

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

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

* Autor de Contato: alejandroduranhr@gmail.com

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

Recepção: 22/11/2019 | Aceitação: 05/03/2020 | Publicação: 30/04/2020

RESUMO

Nesta pesquisa, o efeito sinérgico de um polímero super absorvente (SAP) e um inibidor de corrosão do nitrito 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 nitrito de cálcio; microssilice; durabilidade.

Citar como: Durán-Herrera, A., Canul-Polanco, J. A., Dávila-Pompermayer, R., López-Yépez, L. G., Valdez-Tamez, P. (2020), “Efeito sinérgico de um polímero super absorvente e um aditivo inibidor de corrosão à base de nitrito de cálcio na durabilidade do concreto de alto desempenho”, 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.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2021, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2020.

Synergetic effect of a superabsorbent polymer and a calcium nitrite corrosion inhibitor in high performance concrete durability

ABSTRACT

In this research, the synergetic effect of a super-absorbent polymer (SAP) and a calcium nitrite corrosion inhibitor (CNI) 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 an addition of 9.5% of silica fume were produced. The effect of this technology was evaluated by measuring the following parameters: autogenous and drying shrinkage, surface electrical resistivity and the non-steady-state chloride migration coefficient. Results indicate that the synergistic effect of SAP + CNI improves autogenous shrinkage and surface electrical resistivity.

Keywords: High performance concrete; superabsorbent polymer; calcium nitrite corrosion inhibitor; silica fume; durability.

Efecto sinérgico de un polímero super absorbente y un aditivo inhibidor de la corrosión base nitrito de calcio en la durabilidad del concreto de alto desempeño

RESUMEN

En esta investigación se evaluó el efecto sinérgico de un polímero súper-absorbente (SAP) y un inhibidor de la corrosión a base de nitrito de calcio (CNI), como una tecnología combinada para mejorar la durabilidad del concreto de alto desempeño. Para esto, se produjeron morteros base cemento portland, con una relación agua/cemento de 0.4 y una adición de microsilica de 9.5%. El efecto de esta tecnología se evaluó mediante la medición de los siguientes parámetros: las retracciones autógena y por secado, la resistividad eléctrica superficial y el coeficiente de migración de iones cloruro 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 super absorbente; inhibidor de la corrosión base nitrito de calcio; microsilice; durabilidad.

1. INTRODUÇÃO

É sabido que o concreto de alto desempenho (HPC) possui melhores propriedades mecânicas e de durabilidade do que o concreto convencional (Zhutovsky S. et. Al., 2012). No HPC, materiais cimentícios suplementares (SCM), como sílica ativa (SF), são comumente usados para obter um desempenho superior em termos de desempenho mecânico e de durabilidade (Lothenbach B. et. Al., 2011). No entanto, apesar desses benefícios, a presença de sílica ativa no HPC pode originar adversamente fissuras em idade precoce atribuídas ao processo de hidratação (Pendergrass B. et. Al., 2014).

As misturas de nitrito de cálcio (CNI) são usadas como inibidores de corrosão desde os anos 80 para prolongar a vida útil do concreto armado e são comumente usadas no HPC para construções marítimas (Gaidis J.M., 2004). Na presença da CNI, os tempos de pega do concreto podem ser atrasados (M.A. Quraishi, et. Al., 2016; Hansson C.M. et al., 1998), mas neste trabalho esperamos que a presença de SF possa neutralizar esse atraso.

Devido à finura da SF, é sabido que, na presença deste SCM, a retração do concreto aumentará, principalmente em idades precoces. Com a inclusão da CNI, esperamos que uma leve retração venha ocorrer e, conseqüentemente, pode prejudicar a durabilidade. Portanto, uma solução

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

proposta para esse problema poderia ser a implementação da cura interna através de um polímero superabsorvente (SAP).

Para os resultados positivos que demonstrou mitigar a retração precoce (Snoeck D. et al., 2015), a cura interna é conhecida como uma tecnologia viável para diminuir a fissuração precoce do HPC (Craeye B. et al., 2011; Cusson D. et al., 2010). Essa tecnologia consiste na introdução de um material altamente poroso que pode absorver uma quantidade significativa de água que será liberada na rede porosa do concreto à medida que a umidade relativa e a pressão interna dos poros diminuem. Para esse propósito, polímeros superabsorventes e agregados leves são os agentes mais comuns usados para implementar a cura interna (Jensen O. et. Al., 2001). No entanto, o uso do SAP provou um melhor desempenho em termos de capacidade de absorção de água (Mechtcherine V. et. Al., 2012).

Para implementar essa tecnologia em HPC, a dosagem de polímero superabsorvente que deve ser usado pode ser determinada através do modelo de hidratação de Powers modificado (TC Powers, et. Al., 1948; Jensen O. et al., 2000; Jensen O. et al. , 2002), um modelo que é explicado por dois sistemas de hidratação diferentes, um sistema aberto com água e um sistema fechado isolado de uma fonte externa de água. A Fig. 1 ilustra a importância da cura interna no HPC, porque neste concreto, o nível mais alto de densificação da matriz cimentícia impedirá que a cura externa seja eficaz (penetração de água) em toda a profundidade do concreto, condição que pode ser resolvida através da implementação de cura interna.

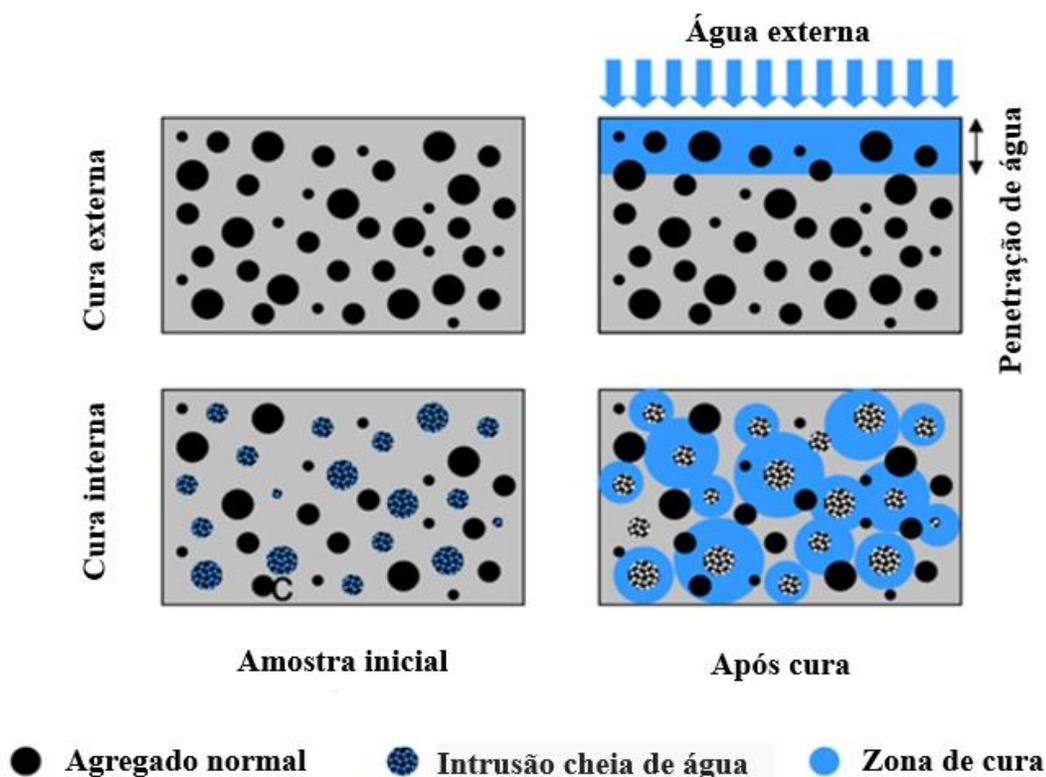


Figura 1. Cura por água interna x cura por água externa no HPC (I. De la Varga et al., 2012)

Assim, voltando à preocupação com o uso de CNI e sílica ativa no concreto. Como a CNI pode modificar o tempo de endurecimento e a taxa de hidratação de uma matriz cimentícia (M.A. Quraishi, et. Al., 2016; Hansson C.M. et al., 1998), espera-se que o método de cura interna com SAP possa diminuir esses efeitos mencionados.

A maioria das pesquisas publicadas sobre o efeito da CNI no concreto à base de cimento Portland avalia o efeito dessa mistura através de testes eletroquímicos de corrosão, mas deixa de lado a

avaliação do efeito dessa mistura em relação aos tempos de pega e à taxa de hidratação (Hansson CM et al. 1998). Neste projeto, espera-se que o método de cura interna com a SAP influencie a hidratação do sistema cimentício e contrarie o atraso dos tempos de pega associados à presença da CNI, por isso foi focado principalmente na avaliação do efeito sinérgico da CNI e da CNI. SAP nas propriedades de estágio fresco e endurecido de um HPC com SF, como: retração autógena, retração por secagem, resistividade elétrica superficial e o coeficiente de migração de cloreto.

2. PROCEDIMENTO

Materiais utilizados para a produção das argamassas:

- Um cimento Portland comum (ASTM C 150) Tipo V (OPC), com uma finura de Blaine de 363 m²/kg, uma massa específica de 3,1 e uma perda ao fogo (LOI) de 3,37%.
- Uma sílica condensada (SF) (ASTM C 1240) com uma área de superfície específica BET de 21,63 m²/g, uma massa específica de 2,2, uma LOI de 2,63% e um teor de SiO₂ de 95%.
- Um agregado de calcário triturado (FA) ASTM C 33 de Monterrey, México, com tamanho nominal máximo de 5 mm, massa específica seca de 2,61 e absorção de água de 2,2%.
- Um polímero super absorvente de poliacrilamida-potássio e poliacrilato de potássio com uma absorção de 25 g/g, uma massa específica de 1,004 e uma dessecção (perda de umidade) de 90% em soluções de poros extraídas de um conjunto de dez pastas cimentícias (Tipo V OPC + SF) com uma relação água / ligante (w / b) de 0,4 e relação s/c de 0,095.
- Um superplastificante (SP) à base de poli-carboxilato com um teor de sólidos de 51,8%, uma massa específica de 1,1.
- Uma mistura de inibidor de corrosão à base de nitrato de cálcio (CNI) com um teor de sólidos de 51,6% e uma massa específica de 1,3.

Argamassas foram preparadas com uma w/c de 0,40 e uma adição de sílica ativa de 9,5% em massa. As proporções de pasta foram estabelecidas de acordo com o modelo de Powers de hidratação modificada para sistemas cimentícios Portland Cement-Silica Fume (PC-SF) (TC Powers, et. Al., 1948; Jensen O. et al., 2000; Jensen O. et al. ., 2002), que avaliam analiticamente o grau de hidratação para a mesma matriz cimentícia exposta a um sistema de cura aberto externo ou a um sistema fechado interno isolado da água de cura externa. Para este projeto, o sistema foi fechado isolado com e sem cura interna (veja a Fig. 2). O diagrama da Fig. 2 apresenta a distribuição da fase volumétrica em uma pasta cimentícia: água capilar, água de gel (pw), gel sólido (bw) e retração química (CS). O CS e o bw foram calculados pelo ensaio da ASTM C 1608 e pela análise termogravimétrica (TGA) correspondentemente. A quantidade de água em gel foi considerada 0,19 g/g para cimento e 0,5 g/g para sílica ativa (Sellevold E. J. et. Al., 1998).

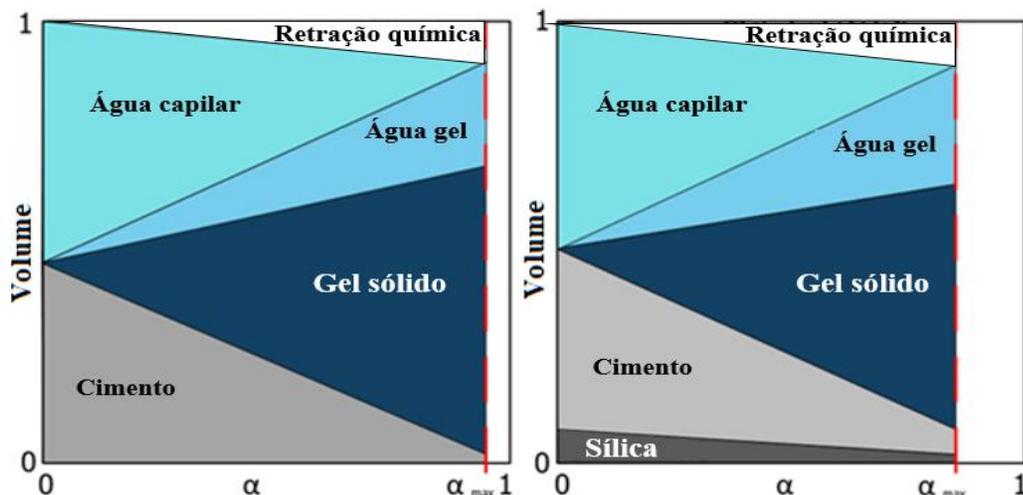


Figura 2. Distribuição da fase volumétrica e nível de hidratação em uma pasta cimentícia com w/c de 0,4, sem SF (esquerda) e com SF (direita), ilustrada de acordo com o modelo de Powers. Observa-se como a distribuição da fase volumétrica muda para um mesmo grau de hidratação, α , na presença de um SCM.

A equação 1 foi usada para calcular b_w :

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

Onde:

- $M_{1000\text{ °C}}$ é a massa da amostra a 1000 °C em gramas
- $M_{105\text{ °C}}$ é a massa da amostra a 105 °C em gramas
- M_{CO_2} é a perda de massa devido à descarbonatação do $CaCO_3$, geralmente entre $650\text{-}800\text{ °C}$.
- LOI_{cem} é a perda ao fogo do cimento

A quantidade necessária de água de cura interna (IC_w) para mitigar a retração autógena em uma pasta cimentícia de cimento Portland e sílica com uma relação a/c de 0,40 foi calculada de acordo com as equações 2 e 3:

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

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

Onde:

- Cem é a quantidade de cimento em kg/m^3
- a/c é a relação w/c da pasta
- s/c a relação sílica ativa / cimento
- IC_w é a quantidade de água de cura interna em kg/m^3
- IC_s é a quantidade de SAP em kg/m^3
- abs é a absorção do SAP em gramas
- des é a desorção do SAP em gramas

A dosagem de CNI foi de 2% em relação à massa dos materiais cimentícios. Uma consistência alvo (espalhamento) de 24 ± 1 cm foi estabelecida para todo o conjunto de misturas de argamassa e foi medida na flow table ASTM C 230, de acordo com o procedimento descrito na ASTM C 1437, mas

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

sem as quedas especificadas na procedimento padrão. Para manter constante a relação água/cimento, a quantidade de água nas misturas foi considerada como parte da água da reação. As misturas foram preparadas em um misturador epicíclico (argamassadeira) que atende aos requisitos da ASTM C 305, através do seguinte procedimento de mistura:

1. Os materiais foram adicionados ao misturador na seguinte ordem: agregados finos, cimento, sílica ativa, SAP e água. O procedimento de mistura começa 30 segundos depois. Para misturas sem SAP, a mistura começou imediatamente após a adição de água.
2. Em seguida, os materiais foram misturados em baixa velocidade por 4 minutos. Nesta etapa, para a mistura CNI, essa mistura foi dosada três minutos após o início da mistura (sem desligar o misturador) e a mistura continuou por mais um minuto em baixa velocidade.
3. Após a dosagem do SP, a mistura continuou por mais um minuto em baixa velocidade.
4. Após um tempo de mistura acumulado de 5 minutos, o misturador foi desligado por 30 segundos para raspar as laterais e o fundo da tigela com uma espátula.
5. Em seguida, o processo de mistura continuou por três minutos em alta velocidade. Para a mistura SAP + CNI, a CNI foi dosada no início desta etapa (5,5 minutos após o início da mistura).

Para todo o conjunto de argamassas, a caracterização das propriedades do estágio fresco consistiu na determinação da consistência (espalhamento) de acordo com a norma ASTM C 1437, mas sem qualquer queda da flow table; o teor de ar e o peso unitário foram determinados de acordo com a norma ASTM C 85. A retração autógena foi avaliada de acordo com a norma ASTM C 1698, após o tempo final de endurecimento do concreto, mas na fração de argamassa do material determinado de acordo com a norma ASTM C 403 e até idade de 28 dias. As medições da tensão autógena linear foram feitas por triplicado através de um molde ondulado flexível e um dilatômetro.

Os quatro traços avaliados neste trabalho são identificados de acordo com a nomenclatura que aparece na tabela 1, e as proporções para todos esses traços, com os agregados em estado seco, são apresentadas na tabela 2.

Tabela 1. Identificação dos traços (ID)

ID	Materiais
REF	PC + SF
SAP	PC + SF + SAP
CNI	PC + SF + CNI
SAP+CNI	PC + SF + SAP + CNI

Tabela 2. Proporção dos materiais em kg/m³, FA em condição seca

Nome	OPC	SF	Água	IC _w	SP	FA	SAP	CNI
REF	485.1	46.1	225.7	----	3.2	1513.8	----	----
SAP	481.7	45.8	224.1	32.5	3.2	1414.3	1.4	----
CNI	485.8	46.1	220.9	----	3.2	1506.7	----	10.7
SAP+CNI	481.3	45.7	217.0	32.5	3.2	1404.3	1.4	10.6

Ao final do processo de mistura, amostras prismáticas com dimensões de 50 x 50 x 250 mm foram moldadas para a determinação da retração por secagem, conforme ASTM C 596 (quatro amostras foram moldadas para cada mistura); amostras cilíndricas com dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, foram moldadas para realizar os ensaios de resistividade elétrica superficial (SER) de acordo com AASHTO TP 95, com um dispositivo que opera de acordo com o ensaio de sonda de matriz de quatro pontos Wenner (AASHTO TP 95, 2011), bem como o coeficiente de migração

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

de cloretos não estáveis de acordo com o NT Build 492 (NT Build 492, 1999). Os resultados desses dois métodos apresentam boas correlações e são comumente relatados como índices de durabilidade do concreto e como indicador da qualidade da pasta de cimento (TC Powers, et. Al., 1948). As amostras foram desmoldadas às 24 h e colocadas em uma sala de cura que atenda às condições controladas exigidas estabelecidas pela ASTM C 31 ($23^{\circ} \text{C} \pm 2^{\circ} \text{C}$ e $\text{UR} \geq 95\%$).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Parâmetros de hidratação

Para OPC e SF, os parâmetros de hidratação foram obtidos no Modelo de Powers (TC Powers, et. Al., 1948; Jensen O. et al., 2000; Jensen O. et al., 2002) através de TGA (Termo Gravimetric Analysis) e medidas de CS e calculadas de acordo com a equação 1-3. Os resultados foram utilizados para calcular a água de cura interna e a quantidade de SAP a ser dosada e estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de hidratação dos materiais cimentícios das medições TGA e CS

Cementícios	b_w (g/g)	p_w (g/g)	CS (ml/100g)	CH g/g	Grau de hidratação (HD)
OPC	0.23	0.19	6.03	0.16	1
SF	0	0.5	19.66	1.7	-----

As equações 1-3 e os valores relatados para os parâmetros de hidratação na Tabela 3 indicam teoricamente que em um sistema fechado a pasta cimentícia (OPC e SF) atingirá um HD de 1 se a relação w/c final for 0,47. Neste trabalho experimental, a pasta cimentícia foi ajustada para ter uma relação w/c de 0,40. Portanto, para atingir um w/c de 0,47, a quantidade de água de cura interna a ser adicionada em termos da razão w/c deve ser 0,07. Para uma relação sílica / cálcio (s/c) de 0,095 obtida como resultado desse cálculo, a massa necessária de água de cura interna (ICw) e a dose necessária de SAP para implementar a cura interna na argamassa são relatadas na tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros para calcular as quantidades de ICw e SAP para implementar a cura interna em um sistema fechado de água penetrada.

a/c_{closed}	a/c	X	s/c	ICw (kg/m^3)	SAP (kg/m^3)
0.47	0.40	0.07	0.095	33.8	1.5

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

3.2 Propriedades no estado fresco

As propriedades de estágio fresco são apresentadas na tabela 5. Todas as misturas atingiram a meta de espalhamento de 24 ± 1 cm. Os resultados do teor de ar e do massa específica mostram que a substituição da areia pelo SAP aumentou o teor de ar e subsequentemente diminuiu a massa específica. Para as misturas CNI e CNI + SAP, as propriedades no estado fresco foram semelhantes à mistura de referência.

Tabela 5. Propriedades no estado fresco das argamassas

Traço	Espalhamento (cm)	Ar incorporado (%)	Massa específica (kg/m ³)
REF	24	1.4	2359
SAP	24	2.1	2283
CNI	24	1.3	2358
CNI+SAP	23	2.4	2295

Tabela 6. Resultados do tempo de espalhamento

Traço	Inicial (min)	Final (min)
REF	220	285
SAP	297	383
CNI	195	245
SAP+CNI	248	307

Como se sabia que a CNI poderia influenciar os tempos de pega (Hansson C.M. et al., 1998) e que o SAP também poderia diminuir os tempos de pega, a determinação dessa propriedade foi incluída no programa experimental deste trabalho. Os resultados dos tempos de pega relatados na Tabela 6 indicam que, isoladamente, as dosagens da CNI aceleram os tempos de pega inicial e final em 25 e 40 minutos, e que o SAP adia esses tempos de cura em 1 h 17 e 1 h 38, respectivamente. Na mistura SAP + CNI, o efeito combinado levou a um atraso nos tempos de ajuste inicial e final de 28 e 22 minutos, respectivamente. A aceleração ou atraso nos tempos de configuração originados pela CNI, SAP e SAP + CNI são insignificantes e não representam nenhum problema para aplicações práticas.

3.3 Retração autógena e por secagem.

Os resultados da retração autógena (EA) apresentados na Fig. 3, com idades de 64 h e 28 dias, mostram o grande benefício do SAP em neutralizar o SA em 97% e 89%, respectivamente. A presença da CNI aumenta significativamente o AS em 89% e 78%, respectivamente, mas, em combinação com a SAP, esse desempenho indesejado contraria a instabilidade volumétrica e leva a reduções do AS de 79% e 69%, respectivamente.

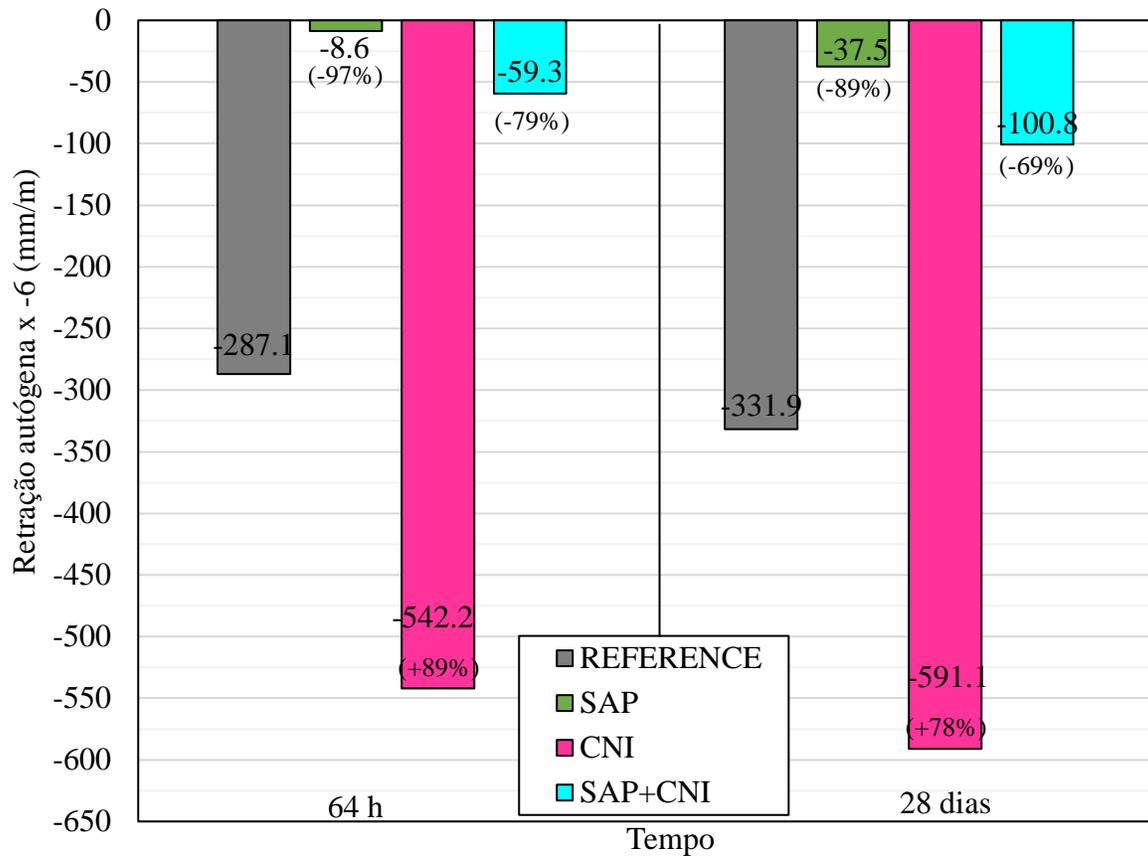


Figura 3. Retração autóloga a 64h e 28 dias.

Para as misturas Reference, SAP e CNI, os resultados do retração por secagem (DS) relatados na Fig. 4, aos 70 dias de idade (595, 620 e 645 μm , respectivamente) ilustram claramente que SAP e CNI não têm um efeito maior nessa propriedade, no entanto, combinando as duas misturas, o DS aumenta para 765 μm , representando um aumento menor de 145 μm em comparação com o DS médio das outras três misturas (620 μm).

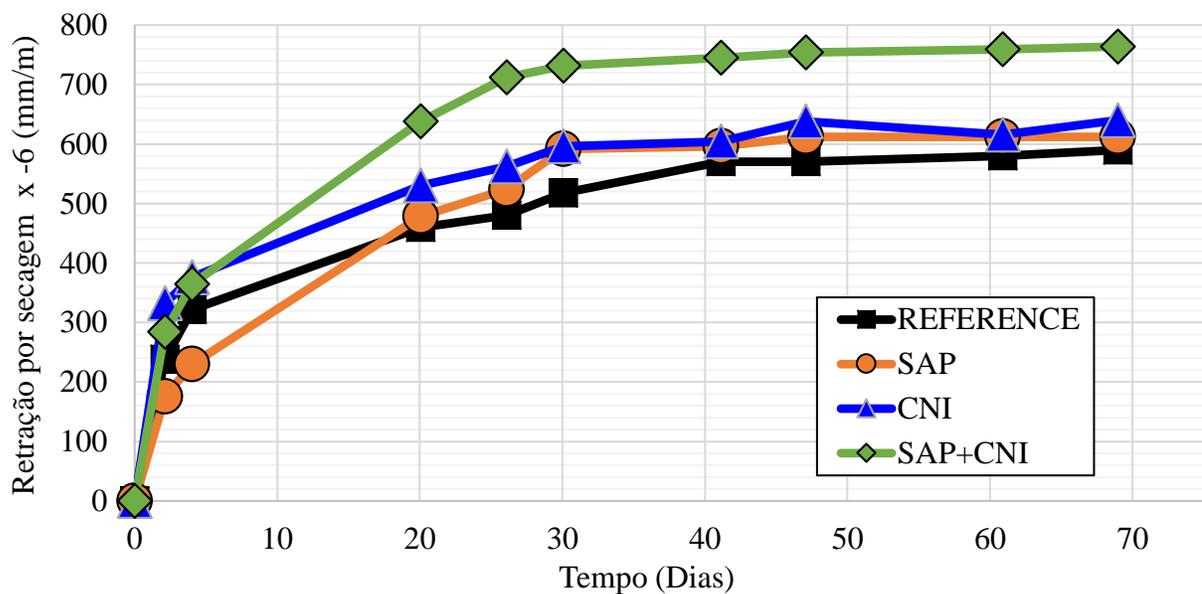


Figura 4. Retração por secagem na idade de 70 dias

3.4 Resistividade elétrica superficial (SER) e coeficiente de migração de cloretos (Dnssm)

Os resultados relatados na Fig. 5 indicam que, para todas as idades relatadas nesta figura, a CNI melhorou ligeiramente a SER dentro de um intervalo de 10% a 13%. De acordo com a classificação qualitativa relatada no método de ensaio padrão para este ensaio AASHTO TP 95, os resultados para referência e misturas de CNI apresentam um potencial de permeabilidade de íons de cloreto muito baixo. Aos 28 dias, a presença do SAP origina uma redução de 36%, sugerindo que o potencial de permeabilidade ao íon cloreto foi afetado e passa de muito baixo para baixo, mas aos 70 e 114 dias as reduções permanecem quase as mesmas (38% e 32%), também que nessas duas idades o concreto recupera o potencial de permeabilidade de íons cloreto muito baixo. A mistura SAP + CNI apresentou tendência semelhante, com reduções de 31%, 32% e 37% nas idades de 28, 70 e 114 dias, respectivamente.

A resistividade elétrica de superfície é uma medida indireta de porosidade e difusividade. A corrente elétrica que flui através da pasta hidratada é devida a um processo eletrolítico resultante principalmente do fluxo de íons presentes na solução porosa (KO Ampadu, et. Al., 1999), por outro lado, quando a concentração de espécies iônicas como o sódio e o potássio, isso levará a uma diminuição da condutividade iônica e, portanto, a um aumento da resistividade elétrica (C. Shi, 2004). Parece que o aumento do SER, originado pela presença de CNI, é o resultado da diminuição do fluxo de corrente elétrica como consequência da provável diminuição da condutividade iônica na solução porosa.

Entre outros, fatores que afetam os resultados de SER são porosidade, teor de água, presença de materiais cimentícios suplementares e a relação w/c. Para misturas com CNI, também é importante destacar que esta técnica pode fornecer um resultado ligeiramente subestimado (AASHTO TP 95, 2011).

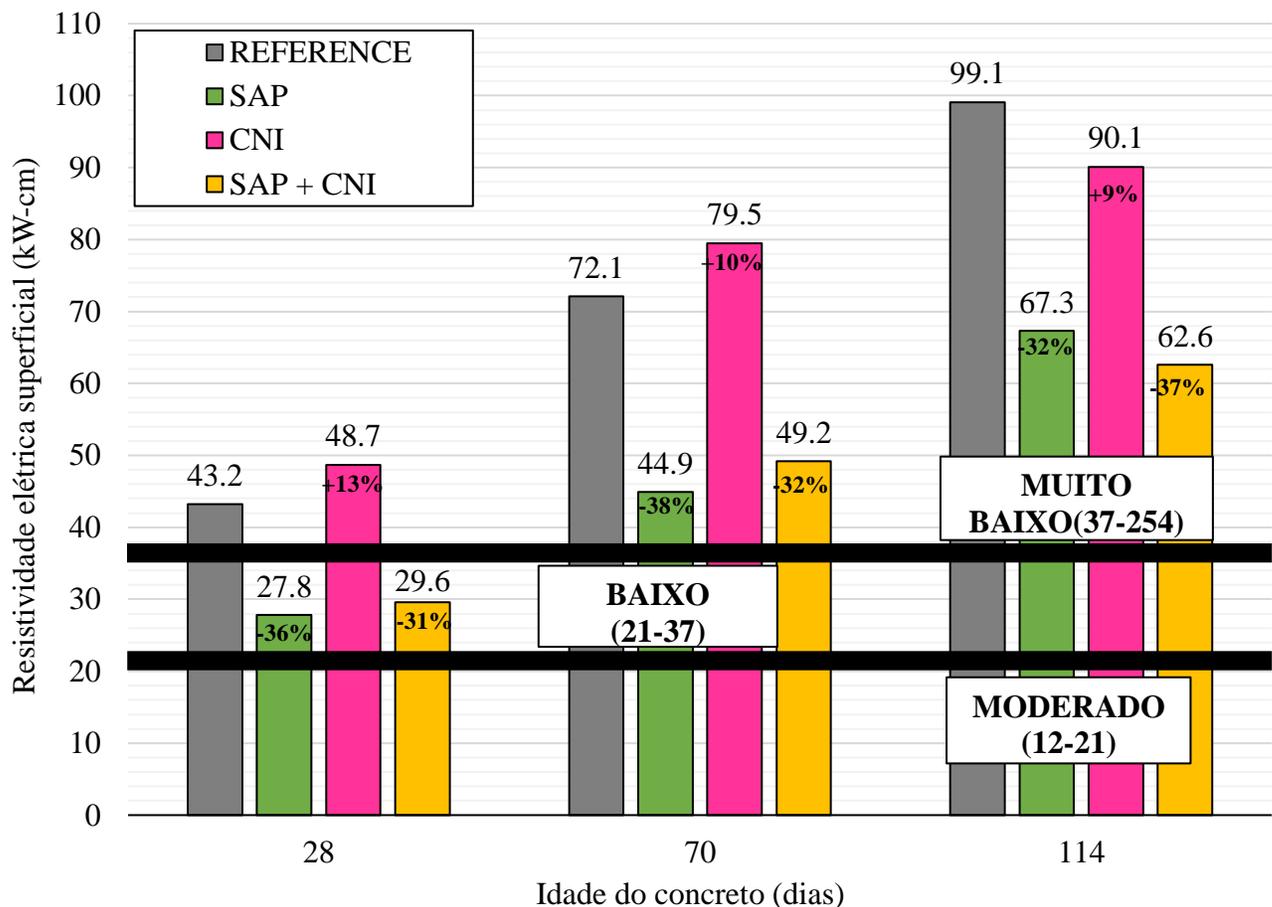


Figura 5. Desenvolvimento de resistividade elétrica superficial até 114 dias de idade.

Os resultados da Tabela 8 indicam que as três tecnologias (SAP, CNI e SAP + CNI) aumentaram o CMC em 38, 30 e 122%. Embora esses incrementos possam ser percebidos como muito altos, a classificação qualitativa estabelecida para esse método de ensaio (Nilsson L., et al., 1998) indica que, para o HPC com essas tecnologias, a resistência potencial à entrada de cloretos é extremamente alta ($D_{nssm} < 2,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2 / \text{s}$) e muito alta ($D_{nssm} = 2,2 - 5,0 \times 10^{-12} \text{ m}^2 / \text{s}$) para a mistura SAP + CNI. Os coeficientes de variação relatados na tabela 7 são incluídos como referência da incerteza que poderia ser esperada para medições feitas em triplicata.

Analisando a diferença absoluta de pega entre SER e D_{nssm} , pode-se observar que as misturas com SAP apresentam alto valores. Este comportamento pode ser atribuído principalmente ao aumento da relação w/c resultante das primeiras idades, porque se considera que o SAP não é efetivo nesse período inicial para consumir a água interna, liberando-a durante o período de mistura até início e fim de pega. Apesar deste pequeno efeito adverso do SAP, SER e CMC indicam que as consequências na durabilidade são desprezíveis.

Tabela 7. Coeficiente de Migração de Cloreto (D_{nssm}) em 114 dias

Nome	CMC ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Coeficiente de variação (%)
REF	1.46	4.44
SAP	2.01	7.04
CNI	1.90	5.03
SAP+CNI	3.25	9.14

Se os vazios do SAP não estiverem preenchidos, os íons terão que percorrer uma rota um pouco mais longa para passar pelo vazio, mas se os vazios do SAP estiverem cheios de líquido, eles poderão fornecer uma via expressa sem obstáculos para o transporte de íons. No entanto, o líquido no vazio pode ser total ou parcialmente retido dentro de uma partícula SAP intumescida e as propriedades de transporte em uma partícula SAP intumescida não são conhecidas (Marianne T.H. et al., 2015). Esta afirmação pode ser a razão dos coeficientes mais altos (D_{nssm}) obtidos para as misturas com SAP.

4. CONCLUSÕES

Com base na análise dos resultados obtidos para as argamassas avaliadas neste trabalho, pode-se tirar as seguintes conclusões:

- Os resultados da resistividade elétrica superficial indicam que o SAP tem o efeito mais prejudicial em termos de durabilidade. Embora, mais cedo ou mais tarde, as misturas sejam classificadas com uma probabilidade muito baixa de penetração de íons cloreto (37-251 $\text{k}\Omega\text{-cm}$), os resultados do SER mostram que o efeito prejudicial atrasará o tempo em que essas misturas atingirem esse nível de impermeabilidade, 30 e 50 dias após a mistura de referência, respectivamente. A CNI também induziu um atraso de 15 dias.
- Apesar das diferenças nos valores absolutos, a SAP e a CNI não afetaram a permeabilidade qualitativa, apresentando uma probabilidade extremamente alta de resistir à entrada de cloretos ($\text{CMC} < 2,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2 / \text{s}$). A combinação de SAP e CNI afetou levemente a permeabilidade dos materiais, apresentando uma probabilidade muito alta de resistir à entrada de cloreto ($D_{nssm} = 2,5 \text{ a } 5 \times 10^{-12} \text{ m}^2 / \text{s}$).
- Os critérios de avaliação qualitativa para resultados de SER e CNI indicam que, em termos de durabilidade, a incorporação do SAP e / ou CNI a um HPC com sílica e uma relação água / ligante de 0,40, não reduz a durabilidade do concreto.
- O efeito prejudicial do SAP exibido pelos resultados de tempos de pega, resistividade

elétrica superficial e coeficiente de migração de cloretos é atribuído a um aumento da relação água / ligante por uma quantidade não qualificada de água de cura interna durante o processo de hidratação entre o tempo de endurecimento e o endurecimento final.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar sua gratidão e sincero agradecimento às diferentes organizações que contribuíram no desenvolvimento deste projeto: ao Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia do México (CONACYT) pela bolsa concedida a Jennifer A. Canul-Polanco, ao Programa de Pesquisa Científica e Tecnológica da Universidade Autónoma de Novo Leão (PACyT-UANL) e ao Programa para a Promoção e consolidação de projetos de pesquisa e desenvolvimento tecnológico da Facultad de Ingeniería Civil (FIC-UANL). Além disso, os autores desejam expressar sua gratidão a José Alfredo Rodríguez Campos, do HOLCIM México S.A. de C.V. ; e a Filiberto Marin, da EUCOMEX S.A. de C.V., por fornecer o cimento Portland e as misturas químicas, respectivamente.

6. REFERÊNCIAS

- 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>.