

Efecto sinérgico de un polímero súper-absorbente y un inhibidor de corrosión de nitrato de calcio en la durabilidad de un concreto de alto desempeño

A. Durán-Herrera*^{id}, J. A. Canul-Polanco^{id}, R. Dávila-Pomper Mayer^{id},
L. G. López-Yépez^{id}, P. Valdez-Tamez^{id}

*Autor de Contacto: alejandroduranhr@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i2.450>

Recepción: 22/11/2019 | Aceptación: 05/03/2020 | Publicación: 30/04/2020

RESUMEN

En esta investigación, se evaluó el efecto sinérgico de un polímero súper-absorbente en conjunto con un inhibidor de corrosión de nitrato de calcio, como una tecnología combinada para mejorar la durabilidad de un Concreto de Alto Desempeño. Para este propósito, se produjeron morteros de cemento Portland con una proporción de agua/cemento de 0.4 y una sustitución de 9.5% de cemento por microsilíce. El efecto de estas tecnologías fue evaluado midiendo los siguientes parámetros: las retracciones autógena y por secado, la resistividad eléctrica superficial y el coeficiente de migración de cloruros en estado no estacionario. Los resultados indican que el efecto sinérgico del SAP + CNI mejora la retracción autógena y la resistividad eléctrica superficial.

Palabras clave: concreto de alto desempeño, polímero súper-absorbente, inhibidor de la corrosión de nitrato de calcio, microsilíce, durabilidad.

Citar como: Durán-Herrera, A., Canul-Polanco, J. A., Dávila-Pomper Mayer, R., López-Yépez, L. G., Valdez-Tamez, P. (2020), “Efecto sinérgico de un polímero súper-absorbente y un inhibidor de corrosión de nitrato de calcio en la durabilidad de un concreto de alto desempeño”, Revista ALCONPAT, 10 (2), pp. 206 – 218, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i2.450>.

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, Nuevo León, México.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. 5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2021 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2020.

Synergetic effect of a super-absorbent polymer and a calcium nitrite corrosion inhibitor in high performance concrete durability

ABSTRACT

In this research, the synergetic effect of a super-absorbent polymer in combination with a calcium nitrite corrosion inhibitor were evaluated as a combined technology to improve concrete durability in High Performance Concrete. For this purpose, Portland cement mortars with a water/cement ratio of 0.4 and a substitution of 9.5% of cement by silica fume were produced. The effect of this technologies was evaluated by measuring the following parameters: autogenous and drying shrinkage, surface electrical resistivity and the non-steady-state chloride migration coefficient. The results indicate that the synergistic effect of SAP + CNI improves autogenous shrinkage and surface electrical resistivity.

Keywords: high performance concrete; super-absorbent polymer; calcium nitrite corrosion inhibitor; silica fume; durability.

Efeito sinérgico de um polímero super absorvente e um aditivo inibidor de corrosão à base de nitrato de cálcio na durabilidade do concreto de alto desempenho

RESUMO

Nesta pesquisa, o efeito sinérgico de um polímero super absorvente (SAP) e um inibidor de corrosão do nitrato de cálcio (CNI) foi avaliado como uma tecnologia combinada para melhorar a durabilidade do Concreto de Alto Desempenho. Para isso, foram produzidas argamassas de cimento Portland com uma relação água/cimento de 0,4 e uma adição de 9,5% de sílica ativa. O efeito dessas tecnologias foi avaliado medindo-se os seguintes parâmetros: retração autógena e por secagem, resistividade elétrica da superfície e coeficiente de migração de cloretos em estado não estacionário. Os resultados indicam que o efeito sinérgico do SAP + CNI melhora a retração autógena e a resistividade elétrica superficial.

Palavras-chave: concreto de alto desempenho; polímero super absorvente; inibidor de corrosão baseado em nitrato de cálcio; microssilice; durabilidade.

1. INTRODUCCION

Es bien sabido que el Concreto de Alto Desempeño (CAD) tiene mejores propiedades mecánicas y de durabilidad que el concreto convencional (Zhutovsky S. et al., 2012). En el CAD, ya que en estos, los materiales cementantes suplementarios (MCS), como la microssilice (MS), son utilizados comúnmente para lograr un desempeño superior en términos de comportamiento mecánico y de durabilidad (Lothenbach B. et al., 2011). Sin embargo, a pesar de estos beneficios, un efecto negativo es que la presencia de la microssilice en un CAD podría originar agrietamientos a edades tempranas, los cuales en parte son atribuibles al proceso de hidratación (Pendergrass B. et al., 2014). Los aditivos inhibidores de la corrosión base nitrato de calcio (INC) son usados como inhibidores de la corrosión desde la década de los años 80 para extender la vida de servicio del concreto reforzado, y son comúnmente utilizados en los CAD para construcciones marítimas (Gaidis J.M., 2004). En presencia de un INC, el tiempo de fraguado del concreto podría extenderse (M.A. Quraishi, et al., 2016; Hansson C.M. et al., 1998), pero en este trabajo, se espera que la presencia de MS pueda contrarrestar este retraso.

Debido a la fineza de la MS, es bien conocido que, con la presencia de los MCS, se incrementará el

agrietamiento del concreto, principalmente a edades tempranas. Con la inclusión del INC, se espera que el agrietamiento pueda verse aumentado y en consecuencia una reducción de la durabilidad potencial. Por lo tanto, una solución propuesta a esta problemática podría ser la implementación del curado interno, a través de un polímero súper-absorbente (PSA).

Por los resultados positivos que ha demostrado para mitigar las retracciones del concreto a edades tempranas (Snoeck D. et al., 2015), al curado interno se le conoce como una tecnología factible para disminuir el agrietamiento en los CAD a edades tempranas (Craeye B. et al., 2011; Cusson D. et al., 2010). Esta tecnología consiste en la introducción al concreto fresco de un material altamente poroso que pueda absorber una cantidad significativa de agua, la cual será liberada dentro de la red de poros del concreto mientras disminuyen la humedad relativa y la presión interna en la red de poros. Para este propósito, los agentes más utilizados para implementar el curado interno son los polímeros súper-absorbentes y los agregados ligeros (Jensen O. et al., 2001). Sin embargo, el uso de PSA ha demostrado un mejor desempeño en términos de capacidad de absorción de agua (Mechtcherine V. et al., 2012).

Para implementar esta tecnología en el CAD, la dosificación del PSA que debería ser utilizada se puede determinar mediante el modelo modificado de hidratación de Powers (T.C. Powers, et al., 1948; Jensen O. et al., 2000; Jensen O. et al., 2002), un modelo que se explica mediante dos diferentes sistemas de hidratación; un sistema abierto de inclusión de agua y un sistema cerrado aislado de alguna fuente externa de agua. La Figura 1 ilustra la importancia del curado interno en el CAD, porque en estos concretos, el mayor nivel de densificación de la matriz cementante, evitará que el curado externo sea efectivo (penetración del agua) a través de toda la profundidad del concreto, una condición que podría resolverse mediante la implementación del curado interno.

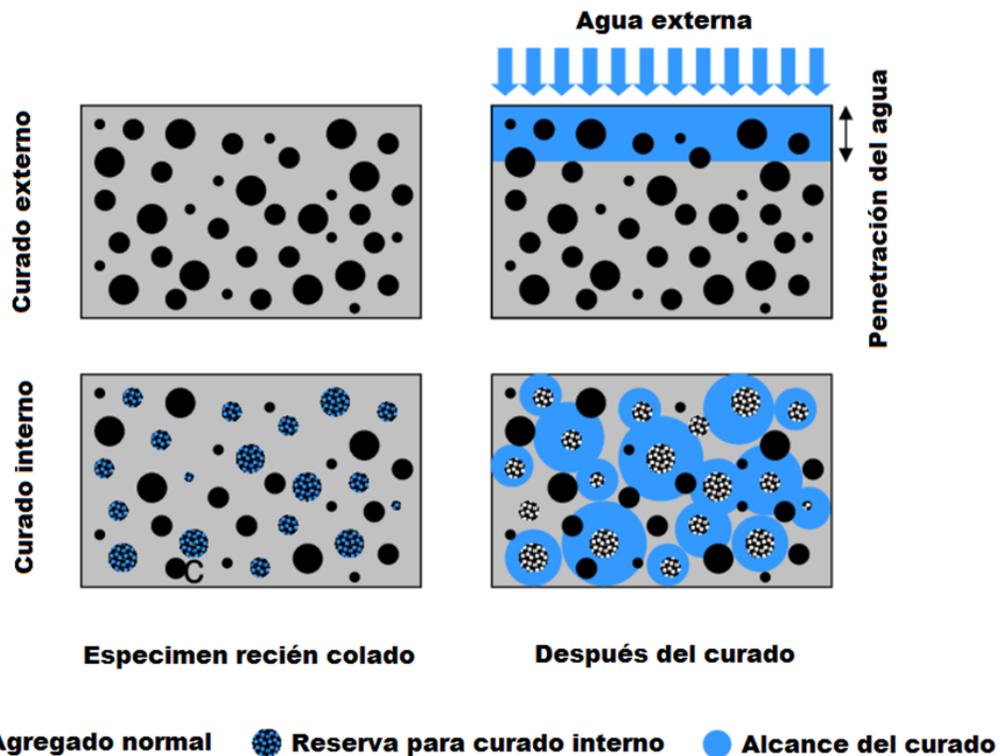


Figura 1. Curado interno con agua vs curado externo con agua en el CAD (I. De la Varga et al., 2012)

Por lo tanto, volvamos a la preocupación por el uso de INC y MS en el concreto. Ya que el INC podría modificar el tiempo de fraguado y el grado de hidratación de un matriz cementante (M.A. Quraishi,

et al., 2016; Hansson C.M. et al., 1998), se espera que el método de curado interno con PSA pueda disminuir los efectos negativos antes mencionados.

Gran parte de las investigaciones publicadas en relación al efecto del INC en el concreto a base de cemento Portland, evalúan el efecto de este aditivo mediante pruebas electroquímicas de corrosión, pero han dejado de lado la evaluación del efecto de este aditivo en cuanto a los tiempos de fraguado y al grado de hidratación (Hansson C.M. et al., 1998). En este proyecto se espera que el método de curado interno con PSA influya en la hidratación del sistema cementante y al mismo tiempo que contrarreste el retardo en los tiempos de fraguado atribuible a la presencia del INC, por lo tanto, este trabajo se centró principalmente en la evaluación del efecto sinérgico de INC y el PSA en las propiedades tanto en estado fresco como endurecido de un CAD con MS, tales como: contracción autógena, contracción por secado, resistividad eléctrica superficial y coeficiente de migración de cloruro en estado no estacionario.

2. PROCEDIMIENTO.

Materiales utilizados para la producción de los morteros.:

- Cemento Portland ordinario Tipo V según ASTM C 150 (CPO), con una finura Blaine de $363 \text{ m}^2/\text{kg}$, un peso específico de 3.1 y una pérdida por ignición (PPI) de 3.37 %.
- Microsílica condensado (MS) seco, que satisface los requisitos de la ASTM C 1240, con un área superficial específica BET de $21.63 \text{ m}^2/\text{g}$, un peso específico de 2.2, una PPI de 2.63 % y un contenido de SiO_2 del 95 %.
- Agregado fino de caliza triturada (AF) que satisface los requisitos de la ASTM C 33, procedente de Monterrey, México, con un tamaño máximo nominal de 5 mm, un peso específico seco de 2.61 y una absorción de agua de 2.2 %.
- Polímero súper-absorbente (PSA) con una absorción de 25 g/g, un peso específico de 1.004 y una desorción de 90% con las soluciones de poro extraídas de un juego de 10 pastas cementantes (CPO Tipo V + MS) con una relación agua-cementante (a/cm) de 0.4 y una dosificación de 9.5 % de microsílíce en masa en sustitución del cemento portland.
- Superfluidificante base policarboxilato (SP) con un contenido de sólidos de 51.8 %, y un peso específico de 1.1.
- Aditivo inhibidor de la corrosión base nitrito de calcio (INC) con un contenido de sólidos de 51.6% y un peso específico de 1.3.

Los morteros se prepararon con una relación a/c de 0.40 y una adición de MS de 9.5% en masa. Los proporcionamientos de las pastas fueron establecidos de acuerdo con el modelo modificado de hidratación de Powers para sistemas cementantes de cemento portland-microsílica (CP-MS) (T.C. Powers, et al., 1948; Jensen O. et al., 2000; Jensen O. et al., 2002), el cual analíticamente evalúa el grado de hidratación (α) para la misma matriz cementante expuesta a un sistema de curado abierto externo, o a un sistema cerrado interno aislado del agua de curado externo. Para este Proyecto, el Sistema fue cerrado aislado con y sin curado interno (ver Figura 2). El diagrama en la Figura 2 presenta la distribución volumétrica de las fases presentes en la pasta cementante: agua capilar, agua en el gel (p_w), gel sólido (b_w), y la retracción química (RQ). La RQ y el b_w fueron calculados mediante la prueba ASTM C 1608 y los análisis termogravimétricos (ATG) respectivamente. La cantidad de agua en el gel considerada fue de 0.19 g/g para el cemento y de 0.5 g/g para la MS (Sellevold E. J. et al., 1998).

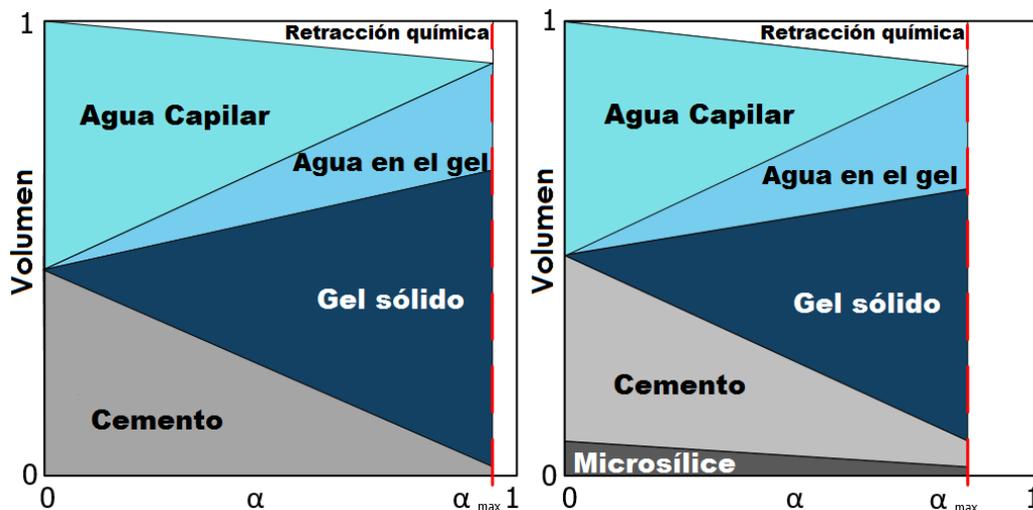


Figura 2. Distribución de la fase volumétrica y grado de hidratación (α) en una pasta cementante con una relación a/c de 0.4, sin MS (izq.) y con MS (der.), ilustrada de acuerdo con el modelo de Powers. En la figura se observa que, con la presencia de un MCS, la distribución de la fase volumétrica cambia conforme aumenta el grado de hidratación.

La Ecuación 1 se utilizó para calcular b_w :

$$b_w = (M_{1000\text{ °C}} - M_{105\text{ °C}} - M_{CO_2}) / (M_{1000\text{ °C}} / \{1 - PPI_{cem}\}) \quad (1)$$

Donde:

- $M_{1000\text{ °C}}$ es la masa de la muestra a 1000 °C en gramos
- $M_{105\text{ °C}}$ es la masa de la muestra a 105 °C en gramos
- M_{CO_2} es la pérdida de la masa debido a la decarbonatación del $CaCO_3$, por lo general entre 650-800 °C.
- PPI_{cem} es la pérdida por ignición del cemento

Para mitigar la retracción autógena en una pasta cementante de cemento portland-microsilíce con una relación a/c de 0.40, la cantidad de agua requerida para el curado interno (IC_w), se calculó utilizando las ecuaciones 2 y 3:

$$IC_w = (Cem) * (0.42 + 0.5 (s/c)) - (a/c) \quad (2)$$

$$IC_s = (IC_w / abs) / des \quad (3)$$

Donde:

- Cem es la cantidad de cemento en kg/m^3
- a/c es la relación agua/cemento de la pasta
- s/c es la relación sílice/cemento
- IC_w es la cantidad de agua de curado interno en kg/m^3
- IC_s es la cantidad de PSA en kg/m^3
- abs es la absorción de PSA en gramos
- des es la desorción de PSA en gramos

La dosificación del INC fue de 2% con respecto a la masa de los materiales cementantes. Para todo el conjunto de mezclas de mortero, se estableció una consistencia objetivo (extensibilidad) de 24 ± 1 cm, la cual se midió en la mesa de fluidez que se especifica en ASTM C 230, y de acuerdo con el procedimiento descrito en ASTM C 1437, pero sin los golpes especificados en el procedimiento

estándar. Para mantener constante la relación agua-cemento, la cantidad de agua en el aditivo fue considerada como parte del agua de reacción. Las mezclas se prepararon en una mezcladora con movimiento epicicloidal que satisface con los requisitos de ASTM C 305, mediante el siguiente procedimiento de mezclado:

1. Se añadieron a la mezcladora los materiales en el siguiente orden: agregados finos, cemento, microsílíce, PSA y agua. El procedimiento de mezclado comienza 30 segundos después. Para mezclas sin PSA, el mezclado comenzó inmediatamente después de añadir el agua.
2. A continuación, los materiales son mezclados a baja velocidad durante 4 minutos.
3. En este paso, para mezclas con INC, este aditivo fue dosificado tres minutos después de comenzar el mezclado (*sin apagar la mezcladora*) y la mezcla continuó durante un minuto adicional a baja velocidad.
4. Después de dosificar el SP, el mezclado continuó por un minuto adicional a baja velocidad.
5. Después de un tiempo de mezclado acumulado de 5 minutos, la mezcladora se apagó por 30 segundos para raspar los lados y el fondo del tazón con una llana.
6. A continuación, el proceso de mezclado continua por tres minutos a alta velocidad.
7. *Para la mezcla PSA + INC, el INC fue dosificado al inicio de esta etapa (5.5 minutos después de iniciar el mezclado).*

Para todo el conjunto de morteros, la caracterización de las propiedades en estado fresco consistió en la determinación de la consistencia (extensibilidad). El contenido de aire y la masa unitaria fueron determinados de acuerdo con ASTM C 85. Las mediciones de la retracción autógena (ASTM C 1698) se iniciaron después de que la mezcla de mortero alcanza el tiempo de fraguado final (ASTM C 403) y se concluyeron a la edad de 28 días. Las mediciones de la deformación autógena lineal se realizaron por triplicado a través de un molde corrugado flexible y un dilatómetro.

Las cuatro mezclas evaluadas en este trabajo son identificadas de acuerdo a la nomenclatura que aparece en la Tabla 1 y los proporcionamientos de todas estas mezclas, con el agregado en condición seca se reportan en la Tabla 2.

Tabla 1. Identificaciones de las mezclas (ID)

| ID | Materiales |
|---------|---------------------|
| REF | CP + MS |
| PSA | CP + MS + PSA |
| INC | CP + MS + INC |
| PSA+INC | CP + MS + PSA + INC |

Table 2. Proporcionamientos de mezcla en kg/m³, CV en condición seca

| Mezcla | CPO | MS | Agua | IC _w | SP | CV | PSA | INC |
|---------|-------|------|-------|-----------------|-----|--------|------|------|
| REF | 485.1 | 46.1 | 225.7 | ---- | 3.2 | 1513.8 | ---- | ---- |
| PSA | 481.7 | 45.8 | 224.1 | 32.5 | 3.2 | 1414.3 | 1.4 | ---- |
| INC | 485.8 | 46.1 | 220.9 | ---- | 3.2 | 1506.7 | ---- | 10.7 |
| PSA+INC | 481.3 | 45.7 | 217.0 | 32.5 | 3.2 | 1404.3 | 1.4 | 10.6 |

Al finalizar el proceso de mezclado, para la determinación de la retracción por secado, se fabricaron especímenes prismáticos de 50 x 50 x 250 mm de acuerdo con ASTM C 596 (se fabricaron cuatro muestras para cada mezcla). Para las pruebas de resistividad eléctrica superficial (RES) y el coeficiente de migración de cloruros en estado no estacionario (Dnssm), se fabricaron especímenes cilíndricos de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura y las mediciones se realizaron de acuerdo con AASHTO TP 95, utilizando para este fin un dispositivo que opera conforme a la Prueba Wenner con un arreglo de cuatro puntos (AASHTO TP 95, 2011), y un equipo con el arreglo descrito en NT Build

492. Los resultados de estos dos métodos presentan buenas correlaciones y se reportan comúnmente como índices de durabilidad del concreto y como un indicador de la calidad de la pasta de cemento (T.C. Powers, et. Al., 1948). Las muestras fueron desmoldadas a las 24 horas y colocadas en un cuarto de curado que cumple con las condiciones controladas especificadas en ASTM C 31 ($23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ and $\text{RH} \geq 95\%$).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Parámetros de hidratación

Para el CPO y el MS, los parámetros de hidratación se obtuvieron del modelo de Powers (TC Powers, et al., 1948; Jensen O. et al., 2000; Jensen O. et al., 2002), mediante ATG (incluyendo la determinación de la cantidad de hidróxido de calcio, HC) y mediante pruebas de RQ, y fueron calculados de acuerdo con las ecuaciones 1-3. Los resultados se utilizaron para calcular el agua de curado interno y la cantidad de PSA a dosificar, mismas que se reportan en la en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de hidratación de los materiales cementante obtenidos a partir de ATG y RQ

| Cementante | b_w (g/g) | p_w (g/g) | RQ (ml/100g) | HC g/g | (α) |
|------------|----------------|----------------|-----------------|-----------|--------------|
| CPO | 0.23 | 0.19 | 6.03 | 0.16 | 1 |
| MS | 0 | 0.5 | 19.66 | 1.7 | ----- |

Mediante las ecuaciones 1-3 y los valores para los parámetros de hidratación reportados en la Tabla 3, se indica teóricamente que en un sistema cerrado la pasta cementante (CPO y MS) reaccionará a un α de 1 si la relación a/c es de 0.47. En este trabajo experimental, se estableció que la pasta cementante tuviera una relación a/c de 0.40 y una relación s/c de 0.095, por lo tanto, para alcanzar una relación a/c de 0.47, la cantidad de agua de curado interno a añadir, en términos de la relación a/c, debería ser 0.07. Para implementar el curado interno en el mortero, la masa requerida de agua de curado interno (ICw) y la dosificación requerida de PSA, se reportan en la Tabla 4.

Table 4. Parámetros para calcular las cantidades de ICw y PSA para implementar el curado interno en un sistema de agua cerrado.

| a/c_{cerrado} | a/c | X | s/c | ICw (kg/m ³) | PSA (kg/m ³) |
|------------------------|------|------|-------|-----------------------------|-----------------------------|
| 0.47 | 0.40 | 0.07 | 0.095 | 33.8 | 1.5 |

$$X = a/c_{\text{cerrado}} - a/c$$

3.2 Propiedades en estado fresco

Las propiedades en estado fresco se presentan en la Tabla 5. Todas las mezclas lograron la extensibilidad objetivo de 24 ± 1 cm. Los resultados del contenido de aire y la masa unitaria muestran que la sustitución de arena por PSA aumentó el contenido de aire y en consecuencia disminuyó la masa unitaria. Para las mezclas INC e INC+PSA, las propiedades en estado fresco fueron similares a las de la mezcla de referencia.

Tabla 5. Propiedades en estado fresco de los morteros

| Mezcla | Extensibilidad (cm) | Contenido de Aire (%) | Masa Unitaria (kg/m ³) |
|---------|---------------------|-----------------------|------------------------------------|
| REF | 24 | 1.4 | 2359 |
| PSA | 24 | 2.1 | 2283 |
| INC | 24 | 1.3 | 2358 |
| INC+PSA | 23 | 2.4 | 2295 |

Tabla 6. Tiempos de fraguado

| Mezcla | Inicial (min) | Final (min) |
|---------|---------------|-------------|
| REF | 220 | 285 |
| PSA | 297 | 383 |
| INC | 195 | 245 |
| PSA+INC | 248 | 307 |

Debido a que se ha reportado que el INC podría influir en los tiempos de fraguado (Hansson C.M. et al., 1998) y que el PSA también podría disminuir los tiempos de fraguado, la determinación de esta propiedad se incluyó en el programa experimental de este trabajo. Los resultados de los tiempos de fraguado reportados en la Tabla 6, indican que por sí solas, las dosificaciones de INC aceleran los tiempos de fraguado inicial y final en 25 y 40 minutos, y que el PSA retarda estos tiempos de fraguado en 1h:17m y en 1h:38m respectivamente. En la mezcla PSA + INC, el efecto combinado condujo a un retraso despreciable en los tiempos de fraguado inicial y final, de 28 y 22 minutos respectivamente. La aceleración o el retardo en los tiempos de fraguado originados por INC, PSA y PSA + INC son insignificantes y no representan ningún problema para aplicaciones prácticas.

3.3 Retracción autógena y por secado.

Los resultados de la retracción autógena (RA) que se presentan en la Figura 3 a las edades de 64 horas y 28 días, exhiben el gran beneficio del PSA al contrarrestar la RA en un 97% y 89% respectivamente. La presencia de INC aumenta significativamente la RA en un 89% y un 78% respectivamente, sin embargo, en combinación con el PSA, este comportamiento no deseado fue contrario contrarrestando la inestabilidad volumétrica y conduciendo a reducciones de la RA del 79% y 69% respectivamente.

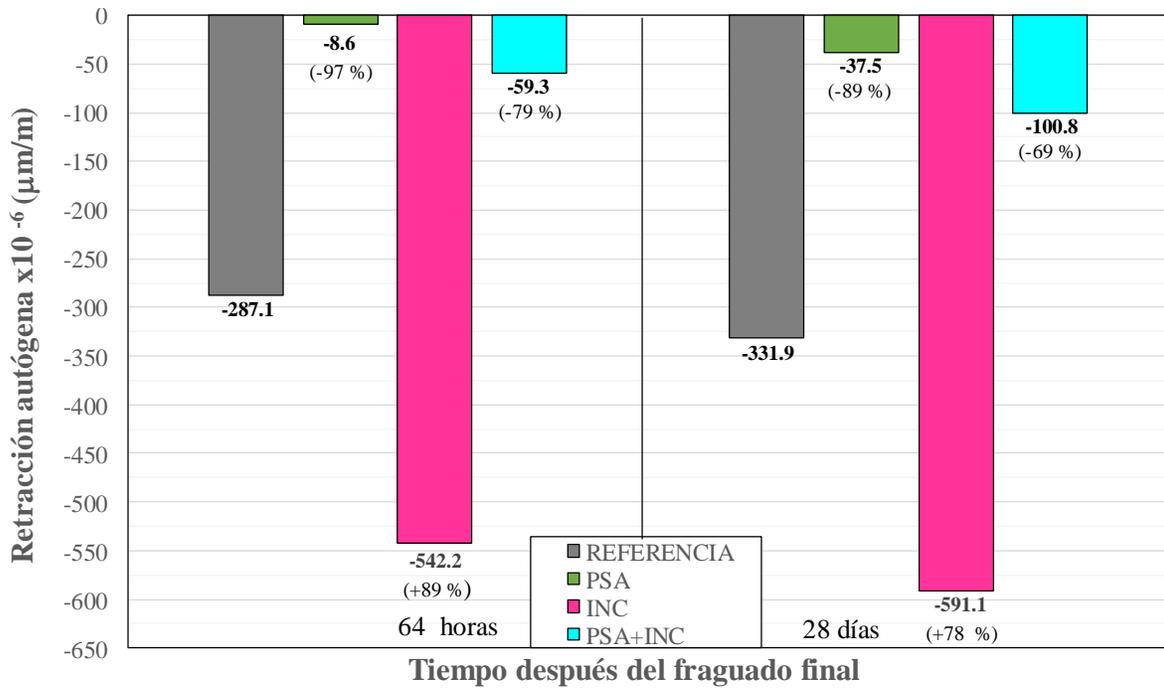


Figura 3. Retracción autógena a 64 horas y 28 días

Para las mezclas de referencia, con PSA y con INC, los resultados de la retracción por secado (RS) que se reportan en la Figura 4, a la edad de 70 días (595, 620 y 645 μm respectivamente), ilustran claramente que el PSA y el INC no tienen un efecto importante en esta propiedad, sin embargo, al combinar los dos aditivos, la RS aumenta a 765 μm , lo que representa un aumento menor de 145 μm en comparación con el RS promedio de las otras tres mezclas (620 μm).

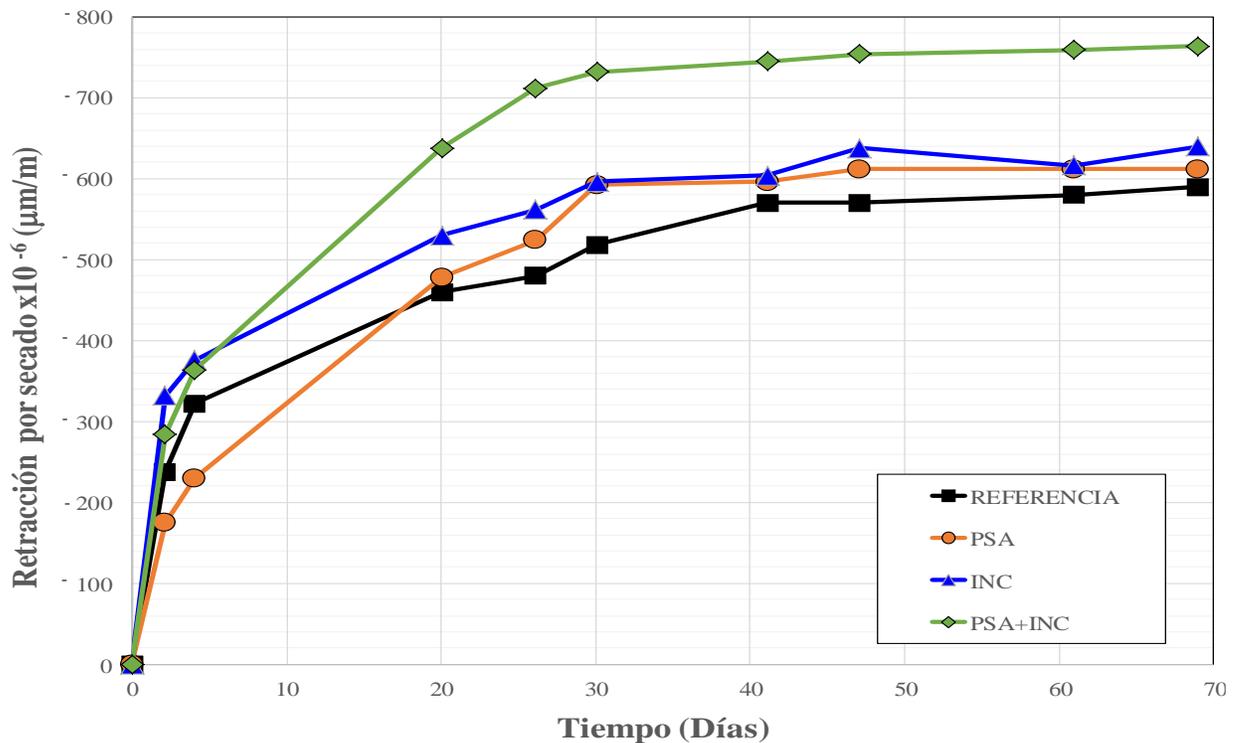


Figura 4. Retracción por secado a la edad de 70 días

3.4 Resistividad eléctrica superficial (RES) y Coeficiente de migración de cloruros (Dnssm)

Los resultados reportados en la Figura 5, indican que, para todas las edades reportadas en esta figura, el INC mejoró ligeramente la RES en un rango de 10% a 13%. De acuerdo con la clasificación cualitativa informada en el método de prueba estándar para estas pruebas AASHTO TP 95, los resultados para las mezclas de referencia y con el INC presentan un potencial de permeabilidad a los iones de cloruro muy bajo. A los 28 días, la presencia de PSA origina una reducción del 36%, lo que sugiere que el potencial de permeabilidad al ion cloruro se vio afectado y pasó de muy bajo a bajo. Sin embargo, a los 70 y 114 días las reducciones siguen siendo casi las mismas (38% y 32%), también a estas dos edades el concreto recupera el muy bajo potencial de permeabilidad al ion cloruro. La mezcla PSA + INC presentó una tendencia similar con reducciones de 31%, 32% y 37% a las edades de 28, 70 y 114 días respectivamente.

La resistividad eléctrica superficial es una medida indirecta tanto de la porosidad como de la difusividad. La corriente eléctrica que fluye a través de la pasta hidratada se debe a un proceso electrolítico que resulta principalmente por el flujo de los iones presentes en la solución de los poros (KO Ampadu, et al., 1999). Por otro lado, cuando la concentración de especies iónicas como el sodio y el potasio disminuye, esto conducirá a una disminución de la conductividad iónica y, por lo tanto, a un aumento de la resistividad eléctrica (C. Shi, 2004). Parece que el aumento de la RES, originado por la presencia de INC, es el resultado de la disminución del flujo de la corriente eléctrica como consecuencia de la probable disminución de la conductividad iónica en la solución de los poros.

Entre otros, los factores que afectan los resultados de RES son la porosidad, el contenido de agua, la presencia de materiales cementantes suplementarios y la relación a/c. Para las mezclas con INC también es importante destacar que esta técnica podría proporcionar resultados ligeramente subestimados (AASHTO TP 95, 2011).

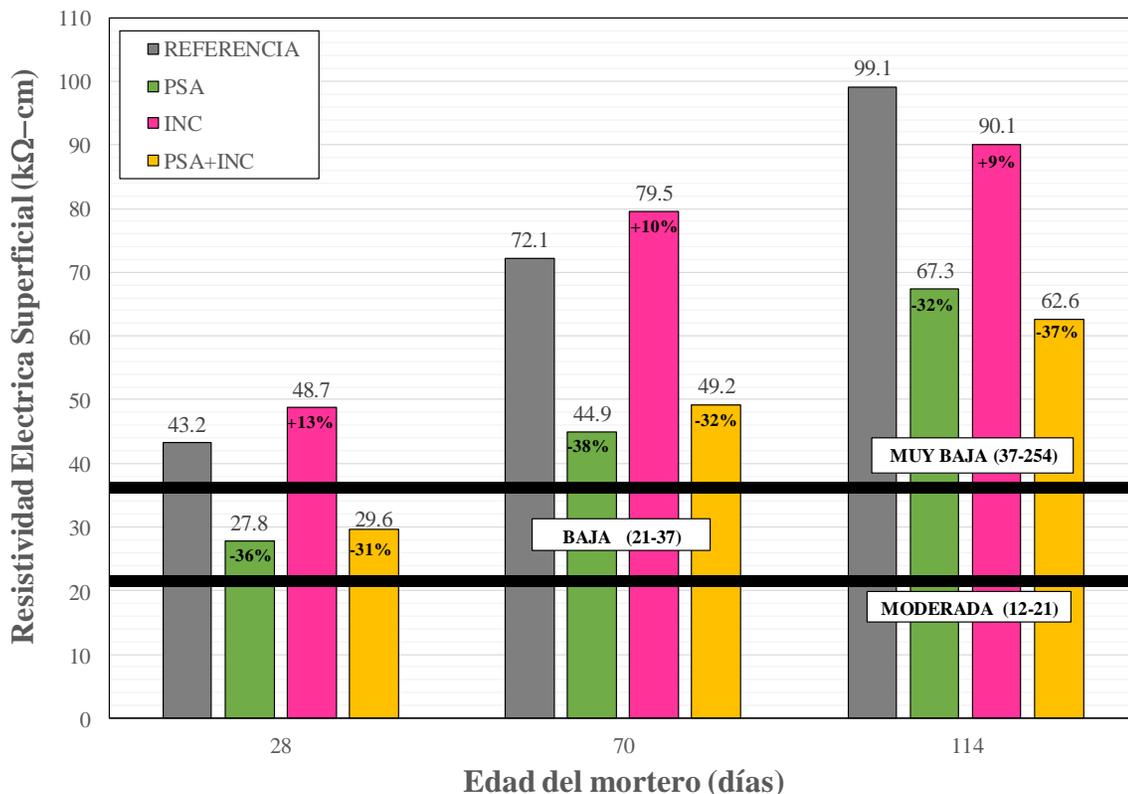


Figura 5. Desarrollo de la resistividad eléctrica superficial hasta una edad de 114 días

Los resultados en la Tabla 7 indican que las tres tecnologías (PSA, INC y PSA+ INC) aumentaron el Dnssm en 38, 30 y 122%. A pesar de que estos incrementos podrían percibirse como muy altos, la clasificación cualitativa establecida para este método de prueba (Nilsson L., et al., 1998) indica que, para un CAD con estas tecnologías, la resistencia potencial al ingreso de cloruros es extremadamente alta ($Dnssm < 2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) para las mezclas PSA e INC, y muy alta ($Dnssm = 2.2 - 5.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) para la mezcla PSA + INC. Los coeficientes de variación que se reportan en la Tabla 7 se incluyen como referencia de la incertidumbre que podría esperarse para mediciones realizadas por triplicado. Analizando las diferencias absolutas para los tiempos de fraguado, la RES y el Dnssm, podemos observar que las mezclas con PSA presentaron los valores más altos. Este comportamiento se atribuye principalmente al aumento en la relación agua/cemento que podría resultar a edades muy tempranas, ya que se considera que el PSA no retiene efectivamente toda el agua de curado interno calculada, liberando parte de ella en un período comprendido entre el momento cuando se fabricaron los especímenes y el momento en que el concreto alcanzó su tiempo de fraguado final. A pesar de este ligero efecto adverso en los resultados obtenidos para el PSA, en términos de durabilidad (cualitativos), los resultados de la RES y el Dnssm indican que el efecto es insignificante o despreciable.

Table 7. Coeficiente de migración de cloruros (Dnssm) a 114 días

| Mezcla | Dnssm ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) | Coefficiente de variación (%) |
|---------|---|----------------------------------|
| REF | 1.46 | 4.44 |
| PSA | 2.01 | 7.04 |
| INC | 1.90 | 5.03 |
| PSA+INC | 3.25 | 9.14 |

Si los poros del PSA están vacíos, los iones tienen que recorrer una ruta un poco más larga para atravesar el poro, pero si los poros del PSA están llenos de líquido, pueden representar una autopista sin obstáculos para el transporte de los iones. Sin embargo, el líquido en el poro puede mantenerse total o parcialmente dentro de una partícula hinchada o expandida de PSA y no se conocen las propiedades de transporte en una partícula hinchada de PSA (Marianne T. H. et al., 2015). Esta declaración podría ser la razón de los coeficientes más altos (Dnssm) que se obtuvieron para las mezclas con PSA.

4. CONCLUSIONES

Basado en el análisis de los resultados obtenidos para los morteros evaluados en este trabajo, se puede concluir lo siguiente:

- Los resultados de la RES indican que el PSA posee el efecto más perjudicial en términos de durabilidad. Aunque, tarde o temprano, las mezclas serán clasificadas con una muy baja probabilidad de penetración de iones cloruro (37-251 kΩ-cm), los resultados de RES muestran que el deterioro retrasará el tiempo para que estas mezclas alcancen este nivel de impermeabilidad; 30 y 50 días después de la mezcla de referencia, respectivamente. El INC también provoca un retraso de 15 días.
- A pesar de las diferencias en los valores absolutos, el PSA y el INC no afectaron la impermeabilidad cualitativa, presentando una probabilidad extremadamente alta de resistir la entrada de cloruros ($Dnssm < 2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$). La combinación de PSA e INC afectó levemente la impermeabilidad de los materiales, presentando una probabilidad muy alta de resistir la entrada de cloruro ($Dnssm = 2.5 \text{ to } 5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$).

- Los criterios de evaluación cualitativos para los resultados de RES e INC indican que, en términos de durabilidad, la incorporación de un PSA y/o un INC en un CAC con microsílice y una relación agua/aglutinante de 0.40, no reduce la durabilidad del concreto.
- Los efectos perjudiciales que pudiesen atribuírsele al PSA por los resultados obtenidos para los tiempos de fraguado, la resistividad eléctrica superficial y el coeficiente de migración de cloruros, se atribuyen a un aumento en la relación agua/cementante, originada por una cantidad no cuantificada de agua de curado interno que se sumó al agua de reacción dosificada durante el periodo de hidratación comprendido entre la fabricación de los especímenes y el fraguado final.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a las diferentes organizaciones que contribuyeron en el desarrollo de este proyecto; al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT) por la beca otorgada a Jennifer A. Canul-Polanco, al Programa de Investigación Científica y Tecnológica de la Universidad Autónoma de Nuevo León (PACyT-UANL) y al Programa para el Promoción y Consolidación de Proyectos de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Facultad de Ingeniería Civil (FIC-UANL). Además, los autores desean expresar su agradecimiento a José Alfredo Rodríguez-Campos, de HOLCIM México S.A. de C.V., y a Filiberto Marín, de EUCOMEX S.A. de C.V., por proporcionar el cemento Portland y los aditivos químicos respectivamente.

6. REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2011). *AASHTO TP 95: Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. Washington, DC.
- Ampadu, K. O. Torii, K., Kawamura, M. (1999), *Beneficial effect of fly ash on chloride diffusivity of hardened cement paste*, *Cement and Concrete Research*, 29 (4), 585–590. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00047-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00047-2)
- Craeye, B., Geirnaert, M., DeSchuttera, G. (2011), *Super absorbing polymers as an internal curing agent for mitigation of early-age cracking of high-performance concrete bridge decks*. *Construction and Building Materials*. 25, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.063>.
- Cusson, D., Lounis, Z., Daigle, L. (2010), *Benefits of internal curing on service life and life-cycle cost of high-performance concrete bridge decks – A case study*. *Construction and Building Materials*, 32, 339-350 <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.02.007>.
- De la Varga, Castro, J., Bentz, D., Weiss, J. (2012), *Application of internal curing for mixtures containing high volumes of fly ash*. *Cement & Concrete Composites*, 34 1001–1008, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.008>.
- Gaidis, J. M. (2004). *Chemistry of corrosion inhibitors*. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, pp. 181–189. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00037-4](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00037-4).
- Hansson, C. M., Mammoliti, L. Hope, B. B. (1998). *Corrosion Inhibitors in concrete Part I - Principles*. *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 12, pp. 1775–1781. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00142-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00142-2).
- Jensen, O., Hansen, P. F. (2001), *Water-entrained cement-based materials*, PCT Patent Application WO01/02317A1.
- Jensen, O., Hansen, P. F. (2001), *Water-entrained cement-based materials I. Principles and theoretical background*, *Cement and Concrete Research*, Volume 31, Issue 4, pages 647-654. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00463-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00463-X).

- Jensen, O. Hansen, P. F. (2002), *Water-entrained cement-based materials II. Experimental observations*, Cement and Concrete Research, Volume 32, Issue 6, June pages 973-978. . [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00737-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00737-8).
- Lothenbach, B., Scrivener, K., Hooton, R. D. (2011), *Supplementary cementitious materials*, Cement and Concrete Research Num. 41 1244-1256. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>.
- Mechtcherine, V., Reinhardt, H. (2012), *Application of Superabsorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction State of the Art Report Prepared by Technical Committee 225-SAP*, <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2733-5>.
- Nordest (1999), NT Build 492: *Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments*.
- Nilsson, L., Ngo, M., & Gjrv, O. (1998). *High-performance repair materials for concrete structures in the port of Gothenburg*. En O. Gjrv, K. Sakai, & N. Banthia, Concrete under severe conditions: environment and loading, volumen 2, pp 1193-1198. Troms, Norway: E & FN Spon. <https://doi.org/10.1201/b16469>.
- Pendergrass, B., Darwin, D. (2014), *Low-cracking High-Performance Concrete (LC-HPC) bridge decks: Shrinkage-Reducing Admixtures, Internal Curing, and cracking performance*. Structural Engineering and Engineering Materials SM Report no. 107. The University of Kansas Center for Research, INC, Lawrence Kansas. <https://kuscholarworks.ku.edu/handle/1808/19821>.
- Powers, T. C., Brownyard, T. L. (1948) *Studies of the physical properties of hardened Portland Cement pastes*, Journal of the American Concrete Institute, USA.
- Quraishi, M. A., Nayak, D. K., Singh, B. N., Kumar, V., Pandey, K. K. (2016), *Experimental Studies on Effects of Sodium Citrate, Calcium Nitrite and Hexamine as Corrosion Inhibitor in Concrete*; Journal of Steel Structures & Construction, 5 pp; [doi: 10.4172/2472-0437.1000117](https://doi.org/10.4172/2472-0437.1000117).
- Sellevoid, E. J. Radjy F. F. (1982), *Condensed silica fume in concrete*, Report BML 82.610. Division of Building Materials. The Norwegian Institute of Technology & The University of Trondheim, Norway.
- Shi, C. (2004), *Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results*, Cement and Concrete Research, 34 (3), 537–545. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.09.007>.
- Snoeck, D. Jensen O. M., De Belie N. (2015), *The influence of superabsorbent polymers on the autogenous shrinkage properties of cement pastes with supplementary cementitious materials*. Cement and concrete research 74, 59-67. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.020>.
- Tange Hasholt, M., Mejlhede Jensen, O. (2015), *Chloride migration in concrete with superabsorbent polymers*, Cement and Concrete Composites, 55, 290-297. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.023>.
- Zhutovsky S. and Kovler K. *Effect of internal curing on durability-related properties of high performance concrete*, Cement and concrete research (2012), vol. 42., 1, pages 20-26, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.07.012>.