




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

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

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

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

Recepção: 20/10/2017 | Aceitação: 20/03/2018 | Publicação: 30/04/2018

### 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.

**Citar como:** T. Zanon, R. Schmalz, F. G. S. Ferreira (2018), "Avaliação dos efeitos da nanosílica em concretos submetidos à ação de íons cloreto", 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 São Carlos, São Carlos-SP, Brasil.

### 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](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://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 2019, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 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.

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

### 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:** hormigón; iones de cloruro; nanopartículas; nanosílice.

## 1. INTRODUÇÃO

Motivado pelo aumento dos casos de deterioração das estruturas de concreto armado, o estudo da durabilidade dos materiais cimentícios tornou-se foco de diversas pesquisas nos últimos anos.

É consenso na literatura, que o uso de adições minerais traz inúmeros benefícios ao concreto, entre eles a melhor resistência à fissuração térmica devido ao baixo calor de hidratação, aumento da resistência final e redução da permeabilidade, devido ao refinamento dos poros e fortalecimento da zona de transição (Mehta; Monteiro, 2014).

A sílica ativa é uma das principais adições minerais presentes no mercado e, além de ser uma superpozolana, é também considerada um filer, por apresentar partículas mais finas que o cimento, com diâmetro médio entre 0,1 e 0,2  $\mu\text{m}$  (Dal Molin, 2011).

Na era da nanotecnologia, nanopartículas de sílica têm sido incorporadas aos materiais cimentícios. Li *et al.* (2017a) explicam que, por apresentar granulometria inferior à sílica ativa, a nanosílica tem uma maior superfície específica, o que potencializa seu efeito pozolânico. Os autores ainda citam que, se usadas em conjunto, os efeitos sinérgicos das adições podem torná-las ainda mais eficazes no preenchimento dos vazios existentes na matriz cimentícia e na densificação da microestrutura.

A sílica ativa já se consagrou como uma adição mineral eficaz na melhoria de diversas propriedades dos materiais cimentícios. No entanto, a nanosílica ainda tem sido objeto de pesquisas recentes que buscam estudar seus efeitos, tanto de forma isolada quanto em conjunto com a sílica ativa, nas propriedades do concreto no estado fresco e no estado endurecido, além dos parâmetros de durabilidade frente a diferentes agentes agressivos (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 os diferentes agentes agressivos presentes no meio ambiente tem-se os íons cloreto e sua capacidade de desencadear a corrosão das armaduras mesmo quando a solução contida nos poros do concreto tem pH elevado. Além disso, após sua reação com aço, os íons cloro não são fixados e ficam disponíveis para dar continuidade à reação (Silva, 2006). Essas particularidades fazem do ataque por cloretos um dos principais mecanismos de degradação das estruturas de concreto.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência da adição de uma nanosílica dispersa em aditivo superplastificante, bem como seu uso combinado com a sílica ativa, nas propriedades mecânicas e físicas e na durabilidade de concretos submetidos ao ataque de cloretos.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1. Caracterização dos materiais

Para esta pesquisa, foram utilizados os seguintes materiais: cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo, nanosílica, sílica ativa e aditivo superplastificante.

Utilizou-se um cimento de alta resistência inicial (CPV ARI). Os resultados da caracterização física e química são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades químicas e físicas do CPV ARI.

| Propriedades químicas          | Resultados (%) | Propriedades físicas                  | Resultados                  |      |
|--------------------------------|----------------|---------------------------------------|-----------------------------|------|
| SiO <sub>2</sub>               | 19,17          | Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) | 3,12                        |      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5,03           | Início de pega (min)                  | 135                         |      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,21           | Fim de pega (min)                     | 210                         |      |
| CaO                            | 63,97          | Pasta de consistência normal          | 31,5                        |      |
| MgO                            | 0,61           | Finura                                | Retido #200 (%)             | 0,1  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,06           |                                       | Blaine (m <sup>2</sup> /kg) | 473  |
| K <sub>2</sub> O               | 0,61           | Resistência à compressão (MPa)        | 1 dia                       | 27,5 |
| SO <sub>3</sub>                | 2,84           |                                       | 3 dias                      | 42,0 |
| Resíduo insolúvel              | 0,85           |                                       | 7 dias                      | 48,7 |
| Perda ao fofo                  | 3,79           |                                       | 28 dias                     | 52,2 |

A caracterização física dos agregados miúdo e graúdo estão apresentados na Tabela 2 e as curvas de distribuição granulométrica, obtidas com base na NBR NM 248 (ABNT, 2003), estão apresentadas nas Figura 1 e Figura 2, respectivamente.

Tabela 2. Resultados de caracterização física dos agregados miúdo e graúdo.

| Parâmetros                                       | Metodologia            | Agregado Miúdo | Agregado Graúdo |
|--|------------------------|----------------|-----------------|
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )            | NBR NM 52<br>NBR NM 53 | 2,64           | 2,77            |
| Massa unitária seca e solta (kg/m <sup>3</sup> ) | NBR NM 45              | 1505           | 1422            |
| Massa unitária compactada (kg/m <sup>3</sup> )   | NBR NM 45              | 1704           | 1568            |
| Absorção de água (%)                             | NBR NM 30<br>NBR NM 53 | 0,34           | 2,26            |
| Material pulverulento (%)                        | NBR NM 46              | 1,33           | 1,00            |

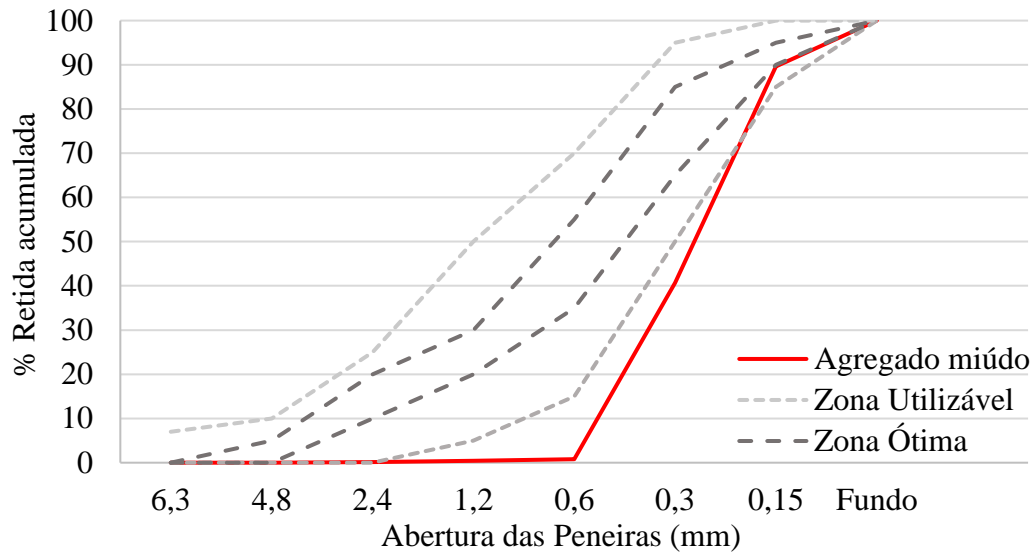


Figura 1. Curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo.

O agregado miúdo apresentou módulo de finura igual a 1,33 e dimensão máxima característica igual a 0,6 mm. Apesar de o agregado miúdo apresentar curva granulométrica fora da zona utilizável estabelecida pela NBR 7211 (ABNT, 2009), a própria norma permite sua utilização, desde que estudos prévios de dosagem comprovem sua aplicabilidade. Sendo assim, e por se tratar de um material comercializado na região de desenvolvimento do estudo, seu uso foi mantido.

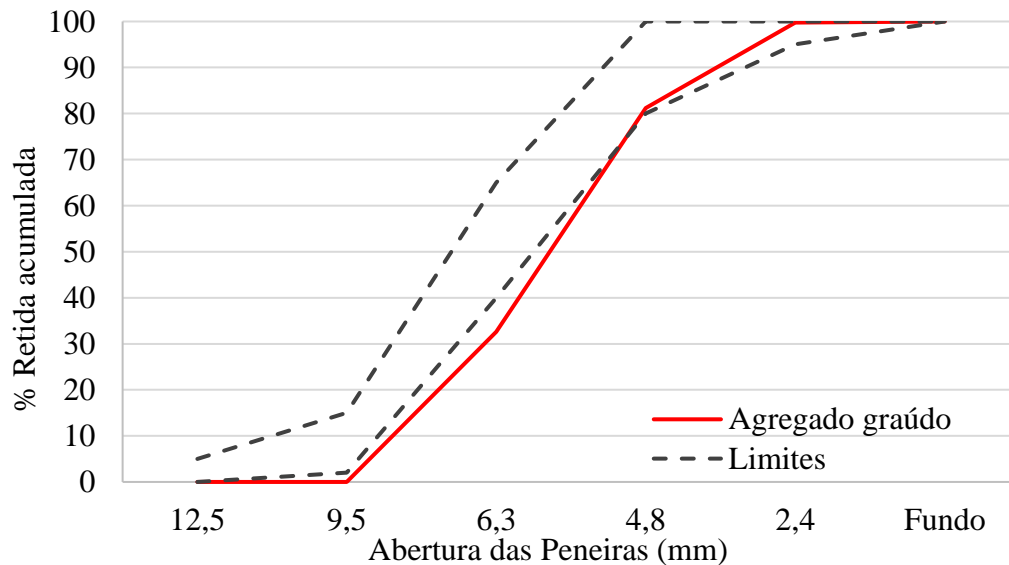


Figura 2. Curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo.

Utilizou-se uma nanosílica dispersa em um aditivo líquido superplastificante à base de policarboxilato, cujo teor recomendado pelo fabricante varia entre 0,5 e 3,0% em relação à massa de aglomerante. Suas características estão apresentadas na Tabela 3. Na Tabela 4 estão as características físicas e químicas da sílica ativa.

Tabela 3. Resultados de caracterização da nanosílica.

| Produto                               | Nanosílica                 |
|---------------------------------------|----------------------------|
| Aspecto                               | Líquido homogêneo cor pele |
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,06                       |
| Teor de sólidos (%)                   | 31,5                       |
| pH                                    | 2,6                        |
| Cloretos solúveis em água (%)         | ≤ 0,15                     |

Fonte: Silicon Indústria e Comércio de Produtos Químicos LTDA.

Tabela 4. Resultados de caracterização física e química da sílica ativa.

| Parâmetros físicos                         |        | Parâmetros químicos                            |      |
|--|--------|--|------|
| Densidade (g/cm <sup>3</sup> )             | 2,10   | Equivalente alcalino, em Na <sub>2</sub> O (%) | 0,7  |
|  |        | Perda ao fogo (%)                              | 3,7  |
| Superfície específica (m <sup>2</sup> /kg) | 20.000 | SiO <sub>2</sub> (%)                           | 93,0 |
|  |        | Na <sub>2</sub> O (%)                          | 0,2  |
| Umidade (%)                                | 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  |

Fonte: Dow Corning Silício do Brasil.

No concreto de referência, sem incorporação de sílica e nanosílica, foi utilizado um aditivo superplastificante à base de éter policarboxílico, MasterGlenium® Sky 150, cujas especificações estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Caracterização do aditivo superplastificante MasterGlenium® Sky 150.

| Produto                               | MasterGlenium® Sky 150 |
|---------------------------------------|------------------------|
| Aspecto                               | Líquido branco turvo   |
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,055 – 1,085          |
| pH                                    | 7,5 – 9,5              |
| Teor de sólidos (%)                   | 28,0 – 31,0            |

Fonte: BASF S.A.

## 2.2. Definição dos traços

O estudo da influência da nanosílica foi realizado em concretos de traço 1:1,6:1,6 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo) e relação água/aglomerante (a/agl) igual a 0,4.

Como já citado, a nanosílica utilizada neste trabalho está dispersa em aditivo superplastificante, o que limitou os teores a serem utilizados. As consistências dos concretos, obtidas conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016), aumentavam com o aumento do teor de nanosílica utilizado. Dessa forma, não foi possível seguir as recomendações do fabricante quanto aos teores limites de utilização do material (0,5 a 3,0%). O teor de aditivo superplastificante utilizado no concreto de referência também foi definido com base na consistência da mistura.

Sendo assim, foram analisados teores de nanosílica entre 0,1 e 0,7%, usada tanto de forma isolada quanto combinada com sílica ativa, sendo esta adicionada ao concreto como substituição parcial do cimento (10% em volume).

Os concretos foram identificados por uma nomenclatura do tipo C-N-S, onde N e S representam os teores de nanosílica e sílica ativa utilizados, respectivamente. Já o concreto de referência é

identificado como REF. As composições dos concretos e as respectivas consistências estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6. Composição dos traços de concreto.

| Concretos | Quantidade de materiais (kg/m <sup>3</sup> ) |       |        |        |      |      |        | Consistência (cm) |
|-----------|--|-------|--------|--------|------|------|--------|-------------------|
|           | Cimento                                      | SA    | AM     | AG     | NS   | SP   | Água   |                   |
| 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               |

Legenda: SA = sílica ativa; AM = agregado miúdo; AG = agregado graúdo; NS = nanosílica; SP = aditivo superplastificante.

O tempo total de mistura dos materiais foi de 7 minutos, sendo a mistura realizada em argamassadeira, de acordo a seguinte ordem de colocação dos materiais: areia, 90% da água, cimento, aditivo, 10% da água e brita. Nos concretos contendo sílica ativa, o material foi adicionado à mistura junto ao cimento.

Após a mistura, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Após 24 h, os corpos de prova foram desmoldados e levados à câmara úmida, onde permaneceram até a data de ensaio.

### 2.3. Propriedades avaliadas

A influência da nanosílica e da sílica ativa foi avaliada nas propriedades mecânicas e físicas dos concretos, por meio de ensaios de resistência mecânica e de absorção de água por capilaridade, e na durabilidade dos mesmos frente à ação dos íons cloreto.

#### 2.3.1. Resistência mecânica

A resistência mecânica foi avaliada por meio da realização de ensaios de resistência à compressão axial na idade de 1, 7 e 28 dias (ABNT NBR 5739, 2007) e de resistência à tração por compressão diametral na idade de 28 dias (ABNT NBR 7222, 2011).

#### 2.3.2. Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado com base na NBR 9779 (ABNT, 2012). Após 28 dias de cura, os concretos foram levados à estufa à  $105 \pm 5$  °C até atingirem constância de massa e então determinou-se a massa seca à  $23 \pm 2$  °C. Os corpos de prova foram posicionados em uma lâmina de água, sobre suportes metálicos, de modo a permitir o contato da água com a base do corpo de prova e evitando o contato com outras superfícies. O ensaio teve duração de 72 horas e as massas dos corpos de prova foram verificadas após 3h, 6h, 24h, 48h e 72h após o início do ensaio. Após a última pesagem, os corpos de prova foram rompidos para visualização da ascensão capilar máxima atingida pela água.

#### 2.3.3. Determinação da frente de penetração de cloretos

A frente de penetração dos íons cloreto foi determinada por meio de ciclos de secagem e molhagem em solução de cloreto de sódio (NaCl).

Após completarem 28 dias de cura, os concretos foram deixados em ambiente de laboratório para secagem por 4 dias e então imersos até a metade da altura na solução de NaCl (3,5%) por 3 dias.

Ao fim dos 3 dias, os corpos de prova foram removidos da solução e iniciou-se novamente o ciclo, os quais foram repetidos durante 16 semanas.

Após 8 e 16 semanas, os corpos de prova foram rompidos e uma solução de nitrato de prata (0,1 M) foi aspergida na superfície fraturada. Na presença de cloretos livres o nitrato de prata reage e resulta em cloreto de prata (tonalidade clara), e na ausência, gera óxido de prata (tonalidade escura). As colorações contrastantes possibilitam a verificação da profundidade de penetração dos íons cloreto no concreto.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Resistência mecânica

Os valores médios dos resultados obtidos dos ensaios de resistência à compressão nas idades de 1, 7 e 28 dias e de resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias, estão apresentados nas Figura 3 e Figura 4, respectivamente.

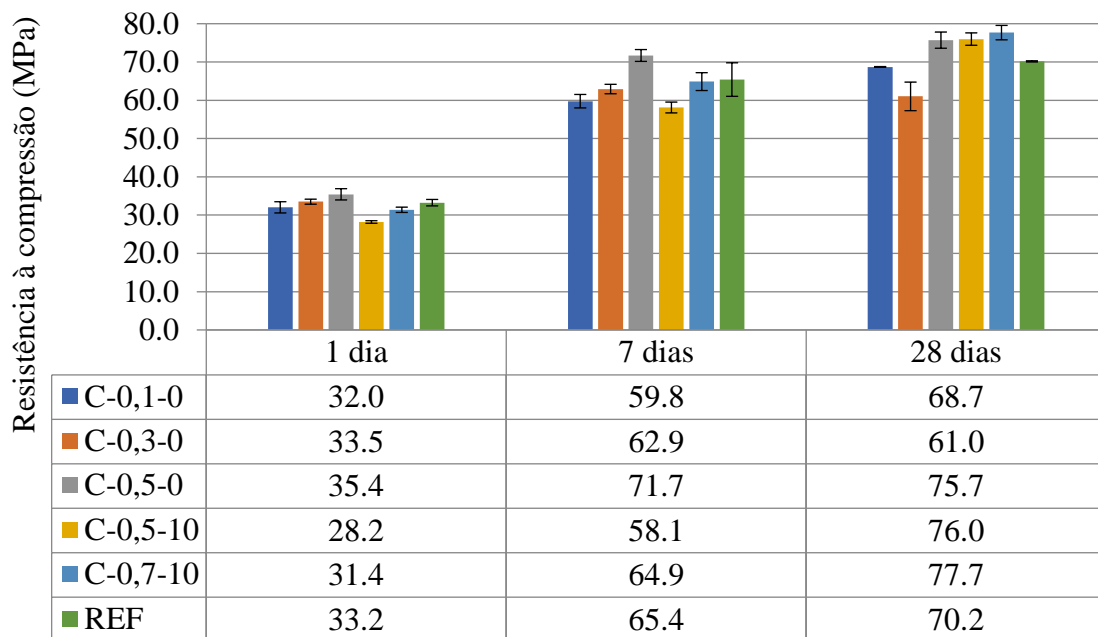


Figura 3. Resistência à compressão ao longo do tempo.

Os resultados indicaram que ao adicionar 0,5% de nanosílica de forma isolada aos concretos (C-0,5-0) houve um aumento de 9,6 e 7,1% na resistência à compressão se comparados aos concretos de referência (REF), aos 7 e 28 dias, respectivamente.

Ao combinar a nanosílica com a sílica ativa, nota-se que nas primeiras idades o concreto de referência atingiu maior resistência à compressão. Entretanto, aos 28 dias os concretos C-0,5-10 e C-0,7-10 atingiram 76,0 e 77,7 MPa, respectivamente, enquanto o REF atingiu 70,2 MPa. O maior ganho de resistência aos 28 dias, e até mesmo aos 90 dias, também foi observado por outros pesquisadores (Senff *et al.*, 2010; Joshagani; Moeini, 2017).

Não foram observadas evidências de um efeito sinérgico entre as adições, uma vez que ao adicionar sílica ativa na mistura, para um mesmo teor de nanosílica (C-0,5-0 e C-0,5-10) não houve ganhos de resistência à compressão.

Esse comportamento difere-se do observado por Li *et al.* (2017a), que constataram que a adição de 2% de nanosílica em pó provocou um aumento de 17% na resistência a compressão aos 28 dias, ao passo que para 10% de sílica ativa esse aumento foi de 11%. Ao combinar as duas adições, 2% de

nanosílica+10% de sílica ativa, o aumento foi de 48%, ficando clara a existência de um efeito sinérgico entre as adições.

Quanto à resistência à tração por compressão diametral (Figura 4), os resultados indicaram que o uso das adições não provocou melhoras significativas, principalmente ao considerar os desvios-padrão de cada amostra. Diferentemente do que concluíram Ganesh *et al.* (2016), que observaram ganhos de 17% e 24% na resistência à tração de concretos aos 28 dias, ao incorporar 1% e 2% de solução de nanopartículas de sílica, respectivamente.

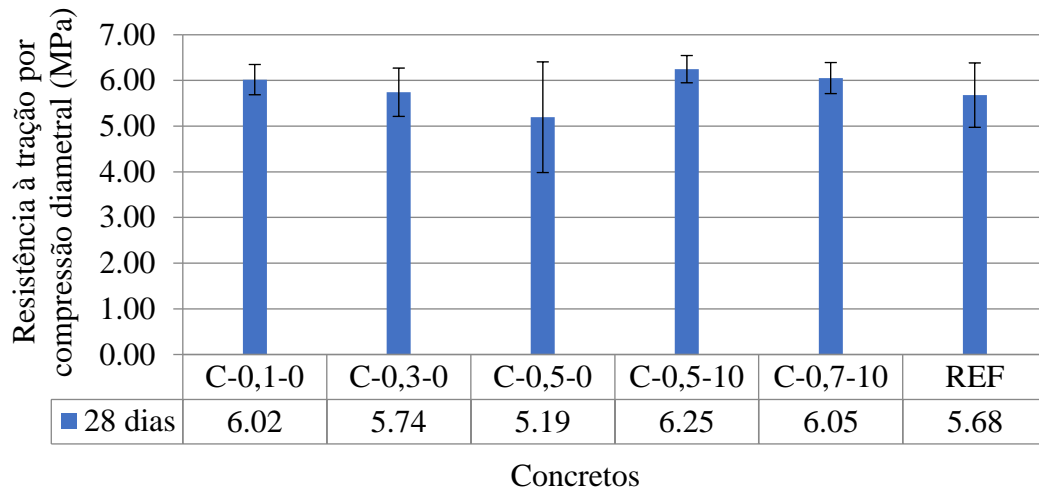


Figura 4. Resistência à tração por compressão diametral dos concretos aos 28 dias.

Vale ressaltar que o fato de a nanosílica utilizada no presente trabalho estar dispersa em superplastificante, dificulta o estudo da sua incorporação em teores mais elevados, inclusive os próprios teores recomendados pelo fabricante. Além disso, não se sabe o real teor de sílica presente no material, impossibilitando a determinação do seu percentual em relação ao aglomerante.

### 3.2 Absorção de água por capilaridade

Os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade possibilitaram a plotagem das curvas de absorção capilar *versus* raiz de tempo para cada um dos concretos estudados, ao longo das 72 horas (Figura 5).

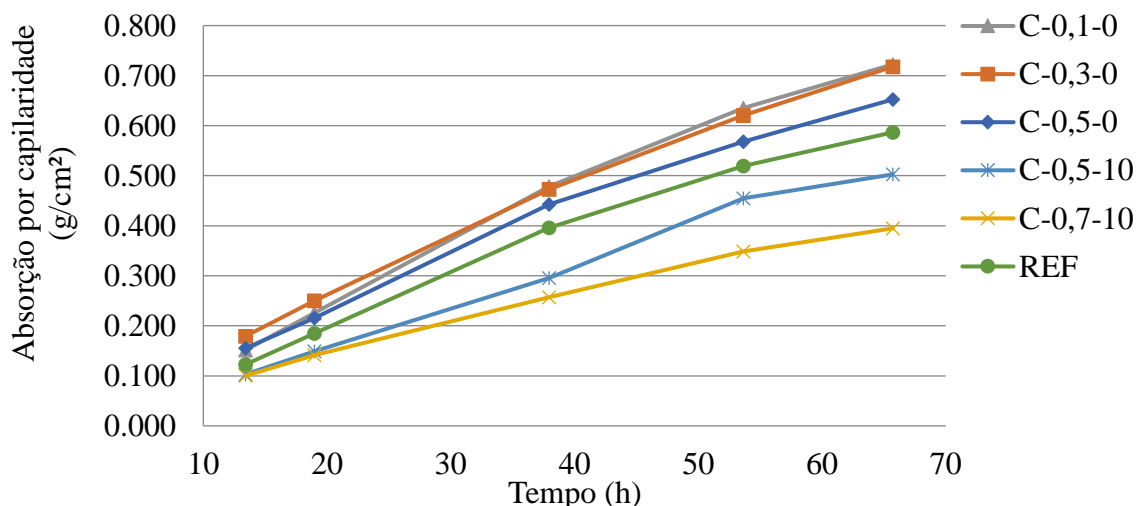


Figura 5. Absorção de água por capilaridade dos concretos aos 28 dias.



Nota-se que o uso isolado de nanosílica, nos teores analisados, não conferiu melhorias na absorção de água por capilaridade dos concretos, uma vez que todos os traços apresentaram índice de absorção superiores (entre 0,652 e 0,722 g/cm<sup>2</sup>) ao traço de referência (0,587 g/cm<sup>2</sup>). Entretanto, ao adicionar sílica ativa e elevar o teor de nanosílica para 0,7% (C-0,7-10) foi possível reduzir esse índice para 0,395 g/cm<sup>2</sup>.

Esses resultados indicam que a sílica ativa, com seus efeitos fíler e pozolânicos, foi capaz de refinar a microestrutura da matriz cimentícia. Por outro lado, a nanosílica dispersa em superplastificante não possui os efeitos físicos e químicos esperados.

Demais pesquisadores estudaram os efeitos de nanosílica nas propriedades físicas de materiais cimentícios e obtiveram resultados positivos, com redução da sortividade, da absorção e do índice de vazios (Li *et al.*, 2017b; Ganesh *et al.*, Joshaghani; Moeini, 2017).

Vale ressaltar que nos estudos citados, as nanosílicas estavam sob forma de pó ou solução. Diante disso, acredita-se que a dispersão da nanosílica em aditivo superplastificante prejudicou a obtenção de resultados positivos no presente trabalho.

Na Figura 6 estão destacadas as ascensões capilares máximas observadas nos corpos de prova de concreto após as 72 horas de ensaio. Observa-se que os concretos que tiveram menor índice de absorção capilar (C-0,5-10 e C-0,7-10) também apresentaram menor altura de ascensão, corroborando a afirmação de que a sílica ativa foi eficiente no refinamento da microestrutura da matriz, ao contrário da nanosílica, cujos concretos apresentaram ascensão superior ao concreto de referência.

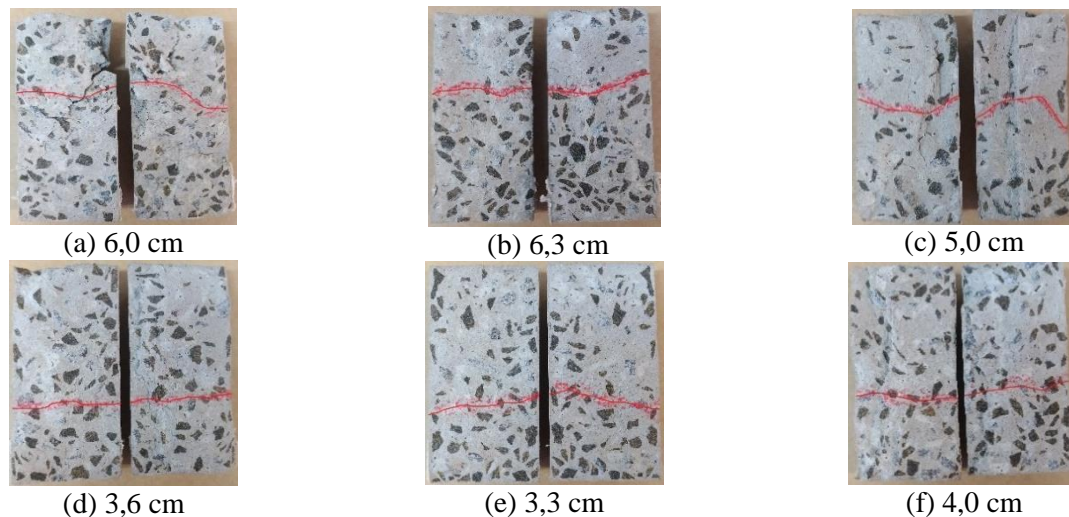


Figura 6. Corpos de prova após ensaio de absorção de água por capilaridade:  
a) C-0,1-0; b) C-0,3-0; c) C-0,5-0; d) C-0,5-10; e) C-0,7-10 e f) REF.

Além do efeito fíler da sílica ativa, responsável pelo preenchimento dos vazios entre os grãos de cimento e os agregados, o efeito pozolânico também auxilia na obtenção de uma microestrutura mais densa devido à formação de C-S-H adicional.

### 3.3 Determinação da frente de penetração de cloretos

A frente de penetração de cloretos nos concretos foi determinada após 8 e 16 ciclos semanais de secagem e molhagem em solução de NaCl. Os resultados estão apresentados na Tabela 7. Frente de penetração dos íons cloreto e os corpos de prova submetidos ao teste colorimétrico de nitrato de prata estão ilustrados nas Figura 7 e Figura 8.

Tabela 7. Frente de penetração dos íons cloreto

| Frente de penetração (mm) |                |                 |
|---------------------------|----------------|-----------------|
| Concreto                  | Após 8 semanas | Após 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             |

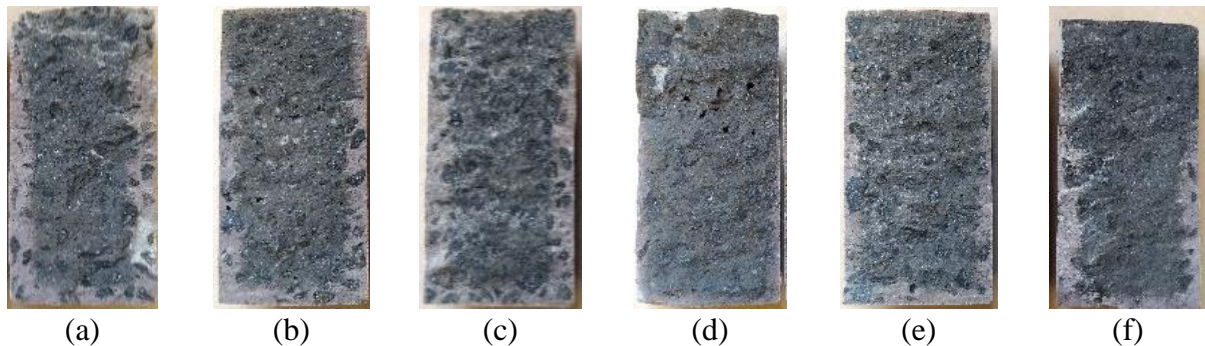


Figura 7. Corpos de prova após ensaio colorimétrico - 8 semanas:  
a) C-0,1-0; b) C-0,3-0; c) C-0,5-0; d) C-0,5-10; e) C-0,7-10; f) REF.

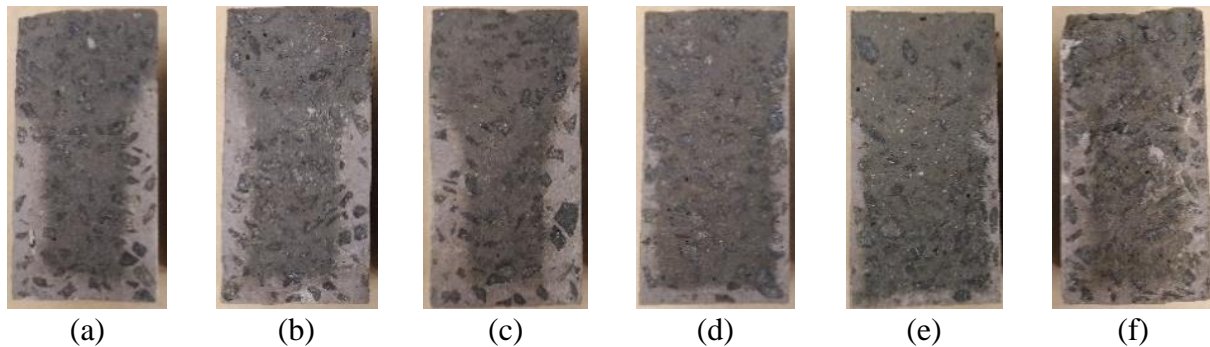


Figura 8. Corpos de prova após ensaio colorimétrico - 16 semanas:  
a) C-0,1-0; b) C-0,3-0; c) C-0,5-0; d) C-0,5-10; e) C-0,7-10; f) REF.

De um modo geral, a presença de nanosílica não impediu a penetração de cloretos nos concretos. Após 8 semanas, as frentes de penetração nos concretos C-0,1-0, C-0,3-0 e C-0,5-0 foram semelhantes à do concreto de referência. Já após 16 semanas, o concreto de referência apresentou valor menor do que os que continham adições.

Por outro lado, os concretos com adição conjunta de nanosílica e sílica ativa apresentaram redução na frente de penetração. Os valores obtidos após 16 semanas pelos concretos C-0,5-10 e C-0,7-10 foram 1,6 mm e 2,9 mm menores que o concreto de referência, respectivamente. Esses resultados eram esperados, uma vez que foram os mesmos traços que obtiveram menor índice de absorção capilar, como discutido anteriormente.

Silva (2006) realizou os mesmos ensaios em concretos de alto desempenho com incorporação de 5 e 10% de sílica ativa e, após 16 ciclos de secagem e molhagem, obteve redução na frente de penetração de 1,9 e 2,7 mm, respectivamente, se comparados ao concreto de referência, que teve frente de penetração de 5,7 mm.

Quanto ao uso da nanosílica, embora o presente trabalho não tenha obtido resultados satisfatórios,

algumas pesquisas apontam que ao utilizar 3 e 6% de uma solução de nanosílica coloidal em argamassas foi possível reduzir a migração de cloretos em 70% e 77%, respectivamente, em comparação aos traços de referência, para uma idade de 28 dias (Joshaghani; Moeini, 2017). Assim como Ganesh *et al.* (2016), que também estudaram a influência de uma solução de nanopartículas de sílica na durabilidade de concretos, por meio do ensaio de migração de cloretos. Os autores observaram que, aos 28 dias, a adição de 2% de nanosílica aumentou a resistência do concreto à penetração dos íons agressivos. Os resultados positivos foram atribuídos ao efeito fíler da nanosílica e sua capacidade de preencher os vazios presentes no concreto, reduzindo, conseqüentemente, a penetração de cloretos.

## 4. CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos, conclui-se que a adição de nanosílica dispersa em superplastificante, nos teores de 0,1 a 0,5%, não conferiu melhorias aos concretos quanto às propriedades mecânicas e físicas, analisadas por meio dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e absorção de água por capilaridade. Do mesmo modo, a nanosílica não reduziu a frente de penetração de cloretos em comparação ao concreto de referência.

Entretanto, ao ser utilizada nos teores de 0,5 e 0,7%, em conjunto com 10% de sílica ativa, foram observadas melhoras em ambas as propriedades, aumentando a resistência mecânica e reduzindo a absorção de água por capilaridade, além da redução na frente de penetração de cloretos, se comparados ao concreto de referência.

Vale ressaltar ainda que como a nanosílica está dispersa em aditivo superplastificante, não foi possível avaliar outros teores dentro dos limites recomendados pelo fabricante. Uma vez que o aumento do teor adicionado leva ao aumento da consistência, podendo culminar em perda de coesão e exsudação das misturas.

## 5. AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Sistemas Estruturais (UFSCar); Laboratório de Estruturas (USP) e ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, pelo apoio na realização dos ensaios. À Holcim do Brasil S/A., à Silicon Indústria e Comércio de Produtos Químicos LTDA e à Dow Corning Silício do Brasil, pelos materiais doados e ao grupo de pesquisa GESEC.

## 6. REFERÊNCIAS

- 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.