

## Evaluación de los efectos del nanosílice en hormigones sometidos a la acción de iones cloruros

T. Zanon<sup>1</sup> , R. Schmalz<sup>1\*</sup> , F. G. S. Ferreira<sup>1</sup> 

\*Autor de Contacto: [rosanaschmalz@gmail.com](mailto:rosanaschmalz@gmail.com)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.274>

Recepción: 20/10/2017 | Aceptación: 20/03/2018 | Publicación: 30/04/2018

### RESUMEN

El presente trabajo estudió la influencia de la nanosílice dispersa en superplastificante, y su efecto combinado con la sílice activa, en diferentes propiedades de los hormigones. Fueron realizados ensayos de resistencia a la compresión, resistencia a la tracción por compresión diametral y absorción de agua por capilaridad, además de ensayos acelerados de durabilidad frente a los iones de cloruro. Los resultados indicaron que la adición de nanosílice (0.1 a 0.5%) no mejoró los hormigones en ninguno de los ensayos realizados. Por otro lado, para los contenidos de 0.5 y 0.7% de nanosílice combinados con 10% de sílice activa, hubo un aumento en la resistencia a la compresión, reducción de la absorción capilar y reducción de la penetración de cloruros.

**Palabras clave:** concreto; iones cloruros; nanopartículas; nanosílice.

**Citar como:** T. Zanon, R. Schmalz, F. G. S. Ferreira (2018), "Evaluación de los efectos del nanosílice en hormigones sometidos a la acción de iones cloruros", Revista ALCONPAT, 8 (2), pp. 138 - 149, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.274>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Sao Carlos, Sao Carlos-SP, Brasil.

### 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](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://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 2019 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2018.

## Evaluation of nanosilica effects on concrete submitted to chloride ions attack

### ABSTRACT

The present paper studied the influence of nanosilica dispersed on superplasticizer, and its combined effect with silica fume, on different concrete properties. Compressive strength, tensile strength by diametrical compression and water absorption by capillarity tests, as well as accelerated durability tests against chloride ions were carried out. The results indicated that the isolated nanosilica addition (0.1 to 0.5%) did not improve the concretes in any of the tests performed. However, for the contents of 0.5 and 0.7% of nanosilica combined with 10% of silica fume, there was an increase in compressive strength, reduction of capillary absorption and reduction of the chlorides penetration.

**Keywords:** concrete; chloride ions; nanoparticles; nanosilica.

### Avaliação dos efeitos da nanosílica em concretos submetidos à ação de íons cloreto

### RESUMO

O presente trabalho estudou a influência da nanosílica dispersa em superplastificante, além do seu efeito combinado com a sílica ativa, em diferentes propriedades dos concretos. Foram realizados ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e absorção de água por capilaridade, além de ensaios acelerados de durabilidade frente aos íons cloreto. Os resultados obtidos indicaram que a adição de nanosílica de forma isolada (0,1 a 0,5%) não conferiu melhorias aos concretos, em nenhum dos ensaios realizados. No entanto, para os teores de 0,5 e 0,7% de nanosílica em conjunto com 10% de sílica ativa, houve aumento de resistência à compressão, redução da absorção capilar e redução da frente de penetração de cloretos.

**Palavras-chave:** concreto; íons cloreto; nanopartículas; nanosílica.

## 1. INTRODUCCIÓN

Motivado al aumento de los casos de deterioro de las estructuras de concreto armado, el estudio de la durabilidad de los materiales cementíceos se volvió el foco de diversas investigaciones en los últimos años.

El consenso de la literatura es que el uso de adiciones minerales trae innumerables beneficios al concreto, entre ellos la mejor resistencia a la fisuración térmica debido al bajo calor de hidratación, aumento de la resistencia final y reducción de la permeabilidad, debido al refinamiento de los poros y fortalecimiento de la zona de transición (Mehta; Monteiro, 2014).

La sílice activa es una de las principales adiciones minerales presentes en el mercado y, además de ser una super puzolana, es también considerada un filler, por presentar partículas más finas que el cemento, con diámetro promedio entre 0,1 y 0,2  $\mu\text{m}$  (Dal Molin, 2011).

En la era de la nanotecnología, nanopartículas de sílice han sido incorporadas a los materiales cementíceos. Li *et al.* (2017a) explican que, por presentar granulometría inferior la sílice activa, la nanosílice tiene mayor superficie específica, lo que potencia su efecto puzolánico. Los autores citan que, si son usadas en conjunto, los efectos sinérgicos de las adiciones pueden volverlas aún más eficaces en el rellenado de los vacíos existentes en la matriz cementícea y en la densificación de la microestructura. La sílice activa ya se consagró como una adición mineral eficaz en la mejoría de diversas propiedades de los materiales cementíceos. No obstante, la nanosílice aún es objeto de investigaciones recientes que buscan estudiar sus efectos, tanto de forma aislada como en conjunto con la sílice activa, en las propiedades del concreto en estado fresco y en estado endurecido, además

de los parámetros de durabilidad frente a diferentes agentes agresivos (Berra *et al.*, 2012; Lim; Mondal, 2015; Ganesh *et al.*, 2016; Ghafoori; Batilov; Najimi, 2016; Joshaghani; Moeini, 2017; Li *et al.*, 2017a; Li *et al.*, 2017b).

Entre los diferentes agentes agresivos presentes en el medio ambiente se tienen los iones cloruros y su capacidad de desencadenar la corrosión de las armaduras aun cuando la solución contenida en los poros del concreto tiene pH elevado. Además de eso, posterior a su reacción con el acero, de los iones cloruro no son fijados y quedan disponibles para dar continuidad a la reacción (Silva, 2006). Esas particularidades hacen del ataque por cloruros uno de los principales mecanismos de degradación de las estructuras de concreto.

Ante ello éste trabajo tiene como objetivo evaluar la influencia de la adición del nanosílice disperso en aditivo superplastificante, así como su uso combinado con la sílice activa, en propiedades mecánicas y físicas y la durabilidad de hormigones sometidos al ataque de cloruros.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 2.1. Caracterización de los materiales

Para esta pesquisa, fueron utilizados los siguientes materiales: cemento Portland, agregado fino, agregado grueso, nanosílice, sílice activa y aditivo superplastificante.

Se uso un cemento de alta resistencia inicial (CPV ARI). Los resultados de la caracterización física y química son presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades químicas e físicas do CPV ARI.

Propiedades químicas	Resultados (%)	Propiedades físicas	Resultados	
SiO <sub>2</sub>	19,17	Masa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,12	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,03	Inicio de pega (min)	135	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,21	Final de pega (min)	210	
CaO	63,97	Pasta de consistencia normal	31,5	
MgO	0,61	Finura	Retenido #200 (%)	0,1
Na <sub>2</sub> O	0,06		Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	473
K <sub>2</sub> O	0,61	Resistencia a compresión (MPa)	1 día	27,5
SO <sub>3</sub>	2,84		3 días	42,0
Residuo insoluble	0,85		7 días	48,7
Pérdida al fuego	3,79		28 días	52,2

La caracterización física de los agregados fino y grueso están presentados en la Tabla 2 y las curvas de distribución granulométrica, obtenidas con base en la NBR NM 248 (ABNT, 2003), están presentadas en las Figura 1 y Figura 2, respectivamente.

Tabla 2. Resultados de la caracterización física de los agregados fino y grueso.

Parámetros	Metodología	Agregado Fino	Agregado Grueso
Masa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 52 NBR NM 53	2,64	2,77
Masa unitaria seca e suelta (kg/m <sup>3</sup> )	NBR NM 45	1505	1422
Masa unitaria compactada (kg/m <sup>3</sup> )	NBR NM 45	1704	1568
Absorción de agua (%)	NBR NM 30 NBR NM 53	0,34	2,26
Material pulverulento (%)	NBR NM 46	1,33	1,00

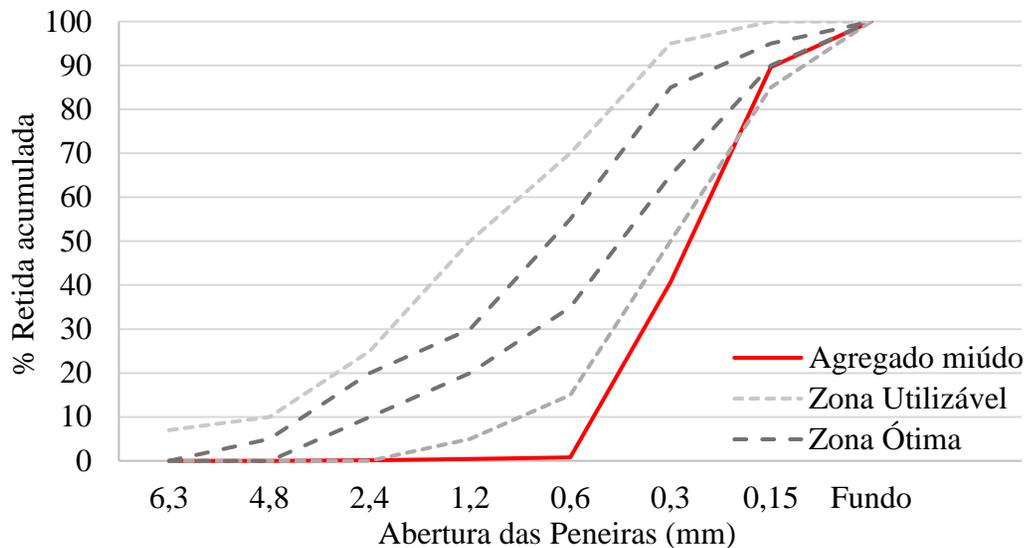


Figura 1. Curva de distribución granulométrica del agregado fino.

El agregado fino presentó módulo de finura igual a 1,33 y dimensión máxima característica igual a 0,6 mm. A pesar de que el agregado fino presenta curva granulométrica fuera de la zona permitida por la NBR 7211 (ABNT, 2009), la propia norma permite su uso, desde que estudios previos de dosis comprueben su aplicabilidad. Siendo así, y por tratarse de un material comercializado en la región de desarrollo del estudio, su uso fue mantenido.

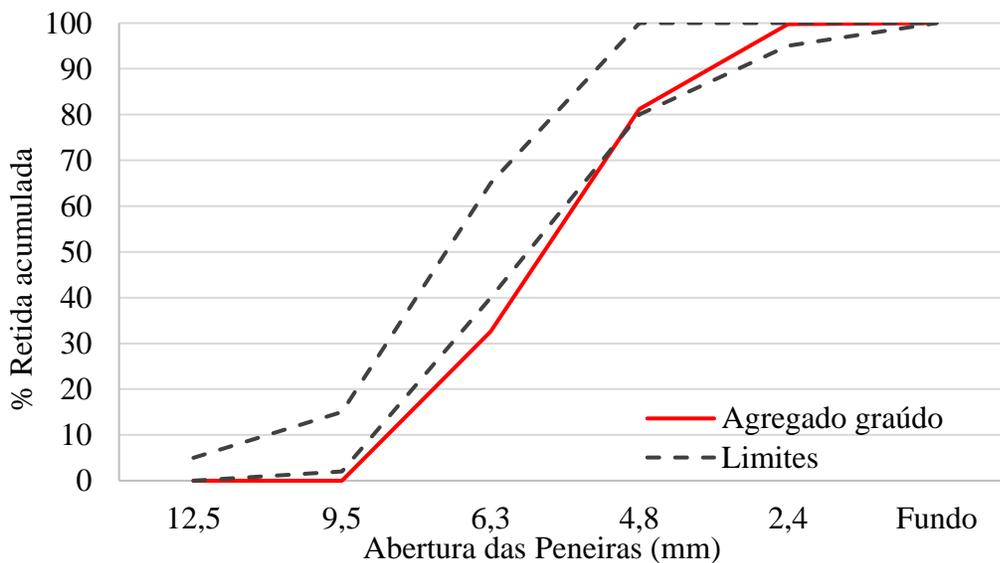


Figura 2. Curva de distribución granulométrica del agregado grueso.

Se usó un nanosílice disperso en un aditivo líquido superplastificante a base de policarboxilato, cuya dosis recomendado pelo fabricante varía entre 0,5 y 3,0% en relación con la masa de aglomerante. Sus características están presentadas en la Tabla 3. En la Tabla 4 están las características físicas y químicas de la sílice activa.

Tabla 3. Resultados de caracterización da nanosíllice.

Producto	Nanosíllice
Aspecto	Líquido homogéneo color carne
Masa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,06
Dosis de sólidos (%)	31,5
pH	2,6
Cloruros solubles en agua (%)	≤ 0,15

Fuente: Silicon Industria y Comercio de Productos Químicos LTDA.

Tabla 4. Resultados de caracterización física y química de la sílice activa.

Parámetros físicos		Parámetros químicos	
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2,10	Equivalente alcalino, en Na <sub>2</sub> O (%)	0,7
		perdida al fuego (%)	3,7
Superficie específica (m <sup>2</sup> /kg)	20.000	SiO <sub>2</sub> (%)	93,0
		Na <sub>2</sub> O (%)	0,2
Humedad (%)	0,1	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,5
		CaO (%)	0,5
Retido 45 mm (# 325) (%)	3,7	MgO (%)	0,4
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,2
		K <sub>2</sub> O	0,9

Fuente: Dow Corning Silicio de Brasil.

En el concreto de referencia, sin incorporación de sílice y nanosíllice, fue utilizado un aditivo superplastificante a base de éter policarboxílico, MasterGlenium® Sky 150, cuyas especificaciones están presentadas en la Tabla 5.

Tabla 5. Caracterización del aditivo superplastificante MasterGlenium® Sky 150.

Producto	MasterGlenium® Sky 150
Aspecto	Líquido blanco turbio
Masa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,055 – 1,085
pH	7,5 – 9,5
Dosis de sólidos (%)	28,0 – 31,0

Fuente: BASF S.A.

## 2.2. Definición de los trazos

El estudio de la influencia del nanosíllice fue realizado en hormigones de dosis 1:1,6:1,6 (cemento: agregado fino: agregado grueso) y relación agua/aglomerante (a/agl) igual a 0,4.

Como ya fue citado, el nanosíllice usado en este trabajo está disperso en aditivo superplastificante, lo que limitó las dosis a ser utilizados. La consistencia de los hormigones, obtenidas conforme la NBR 13276 (ABNT, 2016), aumentaban con el aumento de la dosis de nanosíllice utilizado. De esa forma, no fue posible seguir las recomendaciones del fabricante en cuanto a las dosis límites de uso de material (0,5 a 3,0%). La dosis de aditivo superplastificante utilizado en el concreto de referencia también fue definida con base a la consistencia de la mezcla.

Siendo así, fueron analizados dosis de nanosíllice entre 0,1 y 0,7%, usada tanto de forma aislada como combinada con sílice activa, siendo esta adicionada al concreto como sustitución parcial del cemento (10% en volumen).

Los hormigones fueron identificados por una nomenclatura de tipo C-N-S, donde N y S representan las dosis de nanosíllice y sílice activa utilizados, respectivamente. Ya el concreto de referencia es

identificado como REF. Las composiciones de los hormigones y las respectivas consistencias están presentadas en la Tabla 6.

Tabla 6. Composición de las dosis en el concreto.

Hormigones	Cantidad de materiales (kg/m <sup>3</sup> )							Consistencia (cm)
	Cemento	SA	AM	AG	NS	SP	Agua	
C-0,1-0	524,90	-	839,84	839,84	0,52	-	209,96	180
C-0,3-0	524,38	-	839,00	839,00	1,57	-	209,75	240
C-0,5-0	523,86	-	838,18	838,18	2,62	-	209,54	285
C-0,5-10	474,76	35,51	844,03	844,03	2,55	-	204,11	220
C-0,7-10	474,31	35,47	843,21	843,21	3,57	-	203,91	250
REF	524,39	-	839,02	839,02	-	1,57	209,75	240

Leyenda: SA = sílice activa; AM = agregado fino; AG = agregado grueso; NS = nanosílice; SP = aditivo superplastificante.

El tiempo total de mezcla de los materiales fue de 7 minutos, siendo la mezcla realizada en hormigonera, en el siguiente orden de colocación de los materiales: arena, 90% del agua, cemento, aditivo, 10% del agua y piedra. En los hormigones con sílice activa, el material fue adicionado a la mezcla junto al cemento.

Posterior a la mezcla, fueron vaciados probetas cilíndricas de 50 mm de diámetro y 100 mm de altura. Posterior 24 h, las probetas fueron desencofradas y llevados a cámara húmeda, donde permanecerán hasta la data de ensayo.

### 2.3. Propiedades evaluadas

La influencia del nanosílice y la sílice activa fue evaluada en las propiedades mecánicas y físicas de los hormigones, por medio de ensayos de resistencia mecánica y de absorción de agua por capilaridad, y la durabilidad de estos frente a la acción de los iones cloruros.

#### 2.3.1. Resistencia mecánica

La resistencia mecánica fue evaluada por medio de la realización de ensayos de resistencia a compresión axial a la edad de 1, 7 y 28 días (ABNT NBR 5739, 2007) y de resistencia a tracción por compresión diametral a la edad de 28 días (ABNT NBR 7222, 2011).

#### 2.3.2. Absorción de agua por capilaridad

El ensayo de absorción de agua por capilaridad fue realizado con base en la NBR 9779 (ABNT, 2012).

Posterior a los 28 días de curado, los hormigones fueron llevados a estufa a  $105 \pm 5$  °C hasta alcanzar constancia de masa y entonces se determinó la masa seca a  $23 \pm 2$  °C. Las probetas fueron posicionadas en una lámina de agua, sobre soportes metálicos, de modo de permitir el contacto del agua con la base de la probeta y evitando el contacto con otras superficies. El ensayo tuvo duración de 72 horas y las masas de las probetas fueron verificadas posterior 3h, 6h, 24h, 48h y 72h posterior al inicio del ensayo. Posterior a la última pesada, las probetas fueron ensayadas para visualización de la ascensión capilar máxima alcanzada por el agua.

#### 2.3.3. Determinación del frente de penetración de cloruros

El frente de penetración de los iones cloruros fue determinada por medio de ciclos de secados y humectación en solución de cloruro de sodio (NaCl).

Posterior a completar 28 días de curado, los hormigones fueron dejados en ambiente de laboratorio para ser secados por 4 días y entonces sumergirlos hasta la mitad de su altura en la solución de

NaCl (3,5%) por 3 días. Finalizados los 3 días, las probetas fueron removidas de la solución y se inició nuevamente el ciclo, los cuales fueron repetidos durante 16 semanas.

Posterior 8 y 16 semanas, las probetas fueron separadas y con solución de nitrato de plata (0,1 M) fue rociada en la superficie fracturada. En presencia de cloruros libres el nitrato de plata reacciona y resulta en cloruros de plata (tonalidad clara), y en ausencia, genera óxido de plata (tonalidad oscura). Las coloraciones contrastantes permiten la verificación de la profundidad de penetración de los iones cloruros al concreto.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Resistencia mecánica

Los valores promedios de los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a compresión a edades de 1, 7 y 28 días y de resistencia a tracción por compresión diametral, a los 28 días, están presentados en las Figura 3 y Figura 4, respectivamente.

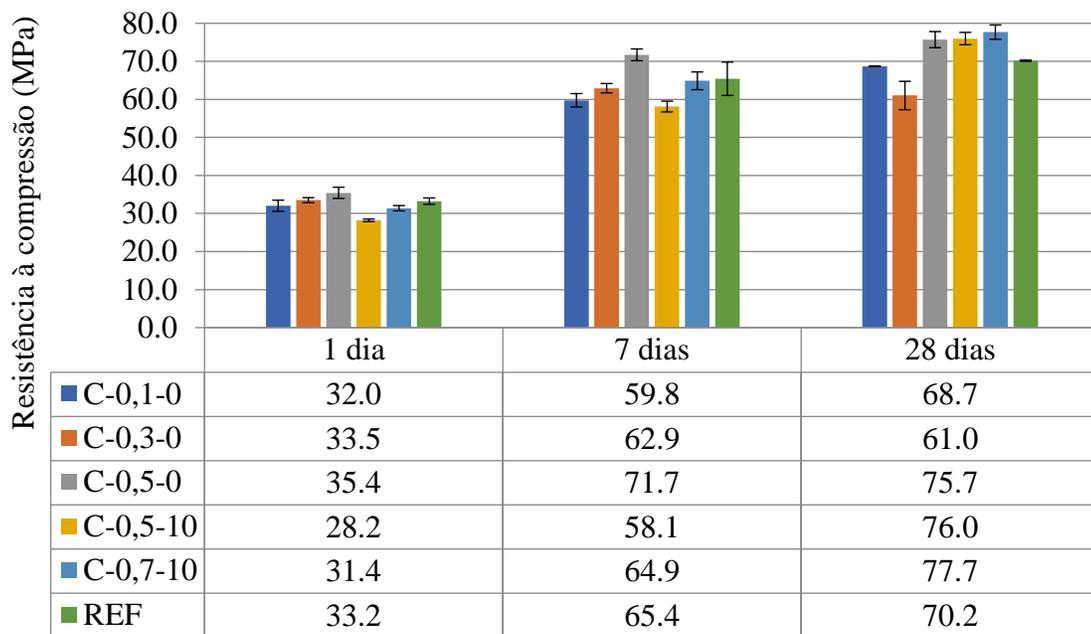


Figura 3. Resistencia a compresión a lo largo del tiempo.

Los resultados indicaron que al adicionar 0,5% de nanosílice de forma aislada a los hormigones (C-0,5-0) hubo un aumento de 9,6 y 7,1% en la resistencia a compresión al compararlos a los hormigones de referencia (REF), a los 7 y 28 días, respectivamente.

Al combinar la nanosílice con la sílice activa, se nota que en edades tempranas el concreto de referencia alcanzó mayor resistencia a compresión. Entre tanto, a los 28 días los hormigones C-0,5-10 e C-0,7-10 llegaron a 76,0 y 77,7 MPa, respectivamente, en cuanto al REF alcanzó 70,2 MPa. La mayor ganancia de resistencia a los 28 días, inclusive a los 90 días, también fue observado por otros investigadores (Senff *et al.*, 2010; Joshagani; Moeini, 2017).

No fueron observadas evidencias de un efecto sinérgico entre las adiciones, una vez que, al adicionar sílice activa a la mezcla, para una misma dosis de nanosílice (C-0,5-0 e C-0,5-10) no hubo ganancias de resistencia a compresión.

Ese comportamiento difiere de lo observado por Li *et al.* (2017a), que constataron que la adición de 2% de nanosílice en polvo provocó un aumento de 17% a la resistencia a compresión a los 28 días, mientras que para 10% de sílice activa ese aumento fue de 11%. Al combinar las dos

adiciones, 2% de nanosílice+10% de sílice activa, el aumento fue de 48%, quedando clara la existencia de un efecto sinérgico entre las adiciones.

En cuanto a la resistencia a tracción por compresión diametral (Figura 4), los resultados indicaron que el uso de las adiciones no provocó mejoras significativas, principalmente al considerar los desvíos patrón de cada muestra. Diferentemente de lo que concluyeron Ganesh *et al.* (2016), que observaron ganancias de 17% e 24% en la resistencia a tracción de hormigones a los 28 días, al incorporar 1% y 2% de solución de nanopartículas de sílice, respectivamente.

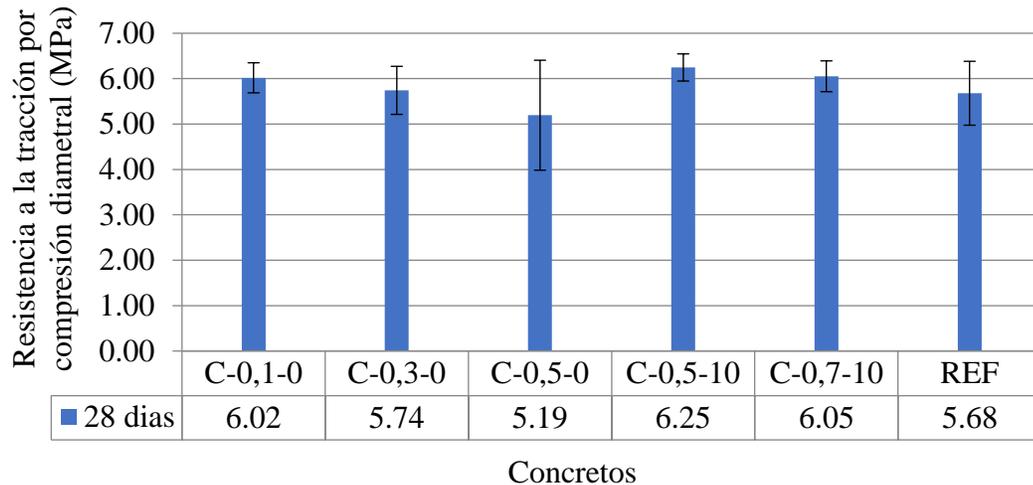


Figura 4. Resistencia a tracción por compresión diametral de los hormigones a los 28 días.

Vale resaltar que el hecho de que la nanosílice utilizada en este trabajo esté dispersa en superplastificante, dificulta el estudio de su incorporación en dosis más elevadas, inclusive las propias dosis recomendadas por el fabricante. Además de eso, no se sabe la real dosis de sílice presente en el material, imposibilitando la determinación de su porcentual en relación con el aglomerante.

### 3.2 Absorción de agua por capilaridad

Los resultados obtenidos del ensayo de absorción de agua por capilaridad permitieron graficar las curvas del capilar *versus* raíz de tiempo para cada uno de los hormigones estudiados, a lo largo de las 72 horas (Figura 5).

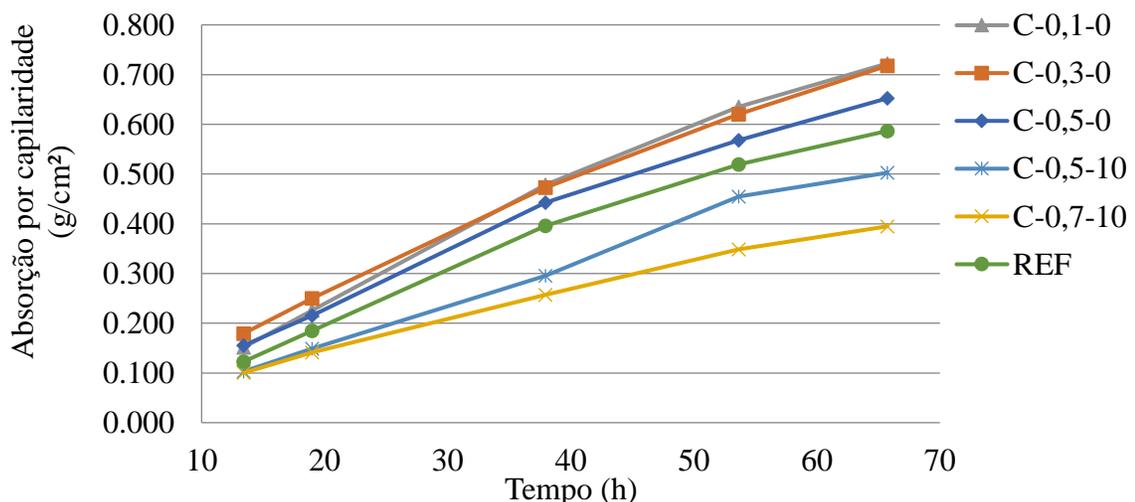


Figura 5. Absorción de agua por capilaridad de los hormigones a los 28 días.

Se observa que el uso aislado de nanosílice, en las dosis analizadas, no confirió mejoras en la absorción de agua por capilaridad de los hormigones, una vez que todos los trazos presentaron índice de absorción superiores (entre 0,652 y 0,722 g/cm<sup>2</sup>) con respecto al patrón (0,587 g/cm<sup>2</sup>). Entre tanto, al adicionar sílice activa y elevar la dosis de nanosílice para 0,7% (C-0,7-10) fue posible reducir ese índice para 0,395 g/cm<sup>2</sup>.

Esos resultados indican que la sílice activa, con sus efectos filler y puzolánicos, fue capaz de refinar la microestructura de la matriz cementícea. Por otro lado, la nanosílice dispersa en superplastificante no posee los efectos físicos y químicos esperados.

Otros investigadores estudiaron los efectos de nanosílice en propiedades físicas de materiales cementíceos y tuvieron resultados positivos, con reducción de la sorción, la absorción y el índice de vacíos (Li *et al.*, 2017b; Ganesh *et al.*, Joshaghani; Moeini, 2017).

Vale resaltar que, en los estudios citados, la nanosílice estaba en forma de polvo o solución. Ante esto, se cree que la dilución del nanosílice en aditivo superplastificante perjudicó la obtención de resultados positivos en este presente trabajo.

La Figura 6 están destacadas las alturas capilares máximas observadas en probetas de concreto posterior a las 72 horas de ensayo. Se observa que los hormigones que tuvieron menor índice de absorción capilar (C-0,5-10 y C-0,7-10) también presentaron menor altura, corroborando la afirmación de que la sílice activa fue eficiente en el refinamiento de la microestructura de la matriz, contrario al nanosílice, cuyos hormigones presentaron ascensión superior al concreto de referencia.

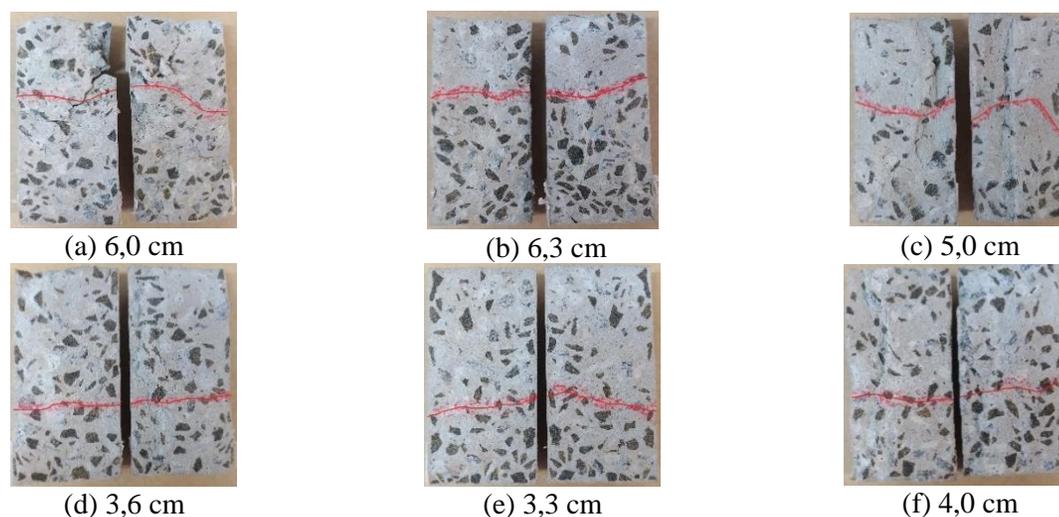


Figura 6. Probetas posteriores al ensayo de absorción de agua por capilaridad:  
a) C-0,1-0; b) C-0,3-0; c) C-0,5-0; d) C-0,5-10; e) C-0,7-10 e f) REF.

Además del efecto filler de la sílice activa, responsable por el llenado de los vacíos entre los granos de cemento y los agregados, el efecto puzolánico también ayuda en la obtención de una microestructura más densa debido a la formación de C-S-H adicional.

### 3.3 Determinación da frente de penetración de cloruros

El frente de penetración de cloruros en hormigones fue determinada posterior 8 y 16 ciclos semanales de secados y humectación en solución de NaCl. Los resultados están presentados en la Tabla 7. Frente de penetración dos iones cloruros y las probetas sometidas al test colorimétrico de nitrato de plata y están ilustrados en las Figura 7 Figura 8.

Tabla 7. Frente de penetración dos iones cloruros

Frente de penetración (mm)		
Concreto	Posterior 8 semanas	Posterior 16 semanas
C-0,1-0	9,4	11,7
C-0,3-0	7,6	11,4
C-0,5-0	8,6	12,3
C-0,5-10	5,4	6,4
C-0,7-10	5,6	5,1
REF	8,3	8,0

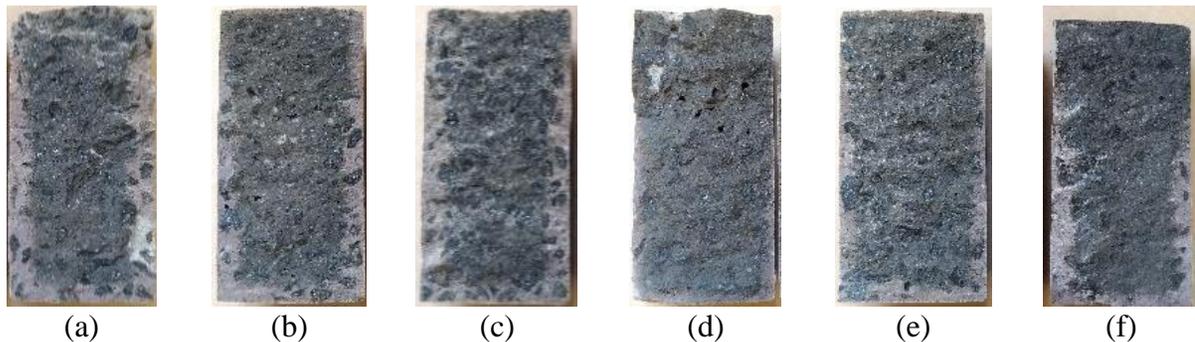


Figura 7. Probetas posteriores al ensayo colorimétrico - 8 semanas: a) C-0,1-0; b) C-0,3-0; c) C-0,5-0; d) C-0,5-10; e) C-0,7-10; f) REF.

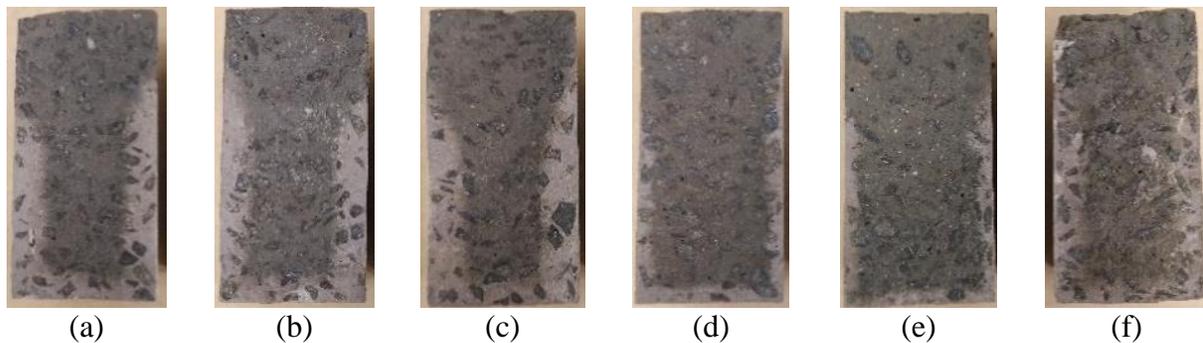


Figura 8. Probetas posteriores al ensayo colorimétrico - 16 semanas: a) C-0,1-0; b) C-0,3-0; c) C-0,5-0; d) C-0,5-10; e) C-0,7-10; f) REF.

De manera general, la presencia de nanosílice no impidió la penetración de cloruros en los hormigones. Posterior a 8 semanas, los frentes de penetración de los hormigones C-0,1-0, C-0,3-0 e C-0,5-0 fueron semejantes al del concreto de referencia. Luego de 16 semanas, el concreto de referencia presentó valor menor de los que contenían adiciones.

Por otro lado, los hormigones con adición conjunta de nanosílice y sílice activa presentaron reducción del frente de penetración. Los valores obtenidos posterior a 16 semanas por los hormigones C-0,5-10 y C-0,7-10 fueron 1,6 mm y 2,9 mm menores que el concreto de referencia, respectivamente. Esos resultados eran esperados, una vez que fueron los mismos trazos que tuvieron menor índice de absorción capilar, como se discutió anteriormente.

Silva (2006) realizó los mismos ensayos en hormigones de alto desempeño con incorporación de 5 y 10% de sílice activa y luego de 16 ciclos de secados y humectación, obtuvo reducción del frente de penetración de 1,9 y 2,7 mm, respectivamente, que, comparados con el concreto de referencia, que tuvo frente de penetración de 5,7 mm.

En cuanto al uso de nanosílice, aun cuando el presente trabajo no haya obtenido resultados satisfactorios, algunas investigaciones apuntan que al utilizar 3 y 6% de una solución de nanosílice coloidal en morteros fue posible reducir la migración de cloruros en 70% e 77%, respectivamente, en comparación a los trazos de referencia, para la edad de 28 días (Joshaghani; Moeini, 2017). Así como Ganesh *et al.* (2016), que también estudiaron la influencia de una solución de nanopartículas de sílice en la durabilidad de hormigones, por medio del ensayo de migración de cloruros. Los autores observaron que, a los 28 días, la adición de 2% de nanosílice aumentó la resistencia del concreto a la penetración de los iones agresivos. Los resultados positivos fueron atribuidos al efecto filler del nanosílice y su capacidad de llenar los vacíos presentes en el concreto, reduciendo en consecuencia, la penetración de cloruros.

## 4. CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos, se concluye que la adición de nanosílice dispersa en superplastificante, en dosis de 0,1 a 0,5%, no confirió mejoras a los hormigones en cuanto a las propiedades mecánicas y físicas, analizadas por medio de los ensayos de resistencia a la compresión, resistencia a la tracción por compresión diametral y absorción de agua por capilaridad. Del mismo modo la nanosílice no redujo el frente de penetración de cloruros en comparación al concreto de referencia.

Entre tanto, al ser utilizada las dosis de 0,5 y 0,7%, en conjunto con 10% de sílice activa, fueron observadas mejoras en ambas propiedades, aumentando la resistencia mecánica y reduciendo la absorción de agua por capilaridad, además de la reducción del frente de penetración de cloruros, al ser comparados al concreto de referencia.

Vale resaltar que como la nanosílice está dispersa en aditivo superplastificante, no fue posible evaluar otras dosis dentro de los límites recomendados por el fabricante. Una vez que el aumento de la dosis adicionada lleva al aumento de la consistencia, pudiendo culminar en una pérdida de cohesión y exudación de las mezclas.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Sistemas Estructurales (UFSCar); Laboratorio de Estructuras (USP) y al Instituto de Investigaciones Tecnológicas del Estado de Sao Paulo, por el apoyo en la realización de los ensayos. A Holcim de Brasil S/A., a Silicon Industria y Comercio de Productos Químicos LTDA e a Dow Corning Silicio de Brasil, por los materiales donados y al grupo de pesquisa GESEC.

## 6. REFERENCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007). *NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). *NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011). *NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). *NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). *NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência*. Rio de Janeiro.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). *NBR NM 30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). *NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003). *NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). *NBR NM 49: Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). *NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). *NBR NM 53: Agregado graúdo: Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003). *NBR NM 248: Agregados: Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Berra, M., Carassiti, F., Mangialardi, T., Paolini, A. E., Sebastiani, M. (2012): *Effects of nanosilica addition on workability and compressive strength of Portland cement pastes*. Construction and Building Materials, v. 35, p. 666-675. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.132>>
- Dal Molin, D. C. C. *Adições Minerais*. Concreto: Ciência e Tecnologia. v. 1, cap. 08, p. 261-309. São Paulo: IBRACON, 2011.
- Ganesh, P., Murthy, A. R., Kumar, S. S., Rehemam, M. M. S., Iyer, N. R. (2016): *Effect of nanosilica on durability and mechanical properties oh high-strength concrete*. Magazine of Concrete Research, v. 68, p. 229-236. <<http://dx.doi.org/10.1680/jmacr.14.00338>>
- Ghafoori, N., Batilov, I. B., Najimi, M. (2016): *Sulfate resistance of nanosilica and microsilica contained mortars*. ACI Materials Journal, v. 113, p. 459-469. <doi: [10.14359/51688989](https://doi.org/10.14359/51688989)>
- Joshaghani, A., Moeini, M. A. (2017): *Evaluating the effects of sugar cane bagasse ash (SCBA) and nanosilica on the mechanical and durability properties of mortar*. Construction and Building Materials, v. 152, p. 818-831. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.041>>
- Li, L. G., Huang, Z. H., Zhu, J., Kwan, A. K. H., Chen, H. Y. (2017a): *Synergistic effects of micro-silica and nano-silica on strength and microstructure of mortar*. Construction and Building Materials, v. 140, p. 229-238. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.115>>
- Li, L. G., Zhu, J., Huang, Z. H., Kwan, A. K. H., Li, L. J. (2017b): *Combined effects of micro-silica and nano-silica on durability of mortar*. Construction and Building Materials, v. 157, p. 337-347. <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.105>>
- Lim, S., Mondal, P. (2015): *Effects of incorporating nanosilica on carbonation of cement paste*. Journal of Materials Science, v. 50, p. 3531-3540. <DOI [10.1007/s10853-015-8910-7](https://doi.org/10.1007/s10853-015-8910-7)>
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: IBRACON, 2014.
- Senff, L., Hotza, D., Repette, W. L., Ferreira, V. M., Labrincha, J. A. (2010): *Effect of nanosilica and microsilica on microstructure and hardened properties of cement pastes and mortars*. Advances in Applied Ceramics, v. 109, n. 2. <DOI: [10.1179/174367509X12502621261659](https://doi.org/10.1179/174367509X12502621261659)>
- Silva, F. G. (2006): *Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos*. Tese (Doutorado) – Interunidades (IFSC – IQSC – EESC), Universidade de São Paulo, São Carlos.