


## Estudo da resistência mecânica e resistência ao ataque ácido em compósitos cimentícios com incorporação de nanopartículas de sílica

### Study of mechanical strength and strength to acid attack on cementitious composites with incorporation of silica nanoparticle

Thainara Longo<sup>1</sup> , Geovana Ferreira Nogueira de Camargo<sup>1</sup>, Michel Fernando Albertim<sup>1</sup>, Dayana Ruth Bola Oliveira<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculdade Educacional de Medianeira, Laboratório de Materiais de Construção Civil. Rua Rio Branco, 1820, Centro, Medianeira, PR, Brasil.

e-mail: thainara\_longo@hotmail.com, geovanasouzanogueira@gmail.com, mfafoz@gmail.com, dayruth@gmail.com

#### RESUMO

Pesquisas na área da ciência e engenharia dos materiais têm buscado alternativas para melhorar as propriedades e características dos compósitos cimentícios. Para tanto, o uso de nanopartículas, como as nanopartículas de sílica vem sendo uma alternativa promissora no segmento de nanocompósitos, proporcionando melhorias das propriedades físicas, químicas e na durabilidade, devido a alteração na microestrutura do material. Estudos internacionais têm demonstrado benefícios com a incorporação de pequenos teores de nanossílica em concretos, pastas de cimento e argamassa, entretanto, existem divergências quanto ao teor e ao tamanho de nanopartículas de sílica incorporada, e seus respectivos efeitos nas propriedades do estado fresco e endurecido dos materiais cimentícios. Diante disso, o presente estudo tem como objetivo analisar a influência da adição de nanopartículas de sílica em compósitos cimentícios, a partir das verificações da resistência mecânica, da absorção de água e da exposição em ambientes agressivos, através de uma análise entre quatro compósitos cimentícios, sendo uma amostra de referência, e nas demais serão adicionados teores de 0,5%, 0,75% e 1,0% de nanossílica em relação à massa de cimento. Os compósitos cimentícios foram analisados mediante o ensaio de resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias, absorção de água e ataque ácido, todos aos 28 dias de cura. Diante dos resultados obtidos verificou-se que a adição de nanossílica promoveu uma maior densificação da matriz cimentícia, logo, melhorou a resistência à compressão, diminuiu a absorção de água e o ataque ácido em relação à referência. Por fim, dentre as misturas avaliadas, conclui-se que o compósito com adição de 0,5% de nanossílica apresentou as melhores contribuições à pesquisa sendo, aumento de 15,6% para resistência à compressão e redução de 4,9% para absorção de água e 0,2% e 1,4% para o ataque ácido pelo método de Miranda e pela ASTM C-267-01, respectivamente.

**Palavras-chave:** Compósitos cimentícios; Nanossílica; Resistência mecânica.

#### ABSTRACT

Research in materials science and engineering has sought alternatives to improve the properties and characteristics of cementitious composites. Therefore, the use of nanoparticles, such as silica nanoparticles, has been a promising alternative in the nanocomposite segment, providing improvements in physical, chemical and durability properties, due to the change in the material's microstructure. International studies have shown benefits with the incorporation of small amounts of nanosilica in concrete, cement pastes and mortar, however, there are divergences regarding the content and size of nanoparticles of incorporated silica, and their respective effects on the properties of the fresh and hardened state of the cement materials. Therefore, the present study aims to analyze the influence of the addition of silica nanoparticles in cementitious composites, from the verifications of mechanical strength, water absorption and exposure in aggressive environments, through an analysis between four cementitious composites, being a reference sample, and in the others, contents of 0.5%, 0.75% and 1.0% of nanosilica will be added in relation to the cement mass. The cementitious composites were analyzed using the compressive strength test at 3, 7 and 28 days, water absorption and acid etching, all at 28 days of curing. In

view of the results obtained, it was verified that the addition of nanosilica promoted a greater densification of the cementitious matrix, therefore, it improved the compressive strength, reduced the water absorption and the acid attack in relation to the reference. Finally, among the mixtures evaluated, it is concluded that the composite with the addition of 0.5% of nanosilica presented the best contributions to the research, being an increase of 15.6% for compressive strength and a reduction of 4.9% for water absorption and 0.2% and 1.4% for acid attack by Miranda method and ASTM C-267-01, respectively.

**Keywords:** Cement composites; Nanosilica; Mechanical resistance.

## 1. INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda e aperfeiçoamento da construção civil, o mercado vem exigindo materiais cada vez mais eficazes, com melhores propriedades mecânicas e maior durabilidade. Elementos estruturais com estas características desempenham com eficácia as funções previstas em projeto e, assim, suportam as deteriorações que podem ficar expostos ao longo do tempo. Com o intuito de suprir tais demandas, pesquisas sobre o uso alternativo da nanotecnologia em compósitos cimentícios têm se tornado cada vez mais promissoras [1, 2]. Dentre as nanopartículas que podem ser incorporadas em compósitos cimentícios, destaca-se a nanossílica, que devido a sua atividade pozolânica de alta reatividade tende a proporcionar materiais mais resistentes e duráveis quando comparados com os mesmos materiais sem sua utilização [2–4].

A alta reatividade da nanossílica está relacionada com a dimensão das partículas e a área superficial específica de contato. Quanto menor for o tamanho das partículas, maior a área superficial, conseqüentemente mais rápido serão as reações químicas, como as pozolânicas [5]. Desse modo, a nanossílica com sua dimensão nanométrica supera os efeitos da incorporação das adições minerais convencionais nos compósitos cimentícios, como a sílica ativa, e a cinza volante [6–8].

A incorporação de nanossílica nos compósitos cimentícios acarreta principalmente dois principais efeitos na microestrutura. O primeiro é a atuação química, que está associada com a elevada reação pozolânica das nanopartículas de sílica, visto que, a mesma reage com hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), liberado durante a hidratação do cimento, e forma o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que tendem a preencher os vazios capilares [9, 10]. Enquanto a atuação física tem efeito filler, devido ao aumento da densidade da estrutura, resultante da dispersão das nanopartículas entre os grãos de cimento, estimulando assim, uma melhor distribuição dos produtos de hidratação, ocasionando conseqüentemente um aumento da resistência [10].

ACCIONA [11], destaca que o efeito físico é mais comum nas idades iniciais dos compósitos cimentícios, devido a maior quantidade de gel formada nesse período. Além disso, o teor de nanopartículas incorporado na mistura influencia diretamente o efeito físico, visto que, quando adicionada em pequena quantidade pode não proporcionar espaço suficiente para a precipitação dos hidratados, enquanto uma alta quantidade pode dificultar a nucleação [12]. Em contrapartida, as partículas de nanossílica possuem grande tendência de aglomeração, devido a sua alta reatividade, formando grumos que podem ser prejudiciais aos materiais a base de cimento. Essas aglomerações podem diminuir a ocorrência das reações pozolânicas, em razão a redução da área superficial de contato. Além disso, quanto maior a área superficial das partículas maior será o consumo de água nas reações de hidratação, podendo diminuir a fluidez do sistema caso a quantidade de água não seja ajustada após a incorporação. Para tanto, pode-se utilizar aditivo superplastificante para melhorar a dispersão das partículas nas matrizes à base de cimento, além de aumentar a fluidez [13–16].

Os compósitos cimentícios são suscetíveis as deteriorações por ação de ambiente ácido, em razão de serem materiais porosos e de natureza alcalina. Cada material reage de maneira particular aos agentes agressivos que está submetido, sendo que, a forma e a velocidade de deterioração estão relacionadas com as características e propriedades do material e do grau de exposição. O contato do compósito cimentício com o meio ácido pode comprometer as propriedades e reduzir a durabilidade, principalmente devido a solubilização de compostos da pasta de cimento hidratada e aumento da porosidade [2, 17, 18].

Dentre as soluções ácidas que reagem facilmente com a pasta de cimento hidratada está o ácido clorídrico (HCl), que é corrosivo e se ioniza totalmente em água, podendo causar graves manifestações patológicas nos compósitos cimentícios. Efluentes industriais e a água do mar podem conter este ácido. A ação do HCl ocorre principalmente devido a reação desse com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), pois o cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ) formado (Equação 1) é solúvel e facilmente lixiviado, expondo os outros hidratos à deterioração [2, 18].



ZANG *et al.* [19] destaca que a incorporação de nanossílica em materiais cimentícios contribuí para a formação de maior quantidade de C-S-H, favorecendo a redução da porosidade, para melhor desempenho frente a permeabilidade por cloretos e melhoria da durabilidade e propriedades mecânicas. Vale salientar que não se tem muitos estudos sobre a análise de perda de massa por ataque ácido com incorporação de nanossílica.

Nesse contexto, o presente estudo visa analisar as propriedades mecânicas, a absorção de água e a resistência ao ataque ácido dos compósitos cimentícios com adição de nanossílica.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Materiais

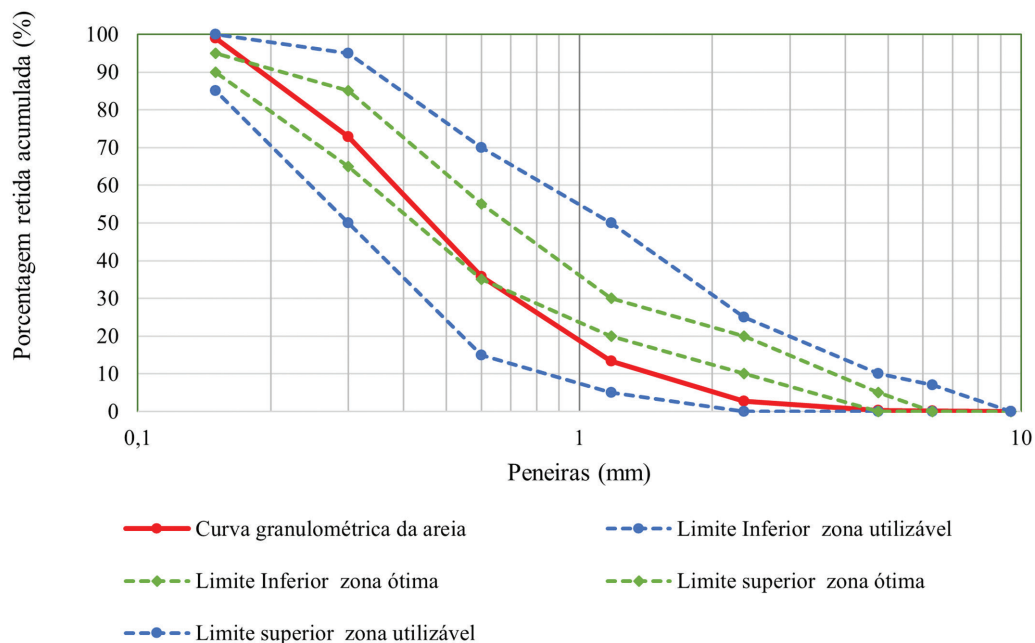
Para a produção dos compósitos cimentícios foram utilizados os seguintes materiais: cimento Portland CP V-ARI, nanossílica dispersa em água, agregado miúdo, água potável e aditivo superplastificante a base de policarboxilato. A nanossílica usada, também conhecida como sílica coloidal, é uma suspensão de partículas de dióxido de silício, tipicamente na forma esférica, com tamanho entre 2 e 5 nanômetros, dispersas em fase líquida aquosa. As características do cimento CP V-ARI e do aditivo superplastificante, estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente. A curva granulométrica do agregado miúdo e suas características estão dispostas na Figura 1 e na Tabela 3.

**Tabela 1:** Características do cimento CP V-ARI.

PROPRIEDADES	ESPECIFICAÇÕES	VALORES
Resistência à compressão (MPa)	24 horas	25,4
	3 dias	38,7
	7 dias	44,9
	28 dias	53,2
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)		4,078
Pega	Início	2h 37min
	Fim	3h 14min

**Tabela 2:** Especificações técnicas do aditivo superplastificante.

PROPRIEDADES	ESPECIFICAÇÕES
Aspecto/Cor	Líquido marrom
Base química	Solução de policarboxilato em meio aquoso
Densidade	1,06 ± 0,02 Kg/L
Dosagem recomendada	0,3 à 2,0% sobre o peso de aglomerantes
pH	3,5 ± 1,0



**Figura 1:** Curva granulométrica do agregado miúdo.

A curva granulométrica da areia encontra-se dentro da zona utilizável, e parcialmente dentro da zona ótima, conforme a Figura 1.

**Tabela 3:** Massa específica, massa unitária e absorção de água do agregado miúdo.

ENSAIOS	RESULTADOS
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,57
Massa unitária estado compactado (g/cm <sup>3</sup> )	1,68
Massa unitária estado solto (g/cm <sup>3</sup> )	1,57
Absorção de água (%)	0,22

## 2.2. Métodos

Para atingir o objetivo realizou-se um comparativo entre quatro compósitos, sendo uma amostra de referência (cimento + agregado miúdo + água + aditivo superplastificante), e as demais com adição de 0,5%, 0,75% e 1,0% de nanossílica em relação à massa de cimento. Na Tabela 4 são apresentados os compósitos em questão, suas nomenclaturas e seus respectivos componentes.

**Tabela 4:** Nomenclatura e componentes dos compósitos cimentícios.

COMPÓSITO	NOMENCLATURA ADOTADA	COMPONENTES
I	CC_REF	Referência (cimento + agregado miúdo + água + aditivo superplastificante)
II	CC_0,5NS	Incorporação de 0,5% de nanossílica em relação à massa de cimento
III	CC_0,75NS	Incorporação de 0,75% de nanossílica em relação à massa de cimento
IV	CC_1,0NS	Incorporação de 1,0% de nanossílica em relação à massa de cimento

Os ensaios realizados no estado fresco e suas respectivas normas estão dispostos na Tabela 5. Os ensaios realizados no estado endurecido, parâmetros normativos e o planejamento experimental estão apresentados na Tabela 6.

**Tabela 5:** Ensaio realizados no estado fresco e suas respectivas normas.

ENSAIOS	NORMAS
Consistência	ABNT NBR 13276/2016 [20]
Densidade de massa	ABNT NBR 13278/2005 [21]

**Tabela 6:** Ensaio realizados no estado endurecido, respectivas normas e o planejamento experimental.

ENSAIOS	DIMENSÕES DOS CPS	NÚMERO DE CP POR IDADE	IDADES ANALISADAS	NORMAS
Resistência à compressão	50 × 100 mm	5	3,7 e 28 dias	ABNT NBR 7215/2019 [22]
Absorção de água	50 × 100 mm	3	28 dias	ABNT NBR 9778/2009 [23]
Ataque ácido	50 × 50 mm	3	28 dias	Método de Miranda [24]
Ataque ácido	50 × 50 mm	3	28 dias	ASTM C 267-01/2012 [25]

A fim de verificar a influência da adição de nanossílica na perda de massa por ataque ácido realizaram-se dois ensaios, um baseado no método de Miranda [24], e outro com base na norma ASTM C 267-01 [25], ambos após 28 dias de cura. O primeiro, consiste em pesar os corpos de prova e submergi-los a uma temperatura de 65°C por um período de 45 minutos, em uma solução de 15% de HCl. Após esse tempo, os corpos de prova foram retirados da solução, secados com um papel toalha e pesados novamente. A diferença entre a massa final e a massa inicial, é a perda de massa associada com o Ca(OH)<sub>2</sub> lixiviado em meio ácido. MIRANDA [24] destaca que quanto maior for a perda de massa, maior é quantidade de Ca(OH)<sub>2</sub> presente no compósito. O segundo

ensaio, foi realizado conforme os procedimentos de exposição, pesagem e inspeção visual da norma ASTM C 267-01 [25], que consiste em lavar os corpos de prova em água corrente, secá-los em papel toalha e deixá-los em repouso por 30 minutos, em seguida, os mesmos foram pesados, fotografados e submersos em solução ácida de 30% de HCl por 56 dias. Após esse período, os corpos de prova foram retirados da solução, fotografados e pesados novamente.

Para a elaboração dos compósitos cimentícios de alta resistência, utilizou-se o traço 1:1 (cimento:areia), em massa, conforme as pesquisas de [26–28]. Fixou-se a consistência em  $260 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$ , com base na ABNT NBR 16541 [29], relação a/c de 0,33, e a porcentagem de aditivo superplastificante em relação a massa de cimento foi variável até atingir a consistência desejada. A Tabela 7 apresenta o consumo dos materiais utilizados.

**Tabela 7:** Quantitativos dos componentes de cada argamassada.

COMPÓSITOS	CIMENTO (G)	AREIA (G)	NS (G)	SPP (G)	RELAÇÃO A/C	ÁGUA (G)
CC_REF	3300	3300	0,00	9,90	0,33	1089
CC_0,5NS	3300	3300	16,50	15,35	0,33	1089
CC_0,75NS	3300	3300	24,75	18,40	0,33	1089
CC_1,0NS	3300	3300	33,00	23,76	0,33	1089

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Índice de consistência e densidade de massa

A quantidade de aditivo superplastificante necessário para obter a consistência desejada de  $260 \pm 10 \text{ mm}$ , o índice de consistência e a densidade de massa de cada compósito cimentício estão apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8:** Resultados do índice de consistência e densidade de massa.

COMPÓSITOS	RELAÇÃO A/C	SPP (ML)*	ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA (mm)	DENSIDADE DE MASSA ( $\text{g/cm}^3$ )
CC_REF	0,33	9,90	261,00	2,07
CC_0,5NS	0,33	15,35	259,00	2,04
CC_0,75NS	0,33	18,40	257,00	2,05
CC_1,0NS	0,33	23,76	257,00	2,06

\*Em relação à massa de cimento.

Nota-se que conforme aumentou a quantidade de nanossílica, foi necessário aumentar a quantidade de aditivo superplastificante para manter o índice de consistência de  $260 \pm 10 \text{ mm}$ . Possivelmente, tal comportamento ocorre devido a elevada área superficial das nanopartículas demandarem uma maior quantidade de aditivo superplastificante, para garantir a fluidez da mistura sem adicionar água extra [13–15].

Com relação à densidade de massa, os compósitos cimentícios com incorporação de nanossílica não apresentaram variação significativa em relação à amostra de referência.

#### 3.2. Resistência à compressão

Analisando a Figura 2 é possível observar que a adição da nanossílica apresentou maior influência nas idades iniciais, conforme era esperado, devido a sua alta reatividade [30, 31]. Aos 3 dias os compósitos com adição de 0,5%, 0,75% e 1,0% apresentaram resistências de 5,4%, 10,1% e 15,9% superiores à referência, respectivamente. Aos 7 dias esses aumentos foram de 1,2%, 5,4% e 10,1%, respectivamente. Já aos 28 dias, a resistência à compressão aumentou 15,6%, 11,5% e 4,8%, em relação à referência, respectivamente. Tal comportamento pode ser atribuído a elevada reação pozolânica e a alta superfície reativa das nanopartículas, que proporcionam uma intensificação das reações pozolânicas [10, 32].

Observa-se que os compósitos não obtiveram aumento da resistência à compressão de maneira linear ao acréscimo do teor de nanossílica incorporada, corroborando com as pesquisas de [28, 33] que estudaram diferentes teores de incorporação de nanossílica e não obtiveram necessariamente, um aumento da resistência à compressão com o aumento do teor de nanossílica.

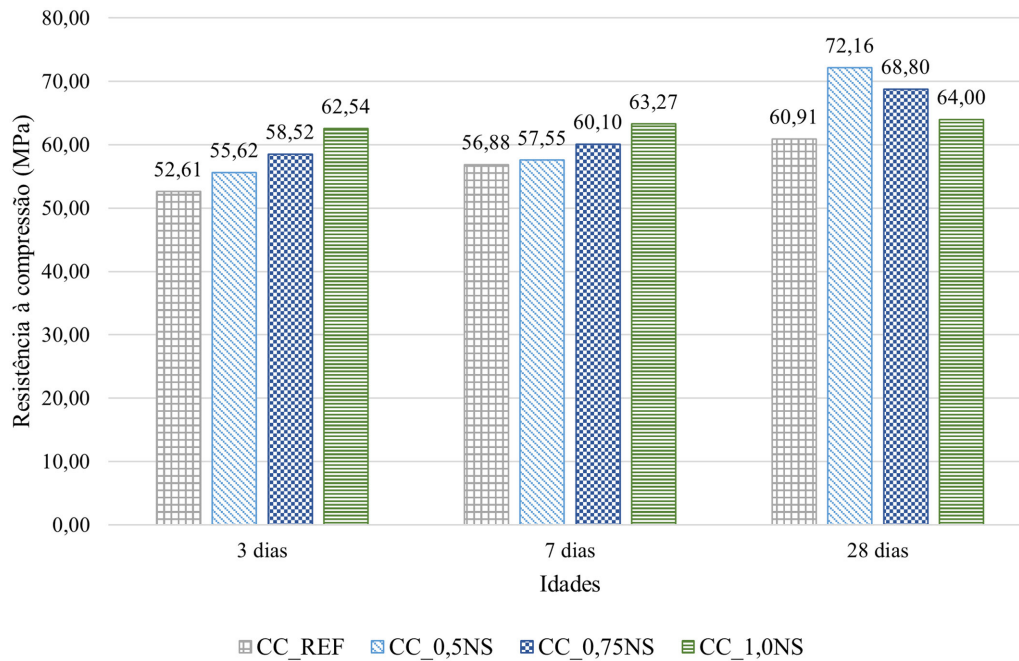


Figura 2: Resultados do ensaio de resistência à compressão.

A análise de variância (ANOVA) para resistência à compressão aos 3,7 e 28 dias, ao nível de 5%, probabilidade ( $p < 0,05$ ) está apresentada na Tabela 9 e o teste de comparação de médias de Tukey para determinar a significância entre as amostras na Tabela 10.

Tabela 9: Análise de variância (ANOVA).

FONTE	GDL	SQ	MQ	F	P	EFEITO SIGNIFICATIVO
<b>3 DIAS</b>						
Compósito	3	273,3	91,09	3,53	0,039	sim
Erro	16	413,1	25,82			
Total	19	686,4				
<b>7 DIAS</b>						
Compósito	3	32,32	10,77	0,64	0,601	não
Erro	16	269,95	16,87			
Total	19	302,27				
<b>28 DIAS</b>						
Compósito	3	587,2	195,73	3,42	0,043	sim
Erro	16	916,5	57,28			
Total	19	1503,7				

Nota: SQ – soma dos quadrados; GDL – grau de liberdade; MQ – média quadrada; Teste F – distribuição de F de Senedecor; p – 95% de confiança das variabilidades serem diferentes do ruído. Se valor-P < 0,05 o efeito é significativo, existe diferença entre as amostras.

Tabela 10: Agrupamento (Tukey) – Resistência à compressão aos 28 dias.

COMPÓSITO	N	MÉDIA	AGRUPAMENTO	
CC_0,5NS	5	71,522	A	
CC_0,75NS	5	65,22	A	B
CC_1,0NS	5	59,882	A	B
CC_REF	5	57,414		B

\*Agrupamento usando Método de Tukey e 95% de confiança.

\*Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Na Tabela 10 está apresentado o enquadramento das amostras conforme análise dos fatores. Na parte a) Análise dos fatores combinados e na parte b) Análise dos fatores isolados. Com base na análise estatística é possível observar que os dois grupos de amostras possuem em comum os compósitos contendo 0,75% e 1,0% de adição de nanossílica, ou seja, estatisticamente ambas são iguais, sendo assim, é possível otimizar o consumo de nanossílica utilizando 0,75% de adição em relação à massa de cimento ao invés de utilizar 1,0%.

De modo geral, verificou-se que o teor com adição de 0,5% de nanossílica apresentou os melhores resultados de resistência à compressão, quando comparado com os demais teores. Visto que ao dobrar o teor para 1,0% de adição de nanossílica, obteve-se resultados superiores nas idades iniciais, porém, aos 28 dias os resultados foram inferiores a metade da adição.

### 3.3. Absorção de água

Os resultados do ensaio de absorção de água estão apresentados na Figura 3.

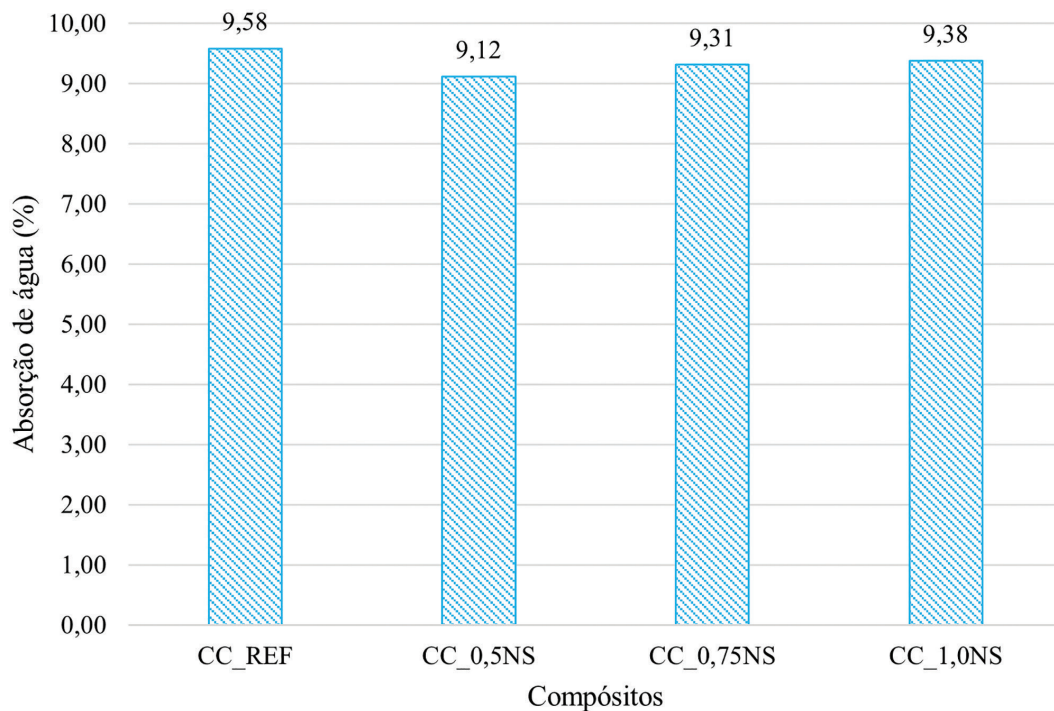


Figura 3: Resultados do ensaio de absorção de água.

Ao comparar os compósitos estudados, observou-se diminuição de 4,9%, 2,8% e 2,2% na absorção de água para os teores de 0,5%, 0,75% e 1,0% de adição de nanossílica, respectivamente, em relação à referência, corroborando com a pesquisa de [28] que também obteve redução na absorção de água com incorporação de 0,2% e 0,4% de nanopartícula de sílica dispersa em poliacarboxilato.

O compósito contendo 0,5% de adição de nanossílica apresentou os melhores resultados de redução de absorção de água, quando comparado com os demais compósitos. Acredita-se que tal resultado é decorrente da nanossílica possivelmente ter auxiliado no refinamento da microestrutura do material.

Ressalta-se que dentre os ensaios de análise de vazios em matrizes cimentícias encontram-se o ensaio de absorção de água que apresenta um indicativo de porosidade [34]. No entanto, a partir desta análise não é possível verificar a distribuição dos poros da amostra. Além disso, o ensaio normatizado pela ABNT NBR 9778 [23] avalia somente os poros permeáveis.

### 3.4. Ataque ácido

A fim de verificar a influência da adição de nanossílica na perda de massa por ataque ácido foram realizados dois ensaios, um baseado na norma ASTM C 267-01 [25], e outro com base no método de Miranda [24]. Os resultados estão apresentados na Figura 4.

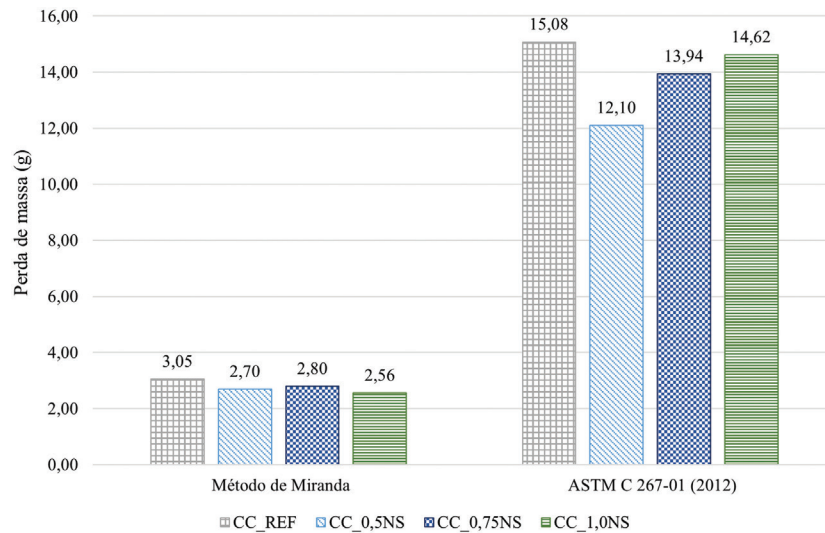


Figura 4: Resultados de perda de massa.

Com base na Figura 4 é possível notar que as reduções de perda de massa condizente ao método de Miranda [24] foram de 0,20%, 0,12% e 0,26% para os teores de 0,5%, 0,75% e 1,0% de nanossilica, respectivamente, em relação a referência. Já segundo os procedimentos da ASTM C 267-01 [25] as reduções foram de 1,40%, 0,50% e 0,20%, para os mesmos teores de adição de nanossilica, respectivamente, condizendo com os resultados obtidos na pesquisa de [26] porém o autor utilizou nanossilica em pó.

Observa-se que a adição de nanossilica auxiliou na resistência à agentes agressivos minimizando os efeitos do ataque ácido. De forma geral, o hidróxido de cálcio (CH) é a fase prioritariamente consumida na reação de ataque ácido, consequentemente, quanto mais CH presente no compósito maior será a perda de massa [24]. Desta forma, a redução da degradação dos compósitos contendo nanossilica, em ataque ácido, pode ser um indicativo da densificação da microestrutura e da menor quantidade de CH na mistura, possivelmente devido à formação de C-S-H nas reações pozolânicas. Verificando a correlação entre os métodos, na Figura 5(a), é possível notar que o melhor comportamento se deu para as amostras contendo adição de 0,5% de nanossilica, sendo que a amostra de referência foi a que mais sofreu influência ao ataque ácido, possivelmente decorrente da maior porosidade das amostras, facilitando assim o acesso da solução de ácido clorídrico para o interior das partículas. NOGUEIRA [27] realizou ambos os ensaios de ataque ácido e observou a mesma tendência.

Analisando a correlação entre o ensaio de resistência à compressão e absorção de água, Figura 5(b), nota-se a mesma tendência observada entre os métodos do ataque ácido, onde o compósito contendo 0,5% de adição de nanossilica também apresentou os melhores resultados, enquanto a referência apresentou baixo desenvolvimento à pesquisa. À medida que a absorção de água diminuiu, a resistência à compressão aumentou, tais resultados corroboram com as pesquisas de [35–37]. Possivelmente tal comportamento ocorreu devido ao refinamento da microestrutura ocasionado pela atuação da nanossilica, ou seja, pela formação dos compostos de silicato de cálcio hidratado e pela diminuição dos vazios intersticiais [38].

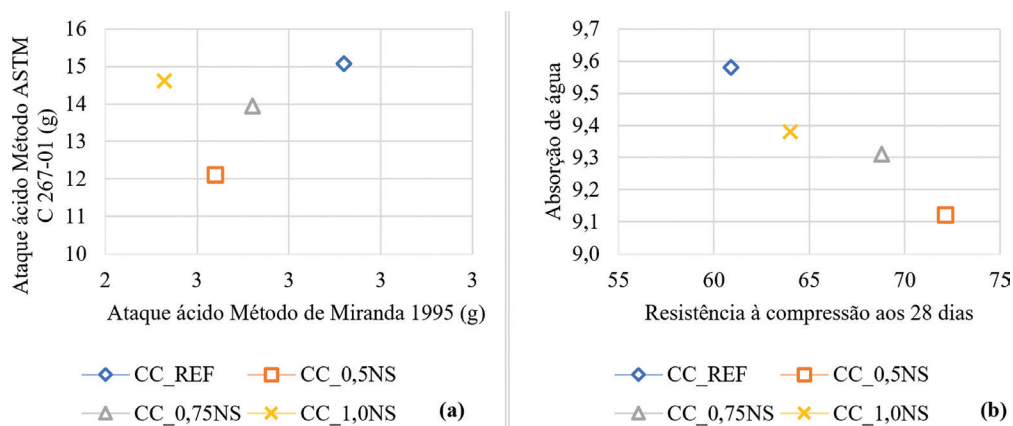


Figura 5: Comparativo entre os ensaios realizados. 5(a) Correlação entre os métodos de ensaios de ataque ácido. 5(b) Correlação entre os ensaios de resistência à compressão e absorção de água.



#### 4. CONCLUSÕES

A partir da análise dos experimentos realizados, todos os compósitos com incorporação de nanossílica dispersa em água, apresentaram melhores propriedades e características quando comparado com a amostra de referência. Verificou-se que a incorporação de nanossílica aumentou a resistência à compressão e promoveu a redução da absorção de água, indicando uma possível redução da porosidade aberta e densificação da microestrutura. Além disso, diminuiu a quantidade de hidróxido de cálcio presente nas amostras, pois minimizou a deterioração pela exposição ao ácido clorídrico.

Dentre os teores estudados (0,5%, 0,75% e 1,0%), o compósito contendo 0,5% de nanossílica foi o que apresentou os melhores resultados, visto que a resistência à compressão aos 28 dias aumentou 15,6% e a absorção de água reduziu em aproximadamente 5,0%, ambos em relação à referência. A redução da absorção de água é um indicativo da diminuição da porosidade aberta do compósito, o que pode diminuir o contato da microestrutura com agentes agressivos quando exposta à ambientes ácidos. Por fim, em ambos os ensaios de ataque ácido observou-se menor degradação em ambiente ácido, reduzindo a perda de massa em relação ao compósito de referência, ou seja, a deterioração foi menor. Ressalta-se que a fase prioritariamente consumida na reação do ataque ácido é o CH, sendo um indicativo de maior ocorrência das reações pozolânicas, formação de C-S-H e consumo do CH.

#### 5. AGRADECIMENTOS

À Faculdade Educacional de Medianeira, aos professores, a técnica do laboratório de materiais de construção e a empresa pela disponibilização da nanossílica para elaboração dos compósitos cimentícios.

#### 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Sobolev, K., Gutiérrez, M.F., “How nanotechnology can change the concrete world: Part 2”, *American Ceramic Society Bulletin*, v. 84, n. 11, pp. 16–19, 2005.
- [2] Mehta, P.K., Monteiro, J.M., *Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais*, 2 ed., São Paulo: IBRACON, 2014.
- [3] Behfarnia, K., Salemi, N., “The effects of nano-silica and nano-alumina on frost resistance of normal concrete”, *Construction & Building Materials*, v. 48, pp. 580–584, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.088>
- [4] Mohammed, A., Rafiq, S., Mahmood, W., *et al.*, “Microstructure characterizations, thermal properties, yield stress, plastic viscosity and compression strength of cement paste modified with nanossílica”, *Journal of Materials Research and Technology*, v. 9, n. 5, pp. 10941–10956, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.083>.
- [5] Jo, B.W., Kim, C.-H., Tae, G., *et al.*, “Characteristics of cement mortar with nano-SiO<sub>2</sub> particles”, *Construction & Building Materials*, v. 21, n. 6, pp. 1351–1355, 2007. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.12.020>.
- [6] Dantas, M.H.O., “Avaliação dos efeitos da adição de nanossílicas em pó e coloidal em pastas de cimento Portland”, Tese de M.Sc., Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2013.
- [7] Li, H., Xiao, H., Yuan, J., *et al.*, “Microstructure of cement mortar with nano-particles”, *Composites. Part B, Engineering*, v. 35, n. 2, pp. 185–189, Mar. 2004. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-8368\(03\)00052-0](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-8368(03)00052-0).
- [8] Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K., *et al.*, “Influence of nano-SiO<sub>2</sub> addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume”, *Construction & Building Materials*, v. 21, n. 3, pp. 539–545, Mar. 2007. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.09.001>.
- [9] Kumar, R., Singh, S., Singh, L.P., “Studies on enhanced thermally stable high strength concrete incorporating silica nanoparticles”, *Construction & Building Materials*, v. 153, pp. 506–513, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.057>.
- [10] Senff, L., Labrincha, J.A., Ferreira, V.M., *et al.*, “Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars”, *Construction & Building Materials*, v. 23, n. 7, pp. 2487–2491, 2009. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.005>.
- [11] ACCIONA Infraestructuras, *Hormigón con nanosílice*, 5º tanque enagas, Madrid, ACCIONA, 2009.
- [12] Cyr, M., Lawrence, P., Ringot, E., “Efficiency of mineral admixtures in mortars: quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength”, *Cement and Concrete Research*, v. 36, n. 2, pp. 264–277, 2006. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.07.001>.

- [13] Khaloo, A., Mobini, M.H., Hosseini, P., “Influence of different types of nano-SiO<sub>2</sub> particles on properties of high-performance concrete”, *Construction & Building Materials*, v. 113, pp. 188–201, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.041>.
- [14] Kong, D., Su, Y., Du, X., *et al.*, “Influence of nano-silica agglomeration on fresh properties of cement pastes”, *Construction & Building Materials*, v. 43, pp. 557–562, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.066>.
- [15] Senff, L., Hotza, D., Repette, W.L., *et al.*, “Effect of nanosilica and microsilica on microstructure and hardened properties of cement pastes and mortars”, *Advances in Applied Ceramics*, v. 109, n. 2, pp. 104–110, 2010. doi: <http://dx.doi.org/10.1179/174367509X12502621261659>.
- [16] Fu, Q., Zhao, X., Zhang, Z., *et al.*, “Effects of nanosilica on microstructure and durability of cement-based materials”, *Powder Technology*, v. 404, pp. 117447, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117447>.
- [17] Alves, A.P.N., “Durabilidade de argamassas poliméricas de agregados leves”, Tese de M.Sc., Departamento de Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.
- [18] Neville, A.M., Brooks, J.J., *Tecnologia do concreto : propriedades do concreto*, 2 ed, Porto Alegre, Bookman, 2013.
- [19] Zhang, P., Wan, J., Wang, K., *et al.*, “Influence of nano-SiO<sub>2</sub> on properties of fresh and hardened high performance concrete: a state-of-the-art review”, *Construction & Building Materials*, v. 148, pp. 648–658, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.059>.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 13276: Argamassa para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos – Determinação do Índice de Consistência*, Rio de Janeiro, ABNT, 2016.
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 13278: Argamassa para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos – Determinação da Densidade de Massa e do Teor de ar Incorporado*, Rio de Janeiro, ABNT, 2005.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos*, Rio de Janeiro, ABNT, 2019.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 9778: Argamassa e Concreto Endurecidos – Determinação da Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica*, Rio de Janeiro, ABNT, 2009.
- [24] Miranda, C.R., “Estudo da resistência do cimento ao ataque de soluções ácidas”, Tese de M.Sc., Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 1995.
- [25] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, *ASTM C267-01, Standard test methods for chemical resistance of mortars, grouts, and monolithic surfacings and polymer concretes*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [26] LAZARI, C.H., “Interferência da relação água/cimentícios em compósitos com incorporação de nanossilica”, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.
- [27] Nogueira, G.S.F., “Influência da incorporação de nanopartículas de sílica em compósitos cimentícios”, Tese de M.Sc., Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.
- [28] NOGUEIRA, G.S.F., SCHWANTES-CEZARIO, N., SOUZA, I.C., *et al.*, “Incorporation of nanosilica in cement composites”, *Revista Matéria*, v. 23, n. 3, pp. 1–12, 2018. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0516>.
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 16541: Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios*, Rio de Janeiro, ABNT, 2016.
- [30] Nili, M., Ehsani, A., “Investigating the effect of the cement paste and transition zone on strength development of concrete containing nanosilica and silica fume”, *Materials and Design*, v. 75, pp. 174–183, 2015.
- [31] KHALIL, A., “Effect of nanosilica on the hydration characteristics and compressive strength of blended basalt cement pastes”, *Egyptian Journal of Chemistry*, v. 59, pp. 573–595, 2016.
- [32] Kontoleonos, F., Tsakiridis, P.E., Marinou, A., *et al.*, “Influence of colloidal nanosilica on ultrafine cement hydration: physicochemical and microstructural characterization”, *Construction & Building Materials*, v. 35, pp. 347–360, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.022>.

- [33] Zhao, L., Guo, X., Liu, Y., *et al.*, “Synergistic effects of silica nanoparticles/polycarboxylate superplasticizer modified graphene oxide on mechanical behavior and hydration process of cement composites”, *RSC Advances*, v. 7, n. 27, pp. 16688–16702, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1039/C7RA01716B>.
- [34] Mashaly, A.O., Shalaby, B.N., Rashwan, M.A., “Performance of mortar and concrete incorporating granite sludge as cement replacement”, *Construction & Building Materials*, v. 169, pp. 800–818, Abr. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.046>.
- [35] Nazari, A., Riahi, S., “O efeito do sio2 nanopartículas nas propriedades físicas e mecânicas do concreto compactado de alta resistência”, *Compósitos Parte B*, v. 42, pp. 570–578, 2011. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.09.025>.
- [36] Khomich, V., Emralieva, S., Tsyguleva, M., “Modificadores de nanossílica para argamassa de cimento”, In: *Conferência Internacional de Engenharia de Petróleo e Gás*, vol. 152, pp. 601–607, 2016.
- [37] Lee, H.S., Balasubramanian, B., Gopalakrishna, G.V.T., *et al.*, “Durability performance of CNT and nanosilica admixed cement mortar”, *Construction & Building Materials*, v. 159, pp. 463–472, Jan. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.003>.
- [38] Varisha Zaheer, M.M., Hasan, S.D., “Mechanical and durability performance of carbono nanotubes (CNTs) and nanosilica (NS) admixed cement mortar”, *Materials Today: Proceedings*, v. 42, pp. 1422–1431, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.151>.