

CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM ADIÇÃO DE NANOSSÍLICA

André de Andrade Novais

Bacharel em Engenharia Civil (andre67andrade@gmail.com)

Filipe Farinha Bittar

Bacharel em Engenharia Civil (filipefarinha97@hotmail.com)

Gabriel de Paiva Godoi Silva

Bacharel em Engenharia Civil (gabrielpaiva.engenharia@gmail.com)

Igor Henrique Alves Dias Silva

Bacharel em Engenharia Civil (igorhenrique0607@outlook.com)

Eduardo Martins Toledo

Mestre, Docente da Universidade Evangélica de Goiás - UniEVANGÉLICA e Universidade Estadual de Goiás - UEG (eduardo.toledo@ueg.br)

Julliana Simas Vasconcellos

Doutora, Docente da Universidade Estadual de Goiás - UEG (julliana.simas@ueg.br)

Ana Lúcia Carrijo Adorno

Doutora, Docente da Universidade Evangélica de Goiás - UniEVANGÉLICA e Universidade Estadual de Goiás - UEG (ana.carrijo@unievangelica.edu.br; ana.adorno@ueg.br)

RESUMO

O concreto autoadensável (CAA) é amplamente utilizado na construção civil por sua capacidade de fluir e preencher formas sem a necessidade de vibração. Essa característica contribui para maior eficiência, redução de custos com mão de obra e diminuição da poluição sonora no ambiente de trabalho. Este artigo explora a adição de nanossílica ao CAA, visando potencializar suas propriedades mecânicas e de durabilidade. A nanossílica, uma forma de dióxido de silício com partículas em escala nanométrica, é altamente reativa e melhora a resistência à compressão, a permeabilidade e a microestrutura do concreto. A pesquisa foi conduzida com o objetivo de avaliar a influência da nanossílica no desempenho do CAA, especialmente na resistência inicial e na fluidez, utilizando ensaios de compressão e *flow test*. Os resultados mostraram que a nanossílica acelera o desenvolvimento da resistência, sendo especialmente eficaz nas primeiras horas de cura, com ganhos de até 94% na resistência do concreto em relação ao traço controle. Além disso, o uso de nanossílica aumentou a fluidez do concreto, facilitando a aplicação em formas complexas e áreas com alta densidade de armadura. No estado endurecido, o concreto com nanossílica apresentou uma resistência superior de 14%, após 28 dias de cura. Em termos ambientais, a utilização de nanossílica permite a redução do consumo de cimento, o que contribui para a diminuição das emissões de CO₂. Portanto, a nanossílica é uma alternativa promissora para a construção de estruturas mais eficientes e sustentáveis.

PALAVRAS-CHAVE: concreto autoadensável; nanossílica; resistência mecânica.

1 INTRODUÇÃO

O concreto autoadensável (CAA) representa um avanço na construção civil por sua capacidade de preencher moldes sem necessidade de vibração, reduzindo a poluição sonora e a necessidade de mão de obra (Tutikian, 2004). Em busca de soluções ainda mais avançadas e sustentáveis, a incorporação de nanossílica ao CAA surge como uma inovação promissora, potencializando tanto a resistência mecânica quanto a durabilidade do concreto, atributos essenciais para estruturas de concreto armado.

O CAA atende os critérios de fluidez e resistência à segregação, assegurando sua eficácia em diversas aplicações (Haeffliger, 2017). A adição de nanossílica ao CAA oferece benefícios significativos, como a melhoria na resistência à compressão e a redução da permeabilidade, o que contribui para um menor impacto ambiental. Isso ocorre porque a nanossílica permite reduzir o consumo de cimento, um dos principais emissores de CO₂ na produção.

A nanossílica, uma forma amorfa de dióxido de silício em escala nanométrica, apresenta alta reatividade com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento (Pedroso, 2021; Pereira, 2019). Sua adição ao CAA não apenas gera uma estrutura cimentícia mais densa e menos porosa, como também refina a microestrutura do concreto, resultando em um material com menores vazios capilares e maior durabilidade ao longo do tempo.

Essas características fazem da nanossílica uma opção estratégica para construções que demandam resistência e rápida desforma, como em paredes de concreto moldadas *in loco*. Além disso, o uso de nanossílica favorece uma vida útil prolongada e maior segurança estrutural em condições adversas (Vasconcellos, 2021; Santos, 2021).

Este estudo visa avaliar a influência da nanossílica no concreto autoadensável, com foco na resistência inicial e na trabalhabilidade. Em termos específicos, busca-se analisar a resistência à compressão de concreto autoadensável com adição de nanossílica, observando o desenvolvimento de resistência nas primeiras horas de cura e até 28 dias. Além disso, investiga-se a trabalhabilidade e a fluidez do concreto autoadensável com nanossílica, comparando com o CAA sem aditivo, por meio de testes de espalhamento.

A investigação das propriedades do CAA com nanossílica busca contribuir para a literatura científica ao fornecer dados experimentais que demonstrem a eficácia dessa adição em termos de resistência mecânica e trabalhabilidade. Com isso, espera-se fornecer uma base para futuras pesquisas e aplicações na construção civil, facilitando a adoção de métodos construtivos mais eficientes.

O estudo também se propõe a comparar a eficácia da nanossílica em relação ao concreto autoadensável convencional em aplicações específicas, como paredes moldadas *in loco*, destacando a capacidade de desforma rápida e a adequação para estruturas que exigem alta durabilidade e resistência precoce.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONCRETO AUTOADENSÁVEL

Segundo a NBR 15823-1 (ABNT, 2017), o concreto autoadensável (CAA) é definido como um concreto capaz de fluir e se adensar pelo próprio peso, preencher a fôrma e passar por armaduras e dutos, enquanto mantém sua homogeneidade, ou seja, sem segregação durante as etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento.

A origem do CAA remonta à década de 1980 no Japão, resultado de pesquisas da Universidade de Tecnologia de Kochi e da Universidade de Tóquio. Esse desenvolvimento

foi impulsionado pela necessidade de aumentar a durabilidade das estruturas de concreto, dado que o Japão, por ser uma região com intensa atividade sísmica, exige estruturas altamente dúcteis e com armaduras densamente distribuídas. O concreto convencional vibrado (CCV) se mostrou ineficiente nessas condições, pois não conseguia envolver as armaduras em áreas congestionadas. Assim, o CAA, com sua fluidez, tornou-se uma solução ideal para o adensamento em áreas de armaduras densas, estendendo a vida útil dessas estruturas (Torres, 2022).

De acordo com Paumgartten (2010), embora o CAA tenha sido desenvolvido nos anos 1980, sua aplicação em larga escala só ocorreu em 1997, durante a construção das ancoragens de concreto da ponte Akashi-Kaikyo, no Japão, que na época possuía o maior vão livre do mundo. Foram utilizados 290.000 metros cúbicos de CAA devido à sua capacidade de eliminar a necessidade de adensamento, fundamental para o vasto volume de concreto empregado. O uso do CAA acelerou a execução e melhorou a qualidade estrutural da ponte.

No Brasil, o uso do CAA inicialmente foi limitado pelo alto custo dos aditivos e pela falta de conhecimento técnico (Geyer e Sá, 2005). Contudo, com a redução dos custos e o avanço do conhecimento, o CAA se tornou uma alternativa viável. Um exemplo é a construção do Museu Iberê Camargo em Porto Alegre, que começou em 2003. A obra utilizou CAA para atender exigências estéticas e desafios estruturais, como as paredes curvas (Faria, 2007).

Em Goiás, diversas empresas e a Universidade Federal de Goiás (UFG) iniciaram pesquisas para adaptar o CAA às condições brasileiras (Oliveira e Oliveira, 2018). Em Goiânia, o uso do CAA se popularizou a partir de 2001. Contudo, sendo uma inovação, não havia normas ou métodos específicos para o CAA no Brasil. A UFG conduziu pesquisas para adaptar os métodos de dosagem e adequar os aditivos às condições climáticas locais, como altas temperaturas, que interferem no desempenho dos aditivos superplastificantes.

A primeira aplicação significativa do CAA em Goiânia foi em 2004, na construção do Edifício Camila, Residencial Sorelle, pela Construtora Arcel Engenharia Ltda. O sucesso deste projeto estabeleceu Goiânia como referência para o uso do CAA, levando a adoção da tecnologia por cerca de metade das construções da cidade (Oliveira e Oliveira, 2018).

Tutikian e Molin (2021) destacam que as diferenças entre o CAA e o CCV são mais perceptíveis no estado fresco. No estado endurecido, as propriedades mecânicas e de durabilidade de ambos os concretos são influenciadas pela composição dos materiais. O CAA pode oferecer propriedades superiores ao CCV, dependendo da qualidade dos componentes, demonstrando sua relevância para a durabilidade estrutural.

Loturco e Faria (2008 *apud* Oliveira e Oliveira, 2018) apontam que o CAA tem diversas vantagens sobre o CCV, como a redução da mão de obra, pois o CAA preenche espaços vazios e contorna armaduras sem vibração. Além disso, a obra é mais rápida devido à concretagem, otimizando o processo de bombeamento (Vieira, 2013).

A redução de ruído no canteiro é outra vantagem, uma vez que a vibração é dispensada. Estudos de Bartos e Söderlind (2000, *apud* Tutikian, 2004) indicam que os ruídos são menores com o CAA, melhorando a segurança no canteiro. No caso da concretagem de lajes, por exemplo, o número reduzido de trabalhadores diminui o risco de acidentes, como desabamentos.

O CAA também proporciona um acabamento superior, com uma aparência visual mais uniforme e menos espaços vazios. Sua durabilidade é ampliada pela menor incidência de falhas durante a concretagem. Tutikian (2004) observa que o CAA requer menos reparos, pois sua estrutura densa e o uso de materiais finos melhoram suas propriedades no estado endurecido.

Apesar de inicialmente mais caro que o CCV, o CAA torna-se vantajoso a longo prazo, compensando o custo com economia de mão de obra e energia (Tutikian, 2004).

Mendes, Bauer e Silva (2017) ressaltam que o CAA otimiza o cronograma da obra com alta produtividade e menor necessidade de equipamentos e mão de obra, embora exija trabalhadores capacitados para sua produção e controle.

Contudo, essa rapidez também apresenta riscos. Segundo Billberg (2003 *apud* Tutikian e Molin, 2021), o CAA pode aumentar a pressão nas fôrmas, levando a colapsos se o tempo de concretagem não for controlado, como ao concretar camadas adicionais sem esperar a pega da anterior.

A trabalhabilidade do CAA no estado fresco é necessária, pois ele se adensa sem intervenção humana, não permitindo correções. Para assegurar essa trabalhabilidade, foram desenvolvidos equipamentos para medir suas propriedades reológicas. Esses equipamentos confirmam as características de dosagem previamente estabelecidas, pois ajustes diretos no caminhão-betoneira são complexos.

Para manipular o CAA com eficácia, é essencial compreender suas características que o diferenciam do CCV. Sua alta fluidez permite o fácil fluxo do material, enquanto a viscosidade garante que grandes partículas sejam transportadas sem segregação. Assim, o CAA combina fluidez e viscosidade (Tutikian e Molin, 2021).

Do ponto de vista reológico, o comportamento do CAA é definido pela viscosidade plástica e pela tensão de cisalhamento. A viscosidade plástica permite o fluxo, enquanto a tensão de cisalhamento inicia o movimento. A fluidez sem segregação do CAA deriva de sua baixa tensão de cisalhamento e alta viscosidade, mantida por aditivos superplastificantes e finos como o cimento. Embora a adição de água aumente a fluidez, ela reduz a viscosidade, ao contrário dos superplastificantes, que aumentam a fluidez sem prejudicar a viscosidade (Okamura, 1997 *apud* Tutikian e Molin, 2021).

A trabalhabilidade do CAA em estado fresco envolve fluidez, coesão entre obstáculos e resistência à segregação. A NBR 15823-1 (ABNT, 2017) estabelece os limites dessas propriedades com ensaios específicos, como o apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Ensaios e classificação para o CAA

(continua)

<i>Ensaio</i>	<i>Classe</i>	<i>Valores Limites</i>	<i>Aplicação</i>
Cone de Abrams (Espalhamento)	SF1	550 a 650 mm	Estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura
	SF2	660 a 750 mm	Maioria das aplicações correntes
	SF3	760 a 850 mm	Estruturas com alta densidade de armadura e/ou fôrma arquitetônica complexa
T500 (Tempo de Escoamento)	VS1	≤ 2 s	Elementos estruturais com alta densidade de armadura
	VS2	> 2 s	Maioria das aplicações correntes
Anel-J (Habilidade Passante)	PJ1	0 a 25 mm com 16 barras de aço	Maioria das aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 60 mm a 80 mm
	PJ2	25 a 50 mm com 16 barras de aço	Elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 80 mm a 100 mm
Caixa-L (Habilidade Passante)	PL1	$H2/H1 \geq 0,80$, com duas barras de aço	Elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 80 mm a 100 mm

Quadro 1 - Ensaio e classificação para o CAA

(conclusão)

Ensaio	Classe	Valores Limites	Aplicação
Caixa-L (Habilidade Passante)	PL2	$H2/H1 \geq 0,80$, com três barras de aço	Maioria as aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 60 mm a 80 mm
Caixa-U (Habilidade Passante)	PU	$H2-H1 \leq 30$ mm	Maioria as aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 60 mm a 80 mm
Funil-V (Viscosidade)	VF1	≤ 8 s	Elementos estruturais com alta densidade armadura
	VF2	9 a 25 s	Maioria das aplicações correntes
Coluna de Segregação ou Método da Peneira (Resistência à Segregação)	SR1	≤ 20 , distância a ser percorrida pelo concreto menor que 5 m	Espaçamento entre armaduras > 80 mm
	SR2	≤ 15 , distância a ser percorrida pelo concreto maior que 5 m	Espaçamento entre armaduras > 80 mm
		≤ 15 , distância a ser percorrida pelo concreto menor que 5 m	Espaçamento entre armaduras < 80 mm

Fonte: Adaptado da NBR 15823-1 (ABNT, 2017).

Embora as vantagens do CAA sejam principalmente atribuídas às suas características no estado fresco, suas propriedades no estado endurecido, como resistência e durabilidade, também são significativas. O CAA apresenta menor módulo de elasticidade, melhor aderência ao aço e maior durabilidade (Melo, 2005 *apud* Oliveira e Oliveira, 2018).

O CAA, quando possui relação água/cimento similar ao CCV, pode atingir resistência à compressão igual ou superior, devido ao aumento da interface entre pasta e agregados. Na produção de CAA, a resistência é influenciada pela dosagem e composição, especialmente pelos aditivos (Verzegnassi, 2015).

Em obras pré-moldadas, o CAA geralmente tem fator água/cimento entre 0,32 e 0,40. Em obras *in loco*, esse fator pode ser superior a 0,40, mantendo resistências comparáveis ao CCV. O módulo de elasticidade do CAA também se correlaciona com a resistência à compressão e o tipo de agregados (Calado *et al.*, 2015).

Embora a resistência à tração do CAA seja equivalente à do CCV, sua proporção com a resistência à compressão é similar (Verzegnassi, 2015). A dosagem adequada e o uso de aditivos superplastificantes preservam as propriedades autoadensáveis do CAA, como fluidez e homogeneidade, além de uma proporção de finos, essenciais para evitar segregação (Calado *et al.*, 2015).

Em síntese, o concreto autoadensável (CAA) destaca-se como uma solução eficiente para projetos que demandam qualidade no acabamento, especialmente em estruturas com alta densidade de armadura. Suas propriedades no estado fresco, como a fluidez e a resistência à segregação, facilitam a execução de estruturas complexas, enquanto seu desempenho no estado endurecido se mostra comparável ao concreto convencional vibrado (CCV). O uso do CAA, porém, requer um controle adequado na dosagem e no manuseio dos aditivos para garantir que suas características sejam preservadas ao longo do processo construtivo.

2.2 NANOSSÍLICA

A nanotecnologia, que emergiu como um campo de estudo em 1959, conforme Sanchez e Sobolev (2010), aborda a engenharia das propriedades e dos fenômenos que

se manifestam em materiais com dimensões que variam entre 1 a 100 nanômetros (nm). Inicialmente adotada na indústria de compostos cimentícios durante a década de 1980, a nanotecnologia tem oferecido atributos que impulsionam o desenvolvimento de materiais de alto desempenho na construção civil. Apesar de seu uso relativamente recente, já revolucionou o mercado pela maneira como melhora a resistência à compressão e as características gerais dos concretos, além de contribuir para a aderência dos materiais, como aponta Pedroso (2021).

Atualmente, o setor da construção civil está fazendo uso extensivo de nanomateriais, como os nanotubos de carbono (NTCs). Esses elementos, compostos por carbono em arranjo hexagonal formando cilindros, atuam no concreto como reforços ao penetrar pequenos poros e fissuras. Eles são eficazes em proporcionar uma alta resistência de aderência com a matriz de cimento, pois os materiais são envolvidos pelo C-S-H (Silicato de Cálcio Hidratado). Além dos NTCs, outras nanopartículas estão sendo estudadas como aditivos, incluindo o óxido de titânio nanométrico (nano-TiO₂), a nanoalumina (nano-Al₂O₃), a nano-magnetita (nano-Fe₃O₄) e a nanossílica (nano-SiO₂), conforme aponta Orellana (2019).

De acordo com Coppetti *et al.* (2020), a nanossílica é uma forma de sílica amorfa altamente reativa que, devido ao seu tamanho reduzido, confere ao compósito uma resistência superior, maior durabilidade e mais coesão em comparação ao concreto tradicional. Dessa forma, é evidente que o concreto autoadensável enriquecido com nanossílica representa um significativo avanço para os canteiros de obras, melhorando as propriedades mecânicas do concreto e assegurando a qualidade do serviço prestado.

Santos (2018) menciona que a nanossílica, frequentemente disponibilizada em forma de suspensão coloidal, tem emergido como uma alternativa promissora para adição aos materiais cimentícios. Essa tendência é impulsionada pelo avanço contínuo das pesquisas e experimentos laboratoriais na área de nanotecnologia, embora sua utilização ainda ocorra em escala menor, quando comparada à sílica ativa.

A nanossílica, composta por sílica amorfa e partículas esféricas de tamanho inferior ao da sílica ativa, possui uma área superficial consideravelmente maior. Isso resulta em uma atividade pozolânica mais intensa, o que aumenta a demanda por água durante o processo e pode reduzir a consistência da mistura em casos em que a relação água/cimento (a/c) é pré-definida. Devido à sua granulometria mais fina, a nanossílica é particularmente eficaz no preenchimento de vazios entre os grãos de cimento, aumentando a densidade do acondicionamento dos compostos cimentícios. Além disso, oferece outras vantagens significativas, como a aceleração da hidratação do cimento e o aumento da tenacidade, bem como melhorias na resistência à compressão, ao cisalhamento, à tração e à flexão, conforme relatado por Hongjian *et al.* (2014) e Santos (2018).

A área de engenharia civil tem concentrado grande parte de suas pesquisas sobre a incorporação de nanopartículas na utilização de nano-SiO₂, como destacam Kawashima, Hou, Corr e Shah (2013). Estudos indicam que a adição dessas nanopartículas provoca alterações microestruturais significativas, atuando como um ativador das reações pozolânicas.

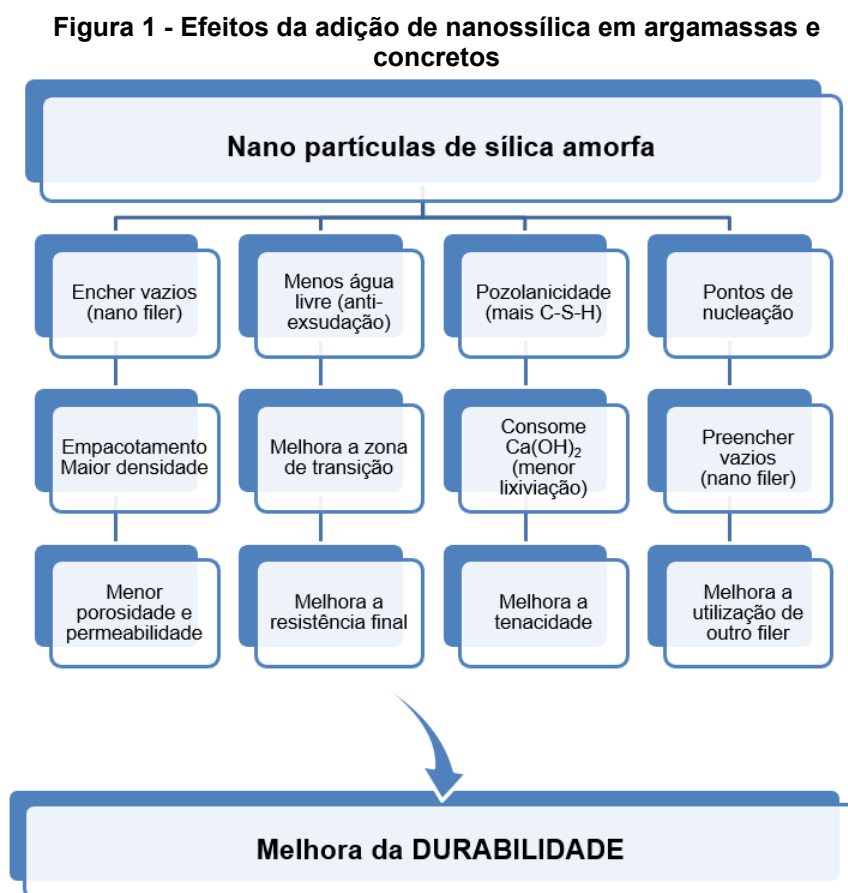
De forma análoga aos efeitos conhecidos da sílica ativa, a nano-SiO₂ interage com o hidróxido de cálcio Ca(OH)₂, resultando em uma produção aumentada de gel de C-S-H, que contribui para a densificação do material. Essa interação resulta em uma redução da permeabilidade do concreto, conforme identificado por Said *et al.* (2012), além de diminuir a lixiviação de íons cálcio com carga positiva (Ca²⁺).

É relevante notar, conforme Sena (2018 *apud* Pedroso, 2021), que a nanossílica pode se apresentar em duas formas distintas no contexto da construção civil. A primeira é como grãos secos compactados, onde a nanossílica é submetida a um processo de preparação especial antes de ser incorporada ao concreto. Esse procedimento assegura

uma completa dispersão da nanossílica na água de amassamento ou em qualquer outro aditivo utilizado. A segunda forma é como suspensão coloidal, que já vem preparada para uso e é produzida como uma suspensão estabilizada por um agente dispersor. Essa última forma é considerada mais eficiente, devido à sua prontidão para uso e facilidade de aplicação no concreto.

A nanossílica, na forma de suspensão coloidal, é produzida por meio da precipitação de soluções de silicato de sódio (Na_2SiO_3), utilizando uma resina de troca iônica. Esse método envolve a combinação de água, hidróxido de sódio (NaOH) e ácido sulfúrico (H_2SO_4), em um processo que ocorre dentro de um reator sob condições controladas de temperatura e pressão. Durante este processo, formam-se grupos de silanóis e siloxanos (Si-OH e Si-O-Si), que são os precursores das partículas de nanossílica. Importante destacar que variáveis, como a temperatura e a adição de certas propriedades influenciam diretamente o tamanho dessas partículas, que são cuidadosamente filtradas para garantir a concentração de sólidos desejada no produto final, conforme explicado por Oliveira (2019). Uma vez formadas, as partículas coloidais de nanossílica interagem com o hidróxido de cálcio gerado durante a hidratação do cimento, resultando na formação de silicato de cálcio hidratado. Esse processo não só aumenta a densidade da pasta de cimento, como também fortalece a matriz cimentícia, conectando os grãos de cimento e preenchendo os espaços vazios, conforme descreve Souza (2021).

A Figura 1 retrata os efeitos de adição da nanossílica em argamassas e concretos.



Fonte: Adaptado de Quercia *apud* Souza (2021).

A Figura 1 ilustra, de maneira integrada, os benefícios da inclusão de nanopartículas de sílica amorfa ao concreto, evidenciando o impacto dessa adição nas propriedades microestruturais e macroestruturais do material. Essas nanopartículas atuam como um nano preenchimento, ocupando os espaços vazios entre os grãos de cimento, o

que resulta em uma matriz de concreto mais densa e homogênea. A redução da porosidade contribui para diminuir a água livre, controlando a exsudação e evitando a segregação e formação de canais de água, essencial para a manutenção da água necessária à hidratação do cimento.

A atividade pozolânica das nanopartículas também é destacada, reagindo com o hidróxido de cálcio presente no concreto para formar uma quantidade maior de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que é fundamental para a resistência do material. Além disso, as nanopartículas funcionam como pontos de nucleação que aceleram a hidratação e melhoram a microestrutura do concreto.

Importante ressaltar que a nanossílica melhora a zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento, o que tradicionalmente é considerado um ponto fraco no concreto. Ela também ajuda a consumir o hidróxido de cálcio, um subproduto da hidratação do cimento, reduzindo a lixiviação de cálcio e aumentando a durabilidade do concreto. Essa ação resulta em um concreto com menor porosidade e permeabilidade, melhorando sua resistência à penetração de agentes agressivos e promovendo uma significativa melhoria na resistência final e na tenacidade do material.

As propriedades da nanossílica em termos de otimização da densidade e empacotamento dos grãos de cimento conferem ao concreto melhorias em termos de durabilidade, resistência à compressão, ao cisalhamento, à tração e à flexão.

Ao abordar as propriedades mecânicas do concreto autoadensável (CAA), a adição de nanossílica é fundamental para aprimorar tanto a resistência quanto a durabilidade do material. Segundo estudos, mesmo uma pequena adição de nanossílica ao CAA pode provocar aumentos significativos na resistência à compressão. Essa melhoria ocorre porque a nanossílica atua como um catalisador das reações pozolânicas, acelerando o processo de endurecimento.

A nanossílica se destaca por ter partículas significativamente menores quando comparada a outros materiais, como o cimento, quartzo e sílica ativa, o que proporciona uma superfície específica mais ampla e melhora sua reatividade na aplicação. As partículas nanométricas da nanossílica interagem diretamente com os componentes do cimento, especialmente com o hidróxido de cálcio durante o processo de hidratação. Esse mecanismo leva à formação de géis de sílica, mais especificamente o silicato de cálcio hidratado, que ocupa os espaços vazios na matriz do concreto. Essa ação reforça a estrutura entre os grãos de cimento e elimina o excesso de água, resultando em uma pasta mais densa e robusta. Consequentemente, essa transformação melhora a capacidade do concreto autoadensável (CAA) de resistir às cargas de compressão, conforme explicado por Pedroso (2021).

Além disso, a distribuição uniforme da nanossílica nas partículas de cimento contribui para um melhor desempenho, tornando o CAA mais adequado para aplicações estruturais que exigem alta resistência.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Esta seção descreve o programa experimental conduzido para avaliar o desempenho do concreto autoadensável (CAA) com adição de nanossílica.

O estudo focou em analisar a influência da nanossílica na resistência à compressão do concreto. Para isso, foram desenvolvidos dois traços de concreto: um traço controle, sem nanossílica, e outro traço modificado, com a inclusão da nanossílica Levasil® CB30, fornecida pela empresa Nouryon.

O produto Levasil® CB30 é uma dispersão aquosa e alcalina de sílica coloidal com aproximadamente 30% de sólidos em peso. A dispersão de sílica é estabilizada com sódio

e suas partículas são amorfas e transportam uma carga superficial negativa. As partículas de sílica são nanométricas, têm uma forma esférica levemente áspera e estão presentes em uma distribuição estreita de tamanho de partícula. A aparência física da dispersão é um líquido translúcido, ligeiramente mais viscoso que a água (Figura 2). No Quadro 2 encontram-se as informações sobre esse produto.

Figura 2 - Nanossílica Levasil® CB30



Fonte: Autores, 2024.

Quadro 2 – Informações sobre o produto Levasil® CB30

Características	• Sílica: 30 wt% • Densidade: 1,2 g/cm³ • pH: 10.5 • Viscosidade: 7 cP
Aplicações	• Produto especializado usado principalmente no concreto para controlar a estabilidade, a segregação e a perda de água.
Armazenamento	• Deve ser transportado e armazenado a uma temperatura de 5-35 °C (40-95 °F).] • Se a dispersão de sílica congelar, a sílica irá precipitar irreversivelmente. • Para armazenamento a granel, o tanque deve ser selado e construído em plástico, plástico reforçado com fibra de vidro ou aço inoxidável. • Para produtos embalados, todos os pacotes translúcidos devem ser armazenados longe da luz solar direta ou da luz brilhante. • Sob condições recomendadas, tem um prazo de validade de pelo menos doze meses após a produção.
Embalagem e transporte	• Está disponível para venda a granel e em embalagens. • As quantidades de envio a granel e os tamanhos das embalagens podem variar de acordo com a região.
Segurança e manuseamento	• Sílica coloidal não é classificada como produto perigoso, mas como levemente irritante. • Como os produtos podem provocar um efeito de secagem na pele, luvas de proteção sempre devem ser usadas. • Em caso de contato com a pele, lave a área de contato com água. • O uso de óculos de segurança é sempre recomendado. Em caso de contato com os olhos, lave abundantemente com água e procure orientação médica profissional.

Fonte: Nouryon, 2022.

O traço de concreto utilizado neste experimento baseou-se em uma formulação padrão adotada por uma construtora conhecida pelo uso de paredes de concreto moldadas *in loco*. O traço aproximado para o concreto com nanossílica, com as proporções corrigidas, é expresso da seguinte forma: 1 : 0,06 : 1,94 : 1,31 : 2,19 : 0,81 : 0,0078 : 0,0525, onde as proporções correspondem a Cimento : Microssílica : Areia Natural : Areia Artificial : Brita 0 : Água : Aditivo : Nanossílica, respectivamente.

A formulação original é projetada para produzir 1m³ de concreto, e incluía cimento CPV ARI, microssílica, areia natural, areia artificial (pó de brita), brita 0, água e aditivo superplastificante Viscocrete 5700. Para os ensaios laboratoriais, a quantidade de materiais do traço original foi reduzida em uma proporção de 20 vezes, para adequação ao volume necessário para os testes. Essa redução foi realizada mantendo as proporções dos componentes, o que assegurou a representatividade do traço aplicado em obras reais, conforme demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição das misturas de concreto: original, reduzido e com nanossílica

Material	Composição Original	Composição Reduzida	Composição com Nanossílica
Cimento CPV ARI	320 kg	16 kg	16 kg
Microssílica	20 kg	1 kg	1 kg
Areia Natural	625 kg	31 kg	31 kg
Areia Artificial (Pó de Brita)	417 kg	21 kg	21 kg
Brita 0	700 kg	35 kg	35 kg
Água	258 L	13 L	13 L
Aditivo Viscocrete 5700	2,5 L	125 mL	125 mL
Nanossílica	-	-	840 g

Fonte: Autores (2024).

A confecção do concreto iniciou-se com a dosagem dos materiais, conforme as proporções estabelecidas para o traço experimental. Todos os componentes foram pesados e separados e foram adicionados gradualmente à betoneira em funcionamento, garantindo a homogeneização e a consistência ideal da mistura, como ilustrado na Figura 3 e Figura 4.

Figura 3 - Mistura dos materiais na betoneira



Fonte: Autores, 2024.

Figura 4 - Mistura final do concreto após adição de todos os componentes



Fonte: Autores, 2024.

O ensaio de fluidez (*flow test*) foi realizado para avaliar a trabalhabilidade do concreto autoadensável, utilizando os procedimentos descritos na NBR 15823 (ABNT, 2017).

A moldagem dos corpos de prova seguiu as diretrizes estabelecidas pela NBR 5738 (ABNT, 2016). Os corpos de prova cilíndricos foram preparados com dimensões padronizadas de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Durante a moldagem, foram aplicadas três camadas de concreto, cada uma compactada manualmente com 25 golpes de uma haste padrão, a fim de garantir a ausência de vazios e a homogeneidade do material. A Figura 5 exibe o processo de moldagem e a Figura 6 os corpos de prova moldados.

Figura 5 - Moldagem dos corpos de prova



Fonte: Autores, 2024.

Figura 6- Corpos de prova moldados



Fonte: Autores, 2024.

Os corpos de prova foram identificados e após serem retirados das fôrmas foram submersos em tanques de água saturada de cal, conforme especificado pela NBR 5738 (ABNT, 2016), como ilustrado na Figura 7. Essa etapa de cura é essencial para garantir que o concreto alcance seu potencial máximo de resistência, preservando a integridade das amostras durante o período de cura. A temperatura da água foi mantida constante, preferencialmente em 21 °C a 25 °C, para evitar variações que pudessem comprometer os resultados dos ensaios.

Figura 7 - Armazenamento dos Corpos de Prova em Tanque de Cura

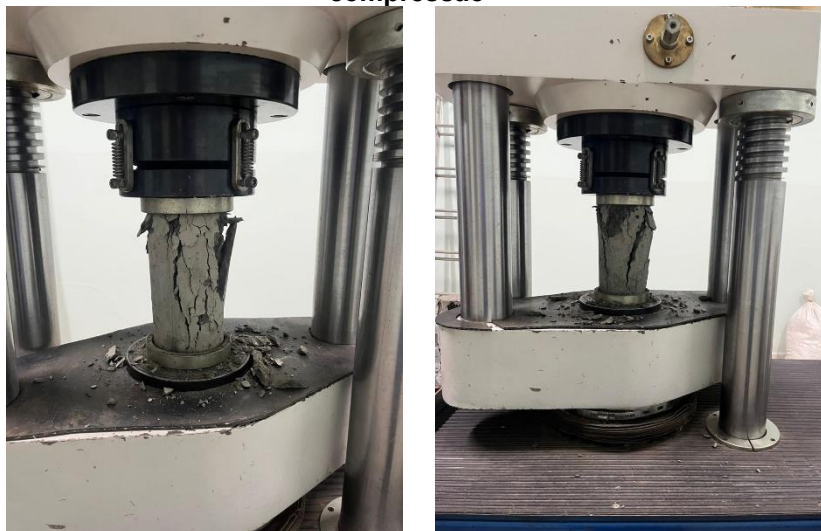


Fonte: Autores, 2024.

Para a realização dos ensaios de compressão, utilizou-se a NBR 5739 (ABNT, 2018) como referência, com a ruptura dos corpos de prova programada em diferentes intervalos de tempo. Como parte da abordagem experimental, foram realizadas rupturas em idades não usuais, incluindo 4h, 7h, 10h e 13h após a moldagem, além das idades padronizadas de 1, 3, 7, 14 e 28 dias. Esta escolha foi motivada pela necessidade de avaliar o efeito da nanossílica desde as fases iniciais de pega, especialmente em aplicações que demandam alta resistência inicial.

A Figura 8 apresenta a ruptura de corpos de prova durante ensaio de compressão simples.

Figura 8 – Ruptura dos corpos de prova durante o ensaio de compressão



Fonte: Autores, 2024.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados para avaliar o desempenho do concreto autoadensável (CAA) com adição de nanossílica. Os dados foram obtidos a partir dos testes conduzidos conforme descrito no programa experimental, abrangendo tanto as propriedades no estado fresco quanto no estado endurecido do concreto. Primeiramente, são apresentados e discutidos os resultados referentes à trabalhabilidade e fluidez, conforme medido pelo *flow test*. Em seguida, são apresentados os resultados dos ensaios de compressão, nos quais são verificadas as contribuições da nanossílica para a resistência mecânica do concreto nas diferentes idades de ruptura.

Os resultados obtidos são analisados comparativamente, destacando as diferenças de desempenho entre o traço controle (sem nanossílica) e o traço modificado com a adição da nanossílica. Essa análise permite avaliar a influência da nanossílica nas características do concreto, trazendo uma visão sobre a viabilidade e os benefícios do uso desse material em aplicações que demandam alta resistência inicial à compressão simples.

4.1 CONCRETO NO ESTADO FRESCO

O ensaio de fluidez (*flow test*) foi realizado para avaliar a trabalhabilidade do concreto autoadensável (CAA), conforme os procedimentos da NBR 15823 (ABNT, 2017). O traço controle apresentou um diâmetro de espalhamento médio de 675 mm, enquanto o

traço com nanossílica registrou um diâmetro ligeiramente superior, igual a 690 mm, representando um aumento de aproximadamente 2%. Esse aumento indica que a adição de nanossílica contribuiu para uma maior fluidez da mistura, facilitando seu escoamento e preenchimento de formas sem a necessidade de vibração mecânica. Esse resultado pode ser atribuído ao papel da nanossílica como agente de preenchimento, melhorando a coesão do concreto e reduzindo a necessidade de outros aditivos para obter a trabalhabilidade desejada.

A Figuras 9 e 10 ilustram os resultados do *flow test* para os traços com e sem nanossílica, respectivamente.

Figura 9 - Flow Test: Traço com Nanossílica (690 mm)



Fonte: Autores, 2024.

Figura 10 - Flow Test: Traço sem Nanossílica (675 mm)



Fonte: Autores, 2024.

4.2 CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios de compressão realizados em corpos de prova de concreto autoadensável (CAA), com e sem adição de nanossílica. Os testes foram conduzidos nos laboratórios da UniEvangélica (para o traço com nanossílica) e no laboratório Carlos Campos (para o traço sem nanossílica). A comparação entre os resultados permite avaliar a influência da nanossílica nas propriedades mecânicas do concreto ao longo do tempo, fornecendo uma visão dos efeitos dessa adição nas diferentes idades de cura.

Os resultados de tensão de ruptura para os corpos de prova sem nanossílica estão na Tabela 2, enquanto os resultados para os corpos de prova com nanossílica estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 2 - Tensão de ruptura dos corpos de prova sem nanossílica

(continua)

<i>Amostra</i>	<i>Idade</i>	<i>Tensão de Ruptura (MPa)</i>	<i>Tensão Média de Ruptura (MPa)</i>
1	4 horas	-	-
2		-	
3	7 horas	1,7	1,65
4		1,6	

Tabela 2 - Tensão de ruptura dos corpos de prova sem nanossílica

(conclusão)

<i>Amostra</i>	<i>Idade</i>	<i>Tensão de Ruptura (MPa)</i>	<i>Tensão Média de Ruptura (MPa)</i>
5	10 horas	3,4	3,55
6		3,7	
7	13 horas	5,1	5,10
8		5,1	
9	24 horas	10,6	10,85
10		11,1	
11	3 dias	16,5	17,00
12		17,5	
13	7 dias	22,4	21,80
14		21,2	
15	28 dias	26,2	25,95
16		25,7	

Fonte: Autores, 2024.

Tabela 3 - Tensão de ruptura dos corpos de prova com nanossílica

<i>Amostra</i>	<i>Idade</i>	<i>Tensão de Ruptura (MPa)</i>	<i>Tensão Média de Ruptura (MPa)</i>
1	4 horas	-	1,20
2		1,2	
3	7 horas	3,3	3,20
4		3,1	
5	10 horas	6,9	6,80
6		6,7	
7	13 horas	7,8	7,75
8		7,7	
9	24 horas	11,7	12,55
10		13,4	
11	3 dias	18,9	19,95
12		21,0	
13	7 dias	27,8	26,00
14		24,2	
15	28 dias	30,1	29,55
16		29,0	

Fonte: Autores, 2024.

A análise da Tabela 4 mostra que a adição de nanossílica tem um impacto significativo, especialmente nas primeiras horas de cura.

Nas primeiras 4 horas, o concreto com nanossílica apresenta resistência de 1,20 MPa, enquanto o concreto sem nanossílica não apresenta resistência mensurável. Esse dado indica que a nanossílica já contribui para o ganho inicial de resistência, acelerando a hidratação do cimento, mesmo em estágios iniciais de cura.

Com 7 horas de idade, o concreto com nanossílica alcança 3,20 MPa, o que é próximo ao dobro da resistência do concreto sem nanossílica, que foi de 1,65 MPa. Esse ganho de 94% na resistência demonstra que, nas primeiras horas, a nanossílica tem um efeito significativo no desenvolvimento inicial da resistência do concreto.

Com 10 horas de cura, o ganho continua expressivo. O concreto com nanossílica atingiu 6,80 MPa, enquanto o concreto sem o aditivo ficou com 3,55 MPa. A diferença de 91% entre os dois traços mostra que a nanossílica continua acelerando o processo de cura, com um aumento considerável na resistência nas primeiras horas.

Tabela 4 - Tensão média de ruptura dos corpos de prova

Idade	<i>Tensão Média de Ruptura dos CPs sem nanossílica (MPa)</i>	<i>Tensão Média de Ruptura dos CPs com nanossílica (MPa)</i>	<i>Tensão com nanossílica / Tensão sem nanossílica</i>
4 horas	-	1,20	-
7 horas	1,65	3,20	1,94
10 horas	3,55	6,80	1,92
13 horas	5,10	7,75	1,52
24 horas	10,85	12,55	1,16
3 dias	17,00	19,95	1,17
7 dias	21,80	26,00	1,19
28 dias	25,95	29,55	1,14

Fonte: Autores, 2024.

Com 13 horas após a moldagem, o concreto com nanossílica alcança 7,75 MPa, enquanto o traço sem nanossílica chega a 5,10 MPa. Essa diferença entre os traços, equivalente a 52%, evidencia uma diferença menor quando comparada aos rompimentos anteriores, mas permanece expressiva. Esse resultado é esperado, já que o efeito acelerador proporcionado pela nanossílica tende a diminuir ao longo do tempo.

Às 24 horas de idade, a diferença de desempenho começa a diminuir. O concreto com nanossílica apresenta resistência de 12,55 MPa, enquanto o traço sem nanossílica tem 10,85 MPa. A melhoria de 16% reflete a diminuição do impacto relativo da nanossílica, mas ela ainda oferece uma resistência superior.

Aos 3 dias de idade, o concreto com nanossílica atinge 19,95 MPa, superando os 17,00 MPa do concreto sem nanossílica. A diferença de 17% continua a evidenciar o efeito positivo da nanossílica, embora a diferença entre os dois traços estejam começando a diminuir.

Aos 7 dias de idade, o concreto com nanossílica atinge 26,00 MPa, enquanto o concreto sem nanossílica chega a 21,80 MPa. A melhoria de 19% ainda é relevante, indicando que a nanossílica continua a melhorar a resistência, mas o ganho relativo já não é tão elevado quanto nas primeiras horas.

Por fim, aos 28 dias de idade, o concreto com nanossílica atinge 29,55 MPa, enquanto o traço sem aditivo fica com 25,95 MPa. A diferença final de 14% mostra que, embora a melhoria tenha diminuído ao longo do tempo, a adição de nanossílica ainda resulta em um concreto mais resistente, o que é benéfico para a durabilidade das estruturas.

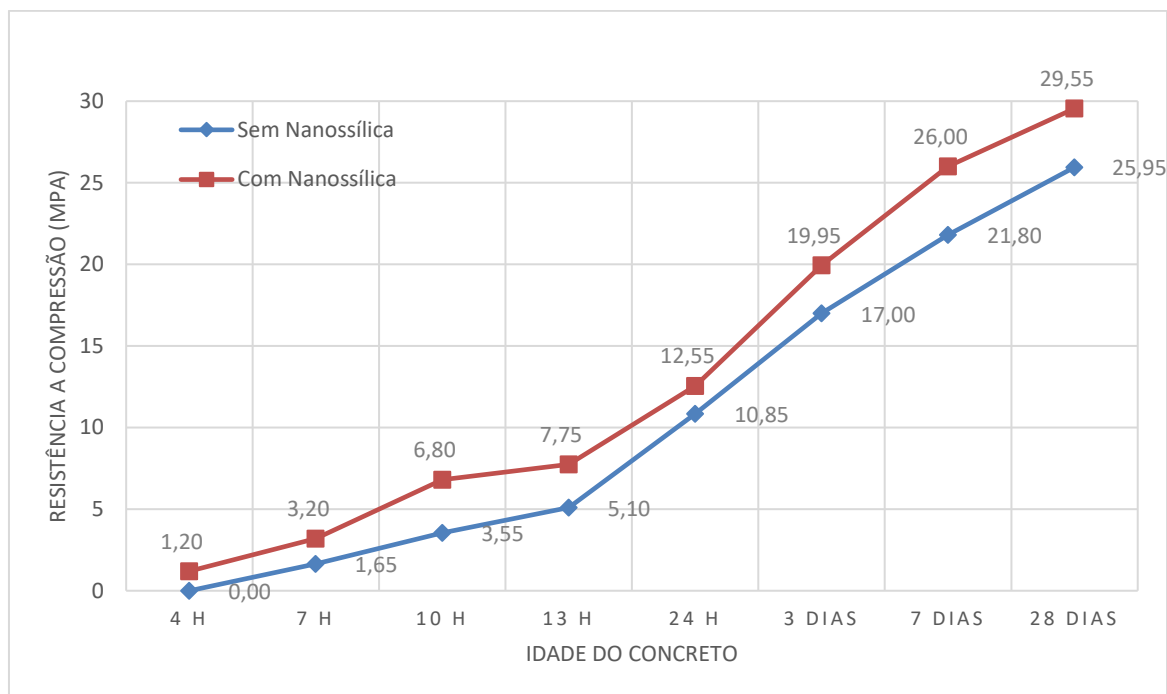
Portanto, a análise dos resultados da Tabela 4 mostra que a adição de nanossílica acelera o desenvolvimento da resistência nas primeiras horas de cura, com ganhos de até 94% nas primeiras 7 horas. Esse efeito diminui com o tempo, mas mesmo aos 28 dias, o concreto com nanossílica apresenta uma resistência superior de 14%. Isso sugere que a

nanossílica é uma excelente opção para melhorar a resistência inicial do concreto, especialmente em aplicações que exigem desforma rápida e alta resistência precoce.

O gráfico da Figura 11 ilustra a evolução da resistência à compressão dos concretos com e sem nanossílica ao longo do tempo.

A análise do gráfico confirma o efeito acelerador da nanossílica nas primeiras horas de cura, o que é particularmente vantajoso para aplicações que exigem resistência rápida, como em desforma precoce. Ao longo do tempo, a diferença entre os dois traços diminui, o que reflete a estabilização das propriedades do concreto.

Figura 11 - Gráfico da evolução da resistência à compressão do concreto com e sem nanossílica



Fonte: Autores, 2024.

A utilização nanossílica se mostra eficaz no aumento da resistência à compressão do concreto autoadensável, com um impacto mais significativo nas primeiras horas de cura, mas que ainda oferece benefícios a longo prazo, como observado no gráfico e na Tabela 4. Isso destaca seu potencial em melhorar a produtividade e a durabilidade das estruturas, sendo especialmente útil em aplicações que exigem maior desempenho inicial, como em obras com parede de concreto onde a agilidade é um fator essencial para o resultado da construção.

4.3 ANÁLISE DE CUSTOS DO USO DA NANOSSÍLICA

O uso da nanossílica no concreto ainda é pouco difundido nas obras, principalmente devido à dificuldade de aquisição do material e ao seu alto custo em relação aos insumos tradicionais da composição do concreto. Embora suas propriedades ofereçam diversos benefícios, essas vantagens nem sempre são perceptíveis a curto prazo, o que pode limitar sua adoção em projetos com foco em resultados imediatos.

Embora a nanossílica ofereça propriedades técnicas vantajosas, como a aceleração do ganho de resistência inicial, a redução da porosidade do concreto e a melhoria no acabamento estrutural, esses benefícios são mais evidentes em análises de longo prazo. Por exemplo, em estruturas sujeitas a ambientes agressivos ou que demandam alta durabilidade, o uso da nanossílica pode reduzir custos futuros de

manutenção e reparos. No entanto, em obras convencionais ou de menor escala, os custos adicionais podem não ser compensados pela percepção dos ganhos.

Tabela 5 – Custos materiais produção do concreto

Material	Composição	Valor Unitário	Composição Sem N.S.	Composição Com N.S.
Cimento CPV ARI	320 kg	1,25 R\$/kg	R\$ 400,00	R\$ 400,00
Microsílica	20 kg	1,80 R\$/kg	R\$ 36,00	R\$ 36,00
Areia Natural	625 kg	0,08 R\$/kg	R\$ 50,00	R\$ 50,00
Areia Artificial (Pó de Brita)	417 kg	0,13 R\$/kg	R\$ 54,21	R\$ 33,36
Brita 0	700 kg	0,13 R\$/kg	R\$ 91,00	R\$ 91,00
Água	258 L	-	-	-
Aditivo Viscocrete 5700	2,5 L	33,30 R\$/kg	R\$ 83,25	R\$ 83,25
Nanossílica	16,8 kg	17,3 R\$/kg	-	R\$ 290,64
Total			R\$ 714,46	R\$ 1.005,10

Com base no traço estudado para o levantamento de custos, o concreto autoadensável apresentou um valor de R\$714,46 por m³ sem a adição de nanossílica. Ao incluir a nanossílica na composição, o custo sobe para R\$1.005,10 por m³, representando um acréscimo de R\$290,64 devido ao custo do material. Esse valor equivale a um aumento de aproximadamente 37% em relação ao custo original do concreto.

A escolha de incluir a nanossílica na composição do concreto deve ser cuidadosamente avaliada, considerando o tipo de obra, a expectativa de desempenho, o orçamento disponível e os resultados desejados a curto e longo prazo. Para que sua utilização se torne mais comum, é necessário ampliar a oferta do material, reduzir os custos de produção e fortalecer a disseminação de conhecimento técnico no setor da construção civil.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo demonstrou que a adição de nanossílica ao concreto autoadensável (CAA) proporciona uma significativa melhoria nas propriedades mecânicas, principalmente em termos de resistência à compressão. A análise dos resultados experimentais mostrou que a nanossílica acelera o desenvolvimento inicial da resistência à compressão, sendo especialmente eficaz nas primeiras horas de cura. Esse efeito é importante para projetos que exigem rápida desforma, já que permite que o concreto atinja resistências adequadas em um período curto.

A fluidez aumentada, observada no *flow test*, sugere que a nanossílica não só melhora as propriedades mecânicas do concreto, mas também facilita a aplicação do material em fôrmas complexas e estruturas com alta densidade de armadura. Esse benefício resulta em um processo de execução mais ágil, sem a necessidade de vibração mecânica, capaz de melhorar a qualidade do acabamento.

Concretos com nanossílica apresentam uma microestrutura mais densa e menos permeável, o que reduz a vulnerabilidade à penetração de agentes agressivos, como água e cloretos. Esse fator implica diretamente em uma maior vida útil das estruturas, o que é particularmente vantajoso em ambientes agressivos, como regiões litorâneas ou industriais.

Do ponto de vista ambiental, a adição de nanossílica permite uma redução da quantidade de cimento necessária para atingir a resistência desejada, o que resulta em uma diminuição no impacto ambiental, alinhando-se às diretrizes de construção

sustentável. A redução nas emissões de CO₂ associadas à produção de cimento é um benefício importante no contexto atual, que demanda soluções mais ecológicas para a construção civil.

A pesquisa evidenciou que, embora seu uso ainda não seja amplamente difundido devido às limitações econômicas, suas propriedades atendem ao objetivo de aumentar a resistência do concreto, confirmando o potencial desse material para aplicações específicas, os resultados mostram que a nanossílica pode oferecer benefícios significativos. No entanto, para que esses benefícios sejam plenamente alcançados, é fundamental um controle rigoroso na dosagem e na aplicação do material.

Em conclusão, este estudo contribui para o entendimento do papel da nanossílica no concreto autoadensável, oferecendo uma solução eficaz para melhorar tanto a resistência inicial quanto a trabalhabilidade do material. Com os avanços contínuos na nanotecnologia, espera-se que o uso de nanossílica se torne cada vez mais acessível e comum na construção civil, representando um componente chave para o futuro das edificações mais sustentáveis e eficientes.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1: Concreto autoadensável - Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5739: Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2018. 9 p.

CALADO, C.; CAMÕES, A.; MONTEIRO, E.; HELENE, P.; BARKOKÉBAS Jr, B. **Durability Indicators Comparison for SCC and CC in Tropical Coastal Environments**. Materials, 8, 1428-1450, 2015.

COPPETTI, L. A. *et al.* **A avaliação das propriedades mecânicas de concretos de pós reativos com uso de nanossílica**. Revista de Ciencia Tecnología e Innovación, v. 1, n. 2. Disponível em: <https://revistas.fio.unam.edu.ar/index.php/masingenio/article/view/150/937>. Acesso em: 13 jan. 2024.

FARIA, Renato. **Escultura Monolítica**. Técnica, n. 129, dez. 2007. Disponível em: <http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/132/artigo286483-1.aspx>. Acesso em: 05 mai. 2014.

GEYER, André Luiz Bottolacci; SÁ, Rodrigo Resende de. **Concreto auto-adensável: Uma nova tecnologia à disposição da construção civil de Goiânia. Aparecida de Goiânia**: Realmix, 2005.

HAEFLIGER, Camila. **Desempenho do concreto autoadensável no estado fresco e endurecido: uma análise comparativa com uso de sílica da casca de arroz**. 2017. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Univates, Lajeado.

HONGJIAN, D.; SUHUAN, D.; XUEMEI, L. **Durability performances of concrete with nano-silica. Construction and Building Materials**, v. 73, p. 705-712, 2014.

KAWASHIMA, S.; CHAOUICHE, M.; CORR, D. J.; SHAH, S. P. **Adhesive properties of nanoclay-modified cementitious materials**. Fifth North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Chicago, 2013.

MENDES, Marcus; BAUER, Elton; SILVA, Francisco. **Avaliação dos parâmetros de autoadensabilidade e de reologia do concreto autoadensável**. Revista Matéria, v. 22, n. 4, out. 2017.

NOURYON. **Levasil® CB30: Colloidal silica**. 2022. 20 p. Disponível em: https://www.leueditora.com.br/wp-content/uploads/2021/04/PDF_divulgacao_ConcretoAutoadensavel.pdf. Acesso em: 10 nov. 2024.

OLIVEIRA, A. P. **Estudo de matrizes cimentícias ternárias contendo sílica ativa e nanossílica**. Goiânia, 2019. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás.

OLIVEIRA, Adriane Cardoso G. De; OLIVEIRA, Márcia Janaína A. de. **Estudo das propriedades do concreto autoadensável**. TCC, UniEvangélica, Anápolis, GO, 2018.

ORELLANA, J. P. L. et al. **Desempenho mecânico e físico de concretos com adição de nanossílica e nanoalumina coloidais**. Revista Técnico-Científica do CREA-PR, 2019.

PAUMGARTTEN, Mariana Domingues. **Concreto Auto-Adensável com materiais encontrados na região de Belém**. TCC, Universidade da Amazônia, Belém, 2010.

PEDROSO, Henrique Thiago Roque. **Análise da influência da nanossílica na resistência à compressão de concretos: uma revisão**. 2021. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

PEREIRA, Fernando do Carmo. **Estudo da carbonatação de concretos com adição de nanossílica**. 2019. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

SAID, A. M. et al. **Properties of concrete incorporating nano-silica. Construction and Building Materials**, v. 36, p. 838–844, 2012.

SANCHEZ, Florence; SOBOLEV, Konstantin. **Nanotechnology in concrete – A review. Construction And Building Materials**, v. 24, n. 11, p. 2060-2071, nov. 2010.

SANTOS, K. K. P. dos. **Estudo comparativo da adição de nanossílica e sílica ativa no concreto**. Trabalho de Conclusão de Curso, UniEvangélica, Anápolis, GO, 2021.

SANTOS, M. O. **Estudo de concretos com adição de nanossílica submetidos à ação combinada de íons cloreto e CO₂**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, 2018.

SOUZA, A. L. R. **Efeitos da mistura de sílica ativa e nanosílica na durabilidade do concreto**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2021.

TORRES, Carlos Alberto Benedetty. **Efeito da orientação de fibras de aço no comportamento do concreto autoadensável de alta resistência**. Tese de Doutorado, Unicamp, 2022.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto Autoadensável**. 3. ed. São Paulo: Leud, 2021.

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca. **Método para dosagem de concretos autoadensáveis**. Dissertação de Mestrado, UFRGS, 2004.

VASCONCELLOS, J. S. **Microestrutura de pastas de cimento Portland com a incorporação de nanossílica funcionalizada com grupos amina**. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2021.

VERZEGNASSI, Emerson. **Estudo das propriedades no estado fresco e endurecido do concreto leve autoadensável**. Dissertação de Mestrado, Unicamp, 2015.

VIEIRA, Romney Anderson Gonçalves. **Vantagens do concreto autoadensável comparado ao concreto convencional**. Monografia, UFMG, 2013.