

INTRODUCCIÓN

La durabilidad de las estructuras de concreto involucra varias cualidades de los materiales, consideraciones de diseño, procedimientos constructivos y condiciones de exposición durante su vida de servicio. Una de las cualidades principales del concreto durable es la baja permeabilidad. Esta característica permite disminuir la tasa de ingreso de substancias al interior de la masa del concreto; lo cual reduce el riesgo, o retarda la ocurrencia, de fenómenos de deterioro de las estructuras tales como la corrosión del acero de refuerzo, el ataque por sulfatos o por reactividad álcali-agregado, entre otras. Adicionalmente, bajo condiciones de servicio, algunas estructuras subterráneas o contenedoras de líquidos, pueden presentar filtraciones, fugas activas y transmisión de humedad, generando un riesgo operativo de las instalaciones e incomodidad a los usuarios del inmueble.

La baja permeabilidad de un concreto está en función de varios factores que interactúan simultáneamente, tales como el diseño de mezcla, la composición del material cementante, las condiciones de curado, la madurez del concreto y en gran medida el uso de aditivos y adiciones especiales que promuevan una reacción físico-química de afinamiento de la porosidad y desconexión de poros.

El presente documento técnico contiene información del desempeño de PENETRON ADMIX tanto en mezclas de concreto convencional como de concretos de alto desempeño de proyectos en México.

PENETRON ADMIX

PENETRON ADMIX es un aditivo reductor de permeabilidad en polvo que se integra en la mezcla de concreto, brindándole cualidades para ser utilizado en estructuras contenedoras de líquidos, tales como cisternas, albercas, plantas de tratamiento de aguas residuales, presas, instalaciones acuáticas; estructuras subterráneas, tales como cimentaciones, túneles y losas de sub-presión; y estructuras en contacto con ambientes agresivos, tales como estructuras marinas y puentes. PENETRON ADMIX es el complemento durable de una mezcla de concreto bien proporcionada, es decir, no está diseñado para compensar las deficiencias de un concreto pobre. **Su dosis típica es de 0.8% con respecto a la masa de cemento.**



Tanque de almacenamiento de agua

El Reporte de Aditivos Químicos para Concreto del American Concrete Institute (ACI 212), considera una clasificación especial para los aditivos reductores de permeabilidad para concretos que estarán expuestos a condiciones hidrostáticas de servicio. PENETRON ADMIX corresponde a dicho grupo de aditivos, Tipo PRAH, ya que cuenta con una tecnología eficaz por cristalización para reducir la permeabilidad promoviendo resistencia a la penetración de líquidos bajo condiciones de presión.

Adicionalmente, PENETRON ADMIX brinda importantes beneficios de disminución de absorción capilar,

reducción de la penetración de iones cloruro y promueve el auto-sellado de microagrietamiento y de grietas por contracción plástica de hasta 0.4 mm de abertura.



Su desempeño puede verificarse bajo ensayos internacionales estandarizados.

MEDICIÓN DE LA PERMEABILIDAD DEL CONCRETO

La permeabilidad del concreto puede evaluarse por métodos de ensayo estandarizados directos e indirectos. Existen diferentes formas de medir el desempeño de baja permeabilidad. El ensayo seleccionado para cuantificar esta característica del concreto, dependerá del tipo de exposición considerada, ya que la intención de los ensayos es simular las condiciones de servicio de la estructura.

Dentro de los ensayos estandarizados directos, se encuentran:

- ASTM C 1585, por la cual se determina el índice de absorción de agua bajo una condición de inmersión por 7 días. Se trata de un ensayo de succión capilar, por lo que no considera la aplicación de presión de agua; y
- DIN 1048 y BS EN 12390-8, donde se determina la profundidad de penetración del agua bajo condiciones de presión hidrostática de 0.5 MPa (50 m columna de agua) sostenida por 72 horas.
- DIN 1048 parte 5 (modificado), donde se determina la profundidad de penetración del agua en 4 ciclos de carga y secado, con duración de 3 días cada uno, considerando una presión hidrostática de 0.5 MPa (50 m columna de agua).
- GD 18445/1, donde se mide el flujo de agua que atraviesa a un espécimen con grietas inducidas. El agua es inyectada a una presión de 1.5 MPa (153 m columna de agua) por 8 semanas.

Por otro lado, NMX C 155 y ASTM C 1202 proponen un método indirecto para medir la capacidad del concreto a resistir la penetración de iones cloruro, considerando la cuantificación de la carga que atraviesa a un espécimen, en Coulombs.

BENEFICIOS DEL USO DE PENETRON ADMIX EN MEZCLAS CONVENCIONALES

La mayor parte de los concretos convencionales son especificados únicamente bajo el requerimiento de resistencia mecánica, generalmente el de compresión axial a 28 días, y de revenimiento para su colocación. Sin embargo, algunas aplicaciones de este tipo de concretos, requieren características de baja permeabilidad para resistir la presión hidrostática, como en el caso de las estructuras subterráneas de cimentación y de niveles de estacionamientos, en zonas donde el nivel freático es importante o donde existe el riesgo de ataque por sulfatos.

Los requerimientos de colocación del concreto para este tipo de estructuras, exigen parámetros tales como revenimiento superior a 18 cm, cualidad bombeable y retención de la trabajabilidad por tiempos de traslado del concreto o condiciones ambientales. Bajo estas circunstancias, y considerando que las prácticas de colocación no siempre se apegan a los requerimientos de durabilidad, los concretos colocados podrían tener una relación a/c en el rango de 0.55 a 0.62, a pesar del uso de aditivos reductores de agua. Dicho rango de relación a/c no siempre cumple los requerimientos de permeabilidad que asegure durabilidad, incluso cuando se cumpla la resistencia mecánica especificada.

Por otro lado, los cementos de uso convencional en México contemplan por lo general un porcentaje determinado de puzolana natural, escoria granulada de alto horno, rellenos de caliza u otros materiales cementantes suplementarios. Las distintas composiciones de los cementos pueden cumplir con los requerimientos de resistencia a la compresión; sin embargo, la característica de permeabilidad puede variar de acuerdo con su composición y con el diseño de mezcla. La dosificación de PENETRON ADMIX está referida al peso del cemento, es decir, para la determinación de su dosis en el m³, no se consideran otras adiciones o materiales cementantes suplementarios que contenga la mezcla.

El sistema de cristalización capilar PENETRON ADMIX permite reducir la permeabilidad de concretos convencionales diseñados adecuadamente, incluso en las condiciones mencionadas de relación a/c. Las Figuras 1 y 2 muestran el promedio de desempeño de concretos con diseño de mezcla convencional elaborados con cemento Tipo CPC 40 RS (NMX C 414) con adición de ceniza volante procedente de Piedras Negras y uso de PENETRON ADMIX. Las muestras provienen de concretos elaborados industrialmente. Se ensayaron especímenes a 90 días, bajo los requerimientos de ASTM C 1202 y de BS EN 12390-8, respectivamente.

La mezcla con relación a/c de 0.52, la cual sólo considera el uso de Cemento Portland Compuesto con característica de resistencia a los sulfatos y 25% de ceniza volante, brinda una permeabilidad moderada de acuerdo con el ensayo antes mencionado y para la edad del concreto evaluada. Para varias aplicaciones donde existe un frente de agua, esta característica de permeabilidad puede resultar insuficiente, generando complicaciones en

la vida de servicio relacionadas con transmisión de agua y corrosión del acero de refuerzo, principalmente.

La mezcla con relación a/c de 0.59 que considera el uso del mismo tipo de cemento y 0.8% de PENETRON ADMIX permite ver la capacidad de reducción de la permeabilidad del aditivo, con menor uso de ceniza volante de acuerdo con el ensayo ASTM C 1202. Finalmente, la mezcla con relación a/c de 0.62 muestra la eficacia de la acción de PENETRON ADMIX con el cemento compuesto CPC 40 RS.

Como se mencionó anteriormente, el ensayo ASTM C 1202 brinda una indicación de la permeabilidad del concreto; sin embargo, el resultado puede estar influenciado por la presencia de otros iones presentes en la solución de poro de la pasta. Por esta razón, es importante complementar la caracterización de los concretos de baja permeabilidad con ensayos directos donde se considera presión de agua.

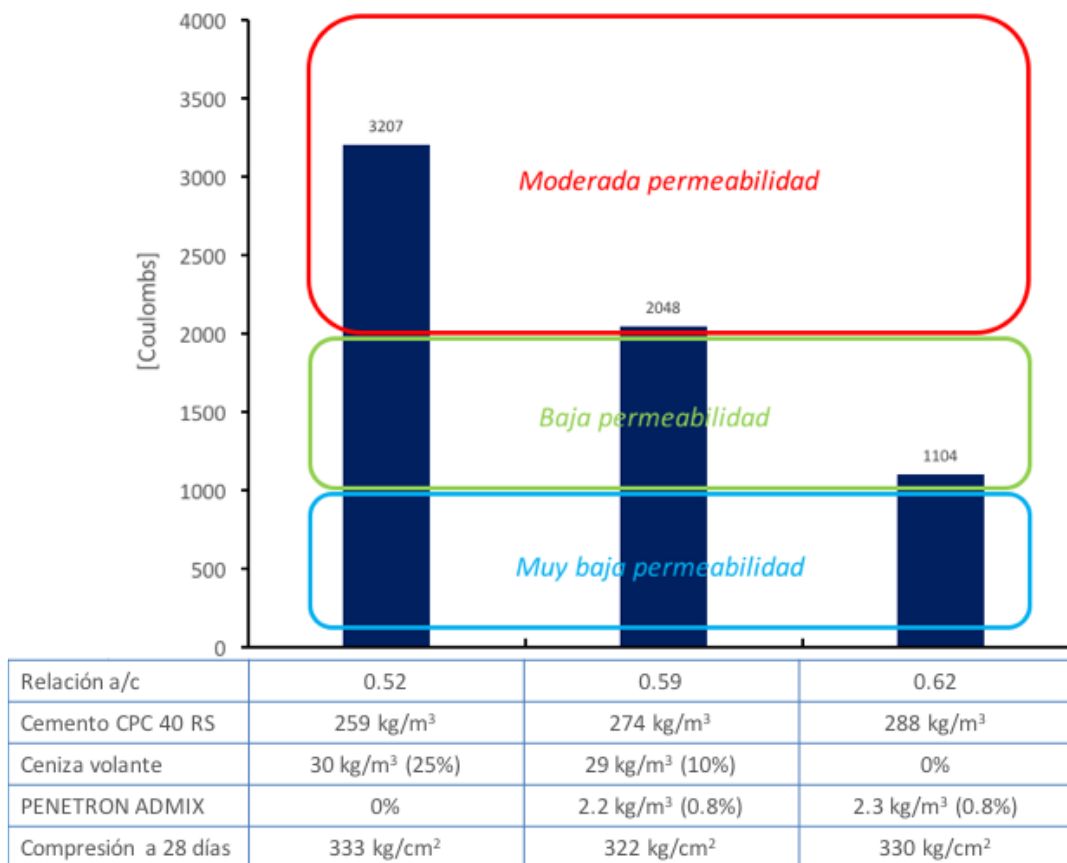


Figura 1. Resistencia a la penetración de iones cloruro a 90 días de mezclas convencionales de acuerdo con ASTM C 1202.

La **Figura 2** muestra el desempeño obtenido de estas mismas mezclas bajo el ensayo BS EN 12390-8. Puede observarse que la profundidad máxima de penetración de agua de 32 mm para la mezcla sin PENETRON ADMIX podría representar que el frente de agua alcanzara rápidamente o sobrepasara el recubrimiento del acero de refuerzo, tomando en cuenta, que se trata de concretos convencionales para estructuras de cimentación. Puede observarse menor profundidad de penetración promedio del agua bajo presión en los casos en que se utilizó PENETRON ADMIX. Incluso podría proponerse la hipótesis de que para los materiales utilizados en estas mezclas, podría existir una acción sinérgica con la ceniza volante (mezcla con relación a/c de 0.59). Sin embargo, se requeriría de mayores estudios para determinar tal comportamiento. Por otro lado, cabe mencionar que como en todos los ensayos, existen circunstancias que lo hacen susceptible a un coeficiente de variación, por lo que los 2 mm de diferencia entre las mezclas con a/c de 0.59 y 0.62, podrían ser no significativos.

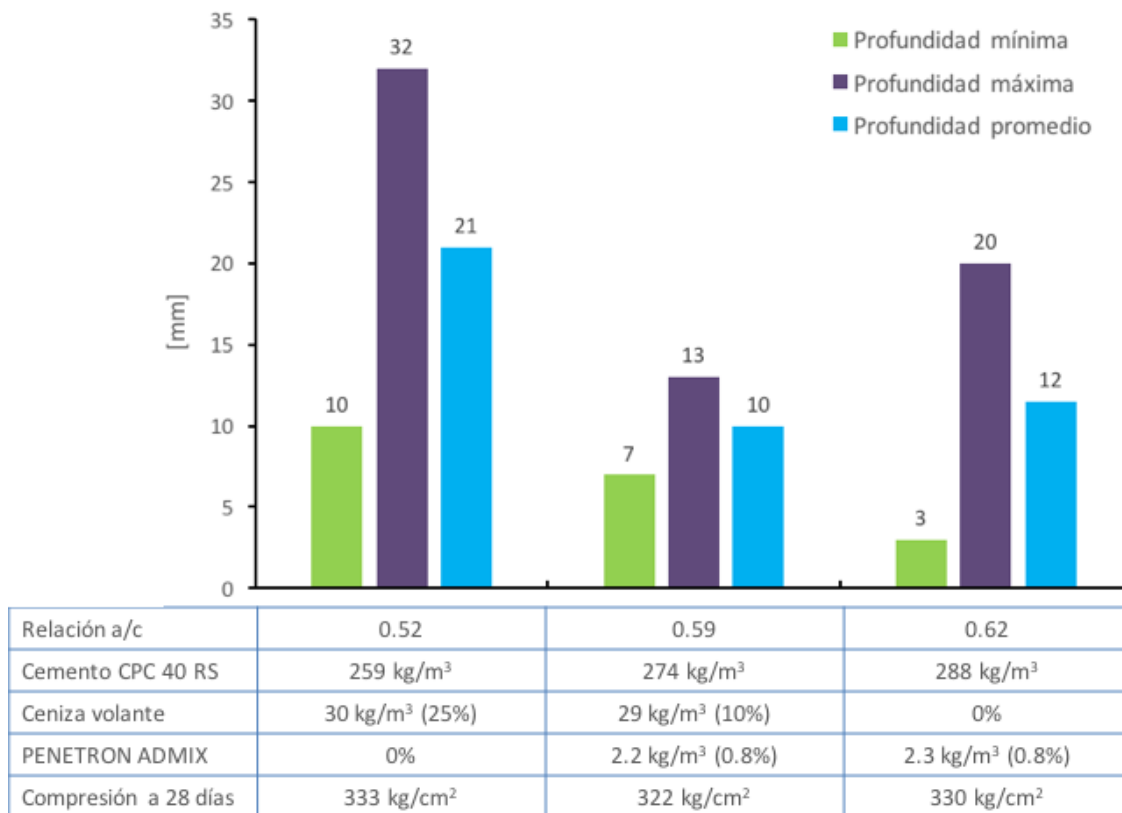


Figura 2. Profundidad de penetración de agua bajo presión de 0.5 MPa en distintas mezclas convencionales de acuerdo con BS EN 12390-8.

CONCRETOS DE ALTO DESEMPEÑO CON PENETRON ADMIX

Además de las resistencias mecánicas, los concretos de alto desempeño cuentan con características de durabilidad tales como la baja permeabilidad, reducción de fisuras y la capacidad de minimizar la corrosión del acero de refuerzo, entre otras. El diseño de mezclas de alto desempeño considera el uso de una relación a/mc baja, determinada generalmente de acuerdo con parámetros de severidad de condiciones de exposición. No es posible lograr la disminución de la permeabilidad únicamente considerando la relación a/mc. La tecnología por cristalización de PENETRON ADMIX contribuye significativamente en la reducción de la permeabilidad en concretos de alto desempeño.



Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México
Losas de pistas pos-tensadas de prueba

La **Figura 3** muestra el comportamiento de una misma mezcla con relación a/c de 0.45, con características de diseño durable, elaborada con materiales de México. La única variante es que la Referencia no contiene PENETRON ADMIX y otra contiene 0.8% con respecto a la masa de cemento. El ensayo corresponde a una adaptación a especímenes de cilindros de concreto, para las condiciones establecidas en la norma GD 18445/1. Al final del ensayo, la mezcla que contiene PENETRON ADMIX muestra una reducción significativa de aproximadamente 40%, en el flujo que atraviesa al espécimen con respecto a la Referencia. El mejoramiento paulatino de la mezcla con PENETRON ADMIX está relacionado con la capacidad de este aditivo de continuar su reacción con los componentes del cemento hidratado en presencia de agua, obturando progresivamente la conexión entre poros.

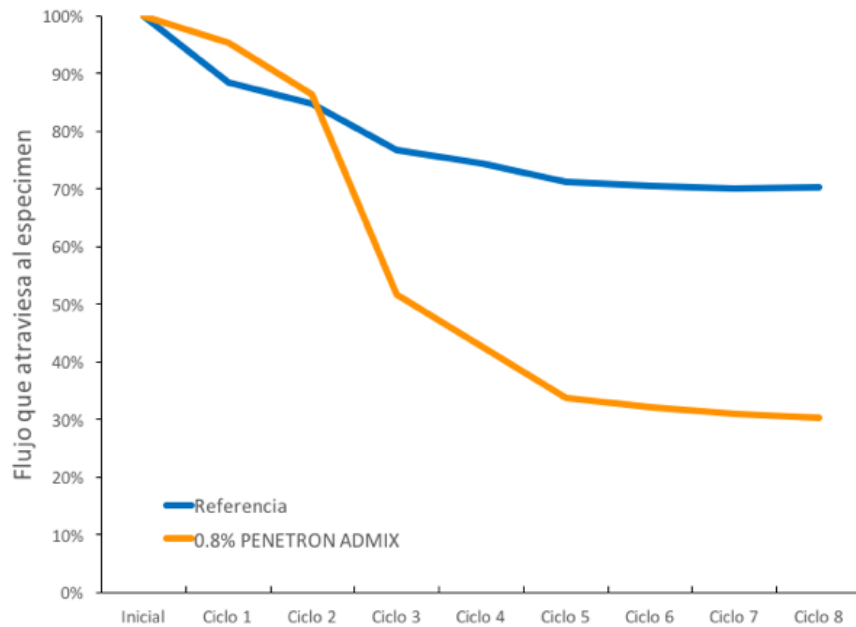


Figura 3. Promedio del flujo que atraviesa al espécimen de acuerdo con GD 18445.

Para la aplicación industrial de un importante proyecto, donde el nivel freático está en contacto constante con la estructura, se realizó un análisis costo-beneficio de distintas alternativas de concreto de baja permeabilidad. **Las Figuras 4, 5 y 6** muestran el desempeño de algunas alternativas de concretos. Las mezclas tienen en común el diseño base, con relación a/mc de 0.45, mismos agregados, uso de 360 kg/m³ cemento resistente a los sulfatos CPO 40 RS BRA (NMX C 414) y revenimiento de 200 mm a una hora. La Tabla 1 muestra la descripción de la nomenclatura.

Tabla 1. Descripción de los concretos en estudio.

Nomenclatura	Humo de sílice (HS)*	PENETRON ADMIX (PA)*
Referencia	----	----
11%HS	11%	----
5.5%HS + 0.8%PA	5.5%	0.8%

*Porcentaje con respecto a la masa de cemento.

La resistencia a la compresión a 28 días de los concretos de alto desempeño en estudio, está en el rango de 661 a 666 kg/cm², como se muestra en la **Figura 4**.

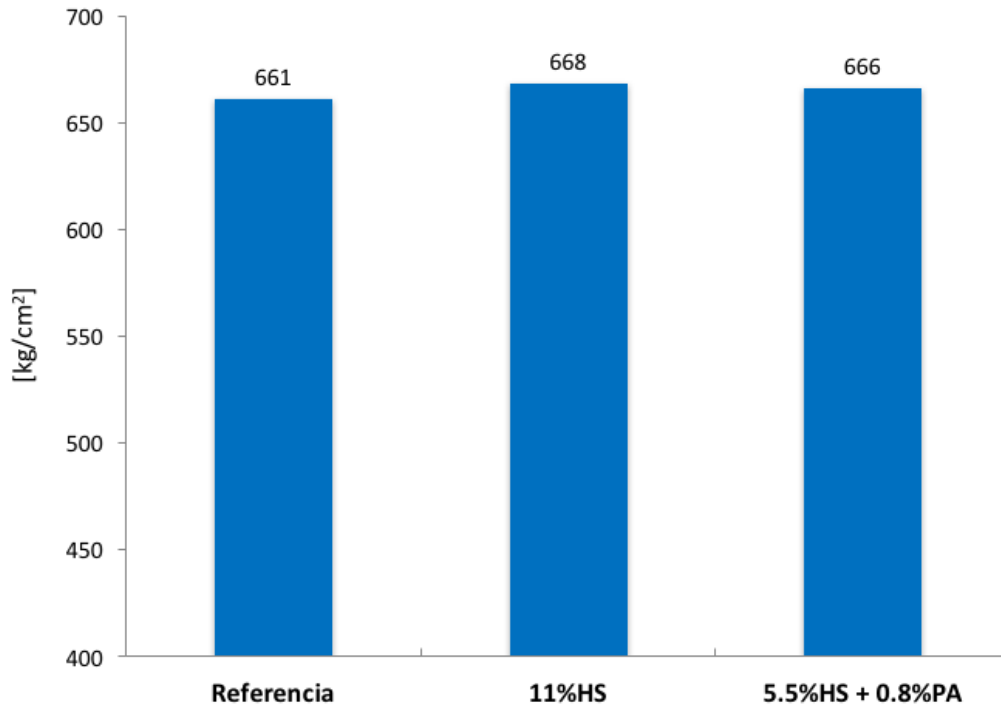


Figura 4. Resistencia a la compresión a 28 días de distintas propuestas de concreto durable.

Los resultados del ensayo ASTM C 1202 brindan información fundamental sobre la necesidad del uso de materiales cementantes suplementarios como el humo de sílice o de aditivos tipo PRAH para lograr reducir la permeabilidad (ver Figura 5). Confirmando así, que para obtener baja permeabilidad, no basta con considerar la reducción de la relación a/mc. Específicamente, las propuestas 11%HS y 5%HS+0.8%PA, se desempeñaron en el rango de muy baja permeabilidad de acuerdo con este ensayo. El humo de sílice proporciona una extraordinaria solución para disminuir la permeabilidad del concreto; sin embargo, en altas dosificaciones en concretos con baja relación a/mc, puede conllevar a retos de aplicación en campo, debidos principalmente a la consistencia cohesiva del concreto para las operaciones de colocación y acabado, al control de la temperatura de hidratación en estructuras masivas, así como a los efectos de la contracción endógena y autodesecación. Los resultados de este análisis, muestran que la combinación de una dosis moderada de humo de sílice y PENETRON ADMIX, en vez de solo cemento y humo de sílice, brinda una solución durable con mejores características en estado fresco para una colocación adecuada.

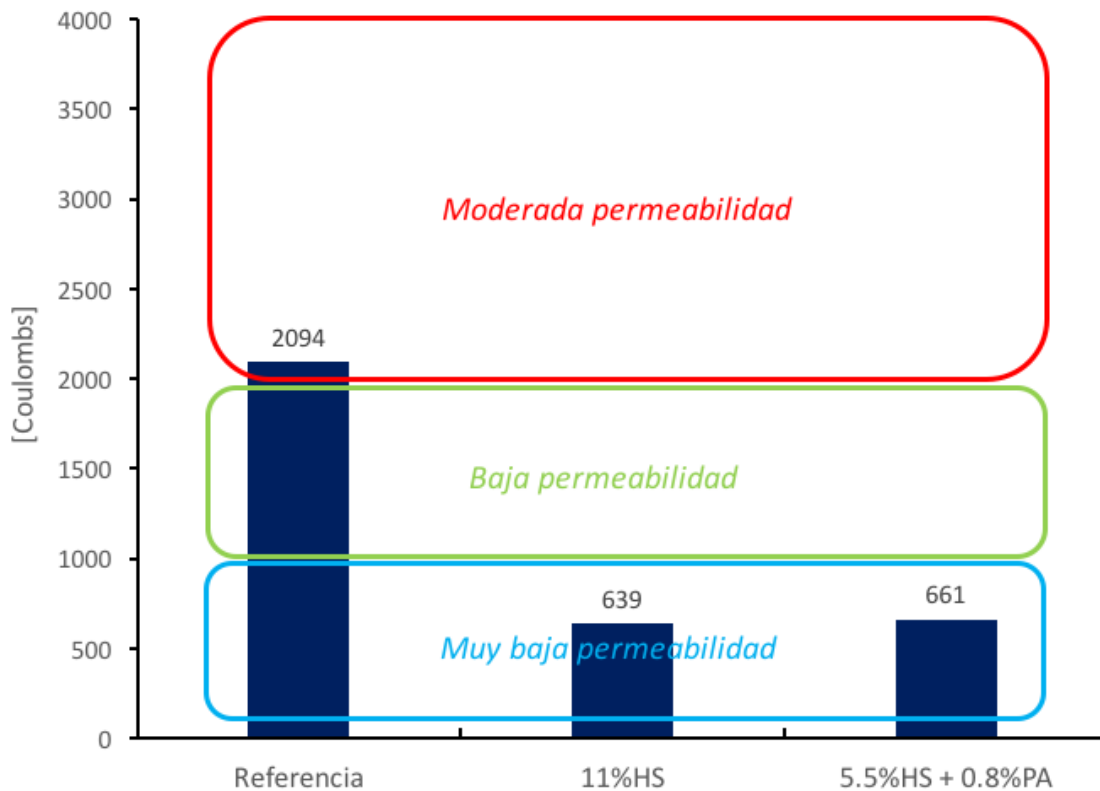


Figura 5. Resistencia a la penetración de iones cloruro a 90 días de acuerdo con ASTM C 1202 para las distintas alternativas de concreto durable.

Además de la evaluación técnica de una propuesta de concreto de alto desempeño, es importante revisar la relación costo-beneficio. La **Figura 6** muestra el costo de cada solución, con relación al concreto de Referencia. Se prefirió el uso de la solución combinada de humo de sílice y PENETRON ADMIX, por los beneficios antes mencionados, así como por los antecedentes del desempeño de PENETRON ADMIX en ensayos que consideran la aplicación directa de presión de agua. Cabe mencionar que, debido a las altas especificaciones del proyecto, se realizaron estas mismas mezclas incluyendo la protección adicional del acero de refuerzo mediante el uso de un aditivo inhibidor de corrosión inorgánico. PENETRON ADMIX mostró compatibilidad con este tipo de aditivos.

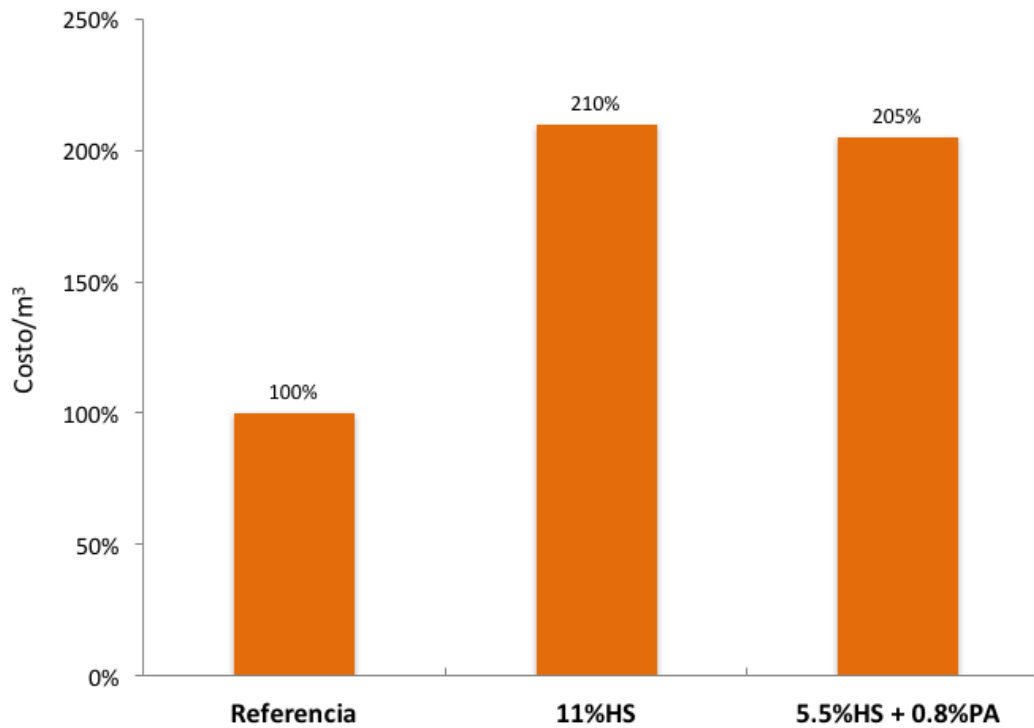


Figura 6. Análisis de costo/m³ de las distintas alternativas de concreto durable.

De este análisis resultó la mezcla que cumple con las altas especificaciones del proyecto. Considerando así, una relación a/mc de 0.45, 400 kg/m³ de cemento CPO 40 RS BRA (NMX C 414), 6.25% de humo de sílice, 0.8% de PENETRON ADMIX e inhibidor de corrosión inorgánico. Las **Tablas 2, 3 y 4** muestran la caracterización completa de este diseño de mezcla, realizado por el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), y el desempeño promedio de 8 muestras obtenidas de lotes industriales colocados en el proyecto.

Tabla 2. Propiedades mecánicas.

Propiedad	Edad (días)	Caracterización IMCYC	Promedio de muestras industriales	Unidad	Ensayo
Resistencia a la compresión	28	678	640	kg/cm ²	NMX C 083
	91		700		
Resistencia a la flexión	28	57	60	kg/cm ²	NMX C 191
Resistencia a la tracción indirecta	28	47	44	kg/cm ²	NMX C 163
Módulo de elasticidad	28	334 171	322 356	kg/cm ²	NMX C 128
Relación de Poisson	28	0.26			

Puede observarse que no se presentó penetración de agua bajo presión de acuerdo con el ensayo BS EN 12390-8, lo cual es una indicación importante de la efectividad de la solución para resistir el ingreso de agua y otras sustancias a la masa del concreto. Igualmente, los índices de absorción de agua obtenidos mediante el ensayo ASTM C 1585, son valores muy bajos, comparados con el límite máximo para condiciones severas de exposición del Manual DURAR CYTED, capítulo III, 1.8.5, donde se considera que un concreto con un recubrimiento de 30 mm está en el rango de baja permeabilidad cuando su índice de absorción es menor de $500 \times 10^{-4} \text{ mm/s}^{1/2}$.

Igualmente, en la Tabla 3, puede verse el efecto progresivo de disminución de la absorción capilar conforme el concreto va madurando, cuando hay presencia continua de agua. Este comportamiento evidencia la capacidad autosellante que produce la tecnología de impermeabilización por cristalización.

Los resultados de los ensayos de permeabilidad directos son congruentes con los obtenidos con el método indirecto de indicación de resistencia a la penetración de iones cloruro ASTM C 1202, donde puede observarse la disminución progresiva de la permeabilidad. A 90 días, los concretos colocados en el proyecto se desempeñan con muy baja permeabilidad, igual que el en el proceso de desarrollo de la mezcla (Figura 5). El aumento de la resistividad eléctrica permite constatar la acción de PENETRON ADMIX a través de la densificación progresiva con el tiempo.

Estos resultados confirman el mejoramiento de la calidad del concreto en cuanto a su resistencia a la penetración de sustancias, lo cual favorece la protección del acero de refuerzo, disminuyendo el riesgo de corrosión.

Tabla 3. Propiedades de permeabilidad.

Propiedad	Edad	Caracterización IMCYC	Promedio de muestras industriales	Unidad	Ensayo
Absorción capilar	24 horas	4.6		g/100 cm ²	ASTM C 1403
	28 días		39		
	90 días		22		
Profundidad de penetración de agua bajo presión	28 días	0		mm	BS EN 12390-8
Índice de absorción de agua	inicial	25×10^{-4}		mm/s ^{1/2}	ASTM C 1585
	secundaria	3.5×10^{-4}			
	90 días		0.0000204×10^{-4}		
Resistencia a la penetración de iones cloruro	28 días		1866	Coulombs	ASTM C 1202
	56 días	1421			
	90 días		614		
Resistividad eléctrica	28 días		12	Ω.cm	NMX C 514
	90 días		27		

La Tabla 4 muestra el comportamiento del sistema seleccionado con respecto a la variación volumétrica, medida como cambio de longitud por contracción por secado y por exposición a sulfatos. Los valores obtenidos de cambio de longitud bajo condiciones que favorecen el ataque por sulfatos, de acuerdo con NMX C 418, se encuentran por debajo del 0.1%, el cual es el máximo valor a un año para que un concreto no represente un riesgo de deterioro por este fenómeno. Por su parte, el cambio de longitud debido a la contracción por secado se encuentra estabilizándose en aproximadamente 470 millonésimas a 4 meses de condición ambiental controlada seca, de acuerdo con NMX C 173.

Tabla 4. Propiedades de cambio de volumen.

Propiedad	Edad	Caracterización	Promedio de muestras industriales	Unidad	Ensayo
Cambio de longitud por exposición a sulfatos	1 mes	0.008		%	NMX C 418
	2 meses		0.018		
	6 meses		0.037		
Cambio de longitud por contracción por secado	28 días	200	344	millonésimas	NMX C 173
	56 días	272			
	4 meses		469		

CONCLUSIONES

El concreto es un material heterogéneo, cuya porosidad y permeabilidad están determinadas por las características de los agregados y la calidad de la pasta. Es posible reducir la permeabilidad de la pasta a través de tecnologías de cristalización comprobadas. PENETRON ADMIX mejora la durabilidad del concreto, ya que su eficaz tecnología implica la reacción con productos de hidratación del cemento, brindando nuevas formaciones de cristales de silicato de calcio hidratado o de carbonato de calcio.

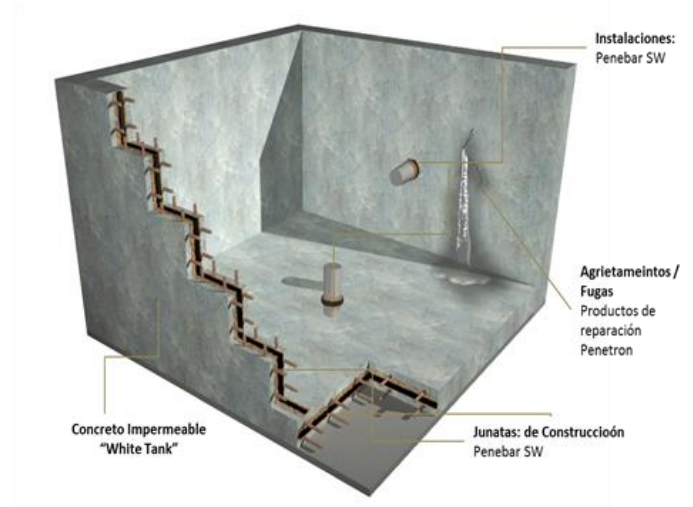
PENETRON ADMIX ha demostrado promover durabilidad tanto en concretos convencionales como en concretos de alto desempeño en México, de acuerdo con las especificaciones solicitadas. Permite brindar soluciones combinadas con otras tecnologías, tales como el humo de sílice, con la posibilidad de contar con una consistencia del concreto que facilita su colocación.



Proyecto Landmark, Guadalajara, Jalisco
Losa de Sub-presión y muros con PENETRON ADMIX

Las tecnologías PENETRON ADMIX ofrece protección impermeable por cristalización, la cual permite mejorar la calidad del matriz cementante del concreto. Puede

utilizarse como parte de un sistema que promueve la estanqueidad de la estructura.



Sistema PENETRON

La correcta evaluación de su desempeño debe contemplar ensayos a edades mayores a los 28 días, ya que su activación es progresiva a través del tiempo y en presencia de agua.

La reducción de la permeabilidad disminuye el riesgo de corrosión del acero de refuerzo, al proporcionar una matriz cementante más durable que evite o disminuya el ingreso de sustancias. En casos severos de exposición a iones cloruro, puede brindarse una protección adicional al acero de refuerzo mediante el uso de inhibidores de corrosión inorgánicos, los cuales son compatibles con PENETRON ADMIX. En otras aplicaciones, donde es fundamental la reducción del agrietamiento por contracción por secado o debido a otras condiciones de servicio, PENETRON ADMIX puede igualmente formar parte de un sistema con macrofibras sintéticas

estructurales para promover una matriz de mejora.
baja permeabilidad con tenacidad

REFERENCIAS

ACI 212	Report of Chemical Admixtures for Concrete.
ASTM C 1202	Standard Test Method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration.
ASTM C 1403	Standard Test Method for rate of water absorption of masonry mortars.
ASTM C 1585	Standard Test Method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes.
BS EN 12390-8	Testing hardened concrete. Depth of penetration of water under pressure.
DIN 1048	Testing concrete; Testing of hardened concrete.
GD 18445	Chinese National Standard for cementitious capillary waterproofing materials.
NMX C 083	Industria de la Construcción – Concreto – Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes – Método de ensayo.
NMX C 128	Industria de la Construcción – Concreto sometido a compresión – Determinación del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson.
NMX C 155	Industria de la Construcción – Concreto hidráulico – Dosificado en masa- Especificaciones y método de ensayo.
NMX C 163	Industria de la Construcción – Concreto – Determinación de la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto.
NMX C 173	Industria de la Construcción – Concreto hidráulico – Determinación de la variación en longitud de especímenes de mortero de cemento y de concreto endurecidos.
NMX C 191	Industria de la Construcción – Concreto – Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro.
NMX C 414	Industria de la Construcción – Cementantes hidráulicos – Especificaciones y métodos de ensayo.
NMX C 418	Industria de la Construcción – Cementos hidráulicos – Determinación del cambio de longitud de morteros con cemento hidráulico expuestos a una solución de sulfato de sodio.
NMX C 514	Industria de la Construcción – Resistividad eléctrica del concreto hidráulico – Especificaciones y Métodos de Ensayo.

Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado. DURAR – Durabilidad de la armadura. CYTED – Programa Ibeoramericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Subprograma XV: Corrosión e impacto ambiental sobre materiales.