón que las que actualmente suelen emplearse.

Es interesante recordar que no hace tanto tiempo el hormigón se referenciaba por relaciones volumétricas entre sus componentes. Era clásico el 1 : 2 : 3, actualmente no; por ello cabe pensar en otros cambios que actualicen las relaciones entre sus componentes.

CONCLUSIONES

El método expuesto ha permitido cuantificar las permeabilidades de numerosos tipos de hormigón, y aportar nuevas experiencias que abundan en el sentido de inducir a reconsiderar los

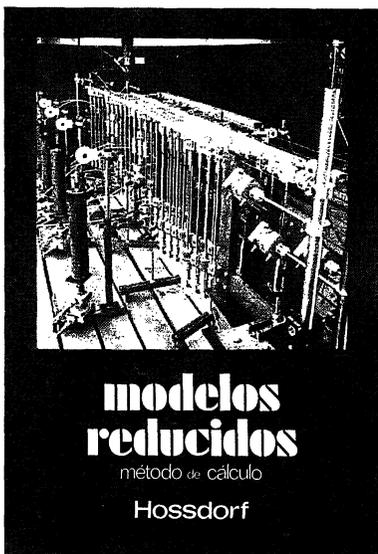
criterios clásicos de pretender enriquecer las especificaciones técnicas del hormigón en base a fijar mínimos a alguno de sus componentes, o a acotar las relaciones entre ellos. El criterio podría ser el de fijar las permeabilidades al hormigón (o fijarlas mediante la oportuna correlación con la resistencia a compresión). Estas limitaciones podrían ser fijadas en función del medio en el que el hormigón deba desarrollar su acción resistente.

Con estos planteamientos podría proyectarse, controlarse y/o construirse, diseñando el hormigón de forma más acorde con las prestaciones que de él se esperen.

Se agradece a los Sres. Fco. Javier Martínez de Eulate (de ANEFHOP), y Eduardo Herrero Nuñez (del CIDA), la atenta lectura de originales, y los comentarios al método expuesto.

* * *

publicaciones del i.e.t.c.c.



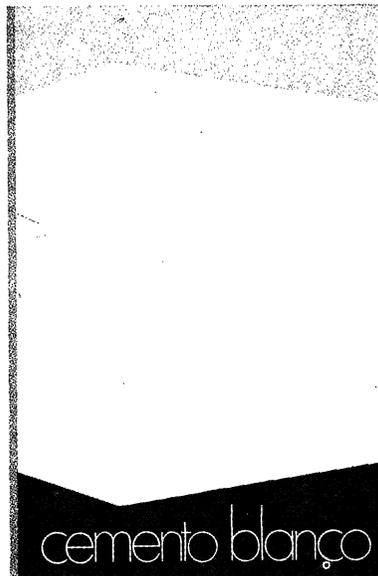
Modelos reducidos. Método de cálculo

H. Hossdorf, Ingeniero Civil

La técnica de los ensayos en modelos reducidos de estructuras sufre hoy día una decisiva metamorfosis. Hasta hace poco era un medio más bien de artesanía, que no siempre era tomado en serio por los académicos teorizantes para comprender el comportamiento resistente de las estructuras complejas y al que se acudió las más de las veces, como a un último remedio debido a sus indiscutibles insuficiencias. Sin embargo, en poco tiempo y gracias a su conexión con los ordenadores digitales, se ha transformado en un instrumento científicamente valioso, que no puede quedar a un lado en la práctica diaria del Ingeniero Projectista.

Un volumen encuadernado en cartón plastificado con lomo de tela, de 17 x 24 cm, compuesto de 250 páginas, 158 figuras y fotografías.

Precios: 1.800 ptas.; \$ USA 26.00.



Cemento blanco

Julián Rezola
Ingeniero Químico Dipl. I. O. S.

Sabido es que existe una extensa y documentada bibliografía sobre el cemento gris; en cambio, no puede decirse lo mismo acerca del cemento portland blanco, ya que los escritos existentes se refieren tan sólo a algunas peculiaridades que le distinguen de aquél.

El autor nos ofrece sus profundos conocimientos y su larga experiencia tanto en laboratorio como en fabricación.

La parte descriptiva del libro se complementa con gráficos, diagramas y fotografías de gran utilidad, destinados a conseguir la aplicación apropiada de este aglomerante.

Un volumen encuadernado en cartón policerado, de 17,4 x 24,3 cm, compuesto de 395 páginas, numerosas figuras, tablas y ábacos.

Precios: España, 1.700 ptas.; extranjero, \$ 34.



La presa bóveda de Susqueda

A. Rebollo,
Dr. Ingeniero de Caminos

El esfuerzo del constructor de presas se sitúa, por su pretensión de perennidad, a contracorriente de las tendencias de la civilización actual, caracterizada por lo fungible. Pueden evocarse las 10.000 grandes presas en funcionamiento o en construcción que están envejeciendo y reclaman los cuidados gerontológicos para mantener y perfeccionar su servicio y garantizar su inalienable pretensión de perennidad. En la medida en que todas nuevas obras, grandes o pequeñas, son portadoras de riesgos ecológicos y, a veces, catastróficos, que aumentan con el envejecimiento, la gerontología de las presas es todo un emplazo. La acción adelantada de Arturo Rebollo en este terreno marca un camino a seguir para todos los que aman su propia obra con la devoción paternal que él ha puesto en Susqueda.

Un volumen encuadernado en cartón plastificado con lomo de tela, de 18 x 24,5 cm, compuesto de 408 páginas, 330 figuras y fotografías y 39 tablas.

Precios: 1.700 ptas.; extranjero, \$ USA 24.00.