

La penetrabilidad del hormigón al agua y a los iones agresivos, como factor determinante de su durabilidad

Profesor RÍO

Sr. Calleja

Un deber ineludible impide que el Director del Instituto, D. Francisco Arredondo, haga como era su deseo, la presentación del conferenciante de hoy, Prof. Río. A última hora me ha encargado a mí de hacerla.

Presentar a quien no lo necesita, es fácil; presentar a un amigo, es grato. De aquí que, por concurrir en esta ocasión las dos circunstancias, hace que la presentación del Prof. Río sea para mí fácil y grato. Los que me escuchan pensarán además que la presentación que hago es una presentación de amigo. Aciertan, porque el Prof. Río y yo lo somos, y buenos, desde hace bastantes años. Pero se equivocarían si pensaran que los elogios que inevitablemente he de hacer de él, se deben más a la amistad que a justos y densos méritos propios del presentado. El Prof Río es ante todo, en lo humano, una excelente persona.

El Prof Río lo es de la Universidad de Roma. Es también el Director de los Laboratorios y el jefe del grupo de investigación de la firma Cementisegni de Colleferro, Roma. Laboratorios e Investigación que no se circunscriben sólo al cemento, sino que abarca otros diversos campos y materiales —plásticos, explosivos, etc.— Aunque tengo para mí que la mayor dedicación y afición la ha centrado y centra el Prof. Río en el Cemento.

En este campo destaca hoy como una de las principales figuras, de las varias italianas pasadas —Quirino, Sestini, Santarelli, Fabio Ferrari— y presentes, en la investigación sobre los sistemas del clínker y de la pasta hidratada del cemento, sobre las fases aluminoferríticas, sobre las puzolanas y los cementos puzolánicos y sobre tantos otros temas como ponen de manifiesto sus muchas e interesantes publicaciones y su actividad internacional.

Ha formado a numerosos investigadores y colaboradores que ya son hoy figuras en estas parcelas de la investigación sobre el cemento.

El Prof. Río tiene una pequeña y legítima vanidad: la de ser, pese a su relativa juventud y a su aspecto indudablemente joven, el decano de los miembros del grupo de Trabajo del Cembureau para el estudio de los métodos de ensayos de cemento y hormigón.

En este grupo preside el Subcomité que se ocupa de la penetrabilidad del hormigón, tema de su conferencia de hoy.

305

De la importancia de la porosidad, permeabilidad y, en suma, de la penetrabilidad del hormigón en la durabilidad del mismo, estamos todos persuadidos. Baste considerar que un hormigón compacto y poco penetrable, aunque hecho con materiales no muy adecuados puede ser durable; mientras que otro hecho con materiales idóneos, pero penetrable y poco denso, no lo es.

De todo ello nos va a hablar, con su gran conocimiento del tema, el Prof. Río, a quien doy la bienvenida una vez más a esta casa y a quien cedo la palabra. Caro Arturo, prego!

* * *

Como se sabe, la resistencia al ataque químico del hormigón depende, esencialmente, de la resistencia química intrínseca del conglomerante y de los áridos con los cuales el hormigón está fabricado e, incluso, de la compacidad e impermeabilidad que presenta.

En tanto que la primera condición se cumple sólo para determinados tipos de cementos, la segunda es más fácil de realizar y permite el empleo de conglomerantes corrientes, por lo menos dentro de unos límites de agresividad bien determinados.

En estos últimos tiempos, el interés de los investigadores se ha desplazado de una manera concreta, desde el estudio de la resistencia química intrínseca de los conglomerantes, hacia el de la permeabilidad o, mejor, de la penetrabilidad de los correspondientes hormigones. Ayuda a este criterio las dificultades que encierran una valoración y normalización válida de la resistencia química de un conglomerante. Es decir, se advierte la tendencia a cambiar de una evaluación sustancialmente química del problema, a una sustancialmente física.

Por consiguiente, es de gran interés el estudio de la penetrabilidad de un hormigón a partir del análisis de su durabilidad, en la que la resistencia química es, sin duda, un factor fundamental.

Por lo demás, la idea de penetrabilidad explica bastante bien la resistencia química intrínseca notable de algunos cementos, tales como, por ejemplo, ciertos conglomerantes puzolánicos. Para estos cementos, la resistencia depende, sobre todo, de la gran cantidad de silicatos cálcicos hidratados formados que representan un valioso obstáculo en la penetración de iones agresivos.

El estudio de la penetrabilidad no debe limitarse tan sólo al agua, sino que también debe extenderse a la penetración de los iones agresivos presentes en la disolución que está en contacto con el hormigón.

La durabilidad con respecto a los agentes atmosféricos, tales como el hielo, depende principalmente de la primera condición citada, mientras que la durabilidad respecto a las sales agresivas, tanto para el hormigón propiamente dicho, como para las armaduras, que ha de proteger, depende sobre todo de la segunda.

Como veremos a continuación, la permeabilidad al agua es un fenómeno muy diferente que el referido a los iones en disolución. Esto es muy complejo, y depende, sobre todo, de la estructura atómica de los iones que penetran.

Con el fin de aclarar mejor el problema, hablaré en primer lugar de la penetrabilidad al agua del hormigón, y posteriormente a las sales agresivas, intentando finalmente resumir las conclusiones que podemos hacer, según el estado actual de nuestros conocimientos.

A) PENETRABILIDAD DEL HORMIGON AL AGUA

La penetrabilidad del hormigón al agua, ha sido estudiada en nuestros laboratorios, siguiendo el método de ensayo adoptado por el CEMBUREAU. Según este método, se mide la absorción de agua del hormigón a la presión atmosférica. Se ha preferido este método a medidas directas de permeabilidad o de percolación, a causa de la mayor simplicidad y reproducibilidad que presenta.

De una manera general, los ensayos de permeabilidad o de percolación son más complejos y menos reproducibles, bien por que miden un parámetro —la marcha del fenómeno— que es variable en función del tiempo, bien porque los datos registrados lo hacen sobre una pequeña sección de la probeta del hormigón, que es un material heterogéneo, o bien porque estos métodos —sobre todo la percolación— pueden alterar la microestructura del hormigón. Para no causar daños a la estructura se debe evitar realizar ensayos bajo presión.

Con respecto a esto, y para referirnos a condiciones prácticas, se ha calculado que la carga de agua de 10 cm es equivalente a la lluvia con un viento a una velocidad de 130 km/h.

En nuestros ensayos, las probetas de hormigón, una vez fabricadas, han sido conservadas 6 días bajo agua, y posteriormente, 21 días al aire con una humedad relativa del 65 % y una temperatura de 20°C.

Después de esta conservación, las probetas, ya pesadas, han sido introducidas en agua potable, con la superficie superior a 2-3 mm por encima del nivel del agua, a fin de facilitar la salida del aire atrapado en su interior. Después de 24 horas se sumergen completamente con una carga de, aproximadamente, 20 mm de agua.

Las probetas se pesaron de vez en cuando, antes y después de la inmersión completa, hasta peso constante. Después se secan a 105°C hasta peso constante, calculándose por diferencia la absorción de agua, en peso o en volumen, a las diferentes edades de observación, para determinar la absorción y el grado de saturación.

Además, con el propósito de resaltar mejor la penetrabilidad de los hormigones al agua, se ha medido la profundidad de penetración en el hormigón por medio de una disolución de eosina amarilla, añadida al agua de inmersión y dosificada a razón de 10 g/litro. Para este control hemos roto las probetas después del secado por el ensayo brasileño de tracción, y fotografiado los resultados.

Siguiendo las modalidades fijadas, se han efectuado tres series de ensayos para examinar la influencia de los diferentes parámetros sobre la penetrabilidad del hormigón al agua.

En la primera serie se ha examinado el comportamiento que a efectos de la absorción del agua, presentan hormigones fabricados con el mismo cemento (cemento portland), con la misma dosificación (300 kg/m^3), con la misma curva granulométrica ($P = 100 \sqrt{d/D}$), pero con diferente relación agua/cemento (0,5 — 0,63 — 0,69) y, por consiguiente, con diferente consistencia.

En la segunda serie se ha estudiado la influencia de la dosificación de cemento, manteniendo constantes los otros parámetros, con excepción de la relación agua/cemento que se ha variado para obtener la misma consistencia para todas las amasadas.

En la tercera serie de ensayos se ha estudiado la influencia del tipo de cemento empleado (cemento portland, cemento puzolánico y cemento de alto horno) manteniendo constantes las demás variables.

Para todos los ensayos se ha empleado el mismo tipo de árido, constituido por caliza triturada.

Hemos resumido los resultados obtenidos en las tablas 1, 2, 3 y 4 y las fotos que se incluyen en el trabajo.

Se destaca que la diferente relación agua/cemento, a igualdad de condiciones, influye mucho en el agua absorbida. En efecto, en la absorción en volumen aumenta desde un valor del 10 % para el hormigón más seco, hasta un 15 % para el hormigón más húmedo, con un aumento del 50 % aproximadamente.

Es también evidente la influencia que ejerce la dosificación del cemento. Su aumento, como era previsible, hace disminuir la penetrabilidad del agua. La absorción decrece aproximadamente un 20 % desde el hormigón más pobre hasta el más rico en cemento.

De una manera general, se observa, sin embargo, que la variación de la dosificación en cemento tiene una influencia menor que la manifestada con la variación en la relación agua/cemento. Quizás sea porque del agua total del amasado, tan sólo una parte es utilizada para la hidratación, aumentando también en proporción con la cantidad de cemento.

La posibilidad de obtener una mayor compacidad, —y consecuentemente una menor permeabilidad— por un aumento de cemento, se anula parcialmente por el aumento simultáneo de agua evaporable.

Con respecto a la influencia del tipo de cemento empleado, refiriéndose al agua total presente en las probetas después de la inmersión, el portland es el cemento que muestra una menor absorción. Si, por el contrario, se mide sólo el agua efectivamente absorbida durante la inmersión, el cemento portland y el puzolánico presentan el mismo comportamiento.

Es necesario hacer notar (como se puede comprobar en el diagrama que se incluye en este trabajo), que la cantidad de agua total contenida en las probetas después de la inmersión, hasta peso constante, es la suma de aquella verdaderamente absorbida durante la inmersión, más el agua presente en las probetas después de la conservación al aire en las condiciones fijadas por el método (21 días -20°C — H.R. = 65 %) antes de la inmersión y que es variable para los diferentes hormigones.

El agua absorbida, o mejor dicho, penetrada en los hormigones después del endurecimiento, es, sin duda, la que ejerce una mayor influencia sobre la durabilidad de los hormigones expuestos a la acción del hielo o a la de las aguas agresivas. Por consiguiente, la medida de la profundidad de la penetración, o aquella, en detalle, del agua absorbida durante la inmersión son más valiosas para la evaluación del comportamiento de los hormigones.

Además, los resultados de las medidas de la profundidad de la penetración, obtenidos por la adición de eosina amarilla al agua de inmersión, como se puede ver en las fotografías adjuntas, se corresponden con los resultados referentes al agua efectivamente absorbida por los hormigones durante la inmersión, pero no están de acuerdo con los resultados relativos al agua total que comprende también el agua evaporable a 105°C, preexistente en las probetas antes de la inmersión.

En efecto, como se puede comprobar en la tabla 4 y el diagrama n.º 2, el agua total de saturación del hormigón es prácticamente la misma, ya sea en las probetas previamente desecadas a 105°C, ya sea en las expuestas al aire a 50°C y 65 % de H.R., o ya sea en las conservadas a 20°C y a 90 % de H.R.

La cantidad variable, en estos casos, es la del agua contenida en las probetas antes de la inmersión y, en consecuencia, el agua absorbida durante la inmersión. Naturalmente, cambia también la profundidad de la penetración medida con la disolución coloreada. La mayor aparece para las probetas presecadas a 105°C y la más pequeña para las probetas conservadas a 20°C y 90 % de H.R.

Por consiguiente, la influencia de las distintas formas de conservación de las probetas antes de la inmersión en el agua es evidente, y tiene también valor para las demás medidas de permeabilidad o de percolación. A este respecto, el procedimiento más simple es secar previamente las probetas, pero, en nuestra opinión, tal solución es demasiado simple, y muy lejos de la práctica común.

Por lo que respecta a la influencia de los áridos sobre la absorción del agua en el hormigón, según los resultados de los ensayos todavía sin concluir, podemos adelantar que, en general, a igualdad de curva granulométrica y otros parámetros, los áridos constituidos por caliza machacada dan a los hormigones menos permeabilidad que los obtenidos con áridos rodados.

A este respecto debe recordarse que POWER ha demostrado que la pasta de cemento endurecida es un millón de veces menos permeable que el mejor hormigón. Podemos sacar en consecuencia, por consiguiente, que la permeabilidad de un hormigón está causada, sobre todo, por el paso del agua a través de los áridos o, mejor dicho, a través de los capilares existentes entre los áridos y la pasta del cemento.

Por consiguiente, las interacciones, incluso de naturaleza química (carboaluminatos) que pueden desarrollarse entre los áridos y el cemento hidratado, tienen también una gran influencia en la penetrabilidad del agua en el hormigón.

B) PENETRABILIDAD DEL HORMIGON A LOS IONES AGRESIVOS

El problema de la penetración de los iones agresivos en el hormigón presenta un interés general. No concierne solamente a la resistencia química intrínseca del hormigón frente a los iones más agresivos por parte de los constituyentes hidratados del cemento

(SO_4^{2-} , Mg^{2+}), sino también a la acción protectora que ha de cumplir el hormigón con respecto a las armaduras del hormigón armado.

De una forma particular, este segundo aspecto del problema es el que se va a tratar. Por ello, recordaré la actividad desarrollada por el Prof. TURRIZIANI, de la Universidad de Roma, y de sus colaboradores, en las investigaciones sobre la cinética de la penetración del ion cloruro en el hormigón. Trataré también de las relaciones existentes entre este fenómeno y los diversos parámetros que entran en la fabricación de un hormigón: la relación agua/cemento, el tipo de cemento, la compactación.

Por otra parte, la penetración de los cloruros en el hormigón no afecta solamente a la corrosión en presencia de oxígeno de las armaduras del hormigón armado. También es la causa principal del desconchado de los hormigones prefabricados expuestos a la acción de hielo y deshielo, sobre todo cuando se han tratado con productos "antihielo" muy ricos en cloruros.

Este ejemplo aclara las relaciones existentes entre la penetrabilidad y la durabilidad de una obra de hormigón.

El método empleado para esta investigación se basa en el contacto de las probetas cilíndricas del hormigón en estudio (diámetro, 5 cm; longitud, 10 cm), después del endurecimiento, con una disolución de CaCl_2 . Esta disolución se coloca dentro de un tubo de polietileno, que es coaxial y está bien acoplado a la probeta cilíndrica, con el fin de que la disolución penetre solamente a través del hormigón.

Las probetas se han protegido exteriormente por una capa de parafina para evitar fenómenos de difusión desde el interior hacia la superficie lateral no recubierta por el tubo de polietileno.

Se han empleado dos disoluciones de CaCl_2 que contienen 30 y 80 g/litro de la sal, respectivamente, y se cambian periódicamente. Las probetas se han conservado en contacto con la disolución de CaCl_2 en un termostato a 25°C , regulado a una H.R. del 100 %, aproximadamente, relativa a las disoluciones de contacto.

A las distintas edades de observación las probetas se han roto longitudinalmente, y sobre una de las mitades se ha medido con una reacción cromática la profundidad de la penetración del ion cloruro; mientras que la otra mitad se emplea para la determinación analítica de la concentración de los cloruros a lo largo de la dirección de avance de los iones.

Por estos medios se ha observado que la cinética de penetración de los iones cloruro está regida por el proceso de difusión de las leyes de FICK.

Una mayor concentración de la disolución de CaCl_2 no hace variar en forma sustancial la profundidad de la penetración de los iones Cl^- en el hormigón, pero sí produce un aumento en la cantidad de los iones penetrados a consecuencia del mayor gradiente de concentración.

El coeficiente de difusión (D) de los iones Cl^- en el hormigón es del orden de 10^{-8} cm^2/s a 25°C , mil veces, aproximadamente, más pequeño que el coeficiente de difusión del mismo ion en el agua.

A igualdad de condiciones, la influencia ejercida por la relación agua/cemento sobre la penetrabilidad de los iones cloruros en el hormigón es muy notable.

Como se puede observar en la tabla 5, relativa a hormigones confeccionados con diferentes tipos de cementos y con dos relaciones agua/cemento, los hormigones que tienen el valor de esta relación menor muestran una mayor compacidad y una mayor resistencia a la penetración. Basta disminuir 0,10 la relación agua/cemento para obtener coeficientes de difusión aproximadamente la mitad de los que corresponden a hormigones con una relación agua/cemento mayor.

En la misma tabla se puede observar que el coeficiente de difusión cambia sensiblemente según el tipo de cemento empleado.

Los hormigones que se han confeccionado con cemento puzolánico y con cemento de alto horno, producidos con el mismo clinker del portland, tienen coeficientes de difusión un 30 % menor.

El empleo de una puzolana con un alto contenido de sílice reactiva ha sido particularmente útil: en este caso el coeficiente de difusión disminuye más de un 40 %.

La diferente porosidad de los hormigones fabricados con distinta relación agua/cemento puede justificar la diferente velocidad de penetración y la mayor difusión en los hormigones con una relación agua/cemento mayor, al resultar más porosos. En todo caso, los resultados obtenidos para los distintos tipos de cemento demuestran que la porosidad del material no es el único factor que regula la velocidad de penetración de los iones.

En efecto, los hormigones hechos con cemento puzolánico y con cemento de alto horno presentan resistencias a la penetración más elevadas, aún cuando sean más porosos.

Por lo demás, los análisis de rayos X efectuados sobre las muestras atravesadas por los iones Cl^- no han mostrado la presencia de cloroaluminatos (o cloroferritos) cálcicos hidratados. Estos pueden formarse por la acción del CaCl_2 sobre los aluminatos, sobre los ferritos hidratados o sobre sus sales complejas que existen en los productos de hidratación del cemento y cuya presencia podría justificar la disminución de la velocidad de difusión. Por el contrario, el cemento A.R.C., que contiene el menor porcentaje de aluminatos y de ferritos es el que da también una menor difusión.

Por consiguiente, es evidente que la distinta interacción entre la superficie de los poros de los diversos cementos y el ion cloruro es la causa fundamental de la diferente velocidad de difusión.

Se ha observado también, que la cantidad de agua no fijada en los hormigones, determinada por secado a 105°C , hasta peso constante, es la misma tanto en las secciones de la probeta atravesadas por los iones Cl^- , como en las partes de ella que no están afectadas por estos iones.

Esto demuestra que la penetrabilidad de los cloruros se manifiesta principalmente por la difusión de los iones en el hormigón, mejor que por la penetración de toda la disolución en las muestras. La demostración de que la penetración de los cloruros no depende de la permeabilidad del agua, se demostró también por los ensayos efectuados en probetas de hormigón barnizadas con silicona o aceite de linaza cocido.

Las probetas barnizadas con silicona han sido bastante menos permeables al agua, pero han mantenido casi la misma permeabilidad a los cloruros. Las probetas barnizadas con aceite de linaza cocido han sido permeables al agua, pero bastante menos permeables a la difusión de los iones.

Los ensayos hechos por los mismos investigadores sobre pastas de cemento portland y puzolánico han confirmado los resultados obtenidos en los primeros ensayos. Las investigaciones se hicieron con disoluciones de CaCl_2 , KCl , Na_2S y $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$.

Para el ion Cl^- del KCl se midió una velocidad de difusión de $3/4$, aproximadamente, que la del ion Cl^- del CaCl_2 . El ion S^{2-} , para el mismo tipo de pasta de cemento, muestra un coeficiente de difusión diez veces más pequeño que el del ion Cl^- .

Se puede deducir que la diferente velocidad de penetración depende de la carga eléctrica de los iones, y en consecuencia, de la distinta interacción entre la superficie de los poros y los iones que penetran.

También el ión S^- penetra con una velocidad mayor en las pastas de cemento portland que en las del puzolánico, de una manera análoga a la observada en la penetración de los cloruros.

El coeficiente de difusión de los iones es dos veces o tres veces menor en el cemento puzolánico aunque la distribución y el tamaño de los poros de las pastas de los dos cementos sean casi los mismos.

La urea [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$] penetra con una velocidad bastante más pequeña que el ion Cl^- y tiene un coeficiente de difusión del orden de $5 \cdot 10^{-10}$ cm/s a temperatura ambiente.

Es de destacar que la penetrabilidad de la urea no depende del tipo de cemento con el cual se ha confeccionado la pasta. Esto confirma la hipótesis de que la velocidad de penetración de los iones depende mucho de la naturaleza de la superficie de los poros. Por consiguiente, es evidente que existe una interacción entre la superficie de los poros y los iones que penetran, y que esta interacción es diferente para los distintos tipos de cemento. Por el contrario, para la molécula no disociada de urea, esa interacción no depende del tipo de cemento empleado, ya que es la misma para todos los cementos.

Como conclusión de esta exposición, y aunque las investigaciones continúan con interesantes desarrollos, ya se puede confirmar que la evaluación de la durabilidad de los hormigones se puede determinar por medidas de penetrabilidad al agua y a los iones agresivos.

Es de destacar que los datos de estas primeras investigaciones demuestran la gran influencia que tienen la confección y la compacidad de los hormigones en la durabilidad de las obras. Vieja ley, pero siempre válida.

TABLA 1

Ensayos de absorción de agua por los hormigones

Hormigones preparados con diferentes valores de la relación: agua/cemento

	Hormigón A			Hormigón B			Hormigón C					
	13,5 % 86,5 % $P = 100 \sqrt{d/D}$			13,5 % 86,5 % $P = 100 \sqrt{d/D}$			13,5 % 86,5 % $P = 100 \sqrt{d/D}$					
Cemento: Tipo Portland												
Arido: Calcáreo triturado												
Curva granulométrica:												
Relación agua/cemento	0,50			0,63			0,69					
Escurrimiento (ASTM)	80 %			60 %			96 %					
Factor de compacidad (BS)	60 %			86 %			94 %					
Cantidad de cemento :	319 kg/m ³			302 kg/m ³			296 kg/m ³					
	$W_b \% = \frac{A_c - B_c}{B_c} \times 100$						$W_v \% = \frac{A_c - B_c}{V} \times 100$					
	A		B		C		A		B		C	
Antes de la inmersión (*)	3,38		3,76		4,10		8,03		8,70		9,35	
1 hora	3,90		4,72		5,43		9,56		10,85		12,35	
3 horas	4,10		5,00		5,72		9,72		11,50		13,00	
8 "	4,18		5,25		6,00		9,90		12,10		13,70	
24 "	4,30		5,45		6,42		10,20		12,50		14,60	
3 días	4,37		5,57		6,48		10,40		12,85		14,80	
7 "	4,45		5,70		6,62		10,60		13,10		15,10	
Peso constante	4,45		5,70		6,65		10,60		13,10		15,20	

(*) Agua evaporable a 105°C de las probetas conservadas durante 21 días a 20°C y 65 % H.R. (Según el método de los ensayos comparativos).

TABLA 2

Ensayos de absorción de agua por los hormigones

Hormigones preparados con diferentes valores de la relación: agua/cemento

	Hormigón A			Hormigón B			Hormigón C					
	10 % 90 % $P = 100 \sqrt{d/D}$			13,5 % 86,5 % $P = 100 \sqrt{d/D}$			18,5 % 81,5 % $P = 100 \sqrt{d/D}$					
Cemento: Tipo Portland												
Arido: Calcáreo triturado												
Curva granulométrica:												
Relación agua/cemento	0,86			0,93			0,48					
Escurrimiento (ASTM)	56 %			60 %			58 %					
Factor de compacidad (BS)	88 %			86 %			87 %					
Cantidad de cemento :	214 kg/m ³			302 kg/m ³			410 kg/m ³					
	$W_b \% = \frac{A_c - B_c}{B_c} \times 100$						$W_v \% = \frac{A_c - B_c}{V} \times 100$					
	E		B		D		E		B		D	
Antes de la inmersión (*)	3,50		3,76		3,92		8,10		8,70		9,05	
1 hora	4,80		4,72		4,62		11,10		10,85		10,65	
3 horas	5,18		5,00		4,78		12,00		11,50		11,05	
8 "	5,55		5,25		4,86		12,45		12,10		11,20	
24 "	5,82		5,45		5,02		13,50		12,50		11,60	
3 días	5,96		5,57		5,14		13,80		12,85		11,90	
7 "	6,04		5,70		5,23		14,00		13,10		12,10	
Peso constante	6,07		5,70		5,28		14,05		13,10		12,15	

(*) Agua evaporable a 105°C de las probetas conservadas durante 21 días a 20°C y 65 % H.R. (Según el método de los ensayos comparativos).

TABLA 3

Ensayos de absorción de agua por los hormigones

Hormigones preparados con diferentes valores de la relación: agua/cemento

	Hormigón A			Hormigón B			Hormigón C		
	13,5 %	86,5 %	$P = 100 \sqrt{d/D}$	13,5 %	86,5 %	$P = 100 \sqrt{d/D}$	13,5 %	86,5 %	$P = 100 \sqrt{d/D}$
Cemento: Tipo Portland									
Arido: Calcáreo triturado									
Curva granulométrica:									
Relación agua/cemento	0,63			0,67			0,60		
Escurecimiento (ASTM)	60 %			56 %			60 %		
Factor de compactación (BS)	86 %			89 %			88 %		
Cantidad de cemento:	300 kg/m ³			295 kg/m ³			302 kg/m ³		
	$W_o \% = \frac{A_c - B_c}{B_c} \times 100$			$W_v \% = \frac{A_c - B_c}{V} \times 100$					
	B	F	C	B	F	C			
Antes de la inmersión (*)	3,76	5,02	4,37	8,70	11,20	10,00			
1 hora	4,72	6,17	5,94	10,85	13,80	13,60			
3 horas	5,00	6,30	6,10	11,50	14,10	14,00			
8 "	5,25	6,50	6,35	12,10	14,55	14,55			
24 "	5,45	6,72	6,67	12,50	15,00	15,30			
3 días	5,57	6,85	6,77	12,85	15,30	15,50			
7 "	5,70	6,90	6,77	13,10	15,50	15,50			
Peso constante	5,70	6,95	6,77	13,10	15,60	15,50			

(*) Agua evaporable a 105°C de las probetas conservadas durante 21 días a 20°C y 65 % H.R. (Según el método de los ensayos comparativos).

TABLA 4

Ensayos de absorción de agua por los hormigones

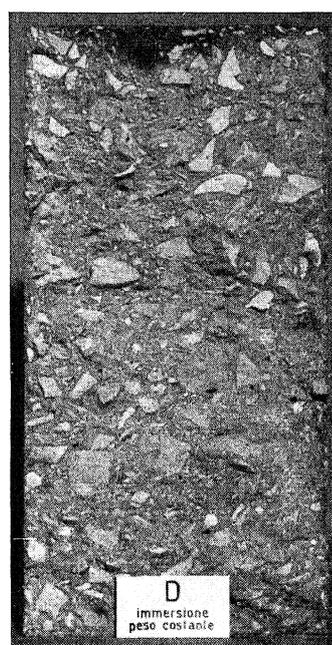
Probetas de hormigón conservadas en diferentes condiciones antes de su inmersión en el agua

	$W_o \% = \frac{A_c - B_c}{B_c} \times 100$		$W_v \% = \frac{A_c - B_c}{V} \times 100$	
	Antes de la inmersión	Después de la inmersión peso constante	Antes de la inmersión	Después de la inmersión peso constante
1. Probetas de hormigón B conservadas durante 28 días bajo arena húmeda y, después, expuestas al aire a 50°C y 65 % H.R. durante 21 días.	4,10	5,64	9,43	12,90
2. Probetas de hormigón B conservadas durante 28 días bajo arena húmeda y, después, expuestas al aire a 50°C y 65 % H.R. durante 21 días.	2,80	5,68	6,47	13,10
3. Probetas conservadas y expuestas como las del n.º 2 y, después, secadas a 105°C hasta peso constante antes de la inmersión.	0,00	5,54	0,00	12,75

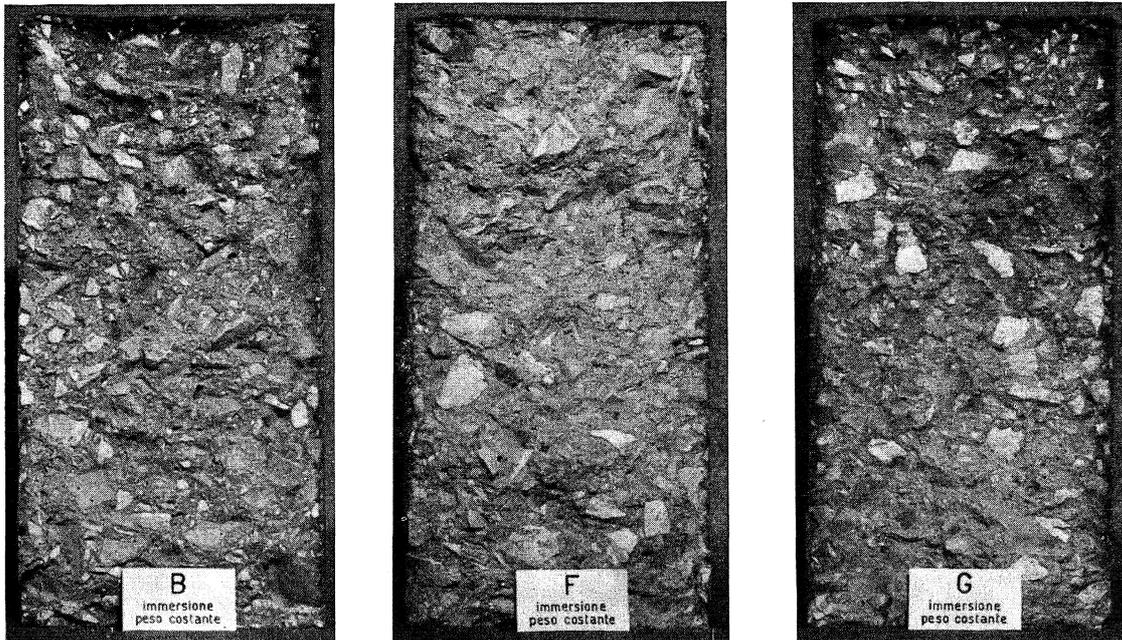
TABLA 5

Características y coeficientes de difusión de los hormigones ensayados

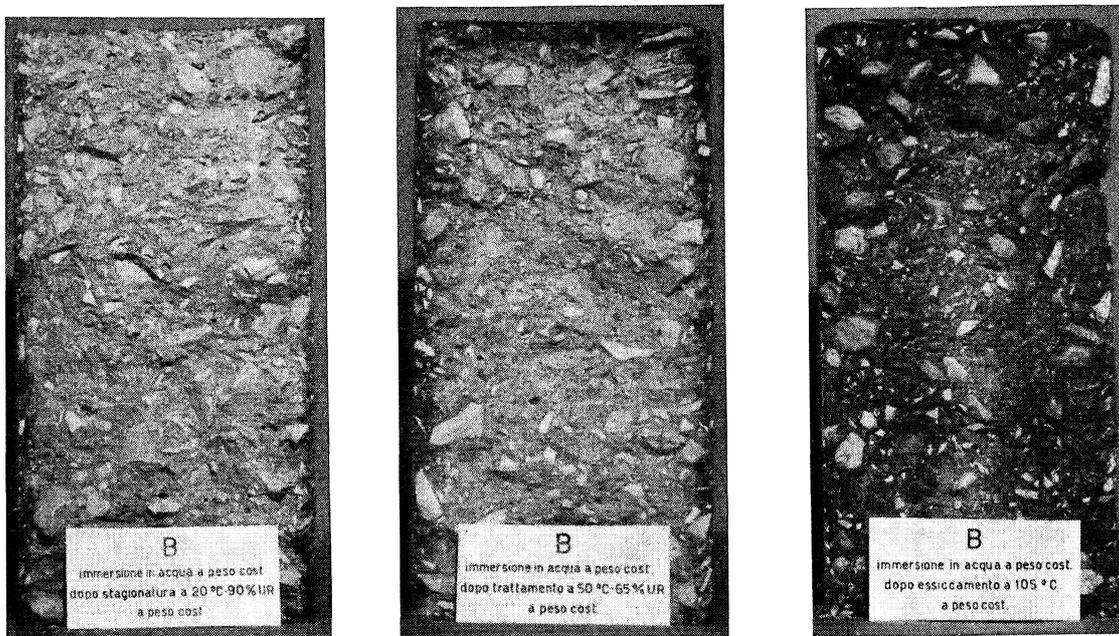
Tipo de cemento	Relación A/C	Porosidad %	Coefficiente de difusión ($\text{cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$)
Portland	0,60	13,4	$3,3 \cdot 10^{-8}$
Portland	0,50	11,8	$1,7 \cdot 10^{-8}$
Alto horno	0,60	17,6	$2,1 \cdot 10^{-8}$
Alto horno	0,50	14,8	$1,1 \cdot 10^{-8}$
Puzolánico	0,63	17,4	$2,3 \cdot 10^{-8}$
Puzolánico	0,53	14,9	$1,1 \cdot 10^{-8}$
Puzolánico A.R.C.	0,63	17,4	$1,8 \cdot 10^{-8}$
Puzolánico A.R.C.	0,53	15,1	$1,0 \cdot 10^{-8}$



Hormigón mantenido en inmersión hasta alcanzar constancia de peso.



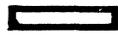
Hormigón mantenido en inmersión hasta alcanzar constancia de peso.



Hormigón mantenido bajo agua hasta alcanzar constancia de peso; después conservado a 20°C y 90 % H.R. hasta alcanzar constancia de peso.

Hormigón mantenido bajo agua hasta constancia de peso y, después, desecado a 105°C hasta peso constante.

ABSORCION DE AGUA POR EL HORMIGON



Agua evaporable de las probetas a 105°C, después de la exposición al aire a 20°C y 65 % H.R. durante 21 días.



Agua absorbida después de la inmersión hasta constancia de peso.

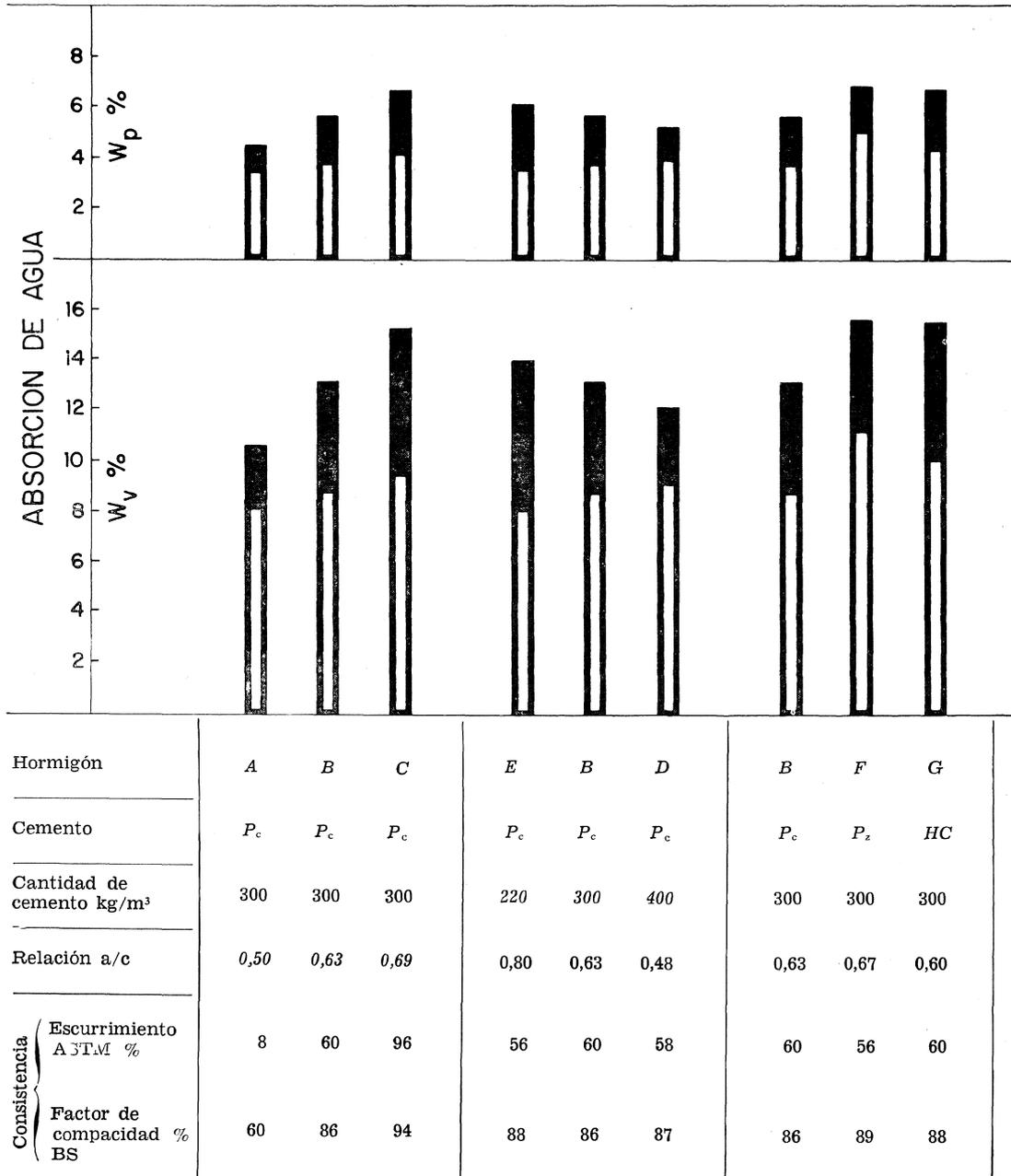
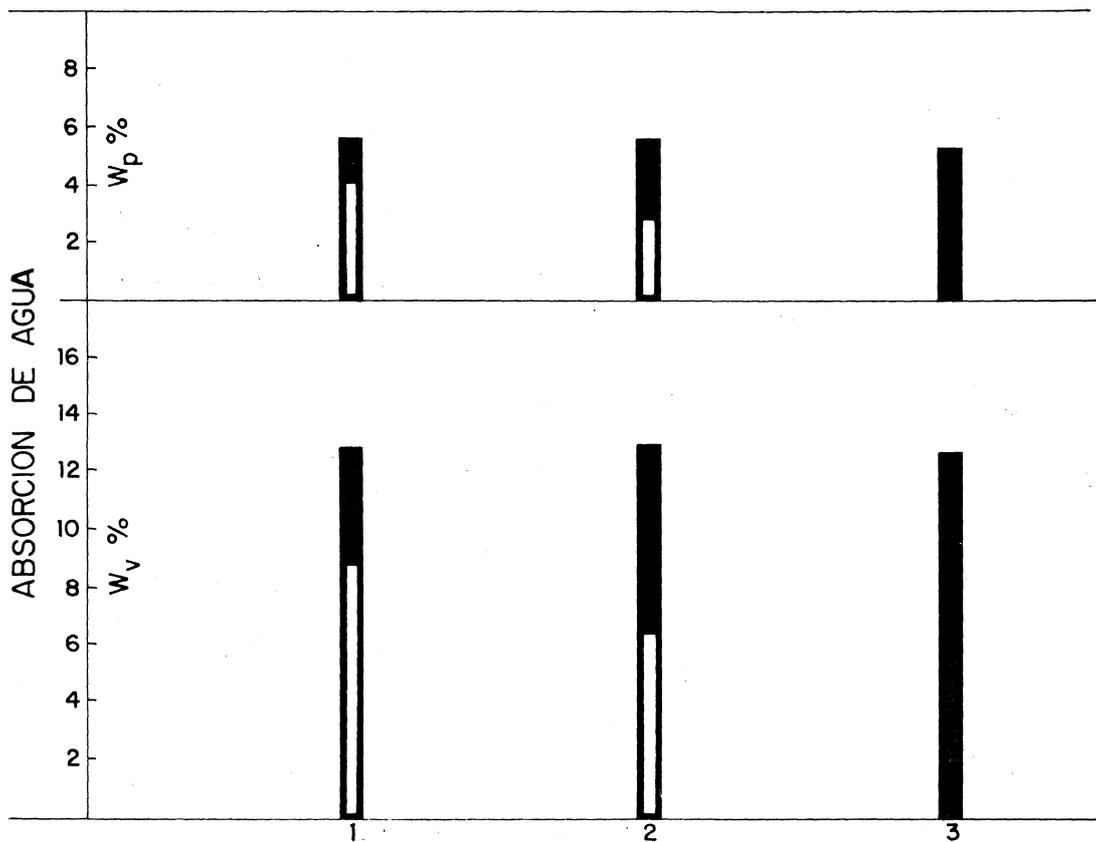
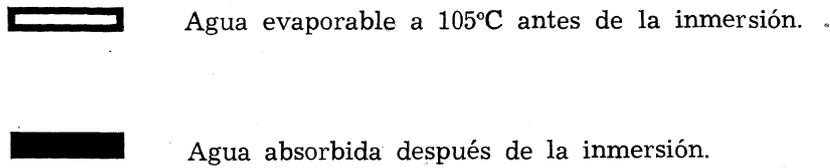


Fig. 1

ABSORCION DE AGUA POR EL HORMIGON



PROBETAS DE HORMIGON B CONSERVADAS DE UNA FORMA DIFERENTE, DESPUES DEL ENDURECIMIENTO (*) Y ANTES DE LA INMERSION EN EL AGUA

N.º 1 Probetas expuestas al aire a 20°C y 90 % H.R. durante 21 días.

N.º 2 Probetas expuestas al aire a 50°C y 65 % H. R. durante 21 días.

N.º 3 Probetas como las del n.º 2 presecadas a 105°C hasta peso constante antes de la inmersión.

(*) Después de extraídas del molde se conservaron las probetas en aire húmedo (90 % H.R.) y a 20°C de temperatura durante 28 días.

Fig. 2

CLORUROS DIFUNDIDOS EN EL HORMIGON

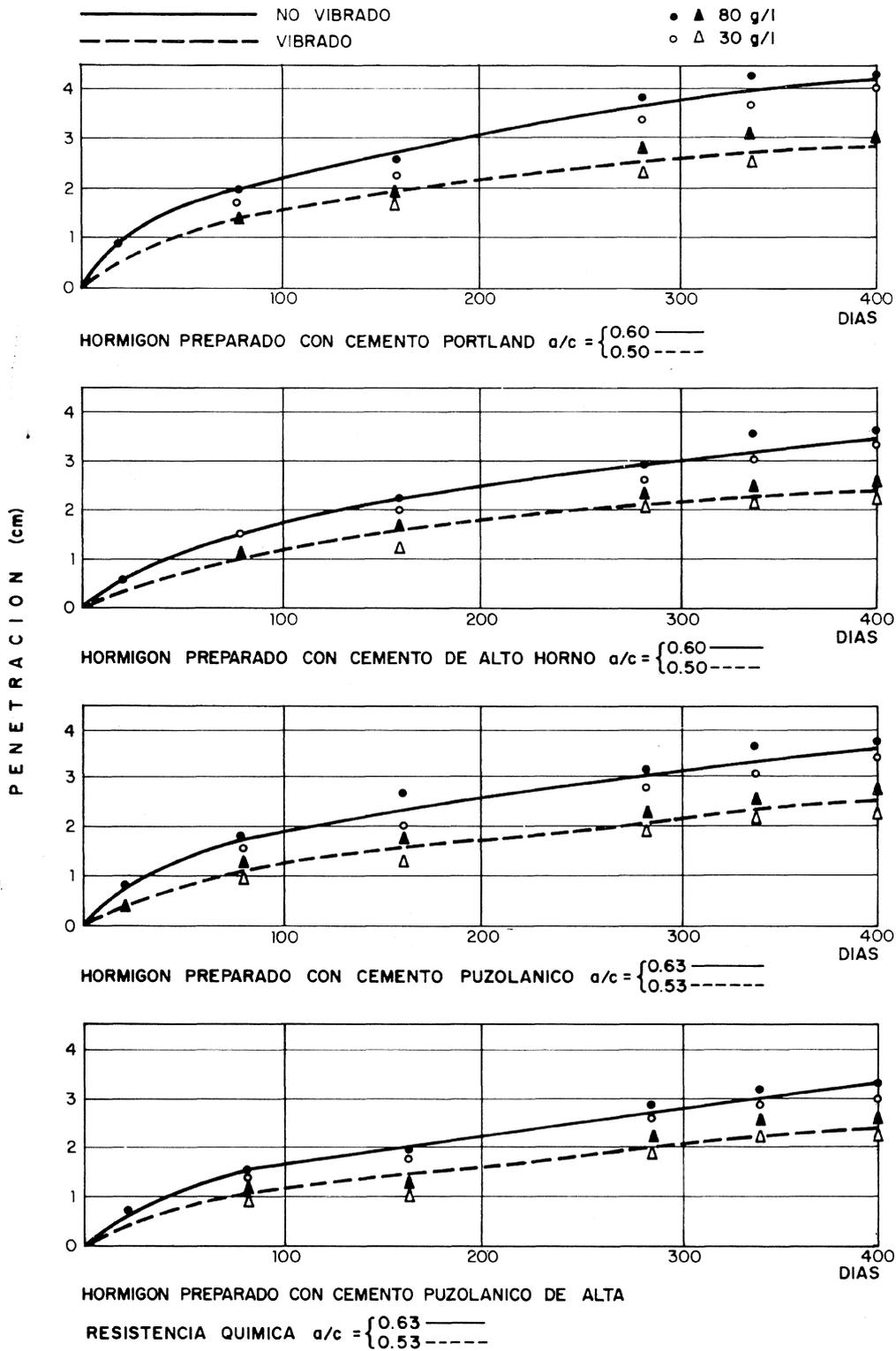
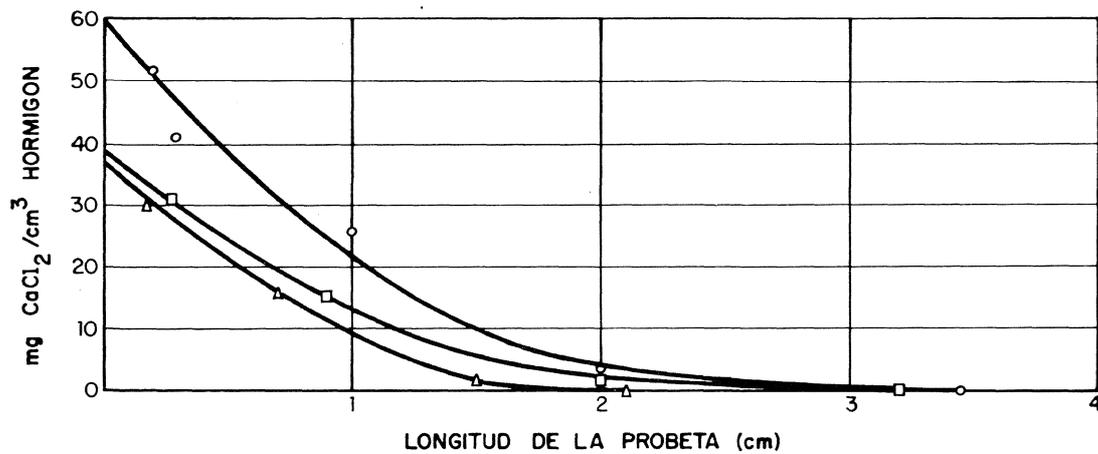


Fig. 3



Concentración de cloruros (expresada en mg CaCl₂/cm³ de hormigón) en función de la longitud de las probetas.

Tiempo de contacto: 340 días.

Hormigones vibrados.

Cemento Portland: CaCl₂ 80 g/l.

Cemento Portland: CaCl₂ 30 g/l.

Cemento altísima resistencia química: CaCl₂ 30 g/l.

Fig. 4