

PERMEABILIDAD DE HORMIGONES

Ing. Marcelo Wainzstein

Tco. Quím. Jorge D. Sota

SERIE II, Nº 304

INTRODUCCION

La durabilidad del hormigón puede ser afectada peligrosamente por la penetración de líquidos agresivos o cuando el hidróxido de calcio que se forma como producto de hidratación del cemento es lavado por circulación del agua dentro del hormigón. Esta penetración del líquido depende de la permeabilidad del hormigón, la que también determina la facilidad con que el hormigón puede ser saturado. Por lo tanto también tiene una importancia fundamental en la resistencia a congelación y deshielo.

Asimismo, en el caso de hormigón armado, el ingreso de humedad y/o aire puede dar lugar a la corrosión del acero. El acero al corroerse puede llegar a aumentar un 200 por ciento su volumen, y se originan fisuras y desprendimiento del recubrimiento. También tiene relación con la presión hidrostática en el interior de las presas, y por último el ingreso de agua en el hormigón afecta a las propiedades térmicas.

Recordemos que la pasta de cemento y los áridos contienen poros. Además el hormigón tiene vacíos causados por compactación incompleta (aire naturalmente incorporado) o por exudación. Luego los hormigones normales endurecidos de construcción, tienen volúmenes de poros comprendidos entre el 8 y 25 por ciento. Ese volumen de poros nos proporciona sólo la suma de poros en porcentual, pero nada expresa acerca del tamaño de los mismos, de su forma o de la distribución, factores que tienen notable influencia sobre esta propiedad que estamos analizando.

ESTRUCTURA DE POROS Y CAPILARES DEL HORMIGON ENDURECIDO. (POROSIDAD) Y SU VINCULACION CON LA PERMEABILIDAD Y ABSORCION

Un mismo volumen de poros puede estar compuesto de una

pequeña cantidad de poros grandes y oquedades, o bien, de numerosos poros de tamaños medio, o finalmente, de una infinidad de poros minúsculos. En general se trata de un conjunto de poros de los más diversos tamaños.

Consideramos la forma, en que dichos vacíos se originan en el hormigón endurecido.

a) En primer lugar, la necesidad de obtener mezclas trabajables y que permitan llenar con facilidad los encofrados, obliga a utilizar una cantidad de agua de mezclado mucho mayor que la necesaria para completar la hidratación y el endurecimiento del cemento, que es del orden del 20 por ciento del peso de cemento, quedando la mayor parte de ella como agua libre en la masa del hormigón. El volumen que esta agua libre ocupa, está inicialmente determinado por la razón agua/cemento y representa espacio libre para ser ocupado por los productos de hidratación del cemento. De ahí la importancia que revisten los bajos contenidos unitarios de agua y un curado eficiente y prolongado. Los diámetros de estos poros son del orden de 10^{-3} a 10^{-4} centímetros. El volumen total estará comprendido entre aproximadamente 8 y 40 por ciento del volumen de la pasta para razones agua/cemento dentro de la gama de valores de trabajo normal.

b) En segundo lugar, el volumen sólido de los productos que se forman por la hidratación del cemento, es menor que la suma de los volúmenes de agua y sólido del cemento que entran en la reacción. Así es como resulta imposible que la pasta endurecida de cemento y agua llene íntegramente el espacio que originariamente ocupaba la misma en estado fresco. La consecuencia es que la pasta endurecida contiene cierta cantidad de vacíos. Estos pequeñísimos poros del gel, de diámetros del orden de 10^{-7} centímetros ocupan aproximadamente el 25 por ciento del volumen aparente de los productos de hidratación.

c) En cuanto a los agregados, que constituyen algo más del 70 por ciento del volumen de hormigón, influyen sobre las características de aquél. El volumen de poros de los agregados del tipo normal varía entre 1 y 5 por ciento y sus diámetros son variables y del orden de los mayores diámetros de los canales capilares de la pasta.

d) El hormigón contiene cierta cantidad de aire natural

o intencionalmente incorporado en su masa. Este volumen puede variar entre 1 y 10 por ciento aproximadamente, dependiendo del tipo y de la cantidad de agente incorporador de aire empleado y de otras circunstancias. Los diámetros oscilan entre 10^{-1} a 10^{-3} centímetros. Asimismo, si la mezcla no está correctamente proyectada o si existen defectos de compactación, en las estructuras se observan los tan indeseables nidos de abeja.

e) Otro tipo de vacíos se desarrolla cuando el hormigón está en estado plástico, inmediatamente después de haber sido colocado en obra. Estando las partículas sólidas, incluso el cemento, en un estado de equilibrio inestable, al producirse el asentamiento de dichas partículas como consecuencia de la acción de las fuerzas gravitatorias, el agua es forzada a dirigirse hacia las partes superiores, comenzando entonces la formación de una serie de canales capilares que pueden llegar hasta las superficies exteriores de las estructuras (exudación). Estos pequeños e innumerables canales de agua interconectados, constituyen una red dentro de la masa del hormigón. Parte del agua que asciende como consecuencia de la exudación, es detenida debajo de algunas de las partículas de agregados de mayor tamaño, constituyendo una película de agua, que tenderá a desaparecer dejando vacíos, que constituyen zonas de debilidad, de alta razón agua/cemento y de pobre adherencia entre la pasta y los agregados. Por lo tanto el hormigón es un material poroso, con vías de acceso abiertos al ingreso, dentro de su masa, de sustancias que están en contacto con el hormigón y también, naturalmente, al egreso, desde su masa al exterior de sustancias en condiciones de recorrer los poros y capilares en sentido inverso. Esto también indica que la superficie de contacto del hormigón con un medio agresivo, no es solamente la externa, delimitada por las formas exteriores de la estructura, sino que a ella debe agregarse la enorme superficie interna constituida por los poros, capilares. Resumiendo, el agua pasa por los capilares del hormigón, por los de la pasta, también puede circular por los correspondiente al gel y pasa en la interfase entre el árido grueso y la pasta.

La circulación de los líquidos, agresivos o no, pueden producirse tanto por permeabilidad, es decir líquido sometido a una presión exterior, como por capilaridad (absorción

capilar).

ENSAYOS DE PERMEABILIDAD

La absorción, que mide el volumen de poros en el hormigón, es un concepto distinto al de permeabilidad.

La permeabilidad del hormigón no es una simple función de su porosidad, pues depende también del tamaño, distribución y continuidad de dichos poros.

La permeabilidad de la pasta de cemento varía con el progreso de la hidratación. En la pasta fresca, el escurrimiento de agua es controlado por el tamaño, forma y concentración de los granos de cemento originales. Con el progreso de la hidratación, la permeabilidad decrece rápidamente porque el aumento del volumen del gel es aproximadamente dos veces el volumen de cemento no hidratado, por lo tanto el gel gradualmente llena el espacio que originalmente ocupa el agua que se va evaporando.

En la pasta endurecida de cierta edad, la permeabilidad depende del tamaño, forma y concentración de las partículas de gel y si los capilares son continuos o no.

En consecuencia, los hormigones que tengan un curado adecuado serán más impermeables que otros con curado deficiente.

Para pastas hidratadas de la misma edad, la permeabilidad es menor a medida que disminuye la razón agua/cemento.

La permeabilidad del hormigón es afectada también por las características del cemento. Asimismo, para las distintas composiciones en compuestos de los cementos, al variar las velocidades de hidratación, queda afectada la permeabilidad, pero sin que la permeabilidad a larga edad sufra variaciones.

La diferencia entre la permeabilidad de la pasta de cemento y el hormigón que contiene la pasta de la misma razón

agua/cemento, está en función de la permeabilidad propia del árido. Si el árido tiene poca permeabilidad, se reduce el área efectiva a través de la cual puede escurrir el agua; en otras palabras, el hormigón logrado con ese árido, tendrá menor permeabilidad que la pasta de la misma razón agua/cemento.

Para conseguir hormigones de baja permeabilidad es fundamental, entre otros factores, el empleo de agregados con buena granulometría y limitación del agua de mezclado. Deben tener buen mezclado, consistencias aptas, una compactación completa y un curado en condiciones favorables; la sustitución del cemento portland por cenizas volantes o puzolanas, reduce la permeabilidad. Davis y Blanks, encontraron que en muchos casos, la reducción alcanza a cifras significativas. Esto último es muy importante para presas, donde la permeabilidad es en general un factor, más importante que la resistencia, más si el agua embalsada es agresiva, o está emplazada en zonas de baja temperatura.

Powers y colaboradores, realizaron experiencias para observar la reducción de la permeabilidad de la pasta de cemento con el incremento de la hidratación, ensayando probetas de razón agua/cemento (en peso): 0,7 y curadas hasta la edad de ensayo obtuvieron los siguientes resultados:

Edad (días)	Coefficiente de permeabilidad K cm/seg
1	2×10^{-4}
5	4×10^{-8}
6	1×10^{-8}
8	4×10^{-9}
13	5×10^{-10}
24	1×10^{-10}
último	$6 \times 10^{-11} *$

* Calculado

El Bureau of Reclamation ha especificado para sus hormigones un límite arbitrario de $1,5 \times 10^{-11}$ cm/seg.

El factor de permeabilidad se calcula con la fórmula de

T A B L A I

CARACTERISTICAS FISICAS Y QUIMICAS DE LOS CEMENTOS EMPLEADOS

Cemento portland normal y purolánico		
	Norma IBAM 1651	Norma IBAM 1503
Nº de Laboratorio	3974-72	6331-73
Marca	L3	M1
<u>Ensayos físicos:</u>		
Agua para pasta normal, %	23,5	23,5
Expansión en autoclave, %	- 0,02	- 0,03
Fregado inicial (h, min)	2,20	3,25
Fregado final (h, min)	4,15	5,15
Superficie específica (cm ² /g)	3,983	3,131
Retenido p/tamiz nº 200, %	8,6	12,0
Resistencia flexión (kg/cm ²)		
3 días	47	-
7 días	64	74
28 días	80	87
60 días	83	-
90 días	94	-
Resistencia compresión (kg/cm ²)		
3 días	161	-
7 días	239	226
28 días	273	313
60 días	294	-
90 días	303	-
<u>Análisis químico:</u>		
Residuo insoluble, %	20,4	0,4
Pérdida por calcinación, %	2,3	1,8
Anhidrido sulfúrico (SO ₃), %	3,4	1,7
Oxido de magnesio (MgO), %	0,6	0,8
Sílice soluble (SiO ₂), %	15,5	21,5
Oxido de hierro (Fe ₂ O ₃), %	3,4	3,6
Oxido de aluminio (Al ₂ O ₃), %	4,6	4,1
Oxido de calcio (CaO), %	48,4	65,2
Cal libre (en OCa), %	0,56	0,32
Oxido de sodio (Na ₂ O), %	0,08	0,10
Oxido de potasio (K ₂ O), %	0,67	0,81
<u>Composición potencial en compuestos:</u>		
Silicato tricálcico (SC ₃), %	-	64
Silicato dicálcico (SC ₂), %	-	13
Aluminato tricálcico (AC ₃), %	-	5,0
Ferro Aluminato tetracálcico (FAC ₄), %	-	11,0
Alcalis total (en Na ₂ O), %	-	0,63

TABLA XI - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS AGREGADOS UTILIZADOS

Nº Lab.:	3717-73	3718-73	3719-73	3720-73
Identificación:	Arena sílicea feldespática	Arena sílicea feldespática	Canto rodado de cuarzo y calcedonia	Canto rodado de cuarzo y calcedonia
Impurezas orgánicas (ensayo colorimétrico)	Satisfactorio	Satisfactorio	-	-
Peso específico agregado saturado y de sup. seca (T/m^3)	2,60	2,62	2,57	2,53
Peso específico agregado seco hasta peso constante (T/m^3) ...	2,59	2,62	2,56	2,50
Absorción de agua 24 h en peso (%)	0,10	0,20	0,70	1,00
Peso de la unidad de volumen agregado seco y suelto (T/m^3) .	1,70	1,56	1,56	1,58
Porcentaje de vacíos (%)	34,40	39,90	39,10	36,80
Módulo de finura	2,91	1,47	7,62	6,31
Granulometría (por ciento que pasa los tamices):				
2"	100	100	100	100
1 1/2"	100	100	97	100
1"	100	100	70	100
3/4"	100	100	41	100
1/2"	100	100	1	95
3/8"	100	100	-	61
nº 4	100	100	-	8
nº 8	91	100	-	-
nº 16	54	100	-	-
nº 30	36	95	-	-
nº 50	25	50	-	-
nº 100	5	8	-	-

Darcy:

$$Kc = \frac{Q}{A} \frac{L}{H}$$

donde Q/A es el caudal de escurrimiento del área transversal bajo presión en $\text{cm}^3/\text{seg. cm}^2$ y L/H es la relación de longitud de percolación del fluido (agua en nuestro caso).

Para valorar el coeficiente de permeabilidad se emplean permeámetros, siendo el más antiguo el utilizado por Glanville en 1930. Este permeámetro sometía a bajas presiones probetas en forma de disco. El agua bajo presión penetraba por la parte superior de la probeta, cuantificando la cantidad que pasaba por la misma. La altura de la probeta que utilizaba Glanville era de 2 pulgadas y su diámetro variaba de 2 a 5 pulgadas.

Para la realización de los ensayos que se informan en este trabajo, se empleó el permeámetro con presiones crecientes hasta 10 atmósferas (fig. 1). Se utilizaron cubos de hormigón de 20 centímetros de lado y/o probetas de la misma sección por 12 centímetros de altura.

EMPLEO DE IMPERMEABILIZANTES

En algunos casos, el hormigón necesita una protección adicional, la cual solamente podrá ser alcanzada por medio de una barrera impermeabilizante entre el hormigón y el agua.

El conjunto hormigón-impermeabilizante debe mantenerse sin alteraciones por largo tiempo, necesitando el impermeabilizante cumplir las siguientes condiciones: ser impermeable y resistir al ataque del agua o sustancias agresivas; ser susceptible de resistir el fisuramiento del hormigón; no sufrir un proceso rápido de envejecimiento, resistir a la intemperie; y finalmente, tener un costo accesible.

Existen en el mercado pinturas aptas para estos fines, entre las cuales pueden mencionarse las de base epoxi.

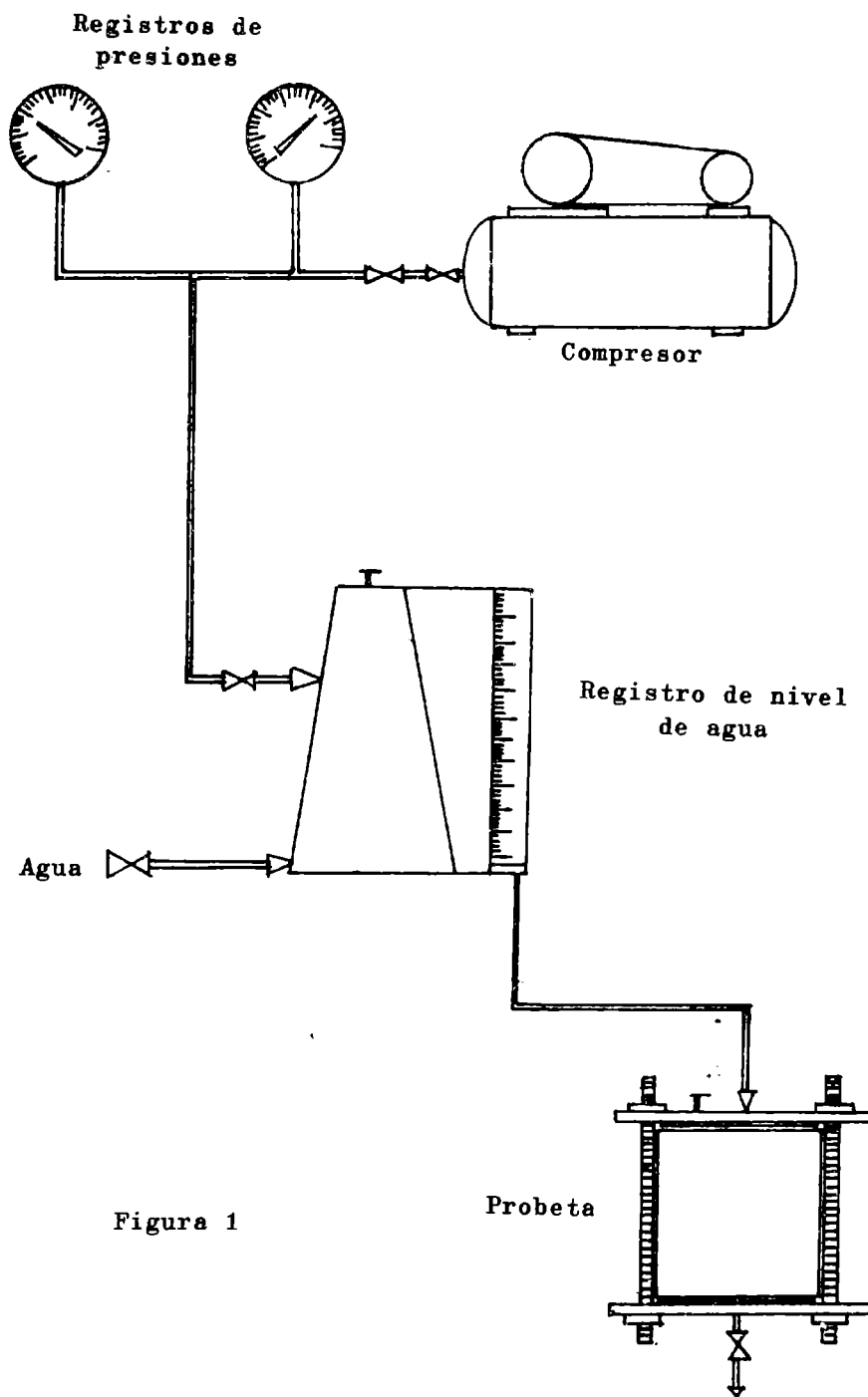


Figura 1

Su capacidad impermeabilizante es mayor a medida que aumenta el espesor de la aplicación. Dependerá el espesor óptimo del tipo de pintura, de las condiciones de exposición al agua, de la rugosidad de la superficie, y de las condiciones y tiempo en que la misma estará expuesta a la abrasión.

Es importante obtener una película continua y uniforme, que tenga capacidad de elongación como para no fisurarse y un espesor suficiente como para sufrir deformación sin romperse. Estas pinturas deben ensayarse antes de su empleo para establecer si cumplen con las condiciones indicadas y si no sufren ampollado, descascarado u otras alteraciones con el envejecimiento.

EXPERIENCIAS REALIZADAS

Como ya se mencionó, se emplearon probetas cúbicas de 20 centímetros de lado y también probetas de la misma sección y 12 centímetros de altura. Las presiones que se aplican en los ensayos son crecientes, con intervalos de presión constante. Puede ocurrir que un capilar del hormigón puede estar obturado por alguna causa, por ejemplo un granito de arena de la fracción fina. Al someter durante 24 horas a una presión de, por ejemplo, 5 kg/cm², durante ese lapso se puede desprender; al aumentar la presión, por ejemplo a 7 kg/cm², son empujadas al exterior; en esas condiciones por el capilar pasará agua y el coeficiente de permeabilidad será más elevado, pero más cercano a un valor práctico.

Las probetas confeccionadas con la mezcla en estudio, se mantienen un día en los moldes y hasta la edad de ensayo (28 días) se las somete a un curado húmedo una vez desmoldadas.

Luego de ese lapso se las coloca en el permeámetro a diferentes presiones: 1 kg/cm² durante 48 horas; a continuación se incrementa la presión a 3 kg/cm² durante 24 horas; y, por último 7 kg/cm² por espacio de 24 horas. Se mide el agua que pasa en esos intervalos de tiempo (fig. 2 y 3).

Las características físicas, mecánicas y químicas de los materiales empleados en las experiencias se informan en la

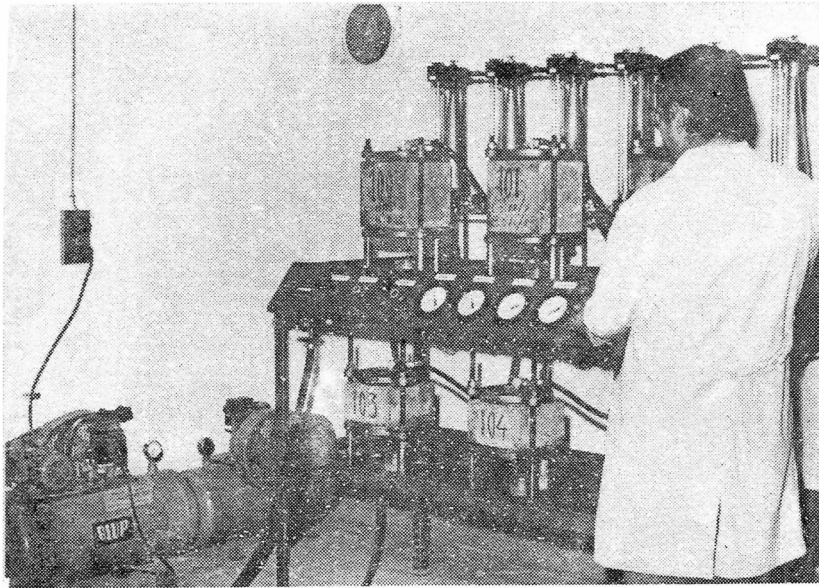


Fig. 2.- Equipo para determinar permeabilidad y compresores para lograr las presiones de ensayo

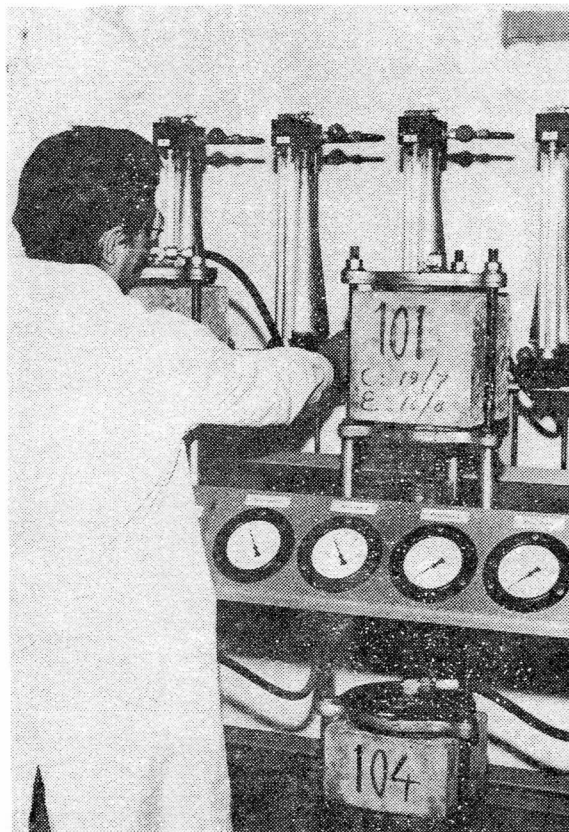


Fig. 3.- Puesta en marcha del ensayo de permeabilidad

tabla I y II; y las dosificaciones realizadas con sus proporciones valoradas en la tabla III.

Se observa que se han efectuado variaciones en los materiales, pero manteniendo los áridos constantes, salvo VI y VII.

Las mismas consisten en:

- a) cemento portland normal sin adición intencional de aire;
- b) cemento portland puzolánico sin adición intencional de aire;
- c) cemento portland normal con adición intencional de aire; y
- d) cemento portland puzolánico con adición intencional de aire.

Se empleó resina "Vinsol" como aditivo incorporador de aire. Con dichos materiales se realizaron hormigones con distintas razones agua/cemento, variables entre 0,40 y 1,0. El total de probetas confeccionadas ascendió a 240.

ANALISIS DE LOS RESULTADOS

En la tabla IV se dan, para las distintas dosificaciones, los valores obtenidos del coeficiente de permeabilidad K, de acuerdo a las variables comentadas en el punto anterior.

Se observa que el cemento puzolánico es el que proporciona los hormigones de menor permeabilidad, siempre que el curado sea efectivo. También la incorporación intencional de aire, aumenta la impermeabilidad, a la vez que reduce la segregación y exudación, provee de mayor trabajabilidad a la mezcla con lo que se pueden emplear hormigones de menor razón agua/cemento al reducir el contenido unitario de agua.

T A B L A III

DOSIFICACIONES DE LAS MEZCLAS DE HORMIGON EMPLEADAS EN LAS EXPERIENCIAS

Mezclas	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Razón Pa/Pc	0,41	0,55	0,59	0,80	1,00	0,40	0,57	0,40	0,57	1,00
Agua	167	149	162	154	154	160	200	157	148	175
Cemento portland normal.....	406	273	275	192	154	400	350	390	260	175
Cemento portland puzolánico .	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Arena silícea "oriental".....	600	647	634	638	676	710	747	512	549	546
Arena silícea "argentina".....	200	216	213	224	228	-	-	232	238	235
Canto rodado "grueso".....	548	589	579	609	617	-	-	507	545	540
Canto rodado "fino"	450	486	473	501	506	-	-	620	662	657
Piedra partida granítica	-	-	-	-	-	1156	1195	-	-	-
Mezclas	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	
Razón Pa/Pc	0,40	0,57	1,00	0,40	0,45	0,80	0,43	0,47	0,75	
Agua	157	148	180	121	135	150	130	140	146	
Cemento portland normal	-	-	-	300	300	190	-	-	-	
Cemento portland puzolánico .	390	260	180	-	-	-	300	300	195	
Arena silícea "oriental"	517	549	541	535	530	580	530	528	577	
Arena silícea "argentina" ...	222	238	232	230	229	248	230	227	247	
Canto rodado "grueso"	601	644	627	620	615	594	617	614	584	
Canto rodado "fino"	489	512	517	510	506	488	506	501	481	
Piedra partida granítica	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Nota: - Los asentamientos de las mezclas determinados por el método del tronco de conos
prendidos entre 7 y 10 centímetros.

- El aire medido (en volumen) osciló en 5 ± 1 por ciento en todos los pastones; como se empleó resina "Vinsol".

valores com-

se em-

T A B L A IV

DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD

Dosisificación *	Razón Pa/Pc	Cantidad de agua que pasa (en ml) a la presión de			Cantidad total de agua que pasa (ml)	Coeficiente de permeabilidad K (m/seg)
		1 atm	3 atm	7 atm		
I	0,41	15	19	5	39	2,8 · 10 ⁻⁹
II	0,55	69	37	36	142	1,0 · 10 ⁻⁸
III	0,59	39	31	13	83	0,6 · 10 ⁻⁸
IV	0,80	44	103	78	225	1,6 · 10 ⁻⁸
V	1,00	45	105	143	293	1,8 · 10 ⁻⁸
VI	0,40	20	13	4	37	2,7 · 10 ⁻⁹
VII	0,57	62	25	8	93	0,6 · 10 ⁻⁸
VIII	0,40	15	11	11	37	2,7 · 10 ⁻⁹
IX	0,57	6	15	14	35	2,5 · 10 ⁻⁹
X	1,00	38	58	62	158	1,1 · 10 ⁻⁸
XI	0,40	12	5	8	25	1,7 · 10 ⁻⁹
XII	0,57	20	32	27	79	0,6 · 10 ⁻⁸
XIII	1,00	40	17	41	98	0,7 · 10 ⁻⁸
XIV	0,40	10	6	15	31	2,2 · 10 ⁻⁹
XV	0,45	12	4	21	37	2,7 · 10 ⁻⁹
XVI	0,80	16	6	18	40	2,9 · 10 ⁻⁹
XVII	0,43	22	9	21	52	3,7 · 10 ⁻⁹
XVIII	0,47	5	2	6	13	0,9 · 10 ⁻⁹
XIX	0,75	14	3	9	26	1,8 · 10 ⁻⁹
		19	5	16	40	2,9 · 10 ⁻⁹

* Ver table III

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. La permeabilidad aumenta al aumentar la razón agua/cemento. Se observa que la razón agua/cemento máxima debe ser de 0,50. Una baja permeabilidad es uno de los requisitos previos para obtener durabilidad.

2. El empleo de cementos portland puzolánicos de calidad verificada, mejora la impermeabilidad siempre que el curado sea efectivo.

3. La incorporación intencional de aire logra disminuir notablemente la permeabilidad. La acción conjunta del empleo de cementos portland puzolánicos con la incorporación intencional de aire, arroja los menores coeficientes, y en consecuencia, a igualdad de otros factores (tiempo de mezclado, curado, edad de ensayo, etc.) dará posibilidad a obtener hormigones de alta impermeabilidad, y en consecuencia, durables.

4. Se sugiere que en las obras públicas de hormigón simple o armado, donde la impermeabilidad o durabilidad sean factores importantes, aparte de incorporar en el pliego las conclusiones aquí obtenidas se exija en el mismo, la determinación del coeficiente de permeabilidad de los hormigones empleados en las estructuras.

BIBLIOGRAFIA

- Buettgern A., H. N. Vidal y S. P. Wing. - An investigation of the permeability of mass concrete with particular reference to Bollder dan. Proceedings American Concrete Institute, 31, 382 (1935); discusiones 32, 230 y 378 (1936).
- Mc Millan P. R. y J. Lyse. - Some permeability studies of concrete. Proceedings A.C.I., 26, 101, (1930).
- Akreyd T. N. - Concrete, properties and manufacture. Pergamon Press, New York, 1962.
- I.P.T. - Instituto de pesquisas tecnológicas. Coloquio Permeabilidade do concreto a agua. San Pablo, diciembre 1971. Ibracon (Instituto Brasileiro do Concreto).

Agradecimientos.- Los autores agradecen al personal de la Sección Ligantes Aéreos e Hidráulicos por su colaboración, y en especial a los operadores Néstor H. Russo, Néstor Rosell y Ricardo I. Sota por su colaboración directa en la realización de las experiencias.