

Efeito da Redução do Teor de APTES da Nanossilica Funcionalizada com Aminosilano nas Propriedades Mecânicas dos Materiais Cimentícios

Andréia de Paula¹, João Henrique da Silva Rêgo²

¹ Universidade de Brasília – UNB / paula_adp@yahoo.com.br

² Universidade de Brasília – UNB / jhenriquerego@unb.br

Resumo

A utilização de materiais cimentícios suplementares (SCM's) como substituição de parte do cimento Portland tem sido estudada, buscando melhorar as propriedades mecânicas e duráveis da pasta de cimento e reduzir a quantidade de cimento utilizada nas misturas cimentícias. Segundo Xu *et al.* (2016), os efeitos das nanopartículas nas propriedades de materiais à base de cimento podem desempenhar um papel importante para um uso eficiente desse material, como na produção de concreto de ultra-alto desempenho (UHPC), um dos tipos de concreto mais promissores, desenvolvido na última década. Estudos mostram que a utilização de NS em substituição ao cimento tem resultado na melhoria da resistência a compressão e no aumento da resistência à penetração de água, o que influencia fortemente na durabilidade. Todavia, um dos muitos desafios a serem vencidos no emprego da NS é a aglomeração das nanopartículas. Por isso, alguns pesquisadores começaram a promover mudanças na superfície da NS, processo chamada de funcionalização. Este trabalho propõe a utilização de NS funcionalizada (NSF) com baixos teores de 3-aminopropiltriétoxissilano (APTES) como substituição de parte do cimento nas argamassas, e avaliar seu efeito nas propriedades mecânicas das argamassas. Serão investigadas cinco argamassas, com diferentes teores de funcionalização, cujas resistências a compressão serão avaliadas aos 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação. Os resultados encontrados mostram que nas idades iniciais a argamassa com NS apresentou ganho de resistência a compressão em relação a argamassa de referência. Após os 3 dias de hidratação as argamassas com NSF iniciam um ganho expressivo de resistência, obtendo melhores resultados quando comparadas com a argamassa com NS, o que comprova que o retardo na hidratação do cimento em argamassas com NSF é benéfico para a matriz cimentícia. Os resultados encontrados nessa pesquisa divergem com os resultados encontrados por Martins (2022), sendo necessário um aprofundamento na discussão do tema.

Palavras-chave: Nanossilica; funcionalização; APTES; cimento Portland; concreto de alto desempenho

1 INTRODUÇÃO

O uso de nanopartículas é uma tendência atual. Segundo Xu *et al.* (2016), nos últimos anos, os efeitos das nanopartículas nas propriedades de materiais à base de cimento têm sido amplamente investigados e podem desempenhar um papel importante para um uso eficiente do cimento. Devido aos seus tamanhos de partículas finas, área superficial notável e alta reatividade, a NS se apresenta como uma nanopartícula com grande potencial de utilização em materiais à base de cimento.

A NS possui uma reatividade pozolânica rápida e um efeito acelerador na hidratação do cimento (SENF *et al.*, 2009; MADANI *et al.*, 2012). Pesquisas demonstraram um ganho na resistência à compressão de misturas formuladas com nanopartículas de sílica (FENG *et al.*, 2020); FERNÁNDEZ *et al.*, 2013). Além disso, segundo Mendes e Repette (2019) e Fernández *et al.* (2013), o efeito de empacotamento que melhora a distribuição granulométrica, reduzindo a porosidade e a pozolanidade entre NS e hidróxido de cálcio (CH) produzindo silicato de cálcio hidratado (C-S-H), são os principais efeitos da NS na microestrutura da matriz do cimento Portland.

Todavia, a utilização de NS na matriz cimentícia traz alguns desafios a serem vencidos, tais como: diminuição nos valores de slump flow causando um efeito significativo na quantidade de água necessária na mistura e a alta reatividade da NS nas idades iniciais que pode formar uma camada de C-S-H na superfície dos grãos de clínquer e dificultar a hidratação completa desse material. Além disso, a quantidade excessiva de NS pode causar aglomeração, devido à dispersão inadequada, o que resulta em efeitos negativos sobre o comportamento reológico, trabalhabilidade e propriedades endurecidas finais de compósitos de cimentos (DURGUN e ATAHAN, 2017; REN *et al.*, 2020).

Outro efeito indesejado é o rápido ganho de resistência nas idades iniciais introduzido pela utilização de NS, que traz como consequência negativa a retração autógena. Segundo Wang *et al.* (2020) isso se deve ao fato da NS com alta atividade pozolânica interferir na hidratação precoce, levando a um maior grau de hidratação do cimento e resultando na promoção de maior retração.

Para evitar estes efeitos indesejados, alguns aditivos têm sido utilizados, como superplastificantes e aditivos redutores de retração, visando controlar os efeitos negativos que a NS pode trazer para as misturas a base de cimento (KONG, DEYU *et al.*, 2013; MANZANO, 2016; GU, WEI *et al.*, 2017; XU, YANG *et al.*, 2020).

A modificação da superfície da NS através de processos de funcionalização tem se apresentado como uma solução para vencer os desafios na utilização de NS nas misturas a base de cimento. (COLLODETTI *et al.*, 2014; MONASTERIO *et al.*, 2015; GU, WEI; *et al.*, 2017; GU *et al.*, 2018; HUANG *et al.*, 2020; DILEEP *et al.*, 2021). A funcionalização, é o processo de anexar grupos funcionais à superfície de nanopartículas hidrofóbicas, a fim de melhorar o comportamento hidrofílico desses materiais.

A fim de vencer os desafios para a utilização de NS em materiais cimentícios, alguns pesquisadores começaram a promover mudanças na superfície da NS (processo chamada de funcionalização) a fim de criar adaptações de acordo com a necessidade (Collodetti *et al.*, 2014; Monasterio *et al.*, 2015; Pérez *et al.*, 2015; Gu *et al.*, 2016; Gu, Ran, *et al.*, 2017; Huang & Wang, 2017; Gu *et al.*, 2018; Azevedo & Gleize, 2018). A presença de grupo silanóis na superfície da sílica permite que ocorra a sua modificação química, produzindo novos materiais com as mais variadas aplicações tecnológicas.

Segundo Fraga *et al.* (2021) e Martins (2022) a funcionalização é um processo químico que consiste em incluir novas funções químicas a nano partícula. Em se tratando da NS, tal reação química substitui os grupos silanóis (OH) da sua superfície por outra função de maior interesse. Este processo também é chamado de silanização. Através de ligações covalentes entre as partes, obtém-se, um novo híbrido com interface orgânico/inorgânico, que pode apresentar características diferentes das apresentadas pelos materiais que o compõe, isoladamente (Martins, 2022).

Segundo Fraga *et al.* (2021) e Martins (2022), o efeito do NSF na matriz cimentícia depende de vários fatores como o agente funcionalizante, o teor do material funcionalizante enxertado no NS, e a relação água/cimento (a/c) ou água/ligante (a/b) além do teor de adição do nanomaterial cimentício suplementar (SNCM) no compósito cimentício.

De acordo com Collodetti, Gleize e Monteiro (2014), Vasconcellos *et al.* (2020) e Fraga *et al.* (2021) a cinética de hidratação de pastas de cimento é alterada com a incorporação da NSF quando comparada com uma pasta de referência contendo apenas cimento ou com uma pasta contendo NS. Os efeitos variam de acordo com o grupo químico utilizado, porém, em geral, há um atraso na hidratação do cimento.

Conforme relatado por Fraga *et al.* (2021), várias pesquisas tratam de diferentes grupos funcionais para funcionalizar a NS, porém o que mais tem se destacado são os aminosilanos. Para Fraga *et al.* (2021), os aminosilanos são conhecidos por terem uma polaridade que permite que eles sejam dispersos em meio iônico (como Portland pastas de cimento) mais facilmente do que outros grupos orgânicos, como os grupos silanol presentes na NS. De acordo com Collodetti *et al.* (2014) enxertos de siloxanos em partículas de NS podem retardar a reação pozolânica da NS, fazendo com que mais partículas de NS fiquem disponíveis para preencher os poros capilares do concreto.

Várias pesquisas têm sido realizadas utilizando como agente funcionalizador da NS os aminosilanos (Rong *et al.*, 2020; Collodetti *et al.*, 2014; Monastério *et al.*, 2015; Gu *et al.*, 2017; Vasconcello, 2021; Martins, 2022), encontrando resultados positivos tais como: melhor dispersibilidade, melhoria na resistência a compressão em idades posteriores, aumento do período de indução, formação do C-S-H adicional, aumento no comprimento das cadeias de silicato, alteração na microestrutura do gel C-S-H, retardo da hidratação do cimento, redução na demanda por aditivo, melhora na trabalhabilidade e redução do volume de poros total.

Algumas dessas pesquisas, observaram que o teor de agente funcionalizador é um fator importante a ser estudado, pois segundo Collodetti (2013) e Bergna (2006) há um número máximo de OH disponíveis na superfície da NS para enxerto de grupos funcionais. Ou seja, há um valor de concentração de agente funcionalizador que promove a saturação da superfície da NS. De acordo com Martins (2022), quando a concentração de OH na superfície da NS começa a diminuir há uma tendência de formação de multicamadas de funcionalização, ou seja, a ligação do radical funcionalizado se ligando a outro radical, criando longas cadeias poliméricas.

Para Martins (2022) a variação da proporção das funcionalizações da NS com aminosilano provocam alterações quanto a cinética de hidratação, na formação do C-S-H, na distribuição de tamanho dos poros e na resistência à compressão das pastas de cimento Portland. Nos estudos de Martins (2022) a NS foi funcionalizada com proporção em volume de APTES/NS de 4/60mL, 6/60mL e 8/60mL, sendo a amostra P-NSFA4 (funcionalizada com 4mL de APTES) a que apresentou resultados mais adequados para utilização em materiais cimentícios de alto desempenho, por esta razão, o presente estudo buscar dar continuidade as pesquisas de Martins (2022) avaliando teores ainda menores de funcionalização com APTES.

Este trabalho tem como tema o efeito da redução do teor de APTES da nanossilica funcionalizada com aminosilano nas propriedades mecânicas dos materiais cimentícios, dando continuidade e uma contribuição importante aos estudos já realizados nessa área, uma vez que o teor de APTES sobre a NS pode influenciar no efeito da NS funcionalizada nos materiais cimentícios.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para o desenvolvimento do programa experimental, foram utilizados os seguintes materiais: Cimento Portland CP-V ARI; Nanossilica coloidal em suspensão com aproximadamente 30% de concentração de nano partículas de SiO₂ (NS); Aditivo superplastificante Tipo 2 (NBR 11768-1:2019); Dispersante: 3-Aminopropiltriétoxissilano (APTES) com 99% de pureza; Dispersante: Diclorometano 99,8% P.A ACS; Água deionizada e Água.

Após a escolha dos materiais a serem utilizados, iniciou-se o programa experimental, com a preparação das amostras de NSF com 1, 2 e 4 mL de APTES, de acordo com a metodologia utilizada por Martins (2022). Em seguida, a fim de investigar a influência da incorporação das NSF's produzidas com diferentes proporções de APTES/NS na resistência a compressão aos 1, 3, 7 e 28 de hidratação das argamassas de cimento, para tanto foram moldadas cinco diferentes argamassas de cimento com a mesma relação $a/agl = 0,35$. A argamassa A-NSFA4 foi tomada como amostra de referência, pois de acordo com as pesquisas de Martins (2022) foi a NSF que apresentou melhor resultado. A nomenclatura e a composição dos traços para as 5 argamassas estão apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1– Nomenclatura e composição das argamassas

Pasta de Cimento	Abreviação	Cimento (g)	Água (g)	Areia Normal em 4 frações	NS (g)	NSF1 (g)	NSF2 (g)	NSF4 (g)	Aditivo SP (%)	Espalhamento (mm)
100% CP V	A-REF	700	241,9	335 x 4	-	-	-	-	0,6	190,89
99% CP V + 1% NS	A-NS	693	207,35	335 x 4	48,27	-	-	-	1	164,17
99% CP V + 1% NSFA1	A-NSFA1	693	196,18	335 x 4	-	50,69	-	-	1	202,83
99% CP V + 1% NSFA2	A-NSFA2	693	197,46	335 x 4	-	-	49,97	-	0,9	184,05
99% CP V + 1% NSFA4	A-NSFA4	693	199,11	335 x 4	-	-	-	48,27	0,9	186,33

Na preparação das argamassas, o teor de aditivo superplastificante (SP) utilizado para as argamassas foi determinado na produção das pastas, de forma que as mesmas tivessem um espalhamento de 110 ± 10 mm, no ensaio de mini slump. Para manter a relação a/agl exata, foi descontada as quantidades de água da NS em suspensão aquosa, das NSF's e do aditivo SP previamente determinadas pelo ensaio de teor de sólidos.

O processo de preparação das argamassas seguiu as recomendações feitas por Santos (2016). A sequência de mistura foi realizada na seguinte ordem: Primeiramente, foi colocado na cuba as porções de areia normal e cimento (componentes secos). Esses materiais foram misturados durante 4 minutos em baixa rotação (140rpm). Em seguida, foi acrescentada a água e a NS ou NSF. Após adição dos líquidos, foi realizado a mistura por 3 minutos na velocidade alta (285rpm). Depois o misturador foi desligado por 1 minuto, sendo realizado a raspagem do material aderido as paredes da cuba neste período. Por fim, foi acrescentado o aditivo SP conforme orientação do fabricante e os materiais foram misturados por mais 5 minutos na velocidade alta.

Após a verificação da consistência das argamassas pelo ensaio da mesa de consistência, foram moldados 04 corpos de prova cilíndricos (50 mm de diâmetro x 100 mm de altura), de acordo com a NBR 7215/2019, para cada idade de rompimento, ou seja, 1, 3, 7 e 28 dias para verificação da resistência à compressão das argamassas. Após moldados os corpos de prova foram armazenados em câmara úmida por 24hs, sendo desformados após este período e colocados em cura úmida em água saturada de cal para evitar a lixiviação de cálcio até a data de ruptura. Os corpos de prova foram retificados de forma a deixar a superfície o mais plana possível para que a distribuição de carga durante o ensaio de resistência a compressão se desse de maneira uniforme. Mediu-se com o auxílio de um paquímetro a largura e a altura dos corpos de prova e com o auxílio de uma balança de precisão mediu-se a massa de cada corpo de prova. Em seguida, os corpos de prova foram

submetidos a tensão de compressão na Prensa Denison modelo T.I.A / M.C com capacidade de 200.000kg até o rompimento. Tendo a carga de ruptura e a área dos corpos de prova foi possível calcular a resistência a compressão de cada corpo de prova aos 1, 3, 7 e 28 dias, sendo que a resistência adotada é a média das resistências individuais dos 4 corpos de prova da mesma idade, como preconiza a NBR 7215/2019.

3 RESULTADOS

Na Figura 1 são apresentados os resultados de resistência à compressão das argamassas de cimento Portland aos 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.

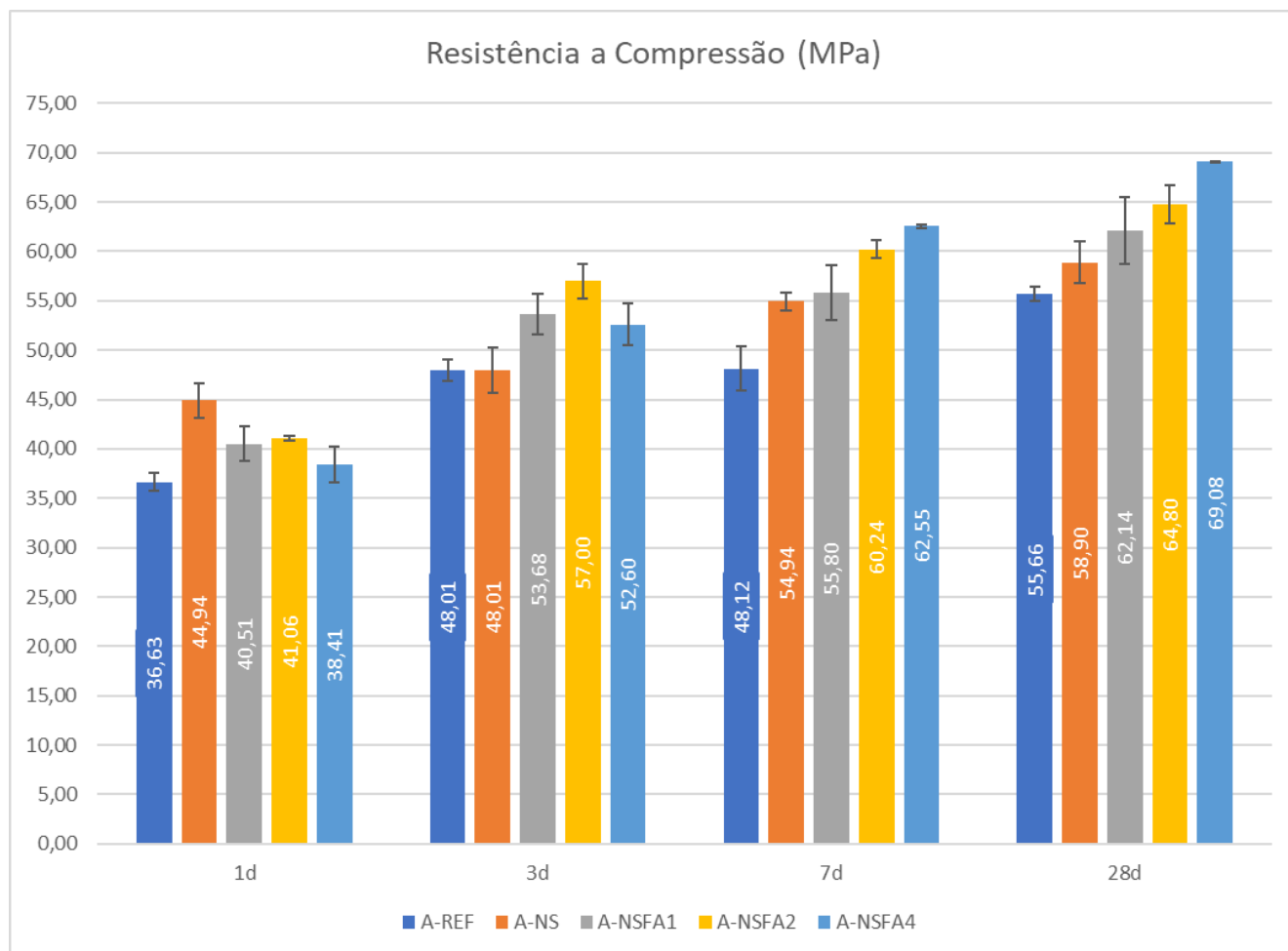


Figura 1: Resistência à compressão das argamassas aos 1, 3, 7 e 28 dias.

Analisando a Figura 1 é possível observar que com 1 dia de hidratação a pasta A-NS apresentou a maior resistência média (44,94MPa), corroborando com a literatura (ANDRADE *et al.*, 2019; FRAGA *et al.*, 2020; VASCONCELLOS, 2021; MARTINS, 2022), tendo um ganho de resistência de 22,68% em relação a A-REF. De acordo com a literatura, esse ganho de resistência em idades iniciais em pastas com NS é bastante característico, e pode ser atribuído ao efeito dos sítios de nucleação, efeito preenchimento e das reações pozolânicas. Na mesma idade, analisando as pastas com NSF, é possível observar que as 3 argamassas com NSF alcançaram resistência ligeiramente superior a A-REF (36,63MPa), porém com resistências praticamente iguais entre si, sendo A-NSFA1 40,51MPa, A-NSFA2 41,06MPa e A-NSFA4 38,41MPa.

Aos 3 dias de hidratação, a A-REF e a A-NS possuem resistência a compressão iguais. Nota-se um ganho de resistência expressivo das argamassas com NSF em comparação com os resultados

apresentados com 1 dia de hidratação. O maior aumento de resistência entre as NSF foi percebido na A-NSFA2 (39,0%), seguida da A-NSFA1 (33,0%) e A-NSFA4 (37,0%), mostrando que a razão de volume APTES/NS pode influenciar no efeito da NSF nos materiais cimentícios. Já aos 3 dias de hidratação é possível observar que as argamassas com NSF possuem resistência superior a argamassa com NS, o que está de acordo com pesquisas já realizadas por Vasconcellos (2021) e Martins (2022), que constataram um retardo no tempo de indução de pastas contendo NSF.

Aos 7 dias, foi possível observar que a resistência da A-NS voltou a ser maior que a resistência da A-REF e que todas as pastas com NSF apresentaram resistência maior que a A-REF. Destaca-se a A-NSFA4 que teve um ganho de resistência de 19,8% em comparação ao resultado alcançado aos 3 dias de hidratação, sendo a argamassa que alcançou a maior resistência entre todas as pastas aos 7 dias de hidratação, embora sua resistência tenha sido ligeiramente superior a alcançada pela A-NSFA2. As argamassas com NSF apresentam resistência superior a argamassa com NS, semelhante ao que já havia ocorrido com 3 dias de hidratação. A A-NSFA4 teve um ganho de resistência de 14% quando comparada a A-NS, seguida da A-NSFA2 (9,63%) e da A-NSFA1 (1,56%). Nota-se que quanto o maior foi o teor de APTES utilizado na funcionalização da NS, maior foi a resistência alcançada. Os resultados encontrados para as resistências aos 7 dias divergem das pesquisas de Martins (2022). Em sua pesquisa, aos 7 dias a amostra M-NSFA4 (31,20MPa) apresentou resistência inferior a M-NS (42,73MPa).

O resultado de resistência a compressão das argamassas com NSF aos 28 dias continuaram superior ao resultado de resistência a compressão da argamassa com NS. Quando comparadas com a A-NS, nota-se um ganho de resistência de 5,5 % da A-NSFA1, 10% da A-NSFA2 e 17,28% da A-NSFA4. Os resultados encontrados para as resistências aos 28 dias divergem das pesquisas de Martins (2022). Em sua pesquisa, aos 28 dias a amostra M-NSFA4 (36,65MPa) apresentou resistência inferior a M-NS (47,96MPa).

4 CONCLUSÕES

Após analisar os resultados de resistência à compressão das cinco argamassas estudadas, as seguintes conclusões podem ser observadas:

Nas idades iniciais, com 1 dia de hidratação, a A-NS apresentou ganho de resistência a compressão expressivo em relação a A-REF. O ganho de resistência nas idades iniciais em pastas com NS é um comportamento esperado e bastante característico devido ao efeito de preenchimento, que melhora a distribuição granulométrica, reduzindo a porosidade e aumentando a resistência.

Os resultados obtidos para a resistência a compressão das argamassas com 1 dia de hidratação, mostram um retardo no ganho de resistência em idades iniciais para as pastas produzidas com NSF, que de acordo com a literatura está relacionado ao prolongamento do período de indução.

O ganho de resistência das argamassas com NSF a partir da idade de 3 dias comprova que o retardo das reações de hidratação que a NSF causa na matriz cimentícia é benéfico para a hidratação do cimento em idades posteriores. Aos 7 dias de hidratação foi possível observar que a resistência da A-NS voltou a ser maior que a resistência da A-REF e que todas as pastas com NSF apresentaram resistência maior que a A-NS.

Os resultados de resistência a compressão aos 28 dias, corroboram os resultados encontrados aos 7 dias de hidratação e estão de acordo com as pesquisas já realizadas, e comprovam que o retardo das reações de hidratação da NSF é benéfico para a hidratação do cimento em idades posteriores como 28 dias ou mais, sendo necessários estudos complementares em idades avançadas, tendo em vista o

indicativo de melhoria da resistência das argamassas com maior teor de APTES em idades mais avançadas.

Com base nos resultados encontrados, observa-se que a variação da proporção em volume APTES/NS provocou alterações na resistência à compressão das pastas de cimento Portland, porém os resultados encontrados para a argamassa funcionalizada com 4ML de APTES, divergem dos resultados das pesquisas de Martins (2022) aos 7 e 28 dias de hidratação. Em sua pesquisa, a argamassa com NSF com 4mL de APTES apresentou resistência a compressão inferior a argamassa com NS. Nesse sentido, conclui-se que são necessários estudos mais aprofundados para entender melhor o comportamento das NSF's nos materiais cimentícios.

5 REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2006.
- _____. NBR 16606: Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018.
- ABDALLA, JAMAL A.; THOMAS, BLESSEN SKARIAH; HAWILEH, RAMI A.; KABEER, K.I. SYED AHMED. Influence of nanomaterials on the water absorption and chloride penetration of cement-based concrete, *Materials Today: Proceedings*, Volume 65, Part 2, 2022, Pages 2066-2069, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.427>.
- ANDRADE, D. DA S.; RÉGO, J. H. DA S.; MORAIS, P. C.; LOPES, A. N. DE M.; ROJAS, M. F. Investigation of C-S-H in ternary cement pastes containing nanosilica and highly-reactive supplementary cementitious materials (SCMs): Microstructure and strength. *Construction and Building Materials*, v. 198, p. 445–455, 2019.
- AZEVEDO, Nagilla Huerb De; GLEIZE, Philippe J.P. Effect of silicon carbide nanowhiskers on hydration and mechanical properties of a Portland cement paste. *Construction and Building Materials*, v. 169, p. 388–395, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.185>.
- BERGNA, H. E. e ROBERTS, W. O. *Colloidal Silica: Fundamentals and Applications*. Ed. CRC Press, 2006.
- COLLODETTI, GIOVANA; GLEIZE, PHILIPPE J.P.; MONTEIRO, PAULO J.M. Exploring the potential of siloxane surface modified nano-SiO₂ to improve the Portland cement pastes hydration properties. *Construction and Building Materials*, Volume 54, 2014, Pages 99-105, ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.028>.
- COLLODETTI, GIOVANA; GLEIZE, PHILIPPE J.P.; MONTEIRO, PAULO J.M. Exploring the potential of siloxane surface modified nano-SiO₂ to improve the Portland cement pastes hydration properties. *Construction and Building Materials*, Volume 54, 2014, Pages 99-105, ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.028>.
- DILEEP, P et al. . Functionalized Nanosilica for Vulcanization Efficiency and Mechanical Properties of Natural Rubber Composites. 2021.
- DOMÍNGUEZ, D.ALONSO; ÁLVAREZ-SERRANO, I.; REYES, E.; MORAGUES, A. New mortars fabricated by electrostatic dry deposition of nano and microsilica additions: Enhanced properties, *Construction and Building Materials*, Volume 135, 2017, Pages 186-193, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.011>.
- DURGUN, MUHAMMED YASIN; ATAHAN, HAKAN NURI. Rheological and fresh properties of reduced fine content self-compacting concretes produced with different particle sizes of nano SiO₂. *Construction and Building Materials*, Volume 142, 2017, Pages 431-443, ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.098>.
- FANG, YI; WANG, JIALAI; MA, HAIBIN; WANG, LIANG; QIAN, XIN; QIAO, PIZHONG. Performance enhancement of silica fume blended mortars using bio-functionalized nano-silica. *Construction and Building Materials*, Volume 312, 2021, 125467, ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125467>.

- FENG, PAN; CHANG, HONGLEI; LIU, XIN; YE, SHAOXIONG; SHU, XIN; RAN, QIANPING. The significance of dispersion of nano-SiO₂ on early age hydration of cement pastes. *Materials & Design*, Volume 186, 2020, 108320, ISSN 0264-1275. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108320>.
- FERNÁNDEZ, J.M.; DURAN, A.; NAVARRO-BLASCO I.; LANAS, J.; SIRERA, R.; ALVAREZ, J.I. Influence of nanosilica and a polycarboxylate ether superplasticizer on the performance of lime mortars. *Cement and Concrete Research*, Volume 43, 2013, Pages 12-24, ISSN 0008-8846. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.10.007>.
- FRAGA, YURI SOTERO BOMFIM; RÊGO, JOÃO HENRIQUE DA SILVA; CAPUZZO, VALDIRENE MARIA SILVA; ANDRADE, DANIEL DA SILVA. Ultrasonication effect of silica fume and colloidal nanosilica on cement pastes. *Revista Matéria*, ISSN 1517-7076 artigos e-12847, 2020, V 25, nº4. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1147>
- FRAGA, YURI SOTERO BOMFIM (2021). Efeito da funcionalização da nanossílica com diferentes razões de massa de aditivo redutor de retração em compósitos cimentícios. *Qualificação de Doutorado em Estruturas e Construção Civil*. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.
- FRAGA, YURI SOTERO BOMFIM; MARTINS, GABRIEL LIMA OLIVEIRA; RÊGO, JOÃO HENRIQUE DA SILVA. Influência da nanossílica funcionalizada com diferentes grupos funcionais nas propriedades de compósitos cimentícios: uma revisão. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, v. 10, n. 8, e27719817349, 2021 (CC BY 4.0) | ISSN 2525-3409 | DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i8.17349>.
- GU, YUE et al. . Synthesis of nanoSiO₂@PCE core-shell nanoparticles and its effect on cement hydration at early age. *Construction and Building Materials*, v. 114, p. 673–680, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.093>.
- GU, Y., RAN, Q., SHE, W., & LIU, J. Modifying Cement Hydration with NS@PCE Core-Shell Nanoparticles. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017(1), 1–13. 2017.
- GU, YUE; WEI, ZHENHUA; et al. . Characterizing cement paste containing SRA modified nanoSiO₂ and evaluating its strength development and shrinkage behavior. *Cement and Concrete Composites*, v. 75, p. 30–37, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.11.001>.
- GU, YUE et al. . Effects and mechanisms of surface-treatment of cementitious materials with nanoSiO₂@PCE core-shell nanoparticles. *Construction and Building Materials*, v. 166, p. 12–22, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.082>.
- HUANG, CHUNLONG; WANG, DONGMIN. Surface Modification of Nano-SiO₂ Particles with Polycarboxylate Ether-Based Superplasticizer under Microwave Irradiation. *ChemistrySelect*, v. 2, n. 29, p. 9349–9354, 2017.
- HUANG, Chunlong et al. . Potential Effect of Surface Modified Nano-SiO₂ with PDDA on the Cement Paste Early Hydration. *ChemistrySelect*, v. 5, n. 11, p. 3159–3163, 2020.
- KONG, DEYU; SU, YONG; DU, XIANGFEI; YANG, YANG; WEY, SU; SHAH, SURENDRA, P. Influence of nano-silica agglomeration on fresh properties of cement pastes. *Construction and Building Materials*, Volume 43. 2013, Pages 557-562, ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.066>.
- LIU, X.; FENG, P.; SHU, X.; RAN, Q. Effects of highly dispersed nano-SiO₂ on the microstructure development of cement pastes. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 53, n. 1, p. 1–12, 2020.
- MADANI H, BAGHERI A, PARHIZKAR T. A reatividade pozolânica de hidrossóis de nanossílica monodispersos e sua influência nas características de hidratação do cimento Portland. *Cem Concr Res*. 2012;42(12):1563–570. [10.1016/j.cemconres.2012.09.004](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.09.004).
- MANSUR, Alexandra A.P.; MANSUR, Herman S. Surface interactions of chemically active ceramic tiles with polymer-modified mortars. *Cement and Concrete Composites*, v. 33, n. 7, p. 742–748, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.04.003>.
- MANZANO, MANUEL ALEJANDRO ROJAS. ESTUDO EXPERIMENTAL DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS DE ALTA RESISTÊNCIA MODIFICADOS COM POLÍMEROS SUPERABSORVENTES (PSAs) COMO AGENTES DE CURA INTERNA. 2016. Universidade de Brasília, 2016. <https://repositorio.unb.br/handle/10482/22140>.
- MARTINS, G. L. O. (2022). Microestrutura de pastas de cimento Portland contendo nanossílica funcionalizada com diferentes proporções de aminosilano. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-XXA/22, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 189p.

- MENDES, T. M; REPETTE, W. L. Effect of nano-silica on Portland cement matrix. *Rev. IBRACON Estrut. Mater.* 12 (06), Nov-Dec 2019. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952019000600009>.
- MONASTERIO, MANUEL et al. . Effect of addition of silica- and amine functionalized silica-nanoparticles on the microstructure of calcium silicate hydrate (C-S-H) gel. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 450, p. 109–118, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2015.02.066>.
- REN, Jingge; LAI, Yuanming; GAO, Jianqiang. Exploring the influence of SiO₂ and TiO₂ nanoparticles on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 175, p. 277–285, 2018.
- REN, CHUNRONG et al. . Preparation and properties of nanosilica-doped polycarboxylate superplasticizer. *Construction and Building Materials*, v. 252, p. 119037, 2020: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119037>.
- RONG, Z.; ZHAO, M.; WANG, Y. Effects of Modified Nano-SiO₂ Particles on Properties of High-Performance Cement-Based Composites. *Materials* 2020, 13, 646. <https://doi.org/10.3390/ma13030646>.
- SENEFF, L. Efeito da adição de micro e nanossílica no comportamento reológico e propriedades no estado endurecido de argamassas e pastas de cimento. 2009. 192 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- VASCONCELLOS, J. S.; MARTINS, G. L. O.; ALMEIDA RIBEIRO OLIVEIRA, G. DE; LIÃO, L. M.; SILVA RÊGO, J. H. DA; SARTORATTO, P. P. C. Effect of amine functionalized nanosilica on the cement hydration and on the physical-mechanical properties of Portland cement pastes. *Journal of Nanoparticle Research*, v. 22, n. 8, 2020.
- VASCONCELLOS, J. S. (2021). Microestrutura de pastas de cimento Portland com a Incorporação de Nanossílica Funcionalizada com Grupos Amina. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD – 08A/21, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 248p.
- WANG, D. Potential Effect of Surface Modified NanoSiO₂ with PDDA on the Cement Paste Early Hydration. *ChemistrySelect*, v. 5, n. 11, p. 3159–3163, 2020.
- XU, YANG; LIU, MING; LI, PENG PENG; ZHU, LI; XIA, XIUJIAN; ZHANG, CHI; YU, YONGJIN; GUO, JINTANG. Effect of dispersant types on the rheological and mechanical properties of oil well cement paste with nanosilica. *Construction and Building Materials*, v. 271, p. 121576, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121576>.
- XU, ZHENHAI; ZHOU, ZONGHUI; DU, PENG; CHENG, XIN. Effects of nano-silica on hydration properties of tricalcium silicate. *Construction and Building Materials*, Volume 125, 2016, Pages 1169-1177, ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.003>
- YANG J., DENG S., XU H., ZHAO Y., NIE C., HE Y. Investigation and practical application of silica nanoparticles composite underwater repairing materials *Energies*, v. 14. 202. 2021.