SIKA INFORMACIONES TÉCNICAS
HORMIGÓN IMPERMEABLE

UNA MIRADA RECIENTE

CONSTRUYENDO CONFIANZA

HORMIGÓN IMPERMEABLE

Una mirada reciente

CONTENIDO

3	Antecedentes
4	Porosidad del hormigón y penetración de agua
7	Mecanismos de penetración del agua
14	Métodos de medición y normas
18	Hormigón impermeable, definición y alcance
20	Aditivos para hormigón impermeable
24	Sika WT-100
27	Diseño de hormigón impermeable
28	Aplicaciones y comentarios
31	Referencias

Canal de Panamá, sistema de exclusas. Miraflores 1909 - 1914

ANTECEDENTES

La necesidad de la sociedad actual por el agua va más allá del propio consumo humano. La empleamos entre otras aplicaciones, para la generación de energía eléctrica, el transporte y el riego de cultivos. El agua es un elemento indispensable de desarrollo y su disponibilidad un indicador del nivel de vida de un país. La ingeniería ha sabido aprovechar las bondades del líquido y ha creado máquinas y estructuras que manipulan el agua de acuerdo a las necesidades. Los rigurosos ingenieros egipcios supieron entender el ritmo de las crecientes del Nilo y crearon presas y canales para almacenar y conducir el agua a sus extensos sembradíos. Este esfuerzo no es tan diferente al de los constructores holandeses que levantaron hace pocos años, el enorme dique de hormigón y acero de Oosterschelde, con el cual dominan el nivel del mar en sus costas.

Almacenar y conducir el agua, en una cantidad y a una velocidad determinadas, han sido materia de la ingeniería durante siglos. En términos de almacenamiento y conducción el hormigón ha sido una de las alternativas más atractivas. Los canales y tuberías de hormigón constituyen sin duda la solución más frecuente para caudales madres de distribución en las ciudades modernas. Las plantas de tratamiento del líquido son igualmente en su gran mayoría, construidas en hormigón y si retrocedemos aún más, las presas de cara de hormigón (CFRD), las presas de gravedad o arco de hormigón convencional o las presas de hormigón compactado con rodillo (CCR) son las primeras protagonistas para retener millones de metros cúbicos de agua.

El hormigón puede contener el agua, lo hace porque su estructura microscópica le permite que el líquido no lo atraviese fácilmente, sin embargo no todos los hormigones son capaces de hacerlo. En realidad los niveles de "impermeabilidad" del hormigón son tan amplios como los niveles de resistencia mecánica (sin que necesariamente haya una relación directa entre estas dos propiedades). La resistencia mecánica de un Hormigón Compactado con Rodillo o un Relleno Fluido frente a un Hormigón de Ultra Alta Resistencia (BPR) varía en dos órdenes de magnitud, es por ello que no se nos ocurriría construir un rascacielos (con las geometrías y secciones usuales) con un Relleno Fluido. De igual forma la permeabilidad del hormigón varía también en dos órdenes de magnitud, tenemos hormigones cien veces más "impermeables" que otros. En este rango no hemos incluido los hormigones drenantes o porosos que aumentarían aún más las diferencias.

En este texto nos proponemos revisar justamente la facilidad con la que el agua entra o sale a través del material. Asimismo enunciar cuales son las medidas que califican un hormigón como "impermeable", cuales son los parámetros y métodos más usados en esta calificación, revisaremos también algunas de las aplicaciones más importantes, para terminar definiendo así un hormigón como "hormigón impermeable".

POROSIDAD DEL HORMIGÓN Y PENETRACIÓN DE AGUA

El hormigón se puede asimilar a un material compuesto por dos fases principales: la pasta y los agregados. La pasta está constituida por cientos de millones de agujas y placas que se enredan y entrecruzan entre sí. Esta pasta rodea y cubre los agregados que constituyen así una constelación de incrustaciones duras.

Los vacíos en tal mezcla predominan como es de esperarse en la pasta y de hecho cuando se toma una rebanada de hormigón extremadamente delgada, la luz pasa principalmente a través de dicha pasta. Para entender la penetración de un líquido al interior del hormigón, es necesario comprender cuáles son los vacíos presentes en el Hormigón.

Los vacíos en la pasta de cemento hidratado se dividen en:

POROS DE GEL C-S-H (ESPACIO ENTRE CAPAS)
Estos vacíos son los que existen dentro de la estructura propia de las "agujas" o "placas" sólidas de la pasta cemento hidratado. Estamos así hablando de una distancia que varía entre 5 a 25 Angstroms (25 x 10^{-10} m). Recordemos que el tamaño de un átomo de Silicio o de Calcio es de 3 Å y 4 Å respectivamente, por lo tanto los vacíos entre capas son los espacios que dividen las moléculas de C-S-H, hidrato principal de la pasta hidratada.
La estructura molecular del C-S-H es aun materia de discusión. La descripción de la geometría sólido / espacio a la escala del Angstroms es aún incompleta.

[1] JENNINGS M.H, BULLARD J.W., THOMAS J.J. ANDRADE J.E, CHEN J.J, SCHERER G.W. "Characterization and Modeling of Pores and Surfaces in Cement Paste: Correlations to Processing an Properties"

La figura 1 (Jennings)[1] expone justamente la modelación de una pasta de C_3S, principal componente del cemento, que se va hidratando. El tamaño de una partícula de C_3S (Silicato tricálcico) en café oscuro es de cerca de 80.000 Å - 100.000 Å (8 a 10 micras).

Los poros de gel o distancia entre capas de C-S-H como vemos están dentro del color café claro, dentro de la estructura misma de las agujas aquí representadas como café claras. Los poros de gel más grandes tienen un tamaño de hasta 200 Angstroms (20 nm). Esta porosidad no es la responsable de la penetración de agua, pero sí de la densidad del hidrato C-S-H. Existe una clasificación que lleva la definición de poros de gel hasta una separación máxima de 4 nm (400 Angstroms) pero en realidad existe un traslapo con la siguiente escala de vacíos conocida como porosidad capilar.
Los gases pueden sin embargo penetrar con cierta facilidad los poros de gel (de hecho medimos esa porosidad usando gases). Por ejemplo el CO_2 responsable de la carbonatación del hormigón puede penetrar poros por debajo de 1 nm (10 Å)[2]. Los poros de gel que constituyen parte del hidrato C-S-H tienen una relación fundamental con los fenómenos de retracción y fluencia de la pasta y por lo tanto afectan igualmente estos dos parámetros en el hormigón.

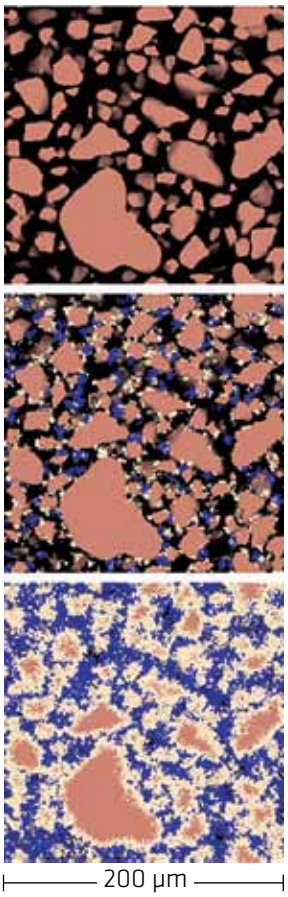


Figura 1. Modelación Jennings et al. (Bullard and Garboczi 2006) de una pasta de cemento (C_3S) A/C =0.5 con diferentes grados de hidración 0, 0.1 y 0.6 de arriba a abajo. En negro porosidad capilar, en café oscuro = C_3S y en café claro = C-S-H incluyendo los poros de gel, en azul $Ca(OH)_2$

POROS CAPILARES

La porosidad capilar en la Figura 1 corresponde al color negro y es el espacio que no fue ocupado por los hidratos o componentes sólidos de la pasta. Al inicio de la hidratación los poros capilares se conectan tridimensionalmente entre sí, sin embargo a medida que la hidratación progresa los poros capilares quedan aislados o desconectados. Esta desconexión tiene repercusiones muy importantes sobre las propiedades de transporte de líquidos y gases a través de la pasta.

La permeabilidad de la pasta de cemento hidratada está así gobernada en buena parte por los poros capilares a partir de los 10 nm. La permeabilidad de la pasta de cemento está definida como la facilidad para fluir de una fase acuosa a través del material bajo un gradiente de presión y está directamente relacionada con el volumen, el tamaño y la morfología de los poros capilares.

En pastas con baja relación Agua/Cemento donde la cantidad de sólidos (hidratos) por unidad de volumen es alta o donde las distancias entre las partículas hidratadas es baja, la porosidad capilar tiene un tamaño que varía entre 10 nm y 50 nm. En pastas o hormigones de alta relación Agua/Cemento la porosidad capilar puede ser de 3000 nm a 5000 nm[3].

La porosidad capilar de hecho cuenta con una subdivisión que define como micro poros aquellos que están por debajo de las 50 nm y macro poros aquellos por encima de este valor. Los micro poros tienen una fuerte influencia sobre los fenómenos de retracción y fluencia, (como los poros de gel) mientras que los macro poros capilares gobiernan la resistencia mecánica y la permeabilidad a líquidos, (Tabla 1).

AIRE INCLUIDO Y ATRAPADO

Dentro de la pasta de cemento siguen en escala los macro vacíos que tienen dimensiones que van desde 10 micras hasta 3000 micras. En este rango aparecen el aire incluido generado gracias a aditivos incorporadores de aire (surfactantes) que permiten tener esferas estables de un tamaño cercano a 100 micras (0.1 mm). La figura 2 (Mehta- Monteiro) justamente expone la escala completa de distribución de tamaños, donde aparecen igualmente la dimensión de los productos de hidratación.

El aire atrapado debido por ejemplo a una consolidación equivocada, constituye el vacío de mayor tamaño en la pasta o en el hormigón. Así el aire atrapado como el incorporado tienen una afectación importante en la penetración de líquidos y en la resistencia mecánica del material.

[2] PAPADAKIS V.G., VAYENAS C.G., FARDIS M.N. (1991), "Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete".
[3] MEHTA. K.P., MONTEIRO. P J.," Concrete: Microstructure, Properties, and Materials".

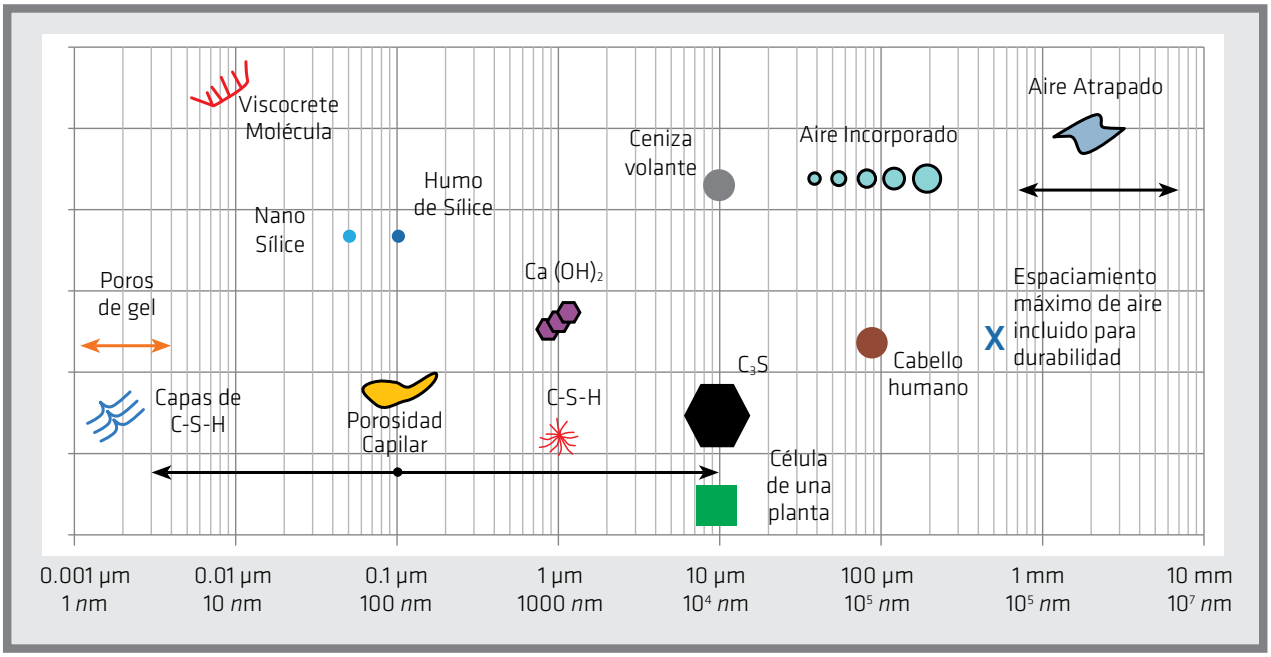


Figura 2. Escala de poros en el hormigón después de Mehta y Monteiro.

De Auerdo a IUPAC		De acuerdo a P. Mehta, 1986		De acuerdo a S. Mindess *et al.*, 2002				
Nombre	**Diámetro**	**Tipo de poro**	**Tamaño**	**Nombre**		**Diámetro**	**Papel de Agua**	**Propiedades de la pasta afectadas**
Microporos	Menor 2 nm	Espacio entre las capas de C-S-H	1 nm a 3 nm	Microporos "inter capas"	Poros de Gel	Hasta 0.5 nm	Agua estructural involucarda en los enlaces no evaporable	Retracción, fluencia de la HR
				Microporos		0.5 nm a 2.5 nm	Agua fuertemente absorbida, sin formar meniscos	Retracción, fluencia de la HR
Mesoporos	2 nm a 50 nm			Capilares pequeños (gel)		2.5 nm a 10 nm	Altas fuerzas de tensión superficial generadas	Retracción entre 50% y 80% HR
		Poros capilares (baja a/c)	10 nm a 50 nm	Capilares medianos	Poros Capilares	10 nm a 50 nm	Moderadas fuerzas de tensión superficial generadas	Resistencia, permeabilidad, retracción con alta HR, >80%
Macroporos	>50 nm	Poros capilares (alta a/c)	3 µm a 5 µm	Capilares grandes	celdas huecas	50 nm a 10 µm	Comporamiento normal de agua en masa	Resistencia, permeabilidad
		Aire incorporado	50 µm a 1 mm	Aire incorporado		0.1 mm a 1 mm		Resistencia

Tabla 1.

NOTAS

Estas son las clasificaciones más comúnmente mencionadas con referencia a las pastas de cemento hidratadas. Los vacíos no saturables no se incluyen en la clasificación por S. Mindess *et al*.

La Tabla 1, expone una síntesis de las clasificaciones de los vacíos de la pasta de cemento y del hormigón. Como puede constatarse son los poros a partir de los 10 *n*m los que tienen la influencia más importante sobre la penetración de líquidos. En la clasificación de Mindess et al, la posibilidad de penetración de agua en la pasta de cemento comienza con los poros saturables que corresponden a aquellos mayores a 10 *n*m.

MECANISMOS DE PENETRACIÓN DE AGUA

La penetración de fluidos como de gases dentro del hormigón determina en buena parte la durabilidad del material. En el caso particular de los líquidos estos pueden penetrar la red porosa del hormigón usando principios físicos muy distintos como la permeabilidad, la difusión, la absorción capilar, la convección o la electromigración.

La permeabilidad se refiere al movimiento de un líquido en presencia de un gradiente de presión como es el que tiene lugar en las estructuras de contención de agua. La permeabilidad se mide sobre medios saturados. En el caso del hormigón este debe estar saturado para poder medir la permeabilidad que se expresa en términos de $m^3/(m^2\ s)$, es decir en m/s.

La difusión corresponde por otro lado al desplazamiento de un compuesto, ión, líquido etc, a través de un medio, debido a una agitación aleatoria a nivel molecular, relacionada esta, con la existencia de un gradiente de concentración. La difusión se determina en general sobre hormigones saturados. A través de este medio continuo, tiene entonces lugar la difusión de una sustancia.

La absorción capilar corresponde al desplazamiento de un frente líquido a través de un capilar, como consecuencia de la interacción de las fuerzas de contacto líquido-sólido. Este fenómeno de movimiento de agua tiene lugar en hormigones secos o parcialmente saturados.

La permeabilidad como la absorción capilar dependen sobretodo del tamaño de los poros mientras que la difusión depende principalmente de la interconexión de la red porosa[4].

La convección o flujo por convección de una sustancia se debe a que una sustancia es arrastrada por el movimiento de otra que la contiene.
La electromigración al igual que la permeabilidad y la difusión se refiere al movimiento de un compuesto o una sustancia (líquida en este caso) debido a la presencia de un gradiente. La diferencia o gradiente en este caso, corresponde a una diferencia de voltaje.
En el mundo de la construcción el agua puede penetrar el hormigón de acuerdo a cualquiera de los mecanismos arriba mencionados, sin embargo los fenómenos más frecuentes y de mayor preocupación frente a la contención de líquidos o penetración al interior del material son:

A. Permeabilidad.

B. Absorción capilar.

C. Difusión.

De acuerdo pero ¿Cuál es la preocupación por la penetración o en el peor de los casos por el paso de agua a través del hormigón?. En realidad más allá de la necesidad obvia por no perder el líquido en estructuras de contención y conducción, o impedir su entrada en lugares donde no se desea. La penetración de agua al interior del hormigón está relacionada con la durabilidad de la estructura misma. La penetración de agua al interior del hormigón está directamente relacionada con el ingreso, redistribución o pérdida de sustancias que pueden ser perjudiciales o benéficas al hormigón, al refuerzo o a ambos elementos.

[4] BUIL M., OLLIVIER J.P. (1992) "Conception des bétons: la structure poreuse".

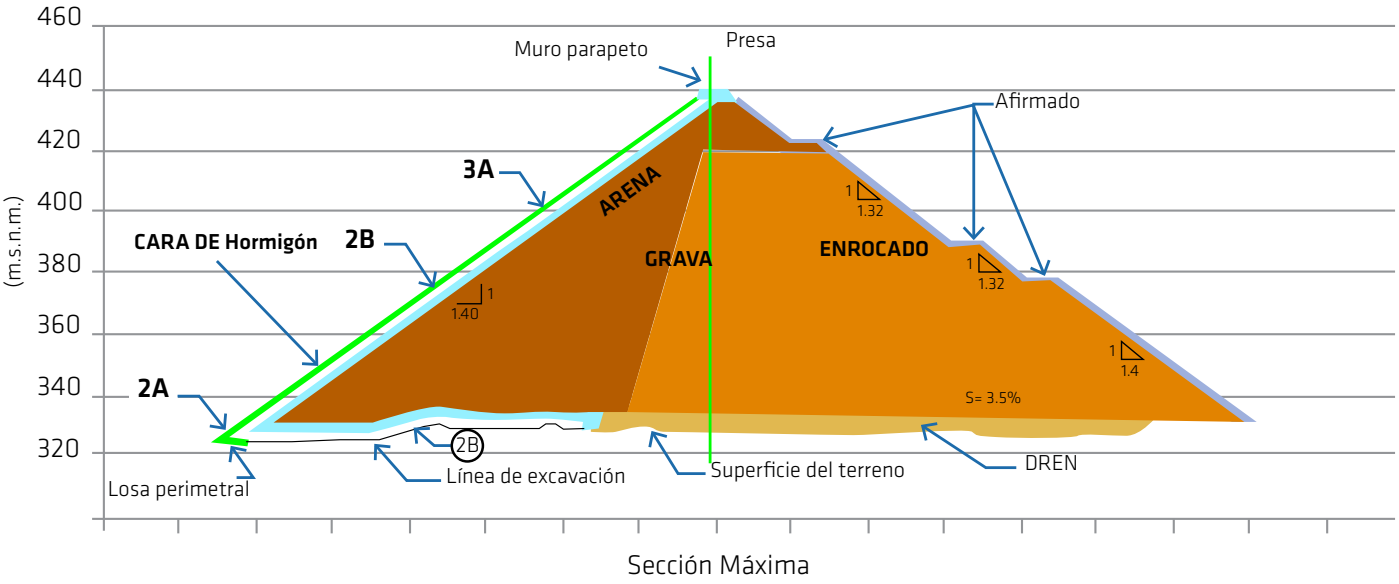


Figura 3. Esquema de una presa de enrocado y cara de hormigón (CFRD).

Dentro de estos casos tenemos:

- Transporte de sulfatos; desde fuentes externas alcanzando los aluminatos de la pasta de cemento y generando compuestos expansivos (etringita) al interior del hormigón. Los sulfatos en estado sólido son prácticamente inócuos sobre la pasta de cemento. Es necesario que estén diluidos y que penetren la red porosa y una vez en el interior estos pueden empezar a reaccionar con los compuestos de la pasta de cemento hidratada, generando entonces nuevos sólidos que fisuran el material.
- Ingreso de cloruros, diluidos en agua de mar o provenientes de otras fuentes son transportados en agua al interior del hormigón hasta alcanzar el acero de refuerzo e inician o aceleran la corrosión del mismo.
- Hielo-Deshielo, el agua luego de penetrar y saturar la red capilar, puede congelarse generando presiones sobre la fase sólida microfisurándola ciclo a ciclo.
- Lixiviación de hidróxido de calcio y álcalis, la entrada y salida del líquido diluye y arrastra parte de los componentes de la pasta de cemento debilitando el material.
- Generación del gel álcali-sílice, el agua se constituye en un componente indispensable del gel expansivo resultante de la combinación de álcalis y el sílice inestable de algunos agregados. La penetración de agua al interior del material aumenta las probabilidades de generación de gel y su volumen total. La difusión de los álcalis depende en buena parte de la continuidad del agua al interior del hormigón.
- Sustitución del Calcio por Magnesio en agua de mar solo es posible con la penetración del líquido al interior del material.

La penetración de agua al interior del hormigón genera riesgos sobre la durabilidad y funcionamiento de la estructura, incluso cuando no ha sido concebida para la contención del líquido. Se puede ver la penetración de agua como benéfica sólo en ciertos casos como el hormigón drenante (diseñado justamente como un filtro). De esta forma para la mayor parte de las aplicaciones en construcción de hormigón reforzado, la penetración del agua se califica como un problema que puede comprometer el funcionamiento de la estructura.

Los fenómenos de ataque a la durabilidad de la estructura más frecuentes están relacionados más con la penetración por absorción capilar que con la permeabilidad. Los hormigones completamente saturados donde gobierna la permeabilidad no disponen de suficiente oxígeno. En el caso de la corrosión por cloruro, los cloruros penetran sobre todo por difusión y absorción capilar, el hielo-deshielo igualmente implica absorción capilar, la lixiviación convección y absorción capilar. Sólo los sulfatos, el alkali y la sustitución de Ca por Mg tiene lugar en condiciones de completa saturación.
Un hormigón al que no le penetre el agua o lo haga muy superficialmente se beneficiará justamente frente a los fenómenos arriba listados ya sea eliminándolos como disminuyendo su efecto.

En las estructuras de hormigón destinadas a conducir o contener agua, el interés por tener un hormigón impermeable se concentra en no perder el líquido. Asimismo existen estructuras en las que se busca exactamente lo contrario, mantenerlas secas en el interior donde el agua no es deseable. De esta forma estructuras como túneles, sótanos o estacionamientos rodeadas por suelos húmedos, niveles freáticos o estructuras de hormigón literalmente sumergidas en el mar como las plataformas Offshore, deben permanecer estancas.

El hormigón en cualquiera de los dos casos, tanto para repeler como contener el líquido se emplea como la barrera que impide el paso del agua de una cara de la estructura hacia la otra. Un ejemplo de los más impresionantes de la capacidad del hormigón para impedir el paso del agua a través de su interior lo constituyen las presas de enrocado con cara de hormigón (CFRD).

En una presa de CFRD la estabilidad estructural está garantizada por la masa de las rocas, gravas y arenas que constituyen su cuerpo principal (Figura 3). De esta forma el peso de la estructura contrarresta el empuje del agua y todas las eventuales cargas por sismo, oleaje etc, que puedan producirse. Sin embargo la función de la presa es almacenar agua, contenerla. De esta forma una muy delgada placa de hormigón (si se la examina

proporcionalmente con la estructura entera) es la que cumple con la función de impedir el paso de agua. Así para una presa que tendrá una presión de agua de cerca de 100 m de altura el espesor de la placa en la base alcanzará los 60 cm. El cálculo del espesor de esta placa de hormigón sigue la expresión lineal Espesor=0,3 + 0,003 H donde H es la altura de presión de agua expresada en metros.

La losa de hormigón, para este ejemplo de 100 m de presión de agua, va disminuyendo su espesor hasta llegar a la parte superior de la presa en apenas 30 cm. Esta placa es así la responsable de impedir el paso del agua. Proporcionalmente con el resto de la estructura, esta losa es apenas un recubrimiento en extremo delgado que como vemos, es capaz de impermeabilizar la estructura. Este hormigón poco permeable requiere un diseño y unas consideraciones especiales que hacen que se le denomine hormigón "impermeable". En este caso el mecanismo de penetración de agua sin duda es la permeabilidad debido a la existencia del delta de presión entre la cara de la losa en contacto con el agua y la cara de la losa en contacto con el relleno granular. Examinemos un poco en detalle el mecanismo de permeabilidad y como estimamos cuanta agua puede pasar de un lado al otro.

PERMEABILIDAD

Si bien el fenómeno de la difusión y absorción capilar predominan en la mayor parte de las estructuras de hormigón, las estructuras sometidas a gradientes de presión de agua no son infrecuentes en obras subterráneas y son las protagonistas en estructuras de contención. Las estructuras sumergidas o de contención de líquidos, están expuestas así al desplazamiento del líquido en su interior cuya velocidad de penetración depende la de permeabilidad (K) del material.
La permeabilidad o el paso de un caudal determinado de agua a través del material está definida así por la relación de Darcy:

$$Q = -\frac{KA}{\mu}\frac{dP}{dz} \qquad (1)$$

Donde Q es el caudal de un fluido de viscosidad cinemática μ que atraviesa un espesor dz de sección aparente A bajo el gradiente de presión dP. Esta expresión supone un régimen laminar en los poros del material.
El término K corresponde a un área y se expresa entonces en metros cuadrados. Esta magnitud se denomina permeabilidad intrínseca y no debe confundirse con el coeficiente de permeabilidad[5]. Este parámetro como lo señala Buil y Ollivier es una característica intrínseca del material y no depende de líquido utilizado para su medida.
Ahora bien si el líquido en cuestión es agua, la literatura ha definido tradicionalmente el coeficiente de permeabilidad.
De esta forma el gradiente de presión puede redefinirse así:

$$\frac{dP}{dz} = \gamma_w \frac{dh}{dz} \qquad (2)$$

Donde γ_w es el peso específico del agua.
Debido a que la velocidad del flujo es v = Q/A entonces en la ecuación se puede expresar en términos de velocidad (v) así:

$$v = -\frac{K}{\mu_w}\gamma_w \frac{dh}{dz} \qquad (3)$$

Donde μ_w es la viscosidad del agua. Por lo que la velocidad del agua aparente se expresa como:

$$v = -K_w \frac{dh}{dz} \qquad (4)$$

De esta forma K_w se conoce como coeficiente de permeabilidad al agua y se expresa como m/s. El coeficiente de permeabilidad al agua no es una propiedad intrínseca del material puesto que depende de los parámetros γ_w y μ_w. Para el agua a 20 °C $\gamma\gamma_w = 10^4$ N/m^3 y $\mu_w = 10^{-3}$ N s/m^2. Si $K_w = K(\gamma\gamma_w/\mu_w)$, la permeabilidad (K) de 1 m^2 corresponde a un coeficiente de permeabilidad de 10^7 m/s.

[5] IBID, p. 57-99.

Los poros importantes para la permeabilidad son aquellos poros capilares con un diámetro de al menos 120 nm y deben ser continuos. Aunque otros autores (Tabla 1-IUPAC) señalan que la porosidad capilar mínima empieza con poros con un diámetro mayor a 50 nm, es decir donde empiezan los macroporos capilares.

En realidad la generación de un flujo dentro del hormigón provocado por la presencia de un delta de presión es frecuente en estructuras de contención, así existe una extensa bibliografía de estudios sobre la permeabilidad de pastas de cemento, morteros y hormigones. De esta forma desde la década de los sesenta se identificó una importante dependencia entre la permeabilidad frente a la geometría de la red porosa. Un ejemplo de esto lo constituye la variación del coeficiente de permeabilidad al agua frente a la relación agua/cemento.

La figura 4 expone los tempranos resultados de Powers[6] obtenidos sobre pastas de cemento hidratadas, donde compara diferentes relaciones A/C frente al coeficiente de permeabilidad al agua.

La variación de la relación agua/cemento tiene un efecto sobre el coeficiente de permeabilidad al agua determinante con una sensibilidad exponencial. Para comprender el impacto de la densidad de la pasta sobre la entrada de agua puede resultar útil comparar dicha penetración frente a la de un gas. Así para una variación de la relación agua/cemento de 0.40 a 0.70 la penetración de CO_2 varía en un factor de 7, mientras que para el mismo rango en pasta de cemento, el coeficiente de permeabilidad o el mismo caudal de agua, cambia en un factor de 120. De esta forma es posible concluir que la permeabilidad es altamente dependiente de la geometría y del radio promedio de la red porosa, mientras que la difusión no lo es. En una pasta madura la permeabilidad al agua depende del tamaño, forma y concentración de las partículas de gel y de si los poros capilares se han vuelto o no discontinuos[7], buena parte de estas características es definida por la relación A/C.
La guía "Concepción de hormigones para una vida útil dada"[8] desarrollada sobre la concepción de hormigones durables especificados por desempeño, señala valores de permeabilidad solo para estructuras cuya vida útil es como mínimo de 50 años (K = $0.1*10^{-18}$ m^2).

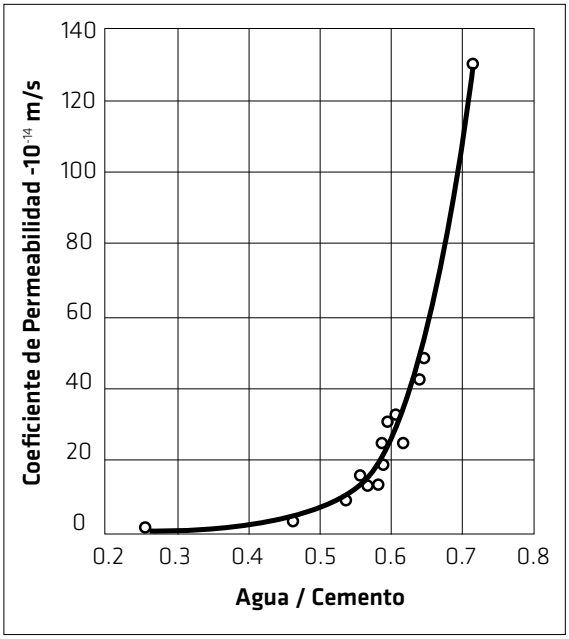


Figura 4. Efecto de la relación agua/cemento sobre los coeficientes de permeabilidad en pastas de cemento hidratado después de Powers.

Esta misma guía utiliza el parámetro de porosidad del hormigón como un valor crucial para calificar la durabilidad de la estructura. Esta característica del hormigón sin embargo puede estar o no relacionada con la permeabilidad.
La porosidad es la relación entre el volumen de poros saturables de agua con respecto al volumen total del hormigón que incluye el volumen de sólidos y poros saturables como no saturables. Pero los poros saturables pueden ser continuos o discontinuos (ciegos), solo los poros continuos (que unen dos superficies externas en el hormigón) contribuyen con la permeabilidad. De esta forma es posible contar con una porosidad alta pero con baja permeabilidad o viceversa.
Si se trata así de contener agua bajo presión es la permeabilidad la que debe ser medida y estimada.
El coeficiente de permeabilidad conocido también como coeficiente de Darcy, ha sido utilizado para calificar hormigones como poco permeables a muy permeables. Esta clasificación sin embargo ha sido poco usada debido a que el ensayo para determinar dicho coeficiente resulta de cierta forma complejo.

Tipo de hormigón	Coeficiente Darcy K (m/s)
Hormigón de baja permeabilidad	$<10^{-12}$
Hormigón de mediana permeabilidad	10^{-10} a 10^{-12}
Hormigón de alta permeabilidad	$>10^{-10}$

Tabla 2. Clasificación de la permeabilidad del hormigón de acuerdo a la NTC 4483

[6] POWERS T.C., COPELAND L.E., HAYES C., MANN H.M. (1954) "Permeability of Pórtland cement paste".
[7] IBID, p. 285-298.
[8] ASSOCIATION FRANÇAISE DE GENIE CIVIL "Conception de Bétons pour une durée de vie donné des Ouvrages, Documents scientifiques et techniques, Maîtrise de la durabilité vis-avis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction. Etat de l'art et Guide pur la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité".

Así usando la expresión de Darcy (ecuación 4), para un muro de hormigón con un coeficiente de $1*10^{-12}$ m/s y una cabeza de presión de agua de 50 m, al frente de agua le costará 6 años para atravesar un muro de 10 cm de espesor (para régimen estacionario y el muro ya saturado).

ABSORCIÓN CAPILAR

La penetración de agua al interior del hormigón basado en el fenómeno de absorción capilar se considera como el mecanismo básico o más frecuente de transporte de agua en las estructuras de hormigón reforzado[9].

El agua al tocar la superficie de un hormigón convencional sufrirá así un efecto de atracción similar al producido por una esponja. Un hormigón seco de 28 días de edad con una relación agua/cemento de 0.60 luego de 3 horas de contacto con el agua (una lluvia) ya ha absorbido 2 L/m^2. Si este hormigón tiene una porosidad del 15% eso significa que el agua ya ha penetrado en algunos puntos hasta 1.2 cm.

La velocidad de penetración por absorción capilar en un hormigón seco puede ser del orden de un millón de veces más rápida que el del mismo volumen de agua que atraviesa el mismo hormigón bajo un gradiente de presión, es decir por permeabilidad.

Las estructuras de hormigón expuestas a ciclos de humedecimiento y secado (lluvia, variación de mareas, variación de altura de niveles freáticos, etc) sin duda representan un número mayor que aquellas que están en contacto permanente con agua y que además están expuestas a una presión de agua constante.

Sobre la superficie de un cuerpo líquido como el agua, tiene lugar un ordenamiento molecular que se orienta en el plano horizontal debido a la gravedad y a las fuerzas atómicas entre las partículas (en el espacio el líquido flotará esférico). Sobre esta superficie de líquido se crea entonces una tensión paralela al plano conocida como tensión superficial.

El efecto de "sábana templada" que genera la tensión superficial, al contacto con un sólido interacciona con las fuerzas de adherencia sólido/líquido y en el caso por ejemplo de un capilar que contiene agua, provoca que la superficie del líquido se curve (hacia arriba o hacia abajo) formado ese menisco que nos es tan familiar en tubos y capilares. Sin embargo más impresionante aún, la interacción de estas fuerzas, hace que en la mayor parte de los casos la tensión superficial provoque un movimiento ascensional del líquido venciendo la gravedad.
El avance de un líquido por capilaridad no está por supuesto limitado a la ascensión, en realidad la fuerza capilar se puede dar en cualquier dirección en el espacio, puede ser oblicua o descendente. Luego de unas horas de lluvia sobre una fachada de ladrillo el agua impregna la superficie y penetra horizontalmente por capilaridad. Así los materiales porosos en contacto con líquidos están expuestos a la penetración de estos a través de su red de capilares.

El fenómeno se ha intentado predecir y modelar durante mucho tiempo, hoy en día una de las formas más aceptadas para describir el movimiento del agua en un medio poroso (hormigón, roca, ladrillo, etc) es la expresión de Hall:

$$I = S\sqrt{t} \quad \textbf{(5)}$$

donde:
I = profundidad de penetración, (mm)
S = capacidad de absorción, sortibidad, (mm/s$^{0.5}$)
t = tiempo, (s)
Esta expresión predice así la penetración del agua para las primeras horas de contacto entre el medio poroso y el líquido cuando el sólido se encuentra inicialmente seco. Así el parámetro S es una característica del material y se conoce como la Sortibidad, que describe la "velocidad" de penetración del fluido.

La sortibidad del hormigón depende al igual que el coeficiente de permeabilidad (K), de las características geométricas de la red porosa del material. Si bien el presente documento se concentra en las propiedades del hormigón y la relación entre su composición y la penetración del agua, es necesario señalar que uno de los parámetros que mayor influencia tiene sobre la penetración por absorción capilar es el estado de saturación del material. El avance de agua dentro de la red porosa por absorción capilar solo es posible en hormigones, morteros o pastas no saturadas. El porcentaje de saturación del medio juega un papel fundamental en la velocidad y la cantidad de líquido penetrado.
La figura 5 expone justamente como los valores de Sortibidad (aquí denominado como A y en mm/min$^{0.5}$) son drásticamente afectados por el nivel de humedad inicial de un mismo hormigón evaluado.
La absorción capilar que predomina como mecanismo de penetración en las estructuras de hormigón puede atravesar en 24 horas, por ejemplo para un valor de Sortibidad (S) de 133 $*10^{-4}$ (mm/s$^{0.5}$), 4 mm para un hormigón convencional.

[9] Hall, C., "Water Sorptivity of Mortars and Concretes: a review".

Es difícil que un tanque o una presa vean afectados sus niveles por pérdidas de agua debidas a la absorción capilar, sin embargo la absorción capilar si es la responsable de la mayor parte de las humedades de viviendas y estructuras en contacto con suelos eventualmente húmedos.
Un hormigón con una matriz cerrada tendrá valores de sortibidad en extremo bajos que no permitirán la penetración de agua por absorción capilar ni siquiera para tiempos muy prolongados.
Desde el punto de vista de la construcción para vivienda y en las ciudades, el control de penetración de agua por absorción capilar juega un papel crucial en la calidad de vida de las personas. Por ello durante décadas se han empleado diversas tecnologías destinadas a eliminar en primeros pisos las humedades en hormigón, mortero o muros en mampostería. Estas tecnologías en su mayoría se concentran en el uso de sustancias o aditivos bloqueadores de poros que interrumpen la penetración del líquido.
Desde el punto de vista de las obras de infraestructura la absorción capilar ha sido en general subestimada. En un muelle los pilotes y las placas que están expuestas a la variación de mareas y las zonas de salpique son definitivamente las áreas más vulnerables frente a la corrosión del acero provocada por la penetración de cloruros. En estas zonas que cuentan con ciclos de humedecimiento y secado, la penetración de agua de mar, con los cloruros diluidos, se hace básicamente a través de absorción capilar. En estas zonas la presencia de: oxígeno suficiente (en la zona sumergida hay muy poco), del ión cloruro y del agua que actúa como el medio a través del cual viajan los iones, cuenta justamente con la combinación ideal para la corrosión. Es decir si se pretende estudiar la facilidad con la que un hormigón permitirá o no la corrosión del acero debería evaluarse su coeficiente de absorción capilar o sortibilidad mas que su permeabilidad o difusión de cloruros en un medio complemente saturado.
De la misma manera los fenómenos de lixiviación del hormigón y de cristalización de sales en la superficie del mismo están definitivamente asociados a ciclos de humedecimiento y secado gobernados por la absorción capilar.

Por supuesto la penetración de agua por absorción capilar sobre una superficie de hormigón depende no solo de la composición original del material sino también de factores relacionados como la presencia de hidrofugantes, recubrimientos, de la orientación del vaciado del hormigón y la cara en contacto con el agua, de si fue curada o no la superficie y por supuesto de la presencia o no de fisuras. Sin embargo el presente documento se concentrará solo en los aspectos de composición del hormigón y de como un hormigón se considera de baja permeabilidad o "impermeable".

El hormigón conocido como autocompactante debe cumplir con una serie de propiedades en estado fresco para encajar con esta definición. Estas propiedades se determinan a través de ensayos que en este caso tienen que ver con las manejabilidades libre y restringida, con su viscosidad y su estabilidad.

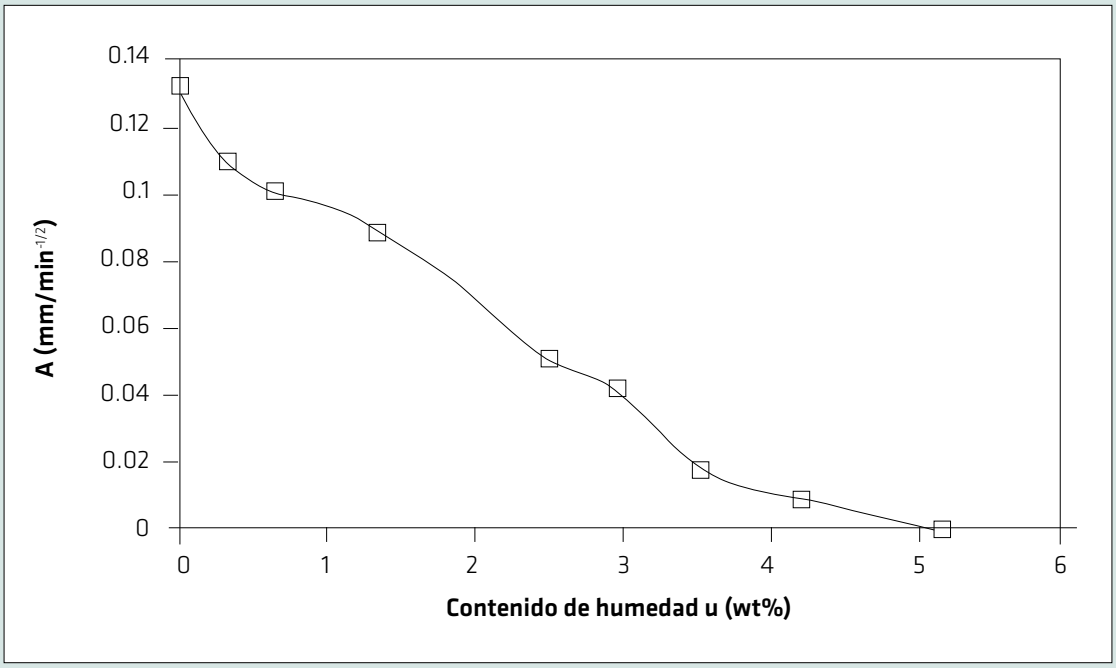


Figura 5. Efecto del contenido de humedad en hormigón sobre el coeficiente de absorción capilar (De Souza et al, 1998).

Un hormigón de alta resistencia debe igualmente cumplir con un parámetro mínimo de resistencia a la compresión (50 MPa o 60 MPa depende de la legislación) que se determina de acuerdo a un ensayo. El hormigón de retracción compensada debe cumplir así mismo una expansión mínima bajo un ensayo normalizado. Un hormigón impermeable solo podrá lograr esta denominación luego de haber superado una serie de ensayos que cumplan con unos parámetros mínimos de penetración de agua.
Es por ello que resulta importante conocer cuáles son los ensayos bajo los cuales se califica un hormigón como impermeable o no.

Estacionamiento libre de filtraciones

MÉTODOS DE MEDICIÓN Y NORMAS

DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD

Los métodos de presión de agua que se emplean para determinar la permeabilidad del hormigón se basan en dos principios básicos, los métodos de flujo constante y los métodos de penetración.

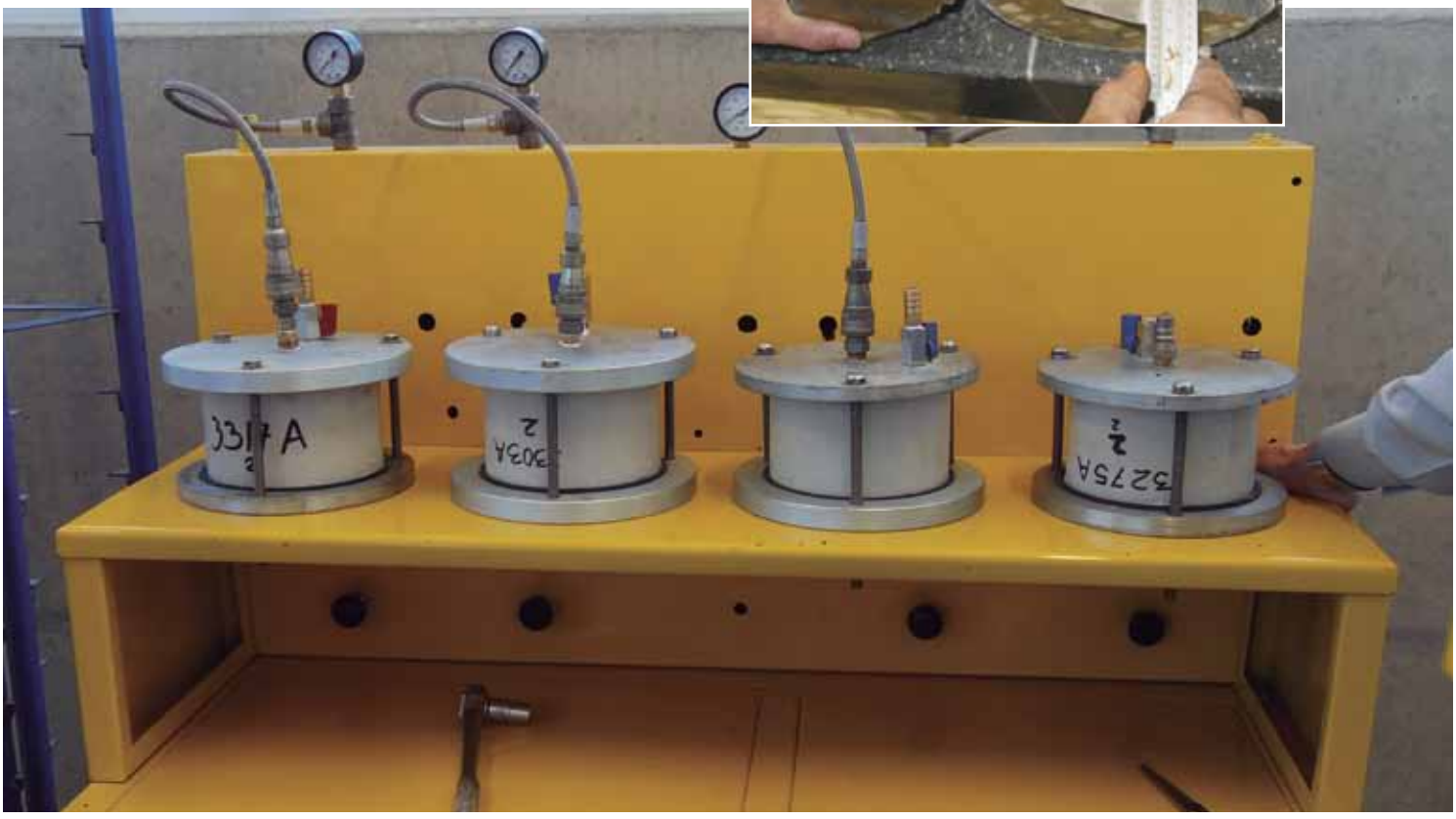
Ambas modalidades implican el exponer una probeta de hormigón endurecida a una columna de presión de agua por una de sus caras. En el método del flujo constante luego de un par de días el agua ha podido atravesar toda la longitud de la probeta y un flujo constante del líquido tiene lugar por la cara inferior del espécimen. Lo que se mide entonces es el caudal (Volumen de agua/tiempo) obtenido que junto con la longitud de la probeta, la presión ejercida y el área del espécimen permiten calcular el coeficiente de Darcy.

Sin embargo hoy en día muchos hormigones, como aquellos que incluyen en su composición adiciones minerales, impermeabilizantes o simplemente hormigones con redes porosas muy cerradas (HPC), el agua luego de semanas no pasa a través de la probeta. Así bajo las presiones usuales de 20 m hasta 130 m de columna de agua, con espesores de probetas entre 5 cm a 20 cm al agua, literalmente le resulta imposible atravesar la probeta.

El agua empieza a entrar en el hormigón bajo estas condiciones de presión para hormigones con relación A/C cercanas a 0.40, sin embargo para A/C inferiores, esta penetración no alcanza sino pocos centímetros que en muchos casos no alcanza a atravesar la probeta. Por esta razón para los hormigones en que la penetración de agua no alcanza a generar un flujo constante fácil de medir, se definió el procedimiento de profundidad de penetración. Se trata de una metodología equivalente a la de flujo constante, solo que luego de tres días se detiene el ensayo y se falla lateralmente la probeta midiendo la mancha penetración de agua. Lo que se determina así, corresponde a profundidad de penetración de agua que se identifica fácilmente a la vista.

Determinación de la profundidad de penetración de agua.

Dispositivo de medición de la permeabilidad del hormigón.

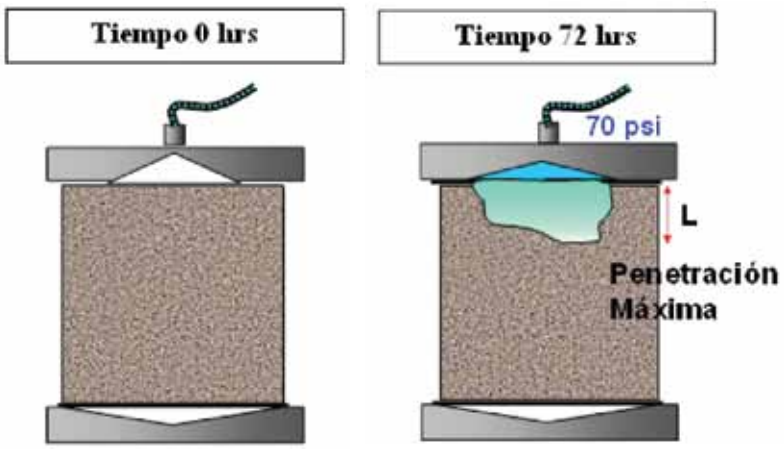


Una observación interesante corresponde a que los especímenes de hormigón destinados a medir la resistencia a la compresión con muy baja relación A/C (< 0.35), luego de 28 días de estar sumergidos en el agua de los tanques de curado al ser fallados están completamente secos en su interior. Estos mismos especímenes cilíndricos (10 cm de diámetro y 20 cm de altura) en el caso de hormigones de resistencias y A/C convencionales (A/C entre 0.75 a 0.55), a los 28 días están completamente saturados en su interior, lo que se constata luego de ser ensayados a tracción por compresión diametral.

Si bien los dispositivos para llevar a cabo estos ensayos hoy en día se adquieren con facilidad en el mercado y los procedimientos están en su mayoría normalizados, la medición de la permeabilidad del hormigón continua siendo en cierta forma, una medida muy especializada. En los laboratorios de hormigón el dispositivo para medir permeabilidad no es tan frecuente. Esto se debe principalmente a las pocas especificaciones que existen referentes a la permeabilidad al agua del hormigón. De por si el comité ACI 350 "Código de Requerimientos para estructuras de hormigón de ingeniería ambiental" que expone los métodos de diseño de estructuras de hormigón reforzado para contener líquidos o gases, dentro de su lista de lo que debe aparecer en las memorias de diseño, en lo que se refiere al hormigón solo debería mencionarse la resistencia a la compresión, la relación A/C y algunas características de composición. La resistencia a la penetración al agua, permeabilidad o el coeficiente de Darcy del material, ni siquiera se mencionan en este comité donde aparecen todas las previsiones para hacer tanques de agua.

Por otro lado el comité ACI 318-08 define el ambiente categoría P, como un entorno donde el agua se considera un agresor. Así en el caso de mayor exposición P1, debe contarse con un hormigón de "baja" permeabilidad (Capítulo 4 Requerimientos de Durabilidad). Un tanque que contiene agua se considera como el ejemplo para la situación P1, y donde como requisito para el hormigón solo se menciona una resistencia mínima de 28 MPa y una relación A/C máxima de 0,5. Una vez más está ausente cualquier especificación referente a la habilidad del agua para penetrar el hormigón.

En las normas ASTM igualmente brilla por su ausencia un método normalizado para medir la permeabilidad al agua del hormigón, es por ello que EEUU para casos donde aparece especificado una permeabilidad al agua dada, se emplean las normas del cuerpo de ingenieros CRD 163 y CRD 48, bajo presiones triaxial y uniaxial respectivamente.
Las especificaciones de permeabilidad aparecen en general para estructuras con altos niveles de ingeniería y por lo tanto para niveles de inversión elevados. Las presas, reactores nucleares y estructuras Offshore son algunos de los ejemplos en los que la permeabilidad al agua del hormigón aparece con un número tan claro como puede serlo el de la resistencia a la compresión.
En una presa de hormigón compactado con rodillo (CCR) la permeabilidad del material[10] se especifica entre 15 a 1500 m/s x 10^{-11} , los hormigones convencionales más usados en la actualidad por su parte (A/C 0.60 a 0.7) varían su coeficiente de permeabilidad entre 1 a 10 x 10^{-10} m/s.



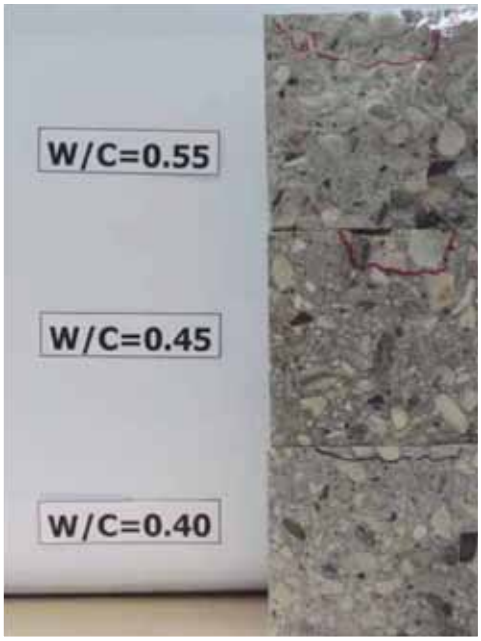


Figura 6. Esquema de funcionamiento de la norma EN 12390-8 de penetración de agua.

[10] KLINER R.A., "Design guidelines for Roller Compacted Concrete lift joints".

La comunidad europea por su parte cuenta con la norma EN 12390-8 "Profundidad de penetración de agua bajo presión", esta metodología se concentra en medir bajo 50 m de columna de agua la profundidad de penetración. Esta norma no determina el coeficiente de permeabilidad, como tampoco tiene lugar flujo alguno luego de las 72 horas que dura el ensayo. Al terminar el tiempo de exposición del hormigón a dicha presión la probeta es ensayada bajo tracción indirecta (método brasilero) y se mide visualmente la profundidad máxima de la mancha de agua penetrada. Esta medida de penetración máxima ha sido usada en diferentes especificaciones y se considera como una medida de la calidad del hormigón y de la facilidad de penetración del agua en él.
La norma alemana DIN 1048-5 cuenta con un protocolo y condiciones similares.
Una modificación cada vez más usada de la norma europea es la de aumentar la presión a 100 m de columna de agua y el tiempo a 96 horas y usar la ecuación de Valenta para calcular con la profundidad de penetración el coeficiente de permeabilidad.

DETERMINACIÓN DE LA ABSORCIÓN CAPILAR

En la tecnología de hormigón la absorción capilar ha sido en cierta forma subestimada, de hecho, un método ASTM para determinar dicha propiedad solo fue definido en el año 2004. Así la norma ASTM C 1585 "Método normalizado para la medición de la tasa de absorción de agua en hormigones de cemento hidráulico" determina la velocidad con la que el agua penetra en un hormigón seco. La velocidad de penetración del agua durante las primeras horas (hasta las 6 hrs aprox.) es una, mientras que a partir de las 24 horas su comportamiento es otro.

La norma ASTM C 1585-04 define así la tasa de absorción inicial (S_i) como la relación entre la profundidad de penetración y la raíz cuadrada del tiempo. Este parámetro describe la penetración del agua en el medio poroso como se explicó atrás, gracias a las fuerzas capilares en un hormigón seco.
En la comunidad europea la norma SIA 262 Anexo A, es la norma con la que se determina la capacidad de absorción capilar del hormigón. Este método cuenta con un preacondicionamiento de las probetas que considera la humedad inicial al interior de la misma y luego la corrige. La metodología tiene el cuidado de "secar" la probeta durante 48 hrs a 50 °C, esto se debe a que existe un error muy extendido en las normas que intentan determinar la facilidad de penetración de agua al interior del hormigón y que tiene que ver con que secan el hormigón en el horno a 105 °C. El someter el hormigón a esta temperatura genera microfisuraciones en la pasta y puede aumentar la porosidad de la misma en más de un 10% del parámetro[11]. Es por ello que una de las dificultades más grandes en los métodos para determinar la absorción capilar lo constituye el preacondicionamiento o secado inicial (y final) de los especímenes. El ensayo SIA 262 es muy sencillo pero su desarrollo completo toma 16 días.

Las probetas cilíndricas de hormigón de 5 cm de diámetro luego de su secado inicial son semisumergidas en una lámina de agua de 3 mm de espesor, durante 24 horas. La penetración de agua en su interior se hace por la ganancia sistemática de peso que se registra en intervalos de tiempo dados. El resultado del ensayo SIA 262-Anexo A se expresa en términos de q_w en g/(m²*h).

Existen también otras metodologías tendientes a determinar la absorción capilar más concentradas en la superficie del material que en su integralidad, una de ellas cada vez más frecuente en las especificaciones corresponde al ISAT-10 (Inicial Surface Absorption Test- 10 min). El ISAT se constituye en un ensayo originalmente creado para la industria de la prefabricación con el objeto de calificar la calidad de las superficie de los elementos. Este método se concentra en medir sobre el hormigón seco el volumen de agua penetrado a los 10 minutos. El dispositivo para medir el ISAT-10 es relativamente sencillo (Figura 7) y este parámetro ha demostrado una correlación por encima de 0.95 con la resistencia al hielo-deshielo (penetración de agua)[12]. La norma BS 1881-208 describe el método de ensayo aunque no aparece una clasificación de hormigones de acuerdo al resultado, sin embargo si existe una escala creada por la Concrete Society que clasifica los hormigones de acuerdo al parámetro ISAT, dicha clasificación aparece en la Tabla 3.

[11] ALIGIZAKI, K.,K., "Pore structure of Cement-based materials".
[12] DHIR R.K., JONES M.R., BYARS E.A., SHAABAB I.G. (1994) "Predicting Concrete Durability from its Absorption".

Las técnicas que buscan comprender la cantidad, velocidad y magnitud de penetración del agua en el hormigón como vemos trascienden largamente el simple valor de la porosidad del hormigón. Dos hormigones con la misma porosidad (v.g. 13 %) pueden tener características de penetración de agua completamente diferentes dependiendo del número de macroporos frente a número de microporos, así como de la tortuosidad y conectividad entre ellos. Es por ello que si queremos comprender los mecanismos de penetración de agua se debe no solo contar con un dato de vacíos sino de su verdadera interacción con el líquido. La geometría de la red porosa de la pasta de cemento y del hormigón en general, influye en su comportamiento mecánico pero aún más en la facilidad como gases y líquidos penetran el material.

La permeabilidad y la absorción capilar están principalmente influenciadas por el volumen total de vacíos, su tamaño, su forma y su conectividad. Es por ello que su modelación resulta compleja y por lo tanto su evaluación en ensayos se constituye en la forma más rápida y económica de entender la facilidad del agua para penetrar en un hormigón en particular.

Clasificación de durabilidad	ISAT - 10 (ml/m²/s*10-2)
1	<50
2	51-70
3	71-90
4	91-110
5	>110

Tabla 3. Clasificación de durabilidad de acuerdo al resultado de ISAT-10

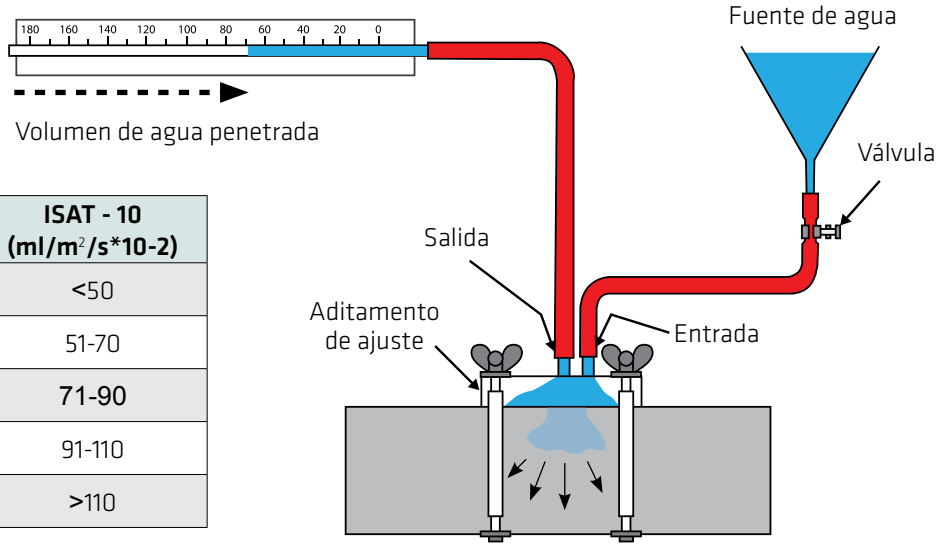


Figura 7. Ensayo de Absorción capilar ISAT-10 (Initial Surface Absorption Test-10 min) de acuerdo B5 1881

Piscina complejo acuático de Bogotá

MÉTODOS DE MEDICIÓN Y NORMAS

¿QUÉ ES UN HORMIGÓN IMPERMEABLE?

Se podría pensar que un hormigón impermeable es un elemento de hormigón en el que una de sus caras está en contacto con un líquido (v.g agua) mientras que la cara opuesta permanece seca. Esto en realidad no es un hormigón impermeable se puede tener un hormigón con una permeabilidad muy alta en el que la cara opuesta a la que está en contacto con el agua permanece seca, debido a que tiene un espesor de varias decenas de metros. Es decir un caudal nulo o muy bajo de agua puede apenas atravesar un muro delgado de hormigón de baja permeabilidad o el mismo caudal obtenerse con un muro muy grueso con un hormigón de alta permeabilidad (Figura 8).

Figura 8. Igual caudal de infiltración para hormigones de diferentes calidades y geometrías.

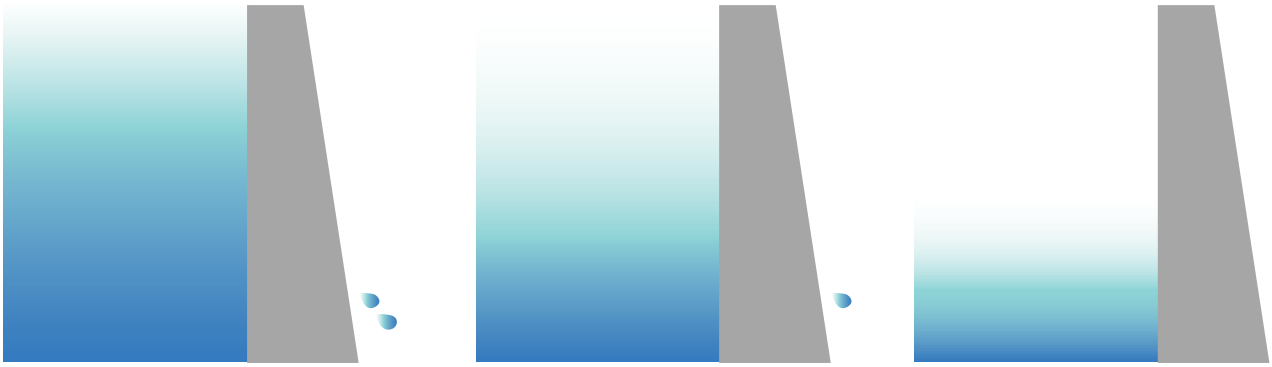


Figura 9. Influencia de la presión y área de contacto del agua sobre la filtración para estructuras de igual geometría, constituidas por la misma calidad de hormigón.

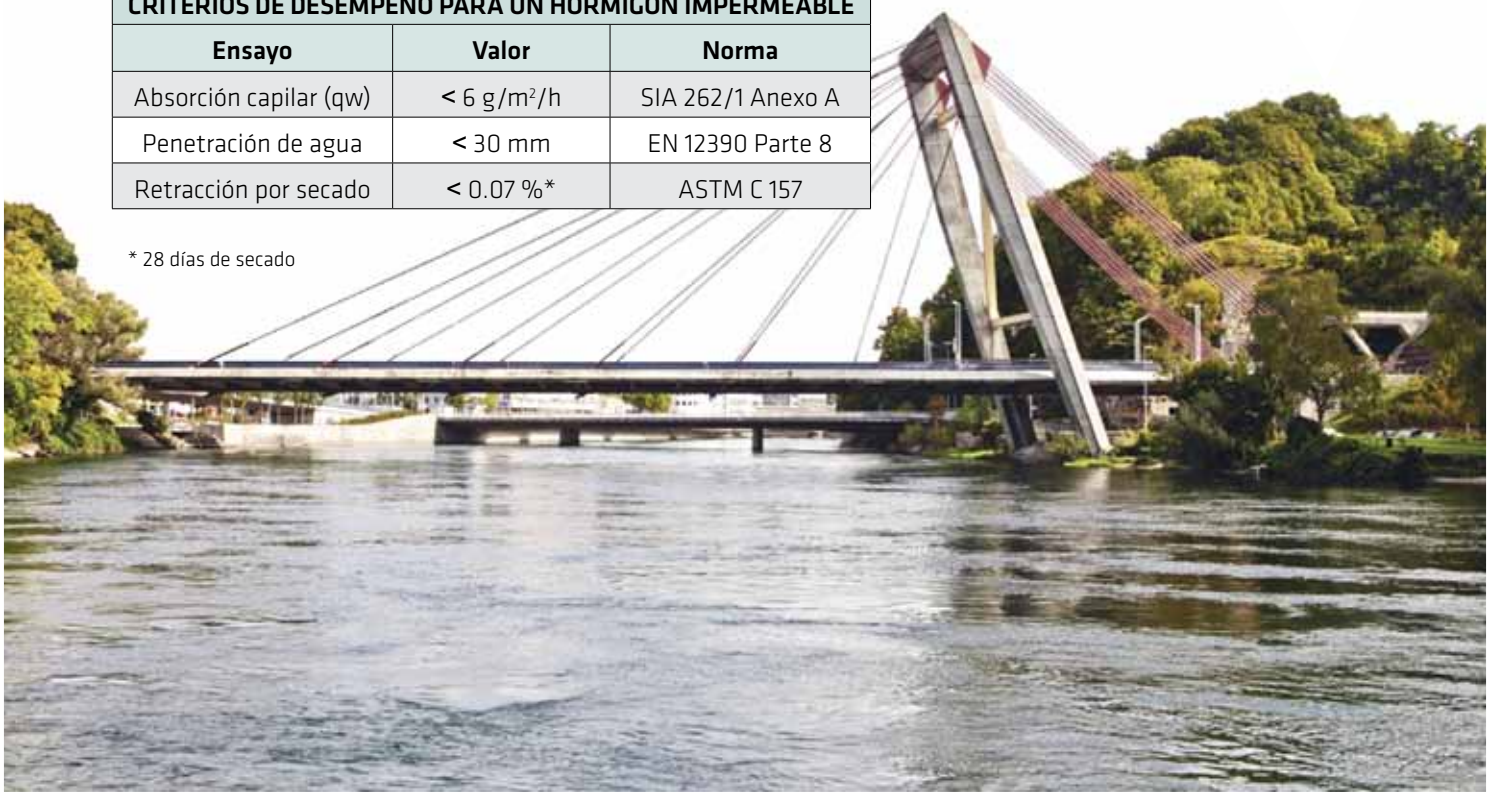
Asimismo estructuras de hormigón de igual geometría construidas con la misma calidad de hormigón pueden ser atravesadas o no por el agua dependiendo de la presión de esta y del área en contacto (Figura 9).
Como vemos tanto la geometría como la presión de agua y área en contacto son variables externas al material mismo, relacionadas con la estructura y su entorno.
Cuando se define el hormigón impermeable se define solo el material sin tener en consideración los aspectos de la estructura o si habrá o no agua del otro lado de la estructura.
La definición de hormigón impermeable es similar a la de un hormigón de alta resistencia. Es decir se define la propiedad del material como tal y no su funcionamiento en la estructura. Un hormigón de alta resistencia es aquel que cuenta con una resistencia a la compresión superior a 60 MPa (independientemente de su edad). Si se usa este hormigón para constituir una columna con sección insuficiente o se la sobrecarga, esta columna fallará, sin que el hormigón haya dejado de ser de alta resistencia.
Un hormigón "impermeable" debería denominarse en realidad como hormigón de baja permeabilidad, puesto que la definición de "impermeable" podría asociarse a la definición de "irrompible". Así, los hormigones conocidos hoy como "impermeables" con espesor insuficiente o con la suficiente presión, el agua si podría atravesarlos.

Dentro del lenguaje de la construcción resulta difícil eliminar la denominación de hormigón impermeable (irrompible), así que se la puede adoptar con la conciencia de que se trata de la característica del material y no de la estructura.
Sika ha definido el hormigón impermeable en términos de las propiedades de transporte más importantes para la penetración de agua arriba examinadas: la permeabilidad y la absorción capilar. Así mismo resulta indispensable definir un parámetro que limite la formación de fisuras del material como lo es la retracción. Si definiéramos un ancho máximo de fisura como lo hace la PCA en su manual de diseño "Circular Concrete Tanks Without Prestressing," (max. 0.2 mm) nos estaríamos refiriendo a la estructura y no al material.
La definición entonces del material se limita a este y no a la estructura, así el hormigón "impermeable" es aquel que cumple con los requisitos que aparecen en la Tabla 4.

Tabla 4. Propiedades y valores para la obtención de un hormigón "impermeable".

CRITERIOS DE DESEMPEÑO PARA UN HORMIGÓN IMPERMEABLE		
Ensayo	**Valor**	**Norma**
Absorción capilar (qw)	< 6 g/m²/h	SIA 262/1 Anexo A
Penetración de agua	< 30 mm	EN 12390 Parte 8
Retracción por secado	< 0.07 %*	ASTM C 157

* 28 días de secado



ADITIVOS PARA HORMIGÓN IMPERMEABLE

La razón por la que se emplean los aditivos para disminuir la permeabilidad van mucho más allá de impedir la entrada o salida de agua. Esta variedad de aditivos se emplean también para impedir o disminuir la aparición de eflorescencias, para aminorar los riesgos de corrosión del acero, de carbonatación y la acción de hielo/deshielo.

Los aditivos impermeabilizantes son usados en hormigones que van a estar en contacto con el agua y en aquellas estructuras que contienen líquidos, como tanques, estructuras enterradas, túneles, presas, puentes, muros de contención, instalaciones de centros acuáticos etc. Estas sustancias que aumentan la vida útil del hormigón reforzado, contribuyen a alcanzar el cometido de mantener el agua donde se ha previsto que permanezca o fluya.

El comité ACI 212-10 "Aditivos para Hormigón"[13] en su capítulo 15 "Aditivos para reducir la permeabilidad" clasifica los aditivos en dos subcategorías: aditivos para detener el agua proveniente de la lluvia, ascensión capilar etc. y aditivos para estructuras expuestas a un gradiente de presión. Es decir aditivos para contrarrestar la absorción capilar y aditivos para detener el ingreso de agua por permeabilidad.

El comité divide para estas dos funciones los aditivos en: impermeabilizantes hidrofóbicos, bloqueadores líquidos, sólidos (talcos, arcillas, bentonitas, fillers activos etc.) y materiales cristalinos o que cristalizan. Igualmente considera las combinaciones de todas estas sustancias.

Cada una de estas alternativas que pueden tener efecto o no sobre las propiedades del hormigón en estado fresco o endurecido, presentan igualmente diferentes niveles de habilidad frente al agua al impedir penetrar el material. Este mismo reporte del ACI 212 expone algunos ejemplos de la acción de los impermeabilizantes sobre el coeficiente de permeabilidad obtenidos por el método europeo modificado (Valenta). Dichos resultados aparecen en las figuras 10 y 11.

[13] ACI 212.3R-10 "Report on Chemical Admixtures for concrete".

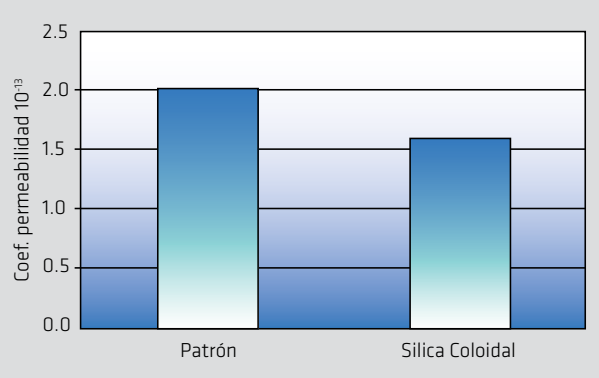


Figura 10. Efecto de la adición de sílica coloidal en un hormigón con un coeficiente de permeabilidad de 1x 10^{-13} m/s

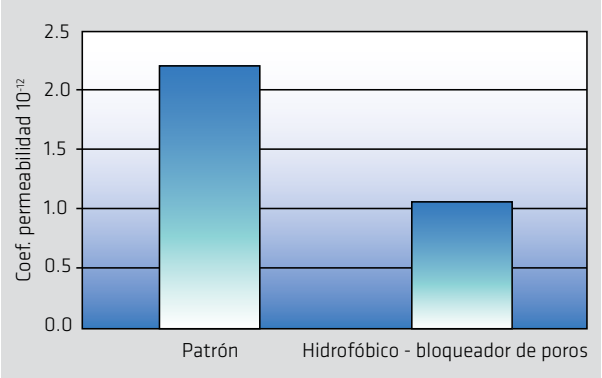


Figura 11. Efecto de la adición de un aditivo hidrofóbico en un hormigón con un coeficiente de permeabilidad de 1x 10^{-12} m/s

Si bien las figuras anteriores exponen la acción de diferentes alternativas para disminuir el coeficiente de permeabilidad hay que señalar que para comparar la acción de distintos impermeabilizantes es necesario comparar el efecto a partir de patrones (hormigones sin aditivo) de igual permeabilidad. El efecto de un impermeabilizante varía con respecto a la permeabilidad inicial del hormigón patrón. Los impermeabilizantes en general son más eficientes para hormigones con coeficientes de permeabilidad inicial altos, a medida que el hormigón cuenta con una matriz porosa más cerrada el efecto del impermeabilizante se ve menos. El reporte del ACI 212.3R justamente comete este error al comparar porcentualmente la acción de aditivos frente a hormigones patrón con diferencias en coeficientes de permeabilidad con un orden de magnitud.

Los aditivos impermeabilizantes han sido usados tanto en hormigón como en mortero durante mucho tiempo para resolver problemas relacionados con humedades o pasos de agua.

Los aditivos **Sika®-1** o **SikaLite®** son aditivos diseñados para impermeabilizar morteros y hormigones (aunque se han utilizado sobre todo en mortero) que tienen un triple efecto sobre estos materiales:

a. Generación de sólidos que bloquean la porosidad interna de la pasta. En este caso reaccionan con los hidratos del cemento (CH, CSH) y generan nuevos compuestos.

b. Generación de oleatos que igualmente saturan la solución capilar y se precipitan dentro de la porosidad.

c. Generación de aire. El aire interrumpe la formación de capilares que logren llegar a la superficie del hormigón. Eliminando así los canales de entrada futura del líquido.La figura 13 muestra especímenes circulares de mortero que han sido semisumergidos en una lámina de agua de 3 mm y al cabo de 4 horas más de la mitad de ellos han sido completamente saturados por agua absorbida por ascensión capilar, mientras que la otra mitad de exactamente el mismo mortero permanecen secos puesto que contienen Sika®-1 (dilución del líquido de amasado 1:10).

Un aditivo como **Sika®-1** puede disminuir o eliminar la penetración de agua por absorción capilar como lo demuestran los resultados de la figura 12 y 14, de acuerdo a la cantidad del aditivo usado. Así la figura 14 muestra que la velocidad de penetración de agua para alcanzar un volumen de 2 g/m² se disminuye en un factor de más de 12 veces en un mortero donde se ha usado una dilución de **Sika®-1**: Agua de 1:5 en masa.

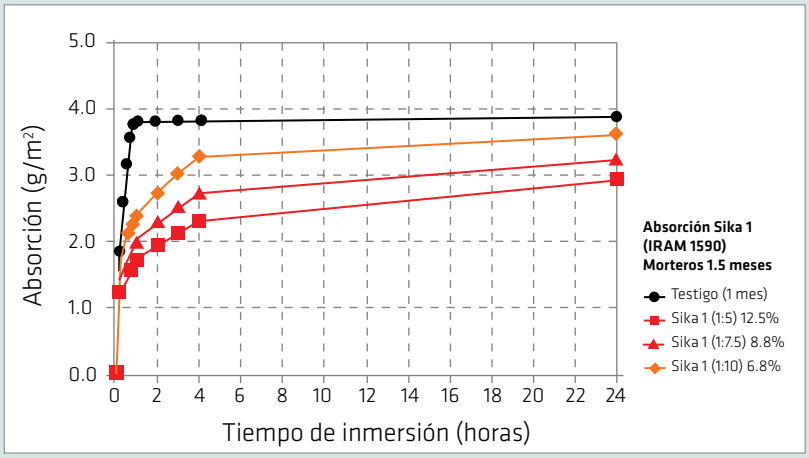


Figura 12. Efecto del **Sika®-1** diluido a (1:5, 1:7.5 y 1:10- **Sika®-1**: Agua) en un mortero de A/C =0.75.

Figura 13. Especímenes de mortero semisumergido con y sin Sika 1 al cabo de 4 horas de absorción capilar.

En el caso del hormigón se desarrolló recientemente, aditivos especiales como el **Sika WT-100**, que permiten disminuir la permeabilidad hasta lograr las condiciones de un hormigón "impermeable" de acuerdo a la Tabla 4.

Por supuesto existen diferentes formas de hacer un hormigón "impermeable" o mejor de baja permeabilidad. Las adiciones minerales como ceniza volante[14], escoria de alto horno[15], puzolanas o humo de sílice[16] han demostrado que tienen un efecto de llenar y bloquear los espacios porosos de la pasta de hormigón hidratado. Eso se debe principalmente a que la velocidad de hidratación del Clinker o cemento Portland es diferente al de las adiciones minerales, de modo que cuando estas últimas se hidratan lo hacen dentro de una porosidad ya creada bloqueándola. Los porcentajes de adición mineral mínimos para tener un efecto sobre la penetración de líquidos están por encima de un 15% del peso total del cementante exceptuando del humo sílice. Por lo tanto, si se pretende disminuir la permeabilidad con una adición se debe considerar la instalación de un silo adicional en la planta y el transporte de estos cementantes alternativos que no siempre están a la mano de los constructores. Igualmente debe considerarse que las adiciones minerales pueden utilizarse como reemplazo del cemento o como una masa cementante adicional al cemento original y los efectos de ambas situaciones no son los mismos.

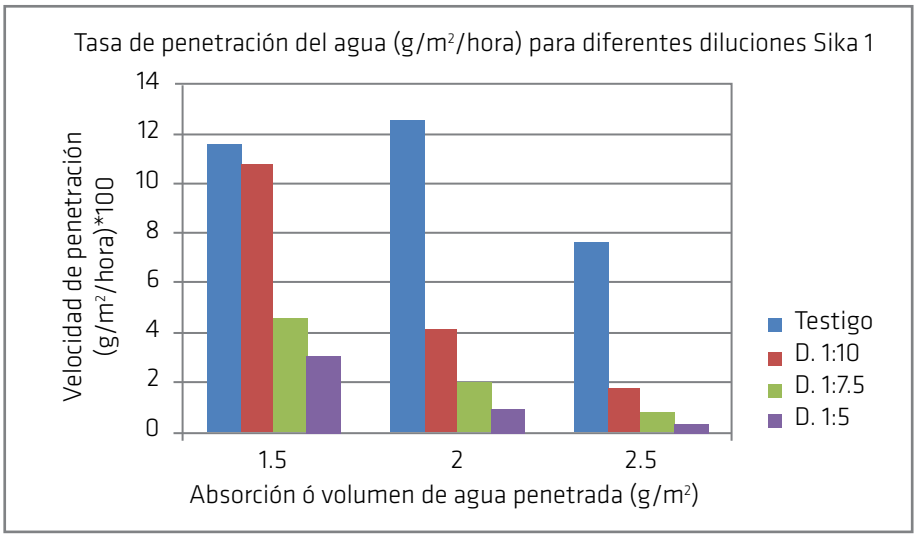


Figura 14. Velocidad de penetración de un volumen dado de agua por absorción capilar en morteros iguales que se diferencian solo por las concentraciones de **Sika®-1** (Dilución de líquido de amasado de 1:10, 1:7.5, 1:5 – Aditivo:Agua)

Uno de los parámetros modificados en la tecnología del hormigón para disminuir la permeabilidad del mismo es sin duda la relación Agua/Cemento. Como se ilustra en la figura 4, desde la década de los cincuenta se conoce el efecto exponencial de la calidad de la pasta sobre la penetración de líquidos al interior del hormigón. La figura 15 expone resultados recientes del efecto de la relación agua/cemento sobre la penetración de agua de acuerdo al método europeo EN 12390-8.

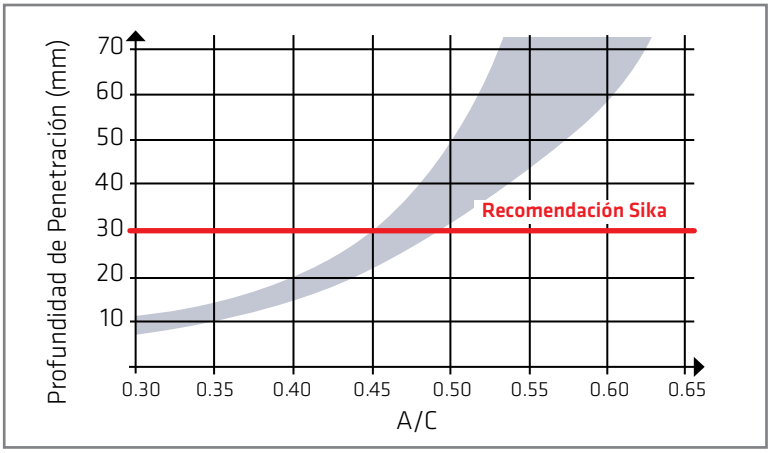


Figura 15. Relación entre la penetración de agua (mm) y la relación A/C de acuerdo con la norma EN 12390-8[17]

[14] HEDEGAARD, S. E., HANSEN T. C. (1992) "Water permeability of fly ash concretes Materials and Structures".
[15] OZYILDIRIM.C. "Low permeability Concretes containing slag and silica fume".
[16] ACI 234.R "Guide for the Use of Silica fume in Concrete".
[17] SCHLUMPF J., BICHER B., SCHWOON O., "Sika Concrete Handbook".
[18] HERMIDA, G., HERRERA D., "Efecto del aditivo Sika 100 WT".
[19] HERMIDA, G, "Influence du volume de pâte et de la concentration en ciment sur la performance du béton : vers le développement d'un béton à contenu minimal en pâte"

De acuerdo a la figura 15 la condición de un hormigón "impermeable" se lograría con una relación A/C inferior a 0.45 donde la penetración de agua en el peor de los casos sería de 30 mm. Esta relación A/C asimismo coincide con la recomendación europea para proteger un hormigón frente a los ambientes más agresivos como aparece en la norma EN 206:2000.

Sin embargo esta relación Agua/Cemento (0.45) está muy sobre el borde de la especificación de hormigón impermeable (Tabla 4). Por lo que debería contarse con un factor de seguridad que puede obtenerse disminuyendo aún más la relación A/C o incluyendo un aditivo impermeabilizante.

Sobre esta misma figura 15 se superponen los resultados de penetración de agua de acuerdo a la norma EN 12390-8 obtenidos en Sika, sobre hormigones idénticos con y sin el impermeabilizante **Sika WT-100**.
En la figura 16 se puede apreciar que un hormigón de A/C de 0.45 sin impermeabilizante (triángulo) sufrió exactamente una penetración de 30 mm de agua mientras que ese mismo hormigón con la misma A/C, con un 2% de **Sika WT-100**, disminuyó dicha penetración a 20 mm (cuadrado). Ahora bien disminuir a 20 mm de penetración de agua también puede hacerse disminuyendo la relación A/C de 0.45 a 0.40 como lo muestra la flecha roja (Figura 16). Así ambos hormigones 0.40 y 0.45+2% de **Sika WT-100** tienen la misma capacidad de resistir la penetración de agua.

Sin embargo existen algunas ventajas que hacen la solución con el impermeabilizante más atractivas que disminuir simplemente la relación A/C. Entre ellas se pueden enumerar:

- Menores relaciones A/C implican en la mayor parte de los casos un incremento en la cantidad de cementante lo que implica en general un aumento en el volumen de pasta y por ello un incremento en la retracción, es decir un aumento en el riesgo de fisuración[19].
- Es más económico en la mayor parte de los casos la alternativa con el impermeabilizante.
- Relaciones A/C más bajas implicanhormigones más viscosos difíciles de bombear y transportar.
- Relaciones A/C más bajas buscando cumplir un requerimiento de penetración de agua aumentan la resistencia muy por encima de la diseño. Lo que podría en algunos casos alejar la estructura real de la diseñada originalmente.

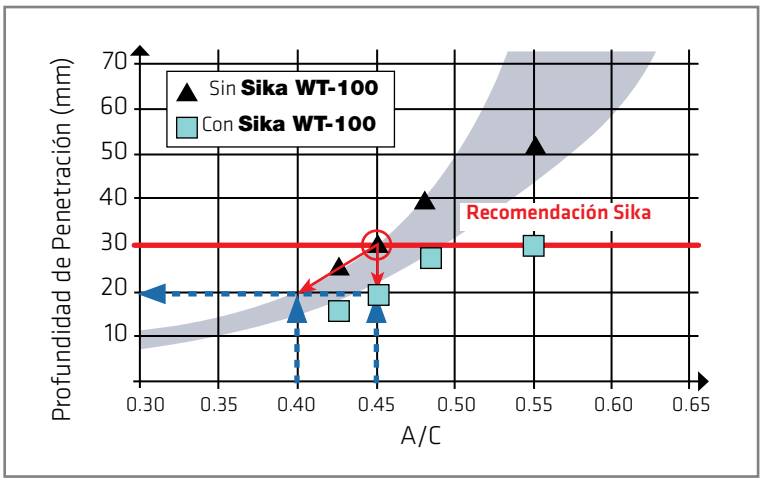


Figura 16. Resultados de Penetración de Agua vs. A/C superpuestos a resultados recientes LEM-Sika con y sin **Sika WT100**[18].

Conducción de agua - Tubería en Hormigón

SIKA WT-100

Sika WT-100 es un impermeabilizante sin cloruros que actúa como un bloqueador de poros y está diseñado tanto para detener la penetración de agua por absorción capilar como la penetración de agua bajo presión.
La figura 17 justamente confirma lo mencionado atrás, respecto a la importancia de evaluar el efecto de aditivos impermeabilizantes partiendo de hormigones patrón (sin aditivo) de igual nivel de impermeabilidad. Así, en este caso, el efecto de este aditivo se ve mas pronunciado para relaciones agua/cemento altas que para bajas o muy bajas. Es por ello que el reporte del comité ACI 212-3 podría estar concluyendo de manera errónea cuando compara el efecto de un impermeabilizante frente a un testigo de permeabilidad dada y luego frente a un hormigón 100 veces menos permeable.
Sika WT-100 en la prueba de disminución de la penetración de agua vemos que tiene una dosis a partir de la cual el efecto disminuye, en este caso dicha dosis corresponde al 2% del peso del cemento. A partir de dicha dosis si bien el aditivo disminuye la penetración, su efecto sobre la penetración de agua es menos pronunciado.

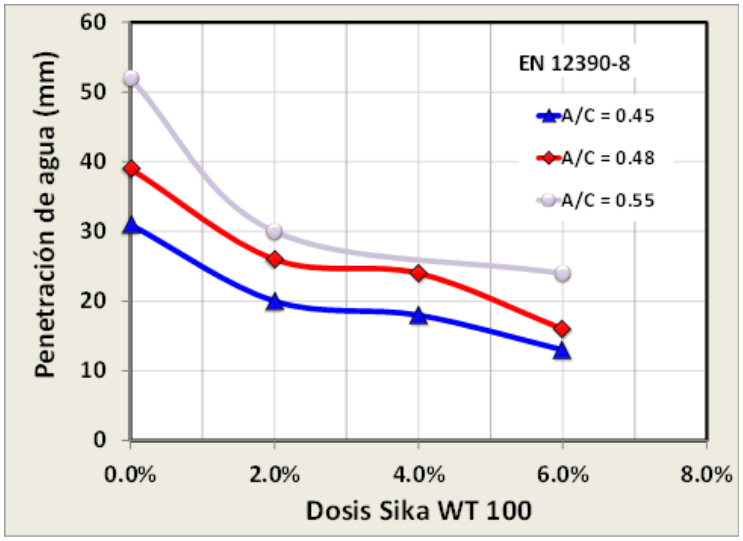
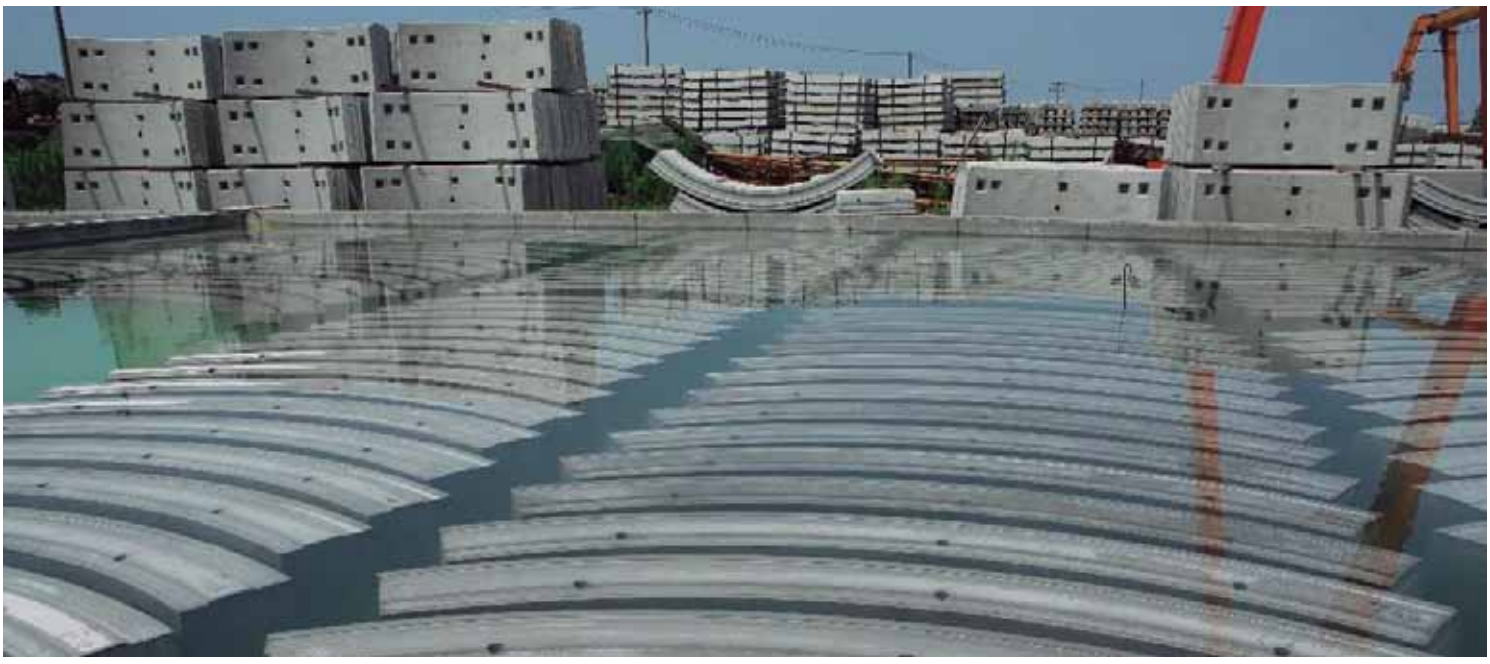


Figura 17. Efecto del aditivo **Sika WT-100** para diferentes relaciones A/C y diferentes dosificaciones frente a la penetración de agua de acuerdo con la norma EN 12390-8



Sika WT-100 por su parte no muestra una dosis de saturación o de máxima eficiencia en lo que respecta al disminuir la absorción capilar, este efecto se obtiene de manera lineal como lo evidencia la figura 18, hasta las dosis evaluadas.

Un balance entre la relación A/C y el aditivo impermeable **Sika WT-100**, permite así obtener hormigones impermeables que pueden ser entre 10 a 100 veces más resistentes a la penetración del agua que un hormigón convencional.
(A/C 0,60-0,70; sin impermeabilizante)

El uso de superplastificantes libres de cloruros, especialmente diseñados para ser compatibles con **Sika WT-100** permitirán al hormigón tener la manejabilidad suficiente (v.g Asentamiento>15 cm) para evitar tener problemas de compactación durante la colocación del hormigón. **Sikament Watertight** o **Viscocrete Watertight** son los superplastificantes ideales en la obtención de un hormigón "impermeable".

La combinación superplastificante - impermeabilizante se constituye así en el eje de la obtención de un material resistente a la penetración del agua, dentro de su propia masa.

Las partes de cemento impermeables son tan viscosas que obligan sin duda al uso de un superplastificante para garantizar la correcta consolidación del material y el impermeabilizante termina de la manera más económica y segura de obtener una red porosa cerrada.

Sika WT-100 bloquea los poros capilares desde 10 *n*m hasta 20.000 *n*m (20 *μ*m).

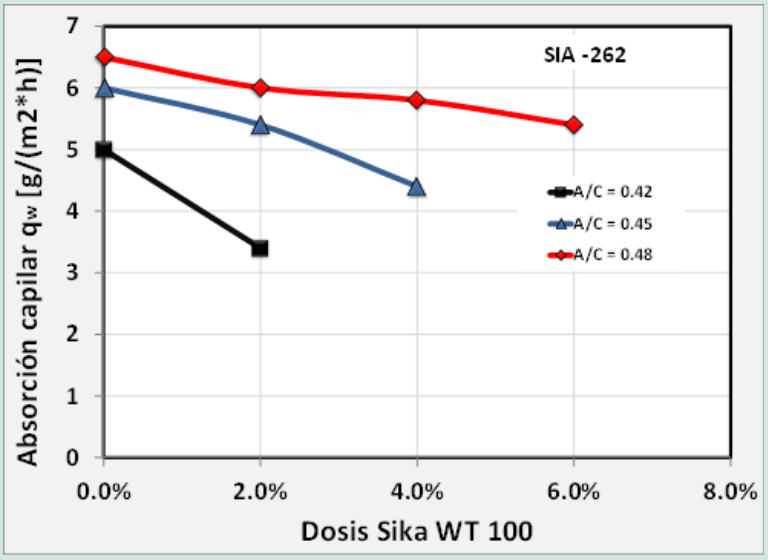


Figura 18. Efecto del aditivo **Sika WT-100** para diferentes relaciones A/C y diferentes dosificaciones, frente a la penetración de agua por absorción capilar de acuerdo con la norma EN 262- Anexo A.

Figura 19. Ensayo de absorción capilar de hormigón de acuerdo con la norma SIA 262-Anexo A.

Figura 20. Efecto de **Sika WT-100** sobre la penetración de agua.

¿RETRACCIÓN Y PERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN?

Un hormigón "impermeable" o de baja permeabilidad puede serlo en su matriz pero si existe una fisura en el elemento constituido por este hormigón, habrá paso de agua. Desde el punto de vista del material existen hormigones que se retraen mucho más que otros. La retracción en estado endurecido del hormigón conocida como retracción por secado, depende fundamentalmente desde el punto de vista de composición del material de el volumen de agua[20], del volumen de pasta[21] y del tipo de cementante empleado.

Es por ello que un hormigón "impermeable" debe ser al mismo tiempo un hormigón de baja retracción por secado.

Si se sigue la metodología ASTM C157 la retracción se mide luego de 28 días de curado húmedo bajo unas condiciones de secado y evaporación específicas (HR 50 %±4%, 23 °C±2 °C), las normas europeas emplean especímenes de otras dimensiones a las norteamericanas (la geometría tiene un impacto muy importante en el valor de la retracción final) así como unas condiciones de secado distintas (HR 70%) por lo que resulta difícil comparar los valores absolutos de retracción del hormigón entre las normas europeas y las de las ASTM.

De acuerdo a las normas europeas la retracción de un hormigón impermeable debería ser inferior al 0.05% de la longitud original del espécimen, mientras que bajo la ASTM, la cual es más exigente en sus condiciones, dicha retracción máxima a los 28 días de secado (56 de edad) debería ser inferior a 0.07%.

Para lograr esta condición de retracción se recomienda emplear un superplastificante como un aditivo reductor de pasta de cemento **Sikament Watertight** o **Viscocrete Watertight** como también un aditivo reductor de retracción (**Sika Control 40**).

Justamente uno de los beneficios más importantes de emplear un aditivo impermea-bilizante, más allá de simplemente reducir la relación A/C, es el de tener un hormigón con una menor cantidad de pasta de cemento. Recordemos que en general entre menor A/C. mayor cantidad de cemento, mayor volumen de pasta y entre mayor volumen de pasta mayor retracción (Ver figura 21).

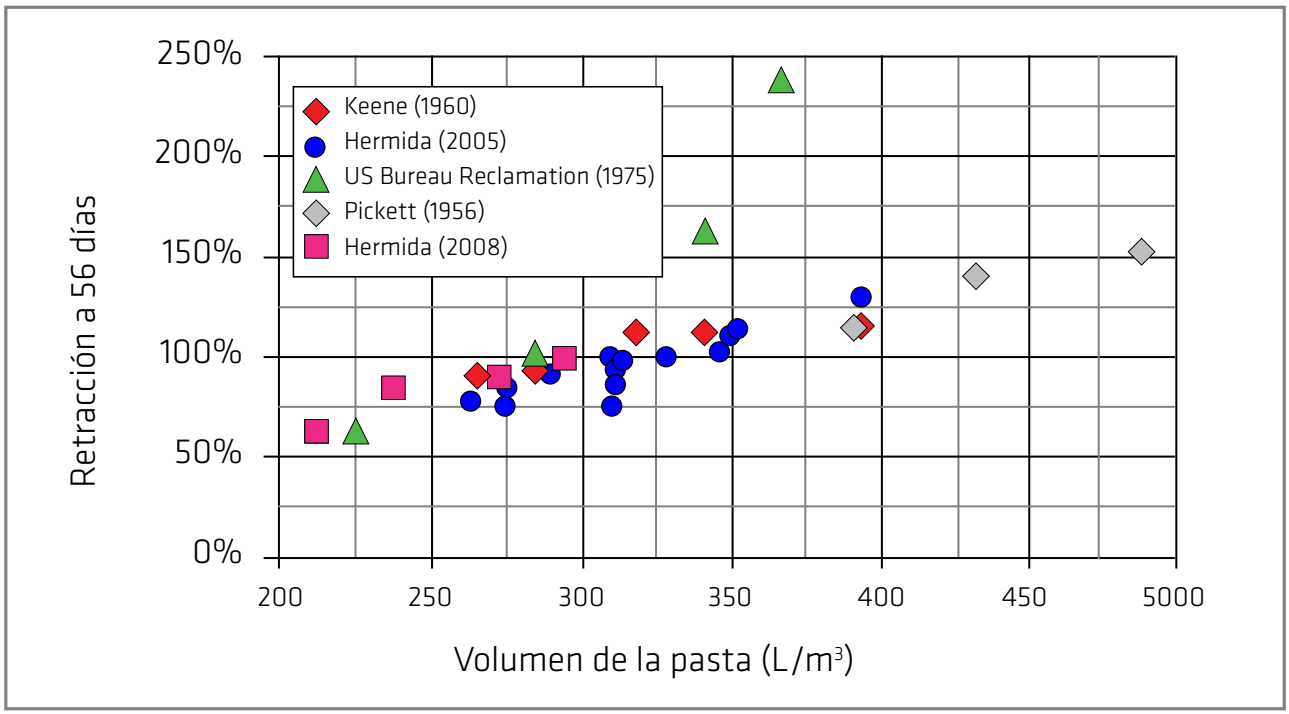


Figura 21. Relación entre el volumen de pasta y la retracción del hormigón[19].

[19] HERMIDA, G, Op. cit.
[20] BAZANT., Z., BAWEJA S., S, "Creep and Shrinkage prediction Model for analysis and Design of Concrete structures: Model B3".
[21] HERMIDA., G., GONZALEZ., J., ROMERO., A "Relación entre la composición del hormigón frente a su retracción en estado fresco y endurecido".

DISEÑO DE HORMIGÓN IMPERMEABLE

El hormigón impermeable de baja permeabilidad que puede cumplir entonces las características que aparecen en la Tabla 4.
Es un hormigón que debe:

a. Tener una relación A/C inferior a 0.45
b. Incluir un 2% del peso del cementante en **Sika WT-100**.
c. Contar con una manejabilidad inicial de mínimo 15 cm (para evitar problemas de consolidación en campo).
d. Inclusión o no de un reductor de retracción (Tipo Sika Control 40) dependiendo el valor de la retracción obtenido.

Un ejemplo de dicho diseño aparece en la siguiente tabla:

DISEÑO DE MEZCLA		
Criterio	**Valor**	**Comentario**
Agregados	Diseño de mezcla	Bien gradados Limpios
Mínimo contenido de cementante	350 kg/m^3	Cementante que cumpla los requisitos de las normas
Máxima A/C - Relación	0.45	Max. agua 160 l/m3
Manejabilidad mínima	15	Consistencia fluida
Superplastificante (HRWR / MRWR)	Sikament Watertight Viscocrete Watertight	
Aditivo Impermeabilizante	Sika WT-100	Sika bloqueador poros

El hormigón impermeable o de baja permeabilidad se puede obtener hoy en día de una manera sencilla y económica para el correcto funcionamiento de estructuras hidráulicas o en contacto con el agua.

APLICACIONES Y COMENTARIOS

El hormigón definitivamente es capaz de detener el agua y no solo puede contener líquidos sino también gases. Los depósitos de almacenamiento de gas natural como la plataforma Troll A son un ejemplo del nivel de estanqueidad del hormigón. En realidad un material que no deja pasar el agua no solo nos permitirá resguardarnos del líquido sino también navegar en él.

La historia de las estructuras de hormigón flotantes se remonta al siglo XIX. Durante la primera guerra mundial, catorce barcos fueron construidos en hormigón reforzado debido a la escasez de acero, uno de estos fue el U.S.S Selma de 130 m de largo. Para esta época el hormigón reforzado también había sido usado para la construcción naval a más pequeña escala en los países escandinavos.
En la segunda guerra mundial este tipo de barcos fue mucho más común y 24 de estas embarcaciones de gran calado surcaron los océanos mientras que 80 barcazas más pequeñas también contribuyeron al abastecimiento y transporte de tropas. La capacidad de estas naves variaron entre 3200 a 140.250 toneladas[22].

Puentes temporales construidos por una sucesión de barcazas sobre las que se fijan vigas han empleado barcazas de hormigón, en múltiples ocasiones de acuerdo a la Gloyd[23]. En 1940 justamente sobre el lago Washington fue construido un puente sobre barcazas de hormigón.
Los barcos y estructuras flotantes en hormigón siempre han estado presentes durante el último siglo, al final de la década de los cincuenta un número muy importante de barcos de hormigón preesforzado fueron construidos en Filipinas (19 barcos entre 1964 y 1966).

Remontándonos a la mitad de la década de 1920 más de 70 estructuras flotantes temporales destinadas a ser túneles fueron construidas en los siguientes países: EEUU, Canadá, Argentina, Cuba, Reino Unido, Dinamarca, Suecia, Holanda, Bélgica, Alemania, Francia, Japón y Australia[24]. Desde 1950 a 1982 se han registrado aproximadamente más de 1.130 cascos de hormigón, la mayor parte de esto corresponde a una eslora cercana a los 50 m. Entre los más grandes hay registrados 40 cascos con 110 m de longitud.

[22] MORGAN, R. G. "Development of the concrete hull. "Concrete Afloat".
[23] GLOYD, C. S. "Concrete Floating Bridges".
[24] XIV NATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING, ACAPULCO (2004) OFFSHORE STRUCTURES – A NEW CHALLENGE.

El reporte de Sare and Yee,[25] demostró que los costos de 19 cascos pretensados de hormigón construidos en Filipinas desde 1964-66 por el fabricante Lusteveco, no solo no necesitaron un muelle seco para su reparación sino que luego de varios años de servicio el promedio de mantenimiento anual fue mas bajo en cerca de un 66% comparado con los costos de cascos metálicos.

Sin que hayan sido muy conocidos cascos de hormigón rompen todos los días las olas del mares demostrando una resistencia a la abrasión y a la penetración del agua que puede competir en estas circunstancias con el metal.
Más allá de las estructuras flotantes de hormigón las enormes plataformas de extracción de petróleo y gas Offshore en los océanos del mundo han demostrado la increíble capacidad del material para mantener su impermeabilidad bajo importantes niveles de presión.

TANQUES DE AGUA
Los tanques de agua de hormigón de acuerdo con el comité ACI 350.1-01 "Tightness Testing of Environmental Engineering Concrete Structures" clasifica estos reservorios de acuerdo a su capacidad de contención de agua o mejor aún de acuerdo a las pérdidas de agua admisibles.

En realidad este comité exige el ensayo del funcionamiento de los tanques antes de su puesta en servicio. El comité si bien está concentrado en tanques de hormigón elevados, sobreterreno o enterrados, también cubre tanques en los que se emplean otros materiales. Así tanques de hormigón con cubiertas de acero, aluminio, madera etc. o tanques de acero con losas de hormigón, son también evaluados y especificados bajo este comité.

Los tanques de agua se clasifican de acuerdo al límite máximo de pérdidas de volumen de agua admisibles por día, así:

Denominación	Criterio de estanqueidad
HST-NML	Sin pérdidas medibles
HST-025	0.025% por día
HST-050	0.050% por día
HST-075	0.075% por día
HST-100	0.100% por día
HST-VIO	Inspección visual solamente

El ensayo de impermeabilidad de un tanque de hormigón o materiales combinados se inicia con el llenado del mismo a una velocidad que no puede ser superior a 1,2 m/h y se lleva hasta 10 cm por debajo del nivel máximo de sobrellenado. Luego y cada 24 horas se mide el nivel del agua (ojalá en cuatro puntos cada 90 °C de ángulo medido desde el centro del tanque). Si el tanque tiene una sección constante en toda su altura basta con calcular la pérdida de nivel del agua. En esta prueba hidrostática (Hydrostatic Test- HST) para un tanque clasificado como HST-075, la duración del ensayo (días de medida) debe estimarse para que con la máxima tasa de pérdida permitida (en este caso 0.075% / 24 h) la caída sea de por lo menos 10 mm.

Así para un tanque cuya altura de agua es de 6.5 metros que debe ser HST-075 la duración del ensayo o tiempo de medidas del nivel del agua se calcularía así:

$$Tiempo\ de\ prueba = \frac{10\ mm}{\frac{0.00075\frac{mm}{mm}}{día}\ 6500\ mm} = 2.05\ días$$

[25] SARE AND YEE "Operational experience with pre-stressed concrete barges Concrete Afloat".

La clasificación HST-VIO corresponde a un examen visual de la estructura que no debe presentar filtraciones o fugas luego de 24 hrs después de que el tanque fue llenado hasta su nivel de ensayo.
Para los tanques HST-NML ninguna pérdida de agua debe exceder los 3 mm en tres días.
Resulta interesante como la prueba de estanqueidad en cualquiera de los tipos de tanque, no es positiva si se observa que las paredes externas del tanque están húmedas o si existe una transferencia de humedad entre la cara exterior del tanque a la superficie de una mano seca.

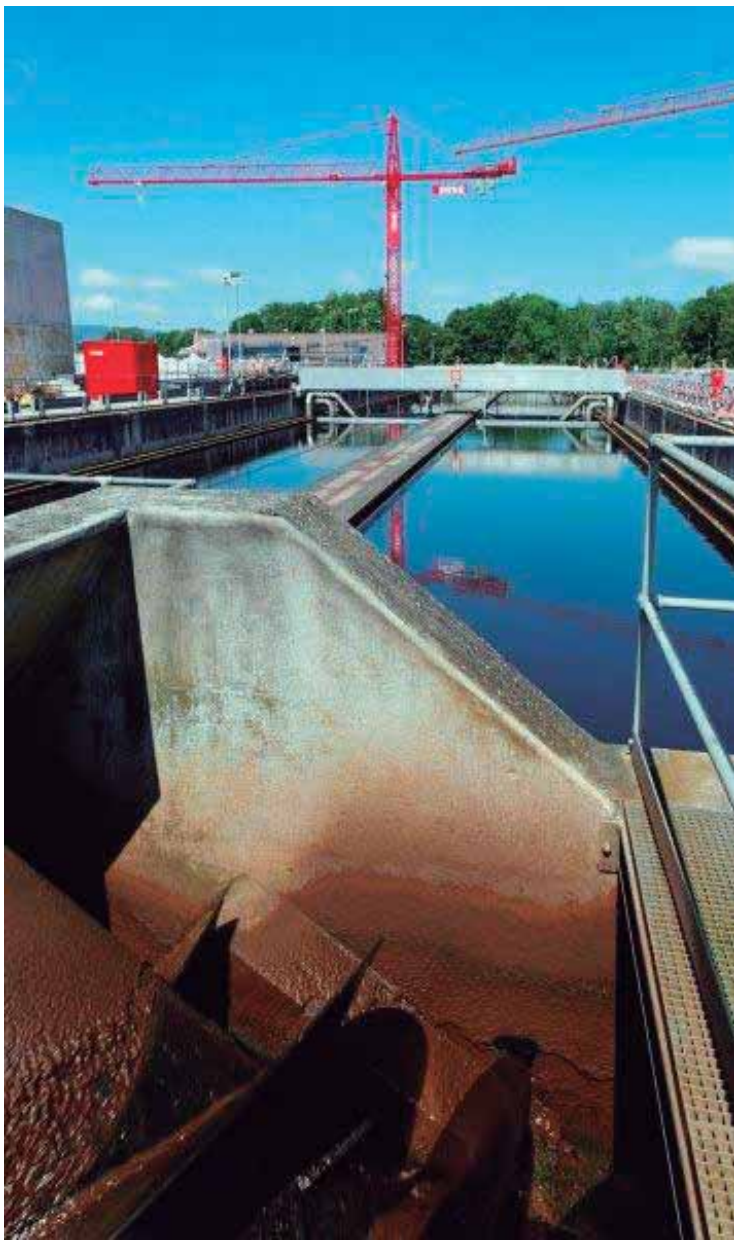
Los tanques de agua hacen parte de nuestro paisaje cotidiano urbano y rural, podría pensarse que son tecnología superada y que construir un tanque de hormigón (son la mayoría) para contener agua resulta sencillo. Esta imagen puede ser engañosa porque cuando se examina en detalle el número de casos de tanques de agua con dificultades nuestra perspectiva hacia su diseño y construcción puede cambiar drásticamente. Una encuesta y estudio recientemente publicados reveló que en Francia solo el 58% de los usuarios de tanques de agua elevados, reservorios y tanques enterrados, están satisfechos con su desempeño.
Entre los tanques enterrados, reservorios y tanques elevados, los que más problemas han evidenciado con respecto a infiltraciones son los elevados. Dentro del levantamiento de las causas de los problemas estaba en primer lugar la fisuración (22%) seguida por la permeabilidad de los recubrimientos o el material (12%) y la abrasión (10%).

SÓTANOS Y ESTRUCTURAS ENTERRADAS

En sótanos y estructuras enterradas como estacionamientos subterráneos, el hormigón está expuesto tanto a penetración por capilaridad como a penetración por diferencias de presión producidas por las aguas freáticas.

Las soluciones con recubrimientos, bentonitas, membranas adheridas o no adheridas, así como dobles muros son frecuentes en la construcción. Un hormigón de baja permeabilidad complementa o reemplaza definitivamente estos sistemas. Las juntas, pases de tubos o discontinuidades se constituyen en la mayoría de las ocasiones en los puntos de filtración, sin embargo los casos de superficies húmedas son sin duda muy frecuentes. Los niveles de impermeabilidad requeridos en una biblioteca subterránea o centro de cómputo son diferentes a los requeridos en un estacionamiento o cuarto de maquinaría.

El nivel de exigencia determinará el nivel de medidas de precaución frente a la penetración de agua pero en todos los casos deberá usarse un hormigón de baja permeabilidad. Esto debido en parte a que arreglar una fuga puntual es hasta cierta medida más sencillo que detener un problema generalizado sobre el paramento de hormigón.



Filtración de agua a través del hormigón

REFERENCIAS

1. *JENNINGS M.H, BULLARD J.W., THOMAS J.J. ANDRADE J.E, CHEN J.J, SCHERER G.W. (2008)"Characterization and Modeling of Pores and Surfaces in Cement Paste: Correlations to Processing an Properties" Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 6 No. 1, pag. 5.29 Feb.*
2. *PAPADAKIS V.G., VAYENAS C.G., FARDIS M.N. (1991), "Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete". ACI Materials Journal, Vol. 8, No. 2, March-April, pp. 186-196.*
3. *MEHTA. K.P., MONTEIRO. P J., (2006) "Concrete: Microstructure, Properties, and Materials" Mc Graw Hill.*
4. *BUIL M., OLLIVIER J.P. (1992) "Conception des bétons: la structure poreuse" La durabilité des bétons. Press d'école nationale des ponts et chaussées. Collection de l'association technique de l'industrie des liants hidrauliques. Sous la direction de Jacques Baron et Jean-Pierre Ollivier. pp.57-99.*
5. *BUIL M., OLLIVIER J.P. (1992) "Conception des bétons: la structure poreuse" La durabilité des bétons. Press d'école nationale des ponts et chaussées. Collection de l'association technique de l'industrie des liants hidrauliques. Sous la direction de Jacques Baron et Jean-Pierre Ollivier. pp.57-99.*
6. *POWERS T.C., COPELAND L.E., HAYES C., MANN H.M. (1954) "Permeability of Pórtland cement paste". Journal of the American Concrete Institute, 51, november, pp. 285-298.*
7. *POWERS T.C., COPELAND L.E., HAYES C., MANN H.M. (1954) "Permeability of Pórtland cement paste". Journal of the American Concrete Institute, 51, November, pp. 285-298.*
8. *ASSOCIATION FRANÇAISE DE GENIE CIVIL (2004) "Conception de Bétons pour une durée de vie donné des Ouvrages, Documents scientifiques et techniques, Maîtrise de la durabilité vis-avis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction. Etat de l'art et Guide pur la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité". Juillet . Véronique Baroghel-Bouny LCPC.*
9. *Hall, C., "Water Sorptivity of Mortars and Concretes: a review," Magazine of Concrete Research, Vol. 41, N°147, 1989, pp. 51-61.*
10. *KLINER R.A., (2003) "Design guidelines for Roller Compacted Concrete lift joints" Roller Compacted Concrete Dams. Ed BergaL R.J. Buil pp 486 Madrid.*
11. *ALIGIZAKI, K.,K., (2006) "Pore structure of Cement-based materials" Testing, Interpretation and requirements. Modern Concrete Technology. Taylor and Francis.*
12. *DHIR R.K., JONES M.R., BYARS E.A., SHAABAB I.G. (1994) "Predicting Concrete Durability from its Absorption". Durability of Concrete: International Conference. SP 145 pp. 1177-1194 (2010).*
13. *ACI 212.3R-10 "Report on Chemical Admixtures for concrete" American Concrete Institute.*
14. *HEDEGAARD, S. E., HANSEN T. C. (1992) "Water permeability of fly ash concretes Materials and Structures, August/September 1992, Volume 25, Issue 7, pp 381-387.*
15. *Ozyildirim.C. "Low permeability Concretes containing slag and silica fume" (1993)- Virginia Transportation Research Council, www.virginiadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/93-r10.pdf.*
16. *ACI 234.R "Guide for the Use of Silica fume in Concrete" American Concrete Institute.*
17. *SCHLUMPF J., BICHER B., SCHWOON O., (2012) "Sika Concrete Handbook".*
18. *HERMIDA, G., HERRERA D., (2012) "Efecto del aditivo Sika 100 WT" Informe interno Agosto 2012.*
19. *HERMIDA, G, (2008) "Influence du volume de pâte et de la concentration en ciment sur la performance du béton: vers le développement d'un béton à contenu minimal en pâte" PHD thesis Ecole Normale Superior de Cachan. Paris.*
20. *BAZANT., Z., BAWEJA S., S, "Creep and Shrinkage prediction Model for analysis and Design of Concrete structures: Model B3" www.civil.northwestern.edu/people/bazant/PDFs/Papers/S39.pdf.*
21. *HERMIDA., G., GONZALEZ., J., ROMERO., A (2005) "Relación entre la composición del hormigón frente a su retracción en estado fresco y endurecido" ACI Seccional Colombia Publicaciones Técnicas. Vol.2.*
22. *MORGAN, R. G. (1977) "Development of the concrete hull. "Concrete Afloat", Proceedings of the conference on concrete ships and floating structures organized by The Concrete Society in association with the Royal Institution of Naval Architects and held in London on 3 and 4 March.*
23. *GLOYD, C. S. (1988) Concrete Floating Bridges. Concrete International, May.*
24. *XIV NATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING, ACAPULCO (2004) OFFSHORE STRUCTURES – A NEW CHALLENGE, Knut Sandvik, Rolf Eie and Jan-Diederik Advocaat, of Aker Kvaerner Engineering & Technology AS Arnstein Godejord, Kåre O.Hæreid, Kolbjørn Høyland and Tor Ole Olsen, of Dr.techn.Olav Olsen a.s Norway.*
25. *SARE AND YEE (1977) "Operational experience with pre-stressed concrete barges "Concrete Afloat", Proceedings of the conference on concrete ships and floating structures organized by The Concrete Society in association with the Royal Institution of Naval Architects and held in London on 3 and 4 March.*

Autor: Ing. Germán Hermida Ph.D.
Laboratorio Ensayo de Materiales

SIKA, EL MÁS AMPLIO RANGO DE SOLUCIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN

IMPERMEABILIZACIÓN

HORMIGÓN

REPARACIONES Y REFUERZO

PEGADO Y SELLADO

SISTEMAS DE PISOS

CUBIERTAS

¿QUIÉNES SOMOS?
Sika es una compañía activa mundialmente en el negocio de los productos químicos para la construcción. Tiene subsidiarias en más de 97 países alrededor del mundo. Sika es líder mundial en el mercado y la tecnología en impermeabilización, sellado, pegado, aislamiento, reforzamiento y protección de edificaciones y estructuras civiles. Sika tiene más de 17.000 empleados en el mundo y por esto, está idealmente posicionada para apoyar el éxito de sus clientes.

Rigen nuestras Condiciones Generales de Venta más recientes.
Sírvase consultar la Hoja de Datos de Producto antes de cualquier uso y procesamiento.

80 ANIVERSARIO SIKA ARGENTINA 1938 - 2018

SIKA ARGENTINA S.A.I.C.
Juan B. Alberdi 5250
B1678CSI · Caseros
Pcia. Buenos Aires · Argentina

Contacto
Teléfono: 011 4734 3500
info.gral@ar.sika.com
www.sika.com.ar

CONSTRUYENDO CONFIANZA

© Sika S.A. I.C. Argentina / Junio 2018