

SUBMETIDO 05/05/2021

APROVADO 27/07/2021

PUBLICADO ON-LINE 10/10/2021

PUBLICADO 30/03/2023

EDITORA ASSOCIADA

Nelma Mirian Chagas Araújo Meira

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5875>

ARTIGO ORIGINAL

Efeito da nanosílica nas propriedades mecânica, física e térmica de concretos

 Giovana Massarico Gonçalves ^[1]*

 Vitor Lourenato Leoni ^[2]

 Fernanda Giannotti da Silva Ferreira ^[3]

[1] giovana.massarico@gmail.com

[2] vitorlleoni@gmail.com

[3] fgiannotti@ufscar.br

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Brasil

RESUMO: Atualmente, no Brasil, a maioria das edificações depende de alto consumo de energia elétrica, consequência de, muitas vezes, serem desconsideradas estratégias para o desempenho térmico e para a eficiência energética do ambiente construído. Várias pesquisas estão sendo realizadas para estudar a viabilidade de adições ao concreto, visando materiais com condutividade térmica que proporcione melhor desempenho térmico. Uma dessas adições é a nanosílica, já muito estudada em relação à durabilidade e à resistência, à compressão de concretos, porém pouco explorada quanto à condutividade térmica. Assim, neste trabalho, verificou-se o efeito da nanosílica coloidal na condutividade térmica de concretos com a incorporação de 0%, 5% e 10%, em substituição em massa ao cimento. Foram avaliadas: massa específica, absorção de água, índice de vazios, resistência à compressão e condutividade térmica dos concretos desenvolvidos. Os resultados indicam que a adição de nanosílica provoca um aumento significativo na massa específica dos concretos, assim como nos valores de resistência à compressão para as amostras com 10% de nanosílica coloidal nas primeiras idades. Em relação à condutividade térmica dos concretos estudados, não foram observadas variações significativas em seus valores, comparando-se os concretos com e sem adição de nanosílica coloidal.

Palavras-chave: concreto; condutividade térmica; nanosílica.

Effect of nanosilica on thermal, physical and mechanical properties of concretes

ABSTRACT: Nowadays, in Brazil, most buildings rely on high electricity consumption, a consequence of not taking strategies for thermal performance and energy efficiency into consideration of the built environment. Several researches have been carried out to study the feasibility of additions into concrete, aiming at materials with thermal conductivity that improve thermal performance. One of these additions is nanosilica, widely studied already in terms of durability and compressive strength of concrete, but little explored in terms of thermal conductivity. Thus, in this work, the effect of adding nanosilica in the thermal conductivity of concrete with the

*Autor para correspondência.

incorporation of 0%, 5% and 10% of colloidal nanosilica in mass replacement of cement was studied. Specific mass, water absorption, air voids ratio, compressive strength and thermal conductivity of the developed concretes were evaluated. The results indicate that the addition of colloidal nanosilica causes a significant increase in the specific mass of the concretes, as well as in the values of compressive strength for the samples with 10% colloidal nanosilica at the early ages. Regarding the thermal conductivity of the studied concretes, no significant variations were observed in their values, comparing the concretes with and without addition of colloidal nanosilica.

Keywords: concrete; nanosilica; thermal conductivity.

1 Introdução

A incorporação de adições minerais a compósitos cimentícios permite melhorar algumas de suas propriedades, em função da alteração da microestrutura da matriz cimentícia. Usualmente, o efeito mais estudado dessas adições é na resistência mecânica do material, porém, diversos outros estudos podem ser conduzidos para avaliar a influência dessas adições em outras propriedades do concreto, propriedades estas relacionadas à durabilidade e às propriedades térmicas, como a condutividade térmica.

Uma adição que vem sendo muito estudada é a nanosílica, com diversos estudos realizados para avaliar o concreto quanto à resistência e durabilidade, como os trabalhos de Du, Du e Liu (2015), Wang (2017) e Said, Ayad e Zeidan (2018), em materiais cimentícios em geral. Entretanto, ao se tratar de propriedades térmicas do material, há poucos estudos relacionados a essa adição e à sua influência na condutividade térmica do concreto.

O consumo de energia por aparelhos AVAC – aquecimento, ventilação e ar-condicionado – vem aumentando consideravelmente nos últimos anos, de acordo com o relatório de indicadores do Atlas da Eficiência Energética de 2019, publicado pela Empresa de Energia Energética (EPE, 2020), principalmente pela falta de planejamento e estratégias para melhorar o desempenho térmico e a eficiência energética das edificações. Em contrapartida, os conceitos de sustentabilidade também vêm ganhando força e exigindo cada vez mais que a sociedade consuma sem ultrapassar a capacidade de renovação dos recursos, e que respeite os ciclos naturais. Nesse contexto, há uma grande busca por novas fontes de energias renováveis, mas uma das melhores soluções do momento ainda é economizar. A aplicação de materiais mais eficazes e inovadores na construção civil pode auxiliar na construção de edificações mais sustentáveis.

Dependendo das características térmicas do material, poderão ser proporcionados melhor conforto térmico e economia de energia aos usuários de uma edificação, já que raramente utilizariam equipamentos AVAC, que normalmente são os maiores consumidores de energia de uma residência.

Assim, este artigo pretende estudar o efeito da adição de nanosílica nas propriedades mecânica, física e térmica de concretos, com a intenção de se obterem maiores informações relacionadas a essa adição e às suas possíveis aplicações na construção civil.

Para isso, o artigo será apresentado em quatro seções: referencial teórico, método da pesquisa, resultados e conclusão. A primeira contempla o uso benéfico da adição da nanosílica em concretos e o estudo da condutividade térmica de concretos, no geral. Em seguida, a metodologia para os ensaios é apresentada, explanando-se todo o

procedimento experimental e introduzindo os resultados e a discussão acerca deles. Por fim, todo o estudo desenvolvido é compilado na conclusão, integrando os objetivos com os resultados alcançados.

2 Referencial teórico

Os estudos do uso de diversas adições ao concreto cresceram muito nos últimos anos. A maioria das adições estudadas é composta por resíduos de materiais que seriam descartados e, quase sempre, contaminariam o meio ambiente. Na tentativa de se achar um uso adequado para esses materiais e se evitar graves problemas ecológicos, muitos desses materiais passaram a ser estudados para avaliar o seu uso em conjunto com o cimento.

Citam-se os trabalhos desenvolvidos por Schmalz (2018), Zanon, Schmalz e Ferreira (2018) e Santos (2019), que avaliaram o uso da adição de sílica ativa e nanosílica nas propriedades mecânicas e relacionadas à durabilidade em concretos e argamassas. Assim como pesquisas que utilizam a incorporação de cinza de casca de arroz em argamassas (SILVA; VISHVALINGAM; ETAMPAWALA, 2021) e as adições de pó de vidro, metacaulim e filer calcário em pastas cimentícias (DU *et al.*, 2021).

Diversas propriedades são avaliadas nesses estudos, porém, devido à necessidade de se melhorar a eficiência térmica das edificações, as propriedades térmicas dos materiais também devem ser avaliadas. As casas construídas nos centros urbanos, além de serem pequenas, também são termicamente desconfortáveis, não só pelos materiais utilizados na construção, mas igualmente pelo conforto térmico desses ambientes ser seriamente afetado pelo rápido crescimento urbano e pelo aquecimento global (SILVA; VISHVALINGAM; ETAMPAWALA, 2021).

Nesse contexto, o campo de pesquisa das propriedades térmicas de concretos, especialmente com a adição de nanosílica, ainda é pouco explorado. Segundo Mehta e Monteiro (2014), a condutividade térmica se dá pelo fluxo de calor transmitido através de uma unidade de área de um material sob uma unidade de gradiente de temperatura unitária, sendo influenciada pelas características mineralógicas do agregado, pelo teor de umidade, pela densidade do material e pela temperatura do concreto. Asadi *et al.* (2018), por meio de revisão de literatura relevante ao tema, afirmam que a densidade consiste na melhor propriedade relacionada à condutividade térmica, abrangendo sua pesquisa na análise dos seguintes fatores:

- Teor de umidade: concretos em condição saturada apresentam maior condutividade térmica;
- Temperatura: a condutividade térmica de concretos diminui à medida em que a temperatura destes aumenta;
- Tipo de agregado: a condutividade térmica aumenta ao se elevar a parcela do volume de agregado graúdo, mas diminui ao se utilizar agregados leves;
- Incorporação de adições minerais: cinzas volantes aumentam a condutividade térmica, enquanto que outros materiais pozolânicos podem ocasionar a sua diminuição, como a sílica ativa;
- Densidade: a condutividade térmica diminui quando a densidade do material diminui.

Du *et al.* (2021) concluíram que a adição de 25% de metacaulim em pastas cimentícias aumenta a condutividade térmica em 54%, e que a incorporação de pó de vidro e filer calcário diminui a condutividade térmica em 24,05% e 36,26%,

respectivamente. Na pesquisa de Silva, Vishvalingam e Etampawala (2021), houve redução da condutividade térmica de argamassas com a incorporação de 20% de cinza da casca de arroz. Nesse contexto, a nanosílica é uma adição mineral com dimensões nanométricas entre 1 nm e 100 nm, dimensão na qual os materiais possuem diferentes comportamentos em função dos efeitos quânticos causados por conta das altíssimas superfícies e interfaces de contato (GLEIZE, 2011). Ainda segundo Gleize (2011), o refino da estrutura dos materiais ou a incorporação de nanopartículas permite o aumento das superfícies de contato e a reatividade, o que gera várias vantagens em termos de reforço e eficiência.

A revisão literária realizada por Zhang *et al.* (2017), que analisou 76 documentos sobre o assunto, mostra que o uso de nanosílica em concretos de alto desempenho é capaz de gerar grande quantidade de C-S-H – composto ligado à atribuição de propriedades cimentantes ao concreto –, contribuindo para a diminuição da porosidade na pasta e na interface pasta-agregado e para o melhor desempenho frente à resistência à compressão, à resistência à flexão, à resistência à abrasão e à permeabilidade por cloretos. Mostra-se, da mesma forma, que a adição de nanosílica reduz a trabalhabilidade dos concretos. Por isso, é necessário o uso de aditivos superplastificantes para garantir a trabalhabilidade dos mesmos.

Ao ser adicionada ao concreto, a nanosílica atua de duas formas diferentes. Ocorre uma reação pozolânica, quando na presença de água, na qual a nanosílica reage quimicamente com o hidróxido de cálcio – liberado pela hidratação do cimento – e forma silicatos estáveis que possuem propriedades cimentícias (NEVILLE, 2015). Também acontece o efeito filer, um efeito físico que ocorre pelo reduzido tamanho das partículas, proporcionando um refinamento da estrutura de poros do concreto.

O efeito pozolânico, associado ao efeito filer, propicia uma melhora na microestrutura dos materiais cimentícios, diminuindo a porosidade e a conexão entre os poros, densificando a matriz cimentícia e melhorando as características da zona de transição pasta-agregado, o que aumenta o desempenho dos concretos e argamassas, tanto sob o ponto de vista de durabilidade, quanto das propriedades mecânicas.

Com relação às propriedades térmicas, para Jittabut *et al.* (2016), a substituição, em massa, do cimento por nanosílica nos teores de 1% a 5% resultou na diminuição da condutividade térmica de compósitos de cimento em 38%, considerando tratamentos térmicos. Para Sikora *et al.* (2017), a adição de 1% e 3% de nanosílica a argamassas de cimento também contribuiu para o decréscimo da condutividade térmica.

3 Método da pesquisa

Os materiais utilizados neste trabalho foram: cimento, agregados miúdo e graúdo, aditivo superplastificante e nanosílica coloidal (Figura 1).

Figura 1 ►

Materiais utilizados na confecção dos concretos.
Fonte: arquivo dos autores



O cimento utilizado foi o CP V ARI – alta resistência inicial –, cujas propriedades físicas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 ►
Propriedades físicas
do CP V ARI.
Fonte: Santos (2019)

Parâmetro	Valor obtido	Valor de referência*	
Massa específica (NBR 16605)	3,16 g/cm ³	-	
Início de pega (NBR 16607)	135 min	≥ 60 min	
Fim de pega (NBR 16607)	210 min	≤ 600 min	
Água para pasta de consistência normal (NBR 16606)	30,0%	-	
% retida na peneira 75 µm (NBR 11579)	0,1%	≤ 6,0%	
Superfície específica – Blaine (NBR 16372)	665,0 m ² /kg	-	
Resistência à compressão (NBR 7215)	1 dia	27,5 MPa	≥ 14,0 MPa
	3 dias	42,0 MPa	≥ 20,0 MPa
	7 dias	48,7 MPa	≥ 34,0 MPa
	28 dias	52,2 MPa	-

*Valores limites não especificados pela NBR 16697 (ABNT, 2018d)

Os agregados miúdo e graúdo utilizados foram naturais, encontrados e comercializados na região de São Carlos. O agregado miúdo apresentou dimensão máxima de 2,4 mm e módulo de finura 1,94 e, através de sua curva de distribuição granulométrica, verificou-se que se encontra dentro da zona utilizável estabelecida pela NBR 7211 (ABNT, 2009a). O agregado graúdo apresentou dimensão máxima característica de 9,5 mm, módulo de finura de 5,81 e curva granulométrica um pouco abaixo dos limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009a) para a zona 4,75/12,5.

A nanosílica utilizada foi uma solução aquosa de sílica coloidal, denominada Levasil CB 8, comercializada pela AzkoNobel, com 50% de teor de sólidos e massa específica igual a 1,4 g/cm³.

Por fim, o aditivo superplastificante utilizado foi o ADVA CAST 585, à base de policarboxilato, fabricado pela Grace – GCP Applied Technologies –, com massa específica aproximada igual a 1,08 g/cm³.

3.1 Definição dos traços e moldagem dos corpos de prova

Para a definição dos traços dos concretos, estabeleceu-se:

- Traço 1:3,2 (cimento: agregados);
- Relação água/aglomerante (*a/agl*) igual a 0,40;
- Nanosílica em teores de 0%, 5% e 10% de substituição em massa ao cimento. A substituição foi feita em massa, por recomendação do fabricante.

O teor de aditivo superplastificante utilizado em cada mistura foi definido mediante a verificação da consistência dos concretos, conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016), sendo adotada uma consistência de (230 ± 10) mm.

Figura 2 ▼

Ensaio de consistência realizado.

Fonte: arquivo dos autores

Para a realização do ensaio de consistência, foram necessários: mesa para índice de consistência, molde tronco cônico, soquete metálico e régua metálica. Para a execução do ensaio, adotou-se também o procedimento especificado pela NBR 13276 (ABNT, 2016). A Figura 2 ilustra o ensaio realizado.



Após a definição dos teores de aditivo superplastificante a serem utilizados, os corpos de prova foram moldados, conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019), para os ensaios de massa específica, absorção de água e índice de vazios e para o ensaio de resistência à compressão dos concretos. Para ambos, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, sendo adotada essa dimensão de corpo de prova em função da dimensão máxima característica do agregado graúdo (igual a 9,5 mm). Para o ensaio de massa específica, foram moldados 2 corpos de prova para cada traço e, para o ensaio de resistência à compressão dos concretos, foram moldados 4 corpos de prova para cada traço e para cada idade (48 horas, 7 dias, 28 dias e 56 dias). Após um dia em ambiente climatizado (temperatura controlada entre 22 °C e 23,5 °C), as amostras foram desmoldadas e mantidas em câmara úmida até a idade prevista dos ensaios.

Para o ensaio de condutividade térmica, utilizou-se a metodologia de Vilela (2017), com algumas adaptações. Assim, foram moldados, para cada traço, 1 corpo de prova cilíndrico de 41,51 mm de diâmetro, aproximadamente, por 400 mm de comprimento. Os moldes foram feitos de tubos de PVC de 2", cortados na direção longitudinal, para facilitar a desmoldagem, e presos com duas abraçadeiras metálicas. Cada corpo de prova foi moldado com um resistor cartucho de 9,51 mm de diâmetro em seu interior. Para isso, foram utilizados tampões com furos circulares de 9,51 mm de diâmetro nas extremidades, para garantir a boa localização do resistor e da pasta térmica na superfície do resistor para que o calor fosse melhor dissipado.

Além disso, foram realizados dois furos circulares no molde, de diâmetros semelhantes aos termopares posteriormente utilizados, para inserir arames na moldagem, de modo que eles ficassem posicionados até o centro do corpo de prova. Um dos arames foi posicionado no centro do corpo de prova (200 mm de sua extremidade) e o segundo,

Figura 3 ▼

Corte esquemático do sistema de moldagem.

Fonte: arquivo dos autores

a 110 mm de sua extremidade. A Figura 3 representa o corte esquemático do sistema de moldagem e a Figura 4 representa a moldagem realizada neste trabalho.

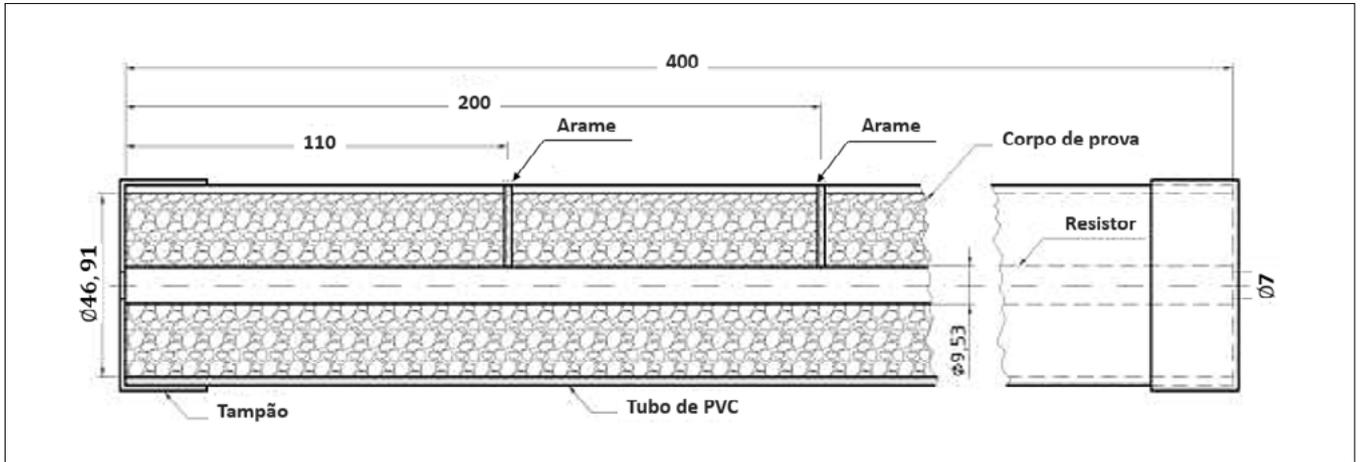


Figura 4 ►

Corpos de provas moldados para o ensaio de condutividade térmica.

Fonte: arquivo dos autores



Após um dia em ambiente climatizado no laboratório – temperatura controlada entre 22 °C e 23,5 °C –, as amostras foram desmoldadas e mantidas em mesmo ambiente até a idade prevista dos ensaios.

3.2 Ensaios realizados nos concretos

Os ensaios de massa específica e de índice de vazios dos concretos foram realizados conforme a NBR 9778 (ABNT, 2009b), na idade de 28 dias.

Os ensaios de resistência à compressão dos concretos foram realizados conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018a), nas idades de 48 horas, 7 dias, 28 dias e 56 dias. Antes dos ensaios, as amostras foram retificadas.

Os ensaios de condutividade térmica dos concretos seguiram o método da pesquisa de Vilela (2017), com algumas adaptações, como número de termopares, realização do

ensaio em ambiente climaticamente controlado (temperatura entre 22 °C e 23,5 °C), resistor cartucho de potência diferente e diferentes idades de ensaio (48 horas, 7 dias, 28 dias e 56 dias). Os equipamentos e os materiais utilizados para o ensaio consistem em um resistor cartucho de 200 W de potência e tensão elétrica de 220 V, 3 termopares tipo K, 3 multímetros semelhantes, lã de vidro, pasta térmica, fita isolante e cronômetro.

Foram inseridos dois termopares nos furos realizados pelos arames na moldagem, para medir a temperatura no centro do corpo de prova e um na superfície do corpo de prova (centralizado). Todos foram presos com fita isolante para evitar deslocamentos dos termopares durante o ensaio. A lã de vidro foi utilizada nas extremidades do corpo de prova, para minimizar a transferência de calor longitudinal e, conseqüentemente, minimizar erros de medição do sistema.

O resistor cartucho utilizado possui 200 W de potência e tensão elétrica 220 V, porém foi utilizado em 127 V devido a um teste realizado para verificar a temperatura máxima alcançada pelo resistor, para que ela não fosse muito elevada e pudesse interferir nos resultados das próximas idades, uma vez que foi utilizado o mesmo corpo de prova na análise em diferentes idades. Nessa direção, optou-se por utilizá-lo em 127 V para se obter uma menor potência e, logo, uma menor temperatura máxima alcançada pelo resistor. A Figura 5 mostra o equipamento montado durante a realização do ensaio de condutividade térmica.

Figura 5 ►
Equipamento do ensaio de condutividade térmica.
Fonte: arquivo dos autores



As temperaturas foram medidas antes do início do ensaio até o momento em que não houve mais variação entre elas, ou seja, até o momento em que o sistema entrou em regime estacionário. Elas foram medidas a cada 5 minutos nos primeiros 30 minutos e a cada 10 minutos até o final do ensaio.

Com a última medida de temperatura de todos os termopares, foram calculadas três variações de temperatura (ΔT) entre os pontos no centro e na superfície do corpo de prova: a primeira entre a temperatura interna no centro do corpo de prova e a temperatura na superfície (ΔT_1), a segunda entre a temperatura interna na periferia do corpo de prova e a temperatura na superfície (ΔT_2) e a terceira entre a média das temperaturas internas no centro e na periferia do corpo de prova e a temperatura na superfície ($\Delta T_{\text{médio}}$).

A partir dos valores encontrados, estes foram substituídos na Equação 1 (página seguinte), mencionada na revisão bibliográfica, para, assim, se obter os valores de

condutividade térmica, estabelecidos como mínimo, máximo e médio para cada traço e para cada idade de ensaio, de acordo com a variação de temperatura utilizada.

$$k = qr \times \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) 2\pi \times L \times \Delta T \quad (1)$$

os quais: qr é a potência do resistor cartucho; r_1 valor do raio do resistor cartucho; r_2 é o valor do raio do corpo de prova; L é o comprimento do corpo de prova; ΔT é a diferença entre as temperaturas do centro e da superfície do corpo de prova (ΔT_1 , ΔT_2 ou $\Delta T_{\text{médio}}$).

Vale ressaltar que a potência do resistor cartucho foi calculada, para cada ensaio, através da medição da tensão e da corrente elétrica por um multímetro e a multiplicação dos valores. Além disso, o raio de cada corpo de prova foi calculado a partir da média aritmética de três medições realizadas com auxílio de paquímetro digital.

3.3 Análise estatística dos resultados

Os resultados de resistência à compressão dos concretos e das respectivas condutividades térmicas foram tratados estatisticamente através da Análise de Variância – ANOVA e, posteriormente, submetidos ao teste de Tukey. Esse tratamento foi realizado com o auxílio do software OriginLab e com nível de significância $\alpha = 5\%$.

A análise de variância possui a finalidade de verificar a existência de diferenças significativas, do ponto estatístico, entre as leituras obtidas em cada ensaio. Ela, basicamente, testa duas hipóteses, nula (H_0) ou alternativa (H_1), sendo a primeira para a ausência de diferença significativa entre os resultados e a segunda para a existência de pelo menos uma diferença entre eles. Para afirmar uma das hipóteses, compara-se o p -valor com o α – nível de significância, sendo que, quando p -valor $< \alpha$, rejeita-se H_0 , assumindo-se a existência de diferença significativa entre os resultados.

Existindo essa diferença, realiza-se o teste de Tukey, que testa as médias amostrais duas a duas, verificando entre quais existem diferenças significativas.

4 Resultados

Tabela 2 ▼

Composição dos traços de concreto e consistências obtidas.
Fonte: dados da pesquisa

O ensaio de consistência, a partir da média dos diâmetros dos espalhamentos obtidos, permitiu a definição dos teores de aditivo superplastificante utilizados em cada traço. Na Tabela 2, apresentam-se a composição dos traços de concreto e a média das consistências obtidas no ensaio.

Concreto	Materiais (g)						Consistência (mm)
	Cimento	NN*	A.M.**	A.G.***	SP (%)****	Água	
REF	1000	-	1280	1920	0,2	400	228
NN5	950	50	1280	1920	0,5	350	222
NN10	900	100	1280	1920	1,3	300	227

* Nanosílica

** Agregado miúdo

*** Agregado graúdo

**** Porcentagem de aditivo superplastificante calculada em relação às massas de aglomerante

Vale ressaltar que a nanosílica utilizada é dispersa em uma solução aquosa onde 50% da massa total é composta de sílica e 50% de água; portanto, para a definição dos traços, foi considerada apenas a porcentagem de sílica existente na massa total do material e a água de amassamento foi quantificada, descontando-se a água da solução. A adição de nanosílica foi feita em substituição ao cimento, portanto, para cada traço, a massa de cimento foi sendo corrigida, descontando-se a massa de nanosílica adicionada. Além disso, com o aumento da quantidade de nanosílica, houve aumento do teor de aditivo, o que pode ser justificado pela grande área superficial da nanosílica, que proporciona a absorção de uma maior quantidade de água, reduzindo a consistência da mistura em situações que a relação água/aglomerante é fixa. Segundo Sanchez e Sobolev (2010), as partículas de cimento Portland possuem área superficial entre 100 e 1000 m²/kg, enquanto as partículas de nanosílica entre 10000 e 1000000 m²/kg.

4.1 Ensaios realizados em concreto

Neste tópico, serão apresentados os resultados de definição dos ensaios de massa específica, absorção de água e índice de vazios, de resistência à compressão dos concretos e de condutividade térmica dos concretos.

4.1.1 Massa específica, absorção de água e índice de vazios dos concretos

Os resultados do ensaio de massa específica, de absorção de água e de índice de vazios, bem como o desvio-padrão (DP) e o coeficiente de variação (CV), estão indicados nas Tabelas 3, 4 e 5.

Tabela 3 ►

Massa específica dos concretos com 28 dias de idade.

Fonte: dados da pesquisa

Concreto	Massa específica real (r) (g/cm ³)	DP (%)	CV (%)	Estatisticamente diferente de REF?
	Média			
REF	2,68	0,00	0,0	-
NN5	2,74	0,01	0,3	Sim
NN10	2,71	0,00	0,0	Sim

Tabela 4 ►

Absorção de água dos concretos com 28 dias de idade.

Fonte: dados da pesquisa

Concreto	Absorção de água (A) (%)	DP (%)	CV (%)	Estatisticamente diferente de REF?
	Média			
REF	5,70	0,00	0,0	-
NN5	6,30	0,14	2,2	Sim
NN10	5,45	0,07	1,2	Não

Tabela 5 ►

Índice de vazios dos concretos com 28 dias de idade.

Fonte: dados da pesquisa

Concreto	Índice de vazios (Iv) (%)	DP (%)	CV (%)	Estatisticamente diferente de REF?
	Média			
REF	13,26	0,04	0,3	-
NN5	14,73	0,16	1,1	Sim
NN10	12,87	0,25	1,9	Não

A partir dos valores obtidos, pode-se observar que a adição de 5% de nanosílica coloidal em massa aos concretos provocou diferenças significativas, em relação ao concreto referência, para todas as propriedades ensaiadas, gerando um aumento da massa específica, da absorção de água e do índice de vazios. Entretanto, a adição de 10% de nanosílica coloidal em massa aos concretos provocou diferenças significativas, em relação ao concreto referência, apenas na massa específica.

4.1.2 Resistência à compressão dos concretos

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão para as idades de 48 horas, 7 dias, 28 dias e 56 dias, bem como o desvio-padrão (DP) e o coeficiente de variação (CV) estão apresentados nas Tabelas 6, 7, 8 e 9.

Tabela 6 ▶

Resistência à compressão dos concretos com 48 horas de idade.

Fonte: dados da pesquisa

Concreto	Resistência à compressão (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Estatisticamente diferente de REF?
	Média			
REF	33,3	1,3	3,9	-
NN5	34,9	0,8	2,5	Não
NN10	36,4	1,4	3,8	Sim

Tabela 7 ▶

Resistência à compressão dos concretos com 7 dias de idade.

Fonte: dados da pesquisa

Concreto	Resistência à compressão (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Estatisticamente diferente de REF?
	Média			
REF	44,4	4,2	9,4	-
NN5	39,0	1,6	4,2	Não
NN10	51,4	2,9	5,6	Sim

Tabela 8 ▶

Resistência à compressão dos concretos com 28 dias de idade.

Fonte: dados da pesquisa

Concreto	Resistência à compressão (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Estatisticamente diferente de REF?
	Média			
REF	59,5	3,7	6,3	-
NN5	54,0	3,1	5,8	Não
NN10	57,0	3,5	6,1	Não

Tabela 9 ▶

Resistência à compressão dos concretos com 56 dias de idade.

Fonte: dados da pesquisa

Concreto	Resistência à compressão (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Estatisticamente diferente de REF?
	Média			
REF	61,9	4,2	6,8	-
NN5	52,8	2,3	4,3	Sim
NN10	66,8	2,8	4,2	Não

A Figura 6 ilustra a evolução, no decorrer do tempo, da resistência média dos concretos, e a Figura 7 mostra as formas de ruptura dos corpos de prova após a realização do ensaio.

Figura 6 ▶

Evolução da resistência à compressão dos concretos estudados.
Fonte: dados da pesquisa

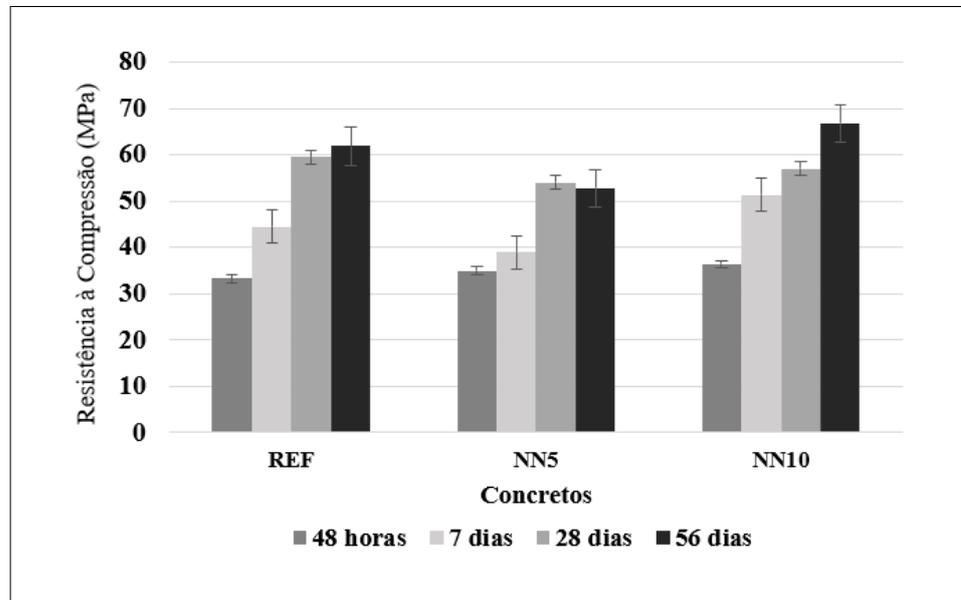


Figura 7 ▶

Formas de ruptura dos corpos de prova.
Fonte: dados da pesquisa



Na idade de 48 horas, as médias dos valores variaram de 33,3 MPa a 36,4 MPa, sendo que os valores obtidos indicam que a incorporação, em massa, de nanosílica coloidal resulta em acréscimos na resistência à compressão, visto que os dois traços com sua adição apresentaram valores superiores ao traço de referência. Também, com a análise estatística, observa-se que há diferença significativa em relação ao traço referência e ao traço com 10% de nanosílica coloidal.

Analisando-se os resultados obtidos na idade de 7 dias, as médias dos valores variaram de 39,0 MPa a 51,4 MPa. Os valores obtidos indicam que a adição de 5% em massa de nanosílica coloidal não resulta em acréscimos na resistência à compressão, assim, de acordo com a análise estatística, não há diferença estatística em relação a esse traço e ao traço de referência. Além disso, os valores obtidos

também indicam que a adição de 10% em massa de nanosílica coloidal resulta em acréscimos na resistência à compressão e, estatisticamente, possui uma diferença significativa em relação ao traço referência.

Já na idade de 28 dias, as médias dos valores variaram de 54,0 MPa a 59,5 MPa. Os resultados indicam que a adição de nanosílica coloidal não resulta em acréscimos na resistência à compressão, já que os dois traços com sua adição apresentaram valores inferiores ao traço de referência. Porém, a análise estatística mostra que não há diferença significativa entre os traços com nanosílica e o traço referência.

Por fim, analisando-se os resultados obtidos na idade de 56 dias, as médias dos valores variaram de 52,8 MPa a 66,8 MPa. Os valores obtidos indicam que a adição de 5% em massa de nanosílica coloidal não resulta em acréscimos na resistência à compressão, enquanto a adição de 10%, sim. De acordo com a análise estatística, há diferença significativa apenas entre o traço com adição de 5% de nanosílica e o traço referência.

O desenvolvimento da resistência à compressão, em porcentagem, dos concretos com adição em massa de nanosílica coloidal em relação ao concreto referência, nas quatro idades de ensaio, pode ser observado na Tabela 10.

Tabela 10 ►

Desenvolvimento da resistência à compressão (%) dos concretos com adição em massa de nanosílica coloidal em relação ao concreto referência.

Fonte: dados da pesquisa

Concreto	Variação da resistência à compressão (%)			
	48 horas	7 dias	28 dias	56 dias
NN5	4,9	-12,2	-9,1	-14,7
NN10	9,2	15,6	-4,1	7,9

Os maiores ganhos de resistência à compressão, nas quatro idades estudadas, ocorreram com a adição em massa de 10% de nanosílica coloidal nas idades de 48 horas e 7 dias, o que pode ser justificado pela característica de ganho rápido de resistência nas idades iniciais, proporcionado pela adição de nanosílica. De modo geral, a adição em massa de 5% de nanosílica coloidal proporcionou diminuição da resistência à compressão com relação ao traço referência – considerando os valores absolutos –, obtendo-se um ganho apenas na idade de 48 horas. Entretanto, a adição em massa de 10% de nanosílica coloidal acarretou acréscimo dos valores de resistência à compressão com relação ao traço referência, obtendo-se, assim, uma diminuição apenas na idade de 28 dias.

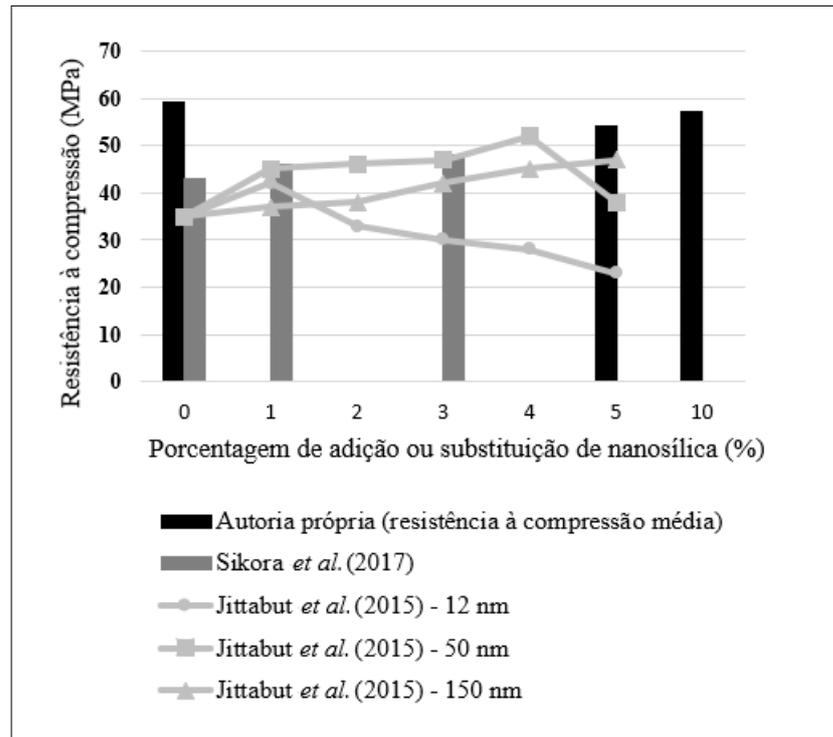
Destaca-se que, embora os valores de resistência à compressão dos concretos com adição de nanosílica tenham sido menores que os de referência em algumas idades, a diferença não foi significativa. Possivelmente esse comportamento pode ser justificado pela baixa relação a/agl utilizada (igual a 0,40), que já proporciona uma menor porosidade ao material quando comparado a concretos com relações a/agl maiores e que pode se sobressair aos efeitos filler e pozolânico (de refinamento dos poros).

Por fim, a Figura 8 (página seguinte) apresenta uma comparação entre os resultados de resistência à compressão aos 28 dias desse estudo com os de Jittabut *et al.* (2015) e Sikora *et al.* (2017), considerando-se as diferenças nos materiais analisados – concreto, pasta e argamassa e dos diferentes traços e tipos e tamanhos de partículas de nanosílica em solução.

Figura 8 ▶

Comparação dos valores de resistência à compressão obtidos neste trabalho com os obtidos por outros autores.

Fonte: dados da pesquisa



4.1.3 Condutividade térmica dos concretos

Os resultados obtidos no ensaio de condutividade térmica para as idades de 48 horas, 7 dias, 28 dias e 56 dias estão apresentados nas Tabelas 11, 12, 13 e 14. Os valores mínimo, máximo e médio da condutividade térmica se referem ao seu cálculo de acordo com as três medidas de variação de temperatura calculadas (ΔT_1 , ΔT_2 e $\Delta T_{\text{médio}}$).

Tabela 11 ▶

Condutividade térmica dos concretos com 48 horas de idade.

Fonte: dados da pesquisa

Concreto	Condutividade térmica W/mK			Estatisticamente diferente de REF?
	Mínima	Máxima	Média	
REF	1,29	1,41	1,35	-
NN5	1,12	1,70	1,38	Não
NN10	0,89	1,70	1,16	Não

Tabela 12 ▶

Condutividade térmica dos concretos com 7 dias de idade.

Fonte: dados da pesquisa

Concreto	Condutividade térmica W/mK			Estatisticamente diferente de REF?
	Mínima	Máxima	Média	
REF	1,00	1,17	1,05	-
NN5	1,10	1,22	1,13	Não
NN10	0,75	1,30	0,95	Não

Tabela 13 ▶

Condutividade térmica dos concretos com 28 dias de idade.

Fonte: dados da pesquisa

Concreto	Condutividade térmica W/mK			Estatisticamente diferente de REF?
	Mínima	Máxima	Média	
REF	0,80	1,13	0,97	-
NN5	1,05	1,10	1,07	Não
NN10	0,78	1,30	0,99	Não

Tabela 14 ▶

Condutividade térmica dos concretos com 56 dias de idade.

Fonte: dados da pesquisa

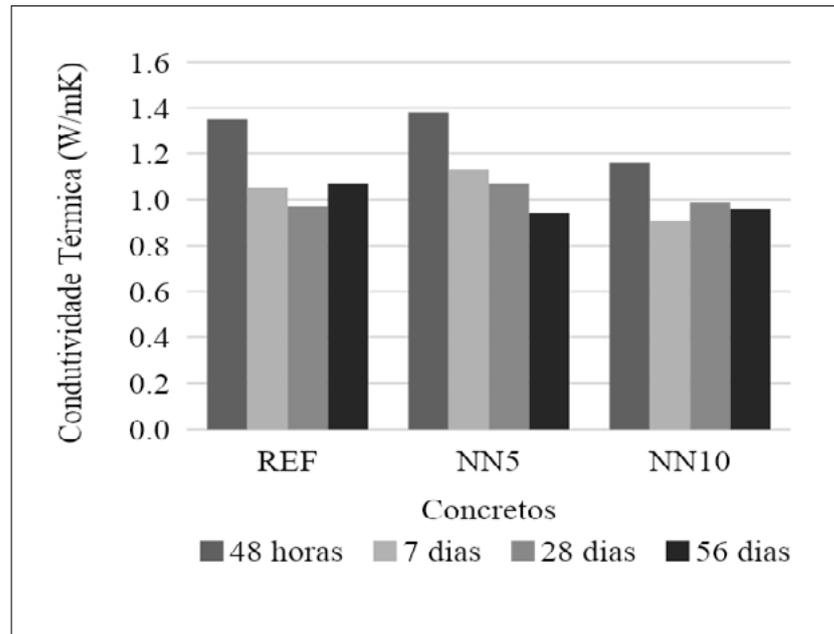
Concreto	Condutividade térmica W/mK			Estatisticamente diferente de REF?
	Mínima	Máxima	Média	
REF	0,9	1,43	1,07	-
NN5	0,9	0,98	0,94	Não
NN10	0,74	1,38	0,96	Não

A Figura 9 ilustra a evolução, no decorrer do tempo, da condutividade térmica média dos concretos.

Figura 9 ▶

Evolução da condutividade térmica média dos concretos estudados.

Fonte: dados da pesquisa



Na idade de 48 horas, as médias dos valores variaram de 1,16 W/mK a 1,38 W/mK, sendo que os valores obtidos indicam que a adição em massa de nanosílica coloidal resulta em decréscimos na condutividade térmica, visto que os dois traços com sua adição apresentaram valores inferiores ao traço de referência. Também, com a análise estatística, observa-se que não há diferença significativa em relação aos traços de referência e aos traços com adição de nanosílica coloidal.

Analisando-se os resultados obtidos na idade de 7 dias, as médias dos valores variaram de 0,95 a 1,13 W/mK. Os valores obtidos indicam que a adição em massa de nanosílica coloidal também resulta em decréscimos na condutividade térmica, visto que os dois traços, com sua adição, apresentaram valores inferiores ao traço de referência. Também, com a análise estatística, observa-se que não há diferença significativa em relação aos traços de referência e aos traços com adição de nanosílica coloidal.

Já na idade de 28 dias, as médias dos valores variaram de 0,97 W/mK a 1,07 W/mK. Os valores obtidos indicam que a adição de 5% em massa de nanosílica coloidal resulta em acréscimos na condutividade térmica, porém, de acordo com a análise estatística, não há diferença estatística em relação a esse traço e ao traço de referência. Além disso, os valores obtidos também indicam que a adição de 10% em massa de nanosílica coloidal resulta em decréscimos na resistência à compressão e, estatisticamente, também não há uma diferença significativa em relação ao traço de referência.

Por fim, analisando-se os resultados obtidos na idade de 56 dias, as médias dos valores variaram de 0,94 W/mK a 1,07 W/mK. Os valores obtidos indicam que as adições de 5% e de 10% em massa de nanosílica coloidal resultam em decréscimos na condutividade térmica, porém, de acordo com a análise estatística, não há diferença significativa entre os traços com adição de nanosílica e o traço de referência.

O desenvolvimento da condutividade térmica, em porcentagem, dos concretos com adição em massa de nanosílica coloidal em relação ao concreto referência, nas quatro idades de ensaio, pode ser observado na Tabela 15.

Tabela 15 ►

Desenvolvimento da condutividade térmica (%) dos concretos com adição em massa de nanosílica coloidal em relação ao concreto referência.

Fonte: dados da pesquisa

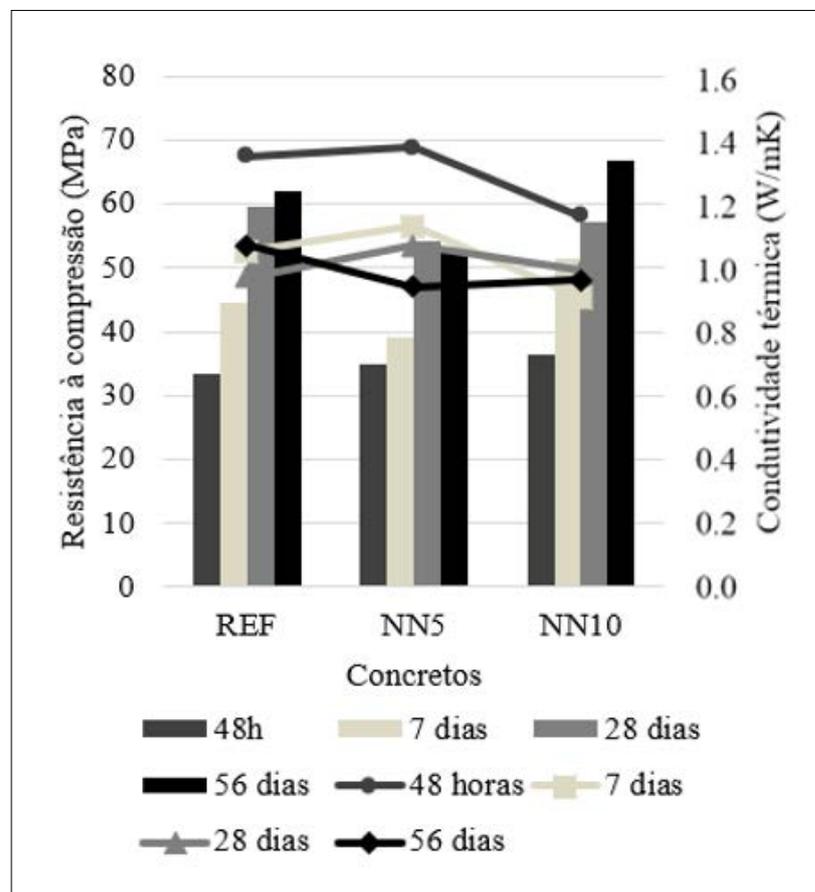
Concreto	Variação da condutividade térmica (%)			
	48 horas	7 dias	28 dias	56 dias
NN5	2,22	7,62	10,31	-12,15
NN10	-14,07	-13,33	2,06	-10,28

Apesar das variações dos concretos com adição em massa de nanosílica coloidal em relação ao concreto referência apresentarem, no geral, uma tendência de diminuição dos valores de condutividade térmica para o traço de adição, em massa, de 10% de nanosílica coloidal, as diferenças não são estatisticamente significativas, permanecendo de acordo com os resultados do ensaio de resistência à compressão. Além disso, a Figura 10 permite observar uma correlação entre os resultados das duas propriedades, em que, enquanto há a tendência de acréscimo nos valores de resistência à compressão nas idades mais avançadas de ensaio, há um decréscimo nos valores de condutividade térmica.

Figura 10 ►

Correlação entre os valores de condutividade térmica e de resistência à compressão obtidos nos ensaios realizados.

Fonte: dados da pesquisa

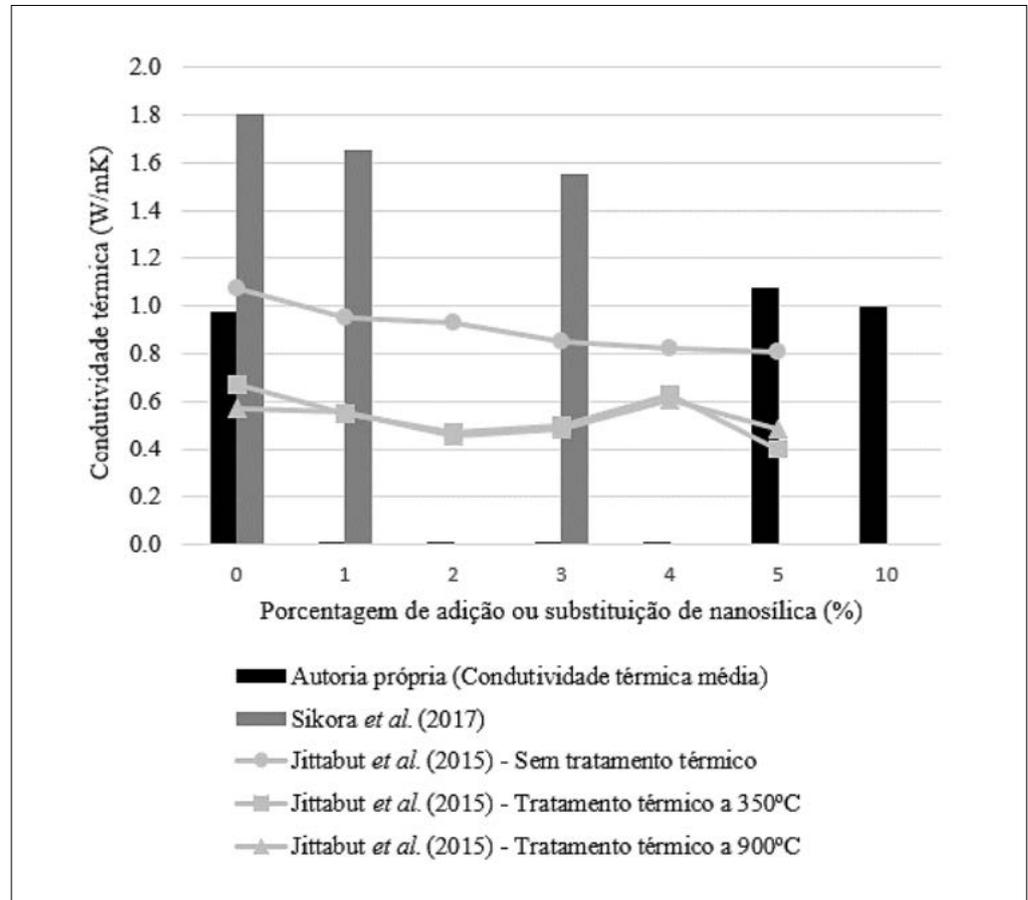


Por fim, a Figura 11 apresenta uma comparação entre os resultados de resistência à compressão aos 28 dias desse estudo com os de Jittabut *et al.* (2015) e Sikora *et al.* (2017), considerando-se as diferenças nos materiais analisados (concreto, pasta e argamassa), dos diferentes traços e dos distintos ensaios realizados.

Figura 11 ►

Comparação dos valores de condutividade térmica obtidos neste trabalho com os valores alcançados por outros autores.

Fonte: dados da pesquisa



5 Conclusão

A partir dos resultados obtidos, podem ser realizadas as seguintes considerações:

- A adição de 5% de nanosilica coloidal em massa aos concretos estudados provocaram aumentos significativos na massa específica, na absorção de água e no índice de vazios dos concretos estudados; enquanto que a adição de 10% de nanosilica coloidal em massa aos concretos estudados apresentou diferença significativa apenas na massa específica, também com aumento;
- Os resultados mais expressivos da adição de nanosilica coloidal para a resistência à compressão dos concretos foram obtidos com a adição de 10% de nanosilica, gerando cerca de 9,2% de aumento, às 48 horas, e de 15,6%, aos 7 dias, em relação ao concreto referência. Esses resultados podem ser justificados pelo efeito filer e pozolânico na incorporação da nanosilica, além da utilização do aditivo superplastificante, que melhora a dispersão das partículas de nanosilica e cimento;
- Em relação à condutividade térmica dos concretos estudados, para a o tipo de nanosilica e para os teores de substituição utilizados, não foram observadas variações significativas em seus valores, de acordo com a Análise de Variância e

com o Teste de Tukey, comparando-se os traços com e sem adição de nanosílica coloidal ao traço referência;

- Relacionado ao desempenho térmico do material estudado, aplicações podem ser analisadas e desenvolvidas para uma melhor eficiência energética no ambiente construído. Como exemplo, resultados de valores maiores de massa específica e de valores menores de condutividade térmica podem ser ideais para aplicações em pisos radiantes, auxiliando para que parte do calor gerado pelo sistema de piso aquecido não seja direcionada para baixo;
- Por fim, este trabalho permitiu a elaboração e a operação de um sistema de medição de condutividade térmica em concretos.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211 Emenda 1**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9778 Versão Corrigida 2**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16606**: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro: ABNT, 2018b.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16607**: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2018c.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018d.

ASADI, I.; SHAFIGH, P.; HASSAN, Z. F. B.; MAHYUDDIN, N. Thermal conductivity of concrete – a review. **Journal of Building Engineering**, v. 20, p. 81-93, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.07.002>.

DU, H.; DU, S.; LIU, X. Effect of nano-silica on the mechanical and transport properties of lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 114-122, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.026>.

DU, Y.; YANG, W.; GE, Y.; WANG, S.; LIU, P. Thermal conductivity of cement paste containing waste glass powder, metakaolin and limestone filler as supplementary cementitious material. **Journal of Cleaner Production**, v. 287, p. 125018, Mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125018>.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Atlas de Eficiência Energética Brasil 2019**: Relatório de indicadores. Nota técnica EPE/DEA/SEE/001/2020. 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/atlas-da-eficiencia-energetica-brasil-2019>. Acesso em: 12 dez. 2020.

GLEIZE, P. J. P. Nanociência e nanotecnologia dos materiais cimentícios. *In*: ISAIA, G. C. (ed.). **Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011.

JITTABUT, P.; PINITSOONTORN, S.; THONGBAI, P.; AMORNKITBAMRUNG, V.; CHINDAPRASIRT, P. Effect of nano-silica addition on the mechanical properties and thermal conductivity of cement composites. **Chiang Mai Journal of Science**, v. 43, n. 5, p. 1160-1170, Oct. 2016. Disponível em: <https://epg.science.cmu.ac.th/ejournal/journal-detail.php?id=7374>. Acesso em: 26 set. 2022.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

SAID, A.; AYAD, A.; ZEIDAN, M. Beneficial use of nano-silica in concrete: a review. **TCEIA – Trends in Civil Engineering and its Architecture**, v. 1, p. 22-24, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.32474/TCEIA.2018.01.000105>.

SANCHEZ, F.; SOBOLEV, K. Nanotechnology in concrete: a review. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 11, p. 2060-2071, Nov. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014>.

SANTOS, M. O. **Estudo de concretos com adição de nanosilica submetidos à ação combinada de íons cloreto e CO₂**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/11762>. Acesso em: 26 set. 2022.

SCHMALZ, R. **Durabilidade de argamassas submetidas ao ataque de sulfatos: efeito da adição da nanosilica**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/9675>. Acesso em: 26 set. 2022.

SILVA, G. H. M. J. S.; VISHVALINGAM, S.; ETAMPAWALA, T. Effect of waste rice husk ash from rice husk fuelled brick kilns on strength, durability and thermal performances of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 268, p. 121794, Jan. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121794>.

SIKORA, P.; HORSZCZARUK, E.; SKOCZYLAS, K.; RUCINSKA, T. Thermal properties of cement mortars containing waste glass aggregate and nanosilica. **Procedia Engineering**, v. 196, n. 1, p. 159-166, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.186>.

VILELA, K. C. **Desenvolvimento de sistema de baixo custo para medição de condutividade térmica em corpos de prova cerâmicos**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017. Disponível em: https://www.eng-materiais.bh.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/189/2018/06/TCCII_Keila-Cristina-Vilela.pdf. Acesso em: 26 set. 2022.

WANG, X. **Effects of nanoparticles on the properties of cement-based materials**. 2017. Doctorate Thesis (Doctorate in Civil Engineering) – Iowa State University, Ames, Iowa, 2017. DOI: <https://doi.org/10.31274/etd-180810-5865>.

ZANON, T.; SCHMALZ, R.; FERREIRA, F. G. S. Avaliação dos efeitos da nanosilica em concretos submetidos à ação de íons cloreto. **Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción**, v. 8, n. 2, p. 138-149, 2018. DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v8i2.274>.

ZHANG, P.; WANA, J.; WANG, K.; LI, Q. Influence of nano-SiO₂ on properties of fresh and hardened high performance concrete: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 648-658, Sept. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.059>.