

Avanços na Engenharia de Geopolímeros: Revisão Qualitativa sobre a Aplicação de Nanossílica como Reforço Nanoestruturado

Marco Antônio de Sá dos Santos

Resumo

Este trabalho apresenta uma avaliação crítica e qualitativa da literatura científica recente sobre a aplicação de nanossílica (NS) em matrizes geopoliméricas, com foco nos avanços promovidos por essa adição sobre as propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura dos geopolímeros enquanto alternativa de menor impacto ambiental ao cimento Portland. A revisão sistematizou estudos publicados majoritariamente entre 2020-2025, combinando análises bibliométricas (VOSviewer®) e sínteses qualitativas das evidências experimentais. Observou-se um crescimento expressivo da produção científica sobre geopolímeros modificados por nanossílica, indicando que a NS funciona simultaneamente como agente de preenchimento, sítio de nucleação e fonte adicional de sílica solúvel, acelerando a geopolimerização e refinando a porosidade da matriz. Esses efeitos traduzem-se, na maioria dos estudos, em incrementos significativos de resistência à compressão e redução da sorptividade e absorção de água, além de melhor desempenho frente a ciclos ambientais agressivos; entretanto, ganhos ótimos dependem fortemente de: forma/qualidade da NS, método de dispersão, dosagem, tipo de precursor e regime de cura. Considerando-se que tanto os geopolímeros quanto a aplicação de nanossílica ainda não são amplamente difundidos em escala industrial, essa combinação representa uma oportunidade promissora de inovação e desenvolvimento de materiais mais eficientes, duráveis e ambientalmente sustentáveis.

Palavras-chave: Geopolímeros. Nanossílica. Propriedades mecânicas. Microestrutura. Sustentabilidade.

1. Introdução

A produção de materiais aglomerantes à base de cimento tem historicamente se apoiado no Cimento Portland Comum (OPC) como principal material aglomerante [1,2]. Apesar de suas reconhecidas propriedades estruturais e da facilidade de produção [3], a utilização intensiva desse cimento acarreta impactos ambientais significativos [1]. Estima-se que sua fabricação seja responsável por cerca de 7% das emissões antrópicas globais de dióxido de carbono (CO_2), liberando aproximadamente 900 kg desse gás por tonelada produzida [1]. Além disso, os processos de descarbonatação do calcário e a queima de combustíveis fósseis exigem grande consumo de energia e recursos naturais, comprometendo a sustentabilidade do setor e motivando a busca por alternativas mais ecológicas [1].

Nesse cenário, os geopolímeros surgem como soluções promissoras e sustentáveis ao OPC [4]. Esses materiais inorgânicos são formados pela ativação alcalina de fontes ricas em alumínio e silício [5], como cinzas volantes, escórias de alto-forno e resíduos agrícolas, como cinza de casca de arroz, possibilitando a valorização de rejeitos industriais e a redução da exploração de matérias-primas virgens [6]. A principal vantagem ambiental dos geopolímeros reside na

significativa diminuição das emissões de CO_2 , que pode chegar a 70% ou 80% em comparação com a produção convencional de cimento [6]. Além disso, esses materiais apresentam elevado desempenho, com resistência mecânica elevada, durabilidade aprimorada frente a agentes agressivos, baixo calor de hidratação e estabilidade química, sendo adequados para múltiplas aplicações na engenharia [4].

Os nanomateriais têm desempenhado um papel revolucionário no aprimoramento dos materiais cimentícios, destacando-se a utilização de nanopartículas para potencializar propriedades físicas e químicas das matrizes geopoliméricas [2]. Em particular, a nanossílica (NS) destaca-se como uma das nanopartículas mais utilizadas [7], devido à sua estrutura amorfa e à elevada reatividade pozolânica, favorecendo a formação de produtos de reação mais densos e homogêneos [8]. Outras nanopartículas como a nanoalumina (NA), o dióxido de titânio (NT), os nanotubos de carbono (CNTs) e o óxido de grafeno (GO) também têm sido estudadas por contribuir significativamente para a melhoria da resistência mecânica, refino da microestrutura, resistência a agentes químicos e até mesmo introdução de funcionalidades como autolimpeza e autodetecção [7,9].

A incorporação de nanopartículas em matrizes geopoliméricas visa principalmente a melhora das

propriedades mecânicas, incluindo resistência à compressão, tração e flexão, bem como o módulo de elasticidade e a tenacidade [9]. Espera-se também a aceleração das reações de geopolimerização, com as nanopartículas atuando como sítios de nucleação e promovendo a formação de produtos de reação mais densos [8]. Consequentemente, ocorre um refino da microestrutura e uma significativa redução da porosidade, resultando em uma matriz geopolimérica mais compacta e homogênea, o que impacta positivamente a durabilidade [9].

Este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão qualitativa sistemática da literatura científica recente acerca da aplicação de nanossilica em matrizes geopoliméricas, visando compreender os avanços promovidos por essas adições nas propriedades mecânicas, de durabilidade e na microestrutura dos geopolímeros.

2. Panorama geral sobre a inserção de nanossilica em geopolímeros

Este estudo fundamenta-se em uma revisão bibliográfica com abordagem exploratória e qualitativa, voltada à análise dos estudos mais recentes que tratam da inserção de nanossilica em geopolímeros. O foco principal é compreender como essa nanopartícula vem sendo aplicada para modificar as propriedades físico-químicas, mecânicas e estruturais desses materiais, também com atenção ao desempenho e à durabilidade das matrizes ativadas alcalinamente.

A busca por publicações científicas foi realizada por meio de levantamentos sistematizados em duas bases de dados amplamente reconhecidas: *ScienceDirect* e *Springer Nature*. Para garantir a relevância e a atualidade dos conteúdos analisados, foram priorizados artigos publicados entre os anos de 2020 e 2025.

Os termos de busca utilizados foram: *geopolymer*, *nanoparticle* e *nanosilica*, permitindo a identificação de estudos que abordassem diretamente a interação entre essas três frentes de pesquisa. A combinação desses descritores possibilitou a filtragem de artigos focados tanto na formulação quanto na caracterização de compósitos modificados com nanossilica, visando uma análise crítica das tendências mais atuais da literatura científica.

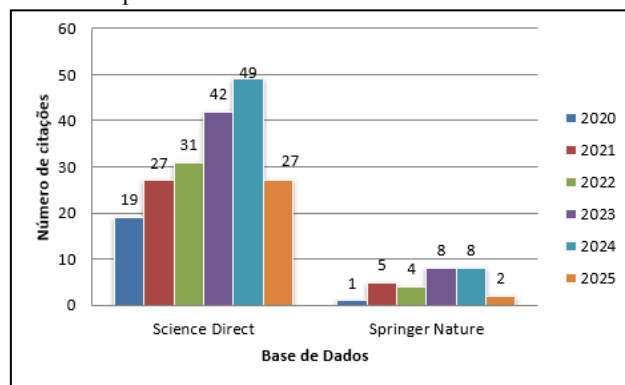
De forma complementar, foi realizada uma análise bibliométrica com o auxílio da ferramenta VOSviewer®, com o intuito de mapear as co-ocorrências entre palavras-chave, identificar autores influentes e delinear os principais eixos temáticos discutidos nos artigos selecionados. Embora os resultados encontrados demonstrem avanços significativos no uso da nanossilica para a melhoria do desempenho dos geopolímeros, também se constataram variações relevantes nas

metodologias de sínteses empregadas, nas dosagens utilizadas e nas formas de dispersão adotadas.

2.1 Citações do tema nas principais bases de dados

A fim de compreender a relevância e o volume de publicações relacionadas à inserção de nanossilica em matrizes geopoliméricas, a busca combinada no período de 2020 a 2025 evidenciam o crescimento progressivo da produção científica sobre o tema, conforme mostra o Gráfico 1:

Gráfico 1. Citações com *geopolymer*, *nanoparticle* e *nanosilica* por ano.

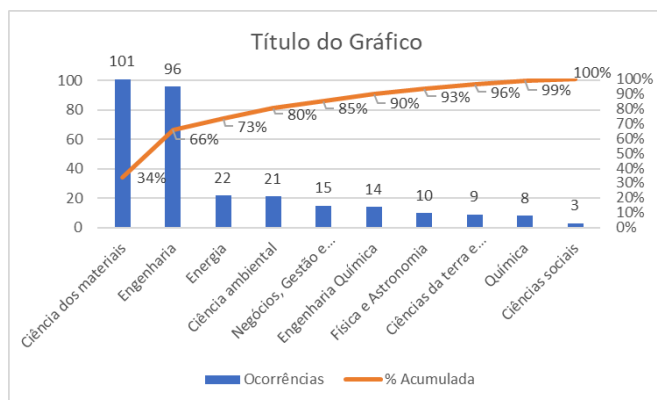


Fonte: Autoral

Nas duas bases de dados analisadas observa-se uma tendência clara de crescimento nas citações envolvendo os termos *geopolymer*, *nanoparticle* e *nanosilica*. Esse aumento expressivo reforça o caráter emergente e inovador dos geopolímeros com aditivos nanoestruturados, consolidando-se como um campo promissor de pesquisa dentro da engenharia. Ainda que bases como *ScienceDirect* e *Springer Nature* apresentem números absolutos mais modestos, também registram crescimento gradual, indicando uma consolidação temática no escopo da literatura científica.

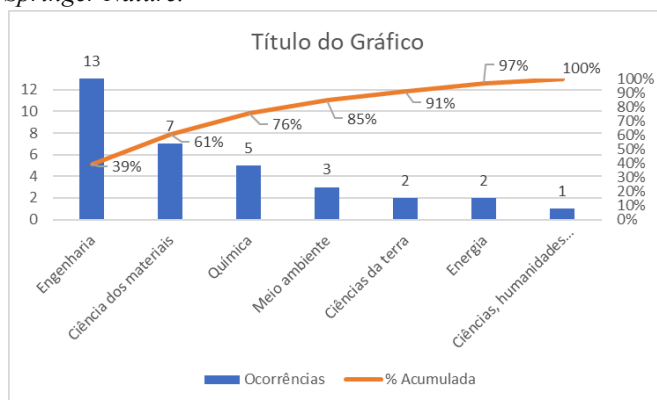
A seguir, os gráficos 2 e 3 apresentam a distribuição das áreas de pesquisa mais recorrentes nas publicações que abordam geopolímeros, nanopartículas e nanossilica, conforme indexadas nas bases ScienceDirect e Springer Nature:

Gráfico 2. Áreas de pesquisa de geopolímeros pelo *Science Direct*.



Fonte: Próprio Autor (2025)

Gráfico 3. Áreas de pesquisa de geopolímeros pelo Springer Nature.



Fonte: Próprio Autor (2025)

No gráfico 2, observa-se que o *ScienceDirect* contempla uma ampla diversidade temática, com destaque para ciência dos materiais (101 ocorrências) e engenharia (96 ocorrências), além de áreas como energia, ciência ambiental, gestão e engenharia química. Já o gráfico 3, referente ao *Springer Nature*, mostra uma concentração mais restrita, majoritariamente em engenharia (13 ocorrências) e ciência dos materiais (7 ocorrências), com menor presença de outras áreas.

Com base nesses dados, nota-se que o *ScienceDirect* se destaca por seu caráter multidisciplinar, abrangendo temas relevantes à engenharia química. Em contrapartida, o *Springer Nature* apresenta um foco mais direcionado à engenharia civil e materiais de construção.

2.2 Co-ocorrências dos tópicos analisados

Para compreender o panorama atual da pesquisa sobre a nanossilica, foi realizada uma análise bibliométrica a partir de um levantamento de 195 artigos científicos publicados entre 2020 e 2025 na base ScienceDirect. Para a visualização e interpretação dos dados, empregou-se o VOSviewer® (v.1.6.20), amplamente utilizado na construção e análise de mapas de

redes bibliométricas, permitindo representar graficamente relações baseadas em co-ocorrência de termos, coautoria e citações. Essa abordagem possibilitou identificar os eixos temáticos mais recorrentes da literatura recente e os pesquisadores com maior centralidade no campo, fornecendo um quadro robusto das tendências e lacunas de pesquisa.

Na Figura 1, mapa de co-ocorrência de palavras chave, observa-se um núcleo temático fortemente ancorado em *geopolymers*, do qual irradiam conexões diretas com *nanoparticles* e *nanosilica*. Isso evidencia que a incorporação de nanomateriais, especialmente a nanossilica, tornou-se um vetor estruturante nas discussões contemporâneas. Em torno desse núcleo, consolidam-se frentes que orbitam *microstructure*, *mechanical properties*, *durability* e *porosity*, o que sinaliza a ênfase da comunidade científica na relação entre microestrutura, propriedades e desempenho. Termos como *bond strength* e *residual mechanical properties* complementam essa frente ao indicar interesse em adesão entre matriz e reforço e manutenção do desempenho após solicitações térmicas e ambientais, como ciclos de aquecimento e resfriamento.

Os agrupamentos temáticos da Figura 1 se articulam também com uma base de materiais e de ativação. *Metakaolin*, *coal fly ash* e *coal combustion fly ash*, além de materiais ativados alcalinamente, indicados por *alkali activated materials* e *alkali activator mortar*, reforçam a presença de precursores aluminosilicáticos e da química de ativação alcalina. *Cement based materials* e *cement* aparecem como contrapontos ou como sistemas híbridos de comparação. *Waste*, *sustainable*, *life cycle assessment* e *circular economy* destacam a agenda de sustentabilidade, com foco na valorização de resíduos e na avaliação do ciclo de vida. Em paralelo, surgem frentes de reforço e de nanotecnologia, como *nanoclay*, *carbon nanotubes*, *MXenes*, *polypropylene fiber* e *composite materials*, o que sinaliza a exploração de reforços particulados e fibrosos, da nano à macroescala, para modular desempenho mecânico, tenacidade e respostas sob impacto. O conjunto sugere um campo em que a nanossilica atua como nó de interseção entre otimização microestrutural, durabilidade e sustentabilidade, em diálogo com outros nanomateriais na busca por matrizes multifuncionais.

Essa leitura integrada com a Figura 1 permite apontar três tendências. Primeiro, consolida-se o triângulo microestrutura, propriedades e durabilidade, no qual a nanossilica atua como agente de refino de porosidade e de nucleação de fases, com repercussões diretas em resistência, adesão e desempenho residual. Segundo, intensifica-se a pauta ambiental, com avaliação do ciclo de vida e economia circular orientando a escolha de precursores, como cinzas e escórias, e rotas de ativação em direção a matrizes com menor pegada. Terceiro, observam-se avanços em nanomateriais emergentes,

como os materiais bidimensionais derivados de metais de transição (MXenes), e em hibridizações com fibras poliméricas e nanotubos de carbono, a fim de explorar sinergias em compósitos geopoliméricos de alto desempenho. Em conjunto, os tópicos mais frequentes e suas interconexões confirmam que os estudos recentes têm privilegiado a engenharia microestrutural orientada a propriedades mecânicas e à resiliência ambiental e operacional, com a nanossilica como elemento central na engenharia de interfaces.

De modo complementar, a Figura 2, mapa de densidade de autores, evidencia a concentração de pesquisadores com alta produtividade ou impacto, formando ilhas de intensidade que sugerem grupos consolidados e redes de colaboração transnacionais. A visualização do mapa também evidencia o papel de redes internacionais e de coautoria recorrente, nas quais determinados grupos atuam como ponte entre subáreas, por exemplo entre desempenho mecânico e sustentabilidade e entre microestrutura e reforços nanoestruturados, favorecendo a transferência de métodos, como protocolos de ativação e rotas de dispersão de nanossilica. Essa colaboração é coerente com a natureza interdisciplinar do campo, que envolve engenharia de materiais, química e geoquímica, engenharia civil, geotécnica e ciência ambiental, ajudando a explicar a rápida difusão de práticas experimentais e de modelagem que sustentam as tendências observadas na Figura 1.

Em síntese, os dois mapas convergem para uma narrativa única que revela a centralidade de *geopolymers*, *nanoparticles* e *nanosilica* como pilares temáticos recorrentes. Esses termos se articulam diretamente com conceitos como microestrutura, propriedades mecânicas, durabilidade e sustentabilidade, delineando os principais focos da literatura recente. Paralelamente, percebe-se uma ampliação da investigação para além das aplicações habituais. As pesquisas passam a incorporar temas como adsorção, estabilização de solos e desempenho sob impacto, impulsionadas pelo uso de reforços nano e microestruturados e pela crescente demanda por soluções ambientalmente responsáveis. Além disso, destaca-se a formação de redes colaborativas densas entre autores, configurando verdadeiros hubs de difusão metodológica e temática. Essas redes não apenas sustentam a evolução do campo, como também impulsionam a emergência de nichos inovadores, como o uso de MXenes e a incorporação de avaliações de ciclo de vida em matrizes ativadas alcalinamente, cenários nos quais a nanossilica continua a exercer um papel estruturante. Esse diagnóstico bibliométrico, portanto, reforça a relevância e atualidade do presente trabalho ao situá-lo nos eixos centrais da discussão científica global.

Figura 1. Co-ocorrências de geopolímeros, nanopartículas e nanossílica pelo VOSviewer®.
Fonte: Autoral

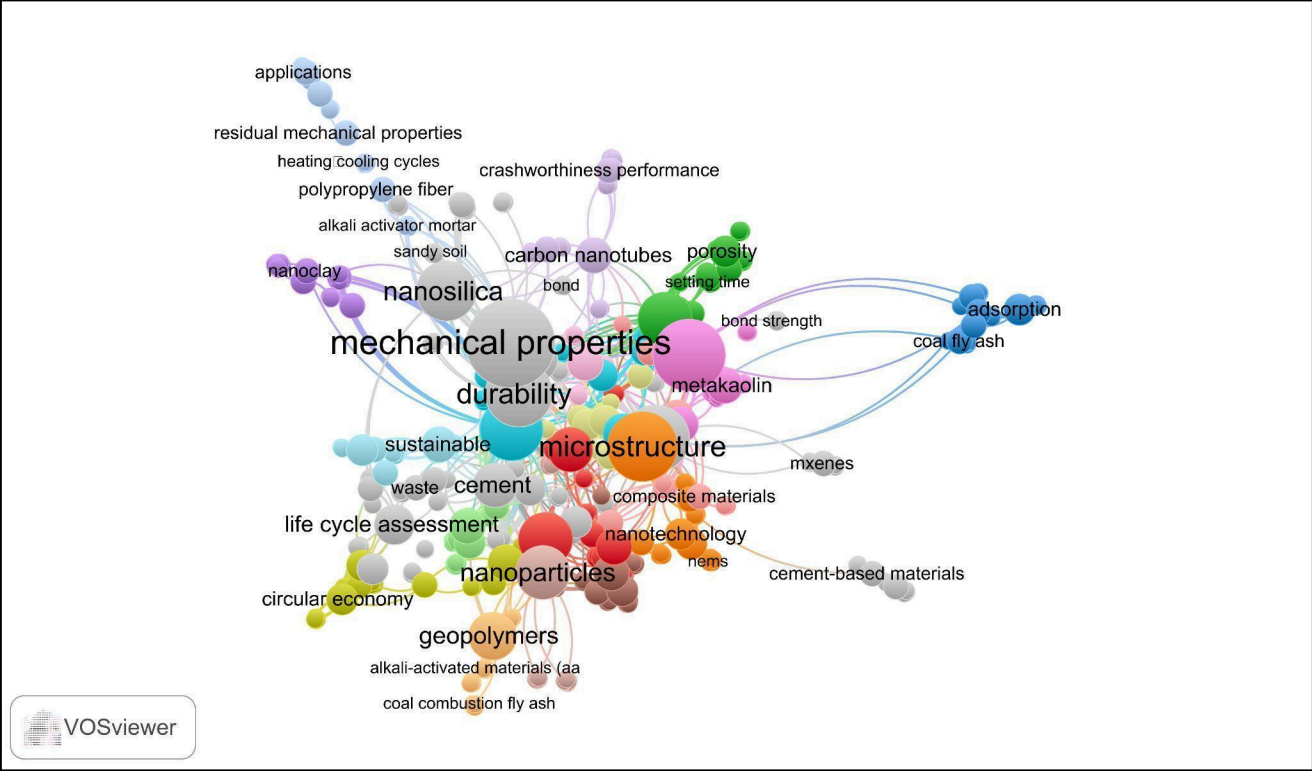


Figura 2. Coautores de geopolímeros, nanopartículas e nanossílica pelo VOSviewer®.
Fonte: Autoral



3. Sínteses das rotas principais de incorporação de nanossílica

A incorporação da nanossílica em geopolímeros visa explorar a alta área de superfície específica das nanopartículas para promover a nucleação e o preenchimento de poros, resultando em uma matriz mais densa e maior resistência [10]. A forma em que a NS é introduzida na mistura, juntamente com o controle do processo, é crucial para evitar a aglomeração, que é um desafio devido às forças de Van der Waals e à alta energia superficial [10]. Abaixo estão as principais rotas de incorporação da nanossílica, com suas características e recomendações de aplicação:

- Mistura Direta (*Dry Dispersion*):

A dispersão da NS ocorre por cisalhamento e atrito com as partículas maiores do precursor aluminossilicato e agregados [11,12]. É um método mais simples, mais direto e mais prático para a produção em larga escala, pois não exige etapas adicionais de pré-tratamento [12]. Além disso, em alguns estudos, a dispersão a seco de nanopartículas de 0-D (esféricas), como NS, mostrou melhor desempenho físico-mecânico do que a dispersão úmida [12]. É altamente suscetível à aglomeração, especialmente para dosagens mais altas de NS [13]. O pó fino também apresenta riscos de saúde ocupacional devido à inalação de nanopartículas aerotransportadas [2,14]. Recomendada para NS em pó em dosagens baixas (tipicamente até 3% em massa do ligante) pois uma dispersão inadequada reduz o efeito de modificação e pode ter um efeito negativo [13]. O uso da dispersão a seco é frequentemente integrado com a mistura mecânica, como agitação ou moagem por bolas para aumentar a eficiência de dispersão [12].

- Pré-dispersão/Coloide (*Wet Dispersion*):

A NS é dispersa em um meio líquido (água ou solução ativadora, como Na_2SiO_3) antes de ser adicionada aos sólidos precursores. Essa abordagem inclui o uso de nanossílica coloidal (CNS) ou a dispersão de NS em pó via ultrassom e aditivos químicos [12]. Utiliza alta energia de cisalhamento (mecânica/ultrassom) e/ou aditivos químicos como os superplastificantes (SPs) para romper os aglomerados de NS em nanossuspensões estáveis [12]. O ultrassom (sonicação) desagrega as nanopartículas através da cavitação [15]. O uso de SPs melhora a dispersão e a fluidez (trabalhabilidade) através da repulsão eletrostática e/ou impedimento estérico [15]. Proporciona uma dispersão mais uniforme e estável, o que potencializa o efeito de nucleação e enchimento, resultando em uma microestrutura mais densa e maior resistência mecânica [16]. O uso de CNS (forma coloidal) evita os riscos de inalação do pó [15]. O processo de

dispersão (especialmente a sonicação) pode ser demorado e energeticamente custoso em escala industrial [15]. Além disso, a alta SSA (área de superfície específica) da NS pode aumentar a demanda por água, prejudicando a trabalhabilidade (redução do slump) [17]. Altamente recomendada para obter a máxima eficiência da NS e quando se buscam ganhos de resistência inicial significativos [18].

- Impregnação por Troca Iônica (*Ion Exchange Impregnation*):

Essa abordagem é discutida de forma complementar, uma vez que atua após a incorporação convencional da nanossílica na matriz geopolimérica, sendo apresentada como estratégia adicional de funcionalização, sem substituir o método principal de adição da nanossílica. Uma solução precursora contendo íons de sílica (ou nanopartículas) é infiltrada em um substrato poroso (como tijolos, argamassa ou agregados) por absorção capilar ou aplicação de pressão/vácuo. A infiltração é seguida por uma reação de troca iônica ou precipitação no interior dos poros [19]. Permite o fortalecimento de estruturas pré-formadas ou agregados porosos (como agregados reciclados) em profundidade [19]. Por exemplo, em agregados reciclados, o tratamento com NS melhora a ligação interfacial entre a fibra e a matriz, reduzindo a porosidade e a razão Ca/Si, parâmetro diretamente associado à densidade e à qualidade microestrutural do ligante [20].

A eficácia é limitada pela profundidade de penetração e pela porosidade do substrato. Além disso, a força iônica da solução pode influenciar a estabilidade da NS na suspensão [19]. Recomendada para pós-tratamentos de reparo e consolidação [19] ou para o tratamento de agregados reciclados visando melhorar a interface com a matriz geopolimérica [20].

- Formação *In Situ* e Revestimento por Imersão (Dip-Coating)

De caráter complementar, aplicada em estágios posteriores à formação da pasta gel polimérica, a NS é gerada na superfície do precursor antes da reação final, ou formada *in situ* na matriz geopolimérica [21]. Pode envolver o crescimento de nanopartículas em torno de uma superfície (como fibras ou agregados) ou a síntese de sílica coloidal a partir de um precursor solúvel como o Tetraetil Ortossilicato (TEOS) seguida de condensação (Sol-Gel) [21]. O TEOS sofre reações de hidrólise e condensação para formar aerogel de sílica/pré-polímero de sílica com nanopartículas de SiO_2 , que é subsequentemente usado para infiltração em poros de substratos [21].

A formação *in situ* ou o revestimento podem garantir uma distribuição extremamente fina na interface

desejada (por exemplo, na Zona de Transição Interfacial - ITZ), otimizando a ancoragem [15]. O uso de Polimetilhidrossiloxano (PMHS) com TEOS pode criar uma estrutura hidrofóbica na superfície [22]. O processo sol-gel é sensível às condições de operação e pode induzir o colapso estrutural durante a secagem [22]. Além disso, requer precursores orgânicos caros (como o TEOS) e solventes, o que aumenta o custo [23]. Recomendada para aplicações de nicho onde a funcionalidade da superfície é fundamental, como impermeabilização e proteção contra eflorescência (utilizando agentes como PMHS-TEOS). É também relevante para a modificação de nanoestruturas em compósitos de alto desempenho [22].

3.1 Variáveis Críticas

O desempenho de compósitos geopoliméricos (GPCs) está intrinsecamente ligado às condições de processamento e à proporção dos materiais constituintes [24]. A otimização destes fatores é essencial para controlar a taxa de dissolução dos precursores aluminossilicatos, a formação de géis poliméricos, silicato de cálcio e alumínio hidratado (C-A-S-H) e o silicato de alumínio e sódio hidratado (N-A-S-H), e a densificação microestrutural [24].

3.1.1 Tipo e Origem do Precursor:

O precursor é a fonte primária de aluminossilicato (Si-Al), sendo os mais comuns a cinza volante (FA), a escória de alto-forno granulada (GBFS) e o metacaulim (MK) [24]. O tipo e a composição (proporção de SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , etc.) são os fatores que definem a estrutura química base e a reatividade do sistema [24]. O efeito na reatividade dos precursores geopoliméricos está diretamente relacionado à sua composição, que define a cinética de polimerização [25]. O metacaulim, por exemplo, é altamente reativo devido ao seu elevado teor de Al_2O_3 e à sua natureza amorfa [26]. Já a escória de alto-forno granulada introduz cálcio (Ca), acelerando significativamente o desenvolvimento da resistência inicial e favorecendo a formação de géis C-A-S-H [25]. Por outro lado, precursores de baixa reatividade, como a cinza volante de Classe F (FA), geralmente necessitam de cura térmica para intensificar a dissolução e a reação de policondensação [26]. Esse comportamento influencia diretamente a microestrutura e a gelificação, pois a estrutura dos géis formados, sejam N-A-S-H ou C-A-S-H, é determinada principalmente pelo tipo de precursor utilizado [26]. A GBFS, por exemplo, contribui de forma predominante para a formação de géis do tipo C-A-S-H [27], enquanto a morfologia das partículas também desempenha papel importante: partículas esféricas de FA podem atuar como núcleos ou revestimentos do gel, promovendo o preenchimento dos poros e resultando em uma matriz mais densa e coesa [28].

3.1.2 Composição do Ativador

A solução ativadora, geralmente uma mistura de hidróxido (NaOH ou KOH) e silicato de sódio ou de potássio, promove a dissolução do silício e do alumínio e fornece os íons alcalinos para a polimerização [24]. O efeito na reatividade dos íons alcalinos na geopolimerização está diretamente relacionado à natureza do cátion e à concentração da solução. O íon sódio (Na^+) tende a acelerar a policondensação devido ao seu menor raio iônico em comparação com o potássio (K^+) [29], enquanto o potássio pode favorecer a formação de oligômeros de silicato maiores, resultando em compósitos com maior estabilidade térmica e resistência à compressão [30]. O aumento da molaridade do NaOH eleva a taxa de dissolução dos precursores [31], embora concentrações excessivas possam aumentar a viscosidade, limitar a mobilidade iônica e causar coagulação rápida do gel [26].

Esses efeitos influenciam diretamente a microestrutura e a gelificação, já que a alta concentração de íons acelera a reação de geopolimerização [17] e aumenta a densidade dos géis formados, tanto C-A-S-H quanto N-A-S-H, especialmente com o aumento da razão Si/NaOH [17]. Consequentemente, o desempenho mecânico é impactado de forma significativa, sendo que a resistência à compressão geralmente cresce com a molaridade do NaOH até atingir um ponto ideal, frequentemente entre 8 e 16 mol/L [31], e a razão $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ exerce forte influência sobre a resistência final do material [29].

3.1.3 Razão Molar Si/Al:

A proporção de sílica para alumina (Si/Al) no sistema ligante determina a complexidade da rede polimérica formada, influenciando diretamente na reatividade e gelificação dos geopolímeros, afetando a estrutura do gel formado [26]. Razões moderadas, entre 1,25 e 2,0, favorecem a formação de estruturas de polisialato mais estáveis, geralmente associadas à melhor desempenho mecânico [31]. Com o aumento da razão Si/Al, observa-se maior força do sistema polimerizado, devido à formação de uma estrutura de aluminossilicato mais condensada [25]. No entanto, o desempenho mecânico ideal é geralmente alcançado dentro de uma faixa limitada de razão Si/Al, tipicamente entre 1 e 3 [32], já que valores muito elevados (acima de 3) podem levar a excesso de espécies silicatadas não reagidas e ao aumento da viscosidade da pasta, dificultando a polimerização e reduzindo a resistência mecânica final [26].

3.1.4 Ordem de Adição e Energia de Mistura

A sequência de adição de materiais e a energia mecânica aplicada, como ultrassom ou alta velocidade de cisalhamento, influenciam a dispersão de aditivos e a

homogeneidade da mistura [26]. A alta energia de mistura, como a sonicação, é necessária para romper aglomerados de nanopartículas, promovendo uma dispersão mais uniforme [26], o que potencializa o efeito de nucleação da nanossílica e acelera a reação inicial [26]. Uma dispersão eficiente também resulta em uma microestrutura mais densa e homogênea [26]. Além disso, a mistura otimizada é crucial para que os nanomateriais atinjam seu potencial de reforço, sendo que a sonicação da nanossílica por períodos suficientes, por exemplo entre 20 e 120 minutos, promove ganhos adicionais na resistência e melhora o módulo de elasticidade do gel [16].

3.1.5 Método de Dispersão da Nanossílica NS

A dispersão da nanossílica (NS) é um dos fatores mais críticos para o sucesso da nano-modificação, devido à sua alta tendência à aglomeração causada pela elevada área de superfície específica (SSA) [26]. Quando dispersa uniformemente, a NS atua como sítio de nucleação para os produtos de reação, acelerando a cinética de polimerização e a formação do gel [12]. A sonicação é eficaz para desmembrar aglomerados, promovendo um efeito de nucleação mais eficiente [26]. Além disso, a NS funciona como nanofiller, preenchendo vazios nanométricos e microporos, refinando a estrutura porosa, reduzindo a porosidade e densificando tanto a microestrutura quanto a zona de transição interfacial (ITZ) [12]. Dispersões mais longas, como de 120 minutos, resultam em maior densificação e menor porosidade [16]. Consequentemente, a dispersão eficiente da NS aumenta a resistência à compressão e à tração [12], enquanto a aglomeração, resultante de dispersão deficiente ou de dosagem excessiva, gera zonas de fraqueza e reduz a resistência final do material [26].

3.1.6 Dosagem e Tamanho de Partícula da NS

A dosagem e o tamanho da nanossílica (NS) controlam diretamente a disponibilidade de sítios de nucleação e a eficácia do efeito nanofiller [26]. Dosagens ótimas, tipicamente baixas, como entre 1% e 5% em massa do ligante, frequentemente entre 2% e 3%, são necessárias para maximizar a resistência [12], enquanto dosagens excessivas, acima de 3% a 5%, podem causar aglomeração e reduzir a resistência [26]. O tamanho das partículas também exerce influência significativa: partículas menores, na faixa de 5 a 658 nm, sendo as mais utilizadas entre 20 e 30 nm, apresentam maior área de superfície específica (SSA) e maior reatividade, acelerando a hidratação e a polimerização [26]. Além disso, o tamanho das partículas afeta a demanda de água e a trabalhabilidade da mistura, e as partículas menores podem preencher poros que partículas maiores não alcançam [33].

3.1.7 Regime de Cura

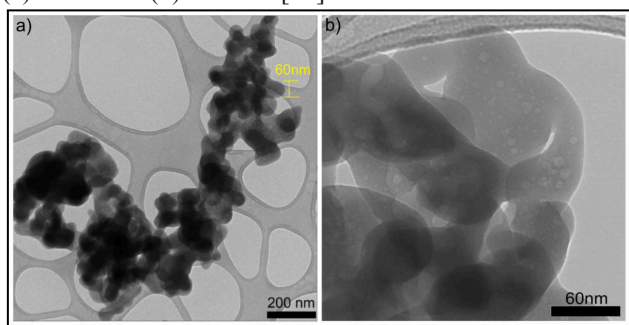
A cura em alta temperatura, entre 40°C e 85°C, acelera as reações de dissolução e policondensação, sendo especialmente importante para precursores como a cinza volante de Classe F [12], pois pode superar a barreira de energia de ativação [34]. Esse processo promove uma microestrutura mais densa e reduz a porosidade [26]; entretanto, temperaturas excessivas ou tempos prolongados podem causar rápida retração, induzir microfissuras ou degradar a resistência do material [26]. A cura sob pressão hidrotérmica, como na autoclavagem, pode refinar ainda mais a microestrutura [35]. Do ponto de vista do desempenho mecânico, a cura à quente leva a um rápido ganho de resistência inicial [26], embora materiais ricos em GBFS ativados possam dispensar a cura térmica para aplicações estruturais [7]. Além disso, observa-se aumento do módulo de elasticidade com a cura à alta temperatura [17].

4. Propriedades físicas da Nanossílica

Diversos estudos relatam diferentes tamanhos médios de partículas de nanossílica utilizados em pesquisas. Um deles empregou partículas com diâmetro médio de 14 nm, determinado por meio de microscopia eletrônica de transmissão (TEM) [36]. Outro estudo reportou partículas com tamanho nominal de 12 nm em dispersão aquosa, embora estas apresentassem aglomerações em cachos de aproximadamente 150 nm, atribuídas à funcionalização com grupos acrílicos [37]. Além disso, outras pesquisas mencionam partículas com cerca de 20 nm, com pureza de 99,9% e estrutura amorfa [16,38]. A literatura também apresenta faixas mais amplas de tamanho, variando entre 9-200 nm [12] ou 20-30 nm [16]. Em contextos específicos, como a produção de nanossílica esférica a partir de resíduos calcários provenientes de minas de fosfato, foi identificado um tamanho de 60 nm [12]. Já em dispersões coloidais de nanossílica, os diâmetros observados foram de 5, 17 e 35 nm [13].

De maneira geral, a morfologia da nanossílica é descrita como esférica e possui uma estrutura amorfa [39], o que significa que não possui uma estrutura cristalina regular, sendo verificada por difração de raios X (XRD) que mostra um pico largo centrado em 22 graus (2 θ) [37].

Figura 5. Imagens de TEM de nanopartículas de SiO₂ em (a) x20.000 e (b) x40.000 [40].



A área superficial específica (ASE) é uma das propriedades mais relevantes da nanossílica, sendo consideravelmente superior à de partículas maiores de sílica, como a sílica ativa [33]. Essa característica confere à nanossílica uma reatividade elevada, além de proporcionar um número maior de pontos de interação com a matriz do material [41]. Os valores de ASE relatados na literatura são amplamente variáveis, conforme apresentado na Tabela (1), o que reflete a diversidade de tipos de nanossílica disponíveis e a influência do método de síntese sobre suas propriedades finais.

Quadro 1. Valores de área superficial específica (ASE) de nanossílicas reportados na literatura.

ASE (m ² /g)	Tipo de Nanossílica	Referências
15-25	Dispersão aquosa	[24]
193	Comercial/Amorfa	[44]
127,69	Não especificado	[42]
~50-500	Hidrotérmica	[43]
640±60	Hidrofílica comercial	[9]
100-300	Amorfa	[33]
180-600	Amorfa	[39]
250	Não especificado	[8]
395,23	Provenientes de rochas de	[44]

	fosfato	
0,2	Genérica	[37]
100-700	Não especificado	[41]

A densidade e a cor também variam conforme o tipo e o estado físico da nanossílica. Em geral, ela é descrita como um pó branco [45], com densidade aparente que pode ser extremamente baixa, variando de 0,1 g/cm³ [39] a ≤ 0,15 g/cm³ [9]. Já a densidade real ou gravidade específica costuma ser superior, apresentando valores como 1,94 g/cm³ [46], 2,4 g/cm³ [16] ou 1,072 g/cm³ para dispersões coloidais de SiO₂ obtidas por via hidrotérmica [43]. Em dispersões coloidais, a gravidade específica pode alcançar 1,395 g/cm³ [29]. Quanto ao pH e à viscosidade, ambos são parâmetros importantes em dispersões coloidais de nanossílica, influenciando sua estabilidade e reatividade. Uma dispersão coloidal pode apresentar pH de 9,51 e viscosidade de 10,79 segundos [29], enquanto a nanossílica hidrotérmica apresenta pH de 9,1 [43]. Já a sílica pirogênica hidrofóbica possui pH entre 5,5 e 8,0 [25].

A solubilidade da nanossílica também é uma propriedade distintiva. Quando o pH de uma solução alcalina ultrapassa 10,7, a NS se converte completamente em silício solúvel [9]. Além disso, a nanossílica amorfa coloidal pode apresentar solubilidade em água de até 60% [39], característica que reforça sua versatilidade e potencial de interação em sistemas reativos.

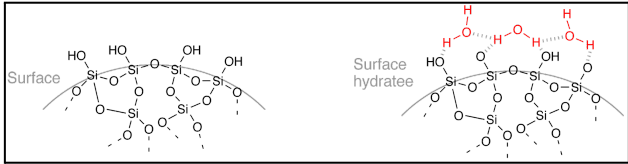
5. Propriedades Químicas da Nanossílica

A nanossílica é predominantemente composta por dióxido de silício (SiO₂), com teores geralmente muito altos [39]. Uma nanossílica estudada quimicamente continha 98,8% de SiO₂, com vestígios de outros óxidos como Al₂O₃ (0,076%), Fe₂O₃ (0,293%), CaO (0,392%), MgO (0,05%), Na₂O (0,328%), SO₃ (0,185%), TiO₂ (0,064%), K₂O (0,080%), P₂O₅ (0,129%), ZnO (0,021%) e CuO (0,020%) [46]. Outra nanossílica de alta pureza continha mais de 99,5% de óxido de silício [9] ou mais de 99% de sílica [47].

Mesmo a nanossílica sintetizada a partir de materiais residuais, como rochas de fosfato, pode atingir uma pureza de 98,52% de SiO₂, com pequenas quantidades de P₂O₅, CaO, TiO₂ e Fe₂O₃ [44]. Nanossílicas de casca de cevada também mostram altos níveis de SiO₂, como 94,2% [42]. A composição química da superfície da nanossílica, analisada por XPS, pode mostrar 56,3% de oxigênio, 40,2% de silício, 2,5% de carbono, 0,9% de sódio e vestígios de cloro, indicando funcionalização com espécies contendo carbono e oxigênio [37]. A superfície da nanossílica frequentemente

contém grupos de silanol (Si-OH), que desempenham um papel crucial em sua reatividade e capacidade de interagir com outros materiais [9].

Figura 6. Superfície de SiO₂ com grupos silanol e siloxano, em estado seco e hidratado [48].



Em alguns casos, a nanossílica pode ser funcionalizada para modificar suas propriedades superficiais e melhorar sua interação com a matriz do material. Um exemplo é a funcionalização com grupos acrílicos, identificada por espectroscopia infravermelha (IR) através de uma banda de estiramento C=C a 1621 cm⁻¹, além da presença de espécies contendo carbono e oxigênio, detectadas por espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X (XPS) [37].

A alta atividade pozolânica da nanossílica está diretamente relacionada ao seu pequeno tamanho de partícula e à sua grande área superficial [33,49]. Em ambientes alcalinos, o silício solúvel liberado pela NS reage com compostos de cálcio, como o Ca(OH)₂ presente no cimento Portland, formando géis de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), os principais responsáveis pela resistência e durabilidade dos materiais cimentícios [33]. Essa reação promove a densificação da matriz, preenchendo vazios e refinando a microestrutura, o que resulta em um material mais compacto e durável [44].

Além disso, a nanossílica apresenta elevada compatibilidade com soluções de silicato de sódio, comumente utilizadas como ativadores alcalinos em geopolímeros [16]. Sua presença intensifica as reações de geopolimerização [4,2], o que é essencial para o desenvolvimento e aprimoramento das propriedades físicas e mecânicas desses materiais [47].

6. Métodos de caracterização

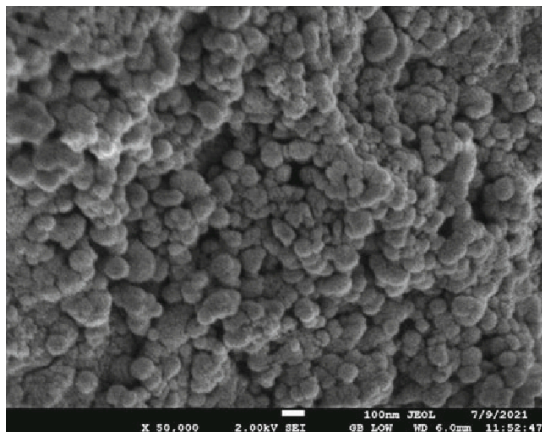
As propriedades da nanossílica são determinadas por uma variedade de técnicas analíticas avançadas:

Quadro 2. Métodos de caracterização.

Método	Finalidade Analítica	Referência
Microscopia Eletrônica de Transmissão (TEM)	Determinar tamanho de partícula e morfologia	[10,37]

Microscopia Eletrônica de Varredura de Emissão de Campo (FESEM)		
Difração de Raios X (XRD)	Determinar a composição mineralógica e a cristalinidade (estrutura amorfa)	[37,9]
Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)	Identificar grupos funcionais	[42,37,4]
Espectroscopia de Fotoelétrons de Raios X (XPS)	Composição química da superfície	[37]
Fluorescência de Raios X (XRF)	Determinar composição química elementar	[10,42]
Análise Termogravimétrica (TGA/DTG)	Determinar perdas de massa e estabilidade térmica	[4]
Análise BET (Brunauer–Emmett–Teller)	Determinar área superficial específica	[25]

Figura 6. Micrografia FESEM de nanossílica [50].



7. Mecanismos de reforço da nanossílica em materiais geopoliméricos

A adição de nanossílica (NS) em materiais geopoliméricos representa uma área de pesquisa estratégica voltada ao desenvolvimento de compósitos com propriedades aprimoradas e maior sustentabilidade [51]. A nanossílica, um nanomaterial zero-dimensional (0-D) com dimensões inferiores a 100 nm em todas as direções espaciais, tem sido amplamente estudada devido à sua capacidade de otimizar o desempenho desses materiais em escalas micro e nanoscópicas [12].

Os principais mecanismos de reforço promovidos pela NS podem ser compreendidos a partir de uma abordagem multifacetada, que envolve o efeito de preenchimento, o efeito de nucleação e a atividade pozolânica [12]. No efeito preenchedor, a nanossílica atua como um “super-preenchedor” em razão do seu tamanho de partícula extremamente pequeno e da elevada área de superfície específica [14,44], permitindo que as nanopartículas de SiO_2 ocupem os poros capilares e microtrincas da matriz, tornando-a mais densa e compacta [14,12]. Essa densificação reduz significativamente a porosidade e a conectividade entre os poros, o que, por sua vez, melhora as propriedades físicas e mecânicas, como resistência à compressão, à flexão e durabilidade [12,45]. Além disso, o preenchimento dos poros contribui para o aprimoramento da zona de transição interfacial (ITZ), uma região crítica para a integridade do compósito [8].

No efeito de nucleação, as nanopartículas de NS fornecem múltiplos sítios de nucleação para a formação e o crescimento dos produtos de hidratação ou de geopolimerização [12], acelerando a formação dos géis N-A-S-H e C-A-S-H [12]. Essa aceleração da reação promove o desenvolvimento de resistência em idades iniciais, uma vez que os produtos se formam mais rapidamente e de maneira mais organizada ao redor dos sítios de nucleação [14]. Por fim, na atividade pozolânica, a nanossílica amorfa apresenta elevada reatividade [14]. Em sistemas cimentícios, reage com o hidróxido de cálcio

(CH), subproduto da hidratação do cimento, formando gel C-S-H adicional [12]. Já em geopolímeros, a NS participa ativamente do processo de geopolimerização, reagindo com as soluções alcalinas para gerar géis adicionais de N-A-S-H ou C-A-S-H [12]. Essa reação impulsionada pela nanossílica contribui de forma significativa para a formação de uma microestrutura mais densa, estável e mecanicamente resistente [14].

8. Impacto da nanossílica nas propriedades dos materiais geopoliméricos

8.1 Melhoria das propriedades no estado fresco

A incorporação de nanossílica em geopolímeros geralmente leva a uma redução na fluidez e trabalhabilidade da mistura [52]. A elevada área superficial específica das nanopartículas de sílica faz com que elas absorvam uma porção significativa da água livre presente na pasta, reduzindo a água disponível para lubrificar as partículas maiores e assim comprometendo a mobilidade dos constituintes sólidos e diminuindo a fluidez [44]. Duan et al., por exemplo, observaram reduções na fluidez de pastas geopoliméricas com nano- TiO_2 (comportamento análogo ao da nanossílica), variando de 8,6% a 45,3% para teores de 1%, 3% e 5%, respectivamente [52]. Da mesma forma, Deb et al. relataram perdas entre 115% e 135% em geopolímeros à base de cinzas volantes com adição de nanossílica [52].

Além disso, a reatividade imediata da nanossílica e a nanoalumina podem reagir imediatamente com o ativador alcalino para formar uma substância mais viscosa, o que contribui para a diminuição da fluidez [52]. Embora as nanopartículas possam atuar como “fillers” preenchendo vazios microscópicos [53,54], o excesso ou a má dispersão das nanopartículas pode levar à aglomeração [45,16]. A aglomeração forma “zonas fracas” na microestrutura e pode produzir produtos de hidratação de forma ineficiente, afetando negativamente a trabalhabilidade e até mesmo as propriedades mecânicas [45]. Outro fator relevante é a viscosidade da solução ativadora, particularmente do silicato de sódio, cujo alto módulo de sílica contribui para o aumento da viscosidade total do sistema. Isso dificulta ainda mais a dispersão adequada das nanopartículas, embora possa contribuir para a redução da reaglomeração [16].

Apesar da tendência predominante de redução da fluidez, alguns estudos registraram aumento da trabalhabilidade em condições específicas. Mustakim et al. relataram uma melhora de 27% na trabalhabilidade de uma mistura com 0,5% de nanossílica, atribuída ao chamado efeito rolamento de esferas (*ball bearing effect*), no qual as partículas ultrafinas favorecem o deslizamento entre partículas maiores [52]. Adak et al. observaram aumento de 8% na deformação de geopolímeros com 6% de nanossílica, e Ibrahim et al. constataram um

comportamento não linear, com ganho inicial de fluidez seguido de perda com maiores teores, indicando a existência de um ponto ótimo de dosagem [52].

Para mitigar a perda de fluidez, é comum o uso de superplastificantes contendo grupos funcionais de carboxilato, que promovem melhor dispersão das nanopartículas e recuperam a trabalhabilidade da pasta geopolimérica [45]. A adição de nanossilica também impacta significativamente o tempo de pega dos geopolímeros, geralmente promovendo sua redução [47].

A própria reatividade química elevada da nanossilica permite que ela participe ativamente da reação de geopolimerização, promovendo o adensamento mais rápido da matriz [45]. Além disso, as nanopartículas finas de sílica servem como "sementes", proporcionando locais de nucleação adicionais que aceleram o processo de hidratação e a formação da rede aluminossilicato [5]. Isso é importante especialmente para geopolímeros curados em temperatura ambiente, onde a taxa de reação pode ser mais lenta [51]. O efeito pozolânico também contribui reagindo com a cal (hidróxido de cálcio) para produzir gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) extra [14]. No contexto de geopolímeros, isso pode acelerar a formação de fases como N-A-S-H e C-A-S-H [55].

A efetividade da nanossilica nas propriedades frescas dos geopolímeros depende fortemente de sua boa dispersão no meio alcalino [16]. A principal dificuldade reside nas intensas forças de Van der Waals que promovem a aglomeração das partículas, reduzindo a área de contato efetiva e, conseqüentemente, os benefícios esperados [16]. Para combater esse problema, métodos como a ultrassonicação têm sido amplamente adotados. Estudos indicam que tempos de sonicação mais longos (como 120 minutos) favorecem a quebra dos aglomerados e promovem uma distribuição mais uniforme das partículas, resultando em microestruturas mais densas e propriedades mecânicas superiores [16].

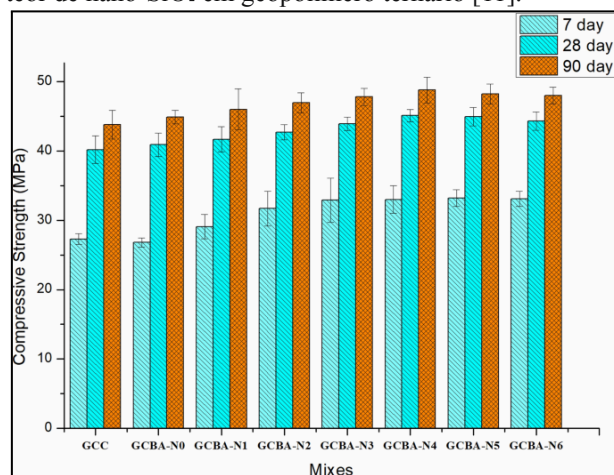
O próprio ambiente altamente alcalino das soluções ativadoras em geopolímeros pode complicar a dispersão de nanomateriais, como nanotubos de carbono (MWCNTs), mas também pode inibir a reaglomeração de nanopartículas de sílica [16,12]

8.2 Melhoria nas propriedades mecânicas

8.2.1 Resistência à compressão

Um estudo em concreto geopolimérico à base de blend ternário observou um aumento de 12% na resistência à compressão com a adição de 1% de nanossilica, e um aumento de 16,12% com 3% de nanossilica, em relação a amostras de referência com 43,17 MPa e 44,27 MPa após 28 dias de cura térmica [11].

Figura 7. Resistência à compressão (7, 28 e 90 dias) vs. teor de nano-SiO₂ em geopolímero ternário [11].



Em contraste, outra pesquisa indicou que, embora 0,75% de nanossilica em concreto geopolimérico fornecesse cerca de 80% da resistência à compressão aos 7 dias, dosagens maiores, como 3% e 6%, não resultaram em resistência suficiente, o que pode sugerir uma complexidade na otimização da dosagem ou dependência da composição específica da cinza volante [56]. A pasta geopolimérica à base de cinzas volantes apresentou um aumento notável de até 129% na resistência à compressão aos 28 dias com a incorporação de 2% em peso de nano-SiO₂ [56,2]. Em geopolímeros à base de escória, a resistência máxima à compressão de 54 MPa foi alcançada com 2% de nanossilica, com diminuição para dosagens superiores [28,46].

Para geopolímeros à base de cinzas volantes e GGBFS, a adição de 1,5% de nanossilica resultou na maior resistência à compressão, atingindo 63 MPa [56]. Em pastas de geopolímero com fibras de aço, a adição de nanossilica (0-3%) aumentou a resistência à compressão em 46,26%. Para pastas de geopolímero à base de cinzas volantes, o aumento foi de 19,26% [56]. Geopolímeros com 2% de NS e 2% de partículas de nano-TiO₂ aumentaram a resistência à compressão em 17,38% e 10,49%, respectivamente, em comparação com a mistura de referência [54]. Em compósitos de geopolímero reforçados com fibra PVA, a adição de nanossilica em diferentes percentagens de 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0% e 2,5% resultou em aumentos de resistência à compressão de 1,2%, 7,0%, 13,3%, 10,4% e 5,0%, respectivamente [54].

Um estudo com geopolímeros à base de lodo reportou um aumento notável de até 108,2% na resistência à compressão com 2% de NS. No entanto, com 3% de NS, a resistência foi 43% maior que a referência, mas menor que a obtida com 2% de NS [45]. Além dos geopolímeros clássicos, diversos estudos também avaliaram o efeito da nanossilica em concretos e argamassas ativadas alcalinamente à base de GGBFS.

Embora tais sistemas não sejam considerados geopolímeros puros devido à predominância de reações que formam fases do tipo CSH e CASH, eles compartilham características reológicas e estruturais semelhantes [54]. Em um desses estudos, a incorporação de nanossílica em concreto ativado alcalinamente com fibras de aço resultou em aumento da resistência à tração e flexão, mas reduções inesperadas na resistência à compressão e no módulo de elasticidade [7]. Em argamassas alcalinizadas, observou-se que 1% da nanossílica aumentou a resistência à compressão sob relação alcalina de 2,5, enquanto 2% reduziu essa propriedade tanto para relações de 1,5 quanto 2,5 [57].

Embora o Concreto de Ultra-Alto Desempenho (UHPC) não seja um sistema geopolimérico, estudos com esse material demonstram o impacto significativo da adição de nanossílica [37]. Por exemplo, a incorporação de 1% de NS resultou em um aumento de 13% na resistência à compressão (de 115 MPa para 132 MPa), atribuído ao efeito de preenchimento dos poros e à reação pozolânica com Ca(OH)_2 , características que também são relevantes em geopolímeros ricos em cálcio. Contudo, o desempenho decresce com dosagens superiores, devido à aglomeração de partículas [37].

Apesar de não ser um geopolímero, um estudo sobre solo arenoso reforçado com nanopartículas de sílica demonstrou que 8% da nanossílica, sob pressão hidrostática de 100 kPa para 300 kPa, aumentou o módulo de elasticidade em 214%. Em comparação, 2% de nanotubos de carbono aumentaram em 36% [39].

A dosagem ótima de nanossílica para a resistência à compressão em geopolímeros é frequentemente identificada em torno de 1% a 3% em peso, dependendo da fonte de aluminossilicato e da presença de outros aditivos. Concentrações mais elevadas de nanossílica podem levar à aglomeração das partículas, o que resulta em regiões de menor densidade e, consequentemente, na redução da resistência mecânica [56].

8.1.3 Resistência à Flexão

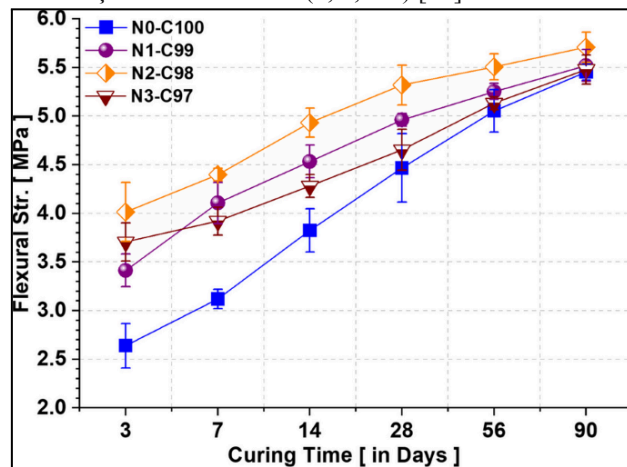
Em pasta de geopolímero à base de cinzas volantes com fibras de aço, a adição de nanossílica (0-3%) resultou em um aumento de 91,85% na resistência à flexão. Para pasta de geopolímero à base de cinzas volantes (sem fibras de aço), o aumento foi de 39,89%. [56]. Um estudo indicou que a adição de 2% de NS em GPC aumentou a resistência à flexão em 82% [56]. Em geopolímeros à base de lodo, 2% de NS proporcionou um aumento impressionante na resistência à flexão: 162,5% (3,15 MPa) aos 3 dias, 94,4% (7 MPa) aos 7 dias e 69,9% (7,9 MPa) aos 28 dias [24].

A nanossílica, quando combinada com fibras de aço, demonstrou melhorar a resistência à flexão em concretos ativados alcalinamente [7]. A inclusão de

nano- SiO_2 e nano- Al_2O_3 em até 2% em peso em geopolímeros à base de cinzas volantes contribuiu para o aumento da resistência à flexão [47]. Em RC ativado alcalinamente, quando o teor de NS atinge 2%, a resistência à flexão aos 28 dias é de 5,7 MPa, o que é 1,3% maior do que a amostra de controle [58]. A resistência à flexão de argamassas aumentou quando a proporção de nano-sílica foi elevada de 1% para 5% [8].

Um estudo recente verificou que, em concretos com adição de 1%, 2% e 3% de nanossílica, a resistência à flexão foi maximizada com 2%, mantendo-se estável até 90 dias. Já a dosagem de 3% apresentou leve queda de desempenho, atribuída à autodessecação e à formação de microfissuras [59]. Apesar de o estudo não ter sido realizado com geopolímeros puros, os mecanismos descritos também ocorrem em sistemas ativados alcalinamente, como a densificação microestrutural e a sensibilidade à dosagem, servindo como base comparativa válida para reforçar os efeitos da nanossílica em geopolímeros [59].

Figura 8. Desenvolvimento da resistência à flexão com substituição variável de NS (1, 2, 3%) [59].



Uma revisão menciona que a nano- SiO_2 individualmente não consegue melhorar a resistência à flexão do concreto geopolimérico. No entanto, o mesmo estudo observa que, quando a nano- SiO_2 é empregada com fibra de aço, as propriedades de flexão são consideravelmente melhoradas [56]. Isso sugere um efeito sinérgico importante com a presença de fibras, que podem atuar como ponte em microfissuras e aumentar a tenacidade do material, um mecanismo que a nanossílica sozinha, como preenchedor, pode não replicar em nível macroscópico para a flexão [54, 56]. A nanossílica contribui para o aumento da dureza e do módulo de elasticidade [37,16], especialmente do gel N-A-S-H em nível micromecânico [16], sendo que amostras com melhor dispersão das nanopartículas apresentaram maiores valores de módulo [37]. Além disso, a densificação da microestrutura e a redução da porosidade

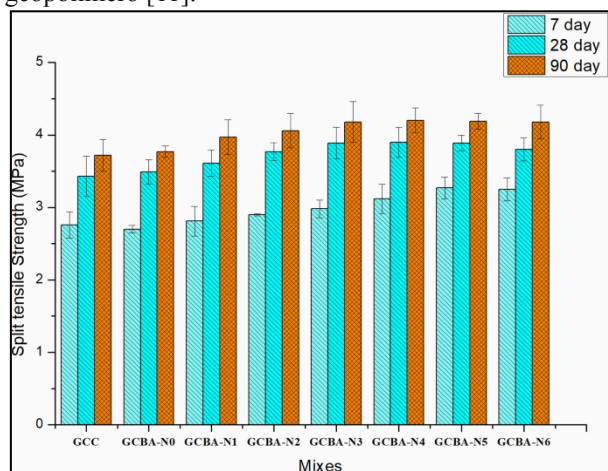
proporcionadas pela presença da nanossílica [37] favorecem a tenacidade e a resistência à fratura do material [6].

Esses aprimoramentos, no entanto, dependem criticamente da dosagem e da dispersão homogênea da nanossílica na matriz geopolimérica [29]. Dosagens consideradas ótimas, geralmente em torno de 2% [29] (podendo chegar a 5% em alguns casos), são apontadas como essenciais para a obtenção de melhorias significativas [52]. Por outro lado, a aglomeração das nanopartículas, comum em dosagens excessivas ou sob condições inadequadas de mistura, pode reduzir os benefícios esperados e até gerar zonas fracas na microestrutura, comprometendo o desempenho mecânico [4]. Para mitigar esse efeito, técnicas de dispersão como a sonicação por ultrassom são frequentemente utilizadas [4], promovendo a quebra de aglomerados [15], a redução do tamanho efetivo das partículas [10] e a formação de microestruturas mais densas e uniformes [37].

8.1.4 Resistência à Tração

A resistência à tração em geopolímeros com nanossílica tende a aumentar, embora os dados ainda sejam mais escassos do que para compressão e flexão. Em sistemas à base de escória granulada de alto-forno (GGBFS), estudos reportam ganhos de tração de até 14% para faixas de 0 a 8% de nanossílica [23]. Em geopolímeros à base de cinza volante, a tração por compressão diametral aumentou em aproximadamente 18%, 30% e 33% com teores de 1, 2 e 3 por cento de nanossílica [52], respectivamente, enquanto em misturas com cinza volante, bagaço e GGBFS, a adição de 4 por cento de nanopartículas elevou a tração em 26,78 por cento aos 7 dias e 27,6 por cento aos 28 dias [11].

Figura 9. Resistência à tração dividida de amostras de geopolímero [11].



Na ausência de séries completas de tração, a literatura sobre resistência à flexão indica melhora

consistente de desempenho, coerente com o refinamento microestrutural observado (ver Seção 8.1.3). A interação sinérgica da nanossílica com fibras de aço também contribui para o retardo da formação de fissuras, aumento da tenacidade e maior capacidade de dissipação de energia, como evidenciado por melhorias expressivas em resistência ao impacto em sistemas contendo cerca de 2% de nanossílica [7]. Os mecanismos dominantes de preenchimento de poros, nucleação e reatividade pozolânica explicam a redução da porosidade e da conectividade, além da melhora da zona de transição interfacial, sustentando incrementos em propriedades que dependem de tração (ver Seção 7). Contudo, o benefício depende da dosagem: teores acima do ideal podem favorecer a aglomeração e comprometer o desempenho. Assim, a otimização entre 1 e 3% deve ser priorizada conforme o sistema e o método de dispersão adotado [11]. Em meios agressivos, os efeitos combinados da nanossílica com fibras podem variar e exigem verificação experimental específica [60].

8.1.5 Módulo de elasticidade

A nanossílica tem sido associada ao aumento do módulo de elasticidade em geopolímeros devido ao seu efeito de preenchimento de poros, aceleração da geopolimerização e densificação da matriz. Embora esse mecanismo já tenha sido discutido em capítulos anteriores, diversos estudos trazem dados quantitativos que ilustram com clareza essa tendência, sobretudo para dosagens entre 1% e 3%.

Em concretos geopoliméricos com adição de resíduos poliméricos ativados (RPA), o módulo de elasticidade aumentou 10,6% aos 28 dias em comparação a amostra sem NS e RPA [30]. Argamassas álcali-ativadas à base de cinzas volantes (FA-AAMs) reforçadas com fibra de carbono e 3% de NS apresentaram incremento de 30% no módulo [12]. Em GPC à base de GBFS, os aumentos variaram até 24%, mesmo quando a faixa testada incluía até 8% de NS [23]. No mesmo artigo em específico também indicou ganhos de 12% com 4% de NS e 13% com 8%, embora tenha também observado uma leve redução do módulo dinâmico em teores mais elevados, sugerindo limitação na eficácia em faixas superiores [23].

Resultados ainda mais expressivos foram encontrados em concretos geopoliméricos à base de pozolana natural: o módulo aumentou 9,6% com 1% de NS, 24,6% com 2,5%, e atingiu picos de 97,5% com 5% de NS e 85,6% com 7,5%, após 90 dias de cura [18]. Em termos absolutos, um GPC à base de GBFS apresentou os seguintes valores de módulo de elasticidade (28 dias, cura ambiente): 20,72 GPa (controle), 21,67 GPa (1% NS), 22,47 GPa (2%), 22,92 GPa (3%) e 22,55 GPa (4%), sendo o maior ganho observado com 3% de NS [18].

Vale destacar que os resultados são sensíveis ao tipo de matriz, dispersão e tempo de cura. Em um concreto auto-adensável álcali-ativado com 2% de NS, observou-se uma leve redução no módulo, o que ressalta a importância do ajuste fino da dosagem [7]. Em outro estudo, a nanoindentação evidenciou aumento do módulo micromecânico do gel N-A-S-H de 11,03 GPa (controle) para 13,30 GPa com 2% de NS, reforçando o impacto nanoestrutural da adição [38].

8.1.6 Tenacidade

Embora a tenacidade não foi comumente quantificada nos estudos analisados de geopolímeros à base de nanossílica, dados disponíveis apontam para ganhos significativos nessa propriedade, sobretudo em sistemas reforçados com fibras. Em argamassas álcali-ativadas à base de cinzas volantes com 3% de nanossílica, observou-se um aumento de 31% na tenacidade à fratura e de 40% no módulo de tenacidade quando associadas a fibras de carbono [12]. Em sistemas híbridos com metacaulim e fibras de álcool polivinílico, a nanossílica também contribuiu para o aumento da tenacidade ao cisalhamento, ainda que sem valores quantitativos reportados [12].

9. Melhoria da durabilidade

A NS apresenta efeitos significativos na durabilidade dos geopolímeros, começando pela resistência à penetração de íons cloreto, uma vez que reduz consideravelmente o coeficiente de difusão de cloretos e a profundidade de penetração, diminuindo a permeabilidade de moderada para baixa ou extremamente baixa [24]. Por exemplo, uma mistura com NS apresentou uma redução de 29,17% na difusão de cloretos em comparação com a mistura de controle [11], e a adição de 6% de NS mostrou a maior resistência à carga transmitida em testes de permeabilidade rápida de cloretos (RCPT) [11]. A NS também aumenta a resistência ao ataque por sulfatos, reduzindo a perda de massa e a degradação induzida por sulfatos [11], além de consumir portlandita, mitigando a formação de produtos expansivos e protegendo contra a degradação [8].

Outro efeito importante é a redução da absorção de água e da sortividade, tornando o material menos suscetível à entrada de umidade, com estudos indicando diminuição da sortividade em até 26,4% [24]. Além disso, a nanossílica pode melhorar a resistência a ciclos de congelamento e degelo [45] e aprimorar a resistência ao ataque por ácidos, devido à sua capacidade de refinar a estrutura de poros e formar uma camada densa que protege a matriz aluminossilicatada [24].

10. Conclusões

A incorporação de NS em matrizes geopoliméricas consolidou-se na literatura recente como uma estratégia eficaz para modular microestrutura, propriedades mecânicas e indicadores de durabilidade, reforçando o potencial dos geopolímeros como alternativa para materiais aglomerantes à base de cimento. Estudos revisados mostram padrões consistentes: a NS atua simultaneamente por efeito de preenchimento, efeito de nucleação e por atividade pozolânica, resultando em ganho de densificação da matriz, redução de porosidade conectada e aumento da formação de géis N-A-S-H e C-A-S-H, mecanismos que explicam os aumentos de resistência.

Os ganhos mecânicos mais reproduzidos referem-se à resistência à compressão e ao módulo de elasticidade, com muitas pesquisas indicando um intervalo ótimo de dosagem (tipicamente em torno de 1 a 3% em massa do ligante) no qual se observa o melhor balanço entre ganho de desempenho e minimização de efeitos adversos, como aglomeração e perda de trabalhabilidade. Em diversos relatos, dosagens superiores tendem a promover reaglomeração, zonas fracas e até redução do desempenho, o que evidencia sensibilidade à composição da matriz e à técnica de dispersão empregada.

No campo da durabilidade, a NS tem mostrado impacto positivo mensurável: redução da difusão de cloretos, menor sorptividade e absorção de água e o aumento da resistência a sulfatos. Tais efeitos tornam os geopolímeros com adição de NS mais promissores para aplicações expostas a ambientes agressivos. Contudo, a magnitude dos ganhos depende fortemente do precursor (FA, metacaulim ou GGBFS), da relação Si/Al do sistema e do regime de cura.

Por fim, conclui-se que a nanossílica é um aditivo com alto potencial de aprimoramento para geopolímeros, desde que aplicada com controle de dosagem, técnica de dispersão adequada e compatibilidade entre precursor e ativador. Nessas condições, promove melhorias relevantes em resistência, microestrutura e durabilidade, aproximando seu desempenho do exigido em aplicações estruturais e de engenharia.

10.1 Limitações da pesquisa

O estudo apresenta limitações relacionadas à restrição das bases de dados e do período analisado, o que pode ter excluído contribuições relevantes e estudos fundamentais anteriores. Além disso, por se tratar de uma revisão qualitativa sistemática, não houve validação experimental própria para confrontar divergências da literatura. Por fim, a análise priorizou aspectos técnicos e de desempenho, abordando de forma limitada a viabilidade econômica e a avaliação de ciclo de vida em escala industrial.

10.2 Pesquisas Futuras

Apesar dos resultados promissores da nanossilica em geopolímeros em escala laboratorial, ainda há lacunas que limitam sua aplicação prática. Destacam-se a necessidade de métodos de dispersão mais eficientes e escaláveis e as incertezas quanto ao comportamento em condições extremas, como exposição ao fogo. Além disso, são fundamentais análises de sustentabilidade e custo-benefício que considerem impactos ambientais, riscos ocupacionais e viabilidade econômica, a fim de justificar sua adoção em escala industrial.

11. Referências

- AHMED, H. U.; MOHAMMED, A. S.; MOHAMMED, A. A. Engineering properties of geopolymer concrete composites incorporated recycled plastic aggregates modified with nano-silica. *Journal of Building Engineering*, v. 75, p. 106942, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106942>.
- AHMED, M. J. et al. A comprehensive review of barley crop-based materials as adsorbents for the removal of aquatic pollutants. *Journal of Molecular Liquids*, v. 406, p. 125151, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.125151>.
- BARBHUIYA, G. H. et al. Effects of the nanosilica addition on cement concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*, v. 32, p. 560–566, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.143>.
- BORJA, W. et al. Synthesis of nano-silica as a promising route of recycling phosphate waste rocks and its incorporation in mortars. *Sustainable Materials and Technologies*, v. 37, e00684, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00684>.
- CHIRANJEEVI, K. et al. Enhancing the properties of geopolymer concrete using nano-silica and microstructure assessment: a sustainable approach. *Scientific Reports*, v. 13, p. 17302, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44491-y>.
- DRABCZYK, A. et al. Review of geopolymer nanocomposites: Novel materials for sustainable development. *Materials*, v. 16, n. 9, p. 3478, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16093478>.
- DHEYAALDIN, M. H. et al. The effects of nanomaterials on the characteristics of aluminosilicate-based geopolymer composites: A critical review. *Journal of Building Engineering*, v. 73, p. 106713, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106713>.
- FARAJ, R. H.; MOHAMMED, A. A.; OMER, K. M. Self-compacting concrete composites modified with nanoparticles: A comprehensive review, analysis and modeling. *Journal of Building Engineering*, v. 50, p. 104170, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104170>.
- HUMUR, G.; ÇEVİK, A. Effects of hybrid fibers and nanosilica on mechanical and durability properties of lightweight engineered geopolymer composites subjected to cyclic loading and heating–cooling cycles. *Construction and Building Materials*, v. 326, p. 126846, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126846>.
- JINDAL, B. B.; SHARMA, R. The effect of nanomaterials on properties of geopolymers derived from industrial by-products: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, v. 252, p. 119028, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119028>.
- KAREEM, Q. et al. Geopolymers as an alternative to Portland cement: an overview on factors affecting geopolymerization process. *Construction and Building Materials*, v. 266, p. 121460, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121460>.
- KHATER, H. M.; GHARIEB, M. Synergetic effect of nano-silica fume for enhancing physico-mechanical properties and thermal behavior of MK-geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, v. 350, p. 128879, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128879>.
- KUMAR, P.; CHAKRABORTY, S. Rice husk-derived silica nanoparticles using optimized titrant concentration for the one-step nanofluid preparation. In: CHINTHAPUDI, E. et al. (org.). *Sustainable chemical, mineral and material processing*. Singapore: Springer, 2023. p. 303–318. (Lecture Notes in Mechanical Engineering). DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-7264-5_24.
- LI, W. et al. Advances in multifunctional cementitious composites with conductive carbon nanomaterials for smart infrastructure. *Cement and Concrete Composites*, v. 128, p. 104454, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104454>.
- LUO, Z. et al. Nanoindentation on micromechanical properties and microstructure of geopolymer with nano-SiO₂ and nano-TiO₂. *Cement and Concrete Composites*, v. 117, p. 103883, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103883>.
- MANSOURGHANAEI, M. et al. Durability and mechanical properties of granulated blast furnace slag based geopolymer concrete containing polyolefin fibers and nano silica. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 28, n. 1, p. 209–219, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-023-2202-6>.
- NAWAZ, M.; HEITOR, A.; SIVAKUMAR, M. Geopolymers in construction: recent developments. *Construction and Building Materials*, v. 260, p. 120472,

2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120472>.
- ONAIZI, A. M. et al. Effect of nanomaterials inclusion on sustainability of cement-based concretes: A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, v. 306, p. 124850, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124850>.
- PARUTHI, S. et al. A comprehensive review of nano materials in geopolymer concrete: Impact on properties and performance. *Developments in the Built Environment*, v. 16, p. 100287, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100287>.
- RAJ, R. S. et al. Nanomaterials in geopolymer composites: A review. *Developments in the Built Environment*, v. 13, p. 100114, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100114>.
- RŮŽEK, V. et al. Carbon fiber-reinforced geopolymer composites: A review. *Fibers*, v. 11, n. 2, p. 17, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/fib11020017>.
- VAKILI, A. H. et al. A systematic review of strategies for identifying and stabilizing dispersive clay soils for sustainable infrastructure. *Soil & Tillage Research*, v. 239, p. 106036, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106036>.
- WANG, W.; WANG, B.; ZHANG, S. Dispersion, properties, and mechanisms of nanotechnology-modified alkali-activated materials: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 192, p. 114215, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114215>.
- ZHAO, L.-C.; XU, L. Experimental investigation on mechanical response of soil reinforced by carbon nanotubes and silica dioxide nanoparticles. *Construction and Building Materials*, v. 415, p. 134203, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134203>.
- YUE, Jianwei; GUO, Zihao; ZHAO, Limin; DENG, Qiang; LI, Yaolin. Experimental study on silica-based prepolymer solution aerogel modification of gray bricks. *Journal of Building Engineering*, v. 108, 112977, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.112977>.
- HU, Yuan; JIN, Zuquan; PANG, Bo; DU, Zhantao; LI, Xiangxiang; HUANG, Yuxin. Surface modification of geopolymer coatings with polymethylhydrosiloxane-tetraethyl orthosilicate (PMHS-TEOS) for inhibiting efflorescence. *Construction and Building Materials*, v. 446, p. 137914, 2024. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2024.137914](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137914).
- MANSOURGHANAEI, M.; BIKLARYAN, M.; MARDOOKHPOUR, A. Durability and mechanical properties of granulated blast furnace slag based geopolymer concrete containing polyolefin fibers and nano silica. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 28, n. 1, p. 209–219, 2024. DOI: [10.1007/s12205-023-2202-6](https://doi.org/10.1007/s12205-023-2202-6).
- RAJ, R. S.; ARULRAJ, G. P.; ANAND, N.; KANAGARAJ, B.; LUBLOY, E.; NASER, M. Z. Nanomaterials in geopolymer composites: a review. *Developments in the Built Environment*, v. 13, p. 100114, 2023. DOI: [10.1016/j.dibe.2022.100114](https://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100114).
- YI, C.; BOLUK, Y.; BINDIGANAVILE, V. Enhancing alkali-activation of metakaolin-based geopolymers using dry water. *Journal of Cleaner Production*, v. 258, p. 120676, 2020. DOI: [10.1016/j.jclepro.2020.120676](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120676).
- VALENTE, M.; SAMBUCCI, M.; CHOUGAN, M.; GHAFAR, S. H. Composite alkali-activated materials with waste tire rubber designed for additive manufacturing: an eco-sustainable and energy saving approach. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 24, p. 3098–3117, 2023. DOI: [10.1016/j.jmrt.2023.03.213](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.213).
- CHAI, M.; ZHANG, J.; ZHANG, H.; YIN, Z. Characteristics of micro-structure of warm and ice-rich frozen soil improved by cement and additives. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 25, n. 10, p. 3691–3700, 2021. DOI: [10.1007/s12205-021-1690-5](https://doi.org/10.1007/s12205-021-1690-5).
- NAWAZ, M.; HEITOR, A.; SIVAKUMAR, M. Geopolymers in construction: recent developments. *Construction and Building Materials*, v. 260, p. 120472, 2020. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2020.120472](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120472).
- KIPROP, S.; ONCHIRI, R. O.; GATHIMBA, N. Mechano-physical properties and microstructure of colloidal nanosilica-incorporated volcanic ash-based geopolymer mortar after exposure to elevated temperatures. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, v. 72, n. 5, p. 66–85, 2024. DOI: [10.14445/22315381/IJETT-V72I5P108](https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V72I5P108).
- POBŁOCKI, K.; PAWLAK, M.; DRZEŹDŹON, J.; GAWDZIK, B.; JACEWICZ, D. Clean production of geopolymers as an opportunity for sustainable development of the construction industry. *Science of the Total Environment*, v. 928, p. 172579, 2024. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2024.172579](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172579).
- KAREEM, Q.; ARIF, M.; JAVED, M. F.; ASLAM, F.; ALABDULJABBAR, H. Geopolymers as an alternative to Portland cement: an overview on factors affecting geopolymerization process. *Construction and Building Materials*, v. 266, p. 121460, 2020. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2020.121460](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121460).
- ROVIELLO, G.; OCCHICONE, A.; DE GREGORIO, E.; RICCIOTTI, L.; CIOFFI, R.; FERONE, C.; TARALLO, O. Geopolymer-based composite and hybrid materials: the synergistic interaction between components. *Sustainable Materials and Technologies*, v. 44, e01404, 2025. DOI: [10.1016/j.susmat.2025.e01404](https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.e01404).
- BARBHUIYA, G. H.; MOIZ, M. A.; HASAN, S. D.; ZAHEER, M. M. Effects of the nanosilica addition on cement concrete: a review. *Materials Today: Proceedings*,

v. 32, p. 560–566, 2020. DOI: [10.1016/j.matpr.2020.02.143](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.143).

XU, Z.; YU, H.; SUN, X.; ZHAO, M.; HUI, D. Research on mechanical properties and microscopic mechanism of multi-based geopolymers under combined action of pre-curing and nano-silica. *Journal of Building Engineering*, v. 97, p. 110930, 2024. DOI: [10.1016/j.jobbe.2024.110930](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110930).

ZHANG, Y.; LIU, Y.; WANG, S.; ZHANG, J.; CHEN, Y.; LI, Q. Photocatalytic cement-based passive cooling composites: a review of characteristics, applications, and mechanisms. *Journal of Building Engineering*, v. 99, p. 111557, 2024. DOI: [10.1016/j.jobbe.2024.111557](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.111557).

XU, Y.; LEE, H.; BUETTNER, N.; AKONO, A.-T. Multiwalled carbon nanotubes as hard templates to yield advanced geopolymer-based self-assembled nanostructured ceramics. *Mechanics Research Communications*, v. 134, p. 104216, 2023. DOI: [10.1016/j.mechrescom.2023.104216](https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2023.104216).

ECHARI-GIACCHI, M.; MARTÍN-MARTÍNEZ, J. M. Efficient physical mixing of small amounts of nanosilica dispersion and waterborne polyurethane by using mild stirring conditions. *Polymers*, v. 14, n. 23, p. 5136, 2022. DOI: [10.3390/polym14235136](https://doi.org/10.3390/polym14235136).

LUO, Z.; LI, W.; GAN, Y.; HE, X.; CASTEL, A.; SHENG, D. Nanoindentation on micromechanical properties and microstructure of geopolymer with nano-SiO₂ and nano-TiO₂. *Cement and Concrete Composites*, v. 117, p. 103883, 2021. DOI: [10.1016/j.cemconcomp.2020.103883](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103883).

ZHAO, L.-C.; XU, L. Experimental investigation on mechanical response of soil reinforced by carbon nanotubes and silica dioxide nanoparticles. *Construction and Building Materials*, v. 415, p. 134203, 2024. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2023.134203](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134203).

ELIZONDO-VILLARREAL, N.; GANDARA-MARTÍNEZ, E.; GARCÍA-MÉNDEZ, M.; GRACIA-PINILLA, M.; GUZMÁN-HERNÁNDEZ, A. M.; CASTAÑO, V. M.; GÓMEZ-RODRÍGUEZ, C. S. Synthesis and characterization of SiO₂ nanoparticles for application as nanoadsorbent to clean wastewater. *Coatings*, v. 14, n. 7, p. 919, 2024. DOI: [10.3390/coatings14070919](https://doi.org/10.3390/coatings14070919).

JINDAL, B. B.; SHARMA, R. The effect of nanomaterials on properties of geopolymers derived from industrial by-products: a state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, v. 252, p. 119028, 2020. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2020.119028](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119028).

AHMED, M. J.; ANASTOPOULOS, I.; KALDERIS, D.; DANISH, M. A. A comprehensive review of barley crop-based materials as adsorbents for the removal of aquatic pollutants. *Journal of Molecular Liquids*, v. 406, p. 125151, 2024. DOI: [10.1016/j.molliq.2024.125151](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.125151).

POTAPOV, V.; EFIMENKO, Y.; FEDIUK, R.; GOREV, D. Effect of hydrothermal nanosilica on the performances

of cement concrete. *Construction and Building Materials*, v. 269, p. 121307, 2021. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2020.121307](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121307).

BORJA, W.; ADARMOUCH, M.; EL HAFIANE, Y.; DAAFI, Y.; TAMRAOUI, Y.; ALAMI, J. Synthesis of nano-silica as a promising route of recycling phosphate waste rocks and its incorporation in mortars. *Sustainable Materials and Technologies*, v. 37, e00684, 2023. DOI: [10.1016/j.susmat.2023.e00684](https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00684).

SHI, J.; SHEN, Y.; ZHANG, W.; FU, Y.; KONG, X. Effects of three different nanomaterials on the properties and microstructure of sludge-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, v. 414, p. 134965, 2024. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2024.134965](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134965).

FALLAH-VALUKOLAEI, S.; MOUSAVI, R.; ARJOMANDI, A.; NEMATZADEH, M.; KAZEMI, M. A comparative study of mechanical properties and life cycle assessment of high-strength concrete containing silica fume and nanosilica as a partial cement replacement. *Structures*, v. 46, p. 838–851, 2022. DOI: [10.1016/j.istruc.2022.10.024](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.10.024).

INDWAR, R.; MISHRA, U.; TITIKSH, A. Geopolymer concrete containing nanomaterials: a step toward sustainable construction. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024. DOI: [10.1007/s11356-024-34172-2](https://doi.org/10.1007/s11356-024-34172-2).

LIU, J.; JANJUA, Z. A.; ROE, M.; XU, F.; TURNBULL, B.; CHOI, K.-S.; HOU, X. Super-hydrophobic/icephobic coatings based on silica nanoparticles modified by self-assembled monolayers. *Nanomaterials*, v. 6, n. 12, p. 232, 2016. DOI: [10.3390/nano6120232](https://doi.org/10.3390/nano6120232).

PRAVEEN KUMAR, V. V.; DEY, S. Study on strength and durability characteristics of nano-silica based blended concrete. *Hybrid Advances*, v. 2, p. 100011, 2023. DOI: [10.1016/j.hybadv.2022.100011](https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2022.100011).

KUMAR, P.; CHAKRABORTY, S. Rice husk-derived silica nanoparticles using optimized titrant concentration for the one-step nanofluid preparation. In: CHINTHAPUDI, E. et al. (org.). *Sustainable chemical, mineral and material processing*. Singapore: Springer, 2023. p. 303–318. (Lecture Notes in Mechanical Engineering). DOI: [10.1007/978-981-19-7264-5_24](https://doi.org/10.1007/978-981-19-7264-5_24).

DRABCZYK, A.; KUDŁACIK-KRAMARCZYK, S.; KORNIENKO, K.; FIGIELA, B.; FURTOS, G. Review of geopolymer nanocomposites: novel materials for sustainable development. *Materials*, v. 16, n. 9, p. 3478, 2023. DOI: [10.3390/ma16093478](https://doi.org/10.3390/ma16093478).

DHEYAA LDIN, M. H.; MOSABERPANAH, M. A.; SHI, J.; ALZEEBAREE, R. The effects of nanomaterials on the characteristics of aluminosilicate-based geopolymer composites: a critical review. *Journal of Building Engineering*, v. 73, p. 106713, 2023. DOI: [10.1016/j.jobbe.2023.106713](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106713).

JANOWSKA-RENNKAS, E.; ZDROJEK, M.; KOZIOŁ, M.; KALICIAK-KOWNACKA, A. Effect of composition of geopolymer composites containing fly ash and waste

glass powder on their durability and resistivity demonstrated in presence of a nanocarbon additive in a form of graphene. *Measurement*, v. 211, p. 112616, 2023. DOI: [10.1016/j.measurement.2023.112616](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112616).

ÜNAL, M. T.; GÖKÇE, H. S.; AYOUGH, P.; ALNAHHAL, A. M.; ŞİMŞEK, O.; NEHDI, M. L. Nanomaterial and fiber-reinforced sustainable geopolymers: a systematic critical review. *Construction and Building Materials*, v. 404, p. 133325, 2023. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2023.133325](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133325).

MA, L.; SUN, M.; YANG, J.; DAI, Q. Nanosilica-enhanced geopolymer cementitious materials: mechanistic insights from experimental and computational simulations. *Journal of Building Engineering*, v. 98, p. 111098, 2024. DOI: [10.1016/j.jobbe.2024.111098](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.111098).

RAMBABU, D.; SHARMA, S. K.; AKBAR, M. A. Properties exhibited by nanomaterial based geopolymers: a review. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, v. 33, p. 1081–1118, 2023. DOI: [10.1007/s10904-023-02601-3](https://doi.org/10.1007/s10904-023-02601-3).

HUSSEIN, T. A.; DHEYAA LDIN, M. H.; MOSABERPANAH, M. A.; AHMED, Y. M. S.; MOHAMMED, H. A.; OMER, R. R.; HAMID, S. M.; ALZEEBAREE, R. Chemical resistance of alkali-activated mortar with nano silica and polypropylene fiber. *Construction and Building Materials*, v. 363, p. 129847, 2023. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2022.129847](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129847).

XI, X.; ZHENG, Y.; ZHUO, J.; ZHANG, P.; GOLEWSKI, G. L.; DU, C. Mechanical properties and hydration mechanism of nano-silica modified alkali-activated thermally activated recycled cement. *Journal of Building Engineering*, v. 98, p. 110998, 2024. DOI: [10.1016/j.jobbe.2024.110998](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110998).

KASHYAP, V. S.; SANCHETI, G.; YADAV, J. S.; AGRAWAL, U. Smart sustainable concrete: enhancing the strength and durability with nano silica. *Smart Construction and Sustainable Cities*, v. 1, p. 1–20, 2023. DOI: [10.1007/s44268-023-00023-1](https://doi.org/10.1007/s44268-023-00023-1).

HUMUR, G.; ÇEVİK, A. Effects of hybrid fibers and nanosilica on mechanical and durability properties of lightweight engineered geopolymer composites subjected to cyclic loading and heating–cooling cycles. *Construction and Building Materials*, v. 326, p. 126846, 2022. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2022.126846](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126846).