



Ministerio de Obras Públicas y Transportes

Durabilidad del Hormigón:

Estudio sobre Medida y Control de su Permeabilidad

INDICE

PRESENTACION

1 LA DURABILIDAD DEL HORMIGON

1.1	Introducción	11
1.2	Factores que afectan a la durabilidad del hormigón	12
1.2.1	Acciones mecánicas	14
1.2.2	Acciones físicas	14
1.2.3	Fisuración	14
1.2.4	Acciones químicas	15
1.2.5	Acciones biológicas	16
1.3	Durabilidad de las armaduras	17
1.3.1	Carbonatación del hormigón	17
1.3.2	Difusión de cloruros	18
1.3.3	Corrosión de las armaduras	20

2 INFLUENCIA DE LA ESTRUCTURA DEL HORMIGON SOBRE SU DURABILIDAD

2.1	La estructura del hormigón	23
2.1.1	Introducción. Los niveles de complejidad estructural	23
2.1.2	Origen de los poros capilares y huecos en el hormigón	24
2.1.3	Clasificación de la porosidad	25
2.1.4	Factores que influyen en la distribución de los poros	27
2.1.4.1	Influencia de la dosificación del hormigón	27
2.1.4.2	Influencia de la utilización de aireantes	29
2.2	Mecanismo de transporte de agua en el interior de la estructura de poros del hormigón	30
2.3	Relación entre la porosidad y la permeabilidad	31
2.4	Porosidad y difusión	35
2.5	Métodos de determinación de la estructura del hormigón	37
2.5.1	Clasificación de los métodos	37
2.5.2	Determinación microscópica del contenido de huecos en el interior del hormigón. Norma ASTM C457	40
2.5.2.1	Método de trazado lineal	40
2.5.2.2	Método modificado por cuenta de puntos	40
2.5.3	El porosímetro de mercurio	41

3 PROCEDIMIENTOS INDIRECTOS DE CONTROL DE LA DURABILIDAD DEL HORMIGON

3.1	Introducción	45
3.2	Máxima relación agua/cemento	46
3.2.1	ACI-318-86	46
3.2.1.1	Requisitos para condiciones especiales de exposición (Art. 4.5.2)	46
3.2.1.2	Requisitos para el hormigón expuesto a soluciones que contengan sulfatos (Art. 4.5.3)	47
3.2.2	CP-110-72	47
3.2.2.1	Máxima relación agua/cemento en hormigón de cemento Portland para asegurar una adecuada durabilidad bajo ciertas condiciones de exposición (Art. 6.3.3)	47
3.2.2.2	Máxima relación agua/cemento en hormigón expuesto al ataque de los sulfatos (Art. 6.3.3)	47
3.2.3	DIN 1045-78	48
3.2.3.1	Relación agua/cemento y consistencia (Art. 6.5.6.3)	48
3.2.3.2	Máxima relación agua/cemento en un hormigón con propiedades especiales (Art. 6.5.7)	48
3.2.4	Código-Modelo CEB-FIP-77	48
3.2.4.1	Máxima relación agua/cemento (Art. d.3.4.3.2)	48
3.2.4.2	Máxima relación agua/cemento en hormigones de características especiales (Art. d.3.5.)	48
3.2.5	pr ENV-206	49
3.2.5.1	Máxima relación agua/cemento en función del tipo de exposición	49
3.2.6	EH-88	49
3.2.6.1	Limitaciones a los contenidos de agua y de cemento (Art. 24.4)	49
3.3	Contenido mínimo de cemento	50
3.3.1	EH-88	50
3.3.1.1	Limitaciones al contenido mínimo de cemento (Art. 24.4)	50
3.3.2	EP-80	50
3.3.2.1	Dosificación del hormigón pretensado (Art. 21)	50
3.3.3	CP-110-72	50
3.3.3.1	Contenido mínimo de cemento Portland en un hormigón para asegurar una adecuada durabilidad bajo condiciones específicas de exposición. (Art. 6.3.3)	50
3.3.3.2	Mínimo contenido de cemento en el hormigón con varios tipos de cemento, expuesto al ataque de los sulfatos (Art. 6.3.3.)	51
3.3.4	DIN-1045-78	51
3.3.4.1	Contenido de cemento en el hormigón armado (Arts. 6.5.5 y 6.5.6)	51
3.3.5	Código-Modelo CEB-FIP-77	51
3.3.5.1	Dosificación de cemento en el hormigón (Art. d.3.4.3.2)	51
3.3.6	pr-ENV-206	52
3.3.6.1	Mínimo contenido de cemento en función del tipo de exposición	52
3.4	Espesor mínimo del recubrimiento	52

3.4.1	EH-88	52
3.4.1.1	Distancias a los paramentos (Art. 13.3)	52
3.4.2	EP-80	52
3.4.2.1	Distancias de las armaduras pasivas a los paramentos (Art. 19.4).	52
3.4.2.2	Recubrimiento en armaduras activas pretesas (Art. 20.3.1.)	53
3.4.2.3	Recubrimiento en armaduras activas postesas (Art. 20.3.2.)	53
3.4.3	ACI-318M-86	54
3.4.3.1	Protección de la armadura (Art. 7.7)	54
3.4.4	CP-110-72	55
3.4.4.1	Recubrimiento de las armaduras (Art. 3.11.2)	55
3.4.5	BAEL-83	55
3.4.5.1	Protección de la armadura (Art. A.7.1.)	55
3.4.6	BPEL-83	55
3.4.6.1	Recubrimiento para armaduras activas postesas (Art. A.10.2, 23)	55
3.4.6.2	Recubrimiento para armaduras activas pretesas (Art. A.10.3, 3)	56
3.4.6.3	Recubrimiento de armaduras pasivas (Art. A.10.4, 2)	56
3.4.7	DIN-1045-78	57
3.4.7.1	Recubrimientos mínimos para el hormigón armado en función de las condiciones ambientales (Art. 13.2)	57
3.4.8	Código-Modelo CEB-FIP-77	57
3.4.8.1	Recubrimiento mínimo (Art. 5.1.)	57
3.5	Tiempo de curado	57
3.5.1	EH-88 (Art. 20)	57
3.5.2	ACI-318M-86 (Art. 5.5.)	58
3.5.3	CP-110-72 (Art. 6.11.6)	58
3.5.4	DIN-1045-78 (Art. 10.3)	58
3.6	Comparación entre los principales códigos existentes	58
3.6.1	Máxima relación agua/cemento	58
3.6.2	Contenido mínimo de cemento	60
3.6.3	Espesor mínimo del recubrimiento	61

4 PROCEDIMIENTOS DIRECTOS DE CONTROL DE LA DURABILIDAD DEL HORMIGÓN: MEDIDA Y CONTROL DE LA PERMEABILIDAD

4.1	Introducción. Clases de permeabilidad	65
4.2	Influencia de diversos factores sobre la permeabilidad	66
4.2.1	Influencia de la dosificación	67
4.2.2	Influencia de la puesta en obra y curado del hormigón	69
4.3	Ensayos para la medida de la permeabilidad y absorción del hormigón	71
4.3.1	Ensayos "in situ"	71
4.3.1.1	Ensayo de absorción superficial inicial (ISAT)	72
4.3.1.2	Método de Figg	75
4.3.1.3	Método de Hansen, Ottosen y Petersen, para la permeabilidad a los gases a baja presión	82
4.3.1.4	Permeabilidad superficial bajo presión	83

4.3.1.5 Ensayos de permeabilidad mediante sondeos	85
4.3.1.6 Ensayos de filtración de elementos estructurales completos	86
4.3.2 Ensayos en laboratorio de muestras tomadas "in situ"	86
4.3.2.1 Ensayos de absorción de agua	86
4.3.2.2 Métodos de ensayo de permeabilidad bajo presión	88
4.3.2.3 Ensayo de penetración de agua	90
4.3.2.4 Relación entre los coeficientes de permeabilidad deducidos de los ensayos de permeabilidad bajo presión y de penetración de agua	93
4.3.2.5 Permeabilidad a los gases bajo presión	94
4.3.2.6 Difusión de gas	96
4.3.2.7 Difusión de vapor de agua	96
4.3.2.8 Difusión iónica	97
4.3.2.9 Otros métodos	97
4.4 Otros ensayos de medida indirecta: medida de la profundidad de carbonatación	97
4.5 Utilización de los resultados obtenidos en los ensayos	98
4.5.1 Especificaciones existentes en las normas	98
4.5.1.1 Ensayos de filtración de estructuras completas	98
4.5.1.2 Ensayo de absorción de agua	98
4.5.1.3 Ensayo de penetración de agua	99
4.5.2 Clasificación de un hormigón en función de los resultados de ensayos	100

ANEXO

PRESCRIPCIONES SOBRE PERMEABILIDAD

BIBLIOGRAFIA	107
--------------------	-----

PRESENTACION

Cada día es mayor la preocupación por conseguir que los puentes de carretera no sólo sean capaces de resistir las cargas para las que se proyectan, sino para que sean duraderos, manteniéndose durante su vida útil en un estado razonable de conservación.

Las causas del posible deterioro de los puentes de hormigón son, obviamente, numerosas y con distintos orígenes. Así, pueden ser debidas a defectos de proyecto, empleo de materiales y dosificaciones inadecuadas, ataques químicos y físicos externos, etc.

Dada la amplitud y complejidad del tema de la durabilidad, la presente publicación se centra fundamentalmente en el estudio de la permeabilidad, analizando la posibilidad de estimar el valor de dicha propiedad como medio adecuado para controlar y mejorar la durabilidad del hormigón.

Es evidente que un hormigón permeable es siempre susceptible de ser atacado por agentes externos, y será también un hormigón que no protege adecuadamente al acero de fenómenos de corrosión, que tanta importancia tienen en la conservación del hormigón armado o pretensado.

En estructuras situadas a la intemperie y sometidas a ambientes cada vez más agresivos (por ejemplo, la utilización de fundentes, o el aumento de agresividad de ambientes de tipo urbano o industrial), se comprende el gran interés que tienen este tipo de estudios.

Por las razones expuestas, el Servicio de Puentes y Estructuras del Area de Tecnología de Carreteras ha considerado interesante promover un estudio sobre este tema, cuyo primer fruto es la presente publicación.

Este estudio ha sido desarrollado por un equipo de técnicos del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales CEDEX, constituido por D. José Manuel Gáligo, I.C.C.P. (Director del Laboratorio Central) y D. Fernando Rodríguez, y dirigido por el primero. El seguimiento y la supervisión ha sido efectuada por este Servicio.

Por el Servicio de Puentes y Estructuras,
Jesús Galindo

1.1 INTRODUCCION

El hormigón, tanto en masa como armado o pretensado, es en la actualidad el material más ampliamente utilizado para fines estructurales, debido a su economía y buen comportamiento en servicio, así como por su adaptabilidad a las formas geométricas deseadas.

Este predominio del hormigón como material de construcción hace que cobren un especial interés todos aquellos problemas que puedan surgir en relación con él, por lo que cada vez se presta mayor atención a estructuras de hormigón con durabilidad insuficiente. A ello se deben añadir los crecientes costes anuales para la reparación de dichas estructuras, para que puedan ofrecer un servicio adecuado. Recientes investigaciones a nivel internacional, por ejemplo en el marco de la OCDE, revelan que estos costes se doblarán durante la década de los 80, y triplicarán durante los años 90. Sobre este punto, son ilustrativos los datos proporcionados por la Federal Highway Administration de los Estados Unidos, que estimó que durante 1973 el coste anual empleado en reparaciones de tableros de puentes ascendía a 70 millones de dólares, mientras que esta cifra se situaba en los 200 millones en 1975 lo que suponía que, en dos años, los costes anuales se habían incrementado casi en un 200%.

Evidentemente, el hormigón no debe cumplir tan sólo con las exigencias resistentes necesarias para desarrollar su papel como material de construcción en elementos estructurales. De poco serviría obtener un hormigón de una adecuada calidad desde el punto de vista resistente si, durante su vida de servicio, agentes agresivos de diversa naturaleza mermaran sus propiedades, con el consiguiente deterioro del elemento en cuestión, pudiendo llegar a producir la ruina de la estructura. En consecuencia, no es suficiente que un hormigón sea resistente.

Es necesario que, además, sea durable. Este hecho, aunque de carácter evidente e importante, se ha mantenido hasta el momento en un segundo plano, postergado por el natural interés en conseguir un hormigón que diera respuesta a las crecientes necesidades resistentes que, bajo el punto de vista estructural, han originado los cada vez más esbeltos y complejos diseños, tanto en la edificación como en la obra pública.

En la actualidad, parece ya resuelto de forma óptima el problema resistente. Como ejemplo, basta señalar la posibilidad de alcanzar resistencias superiores a los 100 MPa en hormigones con áridos escogidos de naturaleza puzolánica, muy finamente divididos y con la adición de superplastificantes.

Por tanto, aunque las normativas modernas son adecuadas para el diseño de nuevas estructuras de hormigón armado o pretensado, debe admitirse que hay todavía un gran campo para ser estudiado para minimizar y controlar las deficiencias que pueden aparecer.

A este respecto es importante recalcar que los proyectistas y directores de una obra deben considerar que:

- El hormigón que va a utilizarse, debe ser preparado mediante la más avanzada tecnología para resistir a los cada vez más agresivos ambientes donde va a ser colocado.
- La impermeabilidad del hormigón es más importante que su resistencia mecánica.

- Es muy deseable que los hormigones tengan mayor resistencia al deterioro químico, al fuego, abrasión y cavitación.
- Las zonas básicas de cualquier estructura deben ser sometidas a un mantenimiento periódico y a un control, por lo que deben ser fácilmente accesible.
- En relación con los métodos de construcción modernos y rápidos para estructuras de hormigón armado, y principalmente para las de hormigón pretensado, debe investigarse qué causas y defectos pueden impedir un correcto comportamiento a largo plazo de dichas estructuras.
- Finalmente debe decirse que numerosas anomalías estructurales observadas pueden ser atribuidas a un comportamiento reológico no lineal, y deben realizarse esfuerzos a este respecto para mejorar los conocimientos sobre el comportamiento actual y a largo plazo de las estructuras.

En consecuencia, los aspectos relacionados con la durabilidad cobran una gran actualidad. Una buena prueba de esto es el creciente número de publicaciones, artículos y reuniones internacionales que se centran en estos aspectos. Sirven como ejemplo los seminarios de la RILEM celebrados en Copenhague (CEB: "Durability of Concrete Structures". CEB Bulletin d'Information nº 152, 1984) y en Tokio ("Materials and Structures", Nº 105, Mayo-Junio 1985), durante el año 1984.

1.2 FACTORES QUE AFECTAN A LA DURABILIDAD DEL HORMIGON

La durabilidad del hormigón puede definirse como la capacidad del hormigón para ofrecer un comportamiento adecuado, en el transcurso de la vida de servicio del elemento estructural.

Según la norma ASTM E 632. "Standard Recommended Practice for Developing Short-term Accelerated Test for Prediction of the Service Life of Building Components and Materials", los diversos factores que afectan a la degradación del hormigón, y que por lo tanto influyen en su durabilidad, se pueden clasificar como indica la Tabla Nº 1.1.

Los procesos que pueden provocar una durabilidad insuficiente, son múltiples y complejos y dependen tanto de la concepción del elemento estructural realizada durante el proyecto, como de las características de su dosificación, fabricación, puesta en obra y conservación.

El deterioro de las características del hormigón es debido, de forma general, a la acción combinada de diferentes agentes agresivos, los cuales se pueden clasificar en cuatro grandes grupos, en función de su forma de actuar:

- Acciones mecánicas
- Acciones físicas
- Acciones químicas
- Acciones biológicas

Esta clasificación sintética es la que se utilizará en la presente publicación. A continuación se indican brevemente las características fundamentales de cada uno de estos grupos.

1. AGENTES ATMOSFERICOS

- Radiación: Solar
 - Nuclear
 - Térmica
- Calor : Elevadas temperaturas
 - Bajas temperaturas
 - Ciclos
- Agua : Sólida : hielo-nieve
 - Líquida : lluvia-condensación estancada
 - Vapor : humedad relativa elevada
- Aire : Componentes normales
 - Gases : tales como óxidos de nitrógeno, de azufre, etc.
 - Nieblas: tales como aerosoles, sales, ácidos y álcalis.
 - Partículas sólidas: tales como arena, lodos y polvos.
- Congelación-Deshielo
- Viento

2. FACTORES BIOLÓGICOS

- Micro-organismos
- Fungicidas
- Bacterias

3. FACTORES DE CARGA (SOLICITACIONES)

- Carga mantenida-periódica
- Acción física del agua (lluvia-granizo-aguanieve-nieve)
- Acción física del viento
- Acción física del agua + acción física del viento
- Movimientos debidos a otros factores, tales como instalaciones-vehículos

4. FACTORES INCOMPATIBLES

- Químicos
- Físicos

5. FACTORES DE SERVICIO

- Diseño
- Instalaciones y procedimientos de mantenimiento
- Desgaste
- Vandalismo

TABLA 1.1

Una interesante clasificación de los distintos procesos susceptibles de provocar una durabilidad insuficiente del hormigón es la basada en el Boletín Nº 148 del CEB; que clasifica los procesos según la modalidad del ataque y divide los procesos de deterioro del hormigón en dos tipos:

- Procesos físicos	- Erosión	<ul style="list-style-type: none"> - Por efecto de las cargas - Por deformaciones impuestas - Por fenómenos físicos
	- Fisuración	
	- Ataque por la helada	
- Procesos químicos	- Ataque ácido	
	- Ataque por sulfatos	
	- Ataque alcalino	
	- Reacción álcali-árido	
	- Ataque salino	
	- Ataque por aguas muy puras	

TABLA 1.2

1.2.1 ACCIONES MECANICAS

Incluyen todas aquellas cargas, sobrecargas, impactos, vibraciones, etc., que pueden afectar al comportamiento futuro del elemento estructural. Pueden estar provocadas por causas naturales, como el viento y el agua, o por causas artificiales.

Este tipo de acciones se deben considerar en el proyecto y son, generalmente, las acciones de las que se tiene un conocimiento más extenso. A pesar de su indiscutible influencia en la aparición de fisuras, tema éste que se tratará más adelante, no parece conveniente insistir en este tipo de acciones más allá de su simple mención, precisamente por ser las que gozan, hasta el momento, de mayor atención y conocimiento general por parte de los técnicos.

1.2.2 ACCIONES FISICAS

Incluyen todos aquellos agentes de origen físico que puedan afectar al futuro comportamiento del hormigón, tales como:

- Las variaciones de temperatura
- Las variaciones de humedad
- Las heladas
- Las temperaturas extremas
- El fuego
- Las corrientes eléctricas
- Las radiaciones

Mención especial merecen todos aquellos problemas relacionados con la temperatura, en alguno de sus múltiples aspectos. Uno de los más frecuentes es la acción de heladas sobre el hormigón endurecido, cuya resistencia a la congelación viene determinada por su porosidad y por su grado de saturación en agua. El comportamiento del agua en el interior de los poros del hormigón es similar al que tendría en el caso de otros materiales sólidos porosos, por lo que el aumento de volumen producido al formarse el hielo llevará consigo un considerable aumento de las tensiones internas en el material, que provocará el correspondiente agrietamiento de la superficie: lo que, a su vez, produce una mayor facilidad para la entrada del agua en el hormigón, con lo que el proceso destructivo de la estructura se va agravando progresivamente.

Por otro lado, y sin que sea necesaria la colaboración antes indicada entre agua y temperatura, esta última produce aisladamente una serie de deformaciones de origen térmico que, a efectos de durabilidad, se traducen en una nueva fuente de fisuración posible. Evidentemente, este fenómeno se encuentra muy acentuado en aquellos casos en los que intervienen grandes volúmenes de hormigón.

1.2.3 FISURACION

Una vez que se ha hecho una breve mención a las acciones mecánicas y físicas, es conveniente realizar un pequeño resumen de las diversas causas que pueden originar el fenómeno de fisuración. Con este fin, y si se excluyen las fisuras motivadas por causas sísmicas, se pueden distinguir:

- fisuración por efecto directo de las cargas aplicadas (tanto por tracción, como por flexión, cortante y torsión). Este tipo de efectos es el más ampliamente considerado en las Instrucciones de hormigón armado o pretensado.

- fisuración debida a la existencia de deformaciones impuestas, las cuales pueden proceder de movimiento de apoyos, retracción o variación de temperatura. A diferencia del caso anterior, para éste y para el siguiente, las indicaciones en las Instrucciones son inexistentes o muy escasas.
- fisuración debida a fenómenos plásticos a muy temprana edad en el hormigón, bien sean éstos por retracción o bien sean asentamientos.

1.2.4 ACCIONES QUIMICAS

Este grupo constituye, sin duda, el de las acciones más temibles y que, por tanto, deberían ser consideradas con detalle a la hora del proyecto y ejecución de cualquier elemento estructural.

En este apartado se va a tratar exclusivamente de aquellos agentes que provocan, por vía química, el deterioro del hormigón. En consecuencia, se va a prescindir por el momento de aquellos procesos que, aunque en sí no destruyan el hormigón, sí redundan en una desprotección del acero, como es el caso de la carbonatación; y no se considerará tampoco el ataque en sí del acero. No obstante, estos temas se tratarán más adelante con suficiente detalle.

Los cinco agentes más frecuentemente responsables del deterioro del hormigón son:

- aire y otros gases, en atmósfera natural o contaminada.
- aguas agresivas (naturales superficiales o subterráneas, de mar, industriales, negras agrícolas, negras urbanas), y otros líquidos.
- áridos reactivos.
- productos químicos orgánicos o inorgánicos (aceites, grasas, etc.).
- suelos y terrenos agresivos.

Ahora bien, los anteriores son los elementos que pueden producir el ataque químico contra el hormigón: pero no todos ellos siguen un modelo de actuación similar. Cabe preguntarse, por tanto, qué tipos de procesos siguen estas acciones. Una primera aproximación a la respuesta se puede lograr mediante la clasificación de los mismos que hace Jiménez Montoya, según la cual la agresión química está formada por uno o varios de los siguientes procesos:

- Disolución de los compuestos hidratados del cemento (en particular de la cal).
- Formación de nuevas sales solubles, que van siendo arrastradas por el agua, (caso de los ataques por aguas puras, ácidos orgánicos e inorgánicos, agua de mar, etc.).
- Formación de cristales u otros compuestos poco solubles, con aumento de volumen y la consiguiente creación de tensiones internas.

Este es el caso de los sulfatos que, en presencia de cal, atacan la alúmina del cemento formando el sulfoaluminato tricálcico (sal de Candlot), con notable aumento de volumen. Un caso semejante en cuanto a sus consecuencias (aumento de volumen y creación de tensiones internas) es el de la corrosión de las armaduras, que se tratará con detalle en 1.3.3. La reacción del Ca(OH)_2 del hormigón con el CO_2 de la atmósfera produce la formación de carbonatos, lo cual lleva consigo una disminución del pH. Al disminuir, por lo tanto, la basicidad del hormigón, disminuye la protección que éste ofrece a las armaduras: por lo que puede iniciarse el ataque a las mismas con el consiguiente aumento de volumen (el óxido tiene un volumen ocho

veces mayor que el metal que lo forma). Dicho aumento provoca tensiones internas que originan la fisuración.

Es también necesario evitar el empleo de áridos inestables, como por ejemplo, aquellos que contienen sulfuros.

- d) Formación de eflorescencias, al cristalizar durante períodos secos sales solubles de calcio y magnesio.

Los agentes químicamente agresivos para el hormigón se pueden clasificar como indica la Tabla 1.3.

1. AGUA DULCE; AGUA CON CO ₂ AGRESIVO; AGUA DE MAR; AGUAS INDUSTRIALES; AGUAS RESIDUALES, ETC.		
2. ACIDOS		
	MINERALES	ORGANICOS
A.	Brómico	A. Acético
A.	Carbónico	A. Fórmico
A.	Clorhídrico	A. Húmico
A.	Crómico	A. Láctico
A.	Fluorhídrico	Fenol
A.	Sulfhídrico	A. Tánico
A.	Nítrico	A. Butírico
A.	Fosfórico	A. Úrico
A.	Sulfúrico	Microorganismos
A.	Sulfuroso	
3. BASES		
	Hidróxido de sodio, de potasio	
	Urea	
	Aminas	
4. SALES		
	Cloruros de calcio, de sodio, de amonio, de magnesio	
	Sulfatos de calcio, de potasio, de sodio, de amonio, de magnesio	
	Nitratos y nitritos de sodio, de potasio, de amonio	
	Sulfuros de hierro	
	Acetatos de sodio	
	Sales de deshielo	
	Esteres-estearatos-jabones	
5. ALCOHOLES		
6. DISOLUCIONES DE AZUCAR		
7. ACEITES VEGETALES Y ACEITES ANIMALES		
8. BACTERIAS; ALGAS; MARISCOS; MICRO-ORGANISMOS		

TABLA 1.3 - Elementos agresivos al hormigón

1.2.5 ACCIONES BIOLÓGICAS

En la clasificación anterior (Tabla 1.3), se observa que no se ha hecho ninguna distinción entre el ataque químico y el biológico. Este hecho se debe a que uno de los mecanismos más habituales de agresión biológica es la segregación de ácidos, bien de forma directa o bien por medio de los productos de descomposición, lo que produce un cierto solapamiento y ambigüedad en la frontera que separa los fenómenos de agresión química y

1.3 DURABILIDAD DE LAS ARMADURAS

biológica. No obstante, hay casos donde se debe hablar propiamente de agresión biológica, caracterizados generalmente por la influencia de hongos, bacterias, algas o musgos, los cuales encuentran buenas condiciones de crecimiento en determinadas zonas de carácter urbano, marítimo o industrial.

Hasta ahora se ha considerado tan sólo el fenómeno de degradación del hormigón; pero no se debe olvidar que una de las consecuencias directas más importantes de dicho proceso es la posibilidad que se abre de ataque sobre las armaduras. Es claro que, al producirse el deterioro de las capas superficiales del recubrimiento de hormigón, éste ya no puede desarrollar correctamente su función protectora respecto de las armaduras, con lo que aumenta notablemente la probabilidad de corrosión de éstas.

Si se considera el papel fundamental, desde el punto de vista resistente, que juegan las armaduras dentro del elemento estructural, resulta evidente que la corrosión potencial de éstas es un tema de importancia decisiva a la hora del proyecto y ejecución de una estructura durable. Se hace, pues, necesario un estudio más detallado sobre este proceso.

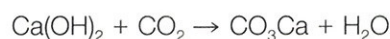
1.3.1 CARBONATACION DEL HORMIGON

En una situación normal, donde no existe una degradación avanzada del hormigón y por lo tanto éste constituye un recubrimiento correcto y tiene una calidad adecuada, el acero de las armaduras está protegido de la corrosión mediante el fenómeno conocido como pasivación. La explicación de este hecho está relacionada con el carácter alcalino del hormigón, ya que éste alcanza habitualmente valores de pH superiores a 12,5.

Para estos valores tan altos del pH, se forma sobre la superficie del acero una capa de óxido de espesor microscópico: la capa pasiva, que impide la disolución ulterior del hierro, por lo que es imposible en principio que tenga lugar la corrosión de la armadura.

Por lo tanto, se confirma el papel fundamental que tiene el recubrimiento del hormigón en la protección de las armaduras, y es claro que el mejor método de minimizar el deterioro de éstas es conseguir que el hormigón tenga una buena calidad y que el recubrimiento tenga el espesor adecuado.

El hormigón es un material poroso que permite, por lo tanto, la penetración a su interior del CO₂ del aire, a través de los poros. Allí tendrá lugar una reacción química entre el anhídrido carbónico y el hidróxido cálcico procedente de la hidratación del cemento. En términos muy simplificados la reacción química puede ser descrita como sigue:



Esta reacción es el principal motivo de la posible disminución de la alcalinidad del hormigón, ya que es precisamente el Ca(OH)₂ el causante de tan altos valores del pH y, en consecuencia, cuando el hormigón se haya carbonatado totalmente, se producirá un descenso apreciable de éste, que puede llegar a tomar valores inferiores a 9 (Figura 1.1).

Como ya se ha dicho, el CO₂ penetra desde la superficie al interior del hormigón. Por lo tanto, la carbonatación comienza en la superficie y penetra lentamente al interior. El proceso determinante en la velocidad de la carbonatación es la difusión del CO₂ en el hormigón, y por lo tanto el grado de carbonatación (incremento de la profundidad de carbonatación con el tiempo), sigue una ley en función de la raíz cuadrada del tiempo.

$$dc = \sqrt[n]{K \cdot t}$$

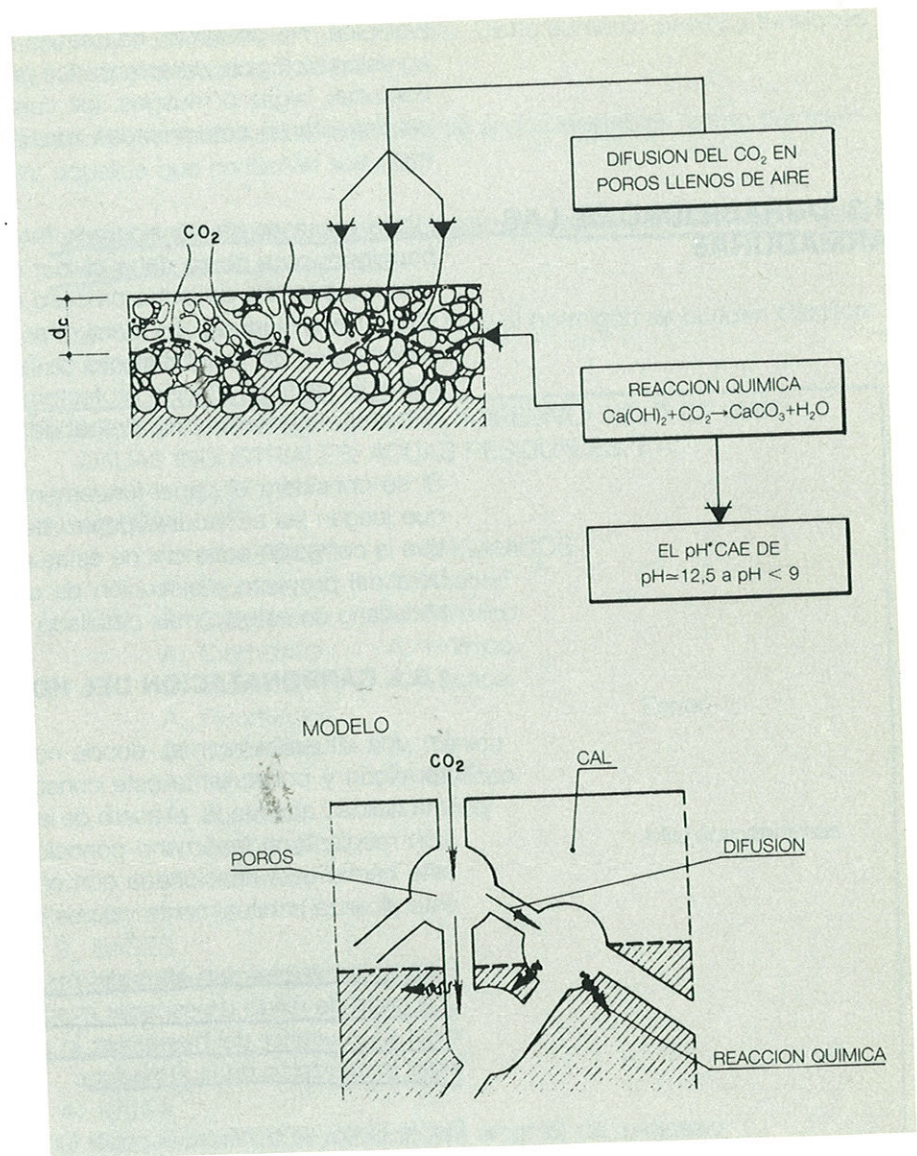


Fig. 1.1. CARBONATACION DEL HORMIGON

siendo "dc" la profundidad de carbonatación; K, una constante dependiente del hormigón (fundamentalmente, de su porosidad), y tomando n el valor de 2 para ambientes secos (interiores) o valores mayores de 2 para ambientes a la intemperie con humedad cambiante.

Es necesario destacar que la difusión del anhídrido carbónico sólo es posible en los poros llenos de aire. En consecuencia, no se podrá producir carbonatación en hormigones que estén totalmente saturados de agua.

1.3.2 DIFUSION DE CLORUROS

Por otro lado, además del CO₂, también los cloruros pueden penetrar por los poros al interior del hormigón tanto si proceden del agua del mar como si proceden de sales. Por lo tanto, la difusión de cloruros es un proceso que tiene lugar en poros que están total o parcialmente saturados de agua. Hay que indicar que nos referimos tan sólo a los cloruros procedentes del exterior, y no a los que puedan estar contenidos en los áridos, aditivos, etc.

Es sabido que la cal tiene una cierta capacidad física y química de fijar los cloruros, dependiendo de la concentración de éstos en el agua de los poros. Sin embargo, no todos los cloruros pueden ser fijados. Existirá, pues,

un equilibrio de disolución entre éstos y los iones libres. Por lo tanto, es importante indicar que, después de la carbonatación, se produce una liberación de los iones fijados. Si se tiene en cuenta que tan sólo los iones libres tienen influencia en la corrosión de las armaduras, se deduce que después de la carbonatación del hormigón aumenta el contenido del cloruro en el agua de los poros y, en consecuencia, aumenta considerablemente el riesgo de corrosión (Figura 1.2).

Es importante resaltar que la cantidad de cloruros requerida para el inicio del proceso de corrosión, es función del valor de pH que alcanza la pasta. Esta relación se expresa en la figura 1.3.

Como resultado del proceso de difusión, la concentración de cloruros decrecerá desde la superficie hacia el interior del hormigón. Para una primera estimación de la profundidad de penetración, se sigue otra vez una función que es raíz cuadrada del tiempo. No obstante, cálculos más exactos muestran que la penetración es más lenta.

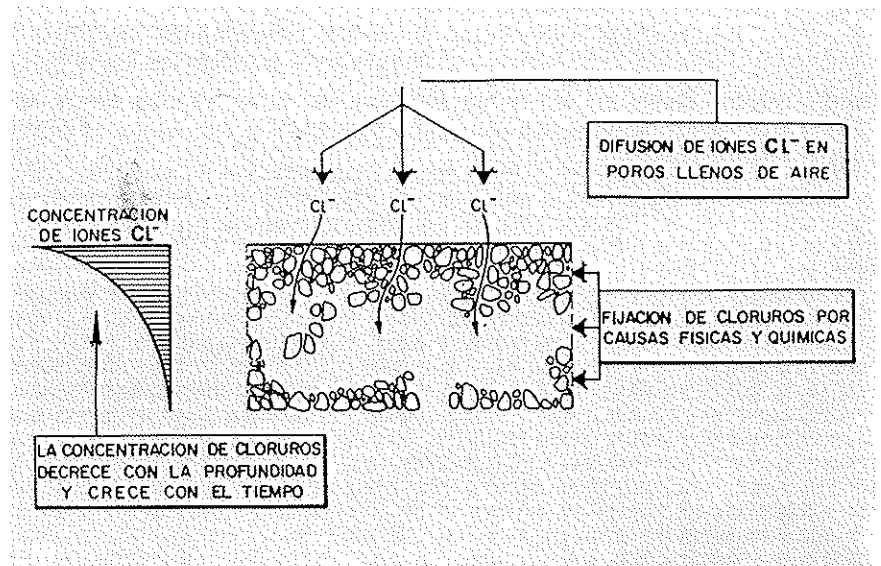


Fig. 1.2. DIFUSION DE CLORUROS EN EL HORMIGON

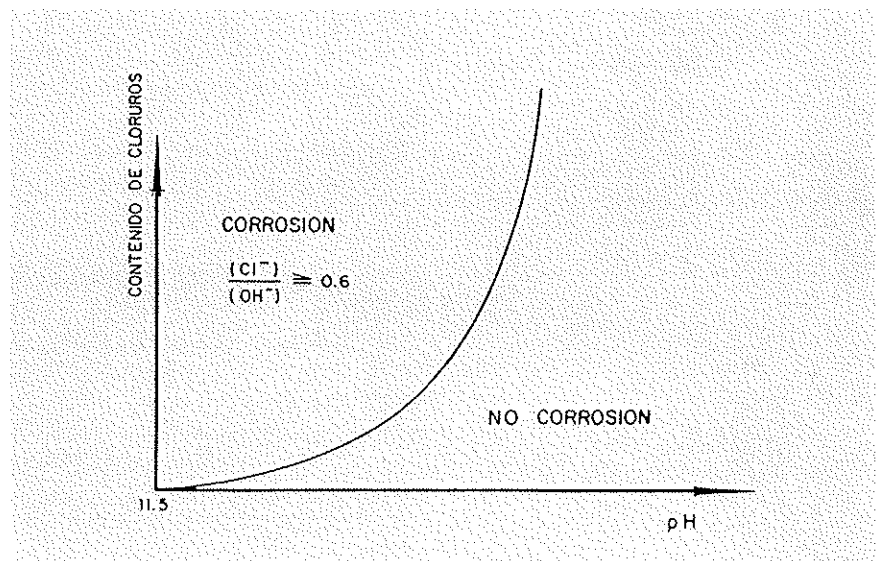


Fig. 1.3. RELACION ENTRE EL CONTENIDO DE CLORUROS Y EL pH PARA QUE SE PRODUZCA LA CORROSION

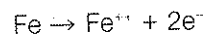
Un fenómeno que agrava esta penetración de cloruros es el proceso alternativo de humectación y desecación de la superficie de hormigón, con agua rica en cloruros, lo que provoca un enriquecimiento de la capa superficial en dichos cloruros (Figura 1.4). Esto se debe a que al principio del periodo de humectación una cantidad relativamente grande de cloruros contenidos en el agua penetrarán en el hormigón por succión capilar; mientras que durante la desecación, el agua se evapora y los cloruros permanecen en el hormigón. Por lo tanto, la profundidad de penetración del agua y la porosidad de la capa superficial son de gran importancia, especialmente en relación con el espesor del recubrimiento.

1.3.3 CORROSION DE LAS ARMADURAS

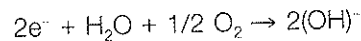
En principio, el fenómeno de la corrosión puede dividirse en otros dos procesos simples:

- el proceso anódico
- el proceso catódico

El primero de éstos consiste en una verdadera disolución del hierro, penetrando en la solución los iones de hierro cargados positivamente (Fe^{++}).



Los electrones sobrantes en el acero se combinarán en el cátodo con agua y oxígeno para formar iones $(OH)^{-}$.



Posteriormente, después de algunos estados intermedios, el hierro y los iones $(OH)^{-}$ se combinarán para formar herrumbre la cual al menos técnicamente, puede ser expresada como Fe_2O_3 . Esto indica que sólo el oxígeno

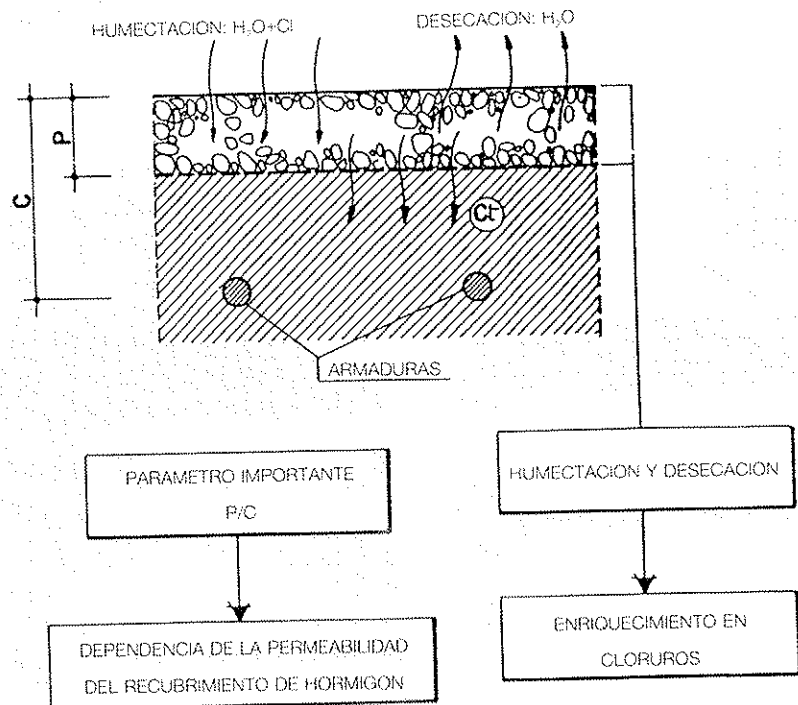


Fig. 1.4. EFECTO DE LA HUMECTACION Y DESECACION DE LA SUPERFICIE DEL HORMIGON CON AGUA RICA EN CLORUROS

es consumido para formar estos productos de herrumbre, mientras que el agua es necesaria para facilitar el proceso electrolytico que tiene lugar. (Figura 1.5).

A consecuencia de lo anterior, la corrosión no se llevará a cabo en un hormigón seco, pues se impide el proceso electrolytico, ni en un hormigón saturado en agua, pues no podría haber difusión del oxígeno. Esto es válido siempre, incluso cuando la capa pasiva de la superficie de la armadura haya sido destruída.

En relación a dicha capa pasiva, hay que hacer notar que ésta debe estar destruída en las áreas de actividad anódica, mientras que por el contrario el proceso catódico puede tener lugar aunque la capa pasiva esté intacta. A este hecho se debe la llamada "Corrosión por picaduras", en los casos de corrosión por cloruros, ya que la capa pasiva se disuelve en pequeñas zonas, por lo que existirán en la superficie pequeñas áreas anódicas y enormes áreas catódicas. La corrosión por picaduras produce en consecuencia ataques muy localizados, en los que se provoca una sensible reducción en la sección de la armadura. A ello se añade la presencia de los cloruros, que actúan como catalizadores y aceleran la disolución del hierro.

Las zonas activas, tanto las anódicas como las catódicas, pueden estar juntas, o separadas a distancias relativamente grandes. En consecuencia, la corrosión puede tener lugar en zonas de la estructura donde esté impedido el acceso directo de oxígeno, siempre que el hormigón esté lo bastante húmedo para que sea posible la conexión electrolytica.

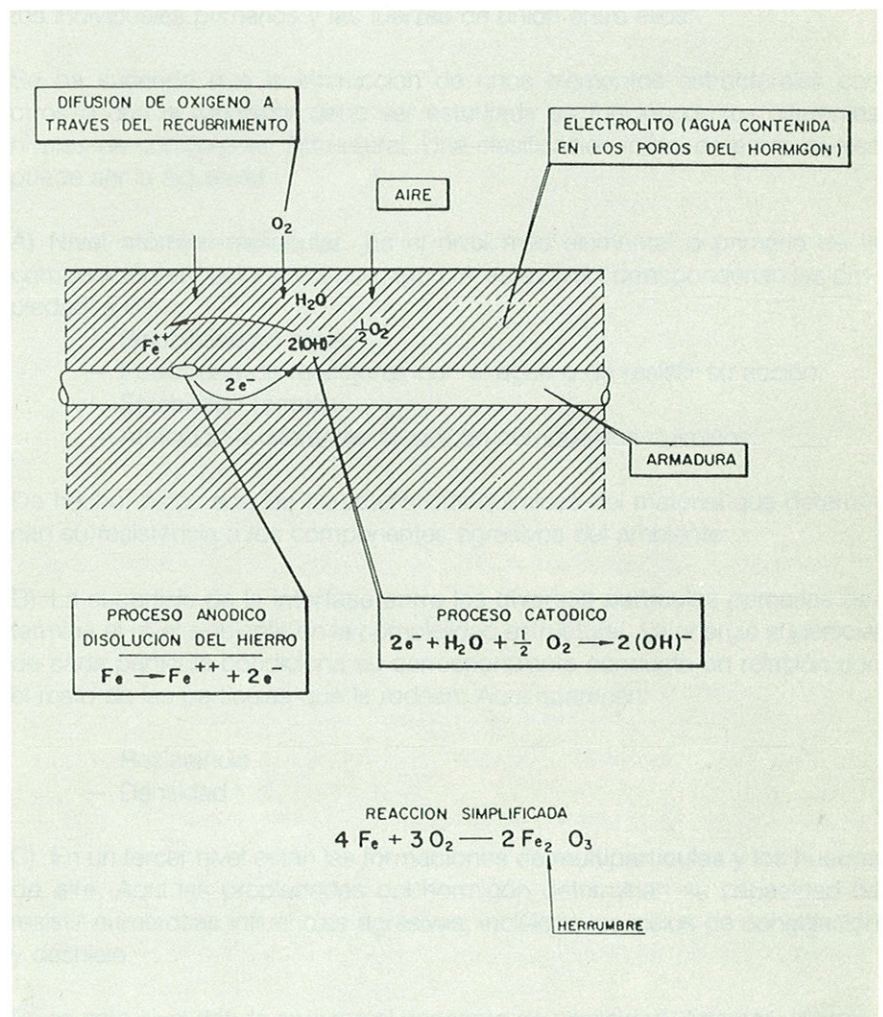


Fig. 1.5. CORROSION DEL ACERO EN EL HORMIGÓN. MODELO SIMPLIFICADO

Además de lo indicado, hay que tener en cuenta la influencia que tiene la existencia de zonas fisuradas sobre la carbonatación del hormigón y la corrosión de las armaduras. No obstante, en el caso de fisuras cuya anchura tenga un valor normal (entre 0,15 mm y 0,35 mm), puede darse el caso que, como resultado del depósito en ellas de compuestos de calcio y de material de herrumbre, se provoque con estos materiales el sellado de la propia fisura, con lo que cualquier corrosión progresiva de la armadura es probable que acabe deteniéndose (fenómeno conocido como "autorreparación").

En resumen, se puede afirmar que todos los procesos que influyen en la corrosión de las armaduras son controlados, en mayor o menor medida, por procesos de difusión.

Carbonatación → difusión de CO_2

Penetración de cloruros → difusión de Cl^-

Corrosión de armaduras → difusión de O_2

En consecuencia, el parámetro de mayor importancia en relación con la corrosión y, por tanto, el parámetro clave para conseguir una adecuada protección de las armaduras es la calidad del recubrimiento. Esta calidad se define por:

1. El espesor del recubrimiento
2. La permeabilidad del recubrimiento

2.1 LA ESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

2.1.1 INTRODUCCION. LOS NIVELES DE COMPLEJIDAD ESTRUCTURAL

Al producirse el endurecimiento del sistema agua-cemento, se lleva a cabo un proceso de formación de un conglomerado, cuya ordenación y composición química son complejas, y que se conoce como pasta de cemento.

La estructura de los poros en la pasta de cemento determina en gran manera la intensidad con la que se desarrollarán las interacciones del hormigón con el ambiente que le rodea. No hay que olvidar que los procesos destructivos comienzan en la superficie y se desarrollan más tarde en el interior, utilizando para ello la facilidad derivada de la existencia de poros y capilares. Por otro lado, hay que considerar que la superficie interna de poros es varias veces mayor que la superficie exterior del elemento de hormigón, con lo que el campo de acción de los agentes que producen el deterioro de éste aumenta considerablemente al crecer su porosidad.

Antes de continuar, parece lo más procedente dar una definición de lo que se conoce como "estructura del hormigón". Para ello, se puede seguir la dada por V. Moskvín y que dice que "la estructura de un sólido, en sentido general, se define como la relación entre la posición espacial de los elementos individuales primarios y las fuerzas de unión entre ellos".

Se ha sugerido que la interacción de unos elementos estructurales con otros o con el ambiente debe ser estudiada en función de los diferentes niveles de complejidad estructural. Una clasificación inicial de estos niveles puede ser la siguiente:

A) Nivel atómico-molecular. Es el nivel más elemental o primario de la composición estructural del hormigón. A este nivel corresponderían las propiedades de:

- Solubilidad en agua
- Posibilidad de reaccionar con el agua o de resistir su acción.
- Estabilidad térmica.
- Atracción a diferentes clases de compuestos químicos.

De hecho, éstas son las características químicas del material que determinan su resistencia a los componentes agresivos del ambiente.

B) La superficie de la interfase entre las diversas partículas primarias determina el nivel siguiente en la complejidad estructural. La energía superficial de cada partícula condiciona su correspondiente conducta en relación con el resto de las partículas que le rodean. Aquí aparecen:

- Resistencia.
- Densidad.

C) En un tercer nivel están las formaciones de multipartículas y los huecos de aire. Aquí las propiedades del hormigón determinan su capacidad de resistir numerosas influencias agresivas, incluidos los ciclos de congelación y deshielo.

Es en este nivel donde aparece el concepto de porosidad. Además, la resistencia del hormigón se ensaya sobre muestras cuya composición se caracteriza por este tercer nivel.

D) Nivel de elemento estructural, en función del tamaño del elemento, de la formación de un campo no uniforme de tensiones, etc.

2.1.2 ORIGEN DE LOS POROS CAPILARES Y HUECOS EN EL HORMIGON

Ya se ha mencionado anteriormente el papel determinante que juega la estructura de los poros de la pasta de cemento durante los procesos agresivos que el hormigón sufre, y cuyas causas proceden del ambiente que le rodea. Interesa, por tanto, reseñar brevemente el proceso de hidratación de las partículas de cemento, el cual origina los poros capilares de la pasta en el hormigón.

Inmediatamente después de poner en contacto el agua y el cemento, las partículas de éste, aún no hidratadas, se dispersan en una solución acuosa, tal y como indica la Figura 2.1. Durante los primeros minutos, la actividad de reacción es muy intensa y el silicato cálcico hidratado, normalmente denominado "gel de cemento", forma un revestimiento alrededor de los granos aislados de cemento (Figura 2.2). A medida que el proceso continúa, los productos de hidratación –incluido el hidróxido cálcico– precipitan en los espacios o huecos. De esta forma, y para un proceso continuado de hidratación, se producen algunas formas complejas de difusión, de las que resulta el posterior depósito del gel de cemento, con el consiguiente consumo de cemento no hidratado y de agua en los poros capilares. En consecuen-

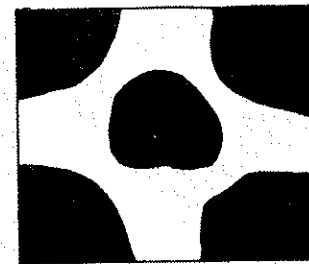
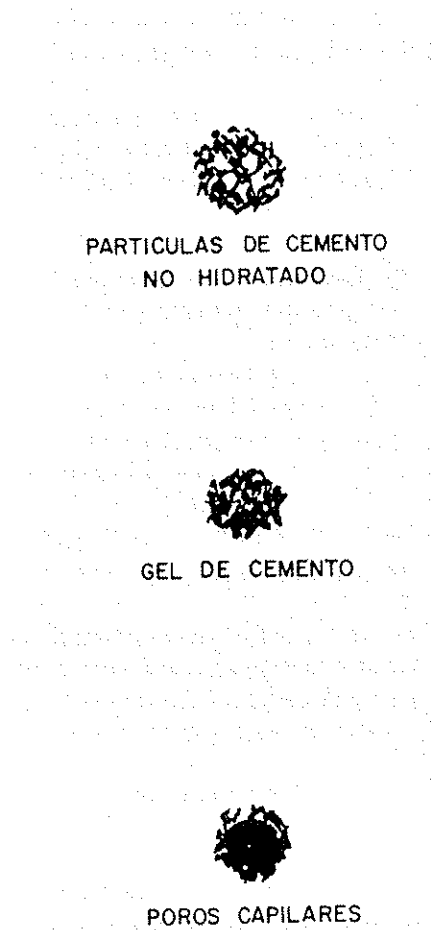


Fig. 2.1

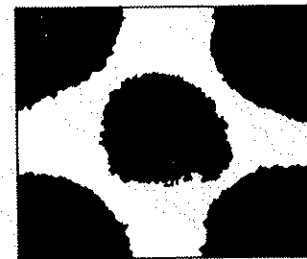


Fig. 2.2

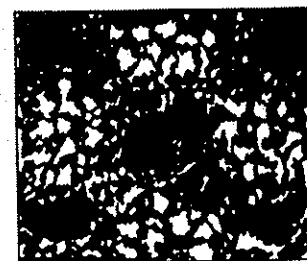


Fig. 2.3

Fig. 2.1, 2.2 y 2.3. LA HIDRATACION DEL CEMENTO Y EL ORIGEN DE LOS POROS CAPILARES

cia, la pasta de cemento endurecida, que constituye uno de los elementos fundamentales del hormigón, puede ser considerada como un material formado por varias fases, y compuesto por partículas de cemento no hidratado, embebidas en una matriz continua de gel de cemento, la cual es atravesada por una múltiple red de poros capilares, llenos o no de agua (Figura 2.3).

Pero la porosidad del hormigón incluye una serie de poros y huecos, que no provienen necesariamente en su totalidad del proceso de hidratación de la pasta de cemento. Además de ésta, hay otras causas que provocan la existencia de aire en el interior del hormigón, tales como una mala compactación, una insuficiente cantidad de pasta de cemento para llenar los huecos entre las partículas de árido y, por supuesto, la aireación artificial mediante la inclusión de aditivos aireantes entre los productos de amasado.

Es fácil comprobar por un sencillo cálculo que, aunque el contenido de aire en el hormigón sea pequeño, altera notablemente la microestructura del cemento endurecido. Por ejemplo, un 3% de volumen de aire en el hormigón representa aproximadamente un 10-11% del volumen de cemento endurecido, el cual con un diámetro de burbuja medio de 0,2 mm significa que hay 3000 burbujas de aire por centímetro cúbico. Pero, a pesar de ello, es necesario hacer notar que el análisis del papel que juega la estructura de la pasta de cemento en el desarrollo de los procesos de deterioro del hormigón debe ser estudiado no sólo en función del contenido total del aire en su interior, sino considerando también el tamaño y la forma de los huecos y poros, así como la posibilidad de que gases o líquidos puedan atravesarlos por flujo o por difusión.

2.1.3 CLASIFICACION DE LA POROSIDAD

La estructura del hormigón se caracteriza por la cantidad de poros y huecos, diferentes en forma y tamaño, que existen en el interior de su masa. Esto hace que las clasificaciones más elementales referentes a la porosidad estén en función de los dos parámetros antes indicados. No obstante, aunque se acepte este hecho que podría parecer útil para homogeneizar los criterios, un rápido repaso a la bibliografía existente sobre el tema muestra la gran diversidad de valores límites empleados en las clasificaciones. Para evitar esto, en 1971 la IUPAC intentó definir una clasificación de los poros en función de su radio, en la cual se distinguían tres grupos:

- microporos, de radio no mayor de 20 Å
- mesoporos, de radio comprendido entre 20 y 500 Å
- macroporos, de radio mayor de 500 Å

Estos límites no fueron específicos para una clasificación, sino que se definieron en el contexto del estudio sobre la adsorción de gas y la aplicación del porosímetro de mercurio.

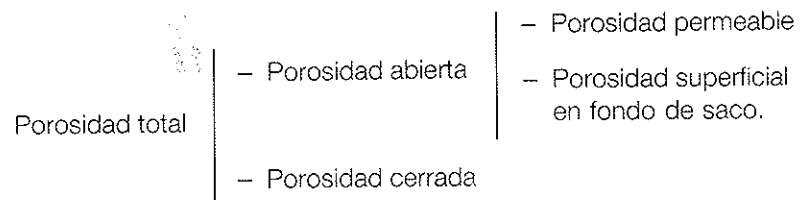
También es interesante citar la división realizada por Moskvín en 1980, en función del comportamiento del agua en el interior de los poros. En este caso se delimitan tres grupos, de la siguiente manera.

1. Poros ultramicroscópicos con radio menor de 50 Å. Si consideramos que el sistema de poros no tiene necesariamente una uniformidad en relación con el tamaño de su sección transversal, nos encontraremos con espacios cuyo tamaño sea prácticamente molecular, por lo que el agua en su interior estará sometida a la acción de fuerzas superficiales provocadas por moléculas en fase sólida.
2. El segundo grupo está constituido por microporos cuyo radio está comprendido entre 50 y 1000 Å. En éstos, el contenido de agua afectada por

las fuerzas superficiales en la fase sólida es similar al agua total que llena los poros y, por lo tanto, la permeabilidad depende de la cantidad de agua en los poros.

3. El tercer grupo comprende los microporos de radio mayor de 1.000 Å donde, excepto el agua de la capa adsorbida, todo el resto del agua es libre. Son estos poros las principales vías que utilizan los gases y líquidos en su movimiento a través del hormigón.

Ahora bien, independientemente de su tamaño, no todos los poros están en las mismas condiciones de servir de medio de penetración de los agentes agresivos al interior de un cuerpo poroso en general y, en particular, del hormigón. Imaginemos un hueco aislado en el interior de un cuerpo. Es evidente que su existencia y ubicación influirán en mayor o menor medida sobre el comportamiento mecánico de dicho cuerpo y, en campos como la Resistencia de Materiales o la Mecánica de Fractura, por poner dos ejemplos significativos, su influencia puede llegar a ser decisiva. Sin embargo, este accidente estructural del cuerpo no tendrá ninguna efectividad como medio de penetración de factores agresivos, pues está impedida su comunicación con el exterior. Esto hace necesaria una nueva clasificación de las distintas porosidades que pueden presentarse en el interior de un cuerpo. Distinguiremos, pues, entre los siguientes conceptos (Figura 2.4).



- Porosidad total: Representa el contenido total de poros existentes en un cuerpo, los cuales no necesariamente deben estar interconectados entre ellos y que, por lo tanto, no siempre permiten el paso de un fluido.
- Porosidad abierta: Representa aquella parte de la porosidad total que incluye los poros que están conectados con el exterior. Permiten la entrada de un fluido, pero no necesariamente su flujo.
- Porosidad cerrada: Comprende la parte de la porosidad total que incluye aquellos poros que no están conectados con el exterior, por lo que no tiene ninguna influencia en un posible proceso de agresión provocado por agentes externos.
- Porosidad permeable: Es la parte de la porosidad abierta que incluye aquellos poros que, por estar comunicados entre sí, permiten el paso de un fluido en el interior de un sólido.
- Porosidad superficial en fondo de saco: Es la parte de la porosidad abierta que incluye aquellos poros que, estando en conexión con la superficie, no lo están con otros de forma que se permita el paso de un fluido.

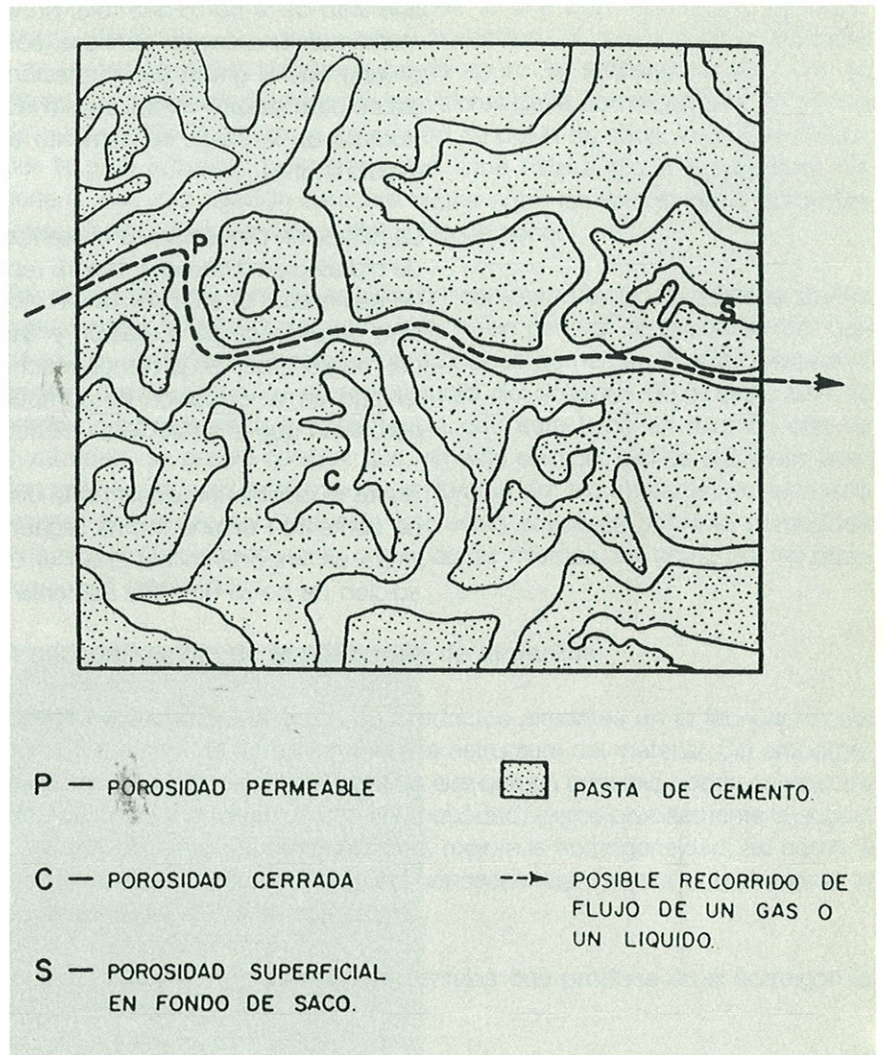


Fig. 2.4. TIPOS DE POROSIDAD

2.1.4 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DISTRIBUCION DE LOS POROS

Es evidente que sobre la estructura de los poros del hormigón influyen todos aquellos procesos seguidos hasta su puesta en servicio. Desde la dosificación hasta su curado, cualquier incidencia tendrá una importante repercusión en su definitiva estructura interna. A continuación, consideremos algunos factores que influyen decisivamente en la distribución de los poros y en la estructura del hormigón.

2.1.4.1 Influencia de la dosificación del hormigón

En una primera aproximación, es claro que cualquier factor que modifique de alguna forma el proceso de hidratación del cemento, modificará la posterior estructura de los poros del hormigón endurecido. Por tanto, la composición del cemento empleado, la relación agua-cemento, la presencia de aditivos, etc. son factores que determinan la porosidad que tendrá el futuro hormigón.

Por ejemplo, parece clara la influencia que la relación agua-cemento tendrá en el tamaño y distribución de los poros existentes en la pasta de cemento. El contenido absoluto de poros del gel, así como la superficie específica, aumentan si se supera la relación agua/cemento que corresponde al grado mínimo de hidratación. En consecuencia, el efecto negativo del considerable

aumento de la porosidad total prevalece sobre el efecto positivo de la formación de una mayor cantidad adicional de productos hidratados: lo que prueba que el grado de hidratación del cemento no es un parámetro suficiente para determinar las propiedades físico-químicas del hormigón. La estructura de la pasta de cemento es el parámetro básico a este respecto (Figura 2.5).

La utilización de cementos diferentes del Portland, que poseen propiedades de hidratación diferentes, tendrá repercusión sobre la porosidad de la pasta de cemento. Por ejemplo, la utilización de cementos puzolánicos lleva consigo un proceso de liberación y fijación de la cal liberada en la hidratación del "clinker", que se prolonga mucho en el tiempo, lo que lleva consigo una lentitud en la formación de compuestos, que confiere al hormigón menor porosidad que si se hubiera utilizado un cemento Portland.

Sobre la posible influencia de la utilización de polvo de sílice en las pastas de cemento Portland, se ha llegado a la conclusión de que la temperatura juega un importante papel en el desarrollo de la porosidad. A 20° C, la adición de polvo de sílice aumenta de forma significativa la porosidad total

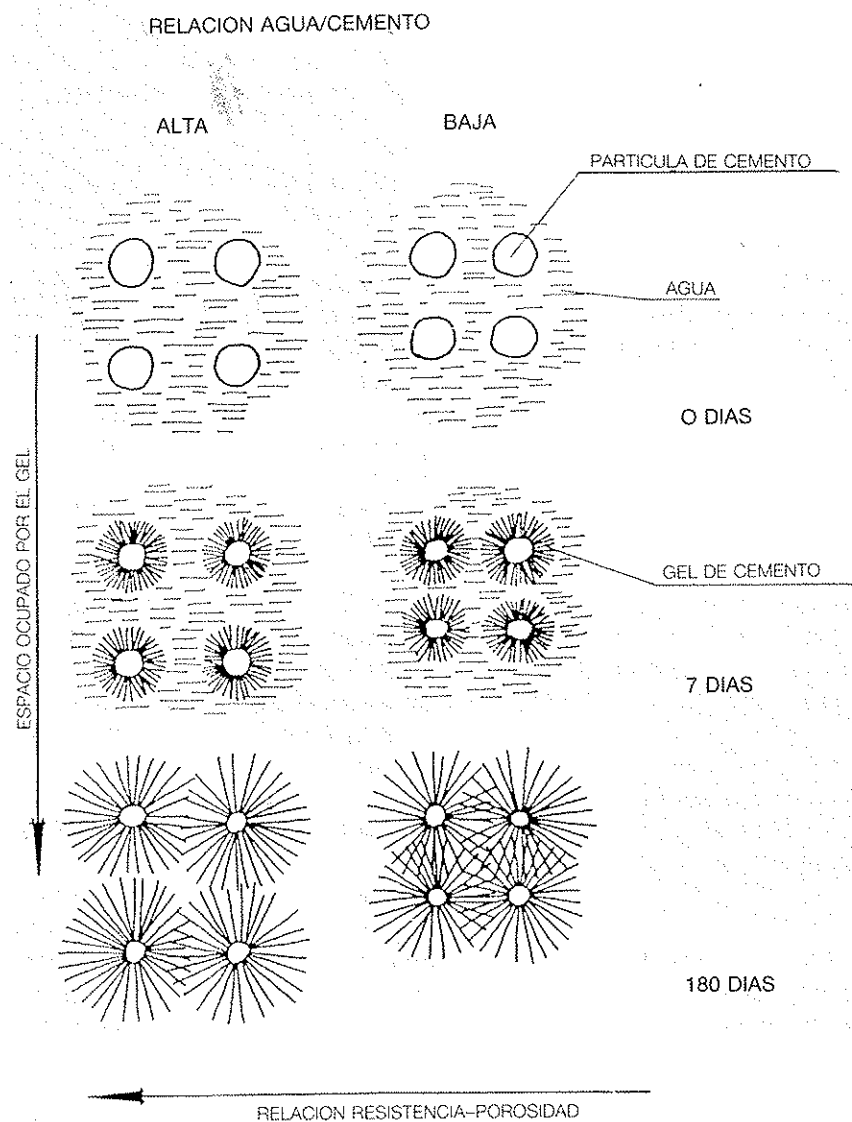


Fig. 2.5. INFLUENCIA DE LA RELACION AGUA/CEMENTO SOBRE LA POROSIDAD

en un período temprano de hidratación, lo que está relacionado estrechamente con el alto valor de superficie específica del polvo de sílice, así como con sus propiedades de absorción de agua. Sin embargo, a 40° C no se observa ninguna diferencia entre los valores de la porosidad total en pastas de cemento Portland con o sin adición de polvo de sílice, lo que se explica por la gran actividad puzolánica que tiene éste a dicha temperatura. En general, hay una relación bastante buena entre los valores de la porosidad total y la actividad puzolánica del polvo de sílice.

Sobre la influencia que la adición de cenizas volantes y escorias puede ejercer sobre la estructura del hormigón, en general se puede afirmar que su efecto es doble: si bien dichas adiciones aumentan la microporosidad capilar, disminuyen a su vez el conjunto del volumen de la estructura de poros, y considerando la importancia que éste tiene en relación con su durabilidad, se puede concluir que, en este sentido, dichas adiciones pueden ser beneficiosas para mejorar la durabilidad. No obstante, es necesario resaltar que el efecto producido por estas adiciones sobre la durabilidad está muy condicionado por el origen de las mismas, así como por las dosificaciones empleadas.

2.1.4.2 Influencia de la utilización de aireantes

Es evidente que la utilización de productos aireantes en la fabricación del hormigón afecta de forma notable a la estructura del material. Sin embargo, la oclusión de pequeñas burbujas de aire que en principio podría parecer de efectos nocivos en relación con la durabilidad, ejerce precisamente la acción contraria: disminuye la permeabilidad, mejora la homogeneidad, así como la resistencia a la congelación y, en consecuencia, mejora notablemente la durabilidad del elemento estructural.

En este sentido, se enumeran las ventajas que produce en el hormigón la utilización de aireantes:

- a) Son más dóciles y trabajables, debido a la acción lubricante de las burbujas de aire.
- b) Son más homogéneos, presentando mayor estabilidad durante el transporte, con menor tendencia a la segregación.
- c) Presentan mejor aspecto al ser desencofrados.
- d) Son más impermeables y menos absorbentes por capilaridad, debido al efecto de las burbujas de aire que interceptan los capilares.
- e) Poseen gran resistencia a las heladas, al actuar las burbujas como camino de expansión cuando se hiela el agua contenida en los capilares.
- f) Tienen mayor resistencia a las aguas agresivas, como consecuencia de su menor permeabilidad y absorción capilar.

Se observa que, en este conjunto de ventajas, las tres últimas están relacionadas con la durabilidad.

El proceso de formación de microburbujas ocluidas en el hormigón, debido a utilización de aireantes, no es siempre el mismo: Su cantidad y tipo depende de una serie de factores, relacionados fundamentalmente con la preparación y puesta en obra del hormigón. Algunos de estos factores son:

- Concentración del aireante y su influencia sobre la tensión superficial.
- Presencia de otros aditivos químicos, tales como retardadores o reductores de agua.

2.2 MECANISMOS DE TRANSPORTE DEL AGUA EN EL INTERIOR DE LA ESTRUCTURA DE POROS DEL HORMIGÓN

- Tiempo de amasado.
- Velocidad de amasado.
- Consistencia de la mezcla.
- Temperatura de la mezcla.
- Relación agua/cemento y contenido de agua de la mezcla.
- Gradación de los sólidos en la mezcla, incluido el cemento.

Los mecanismos que sigue el agua para su transporte en el interior de los poros del hormigón son fundamentalmente de tres tipos: adsorción, absorción y difusión. A continuación se definen brevemente estos tres conceptos:

- Adsorción: es un proceso mediante el cual las partículas se adhieren a la superficie del hormigón. Puede ser de dos tipos: física y química. En la primera, las moléculas se unen a la superficie como resultado de las fuerzas de Van der Waals. En la segunda, es el resultado de la formación de enlaces químicos.
- Absorción: es un proceso por el cual el hormigón atrae mediante fenómenos de tensión superficial, a un fluido para que llene los espacios existentes dentro del material.
- Difusión: es un proceso por el cual un líquido, un gas o un ion puede pasar a través del hormigón, bajo la acción de un gradiente de concentraciones.

En función de estos tres mecanismos de transporte se pueden realizar modelos idealizados de cómo el agua se mueve en el interior de un medio poroso en general y, en particular, dentro del hormigón.

En uno de estos modelos se distinguen seis estados dentro del proceso de transporte de agua en un sistema poroso (Fig. 2.6). Para mayor sencillez se considera un poro sencillo con un estrechamiento en cada extremo. Un flujo de vapor incide sobre el extremo izquierdo.

En el primer estado se produce únicamente adsorción (Fig. 2.6.a) y, hasta que ésta se ha completado, el flujo de vapor no puede ser transmitido y el concepto de conductividad no tiene ningún significado real, aunque el agua, en forma de vapor, se traslada a las zonas donde se produce la adsorción.

Una vez completada la adsorción, el segundo estado es el único de movimiento de vapor no impedido, por lo que éste se comporta como un gas ideal (Fig. 2.6. b).

El tercer y cuarto estado se producen cuando los estrechamientos empiezan a contener agua, tanto si existe (Fig. 2.6.c), como si no (Fig. 2.6.d) una delgada película sobre las paredes del poro.

En el estado (c), el sistema es impermeable a un gas inerte y permeable al agua tan sólo mediante un proceso de destilación, en el que los estrechamientos actúan como corto circuitos para el movimiento del vapor.

Eventualmente, hay una transición al quinto y sexto estado, donde ya existe flujo del líquido. La figura 2.6.e representa la situación no saturada, y la figura 2.6.f. la situación saturada.

Una vez visto este modelo para explicar la transferencia del agua en el interior del hormigón, no se debe olvidar que el espacio de huecos y la permeabilidad no pueden ser caracterizados a menos que se tenga en cuenta el medio que los rodea. Este fenómeno no es tan sólo el resultado de procesos internos que influyen sobre la proporción de huecos llenos de agua, sino también de cambios en la temperatura y en la humedad del

ambiente que le rodea. Además, la proporción de los diferentes estados en que puede estar el agua depende no sólo de la estructura del hormigón, sino que es función también del tamaño del elemento estructural y de las condiciones de contacto entre el hormigón y el agua.

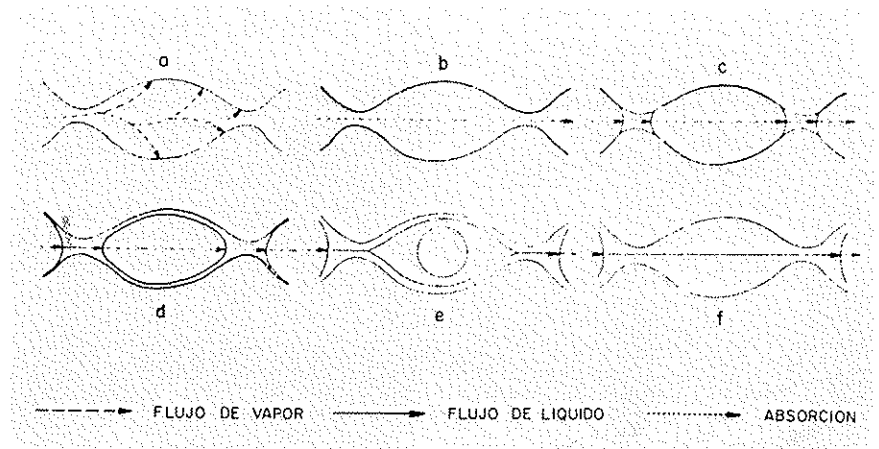


Fig. 2.6. PROCESO DE TRANSPORTE DEL AGUA EN UN MEDIO POROSO

En relación con la forma de enlace entre el agua y el hormigón, se definen tres grupos: los de enlace mecánico, los de enlace físico-químico y los de enlace químico. A este respecto, es interesante destacar que en cada uno de estos grupos varía la energía necesaria para liberar dicha unión, siendo máxima para los enlaces químicos, y mínima para los mecánicos. Esto se expresa claramente en la Tabla 2.1., donde se da para cada grupo los valores de la energía intrínseca de enlace.

Tipo de enlace	Agua	Energía intrínseca de enlace (Julios/gr)
Mecánico	- Agua totalmente libre	0
	- Humedad de los macroporos de la pasta y arena.	0 - 0.03
	- Humedad de los microporos de la pasta.	0 - 0.25
Físico-químico	- Humedad adsorbida en la multicapa	0.2 - 0.5
	- Humedad adsorbida en la monocapa	0.3 - 0.8
Químico	- Débilmente combinada	0.6 - 11
	- Fuertemente combinada	1.1

Energía creciente ↓

TABLA 2.1

2.3 RELACION ENTRE LA POROSIDAD Y LA PERMEABILIDAD

Anteriormente se ha definido el término de porosidad, y al hacer la clasificación de las diversas porosidades se introducía ya, aunque de forma intrínseca, la relación existente entre dicho concepto y las diversas formas de comportamiento de un fluido en el interior de un cuerpo poroso. Este comportamiento es el que condiciona la naturaleza permeable de un sólido en general y, en particular, del hormigón.

Se considera la permeabilidad como una propiedad de flujo que se define en los medios porosos, y que se caracteriza por la facilidad con que un fluido pasa a través de ellos si están sometidos a un diferencial de presión. Este último condicionante sobre la existencia de un gradiente de presiones es importante, pues evita la confusión con otros procesos de transferencia de fluidos tales como la difusión o la absorción, en los que las causas que provocan el fenómeno son de origen distinto, como pueden ser en los ejemplos indicados la existencia de un gradiente de concentración o de ascensión capilar.

Aunque en un principio podría pensarse que un cuerpo será tanto más permeable cuanto más poroso sea, ello no es así. Es evidente que la permeabilidad no depende de la porosidad total, sino de la porosidad permeable. En consecuencia, se pueden encontrar materiales cuyos valores de porosidad son muy altos y que son altamente impermeables, y viceversa. Esto se observa claramente en la Fig. 2.7.

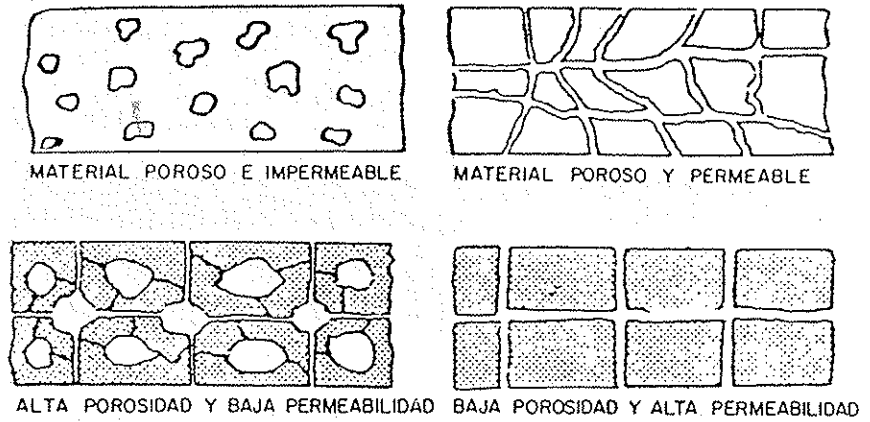


Fig. 2.7. POROSIDAD Y PERMEABILIDAD

Cuando un líquido o un gas penetran en la estructura de un sólido, el tamaño de las partículas que entran debe ser comparable al del poro del sólido. Se ha demostrado que el mecanismo mediante el cual un fluido penetra en el hormigón depende del tamaño del poro. La tabla 2.2. indica qué valores del radio del poro son los límites para que exista un determinado mecanismo de transporte.

Radio del poro, cm.	Coefficiente de permeabilidad (cm/s)	Mecanismo
Menor de 10^{-5}	Menor de 10^{-8}	Difusión molecular
Entre 10^{-5} y 10^{-3}	Entre 10^{-8} y 10^{-7}	Flujo molecular
Mayor de 10^{-3}	Mayor de 10^{-7}	Flujo viscoso

TABLA 2.2
Efecto del tamaño del poro sobre el mecanismo de transporte

En el hormigón no existe tan sólo un determinado tamaño de poros, pero sí habrá un tamaño que sea predominante. Este será el que determine el mecanismo a seguir.

Es conveniente considerar la pasta de cemento de un hormigón como un sólido poroso con una estructura interna complicada, donde existen zonas de alta y baja permeabilidad. Se pueden distinguir tres casos distintos en un sólido, y las relaciona con su permeabilidad a un gas (Fig. 2.8.).

- a) Zonas de baja permeabilidad inmersas en una zona de alta permeabilidad.
- b) Zonas de alta permeabilidad inmersas en una zona de baja permeabilidad.

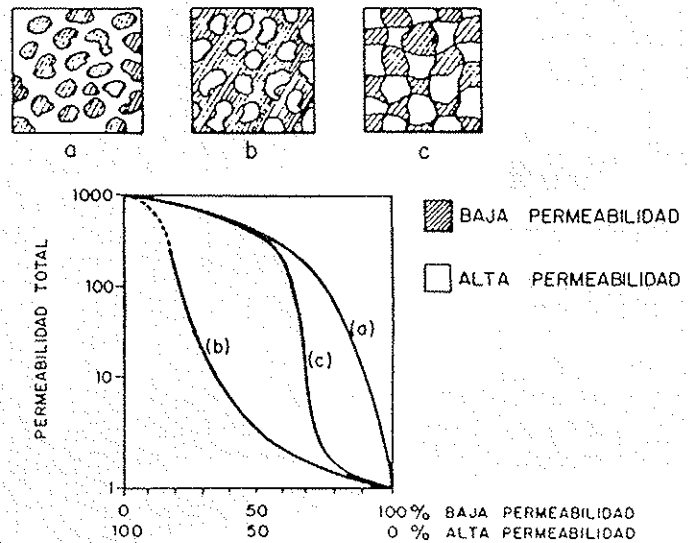


Fig. 2.8. CASOS POSIBLES DE ESTRUCTURAS PERMEABLES

c) Zonas de alta y de baja permeabilidad de tamaño parecido, y distribuidas aleatoriamente.

En la figura 2.8. se representa la influencia que, sobre la permeabilidad total del hormigón, tiene la proporción relativa de zonas de baja permeabilidad (áridos + pasta de cemento) y de zonas de alta permeabilidad (poros). Así, se puede observar la existencia de un valor a partir del cual se comportan exactamente igual los casos "c" y "a", ya que para valores mayores del 60% de poros no hay diferencias entre ambos. De igual forma se obtiene que, para unos valores dados de cada una de las zonas, la permeabilidad total está en función del caso del que se trate, resultando valores máximos para el caso "a" y mínimos para el caso "b".

La relación entre la porosidad y la permeabilidad ha sido estudiada por diversos autores. Como ejemplo significativo, se pueden citar los trabajos desarrollados para pastas de cemento utilizando la teoría del radio hidráulico (r_h), la cual considera la relación existente entre el flujo y las fuerzas de viscosidad que se oponen a él. Se obtiene la relación entre permeabilidad y porosidad que se muestra en la Fig. 2.9., en la que los resultados se agrupan en función de la relación agua/cemento, dando valores de la permeabilidad al agua a los 3, 7 y 28 días, 10 y 20 meses. Se observa claramente que el efecto sobre la permeabilidad de la variación en la relación agua/cemento es independiente del provocado por la hidratación en la estructura de poros; y en consecuencia, en la permeabilidad.

Además, se ha estudiado la permeabilidad en función de dos parámetros estructurales distintos: el área superficial y el radio hidráulico. Al incluir este último factor, se tiene en consideración la relación existente entre el flujo y las fuerzas de viscosidad que se oponen a él. Se ha obtenido como resultado una correlación entre la permeabilidad y el radio hidráulico, que se representa en la Fig. 2.10. El coeficiente de correlación es del 85% y la regresión es:

$$\log K = 38,45 + 4,08 \cdot \log (E r_h^2)$$

donde "E" es la porosidad.

Se llega a la conclusión de que la permeabilidad no está exclusivamente relacionada con la porosidad y la superficie específica sino que, para una

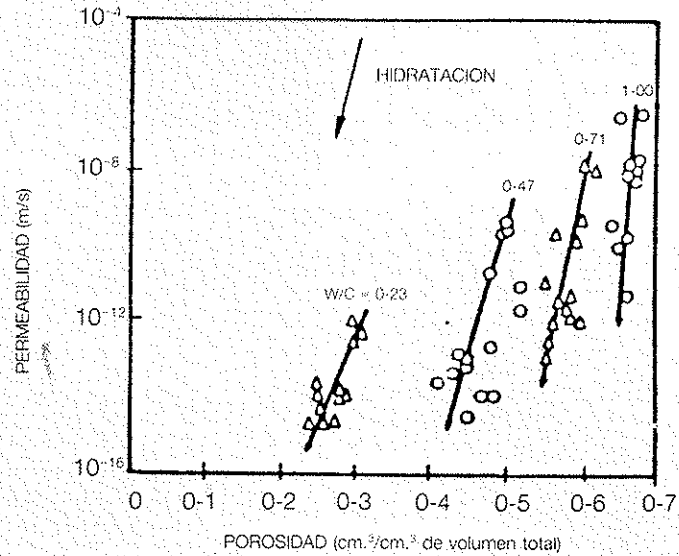


Fig. 2.9. RELACION ENTRE PERMEABILIDAD Y POROSIDAD

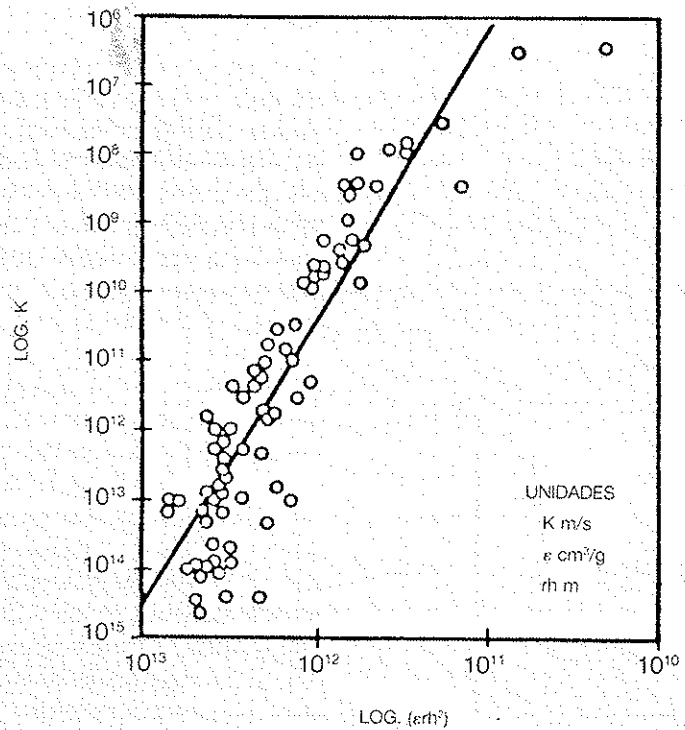


Fig. 2.10. CORRELACION ENTRE PERMEABILIDAD Y RADIO HIDRAULICO

edad dada, dicha superficie aumenta con la permeabilidad; lo que implica que no todas las superficies resisten el flujo de la misma forma.

La permeabilidad de morteros es de gran importancia si se tiene en cuenta que éstos forman las capas externas de cualquier hormigón estructural. Partiendo de que la porosidad de la pasta es mayor que la de los áridos es evidente que, al aumentar la dosificación de éstos, se consigue una reducción del valor de la porosidad del mortero, al mismo tiempo que, contra lo que en principio pudiera pensarse, aumentan tanto el radio hidráulico como la permeabilidad, lo cual se justifica gracias a la aparición de nuevas zonas interfaciales entre el árido y la pasta que, junto con las fisuras, producen nuevos pasos de flujo, con el consiguiente aumento de la permeabilidad.

2.4 POROSIDAD Y DIFUSION

Si un sólido poroso capilar, como puede ser la pasta de cemento endurecida, está en contacto con un líquido se establece un equilibrio entre el fluido de los poros y el líquido circundante, después que los poros hayan sido totalmente saturados con el líquido mediante la acción capilar.

Si la solución acuosa contiene algún tipo de componentes agresivos al cemento endurecido, el equilibrio es inevitablemente destruido. Esta destrucción se debe a la adsorción de humedad de la superficie, o a la reacción química entre los componentes disueltos en el agua y el material del que están formados las paredes de los poros. Esto origina un gradiente de concentraciones del agente agresivo en el sólido y, como consecuencia, se inicia la difusión.

Al tratar de la durabilidad, ya se indicó el importante papel que juega la difusión en el deterioro del hormigón. En general, se puede añadir que este efecto es más pronunciado en aquellos elementos estructurales que estén en contacto con aguas superficiales o subterráneas.

El grado de deterioro de un elemento de hormigón armado o pretensado, que esté inicialmente saturado y no sometido a la acción de una carga hidráulica, se determina mediante la suma de la cantidad de agentes agresivos que acceden a la superficie del elemento, la cantidad de difusión interna de iones electrólitos dentro de los poros del cemento endurecido, y el grado de reacción química.

En una situación teórica, el cemento endurecido de un mortero o de un hormigón puede considerarse como una membrana semipermeable, ya que puede darse el caso, por ejemplo, que sea permeable al agua e impermeable a los iones disueltos en ella.

Como es conocido, el fenómeno de difusión se expresa teóricamente mediante la 1ª Ley de Fick, que dice:

$$Q = -D \cdot \frac{\partial c}{\partial x}$$

donde: D: coeficiente de difusión (cm²/s)

c: concentración.

x: coordenada que define la posición del frente de difusión

Q: caudal del flujo.

Al ser la difusión un fenómeno relacionado necesariamente con la existencia de un gradiente de concentraciones, se puede expresar también el cambio de la concentración con el tiempo en un punto "x", debido a un proceso de difusión unidimensional:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

donde τ es el tiempo.

Estas ecuaciones diferenciales pueden resolverse a partir de las condiciones iniciales y de contorno existentes para la probeta o para el elemento estructural en servicio. Por ejemplo, supóngase un caso en que la difusión tiene lugar sobre una cara de un elemento, pero sin alcanzar aún la cara opuesta. Se tendrán las siguientes condiciones de contorno:

$$C = C_0; x = 0; \tau > 0$$

y las condiciones iniciales serán:

$$C = 0, x > 0, \tau = 0$$

con lo que la solución de la Ley de Fick será el caudal:

$$Q = 2C_0 \sqrt{\frac{D \cdot \tau}{\pi}}$$

y la concentración:

$$1 - \frac{C}{C_0} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{8D\tau}}$$

Por lo tanto, el parámetro que define la predisposición o no de un hormigón para que en él se produzca un proceso de difusión es, evidentemente, el coeficiente de difusión antes mencionado. Este coeficiente depende de la naturaleza de cada hormigón, y su valor es distinto en función de cuál sea el elemento que se difunde. A este respecto, tiene particular importancia el coeficiente de difusión de iones cloruro, dada su influencia en la durabilidad, así como la relativa facilidad con la que puede ser determinada en laboratorio.

La inexistencia de un método normalizado ha provocado una gran heterogeneidad en los parámetros de los diferentes ensayos (dimensiones, concentraciones, preparación de probetas, etc.), aunque los procedimientos sean muy similares entre sí. Como ejemplo significativo, se puede mencionar el método desarrollado por S. Goto y D.M. Roy, cuyas características fundamentales son:

A) Preparación de las muestras:

- Se utilizan dos tipos de cementos: ASTM. Tipo I y API Clase H.
- Amasado con agua desionizada, con relación agua/cemento comprendida entre 0,30 y 0,45, y siguiendo el método API de amasado.
- Molde de plástico de 50,8 mm. de diámetro.
- Curado durante 1 día a 100% de humedad relativa.
- Se desmolda y se cura en agua saturada de cal, a temperaturas entre 27° C y 60° C, durante períodos entre una y tres semanas.
- Se cortan las probetas en rodajas de unos 0,3 cm. de espesor.
- Se utiliza como material de comparación la roca de cuarcita, ya que su permeabilidad al agua es similar a la de una pasta de cemento con relación agua/cemento 0,4, curada durante cuatro semanas a 60° C.

B) Célula de difusión.

(Ver fig. 2.11).

- El lado I contiene agua desionizada (volumen = V).
- El lado II contiene una solución 0,5 N de ClNa.
- Después de un tiempo, se extraen con una pipeta 25 ml de líquido en el lado I para su análisis, y se reemplazan por el mismo volumen de agua desionizada.
- Se añaden tres gotas de ácido nítrico al líquido de la pipeta para prepararlo antes de su análisis.
- Las concentraciones (C_{ppm}) de iones Na⁺ y K⁺ se analizan con un espectrómetro de emisión de plasma.
- La concentración de iones Cl⁻ se obtiene mediante un analizador de iones.

C) Cálculo del coeficiente de difusión.

- Se toma la muestra enésima en el tiempo "t" y las cantidades acumuladas

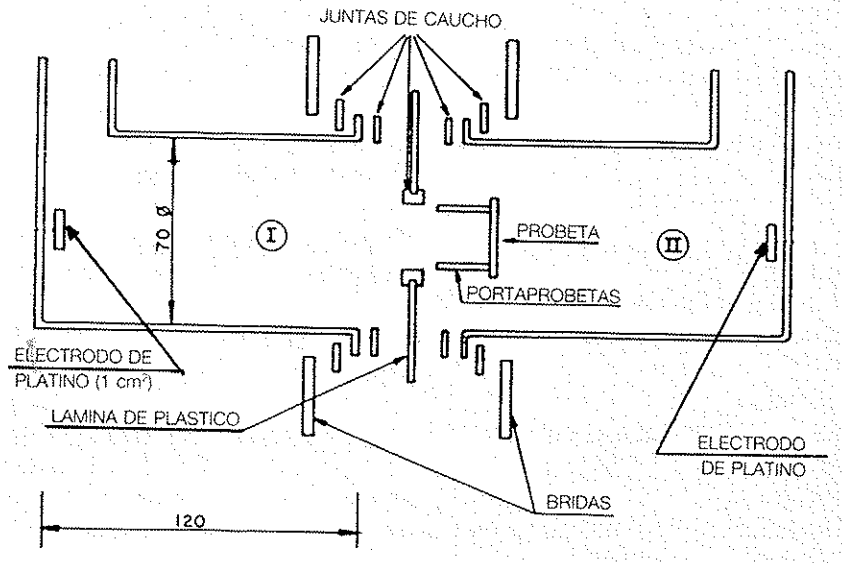


Fig. 2.11. CELULA PARA ENSAYO DE DIFUSION DE CLORUROS

de iones difundidos Q_t (mg) y Q_{mt} (moles/cm²) se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$Q_t = \frac{V}{1.000} \cdot C_n + \frac{25}{1.000} \sum_1^{n-1} C_i$$

$$Q_{mt} = \frac{1}{1.000} \frac{Q_t}{S}$$

donde: Patm: peso atómico.

S: sección transversal de difusión.

- Inicialmente las relaciones Q_t-t y $Q_{mt}-t$ no son lineales, pues no se ha alcanzado aún una situación estable, y además porque en la relación se incluyen los iones K^+ y Na^+ percolados del cemento.
- Posteriormente se alcanza la estabilidad, y se puede calcular el coeficiente de difusión de la gráfica $Q_{mt}-t$.

$$D = \frac{Q_{mt} \text{ (moles/cm}^2\text{)}}{t \text{ (seg)}} \cdot \frac{e \text{ (cm)}}{C \text{ (moles/cm}^3\text{)}}$$

donde:

e: espesor de la muestra

C: diferencia de concentraciónn (moles/cm³) entre los lados I y II.

D: coeficiente de difusión (cm²/s).

2.5 METODOS DE DETERMINACION DE LA ESTRUCTURA DEL HORMIGON

2.5.1 CLASIFICACION DE LOS METODOS

Las tres propiedades que son fundamentales en la descripción de la estructura del hormigón o de cualquier otro material poroso son:

- Porosidad: fracción del volumen total que es ocupado por los poros.
- Superficie específica: área o superficie accesible, contenida en la unidad

de volumen del sólido. Es función de la porosidad y de la distribución por tamaños de los poros.

- c) Distribución por tamaños de los poros: fracción del volumen total de poros abiertos, cuyo tamaño está en un determinado intervalo. Es un medio de conocer la forma de los poros, así como la manera en que están interconectados.

Además de estas tres, existe una cuarta propiedad: la forma de los poros, aunque es mucho menos cuantificable que los anteriores.

Los métodos de determinación de estas propiedades estructurales se pueden dividir en dos grandes grupos: los que están basados en la observación directa (métodos directos) y los que están basados en la evaluación de ciertas propiedades derivadas (métodos indirectos).

Dentro del primer grupo de los métodos directos están exclusivamente los conocidos como "métodos estereológicos", cuyo fundamento radica en la observación microscópica del contenido de huecos en el interior del hormigón. Existe una norma que regula la utilización de estos métodos para la determinación de la estructura de poros del hormigón: la ASTM C457, de la cual se hará un posterior estudio en el apartado 2.5.2.

No obstante, a pesar de la existencia de dicha norma hay que indicar que su utilidad es bastante limitada, debido a las características propias del método, ya que al trabajar sobre una sección determinada de hormigón, no es posible realizar una diferenciación adecuada entre aquellos huecos que forman parte de la porosidad abierta y los que no, lo cual es muy importante desde el punto de vista práctico. En consecuencia, tan sólo debe ser utilizada para la determinación de la porosidad total y, en algunos casos, de la superficie específica.

Entre los métodos indirectos se dispone de una gran variedad. Se pueden clasificar en cinco grandes grupos en función de los métodos que utilizan:

- a) Métodos de desplazamiento de un fluido:

Miden el volumen (o la masa) de un gas o un líquido que se ha desplazado en una probeta. Se obtiene así el volumen de la matriz sólida más el de los poros cerrados, incluyendo también aquellos que son demasiado pequeños para admitir un desplazamiento de las moléculas del fluido.

- b) Métodos de flujo.

Miden la resistencia que un cuerpo ofrece al flujo de un gas o de un líquido. Determinan a partir de ello el valor de la porosidad permeable. Considera que los poros son siempre cilíndricos, lo que supone una simplificación que distorsiona los valores obtenidos en relación con los reales.

- c) Métodos de curvatura interfacial.

Están basados en la teoría de tubos capilares. La curvatura interfacial viene determinada, en una posición dada, por el ángulo de contacto entre el fluido y la pared del poro.

Dentro de este grupo, está el denominado "porosímetro de mercurio", que constituye sin duda el método más ampliamente utilizado para la determinación de la distribución del tamaño de los poros, y del que más adelante se definirán algunas de sus características.

2.5.2 DETERMINACION MICROSCOPICA DEL CONTENIDO DE HUECOS EN EL INTERIOR DEL HORMIGON. NORMA ASTM C457

Esta Norma permite la determinación microscópica del contenido de huecos de aire, de la superficie específica, del factor de separación, así como de la relación aire/pasta en el conjunto del hormigón endurecido. Describe dos métodos:

- Método del trazado lineal.
- Método modificado por cuenta de puntos.

2.5.2.1 Método de trazado lineal

Se utiliza para la determinación de la composición volumétrica de un sólido, mediante la integración de la distancia trazada a través de áreas de cada componente, a lo largo de una línea o de líneas regularmente espaciadas en uno o varios planos. (Fig. 2.12).

Permite la obtención de los siguientes datos:

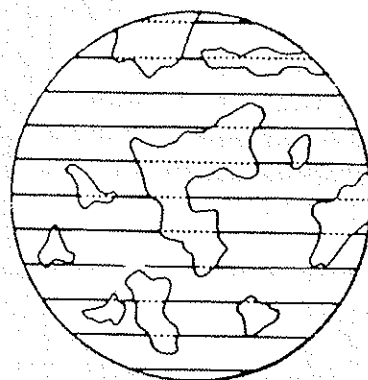
- Número total de huecos en la sección.
- Distancia total trazada sobre las secciones de dichos huecos.
- Distancia total trazada sobre el resto del hormigón.
- Distancia total trazada sobre la pasta.

2.5.2.2 Método modificado por cuenta de puntos

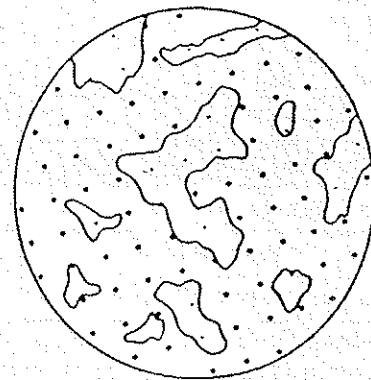
Es un método que determina la composición volumétrica de un sólido por observación de la frecuencia con la cual las diversas zonas de cada material coinciden con un sistema regular de puntos en uno o más planos de corte de la muestra. Se complementa mediante la frecuencia con que cada material corta a líneas regularmente espaciadas (Fig. 2.13).

En este caso se obtienen los siguientes datos:

- Número total de huecos en la sección.
- Frecuencia con la que los puntos regularmente espaciados están superpuestos sobre los huecos de aire.
- Número total de puntos superpuestos sobre la pasta de cemento.



TRAZADO LINEAL



CUENTA DE PUNTOS

Fig. 2.12 y 2.13. METODOS DE ANALISIS ESTEREOLOGICO

2.5.3 EL POROSIMETRO DE MERCURIO

En la actualidad se considera el porosímetro de mercurio como el mejor método para la determinación de la estructura de los macroporos, aunque esto no debe llevar a una sobreestimación de dicho procedimiento, ya que sus resultados pueden estar influenciados por diferentes factores. (Fig. 2.14).

Por otro lado, este hecho no debe en ningún caso provocar un rechazo del método. Se debe, sin embargo, conocer sus limitaciones y los factores que influyen, para así poder interpretar adecuadamente los resultados.

Las principales circunstancias que pueden afectar a la precisión del método son:

- a) Debido al efecto de la presión, se puede producir la rotura de algunas de las paredes de los poros, en especial aquéllas que son más delgadas y de menor resistencia.
- b) Existe una influencia de la rugosidad de la superficie de los poros, por ejemplo en el ángulo de contacto existente entre dicha superficie y el mercurio.
- c) Si permanece en el interior de la muestra alguna cantidad de vapor de agua, éste influye sobre la propiedad del mercurio, como líquido que no moja.

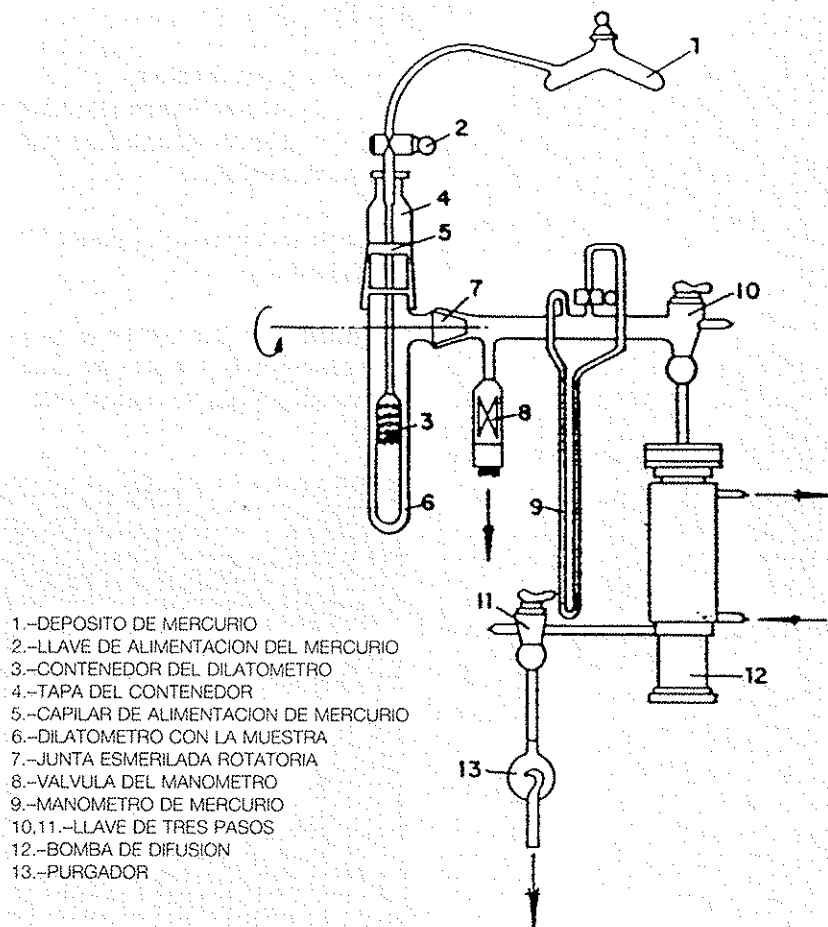


Fig. 2.14. ESQUEMA DE UN POROSIMETRO DE MERCURIO

d) Previamente a la utilización del porosímetro de mercurio, las muestras deben ser calentadas al vacío a la máxima temperatura posible, con el fin de extraer completamente los gases y vapores de su interior. Esto puede ser perjudicial para algunos materiales, como los cementos.

Sobre este último punto se ha llegado a la conclusión de que una desecación previa de las muestras al vacío, a una temperatura de 105° C, tiene poco o ningún efecto sobre poros cuyo radio sea mayor de 100 Å. Para poros de menor tamaño se recomiendan la utilización del método de adsorción BET.

Se puede distinguir entre:

- a) Porosímetros de alta presión: – presión mayor de 0,1 MPa.
– utilizado para poros cuyo radio es menor de 15 µm.
- b) Porosímetro de baja presión: – presión menor de 0,1 MPa.
– utilizado en poros cuyo radio es mayor de 15 µm.

En ambos casos, el método consiste en relacionar cada presión aplicada en el porosímetro de mercurio con un tamaño determinado de poros. Esta relación viene dada por la ecuación de Washburn.

$$d = \frac{\Delta T \cdot \cos \theta}{P}$$

donde:

- d: radio del poro.
- T: tensión superficial (valor aprox. 0,48 N/mm²)
- θ: ángulo de contacto (valor aprox. 140°)
- P: presión.

Los resultados que se pueden obtener con el porosímetro de mercurio son los siguientes:

- a) Distribución por tamaños de poros (Fig. 2.15), mediante la gráfica acumulada de la penetración del mercurio, en función del radio del poro. En consecuencia, se podrán obtener también:

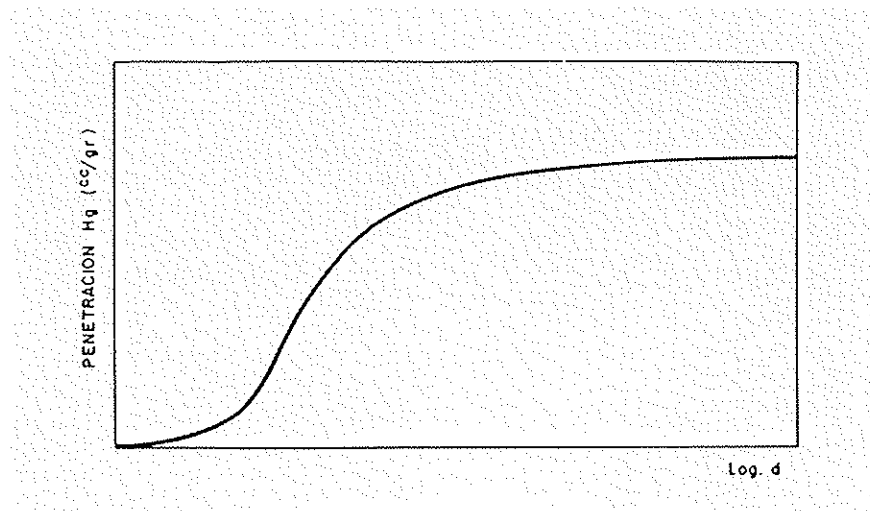


Fig. 2.15. DISTRIBUCION POR TAMAÑOS DE POROS

- Porosidad abierta (en porcentaje sobre el volumen total).
- Poros de tamaño mayor que uno dado.
- Poros de tamaño menor que uno dado.
- Poros de tamaño comprendido en un cierto intervalo.

En los tres últimos casos, el resultado se obtiene en proporción del volumen total de la porosidad abierta.

- b) Distribución de la porosidad abierta (Fig. 2.16), mediante la gráfica de la proporción de dicha porosidad, en función del radio del poro.

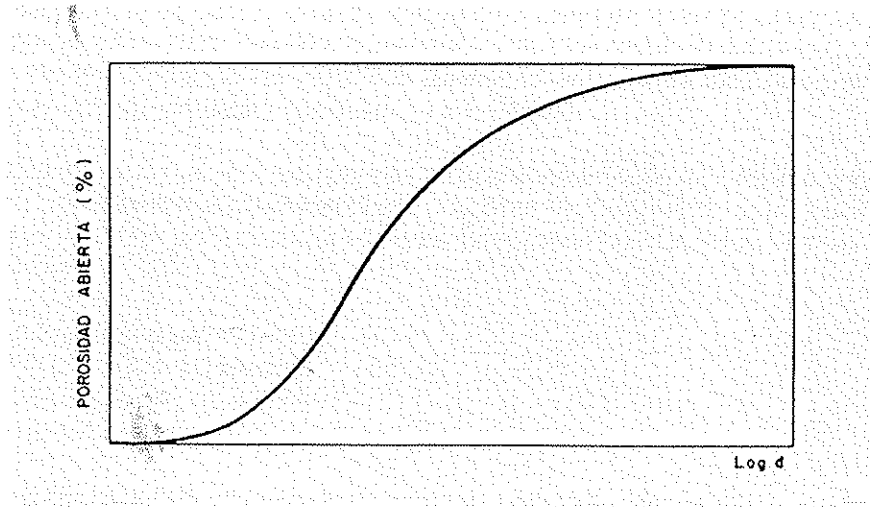


Fig. 2.16. DISTRIBUCION DE LA POROSIDAD ABIERTA

PROCEDIMIENTOS INDIRECTOS DE CONTROL DE LA DURABILIDAD DEL HORMIGON

3.1 INTRODUCCION

En el capítulo anterior se indicó el papel trascendental que, sobre la durabilidad de un elemento de hormigón, juega su estructura interna de poros. Se precisaba además que sobre ésta podía influir una larga serie de factores, como son todos aquellos que determinan los procesos de dosificación y puesta en obra del hormigón. En consecuencia, si se logra ejercer un control adecuado sobre cada uno de los parámetros que rigen estos procesos, se conseguirá controlar indirectamente la estructura de poros del hormigón así elaborado, existiendo por lo tanto la posibilidad de limitar los fenómenos de deterioro del hormigón y aumentar su durabilidad.

A continuación, se va a efectuar una comparación entre las limitaciones que los principales códigos hacen para una serie de parámetros, que tienen gran influencia en la durabilidad. Estos parámetros son fundamentalmente cuatro:

- la relación agua/cemento.
- el contenido de cemento.
- el espesor de recubrimiento.
- la duración del curado.

Hay que tener en cuenta dos importantes circunstancias. En primer lugar, no todas las normas presentan limitaciones para estos cuatro parámetros (Fig. 3.1). Además, pueden existir limitaciones para otros factores, como puede ser el caso del contenido de cloruros en el hormigón, etc., cuyos efectos sobre la durabilidad del elemento estructural son también importantes.

FACTOR QUE LIMITA NORMA	RELACION AGUA/CEMENTO	CONTENIDO DE CEMENTO	ESPESOR DEL RECUBRIMIENTO	TIEMPO DE CURADO
CP-110-72 (REINO UNIDO)	SI	SI	SI	SI
ACI-318-86 (ESTADOS UNIDOS)	SI	NO	SI	SI
BAEL-83 (FRANCIA)	NO	NO	SI	NO
DIN 1045-78 (R.F. ALEMANIA)	SI	SI	SI	SI
CODIGO MODELO CEB-FIP-77	SI	SI	SI	NO
EH-88 (ESPAÑA)	SI	SI	SI	SI
pr ENV-206	SI	SI	-	-

Fig. 3.1. CONTROL INDIRECTO SOBRE LA DURABILIDAD DEL HORMIGON ARMADO EN DIVERSAS NORMAS

Es necesario advertir que los valores que van a ser indicados a continuación, se refieren tan sólo a aquellas limitaciones que están relacionadas con algún criterio de durabilidad. Pueden existir, sin embargo, algunos otros valores de los parámetros antes indicados, y que por no estar en función de dicho criterio, no serán considerados en el presente texto.

Los códigos que se han utilizado son los siguientes:

- "Instrucción para el proyecto y ejecución de obras de hormigón en masa o armado". EH-88. (España).
- "Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón pretensado". EP-80. (España).
- "Building Code Requirements for Reinforced Concrete". ACI-318-86 (Estados Unidos).
- "The structural use of concrete". CP-110-72. (Reino Unido).
- "Régles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états-limites". BAEL-83. (Francia).
- "Régles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant la méthode des états-limites". BPEL-83. (Francia).
- "Beton und Stahlbeton: Bemessung und Ausführung". DIN-1045-78. (R.F. Alemana).
- "Código-Modelo C.E.B.-F.I.P. para las estructuras de hormigón". 1977.
- "Concrete: performance, production, placing and compliance criteria". pr ENIV206. (1988).

3.2 MAXIMA RELACION AGUA/CEMENTO (a/c)

3.2.1 ACI-318-86

3.2.1.1 Requisitos para condiciones especiales de exposición (Art. 4.5.2)

Tipo de exposición	Máxima relación agua/cemento
Hormigón en masa pretendidamente impermeable:	
a) Expuesto al agua dulce	0,50
b) Expuesto a agua salobre o de mar	0,45
Hormigón en masa expuesto a ciclos de congelación y deshielo, en condiciones húmedas:	
a) Bordillos, canaletas, parapetos, u otras secciones delgadas.	0,45
b) Otros elementos	0,50
c) En presencia de fundentes.	0,45
Para protección de la corrosión en el hormigón armado expuesto a fundentes, agua salobre, agua de mar, o rociado por alguno de estos elementos.	0,40

3.2.1.2 Requisitos para hormigón expuesto a soluciones que contengan sulfatos (Art. 4.5.3.)

Exposición a los sulfatos	Máxima relación agua/cemento
Suave	–
Moderada	0,50
Severa	0,45
Muy severa	0,45

3.2.2 CP-110-72

3.2.2.1 Máxima relación agua/cemento en hormigón de cemento Portland para asegurar una adecuada durabilidad bajo ciertas condiciones de exposición (Art. 6.3.3.)

Exposición	Máxima a/c
Suave	0,65
Moderada	0,55
Severa	0,45
Sometido a fundentes	0,55

3.2.2.2 Máxima relación agua/cemento en hormigón con varios tipos de cemento expuesto al ataque de los sulfatos (Art. 6.3.3)

% SO ₃ total	Tipo de cemento	Máxima a/c
Menos de 0,2	Portland normal o con escorias	0,55
0,2 a 0,5	Portland normal o con escorias	0,50
	Portland resistente a los sulfatos	0,55
	Supersulfatado	0,50
0,5 a 1,0	Portland resistente a los sulfatos o supersulfatado	0,50
	Aluminoso	0,45
1,0 a 2,0	Portland resistente a los sulfatos o supersulfatado	0,45
	Aluminoso	0,40
Más de 2,0	Portland resistente a los sulfatos o supersulfatado, además de un adecuado revestimiento de protección.	0,45
	Aluminoso	0,35

3.2.3 DIN 1045-78

3.2.3.1 Relación agua/cemento y consistencia (Art. 6.5.6.3.)

"Para hormigón armado, para la protección del acero contra la corrosión el valor a/c no debe superar 0,65 si se utiliza un cemento Z25, ni 0,75 si se utilizan cementos Z35 o superiores".

NOTA: Z25 - Z35 indican cementos de resistencia 25 y 35 N/mm² respectivamente.

3.2.3.2 Máxima relación agua/cemento en un hormigón con propiedades especiales (Art. 6.5.7)

Propiedad que se pretende	Caso	Máxima a/c
Hormigón impermeable	Elemento de espesor entre 10 y 40 cm	0,60
	Elemento de espesor mayor de 40 cm	0,70
Hormigón resistente a la congelación.	Caso general	0,60
	Si se añaden aireantes	0,70
Hormigón resistente a los ataques químicos.	Ataque suave	0,60
	Ataque fuerte	0,50

3.2.4 CODIGO MODELO CEB-FIP-77

3.2.4.1 Máxima relación agua/cemento (Art. d.3.4.3.2)

"... para la protección de las armaduras debe señalarse que el valor final de la relación agua/cemento no debe exceder, si se trata de ambientes interiores, de 0,70 y, para el exterior, es en ambiente no agresivo, de 0,65.."

3.2.4.2 Máxima relación agua/cemento en hormigones de características especiales (Art. d.3.5)

Características	Caso	Máxima a/c
Hormigón muy impermeable	Elemento de espesor entre 10 y 40 cm	Entre 0,50 y 0,60
	Elemento de espesor mayor de 40 cm	Entre 0,60 y 0,70
Hormigón de alta resistencia a la congelación y a los efectos de fundentes.	Caso general	0,60
	Elementos estructurales macizos y si se añaden aireantes.	0,70
	Acción del hielo y de fundentes.	0,50
Hormigón de alta resistencia a los ataques químicos.	Ataque químico débil	0,60
	Ataque químico fuerte	0,50

3.2.5 pr ENV-206

3.2.5.1 Máxima relación agua/cemento en función del tipo de exposición

Condición ambiental	Máxima a/c	
	Hormigón armado	Hormigón pretensado
Seca	0,65	0,60
Húmeda sin helada	0,60	0,60
Húmeda con helada	0,55	0,55
Húmeda con helada y fundentes	0,50	0,50
Zona marina de rotura de olas con o sin heladas.	0,50	0,50
Ataque químico suave	0,55	0,55
Ataque químico moderado	0,50	0,50
Ataque químico altamente agresivo	0,45	0,45

3.2.6 EH-88

3.2.6.1 Limitaciones a los contenidos de agua y de cemento (Art. 24.4.)

AMBIENTE	MAXIMA a/c
Interior	0,65
Exterior normal	0,60
Exterior con heladas	0,55
Exterior con sales fundentes	0,50
Exterior agresivo	0,55
Exterior agresivo con heladas	0,50
Exterior agresivo con sales fundentes	0,50
Químicamente agresivo	0,50

3.3 CONTENIDO MINIMO DE CEMENTO

3.3.1 EH-88

3.3.1.1 Limitaciones al contenido mínimo de cemento (Art. 24.4)

AMBIENTE	CONT. MIN. CEM. (kg/m³)
Interior	250
Exterior normal	275
Exterior con heladas	300
Exterior con sales fundentes	300
Exterior agresivo	300
Exterior agresivo con heladas	300
Exterior agresivo con sales fundentes	325
Químicamente agresivo	325

3.3.2 EP-80

3.3.2.1 Dosificación del hormigón pretensado (Art. 21)

"Se dosificará el hormigón con arreglo a los métodos que se estimen oportunos, respetando siempre las dos limitaciones siguientes:

- La cantidad mínima de cemento por metro cúbico de hormigón, será de 250 kg.
- La cantidad máxima de cemento por metro cúbico de hormigón será, en general, de 400 kg. El empleo de mayores proporciones de cemento deberá ser objeto de justificación especial".

3.3.3 CP-110-72

3.3.3.1 Contenido mínimo de cemento Portland en un hormigón para asegurar una adecuada durabilidad bajo condiciones específicas de exposición (Art. 6.3.3)

Exposición	Contenido mínimo de cemento (kg/m³)							
	Hormigón armado				Hormigón pretensado			
	Tamaño máximo del árido (mm)				Tamaño máximo del árido (mm)			
	40	20	14	10	40	20	14	10
Suave	220	250	270	290	300	300	300	300
Suave con estricto control de a/c	200	230	250	260	300	300	300	300
Moderada	260	290	320	340	300	300	320	340
Moderada con estricto control de a/c	240	260	290	310	300	300	300	310
Severa	320	360	390	410	320	360	390	410
Severa con estricto control de a/c	290	330	350	370	300	330	350	370
Sometida a las sales fundentes	260	290	320	340	300	300	320	340
Sometida a las sales fundentes y con estricto control de a/c	240	260	290	310	300	300	300	310

3.3.3.2 Mínimo contenido de cemento en el hormigón de varios tipos de cemento, expuesto al ataque de los sulfatos (Art. 6.3.3.)

% SO ₃ total	Tipo de cemento	Mínimo contenido de cemento (kg/m ³)		
		Tamaño máximo del árido (mm)		
		40	20	10
Menos de 0,2	Portland normal o con escorias	240	280	330
0,2 a 0,5	Portland normal o con escorias	290	330	380
	Portland resistente a los sulfatos	240	280	330
	Supersulfatado	270	310	360
0,5 a 1,0	Portland resistente a los sulfatos o supersulfatado	290	330	380
	Aluminoso	290	330	380
1,0 a 2,0	Portland resistente a los sulfatos o supersulfatado.	330	370	420
	Aluminoso	300	340	410
Más de 2,0	Portland resistente a los sulfatos o supersulfatado, además de un adecuado revestimiento de protección.	330	370	420
	Aluminoso	330	370	420

3.3.4 DIN 1045-78

3.3.4.1 Contenido de cemento en el hormigón armado (Art. 6.5.5. y 6.5.6)

"... en el hormigón armado, y para proteger la armadura de la corrosión, el contenido de cemento no debe ser menor de las siguientes cantidades por m³ de hormigón compactado:

240 kg si el cemento es Z35 ó superior
280 kg si el cemento es Z25".

3.3.5 CODIGO - MODELO - CEB-FIP-77

3.3.5.1 Dosificación de cemento en el hormigón (Art. d.3.4.3.2)

"...la cantidad mínima de cemento no debe ser inferior á 250 kg/m³ para hormigón armado, ni á 270 kg/m³ para hormigón pretensado".

3.3.6 pr ENV-206

3.3.6.1 Mínimo contenido de cemento en función del tipo de exposición

Condición ambiental	Mínimo contenido de cemento (kg/m ³)	
	Hormigón armado	Hormigón pretensado
Seca	260	280
Húmeda sin helada	280	300
Húmeda con helada	280	300
Húmeda con helada y fundentes	300	300
Zona marina de rotura de olas, con o sin helada.	300	300
Ataque químico suave	280	300
Ataque químico moderado	300	300
Ataque químico altamente agresivo	300	300

3.4 ESPESOR MINIMO DEL RECUBRIMIENTO

3.4.1 EH-88

3.4.1.1 Distancias a los paramentos (Art. 13.3)

Condiciones ambientales de la estructura	Elementos en general			Láminas, piezas prefabricadas, etc.		
	$f < 250$ ck	$250 \leq f \leq 400$ ck	$f > 400$ ck	$f < 250$ ck	$250 \leq f \leq 400$ ck	$f > 400$ ck
I: Interior de edificios	20 mm	15 mm	15 mm	15 mm	15 mm	15 mm
II: Exteriores normales	30 mm	25 mm	20 mm	25 mm	20 mm	20 mm
III: Atmósfera marina o industrial	40 mm	35 mm	30 mm	35 mm	30 mm	25 mm

3.4.2 EP-80

3.4.2.1 Distancia de las armaduras pasivas a los paramentos (Art. 19.4)

“En las estructuras no expuestas a ambientes agresivos, dicha distancia será igual o superior a:

- un centímetro, si los paramentos de la pieza van a ir protegidos;
- dos centímetros, si los paramentos de la pieza van a estar expuestos a la intemperie o a condensaciones (cocinas, cuartos de baño, etc.) o si van a estar en contacto permanente con el agua (depósitos, tuberías, etc.);
- dos centímetros en las partes curvas de las barras.

En estructuras expuestas a ambientes químicamente agresivos el recubrimiento de las armaduras pasivas vendrá fijado por el proyectista".

3.4.2.2 Recubrimiento en armaduras activas pretesas. (Art. 20.3.1)

Cuando el elemento haya de ser comprobado en Clase I, se admitirán los siguientes recubrimientos mínimos, en mm en función de \varnothing (diámetro máximo de las armaduras).

Tipo de armadura	Ambiente	$\varnothing \leq 3 \text{ mm}$	$\varnothing > 3 \text{ mm}$
Armadura longitudinal	Protegido	8	10
	No protegido	10	12
	Agresivo	13	15
Armadura transversal	En todo caso	7	7

Si el elemento se va a comprobar en Clase II ó Clase III, "se tendrán en cuenta los recubrimientos prescritos en el artículo 19.4."

En piezas expuestas a la acción de agentes corrosivos, habrá que aumentar los recubrimientos o recurrir a otras medidas de protección.

3.4.2.3 Recubrimiento en armaduras activas postesas (Art. 20.3.2)

En el caso de ambiente no agresivo o poco agresivo, los valores mínimos serán, por los menos, iguales al mayor de los límites siguientes:

- 40 mm (recubrimientos vertical y horizontal)
- la dimensión horizontal de la vaina o grupo de vainas en contacto (recubrimientos vertical y horizontal).
- la mitad de la dimensión vertical de la vaina o grupo de vainas en contacto (recubrimiento horizontal).

En casos particulares, en atmósferas fuertemente agresivas, estos recubrimientos deberán aumentarse.

3.4.3 ACI-318-86

3.4.3.1 Protección de la armadura (Art. 7.7)

Tipo de exposición			Recubrimiento mínimo		
			Hormigón armado realizado "in situ"	Hormigón armado prefabricado	Hormigón pretensado
Hormigonado en el terreno y permanentemente expuesto a él			70	–	70
Expuesto al terreno o a la intemperie	Paneles de muro	$\emptyset > 36$	50	40	30
		$16 < \emptyset < 36$	50	20	30
		$\emptyset < 16$	40	20	30
	Placas, viguetas	$\emptyset > 36$	50	50	30
		$16 < \emptyset < 36$	50	40	30
		$\emptyset < 16$	40	30	30
	Otros elementos	$\emptyset > 36$	50	50	40
		$16 < \emptyset < 36$	50	40	40
		$\emptyset < 16$	40	30	40
No expuesto al terreno, ni a la intemperie	Placas, muros, viguetas	$\emptyset > 36$	40	30	20
		$\emptyset \leq 36$	20	15	20
	Vigas, pilares	Armadura principal	40	d_b (*)	40
		Tirantes, cercos, zunchos	40	10	20
	Placas curvas, láminas plegadas	$\emptyset > 16$	20	15	10
		$\emptyset < 16$	15	10	d_b (**)

(*) " d_b " representa el diámetro nominal de la barra. En este caso, el recubrimiento no debe ser menor de 15, ni mayor de 40 mm.

(**) " d_b " representa el diámetro nominal de la barra. En este caso, el recubrimiento no debe ser menor de 20 mm.

NOTAS:

- \emptyset representa el diámetro de la barra en mm.
- El diámetro de 16 mm corresponde al original # 15 y el de 36 mm al # 35, aunque los verdaderos diámetros nominales son 16,0 y 35,7 mm, respectivamente.

3.4.4 CP-110-72

3.4.4.1 Recubrimiento de las armaduras (Art. 3.11.2)

Ambiente	Recubrimiento normal (mm)				
	Resistencia del hormigón (N/mm ²)				
	20	25	30	40	50 ó más
Suave	25	20	15	15	15
Moderado	–	40	30	25	20
Severo	–	50	40	30	25
Muy severo	–	–	–	60	50
Sometido a fundentes	–	–	50(*)	40(*)	25

(*) Sólo es aplicable si se utilizan aireantes.

3.4.5 BAEL-83

3.4.5.1 Protección de la armadura (Art. A.7.1.)

Tipo de exposición	Recubrimiento (mm)
Obras marítimas, expuestas a nieblas espesas o salinas, así como obras expuestas a ambientes muy agresivos.	40
Elementos no revestidos sometidos a acciones agresivas.	30
Elementos a la intemperie, expuestos a la condensación o en contacto con un líquido.	20
Elementos situados en lugares cerrados y secos	10

3.4.6 BPEL-83

3.4.6.1 Recubrimiento para armaduras activas postesas (Art. A.10.2,23)

La distancia mínima "c" entre una vaina o grupo de vainas y el paramento debe ser mayor o igual que las siguientes cantidades:

- las tres cuartas partes de la dimensión horizontal del rectángulo circunscrito a la vaina o grupo de vainas.
- el diámetro.
- en obras normales, 40 mm.
- en obras expuestas a atmósferas agresivas, 50 mm.
- en obras interiores, 30 mm.

3.4.6.2 Recubrimiento para armaduras activas pretesas (Art. 10.3,3.)

Tipo de exposición	Recubrimiento (mm)
Paramentos revestidos en ambientes interiores y secos	10
Paramentos revestidos expuestos a la intemperie, susceptibles de estar expuestos a condensaciones o destinados a obras en contacto con líquidos.	30
Paramentos no revestidos en ambientes interiores y secos.	30
Paramentos no revestidos expuestos a la intemperie, susceptibles de estar expuestos a condensaciones o destinados a obras en contacto con líquidos.	40
Obras expuestas a una atmósfera agresiva	50

3.4.6.3 Recubrimiento de armaduras pasivas (Art. 10.4,2)

Tipo de exposición	Recubrimiento (mm)
Obras marítimas, expuestas al rocío del mar o a nieblas salinas, así como obras expuestas a ambientes muy agresivos.	40
Elementos no revestidos sometidos a acciones agresivas.	30
Elementos a la intemperie, expuestos a la condensación o en contacto con un líquido.	20
Elementos situados en lugares cerrados y secos.	10

3.4.7 DIN 1045-78

3.4.7.1 Recubrimientos mínimos para el hormigón armado, en función de las condiciones ambientales (Art. 13.2)

Condiciones ambientales	Recubrimiento (mm)				
	Hormigón "in situ" o prefabricado				Hormigón prefabricado en fábrica
	Resistencia = 15 N/mm ²		Resistencia \geq 25 N/mm ²		Resistencia \geq 35 N/mm ²
	Caso general	Estructuras planas	Caso general	Estructuras planas	
<ul style="list-style-type: none"> - Elementos en interiores - Elementos que están permanentemente secos o bajo el agua. - Cubiertas con revestimiento impermeable. 	20	15	15	10	10
<ul style="list-style-type: none"> - Elementos a la intemperie o donde el aire exterior tiene acceso constante. 	25	20	20	15	15
<ul style="list-style-type: none"> - Elementos en interiores, con frecuente aparición de valores muy altos de la humedad del aire, a temperaturas normales. - Elementos sometidos a repetidas saturaciones de humedad. 	30	25	25	20	20
<ul style="list-style-type: none"> - Elementos sometidos a acciones particularmente corrosivas. 	40	35	35	30	30

3.4.8 CODIGO-MODELO CEB-FIP-77

3.4.8.1 Recubrimiento mínimo (Art. 5.1)

Condiciones ambientales	Recubrimiento mínimo (mm)					
	Clases de hormigón					
	Resistencia entre 12 y 20 N/mm ²		Resistencia entre 25 y 35 N/mm ²		Resistencia entre 40 y 50 N/mm ²	
	Caso general	Losas, Láminas	Caso general	Losas, Láminas	Caso general	Losas, Láminas
Poco severas	20	15	15	15	15	15
Moderadamente severas	30	25	25	20	20	15
Severas	40	35	35	30	30	25

3.5 TIEMPO DE CURADO

3.5.1 EH-88. (Art. 20)

En los Comentarios a dicho Artículo, se dice:

"Como término medio, resulta conveniente prolongar el proceso de curado durante siete días, debiendo aumentarse este plazo cuando se utilicen ce-

mentos de endurecimiento lento o en ambientes secos y calurosos. Cuando las superficies de las piezas hayan de estar en contacto con aguas o filtraciones salinas, alcalinas o sulfatadas, es conveniente aumentar el citado plazo de siete días en un 50 por 100 por lo menos".

3.5.2 ACI-318-86 (Art. 5.5.)

"El hormigón (excepto si es de alta resistencia inicial) debe mantenerse por encima de los 10° C y mojado durante al menos 7 días después de su puesta en obra, excepto si se realiza un curado acelerado.

El hormigón de alta resistencia inicial, se mantendrá por encima de los 10° C y mojado durante al menos 3 días después de su puesta en obra, excepto si se realiza un curado acelerado".

3.5.3 CP-110-72 (Art. 6.11.6)

Condiciones en que se lleva a cabo el curado	Número mínimo de días		
	Tipo de cemento		
	– Bajo calor de hidratación – Supersulfatado	– Portland – Portland con escorias. – Resistente a los sulfatos.	– Rápido endurecimiento.
Ambiente húmedo o interior	No hay requisitos especiales		
Clima caluroso y vientos secos	7	4	2
Resto de los casos	4	2	1

3.5.4 DIN 1045-78 (Art. 10.3)

"En general, 7 días son suficientes para el curado. Sin embargo, en aquellos elementos hechos con un cemento de resistencia inferior a 25 N/mm², deberá prolongarse dicho período".

3.6 COMPARACION ENTRE LOS PRINCIPALES CODIGOS EXISTENTES

3.6.1 MAXIMA RELACION AGUA/CEMENTO

Al efectuar una revisión de las normas estudiadas (Tabla 3.1), se observa que este parámetro es, junto con el espesor del recubrimiento, uno de los más frecuentemente limitados para el hormigón armado por los diferentes códigos nacionales. Tan sólo la norma francesa no contempla esta limitación para la relación agua/cemento; mientras que, por el contrario, son el código norteamericano ACI y el Código-Modelo del CEB-FIP (Comite Eurointernacional del Hormigón-Federación Internacional del Pretensado), los que presentan una mayor casuística en relación con este parámetro.

Se observa además que los valores máximos de dicha relación agua/cemento cubren, en función del tipo de ambiente, un rango de valores entre 0,35 y 0,70: siendo el primer valor utilizado en el caso de ataque muy severo en el hormigón resistente a los sulfatos (CP-110-72), mientras que el segundo es utilizado, además de en ambientes interiores, en elementos de espesor considerable o en el caso que se empleen aireantes. El código ACI es, en general, el más exigente, oscilando sus limitaciones entre 0,40 y 0,50 (Fig. 3.2).

TABLA 3.1. VALOR MAXIMO DE LA RELACION AGUA/CEMENTO EN EL HORMIGON ARMADO, SEGUN LOS PRINCIPALES CODIGOS EXISTENTES

CRITERIO UTILIZADO PARA LA LIMITACION	DIFERENTES CASOS CONTEMPLADOS EN LOS CODIGOS EXISTENTES	CP-110-72 (PERU UNICO)	ACI-318-86 (ESTADOS UNIDOS)	DIN 1045-78 (R.F. ALEMANIA)	CODIGO MODELO CEB-FIP	pr ENV-206	EH-88 (ESPAÑA)
CASO GENERAL				0,75 (6.5.6.3.)			0,65 (24.4)
EN FUNCION DEL AMBIENTE	AMBIENTE INTERIOR				0,70 (d.3.4.3.2.)	0,65	0,65 (24.4)
	AMBIENTE EXTERIOR SECO Y NO AGRESIVO				0,65 (d.3.4.3.2.)	0,60	0,55 (24.4)
	AMBIENTE HUMEDO CON HELADA					0,55	0,55 (24.4)
	AMBIENTE SUAVEMENTE AGRESIVO	0,65 (6.3.3.)		0,60(x) (6.5.7.4.)	0,60(x) (d.3.5.3.)	0,55	0,55 (24.4)
	AMBIENTE HUMEDO CON HELADAS, EN PRESENCIA DE SALES FUNDENTES					0,50	0,50 (24.4)
	AMBIENTE MARINO, EN LAS ZONAS DE ROTURA DE OLAS CON O SIN HELADAS					0,50	0,50 (24.4)
	AMBIENTE MEDIANAMENTE AGRESIVO	0,55 (6.3.3.)				0,50	0,55 (24.4)
	AMBIENTE MUY AGRESIVO	0,45 (6.3.3.)		0,50(xx) (6.5.7.4.)	0,50(xx) (d.3.5.3.)	0,45	0,50 (24.4)
HORMIGON RESISTENTE A LA PENETRACION DEL AGUA	ELEMENTOS DE ESPESOR ENTRE 10 y 40 cm.			0,60 (6.5.7.2.)	0,50-0,60 (d.3.5.1.)		
	ELEMENTOS DE ESPESOR MAYOR DE 40 cm.			0,70 (6.5.7.2.)	0,60-0,70 (d.3.5.1.)		
	ELEMENTOS EXPUESTOS AL AGUA DULCE		0,50 (4.5.)				
	ELEMENTOS EXPUESTOS AL AGUA SALADA		0,45 (4.5.)				
HORMIGON RESISTENTE A LA HELADA	CASO GENERAL		0,50 (4.5.)	0,60 (6.5.7.3.)	0,60 (d.3.5.2.)		
	SI SE AÑADEN AIREANTES			0,70 (6.5.7.3.)	0,70 (d.3.5.2.)		
	SECCIONES DELGADAS		0,45 (4.5.)				
	EN PRESENCIA DE SALES FUNDENTES	0,55 (6.3.3.)	0,45 (4.5.)		0,50 (d.3.5.2.)		
	EN PRESENCIA DE SALES FUNDENTES Y AGUA SALOBRE O DE MAR		0,40 (4.5.)				
HORMIGON RESISTENTE A LOS SULFATOS	ATAQUE MODERADO	0,50-0,55 (6.3.3.)	0,50 (4.5.)				
	ATAQUE SEVERO	0,40-0,50 (6.3.3.)	0,45 (4.5.)				
	ATAQUE MUY SEVERO	0,35-0,45 (6.3.3.)	0,45 (4.5.)				

NOTA: EL ARTICULO DEL CODIGO CORRESPONDIENTE DONDE SE ENCUENTRA LA LIMITACION, SE INDICA ENTRE PARENTESIS.
(x) EN LAS NORMAS CORRESPONDIENTES, APARECE COMO "HORMIGON RESISTENTE A ATAQUES QUIMICOS SUAVES".
(xx) EN LAS NORMAS CORRESPONDIENTES, APARECE COMO "HORMIGON RESISTENTE A ATAQUES QUIMICOS FUERTES".

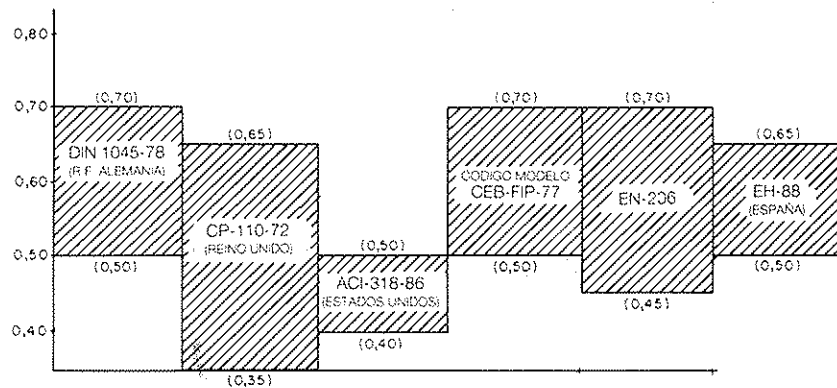


Fig. 3.2. MAXIMA RELACION AGUA/CEMENTO PARA EL HORMIGÓN ARMADO, SEGUN LAS DIFERENTES NORMAS

Para el hormigón pretensado, las limitaciones dadas por las normas CP-110-72, ACI-318-86 y Código-Modelo son las mismas que para el hormigón armado, mientras que la propuesta de la Euronorma pr ENV-206 tan sólo varía el caso de ambiente interior, en que para el hormigón pretensado se considera un valor máximo de 0,60.

3.6.2 CONTENIDO MINIMO DE CEMENTO

Es evidente que, de los códigos considerados, la norma inglesa CP-110-72 es la que limita el contenido de cemento para el hormigón armado en un mayor número de casos. No obstante, hay otras cuatro normas que contemplan también esta limitación. Son la norma alemana (DIN-1045-78), la española (EH-88), así como el Código-Modelo del CEB-FIP y la propuesta de Euronorma pr ENV-206.

Se observa, además, que la variación de los valores límites no es muy grande, especialmente en aquellos casos cuyo ambiente no sea muy severo (Tabla 3.2). Los valores más pequeños que se dan para el contenido mínimo de cemento en cada uno de los códigos estudiados se han representado en la Fig. 3.3.

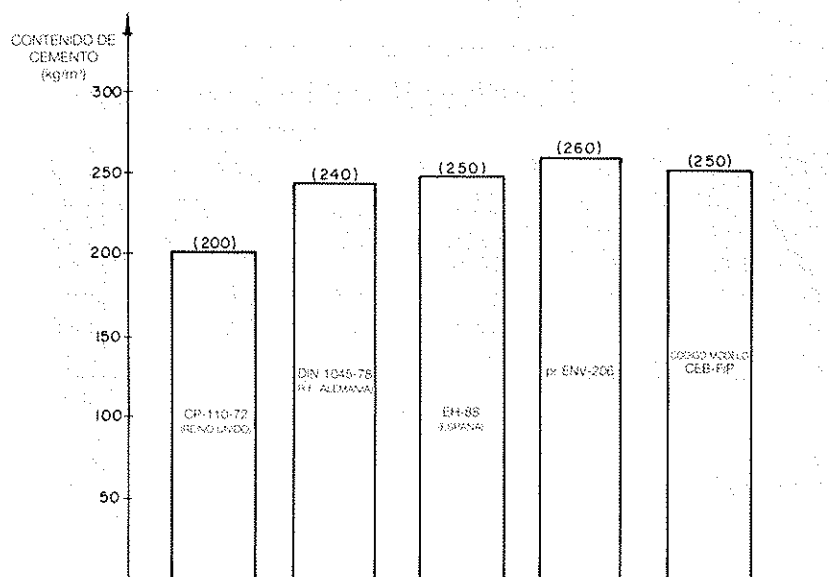


Fig. 3.3. CONTENIDO MINIMO DE CEMENTO EN EL HORMIGON ARMADO SEGUN LAS DIFERENTES NORMAS

TABLA 3.2. CONTENIDO MINIMO DE CEMENTO EN EL HORMIGON ARMADO, SEGUNDO LOS PRINCIPALES CODIGOS (en kg/m³)

CRITERIO UTILIZADO PARA LA LIMITACION	DIFERENTES CASOS CONTEMPLADOS EN LOS CODIGOS	CP-110-72 (REINO UNIDO)	DIN 1045-78 (R.F. ALEMANIA)	EH-88 (ESPAÑA)	pr ENV-206	CODIGO MODELO CEB-FIP
CASO GENERAL	HORMIGON LIGERAMENTE ARMADO					
	HORMIGON ARMADO					250 (d.3.4.3.2.)
	CON CEMENTO CUYA RESISTENCIA NO ES MENOR DE 35 N/mm ²		240 (6.6.5.1.)			
	CON CEMENTO CUYA RESISTENCIA ES DE 25 N/mm ²		280 (6.6.5.1.)			
EN FUNCION DEL AMBIENTE	AMBIENTE SUAVE	220-290 (6.3.3.)		250 (24.4)	260	
	AMBIENTE MODERADO	260-340 (6.3.3.)		275 (24.4)	280	
	AMBIENTE SEVERO	320-410 (6.3.3.)		300 (24.4)	300	
	AMBIENTE SUAVE, CON ESTRICTO CONTROL DE LA RELACION a/c	200-260 (6.3.3.)				
	AMBIENTE MODERADO, CON ESTRICTO CONTROL DE LA RELACION a/c	240-310 (6.3.3.)				
	AMBIENTE SEVERO, CON ESTRICTO CONTROL DE LA RELACION a/c	290-370 (6.3.3.)				
HORMIGON SOMETIDO AL ATAQUE DE LOS SULFATOS		240-420 (6.3.3.)		325 (24.4)		
HORMIGON SOMETIDO A CONGELACION	CON SALES FUNDENTES	260-340 (6.3.3.)				
	CON SALES FUNDENTES Y ESTRICTO CONTROL DE LA RELACION a/c	240-310 (6.3.3.)				

NOTA: EL ARTICULO DEL CODIGO CORRESPONDIENTE DONDE SE ENCUENTRA LA LIMITACION, SE INDICA ENTRE PARENTESIS. EN EL CASO DE LA CP-110-72, EL CONTENIDO MINIMO DE CEMENTO TOMA VALORES ENTRE LOS INDICADOS EN LA TABLA, EN FUNCION DEL TAMAÑO MAXIMO DEL ARIDO. LOS VALORES INDICADOS A LA IZQUIERDA, CORRESPONDEN A UN TAMAÑO MAXIMO DE ARIDO DE 10 mm.

En el caso de hormigón pretensado se observa que los valores límites son, en todos los casos, ligeramente superiores a los indicados para hormigón armado, excepto donde el ambiente es severo. En este caso, las limitaciones se mantienen prácticamente iguales con casi total independencia de que el hormigón sea armado o pretensado (Tabla 3.3).

3.6.3 ESPESOR MINIMO DEL RECUBRIMIENTO

Como ya se indicó anteriormente al comentar la relación agua/cemento, este parámetro es, sin duda, el contemplado en mayor número de normas. Esto es debido a la evidente influencia que el recubrimiento ejerce sobre la protección de las armaduras. No obstante, el rango de valores mínimos que pueden limitar el mencionado parámetro, es muy amplio según la norma que se considere. Como ilustración de lo anterior, basta señalar que en el caso de un ambiente químicamente agresivo, los límites del recubrimiento oscilan, para el hormigón armado, entre 20 y 70 mm (Tabla 3.4).

TABLA 3.3. CONTENIDO MINIMO DE CEMENTO EN EL HORMIGON PRETENSADO
SEGUN LOS PRINCIPALES CODIGOS (en kg/m³)

CRITERIO UTILIZADO PARA LA LIMITACION	DIFERENTES CASOS CONTEMPLADOS EN LOS CODIGOS	CP-110-72 (REINO UNIDO)	EP-80 (ESPAÑA)	CODIGO MODELO CEB-FIP	pr ENV-206
CASO GENERAL			250 (21)	270 (d.3.4.3.2.)	
EN FUNCION DEL AMBIENTE	AMBIENTE SUAVE	300 (6.3.3.)			280
	AMBIENTE MODERADO	300-340 (6.3.3.)			300
	AMBIENTE SEVERO	320-410 (6.3.3.)			300
	AMBIENTE SUAVE, CON ESTRICTO CONTROL DE LA RELACION a/c	300 (6.3.3.)			
	AMBIENTE MODERADO, CON ESTRICTO CONTROL DE LA RELACION a/c	300-310 (6.3.3.)			
	AMBIENTE SEVERO CON ESTRICTO CONTROL DE LA RELACION a/c	300-370 (6.3.3.)			
HORMIGON SOMETIDO AL ATAQUE DE LOS SULFATOS					
HORMIGON SOMETIDO A CONGELACION	CON SALES FUNDENTES	300-340 (6.3.3.)			
	CON SALES FUNDENTES Y ESTRICTO CONTROL DE LA RELACION a/c	300-310 (6.3.3.)			

NOTAS: EL ARTICULO DEL CODIGO CORRESPONDIENTE DONDE SE ENCUENTRA LA LIMITACION, SE INDICA ENTRE PARENTESIS. EN EL CASO DE LA CP-110-72, EL CONTENIDO MINIMO DE CEMENTO TOMA VALORES ENTRE LOS INDICADOS EN LA TABLA, EN FUNCION DEL TAMAÑO MAXIMO DE ARIDO.

TABLA 3.4. RECUBRIMIENTO MINIMO EN EL HORMIGON ARMADO
SEGUN LOS PRINCIPALES CODIGOS (en mm.)

CRITERIO UTILIZADO PARA LA LIMITACION	DIFERENTES CASOS CONTEMPLADOS EN LOS CODIGOS	CP-110-72 (REINO UNIDO)	ACI-318-86 (ESTADOS UNIDOS)	EH-88 (ESPAÑA)	DIN 1045-78 (R.F. ALEMANIA)	CODIGO MODELO CEB-FIP	BAEL-83 (FRANCIA)
EN FUNCION DEL AMBIENTE	AMBIENTE PROTEGIDO	25-15 (x) (3.11.2.)	40-15(xx) (7.7.1.)	20 (13.3.)	20-10 (+) (13.2.)	20-15 (+) (5.1.)	10 (A.7.1.)
	AMBIENTE A LA INTEMPERIE	40-20 (x) (3.11.2.)	50-40(xx) (7.7.1.)	30 (13.3.)	25-15 (+) (13.2.)	30-15 (+) (5.1.)	20 (A.7.1.)
	AMBIENTE QUIMICAMENTE AGRESIVO	50-25 (x) (3.11.2.)	70 (xx) (7.7.1.)	40 (13.3.)	30-20 (+) (13.2.)	40-25 (+) (5.1.)	30 (A.7.1.)
	AMBIENTE MUY AGRESIVO	60-50 (x)			40-30 (+) (13.2.)	40	40 (A.7.1.)
HORMIGON SOMETIDO A SALES FUNDENTES		50-25 (x) (3.11.2.)					

NOTAS: EL ARTICULO DEL CODIGO CORRESPONDIENTE DONDE SE ENCUENTRA LA LIMITACION, SE INDICA ENTRE PARENTESIS.
(x) EL RECUBRIMIENTO TIENE UN VALOR COMPRENDIDO ENTRE LOS DOS INDICADOS, EN FUNCION DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGON.
(xx) IDEM, EN FUNCION DEL TIPO DE ELEMENTO ESTRUCTURAL Y DEL DIAMETRO DE LA ARMADURA.
(+) IDEM, EN FUNCION DEL TIPO DE ELEMENTO ESTRUCTURAL Y DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGON.

También en este caso es el Código americano ACI el más exigente, junto con la CP-110-72 inglesa. En la figura 3.4. se han representado el intervalo entre el mayor y el menor valor de la limitación del recubrimiento mínimo en el hormigón armado, según los principales códigos.

En el caso del hormigón pretensado, las limitaciones son las mismas que para el hormigón armado en cuatro de las normas: ACI-318-86, CP-110-72, Código-Modelo CEB-FIP-77 y pr ENV-206. Sin embargo, Francia y España sí tienen unas normas específicas para hormigón pretensado: la BPEL-83 y la EP-80, respectivamente. En estas normas se distingue, para limitar el recubrimiento, entre armaduras pasivas y activas y, en estas últimas, se hace lo mismo entre armaduras pretensas y postesas: siendo estas últimas las que, en general, presentan valores más elevados de las limitaciones.

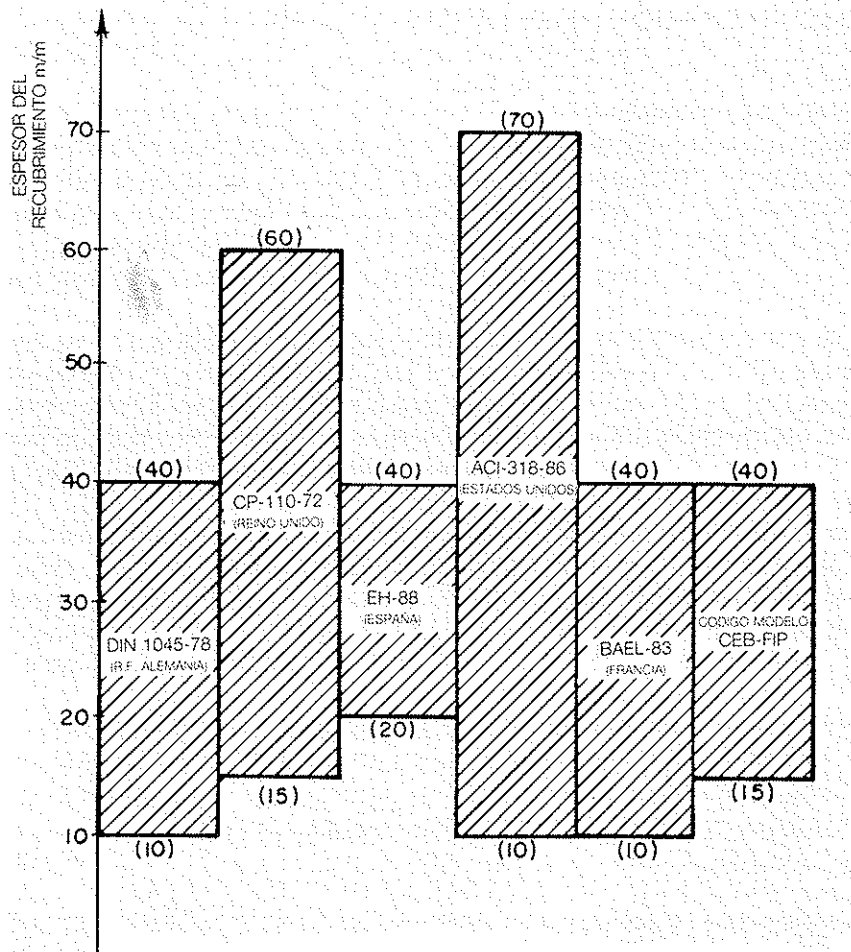


Fig. 3.4. RANGO DE VALORES DEL RECUBRIMIENTO MINIMO DEL HORMIGON ARMADO, SEGUN LAS DIFERENTES NORMAS (en mm)

PROCEDIMIENTOS DIRECTOS DE CONTROL DE LA DURABILIDAD DEL HORMIGÓN: MEDIDA Y CONTROL DE LA PERMEABILIDAD

4.1 INTRODUCCION. CLASES DE PERMEABILIDAD

Los agentes agresivos que disminuyen la durabilidad del hormigón se introducen en éste utilizando la parte de su estructura interna de poros que esta conectada con el exterior. Esta es la razón, como ya se ha indicado, de la gran importancia de la porosidad en relación con un posible control de la durabilidad. Por otro lado, es claro que el grado de agresión estará en función del tipo de agente del que se trate. Esto origina que tampoco se puede hablar de la permeabilidad como término general que define la calidad de un determinado hormigón. Hay siempre que referirlo al tipo de agente del que se trate; o al menos, al elemento en el que está disuelto dicho agente. Así, se puede distinguir entre permeabilidad al agua, al aire, al vapor de agua, a iones, etc. A continuación, se harán algunas consideraciones sobre estos conceptos.

La permeabilidad al agua de un hormigón depende fundamentalmente de las permeabilidades de cada uno de los componentes que lo forman (áridos y pasta de cemento). No obstante, como los áridos están rodeados de pasta de cemento, esto hace que la permeabilidad del hormigón sometido a una presión hidrostática esté, fundamentalmente, en relación con la correspondiente permeabilidad de la pasta de cemento.

Siempre que el árido no sea poroso, el agua que pasa a través del hormigón puede hacerlo en su totalidad por la pasta de cemento, con lo que es independiente de la porosidad o permeabilidad de los áridos. En consecuencia, como norma general, se puede afirmar que si la pasta de cemento es poco permeable, el hormigón también lo será.

La permeabilidad al agua del cemento endurecido es fundamentalmente función de la porosidad capilar de la pasta, y ésta a su vez lo es de la relación agua/cemento y de la duración del período de curado: por lo que estas dos variables son muy importantes a la hora de controlar la posible durabilidad del hormigón.

En relación con la permeabilidad al aire, se puede considerar la filtración de aire como el movimiento incontrolado del mismo a través de las paredes de una estructura, que ocurre como resultado de una diferencia de presión provocada por diferentes causas, como puede ser el viento o efectos de chimenea.

Esta permeabilidad al aire toma un interés primordial en algunas aplicaciones del hormigón como, por ejemplo, su utilización en centrales nucleares, ya que cierto número de elementos radiactivos son gaseosos o pueden mezclarse con el aire, por lo que es conveniente exigir una elevada impermeabilidad del hormigón para evitar que, en el caso de un posible accidente, la dosis de radiación supere los valores que se aceptan como seguros.

Mención especial merece el caso de la permeabilidad al vapor de agua ya que, aunque éste se encuentra disuelto en el aire, no tiene por qué seguir siempre los mismos mecanismos de filtración a través del hormigón. El vapor de agua ejerce su propia presión de vapor, y por lo tanto puede difundirse en el hormigón independientemente de cómo lo haga el aire con el cual está mezclado. Sin embargo, si el aire sufre un movimiento súbito, una elevación o una disminución de la temperatura, el vapor de agua y el aire son similarmente afectados: por lo que en este caso, es frecuente que se considere a ambos como partes de una mezcla aire-vapor.

Además, es necesario citar aquí la permeabilidad a los iones, sobre todo a los cloruros, debido a la gran importancia que tienen en los procesos de corrosión de las armaduras, tal y como se indicó en el capítulo primero. Este fenómeno se produce siempre que existe una diferencia en la concentración de los iones entre dos zonas del elemento de hormigón.

Por último, hay que advertir que en este apartado se ha utilizado indistintamente el término "permeabilidad" tanto en relación con el agua o el aire, como en relación con el vapor de agua e iones. Ya se ha mencionado anteriormente (apartado 2.3.) la diferencia existente entre los conceptos de difusión y permeabilidad: por lo que en el caso del vapor de agua y de los iones la utilización del segundo término es inadecuada, pues el fenómeno no viene producido por la existencia de un gradiente de presión, sino por una diferencia de concentraciones. La justificación de su uso en este apartado viene dada por la frecuencia en que dichas expresiones aparecen en la bibliografía sobre el tema.

4.2 INFLUENCIA DE DIVERSOS FACTORES SOBRE LA PERMEABILIDAD

La permeabilidad de un hormigón, tanto al agua como al aire, está relacionada con la estructura interna de éste, y en particular, con su porosidad permeable. En consecuencia y como primera aproximación, se puede afirmar que, en general, sobre el carácter impermeable de un hormigón influyen todos aquellos factores que colaboran para conseguir una porosidad permeable que sea lo menor posible.

Por lo tanto, al igual que ocurría con la porosidad, todos los procesos que se siguen hasta la puesta en servicio del hormigón tendrán una mayor o menor influencia sobre la permeabilidad del mismo.

Las diversas técnicas de ensayo pueden clasificarse en función del mecanismo de transporte con el que están relacionadas. Así, se tendrá:

- Absorción de agua.
- Permeabilidad a líquidos o gases, provocada por un gradiente de presión.
- Difusión de gases, vapor de agua o iones.

En las primeras se mide, para un tiempo y unas condiciones específicas de inmersión, el volumen de huecos que han sido llenados total o parcialmente. No dan una medida de la permeabilidad real, pero son relativamente simples y rápidas, por lo que pueden tenerse en cuenta como método para estimar la permeabilidad del hormigón.

Con los ensayos de permeabilidad propiamente dichos se proporciona un medio para evaluar la permeabilidad real. En todos ellos existe una condición básica, que es el sellado de la muestra en todas las caras, excepto aquellas dos entre las cuales el flujo va a ser provocado mediante un gradiente de presión. Son difíciles de realizar en aquellos hormigones que sean muy impermeables, ya que se necesitarán unos valores muy altos de la presión.

Finalmente, los ensayos de difusión, aun cuando no se refieren a la permeabilidad en su sentido estricto, tienen un mecanismo de transporte que es de particular importancia en la duración de la vida de servicio de una estructura, por lo que es necesario tenerlo en consideración.

Son muchos los autores que han estudiado la influencia de estos factores, aunque los resultados no siempre son coincidentes. A continuación, se harán algunos comentarios sobre la repercusión que en la permeabilidad de un hormigón puede tener la dosificación, el curado, la puesta en obra, etc.

4.2.1 INFLUENCIA DE LA DOSIFICACION

Si existe algún factor que sea determinante en la condición de impermeabilidad de un hormigón, es –junto con el curado– la dosificación elegida para el mismo y, en particular, su relación agua/cemento.

Sobre este punto, una de las cuestiones que más se ha perseguido resolver ha sido la determinación de un valor de la relación agua/cemento que asegure una buena impermeabilidad del hormigón. La consulta de la bibliografía existente confirma que existe un intervalo, entre 0,40 y 0,60, para el cual la práctica totalidad de los autores aseguran que se obtiene el máximo de impermeabilidad a igualdad del resto de los factores. Así, Schiessl afirma que precisamente si la relación agua/cemento excede del valor 0,6, la permeabilidad aumenta considerablemente debido al incremento de la porosidad capilar. Otros autores reducen este intervalo y se centran alrededor de ciertos valores. Este es el caso de Martialay, que en sus conclusiones obtiene que la cantidad de agua debe ser la mínima compatible con su trabajabilidad. Para un hormigón vibrado con granulometría continua, la relación agua/cemento comprendida entre 0,42 y 0,47 permite obtener un hormigón lo más impermeable posible. Este mismo autor, intentando obtener una expresión analítica que permitiera representar adecuadamente el fenómeno, llegó a la conclusión de que para una relación agua/cemento de $0,52 \pm 0,01$ la permeabilidad del hormigón se puede considerar que es independiente de su granulometría.

Por otra parte, al aumentar el contenido de cemento se aumentará la capacidad de fijación por el hormigón tanto del anhídrido carbónico como de los iones cloruro. Sin embargo, dentro de los valores normales del contenido de cemento, la profundidad de penetración de la carbonatación y de los cloruros tiene un alcance considerablemente menor, en su influencia, que la relación agua/cemento, el curado y la calidad de compactación. No obstante, la cantidad de cemento es importante no sólo en relación con la trabajabilidad, sino también debido a su influencia en la sensibilidad al curado del hormigón. En consecuencia, el contenido de cemento no debe ser menor de 300 kg/m^3 , siempre que la relación agua/cemento se mantenga por debajo de 0,6. El contenido de cemento adecuado para la máxima impermeabilidad del hormigón según el tamaño máximo del árido está dado por la Tabla 4.1.

TABLA 4.1

Tamaño máximo del árido (mm)	Contenido de cemento (kg/m^3)
20 á 25	307 335

Pero, en relación con el cemento, no es suficiente con limitar su contenido, sino que es importante tener en cuenta qué tipo de cemento se está utilizando, pues ello puede provocar distintos comportamientos en el hormigón. Esto resulta evidente si se considera, por ejemplo, que un cemento que contenga algún tipo de adición, como pueden ser las cenizas volantes, resulta mucho más sensible al curado que un cemento Portland normal, por lo que se verá afectada su impermeabilidad, dada la gran importancia que sobre ésta tiene la realización de un curado adecuado.

La fig. 4.1. muestra los efectos de la adición de cenizas volantes sobre la permeabilidad al aire del hormigón. En el caso de un curado en agua durante un período de 28 días, el valor del coeficiente de permeabilidad de un hormigón en un contenido de cenizas volantes inferior al 20% es práctica-

mente el mismo que si no contienen dicha adición. Sin embargo, si dicho contenido es superior al 30%, el coeficiente de permeabilidad es notablemente superior en el hormigón con cenizas. Por otro lado, en el caso de que el período de curado se prolongara durante 91 días, el coeficiente de permeabilidad es menor en el hormigón con adición, e independiente del contenido de cenizas volantes.

Es importante mencionar la gran importancia que tiene la proporción en la que se lleva a cabo el reemplazamiento del cemento por cenizas volantes. En la figura 4.1. se observa que, para proporciones inferiores al 20%, el coeficiente de permeabilidad es menor que si no se hubiera llevado a cabo el reemplazamiento, mientras que por encima de dicho 20%, el efecto es el contrario y el coeficiente de permeabilidad es mayor.

Ahora bien, si la adición fuera de polvo de sílice, el coeficiente de permeabilidad al aire decrecería al aumentar el contenido de dicha adición, con independencia de cuál fuera la duración del período de curado (Fig. 4.2). Esta variación respecto al caso anterior (donde se consideraba la influencia de las cenizas volantes), se puede explicar por la mayor actividad puzolánica que tiene el polvo de sílice.

En relación con la influencia que la utilización de aditivos puede tener sobre la impermeabilidad del hormigón, se puede afirmar que, en general, hay tres tipos de aditivos que la mejoran sensiblemente: los plastificantes, los aireantes y los impermeabilizantes.

La utilización de un aditivo químico plastificante reduce la profundidad de penetración del agua, especialmente en aquellos hormigones cuya calidad es baja.

En la fig. 4.3. se observa que esta reducción es mayor para aquellos hormigones que tienen menor resistencia a compresión, siendo del orden de un 10% si la resistencia es de 25 N/mm².

Los aireantes producen la interrupción de la red capilar de la pasta de cemento, mediante la introducción de pequeños huecos esféricos que actúan como cámaras de expansión y disminuyen el flujo líquido existente en la red

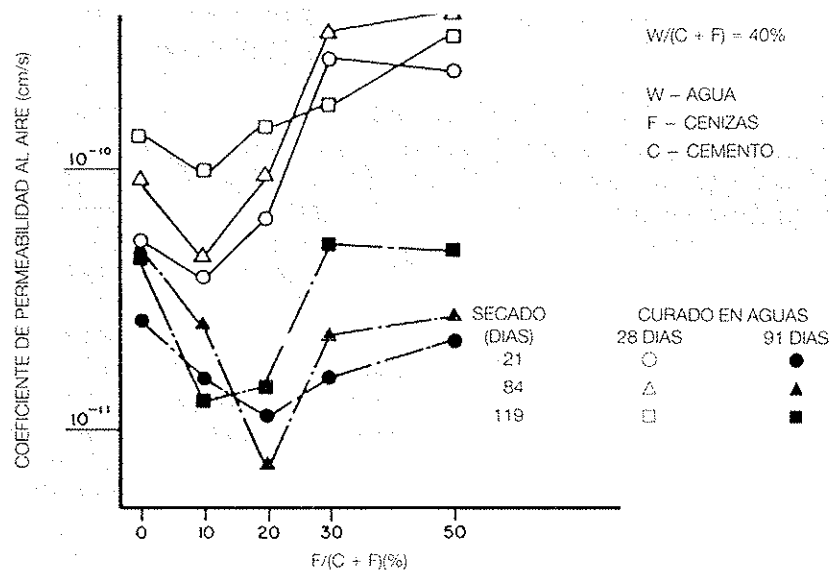


Fig. 4.1. EFECTOS DEL REEMPLAZAMIENTO DEL CEMENTO CON CENIZAS VOLANTES SOBRE LA PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGÓN

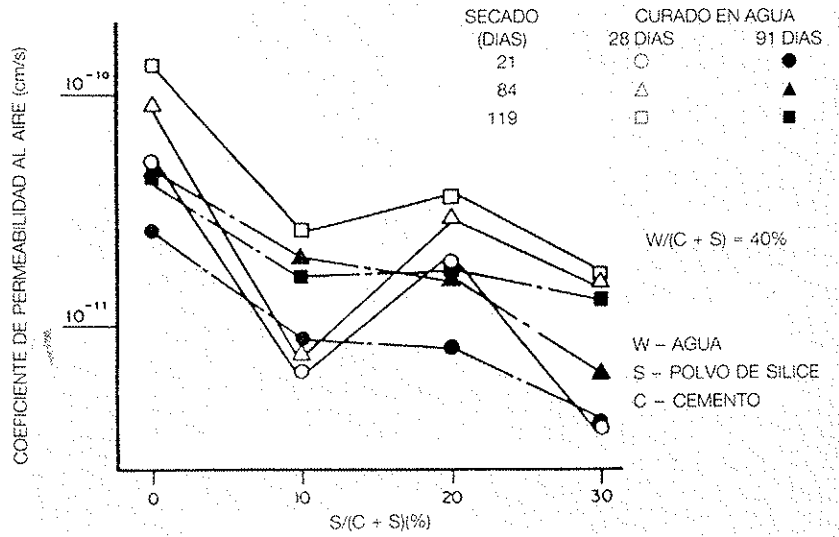


Fig. 4.2. EFECTOS DEL REEMPLAZAMIENTO DEL CEMENTO CON POLVO DE SILICE SOBRE LA PERMEABILIDAD AL AIRE

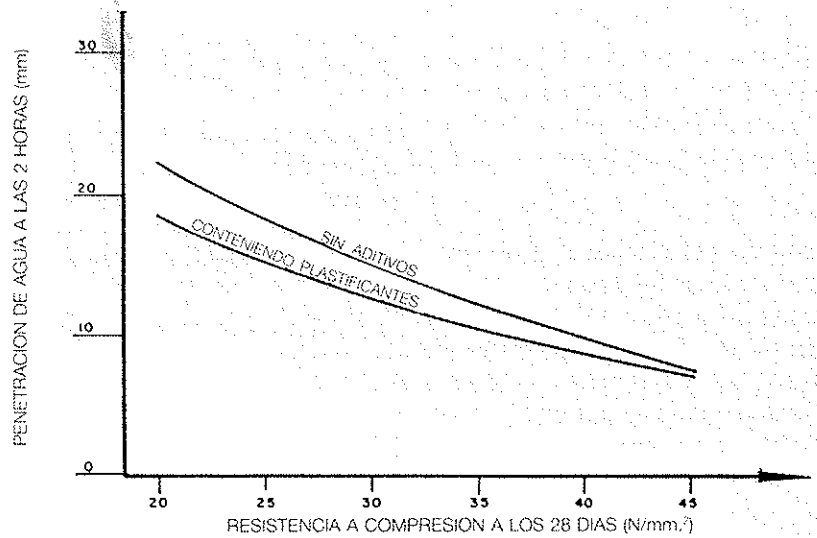


Fig. 4.3. EFECTOS DE LOS PLASTIFICANTES EN LA PENETRACION DE AGUA

capilar. Sin embargo, si se estudia la permeabilidad al aire el efecto es el contrario, pues los huecos de aire provocados por el aditivo forman parte del paso utilizado por el aire en su movimiento, con lo que se facilita éste. (Fig. 4.4).

4.2.2 INFLUENCIA DE LA PUESTA EN OBRA Y CURADO DEL HORMIGON

Aunque anteriormente se haya indicado que la relación agua/cemento y el curado son factores importantes que hay que controlar para la obtención de un hormigón lo más impermeable posible, ello no debe, en ningún momento, llevar a la idea de que los demás factores no tienen importancia. La realidad es precisamente la contraria. Tan sólo si se parte de una adecuada puesta en obra, compactación, etc., será cuando los otros dos factores indicados jueguen un papel importante para asegurar la impermeabilidad máxima. Un hormigón que, por ejemplo, haya sido mal compactado es

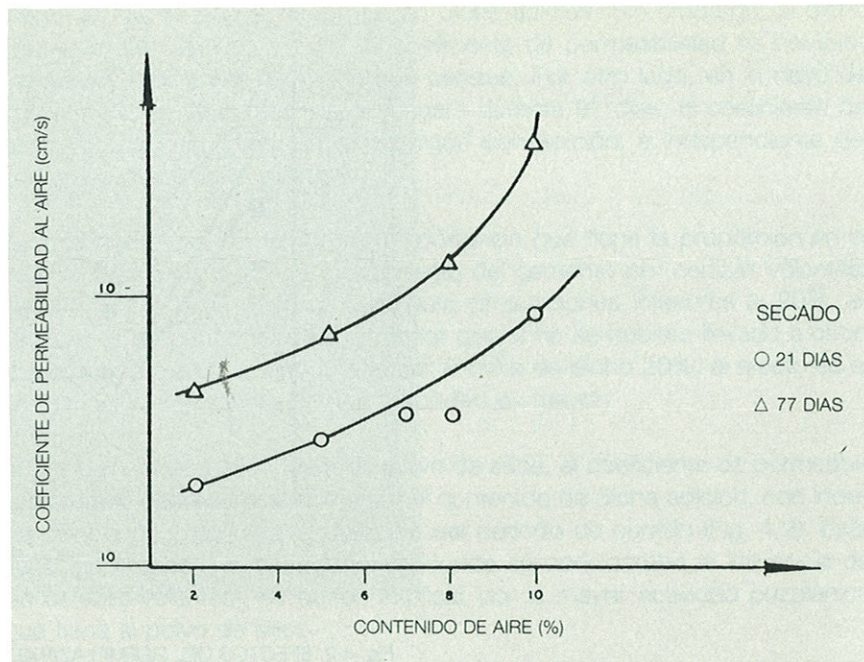


Fig. 4.4. EFECTOS DEL CONTENIDO DE AIRE SOBRE LA PERMEABILIDAD AL AIRE

imposible que tenga la adecuada impermeabilidad, aun en el caso de que el resto de los factores sean los óptimos para conseguirla.

Un parámetro que puede mejorar notablemente el carácter impermeable de un hormigón es la temperatura a la que se realiza el hormigonado. En obras de hormigón en masa, si se logra mantener en valores bajos la temperatura de hormigonado, no sólo mejora la resistencia a largo plazo, sino que se consiguen notables mejoras en la impermeabilidad del hormigón (Tabla 4.2).

TABLA 4.2. Efecto de la temperatura de hormigonado sobre la permeabilidad

Temperatura de hormigonado (° C)	Asiento en Cono (cm)	Coeficiente de difusión (10 ⁻⁴ cm ² /s)	
		14 días	12 meses
5,5	12	77,5	2,6
21,0	9,5	61,3	3,1
29,5	9	42,7	3,5

Una vez puesto en obra el hormigón, se puede producir una pérdida de agua a través de sus superficies, lo que puede tener efectos significativos y perjudiciales sobre su permeabilidad. Estos efectos pueden manifestarse en forma de fisuras o superficies de rotura frágil. Esto no siempre es así, pero si la pérdida de agua es acusada se produce invariablemente un aumento de la permeabilidad, que provocará que el hormigón sea poco durable (Fig. 4.5).

Cuando el hormigón se ha endurecido la superficie puede continuar perdiendo agua, aunque de forma más lenta. El grave problema que puede presentarse ahora es la interrupción prematura del proceso de hidratación del cemento. Hay que tener en cuenta que una permeabilidad baja del hor-

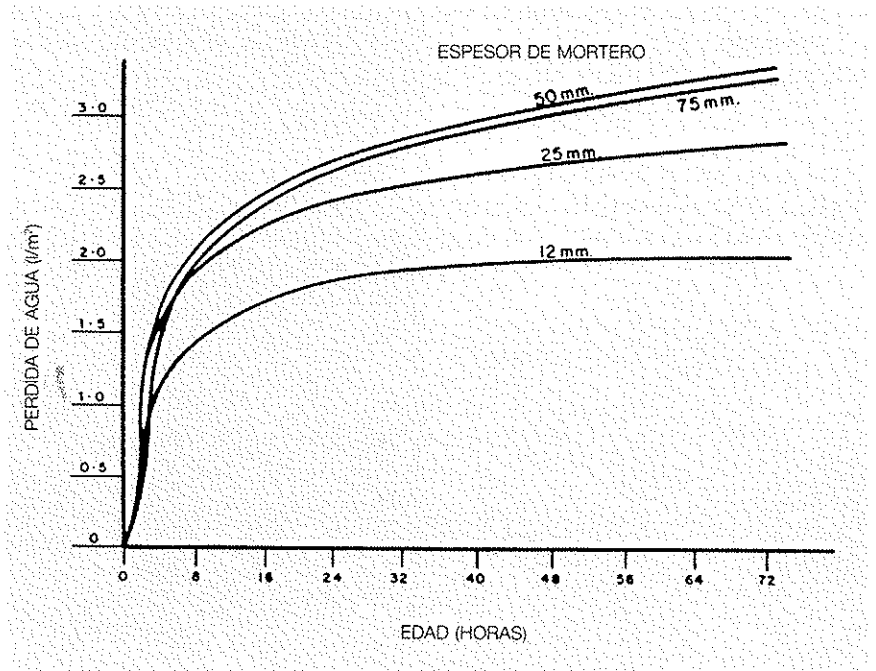


Fig. 4.5. RELACION ENTRE LA EDAD Y LA PERDIDA DE AGUA

migón sólo se podrá conseguir si la hidratación del cemento ha continuado hasta el momento en que los capilares del gel de cemento han sido bloqueados. Para que esto ocurra, y con una relación agua/cemento comprendida entre 0,45 y 0,60 considerase necesario un periodo de curado de al menos 14 días.

4.3 ENSAYOS PARA LA MEDIDA DE LA PERMEABILIDAD Y ABSORCION DEL HORMIGON

Los métodos de ensayo para la evaluación de la permeabilidad del hormigón deben estar siempre referidos a muestras o probetas tomadas "in situ". Las condiciones de laboratorio, tanto en la elaboración como en la conservación de probetas de hormigón, difieren notablemente de las que, en realidad, existen en obra. Esto hace que, al tratar de medir valores de carácter tan práctico como con los relacionados con la durabilidad de un determinado hormigón, no tenga sentido hablar de ensayos de laboratorio. Tan sólo, pues, hay dos grupos de ensayos:

- Ensayos "in situ"
- Ensayos en laboratorio de muestras tomadas "in situ".

La elección de un determinado método de ensayo debe hacerse siempre considerando cuál es el que mejor reproduce las acciones del mecanismo que, en obra, va a ser la causa del deterioro del hormigón. Como ejemplo, la Fig. 4.6 identifica los mecanismos actuantes en las diferentes zonas de una estructura construída en el mar, a la vista de la cual puede hacerse la selección de los métodos de ensayo más adecuados.

4.3.1 ENSAYOS "IN SITU"

La característica fundamental de este tipo de ensayos es su aptitud de ser llevados a cabo en las condiciones del lugar donde esté emplazada una determinada obra, lo que no impide que puedan utilizarse en laboratorio para ensayar muestras tomadas del elemento estructural cuya durabilidad se pretende estudiar.

Normalmente, consisten en ensayos llevados a cabo sobre la superficie del hormigón (por ejemplo, el ISAT), o en taladros de pequeñas dimensiones (por ejemplo, el de Figg).

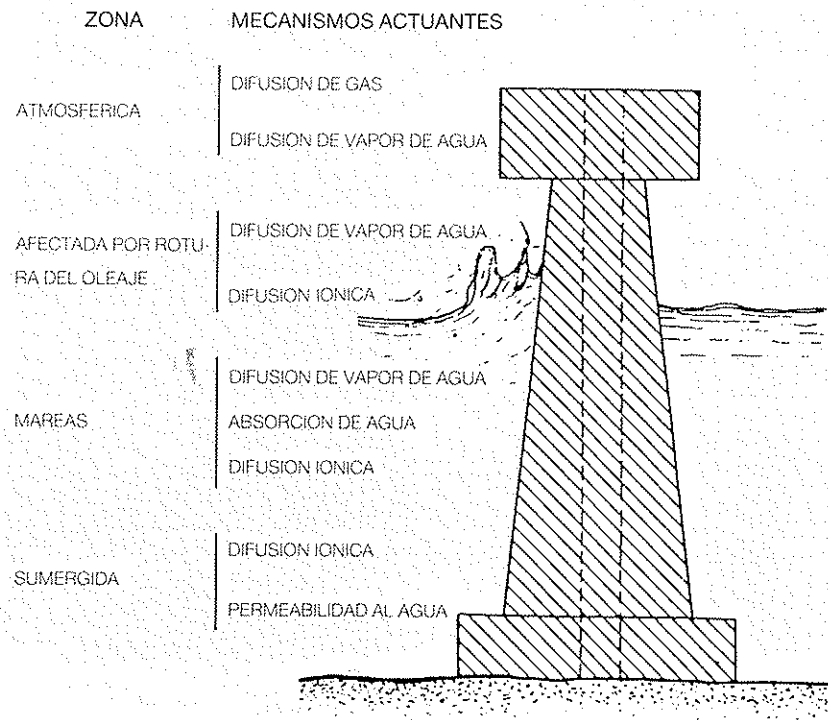


Fig. 4.6. MECANISMOS ACTUANTES EN CADA ZONA DE EXPOSICION DE UNA ESTRUCTURA

Este tipo de ensayos es afectado por ciertos factores de difícil control, como pueden ser la humedad inicial del hormigón, su estado superficial y las condiciones climáticas durante el ensayo: lo que supone un inconveniente, sobre todo a la hora de comparar resultados obtenidos en diferentes ensayos. Sería por lo tanto muy conveniente poder efectuar correcciones sobre los resultados en función de estos factores, en especial de la humedad.

Estos ensayos no distorsionan las superficies del hormigón que se va a ensayar, en contraste con los desperfectos que se originan en un elemento estructural por la extracción de testigos para su posterior estudio en laboratorio.

Hay que hacer notar que la mayoría de estos métodos no dan como resultado un valor de permeabilidad real, sino lo que se podrían llamar "índices de permeabilidad". Más adelante se verá que, por ejemplo, en el ensayo ISAT se mide el desplazamiento de un menisco, mientras que en el de Figg se miden tiempos.

4.3.1.1 Ensayo de absorción superficial inicial (ISAT)

Este método de ensayo mide la proporción en que el agua es absorbida por una superficie de un elemento de hormigón. En ningún caso debe pensarse en él como un ensayo para medir la permeabilidad de toda la masa de hormigón.

No obstante, al ser una medida de las propiedades de la superficie, es muy interesante en relación con algunos criterios de comportamiento del hormigón, como puede ser la corrosión de las armaduras, la resistencia a la congelación o la meteorización del hormigón.

El procedimiento de ensayo se recoge en la Norma británica BS 1881: Parte 5: 1970. "Methods of testing hardened concrete for other than strength. Test for determining the initial surface absorption of concrete".

En el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas del M.O.P.U. se ha desarrollado un equipo para llevar a cabo este ensayo. Para ello, se siguieron las especificaciones indicadas en la mencionada norma (Fig. 4.7).

Para realizar el ensayo, se procede en primer lugar a la colocación en la cámara del producto de sellado que se utilice, procurando evitar cualquier fallo en el contacto entre éste y el plástico de la cámara que posteriormente pueda ser origen de posibles fugas. (Fig. 4.8).

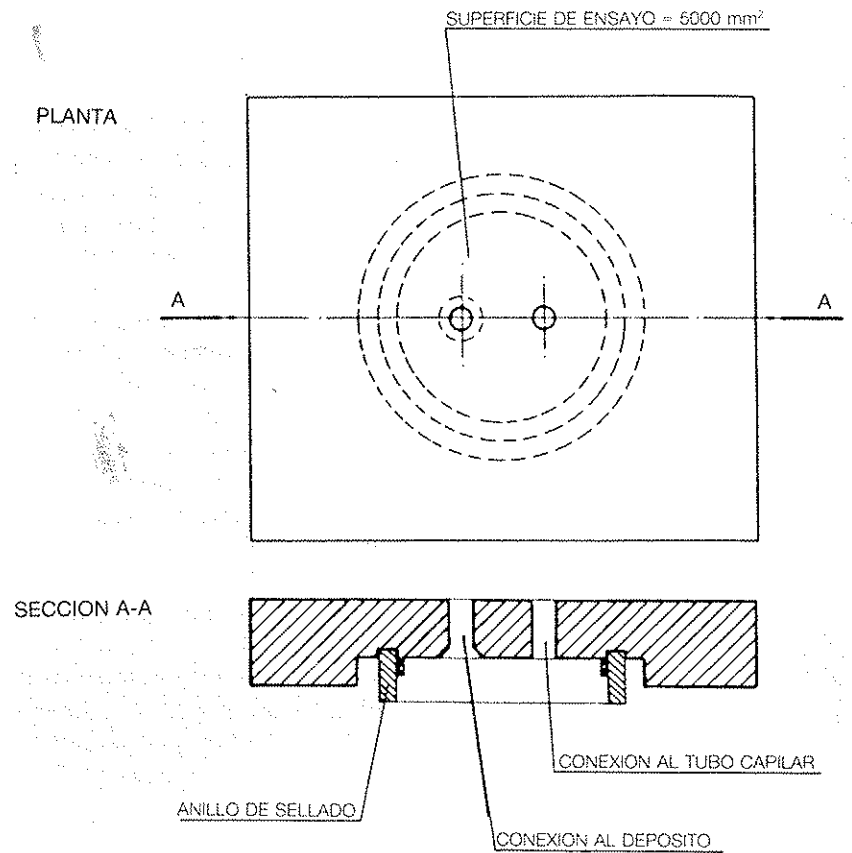


Fig. 4.7. ENSAYO ISAT. CAMARA DE ENSAYO

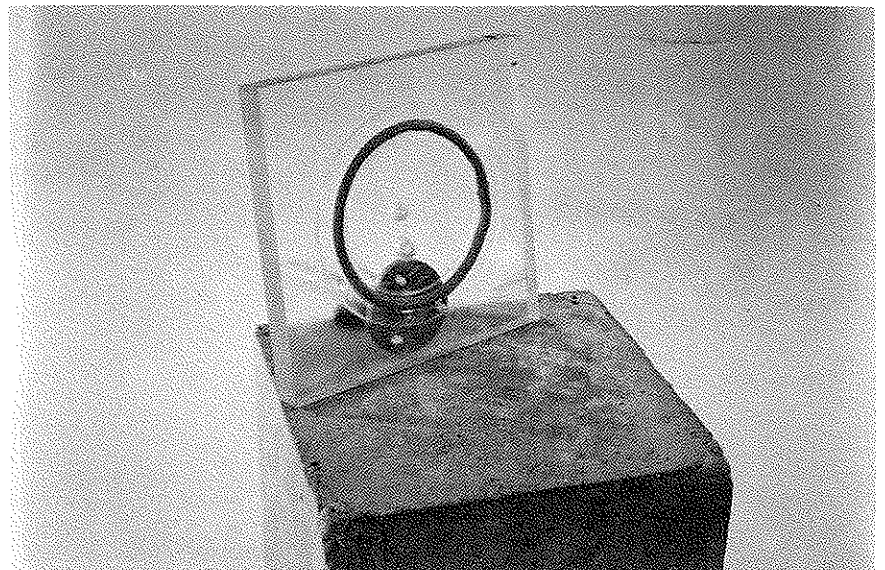


Fig. 4.8. METODO I.S.A.T. CAMARA DE ENSAYO Y JUNTA DE SELLADO

A continuación se procede a la colocación por presión de la cámara sobre la superficie del hormigón a ensayar. Se comprobará asimismo la buena adherencia entre ésta y el producto de sellado.

Una vez realizadas las operaciones anteriores se coloca el depósito, de tal manera que cuando se llene, la carga aplicada sobre la superficie del hormigón a ensayar sea de 200 ± 20 mm. En el caso de superficies no horizontales, la carga de agua será la altura media de la cámara.

El tubo capilar se coloca de tal manera que pueda ser fijado horizontalmente al mismo nivel que la superficie del agua del depósito, para que así el extremo abierto del capilar pueda ser elevado y evitar el derrame de agua entre los diversos tiempos de lectura.

En la norma se indica que, para ensayos realizados en laboratorio, la temperatura del agua debe mantenerse a $20 \pm 2^\circ$ C. Para ensayos "in situ" entiende que no pueden establecerse límites, pero advierte que deben tomarse precauciones para evitar fluctuaciones en la temperatura del agua, y recomienda que ésta no supere los 22° C en ningún caso.

Para comenzar el ensayo, se cierra la llave del depósito y se llena éste con agua. Una vez hecho esto se anota la hora de comienzo del ensayo, se abre la llave y se pone en marcha el cronómetro.

Al abrir la llave del depósito el agua alcanza la cámara, llenándola y saliendo por el tubo de conexión con el capilar. Se debe procurar que durante todo este proceso el depósito no se vacíe y que no queden restos de aire atrapado. En caso contrario, se deben eliminar completamente las posibles burbujas. Al finalizar este proceso se rellena el depósito para mantener la carga específica de agua. Fig. 4.9.

Las lecturas se toman después de intervalos de 10 minutos, 30 minutos y 1 hora desde el comienzo del ensayo. Para la realización de los mismos se anota el desplazamiento que, durante 1 minuto tiene el menisco en el interior del capilar. Los resultados se expresan en m/m^2 seg.

Al realizar el ensayo "in situ", se suelen limitar los resultados a los obtenidos a los 10 minutos, con objeto de favorecer así que se realice el mayor número posible de ensayos.

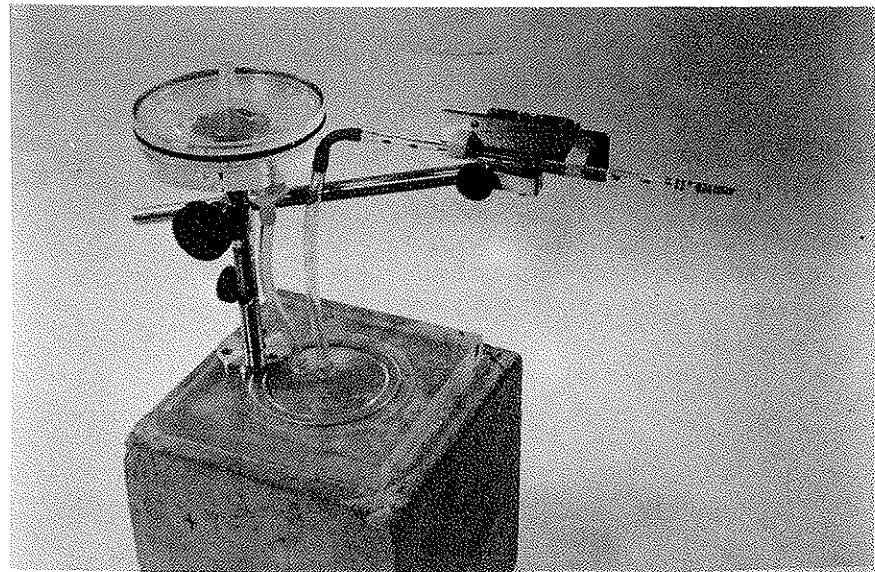


Fig. 4.9. METODO I.S.A.T. VISTA GENERAL DEL ENSAYO

Los resultados, como ya se ha indicado, no representan directamente la permeabilidad del hormigón, por lo que no puede realizarse una comparación directa entre ellos y los obtenidos por otros métodos. En consecuencia, la interpretación y utilización práctica de dichos resultados sólo es posible por comparación con los obtenidos en un hormigón de comportamiento conocido.

4.3.1.2 Métodos de Figg

Estos métodos de ensayo permiten medir la permeabilidad en la zona de recubrimiento del hormigón, mediante métodos parcialmente destructivos.

En un principio se desarrollaron y utilizaron sobre probetas de laboratorio, aunque posteriormente se han realizado varias experiencias "in situ" como, por ejemplo, con motivo de estudios sobre la resistencia del hormigón a los sulfatos.

Se basan en la variación del tiempo necesario para que se produzca una determinada variación de la presión de aire o de un volumen de agua. Es posible que a partir de estos datos se puedan obtener valores de la permeabilidad real, pero no existe ninguna referencia de que ésto hay sido conseguido hasta la fecha.

En el trabajo original de Figg se proponen dos métodos: uno para la permeabilidad al agua y otro para la permeabilidad al aire. En ambos casos se realiza un orificio en el hormigón, de 5,5 mm de diámetro y 30 mm de profundidad. Una vez limpiado dicho orificio, se coloca un tapón de poliéster y se sella con silicona. El equipo de ensayo varía ligeramente según se trate de estudiar la permeabilidad al agua (Fig. 4.10) o al aire (Fig. 4.11). En el

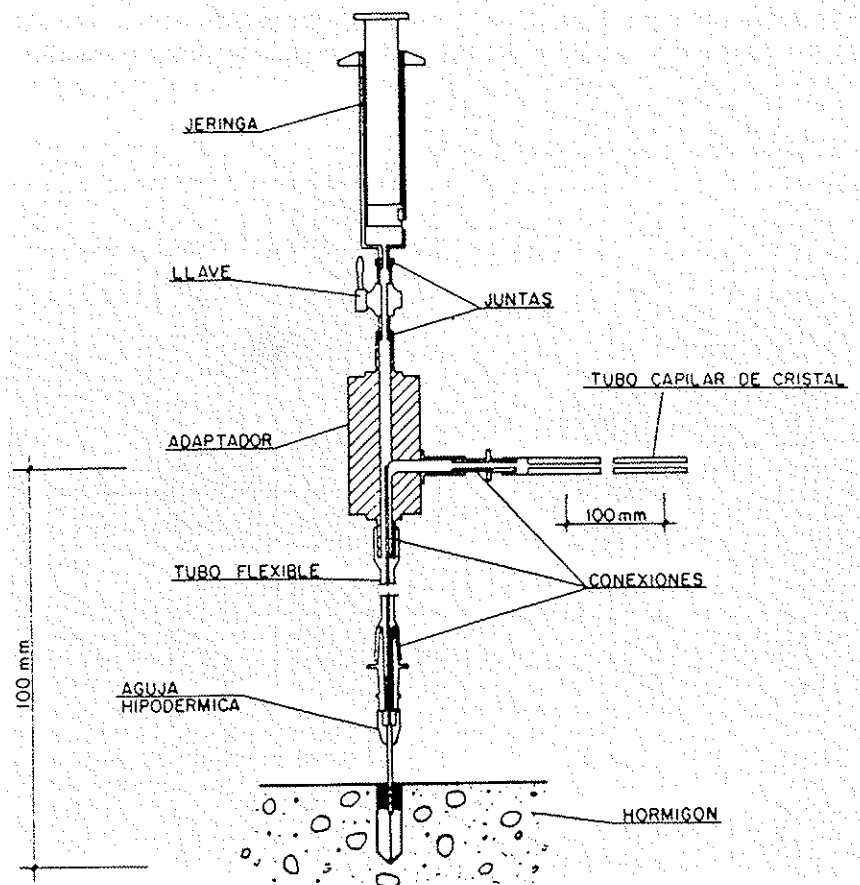


Fig. 4.10. EQUIPO DE FIGG PARA LA PERMEABILIDAD AGUA

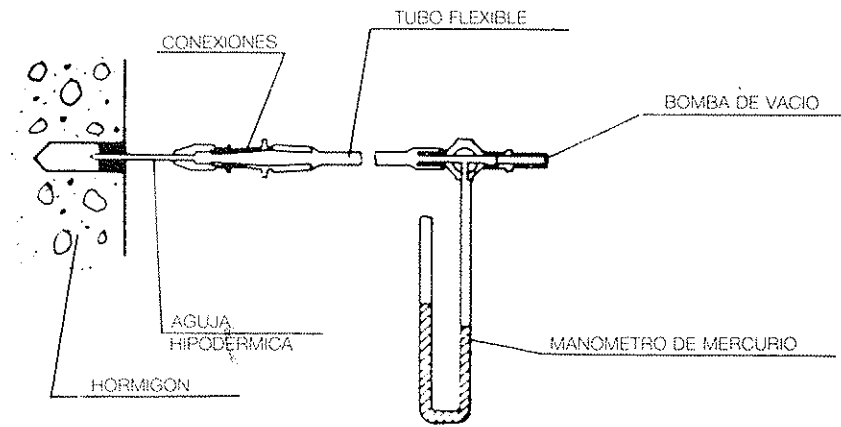


Fig. 4.11. APARATO DE FIGG PARA LA PERMEABILIDAD AL AIRE

primero de los casos, se aplica una carga de agua de 100 mm y se mide el tiempo necesario para que un menisco se desplace una distancia de 50 mm. Para la permeabilidad al aire, se reduce la presión desde el valor atmosférico hasta 15 KPa, y se mide el tiempo necesario para que la presión alcance el valor de 20 KPa.

Con los resultados obtenidos, Figg obtuvo la relación existente entre el tiempo de ensayo y la resistencia a compresión (Fig. 4.12) o la relación agua/cemento (Fig. 4.13).

Este método original de Figg ha sido posteriormente modificado por diferentes razones. Una de éstas es que en la publicación original no se dieron suficientes detalles del equipo utilizado, por lo que otros investigadores se vieron obligados a usar los medios que tenían a su alcance en sus laboratorios.

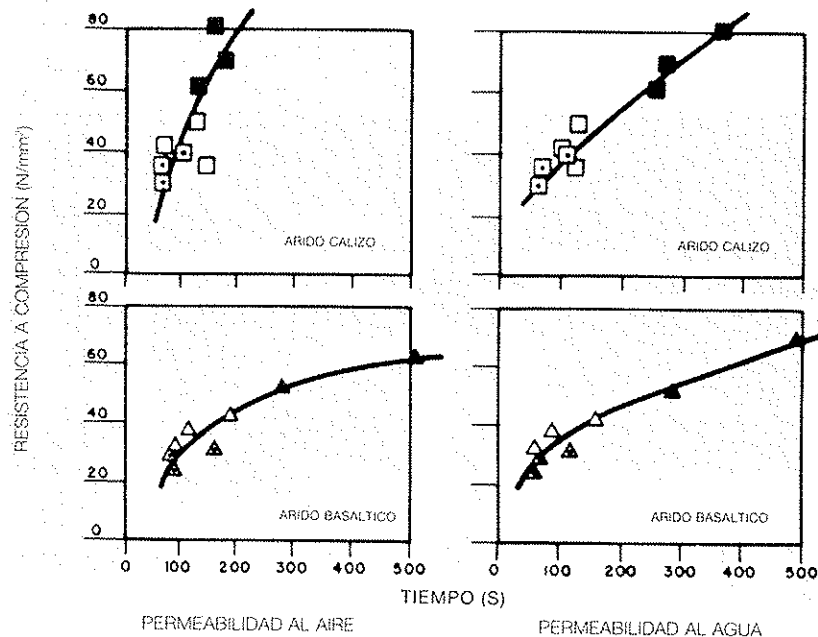


Fig. 4.12. RELACION ENTRE EL TIEMPO EN EL ENSAYO FIGG Y LA RESISTENCIA A COMPRESION

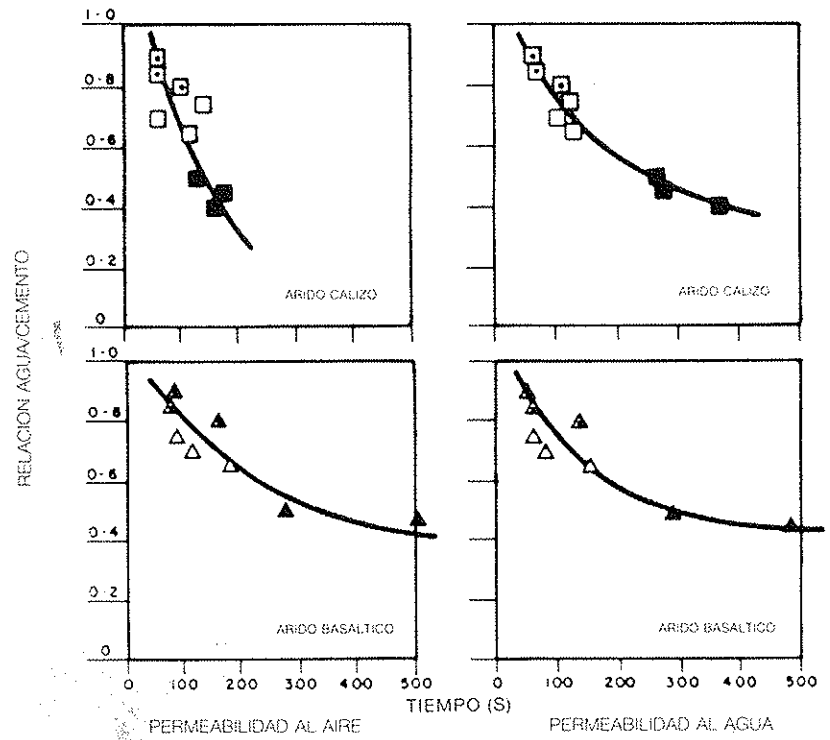


Fig. 4.13. RELACION ENTRE EL TIEMPO EN EL ENSAYO FIGG Y LA RELACION AGUACEMENTO

Mención especial merecen las modificaciones llevadas a cabo por Ove Arup y sus socios, bajo la dirección del propio Figg. Se ha tomado el método original y se han realizado algunos cambios para que el ensayo pueda desarrollarse fácilmente "in situ". Entre dichos cambios, cabe destacar los siguientes:

- El manómetro de mercurio original ha sido reemplazado por un manómetro digital portátil. (Fig. 4.14).

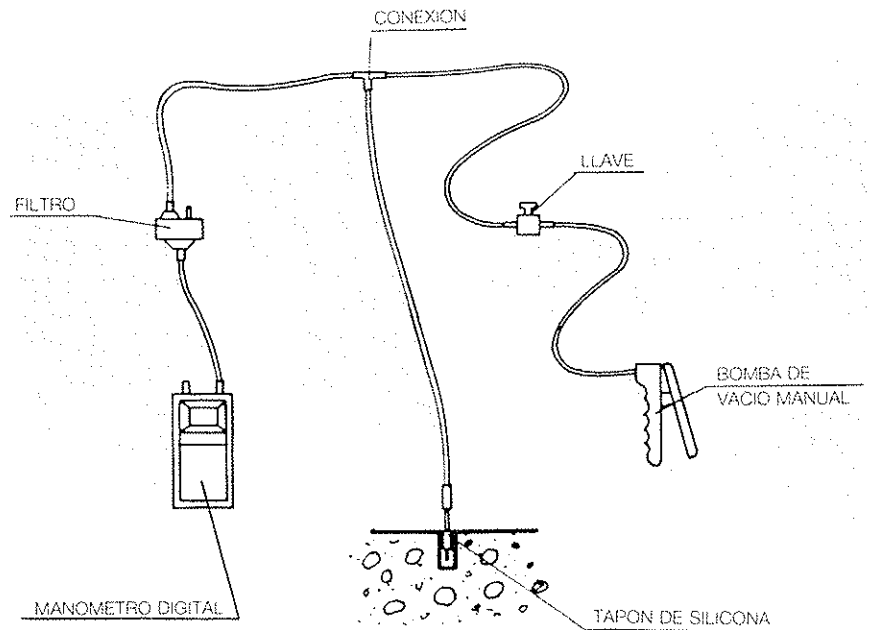


Fig. 4.14. MODIFICACIONES DEL EQUIPO FIGG

- Se ha introducido un filtro para proteger del polvo al manómetro.
- Se ha variado las dimensiones del orificio (10 mm de diámetro y 40 mm de profundidad), para obtener un resultado más consistente, pero minimizando el impacto visual provocado por el orificio en la estructura.
- También se ha variado la presión utilizada en el ensayo de permeabilidad al aire, que es de 45 KPa hasta 50 KPa, con el fin de poder utilizar una bomba de vacío normal.

Una vez introducidas las citadas modificaciones, y disponiendo del equipo adecuado (Fig. 4.15), el procedimiento operativo para llevar a cabo el método de Figg para la permeabilidad al aire es el que a continuación se describe.

Inicialmente, se debe taladrar un orificio de 10 mm de diámetro, utilizando para ello una taladradora de baja velocidad, preferiblemente adaptada con un tope que permita la obtención de la profundidad adecuada que, en este caso, es de 40 mm. Durante este proceso, se refrigera mediante aire o agua para evitar el deterioro de la broca y facilitar el proceso de perforación. (Fig. 4.16).

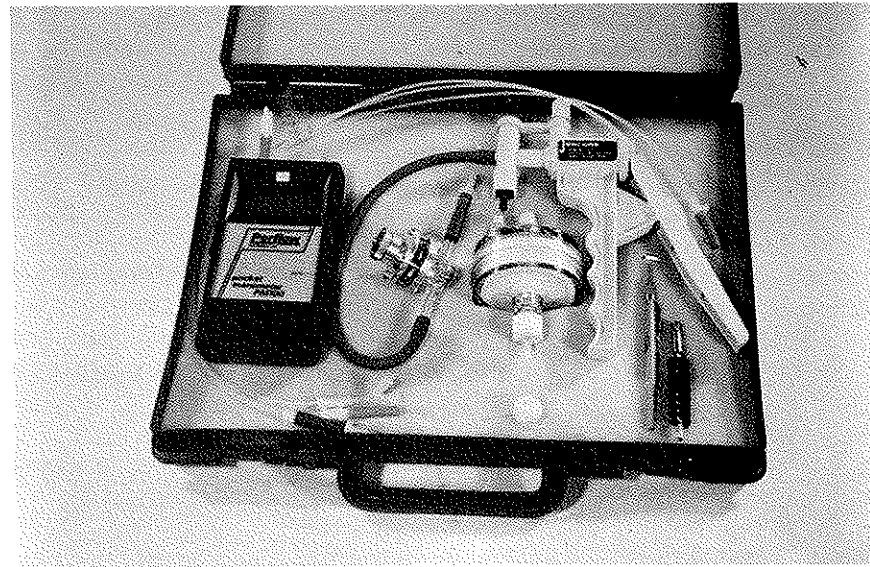


Fig. 4.15. METODO DE FIGG PARA LA PERMEABILIDAD AL AIRE. EQUIPO EN MALETIN DE TRANSPORTE

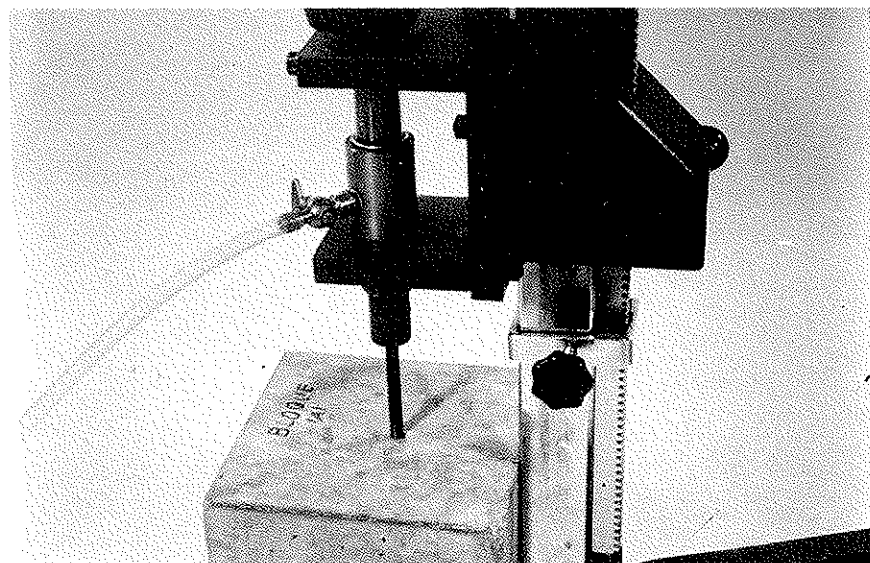


Fig. 4.16. METODO DE FIGG. REALIZACION DEL TALADRO

Si este proceso se prolonga, en la superficie del orificio tiende a depositarse el polvo generado, lo que podría dificultar la obtención posterior de un sellado adecuado del orificio.

Una vez realizado el taladro, éste debe ser limpiado de forma que no queden restos de polvo en su interior. Esta limpieza puede realizarse mediante aire a presión o por medio de una brocha de las utilizadas para limpiar armas.

Posteriormente, se procede a la colocación de un apoyo de plástico o poliestireno expandido cuya misión es permitir la posterior aplicación de un producto de sellado de forma que la cámara de aire que queda en el taladro posea la suficiente estanqueidad. Dicho apoyo se puede obtener de una plancha mediante la utilización de un sacabocados, y se introduce en el taladro, a una profundidad de 20 mm por presión con un trozo de varilla adecuado. (Fig. 4.17).

Una vez colocado el apoyo, se procede a la aplicación del producto de sellado en el orificio, procurando evitar huecos de aire y facilitando una buena unión entre las paredes del taladro y el producto utilizado. (Fig. 4.18).

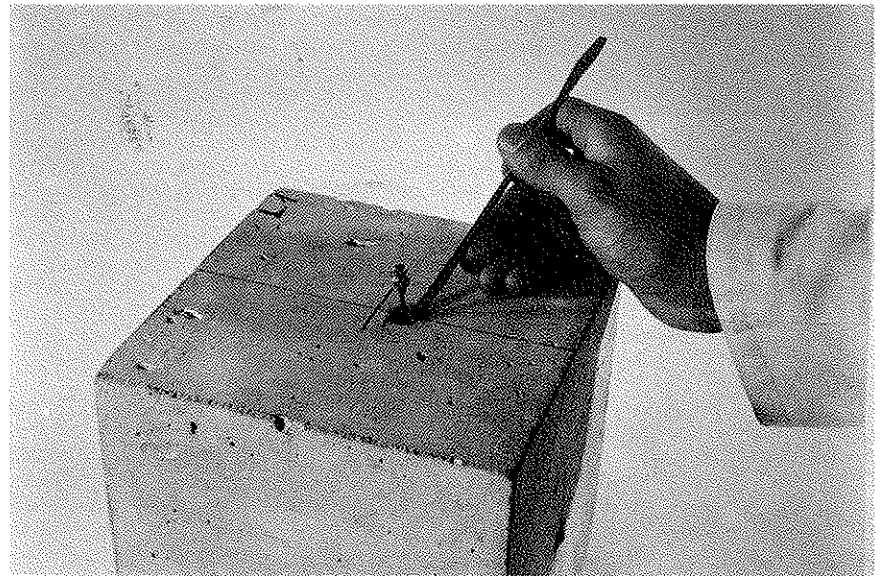


Fig. 4.17. METODO DE FIGG. COLOCACION DEL TOPE DE SELLADO

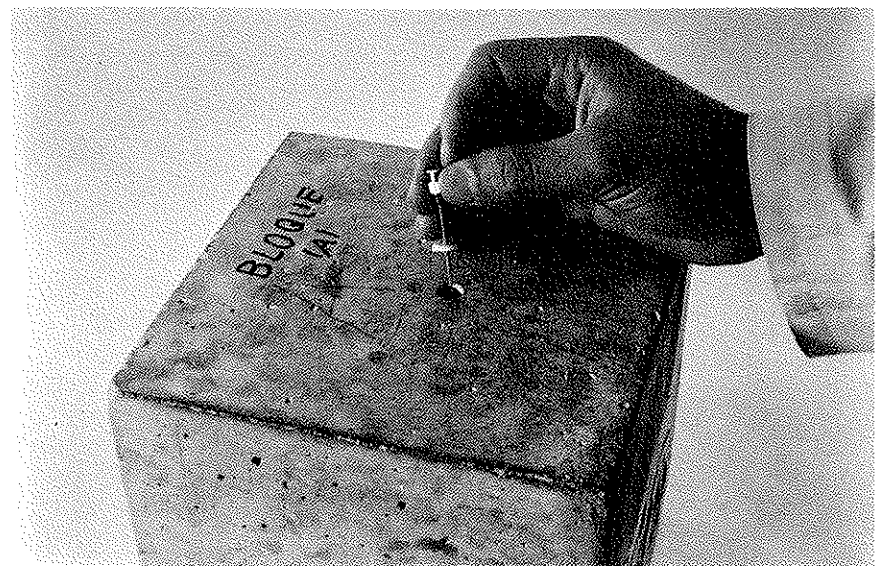


Fig. 4.18. METODO DE FIGG. SELLADO DEL TALADRO

Se ha observado la conveniencia de introducir la aguja hipodérmica antes de que el producto de sellado haya endurecido, lo que facilita notablemente la estanqueidad, ya que entre la aguja y el sellado hay una perfecta unión. De esta forma, se minimizan los efectos que, sobre el producto de sellado—Figg propone una silicona— tiene el hecho de perforarlo cuando ya está endurecido. (Fig. 4.19).

A continuación se permite el curado del producto de sellado durante un período de tiempo variable en función de la naturaleza del mismo, lo que a su vez permite la disminución de, al menos, una parte de la humedad que el hormigón ha adquirido durante el proceso de perforación, debido a la aplicación de agua para la refrigeración de la broca.

El aparato de ensayo se une a la aguja hipodérmica, mediante conexiones Luer, y se realiza un vacío superior a los 55 KN por debajo de la presión atmosférica. Se cierra, entonces, la válvula de vacío de diafragma y se observan las lecturas de presión que aparecen en el manómetro digital. Las lecturas de tiempo se inician en el momento que sobre la pantalla de éste aparece “-55 KN”, y se continúan hasta que se obtiene “-50 KN”. (Fig. 4.20).

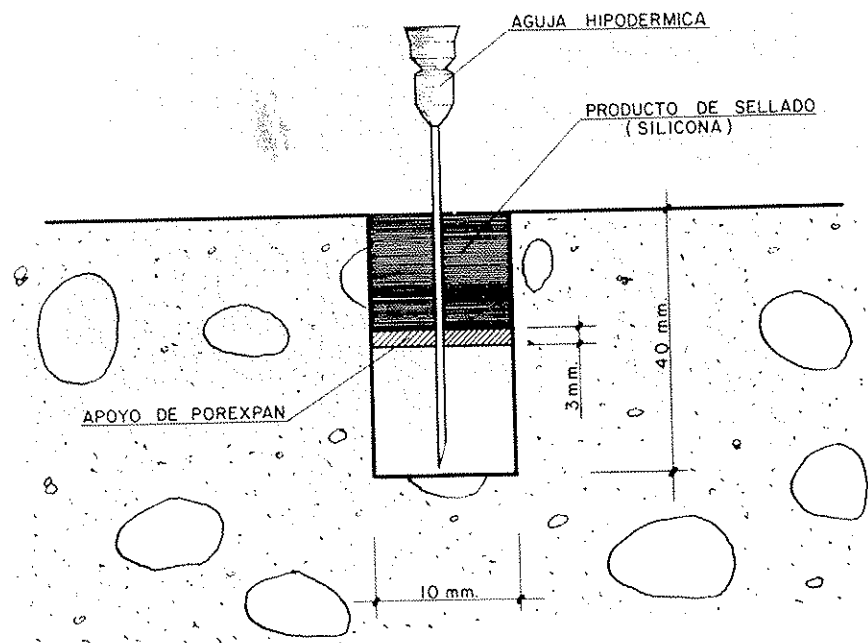


Fig. 4.19. METODO DE FIGG. DETALLE DEL SELLADO

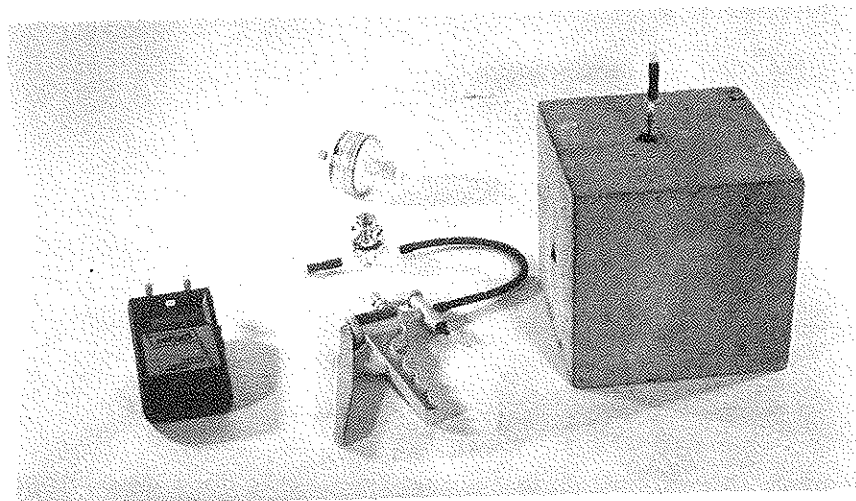


Fig. 4.20. METODO DE FIGG PARA LA PERMEABILIDAD AL AIRE. VISTA GENERAL DEL ENSAYO

Para el método de Figg para la permeabilidad al agua es válido todo lo indicado anteriormente en lo que se refiere a los procedimientos y precauciones a seguir en la realización del taladro y posterior sellado del mismo. Posteriormente, y suponiendo ya realizadas las operaciones indicadas, se procede al montaje del equipo. Para ello, se coloca el bastidor metálico (Fig. 4.21) de forma que la pipeta capilar calibrada esté horizontal y a 100 mm por encima de la superficie de sellado. Esto se consigue colocando el bastidor directamente sobre la superficie, en el caso de superficies horizontales lisas (como puede ser el caso de una losa ensayada en su cara superior), o bien soportando el equipo de alguna forma que permita la consecución de las condiciones geométricas indicadas. (Fig. 4.22).

A continuación se inserta el tubo, con la cánula en su interior, en la aguja hipodérmica, de tal forma que ésta alcance la base del taladro. Es muy

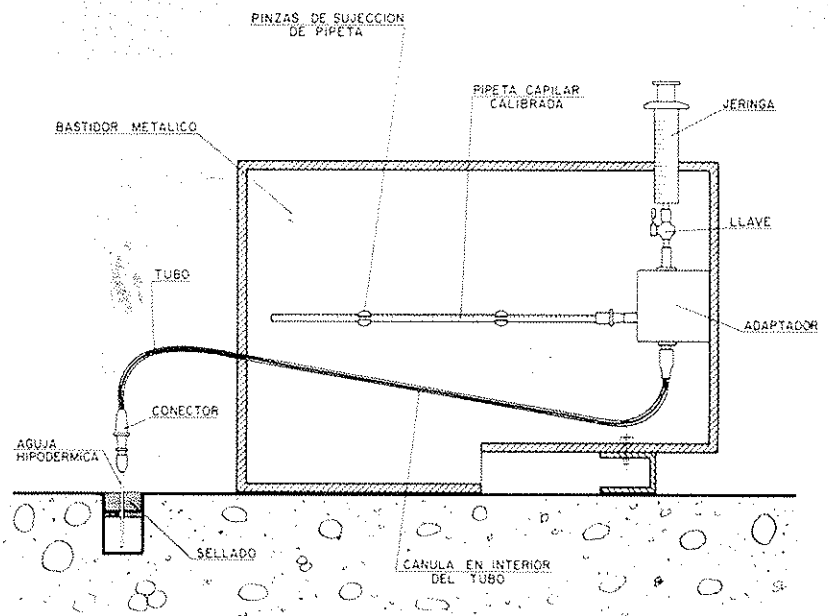


Fig. 4.21. METODO DE FIGG PARA LA PERMEABILIDAD AL AGUA. MONTAJE DEL EQUIPO

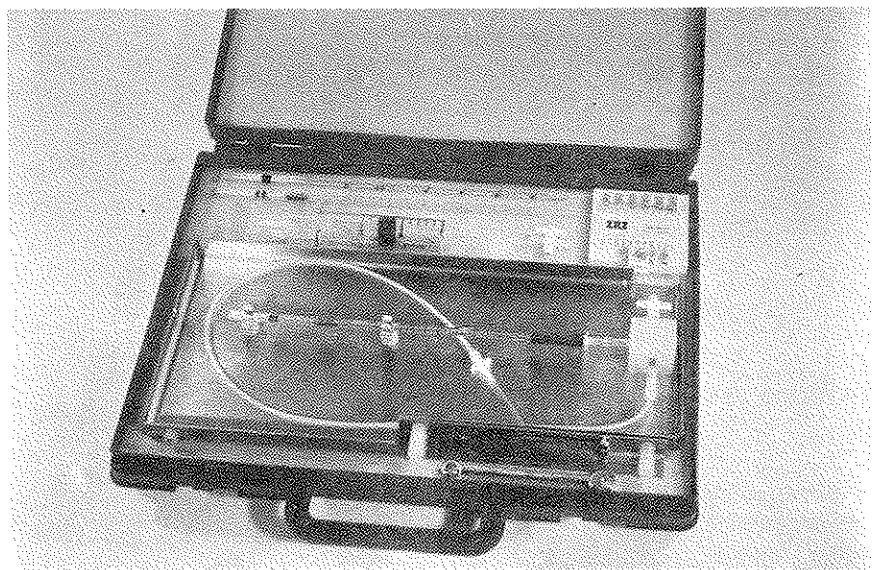


Fig. 4.22. METODO DE FIGG PARA LA PERMEABILIDAD AL AGUA. EQUIPO EN MALETIN DE TRANSPORTE

importante que el conector del tubo esté firmemente unido a la boquilla de la aguja.

Después, se llena la jeringa de 20 ml con agua destilada y se conecta con la llave de dirección única, bien directamente o mediante un tubo de conexión. Se abre la llave y se extrae el aire del conjunto, desplazando lentamente el émbolo de la jeringa.

El siguiente paso consiste en el llenado del taladro con agua, de forma que la posición del menisco en el capilar sea la correspondiente al cero de la graduación de éste.

El tiempo, en segundos, necesario para la absorción de un volumen total de 0,1 ml de agua, se toma como medida de la permeabilidad del hormigón al agua.

En el caso de hormigones de alta calidad, el tiempo necesario para la absorción de 0,1 ml de agua se alarga bastante, lo que hace más práctico medir el tiempo de absorción para un volumen de agua más pequeño (por ejemplo, 0,01 ó 0,02 ml). Por el contrario, en el caso de hormigones de gran absorción el efecto es el inverso, y puede ser adecuada la utilización de tubos capilares de mayor volumen (por ejemplo 0,5 ml).

4.3.1.3 Método de Hansen, Ottosen y Petersen, para la permeabilidad a los gases a baja presión

Este método permite la evaluación "in situ" de la permeabilidad al aire, en términos de incrementos de presión, para un espesor elegido del recubrimiento de un hormigón que está sometido a aire a baja presión. Ha sido considerado como una modificación del método de Figg.

El equipo se fija sobre la superficie de hormigón que se pretende ensayar, y se realiza un orificio á 45° con la perpendicular, donde posteriormente se instalará un sensor de presión, con el que se medirán los incrementos de ésta a lo largo del tiempo, al aplicar sobre la superficie una presión de aire de 0,4 MPa. (Fig. 4.23 y 4.24).

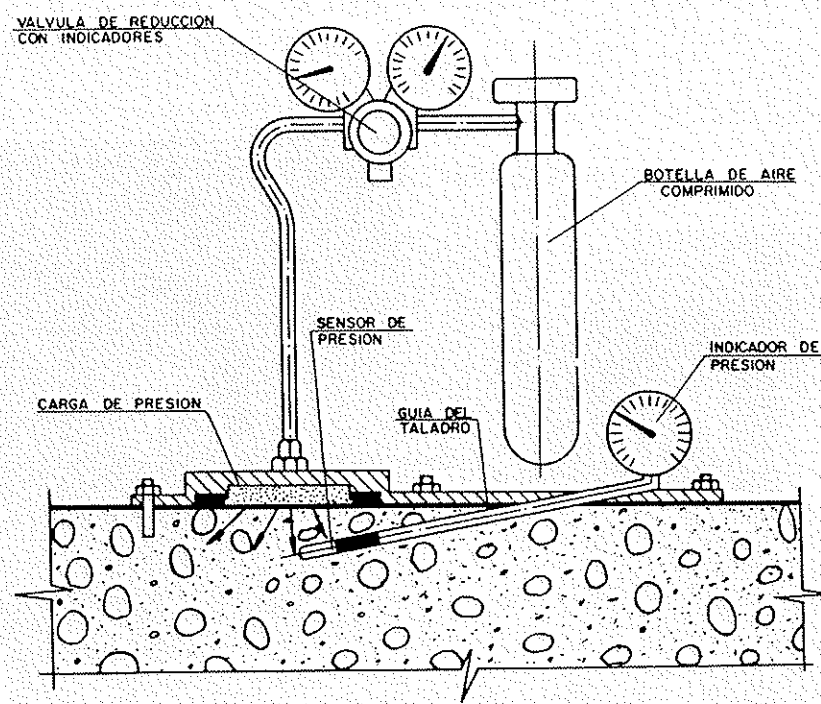


Fig. 4.23. EQUIPO PARA LA DETERMINACION DE LA PERMEABILIDAD AL AIRE A BAJA PRESION MEDIANTE EL METODO DE HANSEN, OTTOSEN Y PETERSEN

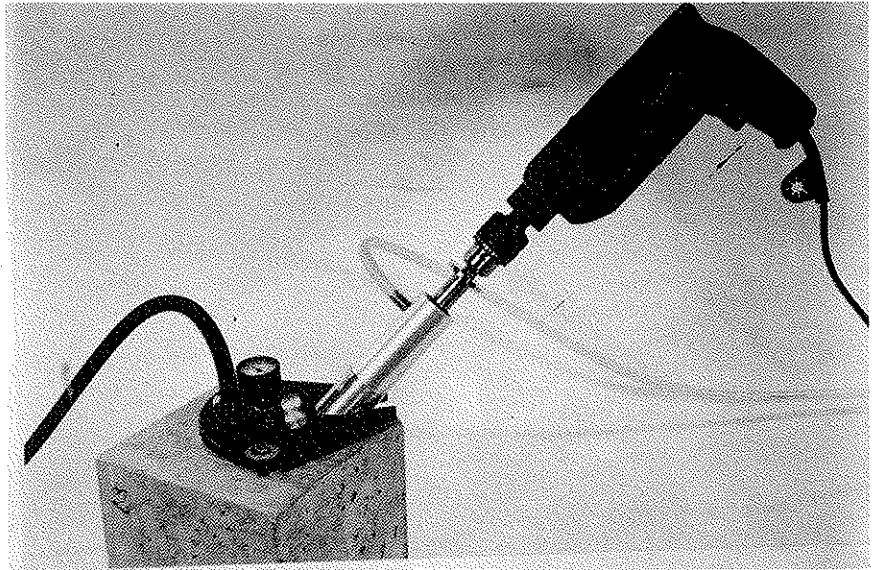


Fig. 4.24. METODO DE HANSEN, OTTOSEN y PETERSEN. PERFORACION DEL TALADRO

En un principio, el ángulo que formaba el orificio con la superficie era de 8° . En la actualidad, dicho ángulo se ha modificado hasta los 45° indicados, ya que ésto facilita el ensayo y no altera la validez de los resultados.

En los trabajos desarrollados por el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX (M.O.P.U.), se observó que el equipo original comprendía dos circunstancias fundamentales que originaban problemas operativos a la hora de realizar los correspondientes ensayos. Estas circunstancias eran las siguientes:

- El método de ensayo comprendía la toma de resultados durante una hora y de forma prácticamente continua, por lo que se introdujo un método automático para el registro de los mismos, con objeto de hacer más operativo el ensayo.
- Además, el manómetro que poseía el equipo original para medir las presiones en la cámara de ensayo presentaba un fondo de escala de 0,4 kPa. En el caso de muchos hormigones, este valor era claramente insuficiente por alcanzarse el fondo de escala en un plazo de escasos segundos. En consecuencia, se contempló la posibilidad de aumentar dicho fondo de escala de forma que se pudieran registrar valores de hasta 2 kPa, lo que supone incrementar a su vez, el tiempo de obtención de resultados hasta valores razonables (varios minutos), aun en el caso de hormigones que no sean muy impermeables al aire. (Fig. 4.25 y 4.26).

4.3.1.4 Permeabilidad superficial bajo presión

Se pueden seguir dos métodos:

A) Método de Montgomery y Adams.

Es un ensayo parecido al ISAT. Utiliza un equipo portátil que, por tanto, puede ser también empleado "in situ".

Se adhiere un dispositivo especial sobre la superficie de hormigón, mediante el pistón de una cámara hidráulica. Dicho pistón es controlado por medio de una escala micrométrica. Las medidas antes y después del ensayo pueden dar una indicación del volumen de agua fluyente a la presión de ensayo, lo que permite calcular el coeficiente de permeabilidad y compararlo con otras medidas más directas. Tiene el inconveniente de que ha sido poco

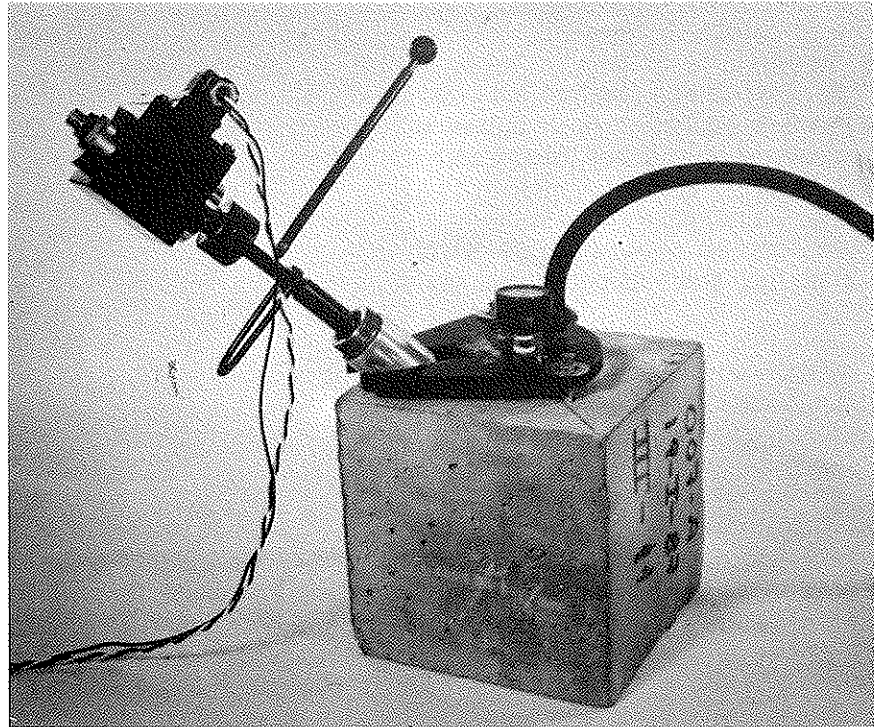


Fig. 4.25. METODO DE HANSEN, OTTOSEN Y PETERSEN. VISTA GENERAL DEL EQUIPO, CON TRANSDUCTOR INSTALADO PARA LA TOMA AUTOMATICA DE DATOS

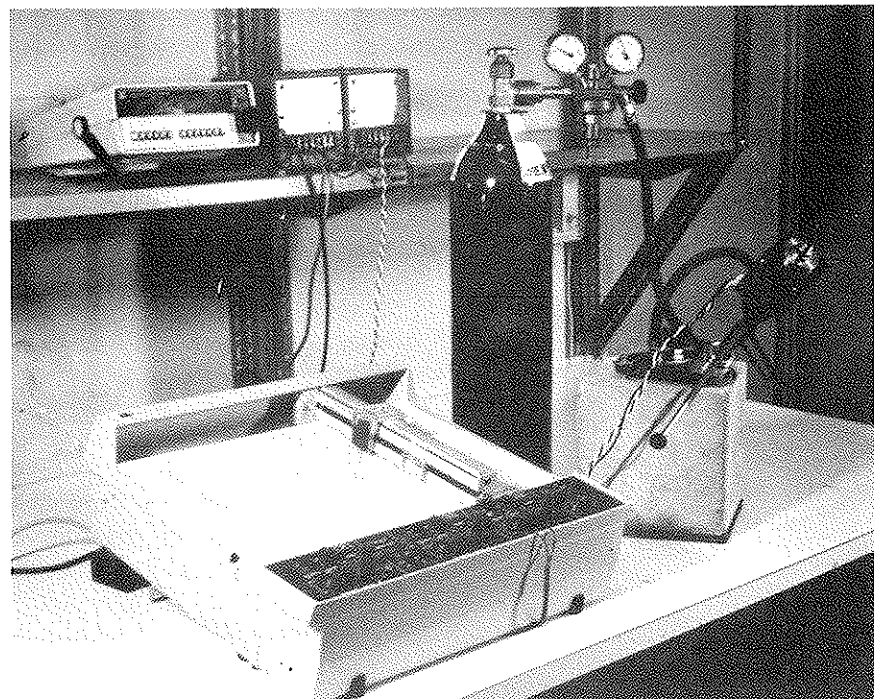


Fig. 4.26. METODO DE HANSEN, OTTOSEN Y PETERSEN. VISTA GENERAL DEL ENSAYO utilizado, además de su facilidad para producir daños superficiales en el hormigón al retirar el equipo, motivados por su sistema de pegado (Fig. 4.27).

B) Método de Steinert

Se pegan juntas de goma y se fijan a la superficie del hormigón, formando dos cuerpos en forma de anillo. Estos se llenan de agua y son sometidos a presión, mediante aire comprimido a 0,7 MPa. Se mide el volumen de agua que penetra en el hormigón a través del cuerpo interior.

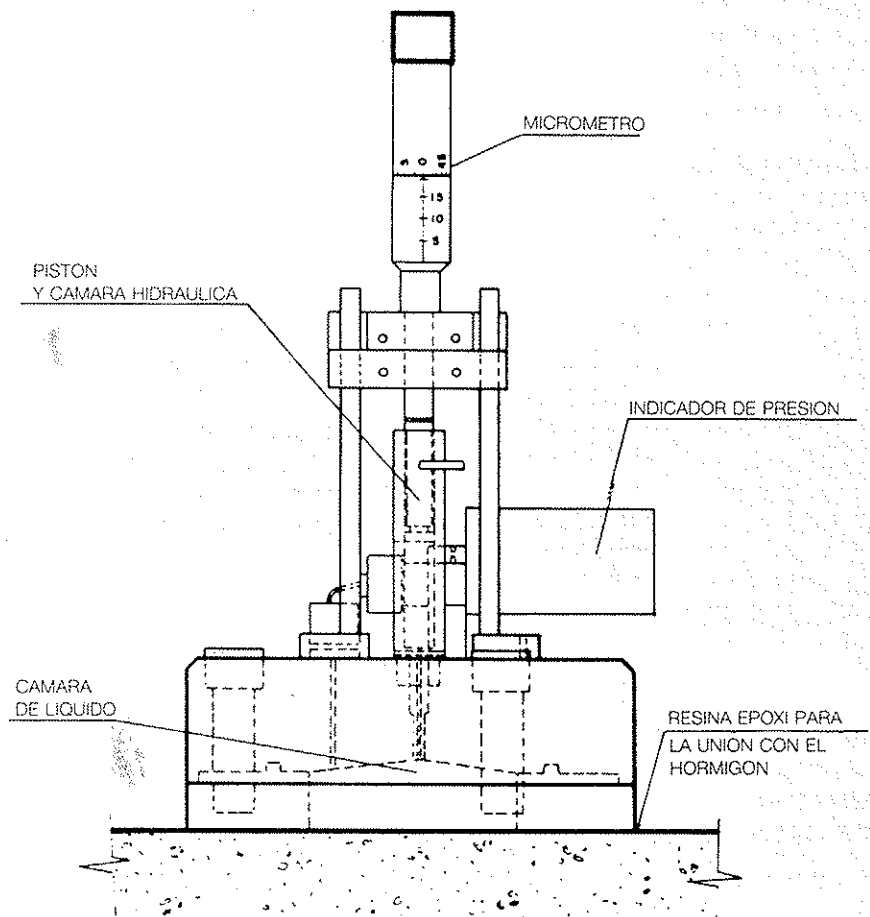


Fig. 4.27. EQUIPO DE MONTGOMERY Y ADAMS

Este método se aproxima a un proceso unidireccional y el ensayo puede ser considerado como un ISAT de alta presión.

4.3.1.5 Ensayos de permeabilidad mediante sondeos

La permeabilidad "in situ" de elementos de hormigón en masa puede ser medida utilizando procedimientos derivados de los ensayos de perforación que, normalmente, se realizan en Mecánica de Rocas.

En dichos ensayos se aísla una determinada longitud de sondeo mediante fundas dilatables, simples o dobles. El agua o el aire es entonces inyectado o extraído de la sección que se fisura entre las fundas, o bien por debajo de una sola funda. Las variaciones de presión dentro de la zona de ensayo se obtienen mediante transductores eléctricos, lo que permite la determinación de la permeabilidad a partir de los datos de presión y flujo.

Los valores habituales del tamaño de los sondeos en las rocas y suelos, así como sus permeabilidades son, generalmente, demasiado grandes para ser directamente aplicables al ensayo de estructuras. Sin embargo, recientemente se ha desarrollado una técnica que podría ser adecuada, en especial para ensayos algo más profundos. En este método se perfora un orificio de 25 a 50 mm de diámetro, con una profundidad de al menos 0,5 m. Se basa fundamentalmente en provocar un vacío y medir cómo se va recuperando la presión. Por lo tanto, esta técnica, aunque no ha sido aplicada a las estructuras de hormigón, podría considerarse una extensión del método de Figg para medir la permeabilidad al aire a mayor distancia de la superficie.

Las características de este ensayo sugieren que, en el caso de su posible utilización en un futuro, ésta se vería restringida a aquellos elementos en que existen grandes cantidades de hormigón en masa, como, por ejemplo, puede ser el caso de presas.

4.3.1.6 Ensayos de filtración de elementos estructurales completos

Los métodos que, hasta el momento, se han indicado para el ensayo de la permeabilidad "in situ", sólo dan medidas indicadoras de la misma sobre secciones concretas y localizadas. No obstante, también han sido desarrollados algunos métodos para ensayar ciertas estructuras en su totalidad. Este es el caso de algunos ensayos para tuberías de hormigón, plataformas petrolíferas "off-shore" y vasijas de centrales nucleares.

En España, un ejemplo de este tipo de ensayos es el que el Instituto Eduardo Torroja para la Construcción y el Cemento ha desarrollado para la permeabilidad de tubos de hormigón armado y pretensado. Está basado en las investigaciones que anteriormente, se habían llevado a cabo sobre tubos y probetas de un mismo hormigón, obteniéndose que la permeabilidad de los primeros es muy superior a la de las probetas (del orden de 30 veces).

4.3.2 ENSAYOS DE LABORATORIO DE MUESTRAS TOMADAS "IN SITU"

Aunque muchos de los ensayos que se realizan "in situ" pueden llevarse a cabo también en laboratorio, en este apartado se va a hacer referencia tan sólo a aquellos métodos que son exclusivamente destinados para ensayarse en laboratorio aunque las probetas hayan sido extraídas "in situ".

En la mayoría de los casos, un ensayo de este tipo da una mejor medida de la permeabilidad que un ensayo realizado "in situ", debido a que la probeta se puede cortar y moldear al tamaño preciso para el ensayo.

4.3.2.1 Ensayos de absorción de agua

Se dispone fundamentalmente de dos procedimientos de ensayo:

A) Método por inmersión a pequeña profundidad

Este es, sin duda, el método de ensayo más normalizado, por lo que seguramente es uno de los más utilizados en la práctica, pese a que en ningún caso pueda considerarse como un ensayo de permeabilidad, pues los mecanismos de transporte son absolutamente distintos.

Se ha intentado relacionar los resultados de este ensayo con la permeabilidad, aunque aquéllos sólo pueden indicar la capacidad de absorción de la porosidad abierta, mientras que la permeabilidad es función del flujo en la porosidad permeable: por lo que ambos datos son de complicada y dudosa relación.

Una de las normas más características de este tipo de ensayos es la BS:1881:Parte 122, donde se describe el siguiente procedimiento de ensayo:

- Se seca la muestra en un horno á 105° C durante 72 horas.
- Se enfría en un depósito durante 24 horas.
- Se pesa, e inmediatamente se sumerge en un tanque que contiene agua á 20° C, de forma que quede á 25 mm por encima de la cara superior de la muestra.
- Se deja sumergida 30 minutos, se extrae y se sacude. Se seca la superficie y se vuelve a pesar.
- La absorción viene dada por la diferencia de peso.

Existen también otras normas, como la BS:368 para baldosas de hormigón utilizadas en pavimentación, la Recomendación CPC 11.1. de la RILEM o la Norma ASTM C497. Los procedimientos operativos son prácticamente los mismos, salvo algunas modificaciones que pueden tener alguna importancia, sobre todo en la última de ellas.

La experiencia ha indicado que pueden tomarse como valores representativos de la absorción de agua del hormigón, al realizar un ensayo de inmersión durante 30 minutos según la norma BS 1881:Parte 122., los datos por la Tabla 4.3.

TABLA 4.3 Valores característicos de la absorción

CALIDAD DEL HORMIGON	ABSORCION DE AGUA
Baja absorción	Menor del 3 %
Absorción media	Entre 3 y 5 %
Alta absorción	Mayor del 5 %

B) Método de la ascensión capilar.

Este es un ensayo basado en la absorción por efectos capilares. Puede considerarse una variación del método de inmersión. Básicamente, consiste en colocar una probeta de hormigón de forma que una de sus caras esté en contacto con el agua, para posteriormente medir la altura o el paso de agua absorbida por ascensión capilar.

Este método puede también utilizarse para obtener una indicación de cuál es el tamaño y la distribución de los poros, en función de la velocidad con que el agua es absorbida por la superficie del hormigón. En la Fig. 4.28. se representa la relación entre el tamaño de los poros y los resultados obtenidos para la ascensión capilar mediante la siguiente expresión:

$$d = \sqrt{\frac{r^2 \cdot P_o \cdot T}{4 \cdot \mu}}$$

donde: r: radio del poro.
 P_o: presión atmosférica.
 T: tiempo.
 μ: viscosidad.
 d: altura capilar.

Por otro lado, si se relacionan la altura capilar y el volumen de agua absorbida por unidad de área, se puede obtener una estimación del valor de la porosidad abierta (Fig. 4.29).

Además, se puede hacer una representación gráfica relacionando el volumen de agua absorbida por unidad de superficie con la raíz cuadrada del tiempo. Esta relación es lineal, y viene dada por:

$$\frac{V}{A} = S \sqrt{T}$$

donde S representa la sortividad.

Existe una Recomendación RILEM, la CPC 11.2., en la que se mencionan todos los pasos que deben seguirse para la realización de este ensayo.

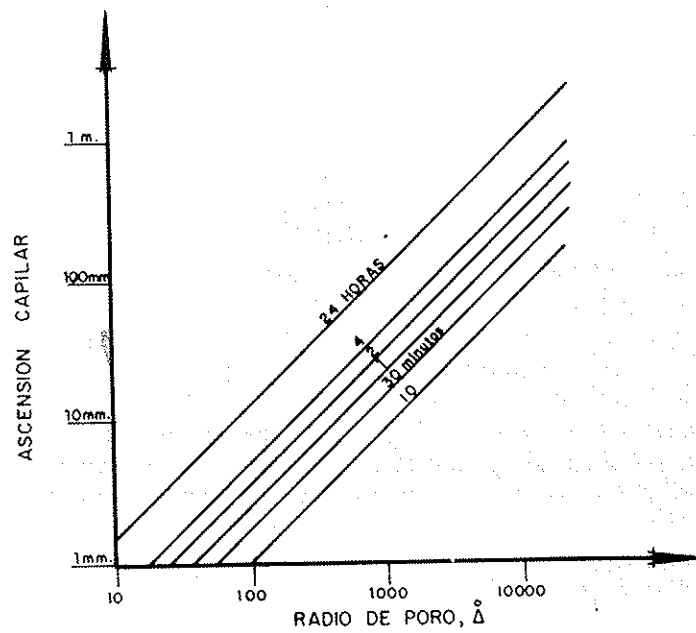


Fig. 4.28. RELACION ENTRE LA ASCENSION CAPILAR Y EL RADIO DE POROS

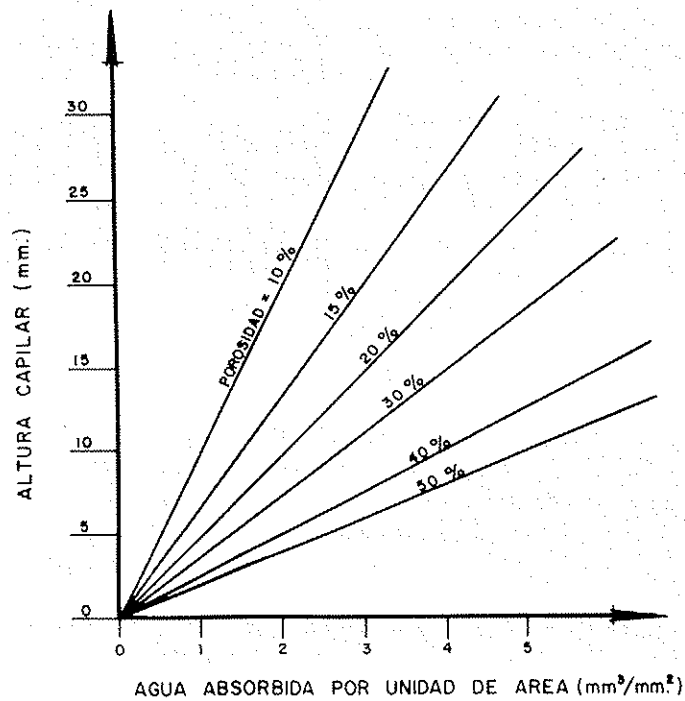


Fig. 4.29. ESTIMACION DE LA POROSIDAD A PARTIR DE LA ASCENSION CAPILAR

4.3.2.2 Métodos de ensayo de permeabilidad bajo presión

Para la medida directa de la permeabilidad del hormigón a líquidos bajo presión, se requiere una célula de ensayo que, en principio, es similar a la utilizada para los ensayos triaxiales en Mecánica de Rocas. Sin embargo, la permeabilidad del hormigón es mucho menor que la de un suelo o una roca, por lo que las dimensiones de la célula, así como las presiones aplicadas serán diferentes en el caso del hormigón, para poder así provocar el flujo de líquido a través de éste (Fig. 4.30).

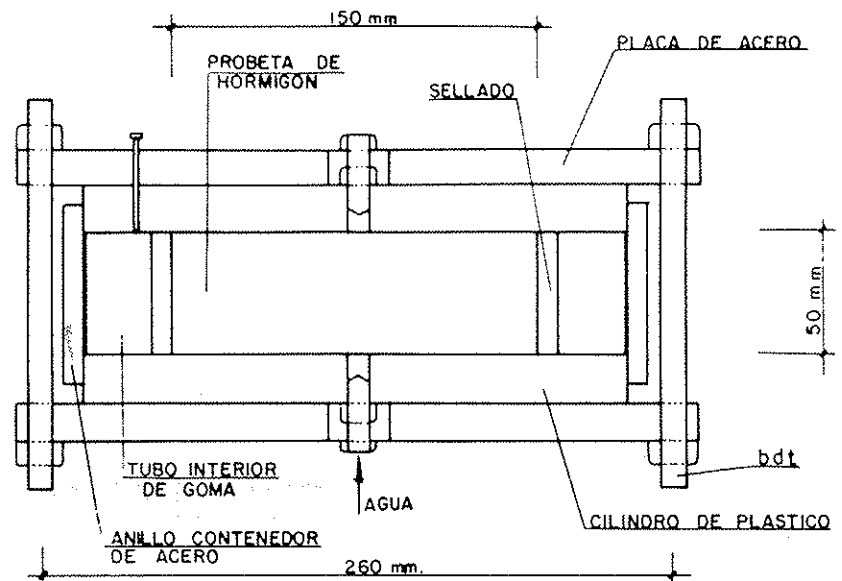


Fig. 4.30. CELULA DE ENSAYO PARA LA PERMEABILIDAD AL AGUA BAJO PRESION

El fundamento de este método consiste, básicamente, en someter a una cara de una muestra a la acción de un líquido bajo presión, y medir el volumen filtrado que se recoge en la cara opuesta. Una norma básica para el desarrollo de este tipo de ensayos es la recogida en la Recomendación RILEM CPC 13.2., y que coincide con la ISO/DIS 7032.

En un principio, el flujo de agua está influido no sólo por los ensayos de presión, sino también por las fuerzas capilares, las cuales dejan de influir cuando el agua ha atravesado la totalidad de la muestra y moja la superficie opuesta a aquella en donde se aplica la presión de agua. El flujo de agua entonces decrece hasta alcanzar unos valores estables, que corresponden a la saturación completa y la penetración total de la probeta.

El tiempo para alcanzar estas condiciones estables depende del espesor y del coeficiente de permeabilidad establecido por la ley de Darcy:

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{dh}{dl}$$

Dada una relación agua/cemento, al ensayar un hormigón por este método pueden obtenerse resultados que cubran un amplio intervalo de valores. Esta posible dispersión se debe a la existencia de gran cantidad de factores que pueden modificar las condiciones de ensayo. Los factores más habituales son:

- hidratación variable y continua de la muestra.
- saturación inicial incompleta y variable.
- agua no absolutamente limpia.
- reacción química de la muestra con el fluido de ensayo.
- efecto de posibles gases disueltos.
- sedimentación, debida al movimiento de finos.
- colapso de la microestructura e inestabilidad macroscópica, se aplican presiones muy altas.
- falta de consecución de condiciones estables de flujo.

Este método ha sufrido, en su planteamiento más general, diversas modificaciones. Una de ellas es la propuesta por Alegre y Lechuga, no sólo por la

forma de la probeta que utiliza, ni por la forma de aplicación de la presión originando un flujo radial (Fig. 4.31), sino también por su versatilidad al poder ser utilizado este equipo para otros ensayos, como los que más adelante se comentarán, de penetración de agua y de permeabilidad a los gases bajo presión.

4.3.2.3 Ensayo de penetración de agua

Si se quiere ensayar un hormigón poco permeable, la utilización del método de permeabilidad bajo presión encuentra notables dificultades. Estas están motivadas fundamentalmente por la necesidad de aplicar valores muy altos de la presión, lo cual no siempre es posible, y aun en el caso que lo fuera se corre el peligro antes indicado de colapso en la microestructura, por lo que los resultados obtenidos no serían reales. En estos casos se utiliza el llamado método de penetración de agua.

El procedimiento básico de este método consiste en la aplicación de una carga de agua sobre una superficie de la muestra durante un cierto tiempo. Posteriormente, se corta la muestra perpendicularmente a la cara de aplicación de la presión de agua, para determinar visualmente la profundidad de penetración. El montaje de la célula de ensayo es similar al de los ensayos de permeabilidad bajo presión pero en este caso no se llega a la saturación total de la probeta.

Aunque los resultados del ensayo se expresan en profundidades de penetración, es posible en algunas circunstancias deducir un valor del coeficiente de permeabilidad, a través de la ecuación de Valenta, obtenida para la penetración unidireccional:

$$d = \sqrt{\frac{2 \cdot K \cdot T \cdot h}{\Theta}}$$

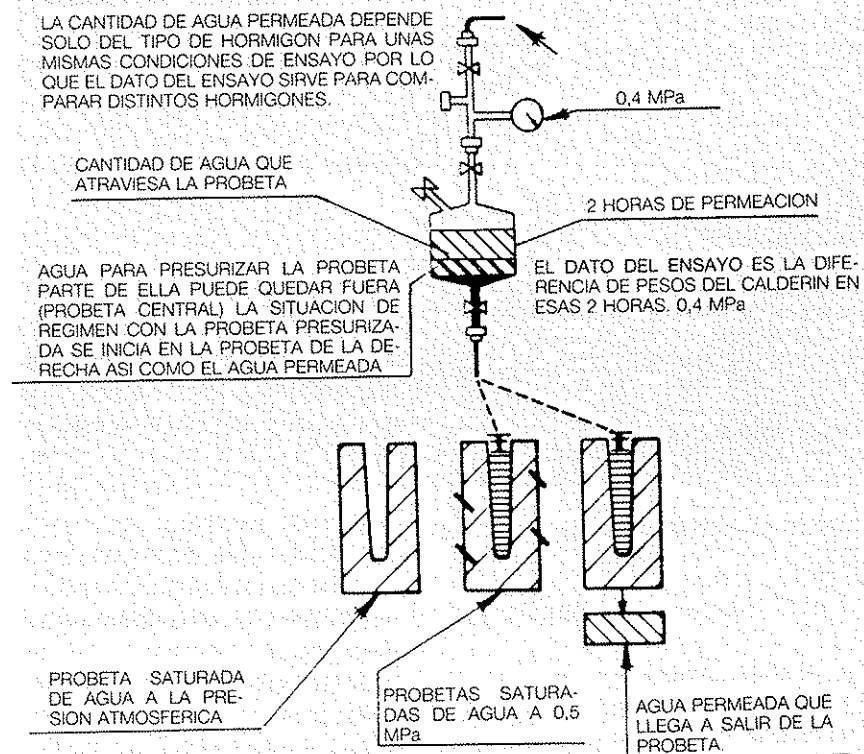


Fig. 4.31. ESQUEMA DEL EQUIPO DE PERMEABILIDAD A LOS LÍQUIDOS DE ALEGRE Y LECHUGA

donde: d: profundidad de penetración.
T: tiempo.
h: carga de presión aplicada.
K: coeficiente de permeabilidad.
 Θ : porosidad del hormigón.

Para poder aplicar correctamente esta expresión, hay que tener en cuenta que la penetración de agua sólo puede suponerse como un proceso unidireccional si la profundidad de penetración es más pequeña que el diámetro del área de ensayo.

Este ensayo está normalizado en la Recomendación RILEM CPC 13.1., y en la Norma ISO/DIS 7031. No obstante, en los trabajos desarrollados en el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX se encontraron una serie de inconvenientes de orden práctico que, al seguir dichas normas, pueden originar graves trastornos en relación con la operatividad del propio ensayo. Los principales puntos que se observaron fueron los siguientes:

- Si el hormigón posee una humedad interna considerable, puede impedir la visualización adecuada de la mancha producida por el agua penetrada.
- La superficie de rotura que se produce al romper la probeta no es en ningún caso plana, debido a la heterogeneidad propia del hormigón, lo que puede dificultar la obtención de medidas del frente de penetración.

Para solventar dichos problemas, se llevó a cabo un estudio sobre la posible utilización de colorantes, la necesidad de un período de desecación previo al ensayo, y la utilización de métodos fotográficos para la determinación del frente de penetración (Fig. 4.32).

Se obtuvo que la utilización de colorantes disueltos en el agua utilizada en el ensayo alteraba sensiblemente el desarrollo del ensayo, pues las partículas de los mismos se depositaban en las paredes de los poros modificando su sección y, en consecuencia, variando la estructura interna del hormigón ensayado. Se observó la necesidad de un período de desecación previo al ensayo, de forma que no se alterara el hormigón por eliminación del agua de gel que contiene. Asimismo, se desarrolló un método de obtención de resultados mediante técnicas fotográficas.

Después de las modificaciones introducidas en el mencionado estudio, el método de ensayo será el que a continuación se indica. En primer lugar, y previamente a la realización del ensayo, se debe proceder a la desecación para la eliminación del agua capilar que pueda existir en los poros del hormigón. Para ello, se ha estimado suficiente introducir la probeta a ensayar en una cámara de desecación durante un período no inferior a 24 horas. Es de gran importancia el hecho de no alterar la estructura interna del hormigón que se pretende ensayar, por lo que en ningún caso se deben superar los 50° C en el interior de dicha cámara, pues ello supondría la eliminación de parte del agua de gel del hormigón, con lo que la estructura interna del mismo se vería notablemente alterada.

Una vez extraída la probeta de la estufa, se la deja enfriar hasta que alcance la temperatura ambiente. Una vez conseguida ésta, y evitando en cualquier caso ambientes de elevada humedad relativa, se procede a la preparación de la superficie de ensayo. Para ello, se recurre a un pulido o repicado de la superficie de ensayo hasta conseguir eliminar la capa superficial de mortero. Las dimensiones de la superficie de ensayo son función del tamaño de la probeta y están indicadas en las correspondientes normas. (Fig. 4.33).

A continuación, se procede a la colocación de la probeta sobre uno de los contenedores del equipo. (Fig. 4.34). Se acopla cuidadosamente la junta tórica, de forma que evite la posible formación de fugas por la superficie

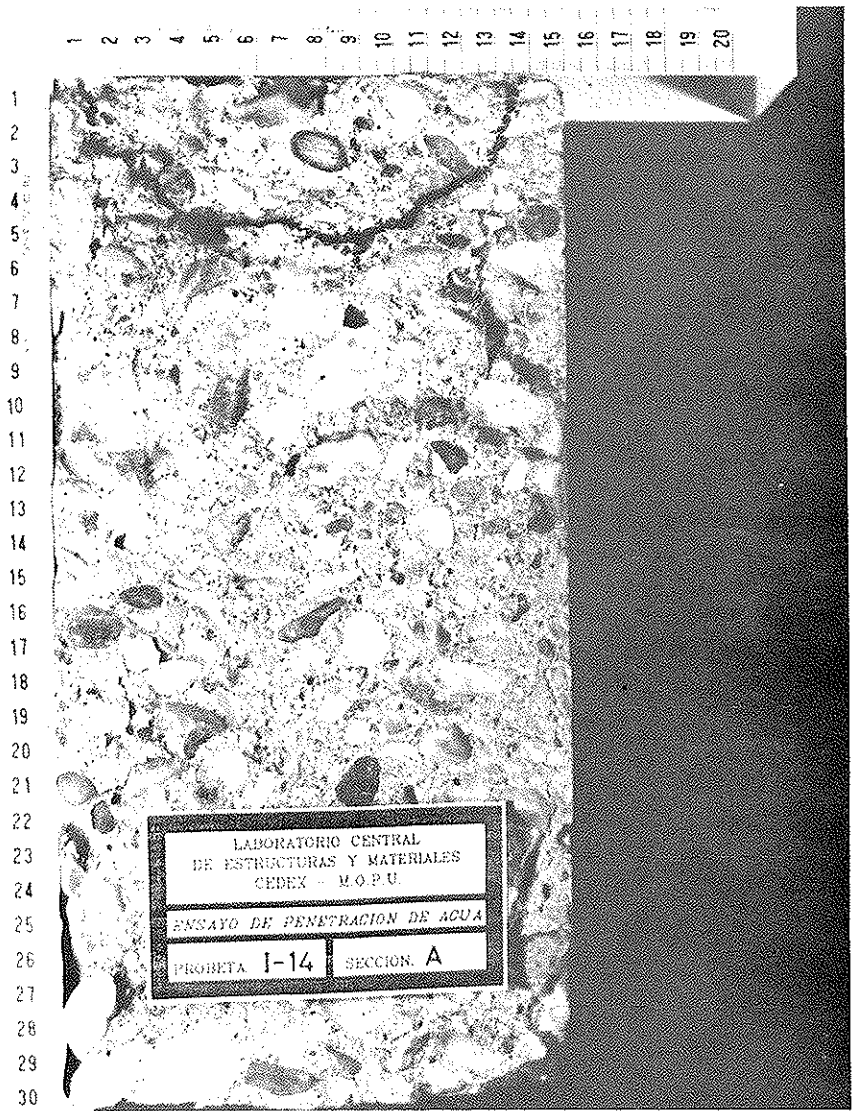


Fig. 4.32. ENSAYO DE PENETRACION DE AGUA. EJEMPLO DE FRENTE DE PENETRACION

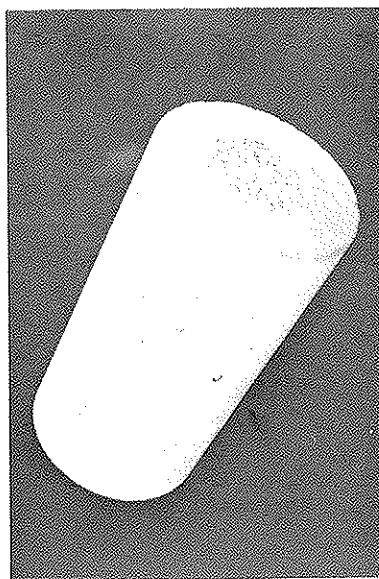


Fig. 4.33. ENSAYO DE PENETRACION DE AGUA. PREPARACION DE LA SUPERFICIE DE ENSAYO

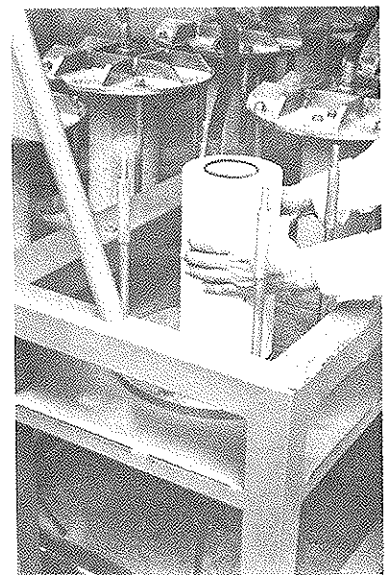


Fig. 4.34. ENSAYO DE PENETRACION DE AGUA. COLOCACION DE LA PROBETA SOBRE EL BASTIDOR METALICO DEL EQUIPO

de ensayo de la probeta, y se cierran las tapas superiores del contenedor apretando sus correspondientes tornillos. (Fig. 4.35). Es necesario tener en cuenta que el momento de apriete necesario ejerce sobre el hormigón unas tensiones como reacción a la fuerza con la que se pretende evitar las posibles fugas por las juntas. Estas tensiones pueden originar problemas en el caso de hormigones de resistencias muy bajas, por lo que en dichos casos será necesario actuar con precaución para no fisurar el hormigón, lo que falsearía los resultados: pudiéndose llegar, en casos extremos, a la imposibilidad de realizar el ensayo por dichas circunstancias.

Una vez colocada definitivamente la probeta en el contenedor, y acoplado éste en el conjunto del equipo se procede a la aplicación de la presión, comenzando el ensayo propiamente dicho. Las presiones de ensayo serán las recogidas en la Recomendación RILEM CPC 13.1. y, que coinciden con las de la Norma ISO/DIS 7031:1983; esto es, se aplicará un primer escalón de presión de 0,1 MPa durante un período de 48 horas, para continuar con otros dos escalones de 0,3 y 0,7 MPa durante períodos de 24 horas de duración cada uno.

Una vez concluido el último escalón de presión se desmonta el ensayo y se rompe la probeta a tracción indirecta, según el método brasileño. La probeta se rompe por un plano que pasa por dos de sus generatrices opuestas, originándose dos superficies donde se puede posteriormente evaluar la mancha originada por el agua penetrada en el hormigón.

Otros autores han diseñado sus propios métodos en función de los medios disponibles en sus laboratorios.

4.3.2.4 Relación entre los coeficientes de permeabilidad deducidos de los ensayos de permeabilidad bajo presión y de penetración de agua

Las medidas de la permeabilidad del hormigón no son sólo función de su porosidad, su estructura de poros o de las propiedades del fluido. Al realizar un ensayo de permeabilidad de agua si el cemento está parcialmente deshidratado, al ser puesto en contacto con el agua, se provocará un comienzo de hidratación de dicho cemento. La proporción en que esto ocurre está determinada, al menos en parte, por la presión aplicada en el ensayo.

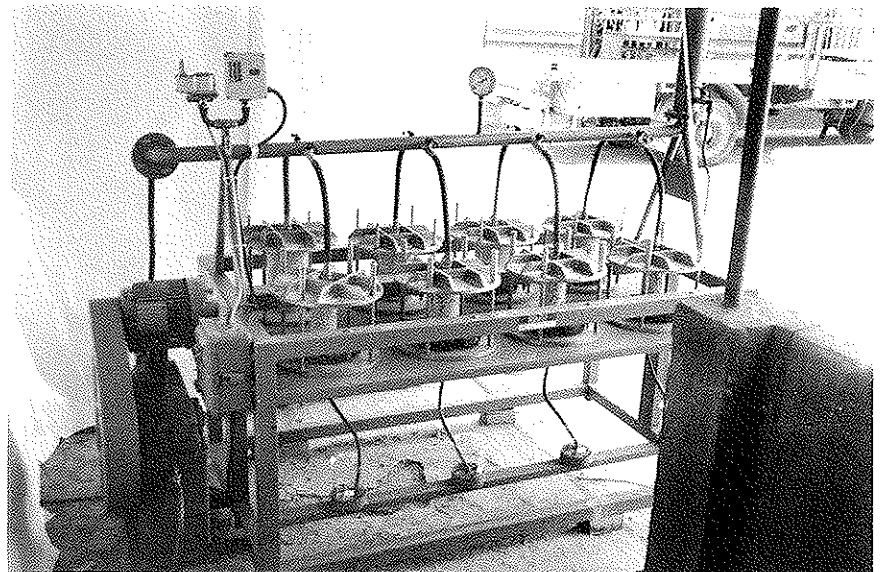


Fig. 4.35. ENSAYO DE PENETRACION DE AGUA. VISTA GENERAL DEL EQUIPO DE ENSAYO

Además, el flujo de agua a través del hormigón puede provocar la obturación de los poros por las partículas sueltas en el sistema capilar. Por lo tanto, existen una serie de procesos que pueden reducir la porosidad del hormigón durante el ensayo, y en consecuencia, alteran los valores que se obtienen de las medidas de permeabilidad.

En general, los valores obtenidos a partir del ensayo de penetración son mayores que los obtenidos por permeabilidad bajo presión (Fig. 4.36). Esto es debido a:

- Las variaciones de permeabilidad en el interior de la muestra.
- El tiempo que se emplea para penetrar la muestra y durante el cual están cambiando las propiedades de ésta.
- La cantidad de cemento deshidratado que se hidrata durante el ensayo.

4.3.2.5 Permeabilidad a los gases bajo presión

La bibliografía referente a este tipo de ensayos es bastante limitada en comparación con los métodos de permeabilidad a líquidos. No obstante, los efectos de la permeabilidad al gas son importantes en relación con la durabilidad de las armaduras en el hormigón armado y pretensado.

En este caso, aunque puede seguir siendo válida la ley de Darcy, será necesario tener en cuenta los efectos de la compresibilidad del gas, por lo que dicha ley queda transformada en la siguiente expresión:

$$Q_2 = \frac{K \cdot A \cdot (P_1^2 - P_2^2)}{2 \cdot \theta \cdot l \cdot P}$$

donde P_1 y P_2 son respectivamente, las presiones de entrada y salida del

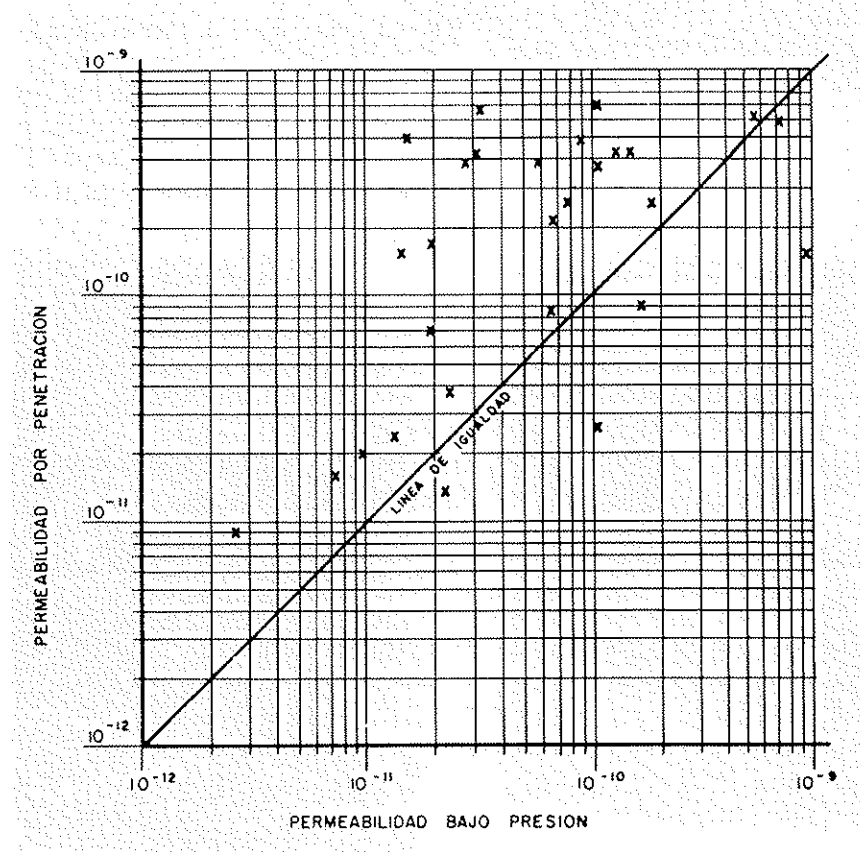


Fig. 4.36. RELACION ENTRE LOS COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE PENETRACION Y DE PERMEABILIDAD BAJO PRESION

gas de ensayo. Normalmente, el valor de P_2 coincide con la presión atmosférica. Además Θ , l , A representan respectivamente la viscosidad, el espesor de la muestra y el área de la misma.

No existe ninguna norma para la realización de este tipo de ensayos. En esencia, el equipo y el procedimiento de ensayo es análogo al empleado en el caso de líquidos. Un ejemplo de ello es el equipo utilizado por Alegre y Lechuga, del que ya se ha hecho mención anteriormente. Sin embargo, debido a la menor viscosidad de los gases, la cantidad de flujo es mayor y el tiempo necesario para alcanzar las condiciones estables del ensayo es menor que en el caso de líquidos.

Generalmente se utiliza aire u oxígeno como fluido de ensayo. Pero los métodos que, hasta el momento, se han desarrollado son muy variados en sus condiciones de ensayo. El curado, desecación y humedad de las muestras son diferentes en cada uno de ellos, lo que hace que los resultados obtenidos no sean comparables.

En España, Muñoz Martialay ha desarrollado un método de ensayo de este tipo. El equipo consta fundamentalmente de tres dispositivos (Fig. 4.37.):

- un dispositivo para el suministro de aire a presión.
- un dispositivo para la colocación de la probeta a ensayar.
- un dispositivo para la medida de los caudales de aire filtrados a través de la probeta.

En el año 1984, durante el Seminario de la RILEM sobre "Durabilidad de estructuras de hormigón a la intemperie", se presentaron los resultados de un programa de cooperación entre siete laboratorios europeos para medir la permeabilidad al oxígeno del hormigón. Se utilizaron equipos similares en su diseño, y procedimientos de ensayo unificados. Se observó bastante

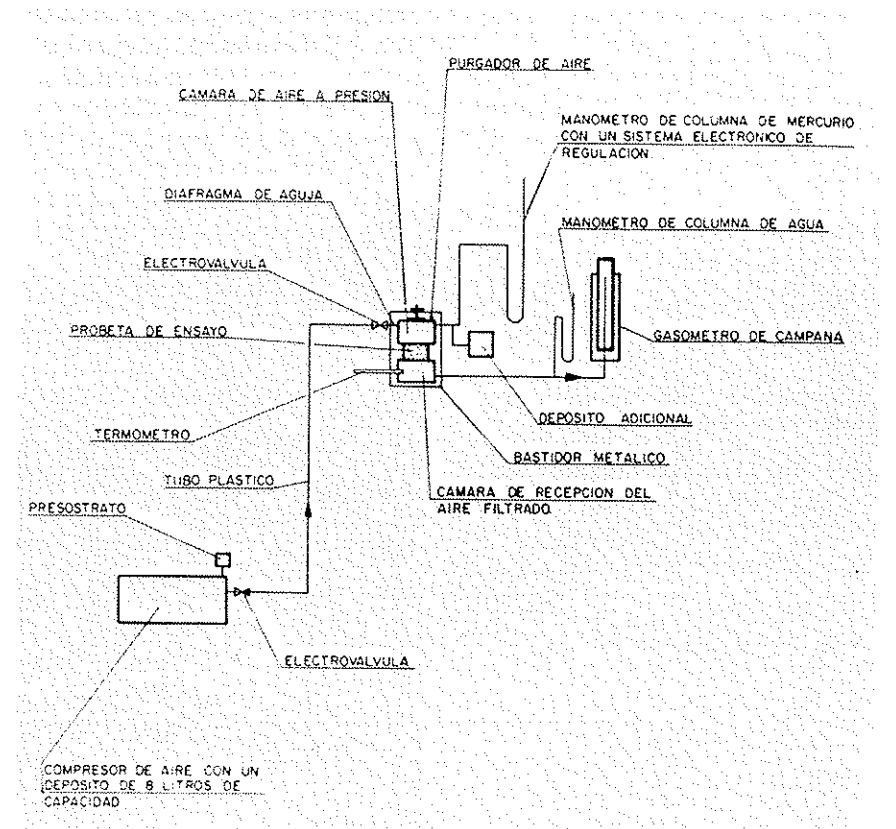


Fig. 4.37. ESQUEMA DEL PERMEABILIMETRO DISEÑADO PARA LA REALIZACION DE LOS ENSAYOS

dispersión en los resultados, lo que fué atribuído a pequeñas diferencias entre los procedimientos de curado y las condiciones particulares de los diversos laboratorios. En esto se basa la conclusión de que las medidas de permeabilidad al oxígeno constituyen una indicación fiable de la calidad del hormigón, dada la sensibilidad que se observa frente a pequeños cambios en la dosificación y grado de curado. (Fig. 4.38).

4.3.2.6 Difusión de gas

Este tipo de ensayo consiste fundamentalmente en la creación de corrientes de oxígeno y nitrógeno sobre dos caras opuestas de una probeta en forma de disco, para medir la proporción de oxígeno que se incorpora a la corriente de nitrógeno después de haber pasado a través del hormigón.

La duración del curado tiene una importante influencia en el coeficiente de difusión del oxígeno, así como el contenido de humedad de la muestra, lo cual es necesario tener en cuenta para una correcta interpretación de los resultados.

4.3.2.7 Difusión de vapor de agua

Este método sirve para determinar el coeficiente de difusión en condiciones estables y no saturadas, si el fluido que se transporta es vapor de agua. Este fenómeno puede representarse por la siguiente expresión:

$$Q = K_p \cdot \frac{dp}{dx}$$

donde Q es el volumen de flujo por unidad de área, Kp es el coeficiente de difusión y dp/dx es el potencial de presión de vapor.

Se define a Kp como coeficiente de difusión, porque la transmisión de vapor de agua está motivada por una diferencia entre las concentraciones de humedad. Por lo tanto, éste será el único caso en que se puedan aplicar los dos conceptos de gradiente de concentración y de diferencial de presión.

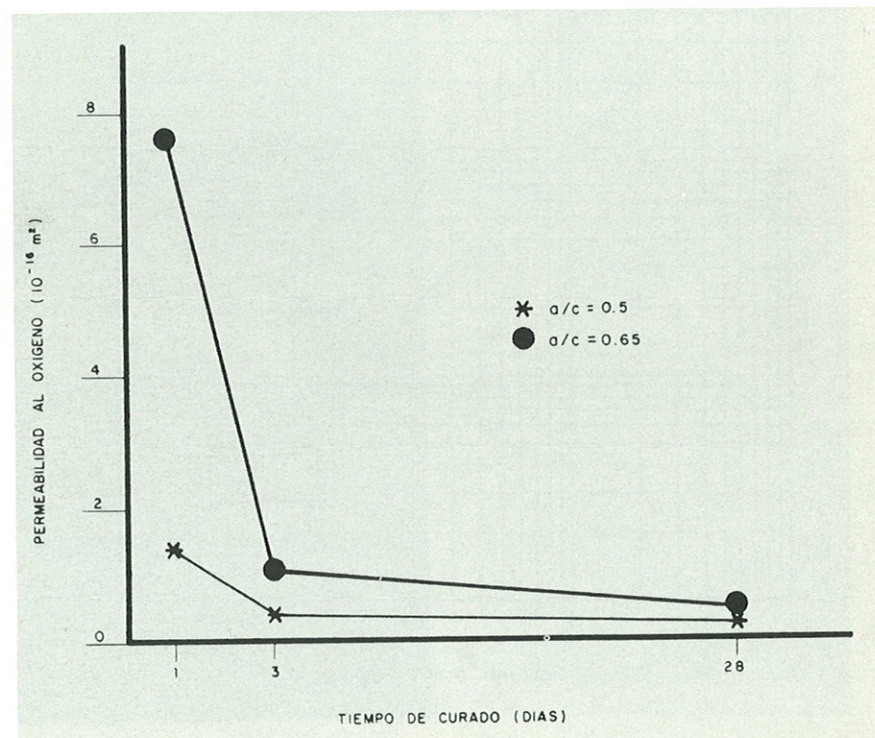


Fig. 4.38. RELACION ENTRE LA PERMEABILIDAD AL OXIGENO Y EL TIEMPO DE CURADO

El equipo para realizar este ensayo se muestra en la Fig. 4.39. La humedad se difunde a través de los poros de la muestra y es captada por el desecante. Pesando el recipiente y la muestra a intervalos regulares, se puede observar cuando se ha alcanzado una situación estable.

4.3.2.8 Difusión iónica

De este ensayo ya se ha hecho referencia al hablar de la relación entre porosidad y difusión. Tan sólo cabe recordar que no existe ninguna norma para su realización, por lo que hay una gran variedad en las condiciones de los ensayos que hasta ahora se han llevado a cabo, aunque el fundamento de todos ellos es el mismo: crear un gradiente de concentración entre dos caras opuestas de una muestra de pequeños espesor.

4.3.2.9 Otros métodos

Existen, además de los ya indicados, otros métodos relacionados con la permeabilidad del hormigón, aunque su importancia es muy limitada.

Entre estos métodos, se pueden citar los basados en la atenuación de radiaciones, técnicas de alta presión, transitorios de presión, presión osmótica, etc.

4.4 OTROS ENSAYOS DE MEDIDA INDIRECTA: MEDIDA DE LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACION

El proceso de carbonatación del hormigón, al que ya se ha hecho referencia al tratar sobre la durabilidad del mismo, no depende exclusivamente de la permeabilidad. Es cierto que en él juega un importante papel la difusión del anhídrido carbónico, pero también incluye otros procesos: alguno de los cuales, como es el caso de la reacción química de carbonatación, depende de factores adicionales.

Por tanto, el ensayo de determinación de la profundidad de carbonatación no ofrece una medida de la permeabilidad, ni tan siquiera un índice de la misma, pero sí permite una estimación importante sobre el estado de deterioro en el que se encuentra el hormigón que se ensaya.

En la actualidad, existe un proyecto de Recomendación de la RILEM sobre este ensayo, la CPC-18. El procedimiento propuesto consiste en obtener

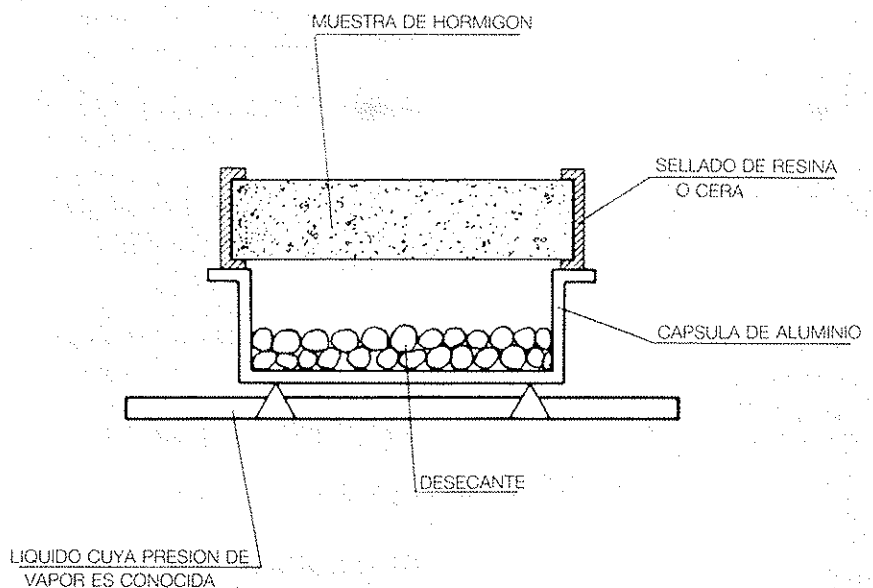


Fig. 4.39. EQUIPO PARA EL ENSAYO DE DIFUSION DE VAPOR DE AGUA

en cada fecha de ensayo una capa de la probeta, que se limpia en su superficie de rotura, y que posteriormente se rocía con una solución indicadora que contiene un 1% de fenolftaleína en alcohol etílico al 70%. A las 24 horas, se observa la forma que tiene el frente de carbonatación.

4.5 UTILIZACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS

4.5.1 PRESCRIPCIONES EXISTENTES EN LAS NORMAS

La creciente importancia que va obteniendo el hecho de realizar un hormigón durable lleva a pensar en la elección de algún tipo de ensayo de permeabilidad cuyos resultados se puedan comparar con otros valores, considerados como límites, y que se deben cumplir o no en función de las características del elemento estructural.

Para llevar a cabo dicho propósito sería necesario definir un ensayo, así como los valores que sirvieran de prescripciones cuyo cumplimiento fuera necesario para favorecer una mayor durabilidad. Sin embargo, en el actual estado del conocimiento sobre el tema, esto no ha sido conseguido salvo en algún caso particular. Las razones de ello pueden resumirse en dos. En primer lugar, existe una carencia de datos sobre qué métodos de ensayo pueden reproducir mejor cada uno de los riesgos particulares que sufre el hormigón durante su vida en servicio. Además, a la gran importancia de este primer punto, hay que añadir que no se tienen suficientes resultados de cada ensayo, por lo que tan sólo se pueden apuntar los valores más usuales, a modo de indicación sobre la calidad del hormigón.

Sin embargo, y como antes se indicó, existen algunas excepciones para las cuales las normativas de varios países recogen ciertos valores para alguno de los ensayos de permeabilidad. A continuación, se indicarán algunos ejemplos de estas especificaciones.

4.5.1.1 Ensayos de filtración de estructuras completas

Norma BS 5911: Parte 1: 1981

Se utiliza en tuberías de hormigón para drenaje y alcantarillado. El criterio de aceptación es que la tubería ensayada resista una presión hidrostática interna de $0,14 \text{ N/mm}^2$ durante un período de un minuto sin que aparezcan fisuras, filtraciones ni otros signos de mal comportamiento.

Instrucción del Instituto Eduardo Torroja para tubos de hormigón armado o pretensado

Distingue entre ensayos sobre probetas y sobre tubos. La propia norma indica que, de forma orientativa, se pueden considerar los siguientes límites:

- Cantidad de agua absorbida en ensayos de permeabilidad realizados sobre tubos: $1,30 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ durante la tercera hora de ensayo, y como valor medio $0,60 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$.
- Cantidad de agua absorbida en ensayos de permeabilidad efectuados sobre probetas: $0,02 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ durante la tercera hora de ensayo.

4.5.1.2 Ensayo de absorción de agua

Norma BS: 5911: Parte 1: 1981

Se utiliza para tuberías de hormigón. El método de ensayo es prácticamente el mismo que el indicado en la BS: 1881: Parte 122: 1983, pero se incluye una fase adicional de inmersión durante un período de 24 horas. Los límites de aceptación son que la absorción de agua no supere el 3,6 % después de 30 minutos, ni el 6,5 % después de 24 horas.

Esta es una norma referida a las baldosas de hormigón que se utilizan para pavimentación. Sigue un procedimiento análogo al descrito en la BS 1881: Parte 122: 1983. Los límites aceptables en los resultados vienen definidos en función de la edad a la que se realiza el ensayo. Tabla 4.4.

TABLA 4.4 Límites de la absorción de agua

Edad de la muestra en el ensayo (meses)	Máxima absorción media en peso (%)
Hasta 1	3,6
Hasta 2	3,2
Hasta 3	3,0
Hasta 4	2,9
Hasta 5	2,8
Más de 6	2,7

4.5.1.3 Ensayo de penetración de agua

Proyecto de ENV 206

El actual proyecto de norma ENV-206 "Concrete Performance, Production, Placing and Compliance Criteria", con fecha de Abril de 1988, contiene en su apartado 6.2.2. ("Durability requirements related to environmental conditions") una tabla, la número 3, en la que se indican las especificaciones que debe cumplir el hormigón para que posea una adecuada durabilidad en relación con el tipo de exposición ambiental. En dicha tabla, se introduce como requisito la consecución de un hormigón impermeable, para siete de los nueve tipos de exposición considerados en el mencionado proyecto de Norma. Concretamente, se indica como necesaria esta característica del hormigón para los siguientes ambientes:

- Ambiente húmedo con helada.
- Ambiente húmedo con helada y sales fundentes.
- Ambiente marino (con o sin helada).
- Ambiente químicamente agresivo (suave, moderado o altamente agresivo).

Para estimar la impermeabilidad de un hormigón se remite, en dicha tabla 3, al apartado 7.3.1.5. ("Resistance to water penetration"), cuyo contenido es el siguiente:

"La dosificación será considerada adecuada para un hormigón impermeable al agua si la resistencia a la penetración de agua se ensaya según la Norma ISO 7031, obteniéndose valores para la penetración máxima inferiores a los 50 mm y para la penetración media inferiores a los 20 mm. La relación agua/cemento no superará el valor de 0,55".

Norma DIN 1045

Es una norma de carácter general sobre diseño y construcción de hormigón en masa o armado, con finalidad análoga a la EH-88 española. Fija unos valores máximos admisibles para la profundidad de penetración de agua,

en función de las propiedades que se pretende que tenga el hormigón.
Tabla 4.5.

TABLA 4.5. Valores máximos de la profundidad de penetración.
(DIN 1045)

PROPIEDAD DEL HORMIGON	MAXIMA PROFUNDIDAD DE PENETRACION (mm)
Impermeable al agua	50
Resistente a la helada	50
Resistente a ataque químico ligero	50
Resistente a ataque químico fuerte	30
Resistencia a ataque químico muy fuerte (además, aplicar un revestimiento al hormigón)	30
Resistente al agua de mar	50

4.5.2 CLASIFICACION DE UN HORMIGON EN FUNCION DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS

En la tabla 4.6. se da una posible clasificación de un hormigón en función de los valores que se obtienen en cada uno de los principales métodos de ensayo anteriormente citados. Sin embargo, hay que advertir que los valores indicados no tienen, en ningún momento, carácter de limitación exacta, ya que debido a la diversidad que se presenta en las técnicas de ensayo así como en la calidad de las muestras, se pueden obtener diferencias significativas en los resultados sin que ello implique una variación real en la calidad del hormigón.

TABLA 4.6 Valores típicos de los principales ensayos de permeabilidad, absorción y difusión

METODO DE ENSAYO	UNIDADES	PERMEABILIDAD/ABSORCION/DIFUSION		
		BAJA	MEDIA	ALTA
Permeabilidad intrínseca Coeficiente de permeabilidad al agua Coeficiente de permeabilidad al gas	m ² m/s m/s	< 10 ⁻¹⁹ < 10 ⁻¹² > 5.10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹⁹ – 10 ⁻¹⁷ 10 ⁻¹² –10 ⁻¹⁰ 5.10 ⁻¹⁴ –5.10 ⁻¹²	> 10 ⁻¹⁷ > 10 ⁻¹⁰ > 5.10 ⁻¹²
ISAT 10 min. 30 min. 1 h. 2 h.	m/m ² /s	< 0.25 < 0.17 < 0.10 < 0.07	0.25–0.50 0.17–0.35 0.10–0.20 0.07–0.15	> 0.50 > 0.35 > 0.20 > 0.15
Figg (Absorción de agua 50 mm. (Hormigón seco)	s	> 200	200–100	< 100
Ove Arup (Permeabilidad al aire) – 55 KPa a –50 KPa	s	> 300	300–100	< 100
Absorción de agua (a los 30 min.)	%	< 3	3–5	> 5
Profundidad de penetración (a los 4 días) DIN 1048	mm	< 30	30–60	> 60
Coeficiente difusión de oxígeno (28 días)	m ² /s	< 5.10 ⁻⁸	5.10 ⁻⁸ –5.10 ⁻⁷	> 5.10 ⁻⁷
Coeficiente aparente de difusión de Cloruros	m ² /s	< 10 ⁻¹²	10 ⁻¹² –5.10 ⁻¹²	> 5.10 ⁻¹²

2

1

ANEJO 1
PRESCRIPCIONES SOBRE PERMEABILIDAD

A.1 ENSAYO ISAT

A.1.1 Norma BS 1881: Parte 5: 1970. "Methods of testing hardened concrete for other than strength".

A.2 ENSAYO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES COMPLETOS

A.2.1 Instrucción del Instituto Eduardo Torroja para tubos de hormigón armado o pretensado (1980). Ensayos de permeabilidad y porosidad.

A.3 ENSAYO DE ABSORCION

A.3.1 Norma BS 1881: Parte 122: 1983. "Method for determination of water absorption".

A.3.2 Recomendación provisional RILEM CPC-11.1. "Absorption of water by immersion".

A.3.3 Recomendación provisional RILEM CPC-11.2. "Absorption of water by capilarity".

A.3.4 Recomendación RILEM CPC-11.3. "Absorption of water by immersion under vacuum".

A.3.5 Norma BS 368: 1971. "Specification for precast concrete flags. Test for the absorption of water".

A.3.6 Norma ASTM C497-M. "Standard Methods of Testing Concrete Pipe, Sections or Tile. Absorption Test".

A.3.7 Norma ASTM C642. "Standard Test Method for Specific Gravity, Absorption, and Voids in Hardened Concrete".

A.4 ENSAYO DE PROFUNDIDAD DE PENETRACION DE AGUA

A.4.1 Recomendación provisional RILEM CPC 13.1. "Test for the penetration of water under pressure on hardened concrete".

A.4.2 Norma ISO/DIS 7031: 1983. "Concrete hardened. Determination of the depth of penetration of water under pressure".

A.5 ENSAYO DE PERMEABILIDAD AL AGUA BAJO PRESION

A.5.1 Recomendación provisional RILEM CPC-13.2. "Test for permeability of porous concrete".

A.5.2 Norma ISO/DIS 7032: 1983. "Concrete hardened. Determination of permeability".

A.6 OTROS ENSAYOS

A.6.1 Recomendación RILEM CPC-18. "Measurement of hardened concrete carbonation depth".

A.7 NORMATIVA ESPAÑOLA

A.7.1 Normas U.N.E. (en fase de proyecto).

BIBLIOGRAFIA

- ALEGRE, S.; LECHUGA, J.A. "Permeabilidad del hormigón a los gases y líquidos. Nuevo método de determinación". *Materiales de construcción*. Vol 34. Nº 195. Julio/Agosto/Septiembre 1984 pág. 3-15.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. "Microscopical determination of air-void content and parameters of the air-void system in hardened concrete". ASTM C 457. 1971.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. "Standard test for specific gravity, absorption and voids in hardened concrete". ASTM C 642. 1982.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. "Standard methods of testing concrete pipe, sections or tile. Absorption". ASTM C 497. 1983.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. "Standard methods of testing concrete pipe, sections or tile. Permeability". ASTM C 497. 1983.
- BERISSI, R.; BONNET, G.; GRIMALDI, G. "Mesure de la porosité ouverte des bétons hydrauliques." *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*. Nº 142. Marzo/Abril 1986. pág. 59-67.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. "Methods of testing hardened concrete for other than strength. Test for determining the initial surface absorption of concrete". BS 1881: Parte 5: 1970. pág. 27-35.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. "Specification for precast concrete flags". BS 368: 1971.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. "Testing concrete. Method for determination of water absorption". BS 1881: Parte 122: 1983.
- BRUNAUER, S.; EMMETT, P.H.; TELLER, E. "Absorption of gases in multi-molecular layers." *Journal of American Chemistry Society* Nº 60. 1938. Pág. 309.
- BUENFELD, N.R.; NEWMAN, J.B. "The permeability of concrete in a marine environment". *Magazine of Concrete Research*. Vol 36. Nº 127. Junio 1984. pág. 67-80.
- BUNGEY, J.H. "The testing of concrete in structures." *Survey University Press*. Nueva York. 1982.
- BUTT, Y.M.; KOLBASOV, V.M.; BERLIN, L.E.; MELNITSKY, G.A. "An application of mercury porosimetry. Method to pore structure research of cement stone and clinker". *Proceedings of the RILEM/IUPAC International Symposium on Pore Structure and properties of materials*. Praga. 18-21. Septiembre 1973. Final Report. Part II. pág. C407-C414.
- CADY, P.D. "Corrosion of reinforcing steel in concrete. A general overview of the problem." *Chloride corrosion of steel in concrete*. ASTM STP 629. Philadelphia. 1977. pág. 3-11.

- CATHER, R.; FIGG, J.W.; MARSDEN, A.F.; O'BRIEN, T.P. "Improvements to the Figg method for determining the air permeability of concrete". Magazine of concrete research. Vol 36. Nº 129. Diciembre. 1984. pág. 241-245.
- CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACION DE OBRAS PUBLICAS. "Técnicas experimentales para la evaluación del estado estructural". 1985.
- CHANTREE, P.A. "Measurement of rates of water absorption of concrete". Sulphate resistance of buried concrete. Second interim report on long-term investigation at Northwick Park. BRE Report. Londres. 1981. pág. 58-61.
- CHEKHOVSKY, J.V.; BERLIN, L.E.; BRUSSER, M.I. "Investigation into cement concrete porous structure and its relationship with technological factors and physical properties of concrete". Proceedings of the RILEM/IUPAC International Symposium on Pore Structure and Properties of Materials. Praga. 18-21 Septiembre. 1973. Preliminary Report. Parte I. pág. B51-B71.
- CLARKE, J.N. "Testing concrete durability - The work of the Concrete Society". Concrete. Vol 20. Nº 1. Enero 1986. pág. 29-30.
- COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON. "Durability of concrete structures. State-of-the art Report". Bulletin d'information Nº 148. 1982.
- COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON "Durability of concrete structures. Report of CEB-RILEM International Workshop". Bulletin d'information nº 152. Copenhague. Mayo 1983.
- ERLIN, B.; VERBECK, G.J. "Corrosion of metals in concrete. Needed research". Corrosion of metal in concrete. Publication ACI-SP 49. 1975. pág. 39-46.
- FAGERLUND, G. "Strength and porosity of concrete". Proceeding of the RILEM/IUPAC International Symposium on Pore Structure and Properties of Materials. Praga. 18-21. Septiembre. 1973. Preliminary Report. Parte II D51-D73.
- FATTUHI, N.I. "Carbonation of concrete as affected by mix constituents and initial water curing period". Materials and structures. Vol 19. Nº 110. Marzo/Abril 1986. pág. 131-136.
- FIGG, J.N. "Methods of measuring the air and water permeability of concrete". Magazine of Concrete Research. Vol 25. Nº 85. Diciembre 1973. pág. 213-219.
- FINTEL, M. "Handbook of concrete engineering". Van Nostrand Reinhold Company. Nueva York. 1974.
- GABINETE DE APLICACIONES NUCLEARES A LAS OBRAS PUBLICAS. "Permeabilidad al aire de hormigones". Publicación EN-3. Madrid. 1967.
- GERWICK, B.C. "Implications of recent developments in concrete ships and floating structures". FIP Notes. 1984.
- GOTO, S.; ROY, D.H. "Diffusion of ions through hardened cement pastes". Cement and Concrete Research. Vol 11. Nº 5/6. Septiembre. 1981. pág. 751-757.

- GRUBE, H.; LAWRENCE, C.D. "Permeability of concrete to oxygen". RILEM Seminar on Durability of concrete Structures under normal outdoor exposure. Hanover. 26-29. Marzo 1984.
- HANSEN, A.I.; OTTOSEN, N.S.; PETERSEN, C.G. "Gas Permeability of concrete in situ: theory and practice". In Situ/Nondestructive Testing of Concrete. Publication ACI SP-82. 1984. pág. 543-556.
- HAYNES, J.M. "Determination of pore properties of constructional and other materials". Materials and Structures. nº 33. Mayo/Junio 1973 pág. 169-174.
- HAYNES, J.M. "Stereological analysis of pore structure". Materials and Structures. Nº 33. Mayo/Junio 1973. pág. 175-179.
- HO, D.W.S.; LEWIS, R.K. "Water penetration into concrete. A measure of quality as affected by material composition and environment". Perth Conference. 20-21 Octubre 1983.
- INSTITUTO EDUARDO TORROJA DE LA CONSTRUCCION Y EL CEMENTO. "Normas del Instituto Eduardo Torroja para tuberías de hormigón armado y pretensado". Madrid. 1980.
- INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. "Concrete hardened. Determination of the depth of penetration of water under pressure." Génova. 1983. Norma ISO/DIS 7031.
- INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION "Concrete hardened. Determination of permeability". Génova. 1983. Norma ISO/DIS 7032.
- INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY. "Manual of symbols and terminology". IUPAC. 1972.
- JAKUBICK, A.T. "Vacuum logging for measurement of the integrity of the near excavation zone". Proceedings of the International Symposium on field measurements in geomechanics. Zurich. Septiembre 1983. Ed. A.A. Balkema Rotterdam. 1984.
- JIMENEZ MONTOYA, P.; GARCIA MESEGUER, A.; MORAN CABRE, F. "Hormigón Armado". Ed. Gustavo Gili. Barcelona. 1981.
- KASAI, Y.; MATSUI, I.; NAGANO, M. "On site rapid air permeability test for concrete". In situ/Nondestructive testing of Concrete. Publicación ACI SP-82. 1984. pág. 525-541.
- KLIEGER, P. "Air-Entraining Admixtures". Significance of test and Properties of Concrete. Making Materials. ASTM. Publicación STP 169B. 1978. pág. 787-803.
- KREIJGER, P.C. "The skin of concrete. Composition and properties". Materials and Structures. Vol. 17. Nº 100. Julio/Agosto 1984. pág. 275-283.
- LEVITT, M. "Applications of the initial surface absorption test". Proceedings of RILEM Symposium on Durability of Concrete. Praga. 1969. pág. A49-A53.
- LEVITT, M. "The ISAT for limit state design for durability" Concrete. Vol 19. Nº 7. Julio 1985. pág. 29.
- LIN, C.Y.; HWANG, C.L. "The effect of fly ash on properties of cement mortar". II International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, slag

- and Natural Pozzolans in Concrete. Supplementary Papers. Madrid. 1986. ACI. Paper N° 21.
- MARECOS, J. "Research and following of concrete structures". Materials and Structures. Vol 18. N° 107. Septiembre/Octubre 1985. pág. 349-352.
- MC CURRISH, L.H. "Permeability testing of site concrete. A review of methods and experience". Permeability of concrete and its Control. Papers for a one-day Conference. The Concrete Society. Londres. Diciembre. 1985.
- MIDGLEY, H.G.; ILLSTON, J.M. "Some comments on the microstructure of hardened cement pastes". Cement and Concrete Research Vol 13. N° 2. Marzo 1983. pag. 197-206.
- MIDGLEY, H.G.; ILLSTON, J.M. "The penetration of chlorides into hardened cement pastes". Cement and Concrete Research. Vol 14. N° 4. Julio 1984. pág. 546-558.
- MOSKVIN, V. "Concrete and Reinforced Concrete. Deterioration and Protection". Mir Publisher. Moscú. 1983.
- MUÑOZ MARTIALAY, R. "Permeabilidad al aire del hormigón". Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del cemento. Monografía N° 332. Madrid. 1975.
- MURATA, J. "Studies on the permeability of concrete". Bulletin RILEM N° 29. Diciembre 1965. pág. 47-54.
- NAGATAKI, S.; UJIKE, I. "Air permeability of concrete mixed with fly ash and condensed silica fume". Proceedings of the II International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, slag and Natural Pozzolans in Concrete. Madrid. 1986. ACI SP-91. pág. 1049-1068.
- NEWMAN, K. "The structure and properties of concrete. An introductory review". Proceedings of an International Conference on the structure of concrete and its behaviour under load. Cement and Concrete Association. Londres. Septiembre. 1965 pág. XIII-XXXII.
- NYAME, B.K.; ILLSTON, J.M "Relationships between permeability and pore structure of hardened cement paste". Magazine of Concrete Research. Vol 33. N° 116. Septiembre 1981 pág. 139-146.
- NYAME, B.K. "Permeability of normal and lightweight mortars" Magazine of Concrete Research Vol 37. N° 130. Marzo-1985 pág. 44-48.
- PAGE, C.L.; SHORT, N.R.; EL TARRAS, A. "Diffusión of chloride ions in hardened cement pastes". Cement and Concrete Research. Vol 11. n° 3. Mayo 1981. pág. 395-406.
- PAYNE, J.C.; DRANSFIELD, J.M. "Influence of admixtures and curing on permeability". Permeability of Concrete and its Control. Papers for a one-day Conference. The Concrete Society. Londres Diciembre 1985.
- PETERSEN, C.G. Comunicación privada 1986.
- PIHLJAVAARA, S.E.; PAROLL, H. "On the correlation between permeability properties and strength of concrete". Cement and Concrete Research. Vol 5. n° 4. Julio. 1975. pág. 321-328.

- RICHARDS, P.W. "A laboratory investigation of the water permeability and crushing strength of concrete made with and without pulverised fuel ash, as affected by early curing temperature". Advanced concrete Project 82/9. Slough, cement and Concrete Association. 1982.
- RILEM. Recomendación CPC 11.1 "Absorption of water by immersion". 1974.
- RILEM. Recomendación CPC 11.2 "Absorption of water by capillarity" 1974.
- RILEM. Recomendación provisional CPC 13.1. "Test for the penetration of water under pressure on hardened concrete". 1979.
- RILEM. Recomendación provisional CPC 13.2 "Test for permeability of porous concrete". 1979.
- RILEM. Recomendación CPC 11.3. "Absorption of water by immersion under vacuum". 1984.
- RILEM. Recomendación CPC 18. "Measurement of hardened concrete carbonation depth". 1985.
- ROSE, D.A. "Water movement in unsaturated porous material". RILEM Bulletin nº 29. Diciembre 1965. pág. 119-124.
- SCHIESSL, P. "Protection of reinforcement". CEB. Bulletin d'information nº 152. Report of CEB-RILEM International Workshop on Durability of Concrete Structures. Copenhagen. Mayo. 1983.
- TENOUTASSE, N.; MARION, A.M. "The influence of silica-fume on the hydration and microstructure of OPC pastes". II International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, slag and Natural Pozzolans in Concrete. Supplementary Papers. Madrid. 1986. Paper Nº 31.
- VALENTA, O. "The permeability and the durability of concrete in aggressive conditions". Proceedings of the X Congress on Large Dams. Montreal. 1970.
- VALENTA, O. "From the Second RILEM Symposium Durability of Concrete in Prague". Materials and Structures. Vol 3. Nº 17. Septiembre/Octubre 1970. pág. 333-346.
- VERBECK, G. "Pore Structure". Significance of Test and Properties of Concrete – making materials. ASTM. Publicación STP 169 B. 1978. pág. 262-274.
- VIVO GIRON, S.; MUÑOZ MARTIALAY, R. "Permeabilidad al agua de tubos de hormigón". Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del cemento. Monografía nº 344. Madrid. 1977.
- VOURINEN, J. "On the calculation of the permeability coefficient of concrete". Proceedings of RILEM Symposium on Durability of Concrete. Final Report. Praga. 1969. pág. A87-A89.
- VOURINEN, J. "Applications of diffusion theory to permeability tests on concrete. Part I. Depth of water penetration into concrete and coefficient of permeability". Magazine of Concrete Research Vol 37 Nº 132. Septiembre 1985. pág. 145-152.
- VOURINEN, J. "Applications of diffusion theory to permeability test on concrete. Part II: Pressure-saturation test on concrete and coefficient of per-

meability". Magazine of Concrete Research Vol 37. nº 132. Septiembre 1985. pág. 153-161.

WIGGS, P.K.C. "The relation between gas permeability and pore structure of solids". Proceedings of the Tenth Symposium of the Colston Research Society on Structure and Properties of Porous Materials. 24-27 Marzo 1958. Butterworths Scientific Publications Londres. pág. 183-188.

WRIGHT, J.R.; FROHNSDORFF, G. "Durability of building materials: Durability research in the United States and the influence of RILEM on durability research". Materials and Structures Vol 18. nº 105. Mayo 1985. pág. 205-214.

ZAGAR, L. "Methods of determination of pore structure. Permeability and diffusion". Proceedings of the RILEM/IUPAC International Symposium on Pore Structure and Properties of Materials. Praga. 18-21. Septiembre 1973. Final Report Part II. pág. C 249-C 272.

CODIGOS NACIONALES E INTERNACIONALES DE CARACTER GENERAL MENCIONADOS EN EL TEXTO

COMISION PERMANENTE DEL HORMIGON. "Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado" *EH-88*. Madrid. 1988.

COMISION PERMANENTE DEL HORMIGON. "Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón pretensado". *EP-80*. Madrid 1980.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. "Building Code Requirements for Reinforced Concrete". *ACI-318*. Detroit. 1986.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. "The Structural use of concrete". *CP-110*. Londres. 1972.

UNION TECHNIQUE INTERPROFESSIONNELLE DE FEDERATIONS NATIONALES DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS. "Regles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en beton armé suivant la méthode des états limites". *BAEL-83*. Paris 1984.

UNION TECHNIQUE INTERPROFESSIONNELLE DE FEDERATIONS NATIONALES DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS. "Regles techniques de conception et de calcul de ouvrages et constructions en beton precontraint suivant la méthode des états limites". *BPEL-83*. Paris 1984.

DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG. "Beton und Stahlbeton; Bemessung und Ausführung". *DIN 1045*. Berlin 1978.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON "Código - Modelo CEB-FIP para las estructuras de hormigón". 1977.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION TECHNICAL COMMITTEE CEN TC/104. "Concrete: performance, production, placing and compliance criteria". pr *ENV-206*. Bruselas. 1988.

