Efeito da nanossílica sobre as propriedades mecânicas de concretos de alta resistência

HIGOR VINÍCIUS STRAPASSON – MESTRANDO EM ENGENHARIA CIVIL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL,
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC

MILENA ZICATTO – ENGENHEIRA CIVIL

MARIANA ZUCCHI VARGAS – ENGENHEIRA CIVIL
CRISTINA VITORINO DA SILVA – DOUTORA EM ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO,
UNIVERSIDADE REGIONAL INTEGRADA DO ALTO URUGUAI E DAS MISSÕES – URI

FERNANDA PAVAN LORA – MESTRANDA EM ENGENHARIA CIVIL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM ENGENHARIA CIVIL,
FACULDADE MERIDIONAL – IMED

RESUMO

O CONCRETO É O MATERIAL MAIS UTILIZADO NA CONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES NO BRASIL. POR INTERMÉDIO DOS AVANÇOS TECNOLÓGICOS, INTRODUZIU-SE NO MERCADO O CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA (CAR) ALIADO À NANOTECNOLOGIA, EM BUSCA POR MELHORIAS NO DESEMPENHO MECÂNICO E NA DURABILIDADE DE ESTRUTURAS. NESTE CONTEXTO, A APLICAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS DE SÍLICA (NS) EM MATERIAL CIMENTÍCIO SE DESTACA POR INTENSIFICAR SUAS PROPRIEDADES MECÂNICAS, ATUANDO NO PREENCHIMENTO DE VAZIOS E

NA REDUÇÃO DA ZONA DE TRANSIÇÃO, AINDA NO ESTADO FRESCO DA MISTURA. COM O INTENTO DE VERIFICAR A EFICÁCIA DA ADIÇÃO DE NS EM CAR, ESTE ESTUDO PROPÕE AVALIAR O EFEITO DE SUA UTILIZAÇÃO SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO, POR MEIO DA ADIÇÃO DE TRÊS TEORES IDEAIS DE NS (0%, 1,5% E 3%) EM RELAÇÃO À MASSA DE CIMENTO PORTLAND. OS RESULTADOS ENCONTRADOS FORAM POSITIVOS EM TODAS AS PROPRIEDADES ESTUDADAS ATRAVÉS DE ANÁLISES DE VARIÂNCIA.

Palavras-chave: concreto de alta resistência, nanotecnologia, nanopartículas de sílica.

I. INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção mais utilizado pelo homem, sendo um elemento heterogêneo que tem ganhado grande espaço no cenário atual devido a sua versatilidade, resistência e durabilidade. Conciliando a necessidade de fabricação de estruturas mais esbeltas, resistentes e duráveis, com os avanços da tecnologia na construção civil, introduziu-se no mercado os concretos de alto desempenho (CAD) e os concretos de alta resistência (CAR).

Esta inclusão iniciou uma nova era na construção civil, com os concretos de terceira geração com a adição de nanomateriais. Acredita-se que a

nanotecnologia seja um dos campos de pesquisa mais promissores para melhorar significativamente o projeto de misturas, bem como o desempenho e a produção de materiais à base de cimento [1].

A revolução da nanotecnologia aprimorou uma grande variedade de produtos, serviços e indústrias, incluindo o setor da construção civil. Uma avaliação abrangente de seus efeitos na saúde humana e ambiental é essencial para o estabelecimento de regulamentos e diretrizes que permitam inúmeros benefícios aos nanomateriais, ao mesmo tempo que forneçam uma proteção adequada aos ecossistemas [2]. O campo da nanotecnologia está amadu-

recendo rapidamente enquanto área de pesquisa fértil e interdisciplinar a partir da qual novos materiais funcionais e inteligentes são desenvolvidos, como é o caso das nanopartículas de sílica.

A NS é utilizada no concreto para melhorar o seu desempenho, devido à sua ação pozolânica e efeito de preenchimento dos poros entre os grãos de cimento. Além disso, a incorporação de NS no concreto resulta em uma microestrutura mais densa e compacta, redução na absorção de água e melhoria nos parâmetros mecânicos do material, como as resistências à compressão e tração e módulo de elasticidade [3].

Considerando a escassez de pesquisas relacionadas ao desempenho

► Tabela 1 – Matriz experimental do estudo

Fatores controláveis	Combinações			Número de CP's (por combinação) a serem ensaiados
	A	B	C	
Teor de adição de NS (%)	0,0	1,5	3	
Variáveis resposta	Idades (dias)			
Absorção capilar	28	4	0	0,37±0,03
Módulo de elasticidade	28	4	0	0,37±0,03
Resistência à compressão uniaxial	28	4	0	0,37±0,03
Resistência à tração por compressão uniaxial	28	4	0	0,37±0,03
Resistência à tração na flexão	28	2	0	0,37±0,03

Fonte: Autores (2021)

mecânico do CAR com a inserção de NS, este estudo busca analisar a influência das adições de 1,5% e 3% de NS em suspensão coloidal no referido material, em comparação às amostras do concreto sem qualquer adição, verificando as características que cada teor adicionado exerce sobre o mesmo.

2. METODOLOGIA

Para compreender como a NS atua nas matrizes do CAR, definiu-se os teores ótimos de adição da mesma (1,5% e 3%) e, posteriormente, determinou-se a quantidade de corpos de provas (CP's) a serem moldados para cada ensaio proposto, de acordo com matriz experimental do estudo, conforme mostra a Tabela 1.

A caracterização dos materiais utilizados foi realizada em conformidade com as normativas vigentes, obtendo-se os seguintes resultados:

- cimento CPV-ARI, com finura por meio da peneira 75 μm igual a 1,91% e massa específica igual a 3,04 g/cm³;
- agregado miúdo e graúdo, com massa unitária respectivamente, igual a 1,54 g/cm³ e 1,60 g/cm³, massa específica igual a 2,92 g/cm³ e 2,84 g/cm³, absorção de água

igual a 0,60% e 0,78%, módulo de finura igual a 1,62 e 7,01, dimensão máxima característica (DMC) equivalente a 2,36 mm e 19mm;

- nanopartículas de sílica compostas por 15% de sólidos, com massa específica e pH igual a 1,1 g/cm³ e 9,5 respectivamente, sob forma de solução coloidal aquosa de sílica amorfa;
- sílica ativa, com massa específica igual a 2,20 g/cm³ e teor de substituição considerando 10% do volume de cimento;
- aditivo superplastificante à base de policarboxilatos, livre de cloretos e com massa específica igual a 1,1 g/cm³.

O método de dosagem experimental adotado para a produção do CAR (f_{ck} de 55 MPa) foi o desenvolvido pelo

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo (IPT) modificado por Cremonini (2001) [4]. Os resultados são evidenciados na Tabela 2.

De acordo com a Tabela 2, os valores de resistência obtidos para os três traços apresentaram resistências maiores que o f_{ck} inicial de 55 MPa. Assim, optou-se por utilizar o traço 1:5 para a confecção dos CP's, por apresentar um menor consumo de cimento.

Os ensaios foram elaborados no Laboratório de Preparo de Amostras e de Técnicas Construtivas (LAPATEC), localizado no Campus 2 da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões - URI Campus de Erechim.

Dentre a instrumentação utilizada, conforme mostra a Figura 1, foram empregados diferentes tipos de fôrmas metálicas para a moldagem das amostras de concreto. Para os ensaios de absorção de água por capilaridade e resistência à compressão uniaxial, os CP's foram produzidos em fôrmas com dimensão Ø100 x 200 mm; já para os ensaios de resistência à tração na flexão, as dimensões das fôrmas utilizadas foram de 150x150x500 mm.

Após a moldagem, os CP's foram adensados em mesa vibratória e cobertos por 24 horas com uma lona plástica para evitar a perda de água da mistura para o ambiente externo. Em seguida,

► Tabela 2 – Traços utilizados na dosagem dos concretos

m	α (%)	Traço unitário				Slump (mm)	Aditivo (%)	Consumo de cimento (kg/m ³)	H (%)	Resistência F_{cj} (MPa)	a/c
		c	a	p	sa						
2	—	1,0	0,5	1,5	0,1	150	1,387	791,0	0,065	68,70	0,20
3,5	0,5	1,0	1,25	2,25	0,1	130	0,932	519,2	0,065	63,90	0,29
5	—	1,0	2,00	3,00	0,1	150	0,856	386,5	0,065	65,26	0,39

Fonte: Autores (2021)

► **Figura 1**
Moldagem dos CP's
Fonte: Autores (2021)

os CP's foram desmoldados e mantidos em câmara úmida ($UR \geq 95\%$ e temperatura de $23^\circ\text{C} \pm 2$), para posterior realização dos ensaios.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a análise dos resultados, eliminou-se os dados hipotéticos e, em seguida, a análise dos dados foi efetuada a partir do método de variância (ANOVA) de uma via (*One Way*), com o auxílio do software *Statistica*. A Tabela 3 mostra um resumo dos resultados encontrados para cada ensaio realizado, onde a análise e a interpretação dos resultados será evidenciada através dos tópicos abaixo.

3.1 Resistência à compressão uniaxial

Analisando a Tabela 3, é possí-

vel verificar que a adição de 1,5% de NS não influenciou significativamente o desempenho do CAR quanto a sua resistência à compressão uniaxial, diferentemente da adição de 3% do nanomaterial, que culminou em resultados menores de resistência quando em comparação as amostras de referência.

De modo geral, o aumento da resistência à compressão mediante a inserção de um nanomaterial pode relacionar-se ao efeito filler e a criação de pontos de nucleação nas misturas cimentícias. Neste caso, como o aumento de resistência não foi significativo nas amostras com 1,5% de NS, então pode-se concluir pela atuação do efeito filler. Além disso, acredita-se que a não realização da dispersão do material tenha promovido a agregação das partículas de sílica, possibilitando uma instabilidade na dispersão coloidal e evidenciando reduções na resistência à compressão [5].

3.2 Resistência à tração por compressão diametral

Por meio da análise da Tabela 3, verifica-se que o efeito da adição de NS não foi significativo na variável de resposta em ambas as porcentagens de adição. Pode-se concluir pela necessidade de maiores porcentagens de adição de NS sobre o CAR, para a promoção de um aumento de resistência à compressão diametral, além de períodos maiores de cura.

De acordo com o estudo realizado por Silva Junior (2017), a resistência à tração por compressão diametral dos concretos cresce com o aumento do teor de adição de nanossílica [6]. A adição de 2% de NS, combinada com

o teor de água ótimo, apresenta um bom desempenho relacionado com a resistência à tração, justificando-se que a adição de 1,5% desta pesquisa não apresentou tal efeito significativo. Além disso, aconselha-se verificar as propriedades em idades mais avançadas de cura (por exemplo aos 90 e 180 dias) como forma de identificar aumentos na resistência, conforme identificado pelo autor mencionado acima.

3.3 Resistência à tração na flexão

Por meio da Tabela 3, percebe-se que o efeito da adição de NS não foi significativo na variável de resposta em ambas as porcentagens. Verifica-se também que as amostras com adições promoveram respectivamente aumentos de 6,48% e 9,88% na resistência à tração na flexão do CAR quando comparadas às amostras de concreto sem adição. Em ambos os teores de adição de NS, observou-se um ganho linear de resistência devido à grande capacidade que a matriz do compósito, com a contribuição das nanopartículas de sílica de resistir aos efeitos de tração.

As nanopartículas de sílica promovem uma atuação física, ocupando os espaços intersticiais existentes entre os grãos de cimento, desempenhando o papel de filler. Como resultado, uma maior densificação da matriz de cimento será obtida e, por conseguinte, uma maior resistência e durabilidade de pastas, argamassas ou concretos [7].

3.4 Módulo de elasticidade

Analisando a Tabela 3, verificou-se um aumento de 5,50% ou 2,15 GPa no concreto com adição de 1,5% de

► Tabela 3 – Resultados dos ensaios realizados

Teor de adição de NS (%)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (MPa)	p	Significância
Resistência à compressão uniaxial					
0,0	75,16	3,42	4,55	—	—
1,5	75,34	2,90	3,85	0,948853	NS
3,0	59,22	0,76	1,28	0,008502	S
Resistência à tração por compressão diametral					
0,0	5,11	0,56	10,94	—	—
1,5	5,36	0,46	8,67	0,580335	NS
3,0	5,00	0,16	3,11	0,821823	NS
Resistência à tração na flexão					
0,0	6,17	0,27	4,35	—	—
1,5	6,57	0,40	6,03	0,358665	NS
3,0	6,78	0,04	0,63	0,086699	NS
Módulo de elasticidade					
0,0	39,13	1,17	2,99	—	—
1,5	41,28	1,14	2,77	0,059596	NS
3,0	43,35	0,07	0,16	0,006641	S
Absorção de água por capilaridade					
0,0	0,19523*	0,01	7,53	—	—
1,5	0,22794*	0,02	7,90	0,569904	NS
3,0	0,21645*	0,03	15,49	0,558836	NS

p: nível de significância; S: valor significativo; NS: valor não significativo. Se $p < 5\%$ = efeito significativo. *valores médios de absorção após 72 h (g/cm²).

Fonte: Autores (2021)

NS em relação ao concreto referência, não apresentando efeito significativo na variável de resposta. Já, a adição de 3% de NS obteve uma influência significativa e positiva da incorporação de NS nos compósitos, onde a adição obteve um acréscimo de 10,7% em relação ao concreto referência. Diante disso, observou-se um aumento contínuo no módulo de elasticidade em ambas as porcentagens devido à grande flexibilidade transversal que as nanopartículas de sílica possuem em resistir aos efeitos.

Segundo Mendes (2016), o módulo de elasticidade pouco se altera em função da quantidade de nanossílica, assim como a densidade do material. A presença de agregados e a interface matriz-agregado são fatores determinantes no módulo de elasticidade do concreto, que atribuem a nanossílica um efeito diferente do observado em matrizes cimentícias, sendo um destes fatores que contribuíram para os baixos ganhos no módulo de elasticidade desta pesquisa [8].

3.5 Absorção de água por capilaridade

Através da análise da Tabela 3, observa-se que tanto o concreto sem adição quanto o concreto com adição de NS apresentaram um comportamento linear de crescimento. Ainda, verificam-se aumentos de 16,8% e 10,9% na absorção média capilar dos concretos com adição de NS, sem a promoção de efeitos significativos nas variáveis de resposta.

Devido ao tamanho reduzido das nanopartículas de sílica, as mesmas acabam preenchendo os vazios existentes na mistura, propiciando um maior

empacotamento da matriz cimentícia e diminuindo significativamente o diâmetro dos poros. No CAR, a água permeia pela matriz e também pela interface matriz-agregado; pode-se concluir que é provável que os parâmetros relacionados a permeabilidade dos concretos, principalmente em relação a interface matriz-agregado, são influenciados pela adição de NS, explicando, em parte, os resultados aqui obtidos.

3.6 Análise comparativa dos resultados obtidos para as variáveis de resposta

A Tabela 4 contém um resumo comparativo dos resultados obtidos para as variáveis de resposta, analisadas em porcentagem, com relação ao concreto referência. A Figura 2 mostra um compilado de todos os ensaios.

Conforme a Tabela 4, a incorporação de 1,5% de NS proporcionou um leve crescimento de 1,08% na resistência à compressão uniaxial e um aumento de 4,89% na resistência à tração por compressão diametral. Nos ensaios de resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade, ocorreram acréscimos de 6,5% e 5,5%, respectivamente, em comparação ao concreto referência. Em ambos os ensaios supracitados, os aumentos de resistência não foram expressivos.

A adição de 3% de NS promoveu reduções de 21,2% na resistência à compressão uniaxial e 1,96% na resistência à tração por compressão diametral. Em contrapartida, os ensaios de resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade proporcionaram acréscimos de 9,9% e 10,9%, em relação ao concreto referência.

► Tabela 4 – Resumo comparativo dos resultados obtidos para as variáveis de resposta

Teor de adição (%)	Variáveis de resposta				
	Resistência à compressão uniaxial	Resistência à tração por compressão diametral	Resistência à tração na flexão	Módulo de elasticidade	Absorção de água por capilaridade
0,0	Referência	Referência	Referência	Referência	Referência
1,5	↑ 1,08%	↑ 4,89%	↑ 6,48%	↑ 5,50%	↑ 16,75%
3,0	↓ 21,21%	↓ 1,96%	↑ 9,88%	↑ 9,25%	↑ 10,87%

Fonte: Autores (2021)

De modo geral, as adições de NS indicaram que o desempenho do concreto é melhorado, acreditando-se que os acréscimos estão relacionados ao efeito filler e a reação pozolânica da matriz cimentícia. O tamanho reduzido das nanopartículas fornece uma área de superfície maior, promovendo uma aceleração da taxa de hidratação e das reações pozolânicas [9].

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na análise estatística dos resultados, verificou-se que a adição de NS influenciou significativamente apenas as amostras de CAR contendo 3% de NS, mediante o ensaio de módulo de elasticidade, em comparação ao concreto referência (sem nenhuma adição).

Dentre todas as variáveis de resposta, a absorção média de água por capilaridade apresentou o maior quantitativo em relação ao concreto de referência (16,8%), constatando-se como um efeito desfavorável na zona matriz-agregado, o que favorece o acesso de agentes agressivos e, posteriormente, a degradação do material. A água é o agente responsável por transportar substâncias que podem causar danos ao concreto e, por isso, é necessário reduzir o seu fluxo para o interior do material, assim evitar danos ao mesmo a partir da sua microestrutura. Consideramos necessário desenvolver uma

nova fase de estudos focando-se na otimização da dispersão/funcionalização das nanopartículas de sílica que deverá envolver inclusive a caracterização da NS por técnicas químicas apropriadas como a espectrometria de Raman.

Acredita-se também que os pequenos acréscimos de quantitativos obtidos nas variáveis de resposta devem-se a não utilização do método de dispersão/funcionalização das na-

nopartículas de sílica, mesmo o nanomaterial já estando disperso em meio aquoso. Conforme cita a literatura, a dispersão do material é necessária, já que as partículas tendem a se aglomerar, devido a influência de forças de Van Der Waals, que reduzem as superfícies livres das moléculas e resultam na redução do seu desempenho dentro da matriz cimentícia [10].

De modo geral, as adições de 1,5% e 3% de NS não apresentaram efeitos satisfatórios no CAR. Esperava-se que a adição de NS promovesse um aumento na resistência do concreto, tornando a zona de transição mais compacta e coesa. Conclui-se, então, a necessidade de redução da adição na ordem de 1% de NS para que ocorram significativas melhorias nas propriedades

► Figura 2

Ensaios realizados: a) Resistência à compressão uniaxial; b) Módulo de elasticidade; c) Resistência à tração por compressão diametral; d) Resistência à tração na flexão; e) Absorção capilar

Fonte: Autores (2021)

mecânicas do material, tanto no estado fresco como endurecido.

É importante salientar que, atualmente, os maiores desafios encontrados para a inserção das nanopartículas

de sílica na construção civil é a sua escassa produção industrial e os elevados custos relativos a mesma. Desta forma, demonstra-se necessário o crescimento da nanotecnologia no setor

da construção civil, em conjunto com investimentos notórios para o seu desenvolvimento, permitindo antever um sucesso crescente da aplicação desta tecnologia a médio e a longo prazo. ➡

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SAID, A. M. et al. Properties of concrete incorporating nano-silica. Construction and Building Materials. v. 36, p.838-844, nov. 2016. Elsevier.
- [2] LEE, J.; MAHENDRA, S.; ALVAREZ, P. J. J. Nanomaterials in the Construction Industry: a review of their applications and environmental health and safety considerations. Acs Nano, v. 4, n. 7, p. 3580-3590, jul. 2010. American Chemical Society (ACS).
- [3] SINGH, L. P. et al. Beneficial role of nanosilica in cement based materials – A review. Construction and Building Materials. v. 47, p.1069-1077, out. 2013. Elsevier.
- [4] CREMONINI, R. A. et al. Desenvolvimento de um método de dosagem de concretos de alta resistência com baixo consumo de cimento, IBRACON, 2001.
- [5] SOUSA, I. P. S. Obtenção da nanossílica funcionalizada visando o uso como aditivo em misturas cimentícias. 2017. 89 f. Dissertação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia/GO, 2017.
- [6] SILVA JUNIOR, P. F. Estudo da estabilidade dimensional de concretos de alta resistência com adição de polímero superabsorvente e nanopartículas de sílica. 2017. 368 f. Tese, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.
- [7] SENFF, L.; HOTZA, D.; REPETTE, W. L. Comportamento reológico de pastas de cimento com adição de sílica ativa, nanossílica e dispersante policarboxílico. Revista Matéria, v. 15, nº 1, p. 12-20, 2010.
- [8] MENDES, T. M. Efeito da nanossílica em matrizes cimentícias de ultra alta resistência. 2016. 113 f. Tese, Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- [9] SAID, A. M. et al. Properties of concrete incorporating nano-silica. Construction And Building Materials, v. 36, p. 838-844, nov. 2012. Elsevier BV.
- [10] YANG, R. Y. et al. Agglomeration of fine particles subjected to centripetal compaction. Powder Technology, v. 184, 2008.

PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON/ABECE

Macrofibras poliméricas para concreto destinado a aplicações estruturais: definições, especificações e conformidade

Elaborada pelo CT 303 – Comitê Técnico IBRACON/ABECE sobre Uso de Materiais não Convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras, a Prática Recomendada especifica os requisitos técnicos das macrofibras poliméricas para uso em concreto estrutural.

A Prática Recomendada abrange macrofibras para uso em todos os tipos de concreto, incluindo concreto projetado, para pavimentos, pré-moldados, moldados no local e concretos de reparo.

AQUISIÇÃO

www.ibracon.org.br (Loja Virtual)

DADOS TÉCNICOS

ISBN: 978-85-98576-29-9

Edição: 1ª edição

Formato: eletrônico

Páginas: 37

Acabamento: digital

Ano da publicação: 2017

Coordenador: Eng. Marco Antonio Carnio

PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON/ABECE

MACROFIBRAS POLIMÉRICAS PARA CONCRETO
DESTINADO A APLICAÇÕES ESTRUTURAIS

COMITÊ 303: Materiais não convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras

GT4: Caracterização de materiais não convencionais e fibras para reforço estrutural

Coordenador: Eng. Marco Antonio Carnio
Representante CTA: Sofia Maria Carrato Dinis

Patrocínio