

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE MISTURAS DE SOLO-CIMENTO COM NANOPARTÍCULAS PARA UTILIZAÇÃO EM ALVENARIA

COMPRESSION STRENGTH OF SOIL-CEMENT MIXTURES WITH NANOPARTICLES FOR USE IN MASONRY

DANIEL DA SILVA ANDRADE

Universidade Estadual de Goiás, Anápolis - GO, Brasil
ds.andrade@hotmail.com

EMILLY CRISTINA SOUZA SANTOS

Universidade Evangélica de Goiás, Anápolis - GO, Brasil
emilly.dsmoveis@gmail.com

GIOVANNA FERNANDES RIBEIRO

Universidade Evangélica de Goiás, Anápolis - GO, Brasil
gixvannx@gmail.com

Resumo: Diante dos atuais desafios da construção civil, que exigem soluções mais sustentáveis e de menor impacto ambiental, o solo-cimento apresenta-se como uma alternativa viável, sendo um material de construção constituído pela mistura homogeneizada, compactada e curada de solo, cimento Portland e água em proporções adequadas. A possibilidade de utilização de um baixo teor de cimento, aliada à ausência de queima, utilizada na fabricação dos tijolos cerâmicos, torna o solo-cimento um material de baixo impacto ambiental, contribuindo para a sustentabilidade na construção. Este trabalho tem como finalidade avaliar a resistência à compressão de misturas de solo-cimento, binárias e ternárias, com nanossílica e/ou metacaulim, com o objetivo de avaliar a potencialidade destes materiais para a utilização em alvenarias de tijolos prensados ou painéis de paredes monolíticas. Foram produzidos corpos de prova cilíndricos (5x10cm) com misturas binárias e ternárias, contendo cimento Portland, nanossílica (3%) e/ou metacaulim (5%, 10% ou 15%), em substituição parcial ao cimento. A resistência à compressão dos corpos de prova foi determinada de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018). A nanossílica, utilizada individualmente e em conjunto com o metacaulim, exerceram influências relevantes na resistência à compressão das misturas, com destaque para a mistura com 3% de nanossílica e 15% de metacaulim que apresentou resistência à compressão maior que o dobro em relação à resistência da mistura de referência. Isto demonstra grande potencialidade para a utilização destes materiais em alvenarias de tijolos prensados ou painéis de paredes monolíticas.

Palavras-chave: Solo-cimento. Nanossílica. Metacaulim. Sustentabilidade.

Abstract: In light of the current challenges faced by the construction industry, which demand more sustainable solutions with lower environmental impact, soil-cement emerges as a construction material composed of a homogenized, compacted, and cured mixture of soil, Portland cement, and water in appropriate proportions. The possibility of using a low cement content, combined with the absence of firing—required in the production of ceramic bricks—makes soil-cement a low environmental impact material, contributing to sustainability in construction. This study aims to evaluate the compressive strength of binary and ternary soil-cement mixtures incorporating nanosilica and/or metakaolin, with the objective of assessing the potential of these materials for use in pressed brick masonry or monolithic wall panels. Cylindrical specimens (5x10 cm) were produced using binary and ternary mixtures containing Portland cement, nanosilica (3%), and/or metakaolin (5%, 10%, or 15%) as a partial replacement for cement. The compressive strength of the specimens were determined in accordance with NBR 5739 (ABNT, 2018). Nanosilica, used individually and in combination with metakaolin, had a significant influence on the compressive strength of the mixtures. Notably, the mixture containing 3% nanosilica and 15%

Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 18, n. 1, edição extra, p. 65-82, jun. 2025. ISSN 1981-4089
metakaolin exhibited more than twice the compressive strength of the reference mixture. This demonstrates the strong potential of these materials for use in pressed brick masonry or monolithic wall panel systems.
Keywords: Soil-cement. Nanosilica. Metakaolin. Sustainability.

Introdução

O Conselho Internacional da Construção aponta a indústria da construção civil como o setor de atividades humanas que mais consome recursos naturais e utiliza energia de forma intensiva, gerando consideráveis impactos ambientais (COSTA; PIMENTEL, 2020). Além dos impactos relacionados ao consumo de matéria prima e energia, há aqueles associados à geração de resíduos sólidos, líquidos e gasosos. Estima-se que mais de 50% dos resíduos sólidos gerados pelo conjunto das atividades humanas sejam provenientes da construção civil. Tais aspectos ambientais, somados à qualidade de vida que o ambiente construído proporciona, sintetizam as relações entre construção e meio ambiente.

O Conselho Internacional de Pesquisa e Inovação na Construção define a construção sustentável como “o processo holístico para restabelecer e manter a harmonia entre os ambientes, natural e construído, e criar estabelecimentos que confirmem a dignidade humana e estimulem a igualdade econômica”. Com isto, a realização de pesquisas científicas e tecnológicas que contribuam com a sustentabilidade na construção civil, considerando adequação ambiental e viabilidade econômica, é cada vez mais indispensável na busca de minimizar os impactos ambientais provocados pela construção.

Uma das tendências atuais em relação ao tema construção sustentável é o desenvolvimento de pesquisas em tecnologias alternativas que pregam o resgate de materiais e tecnologias vernáculas com o uso de terra crua, solo-cimento e outros materiais naturais e pouco processados, sendo de grande importância investigar e buscar o melhoramento destas técnicas e materiais, tornando-os cada vez mais eficientes, duráveis e viáveis economicamente.

O solo-cimento é definido como o resultado da mistura de solo, cimento e água, em proporções definidas por dosagens específicas para a sua aplicação. Na mistura, o cimento tem a função de estabilizar o solo e facilitar a compactação. As construções de solo mais antigas da humanidade, segundo Santiago (2001), datam de mais de 5000 anos a.C. Dentre essas construções, podem se destacar as pirâmides de Amon, em Luxor (1450 a.C.), em Karnak (1550 a.C.) e o templo de Abu-Simbel (1330 a.C.), sendo que essas obras foram construídas em pedras ou sobre pedras.

O emprego do solo-cimento no Brasil foi iniciado na década de 1930. No final da década de 1950, a mistura de solo e cimento estava totalmente aprovada no Brasil, passando a ser difundida como nova alternativa para baratear as construções. A primeira casa construída em solo-cimento no país teve como responsável o *Instituto del Cemento Portland Argentino* – IPCA, uma vez que a Argentina divulgava a maneira correta de empregar o novo método construtivo de acordo com Faria (1990). O solo-cimento, em edificações, pode ser empregado de duas formas: paredes monolíticas e tijolos ou blocos prensados. A técnica do solo-cimento pode ainda ser aplicada em muros, contenções, fundações, passeios, contra pisos, coberturas abobadadas e em lajes mistas.

Os nanomateriais possuem um papel fundamental quando aplicados em materiais cimentícios pois proporcionam alterações em sua microestrutura, produzindo materiais mais resistentes e duráveis. Dentre os nanomateriais aplicados em materiais cimentícios destacam-se os nanotubos de carbono, as nanopartículas de dióxido de titânio e a nanossílica.

A nanossílica, também chamada de pó de quartzo ou pó de sílica, é um material que, assim como a sílica ativa, é caracterizado por sua alta porcentagem de SiO_2 , acima de 99%. De acordo com Andrade et al. (2018), a nanossílica, ou nanopartículas de SiO_2 , é considerada uma adição pozolânica altamente reativa que, em substituição ao cimento tem demonstrado que ocorre uma melhoria em suas propriedades mecânicas, além de aumentar a resistência à penetração de água, o que influencia fortemente na durabilidade.

A reação pozolânica é a reação das adições ricas em SiO_2 com o hidróxido de cálcio formado pela hidratação do cimento gerando mais silicato de cálcio hidratado (C-S-H). A nanossílica acelera a dissolução do C_3S e a formação de C-S-H, e também proporciona sítios de nucleação para o C-S-H. Mesmo pequenas quantidades de adições de nanossílica podem ser muito eficientes se comparadas com quantidades maiores de sílica ativa em termos de melhoria das propriedades mecânicas dos materiais à base de cimento. Além disto, proporciona o efeito *filler* levando a uma melhora na microestrutura com o refinamento dos poros.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), em meados da década de 1960, algumas adições minerais passaram a ser utilizadas com o objetivo de se obter misturas cimentícias de alto desempenho. Esta aplicação, além do bom resultado relacionado à durabilidade, também proporcionou às estruturas elevados valores de resistência, fazendo com que se começasse a utilizar estes materiais com o intuito de se obter misturas cimentícias de alta resistência. O

Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 18, n. 1, edição extra, p. 65-82, jun. 2025. ISSN 1981-4089 excelente resultado na atividade pozolânica de alguns desses materiais fez com que fossem denominadas adições minerais altamente reativas. Atualmente, como principais pozolanas altamente reativas utilizadas em materiais cimentícios, têm-se a sílica ativa, o metacaulim e a cinza da casca de arroz com queima controlada. O material para ser classificado como pozolana de alta reatividade deve, segundo Malhotra e Mehta (1996), combinar dois fatores: uma estrutura amorfa e uma grande área superficial.

As adições minerais podem ser associadas em diversas combinações e teores variados. As misturas que combinam cimento Portland e um tipo de adição são denominadas binárias, as que combinam cimento Portland e dois tipos de adições são denominadas misturas ternárias. Estas adições podem ser incorporadas às misturas por diferentes métodos, incluindo a substituição parcial em massa de cimento e a inclusão como um aumento da quantidade de aglomerante (ANDRADE et al., 2018).

Contudo, este trabalho propõe avaliar a resistência à compressão de misturas de solo-cimento, binárias e ternárias, com nanossílica e/ou metacaulim, com o objetivo de avaliar a potencialidade destes materiais para a utilização em alvenarias de tijolos ou blocos prensados ou painéis de paredes monolíticas.

Apesar dos pontos positivos evidentes no Brasil em relação às construções de solo-cimento, o interesse por esta tecnologia vem tomando menos visibilidade, na proporção em que outros materiais, na maioria dos casos mais industrializados, surgem no mercado. Estudar e compreender essa tecnologia, com os resultados voltados a apresentar alternativas na composição e fabricação de misturas de solo-cimento com nanossílica e/ou adições minerais altamente reativas poderá apontar tendências e mudanças no cenário da construção civil brasileira rumo à adoção de técnicas de construção mais econômicas e sustentáveis.

Acredita-se que a incorporação de nanossílica, individualmente ou em conjunto com metacaulim pode influenciar de forma positiva as propriedades mecânicas das misturas de solo-cimento, de modo a tornar este material mais econômico, resistente e durável.

Programa Experimental

O Programa experimental foi dividido em três etapas: seleção e caracterização dos materiais (cimento Portland, solo, metacaulim e nanossílica); moldagem e cura das misturas de

Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 18, n. 1, edição extra, p. 65-82, jun. 2025. ISSN 1981-4089
solo-cimento como nanossílica e/ ou metacaulim; avaliação da resistência à compressão das misturas.

Seleção e caracterização dos materiais

As amostras de solo utilizadas foram colhidas no terreno da Unievangélica Centro Universitário de Anápolis onde foi realizada perfuração e movimentação de solo para a realização de obra civil. Foi utilizada a porcentagem de 50% de areia média em substituição ao solo como forma de corrigi-lo. Além de solo foram utilizados os seguintes materiais:

- Cimento CPII-F32
- Metacaulim HP da Metacaulim do Brasil;
- Nanossílica coloidal com 15% de SiO₂ da Akzonobel.

Foram realizados os seguintes ensaios de caracterização do solo:

- Preparação de amostras de solo para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, NBR 6457 (ABNT, 1996);
- Massa específica do solo, NBR 6508 (ABNT, 1984);
- Análise granulométrica, NBR 7181 (ABNT, 1988);
- Determinação do limite de liquidez, NBR 6459 (ABNT, 1984);
- Determinação do limite de plasticidade, NBR 7180 (ABNT, 1984).

Foram realizados os seguintes ensaios de caracterização do cimento Portland:

- Resíduo na peneira # 200 µm, NBR 3432 (ABNT, 1991);
- Tempo de início e fim de pega, NBR NM 65 (ABNT, 2003);
- Resistência à compressão aos 3, 7, 28 e dias, NBR 7215 (ABNT, 2019).

Foram realizados os seguintes ensaios de caracterização da nanossílica coloidal e do metacaulim.

- Análise química (Fluorescência de raios - X);
- Difração de raios X;
- Granulometria por raio laser;
- Microscopia Eletrônica de transmissão;
- Microscopia eletrônica de varredura.

Moldagem e cura das misturas de solo-cimento

O método para preparação das amostras de solo seguiu as etapas descritas na norma NBR 6457 (ABNT, 1986), procedendo-se a preparação com secagem prévia. O solo foi seco ao ar livre, para que a umidade chegasse próxima à higroscópica; foram desmanchados os torrões, e a amostra, homogeneizada.

As misturas e as moldagens dos corpos de prova foram realizadas com a aplicação do método prescrito na NBR 5752 (ABNT, 2014), com adaptações.

Para a quantidade de cimento, optou-se por mantê-la fixa na proporção de 12,5% em massa. De acordo com literatura existente sobre tijolos de solo-cimento, 10% de cimento já seria considerado ideal, porém optou-se por uma quantidade maior para evidenciar o efeito das adições pozolânicas, e também como forma de diversificação da pesquisa.

O teor de umidade (umidade ótima) foi estimado pelo método prático, onde uma pequena porção da mistura colocada na palma da mão foi prensada com o fechamento da mão. A mistura não poderia deixar a água sair com o simples aperto da mão e deveria formar um bolo firme com o formato da mão fechada e, ao se partir em duas partes, esse bolo não deveria esfarelar. Caso a mistura estivesse seca e o bolo esfarelando com facilidade acrescentava-se mais água. No caso, o teor de umidade inicial foi de 6% em relação à massa da mistura seca, os demais teores usados para a continuidade do ensaio foram 8%, 10%, 12% e 14% totalizando cinco determinações para cada traço em estudo. O valor médio de umidade ótima estimado com esse procedimento foi de 11,1% e esse teor de umidade foi mantido para todas as misturas.

Foram produzidas 8 misturas distintas de solo-cimento sendo uma mistura referência, contendo cimento Portland, solo e água, e misturas com adição de 3% de nanossílica coloidal, e/ou metacaulim, variando-se os teores do metacaulim em 5%, 10% e 15%. A Tabela 1 mostra a composição das misturas confeccionadas nesta pesquisa.

A nanossílica coloidal e o metacaulim foram adicionados às misturas em substituição parcial à massa de cimento Portland. A nanossílica coloidal utilizada nesta pesquisa trata-se de uma suspensão aquosa, desta forma, a dosagem das argamassas foi realizada considerando a concentração de nanopartículas de SiO₂ na suspensão (15%). Com o intuito de manter fixa a

Após a cura os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de compressão conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018). Para a determinação da resistência à compressão das misturas foi calculada a média aritmética dos resultados de resistência dos 6 corpos de prova e ignorados até dois valores a fim de cumprir o requisito de desvio relativo máximo de 6% para o cálculo de uma nova média de acordo com a NBR 5752 (ABNT, 2014). Com a obtenção das médias de resistência à compressão foi determinado o índice de desempenho das misturas pela Equação 1:

$$ID = \frac{f_B}{f_A} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

ID = índice de desempenho;

f_B = resistência média dos corpos de prova moldados com a mistura B (solo-cimento, nanossílica e/ou metacaulim);

f_A = resistência média dos corpos de prova moldados com a mistura A (solo-cimento).

Análise estatística dos resultados

Neste trabalho foi realizada a análise de variância para verificar se existem diferenças significativas entre as médias dos resultados de resistência à compressão das misturas produzidas.

A análise de variância é uma ferramenta estatística que permite concluir, com um grau de confiança pré-determinado, se existem ou não diferenças entre as médias de mais de duas populações. Essa comparação é feita por meio de um teste de hipóteses, onde as hipóteses testadas são:

- Hipótese Nula (H_0): não existe diferença entre as médias;
- Hipótese Alternativa (H_1): pelo menos uma média é diferente das demais.

Uma das formas de concluir esse teste é por meio da probabilidade de significância (p-valor). Esta mede a força da evidência contra H_0 em uma escala numérica. Um p-valor pequeno indica uma forte evidência para se rejeitar H_0 . O valor de referência utilizado neste trabalho foi

Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 18, n. 1, edição extra, p. 65-82, jun. 2025. ISSN 1981-4089 de 5% ($\alpha = 0,05$). Isto representa a probabilidade de se rejeitar H_0 . Logo, o nível de confiança associado ao teste é de 95%. Sendo assim, utiliza-se a seguinte regra de decisão.

- Rejeitar H_0 se p-valor $< 0,05$;
- Não rejeitar H_0 se p-valor $\geq 0,05$.

Se a análise estatística conduz à hipótese de que as diferenças observadas entre as médias amostrais são devidas às variações aleatórias na amostra, conclui-se que as médias dos resultados de resistência à compressão são iguais. Por outro lado, se pelo menos uma das médias amostrais for diferente das demais, conclui-se que as médias não são iguais e as variáveis em questão exercem mudanças significativas no comportamento das propriedades estudadas.

Foi realizada também a comparação múltipla entre as médias de resistência à compressão, importante nos casos de rejeição da hipótese de igualdade. Assim, é importante que se verifiquem quais médias são consideradas diferentes. Para esta comparação, utilizou-se o teste de Duncan, para que se separem as variáveis aplicadas ao estudo em grupos homogêneos, agrupando médias estatisticamente semelhantes e separando as médias diferentes.

Apresentação e análise de resultados

Caracterização dos materiais

A Tabela 2 mostra os resultados dos ensaios de caracterização do solo utilizado nesta pesquisa.

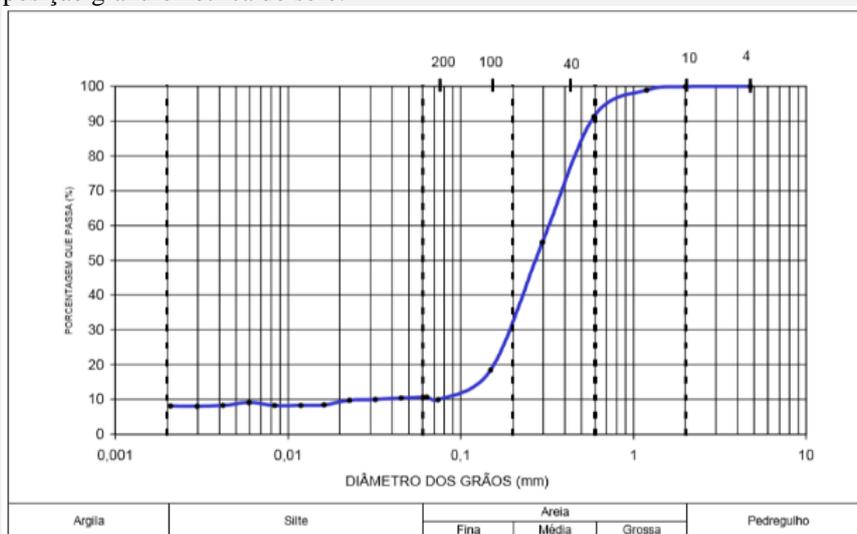
Tabela 2 – Resultados de caracterização do solo

Características físicas	Norma (ABNT)	Valor
Massa específica (g/cm^3)	6508	2,68
Massa unitária (g/cm^3)	7251	1,54
Limite de Liquidez (%)	6459	24,00
Limite de Plasticidade (%)	7180	10,80
Material que passa # 4,8mm (%)	6502	100,00
Material que passa # 0,075 (%)	6502	10,00

Fonte: Andrade D.S. et al.

A Figura 2 mostra a composição granulométrica do solo utilizado nesta pesquisa.

Figura 2 - Composição granulométrica do solo.



Fonte: Andrade D.S. et al.

Observa-se na Tabela 3 que a resistência à compressão do cimento CII F-32 atende aos requisitos estabelecidos na NBR 11578 (ABNT, 1991), ou seja, deve apresentar resistência à compressão média maior ou igual a 10MPa aos 3 dias, maior ou igual a 20MPa aos 7 dias e, maior ou igual a 32 MPa aos 28 dias. O índice de finura por peneiramento apresentou um valor de 6,78%, estando em conformidade com a NBR 11578 (ABNT, 1991) que estabelece o valor máximo de 12%. O tempo de início de pega também está em conformidade com a norma citada que estabelece o tempo mínimo de 1 hora.

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de caracterização do cimento CII F-32 utilizado nesta pesquisa.

Cimento Portland	Tempo de pega		#200	Resistência à compressão		
	Início	Fim		1 dia	7 dias	28 dias
	h:min	h:min	%	MPa	MPa	MPa
CII F-32	02:38	03:15	6,78	18,55	27,34	32,09

Autor: Andrade D.S. et al.

A espectroscopia por fluorescência de raios X foi realizada no metacaulim e no cimento CII-F32 para o estudo da composição química desses materiais. A Tabela 4 mostra a composição química do metacaulim e do cimento CII-F32.

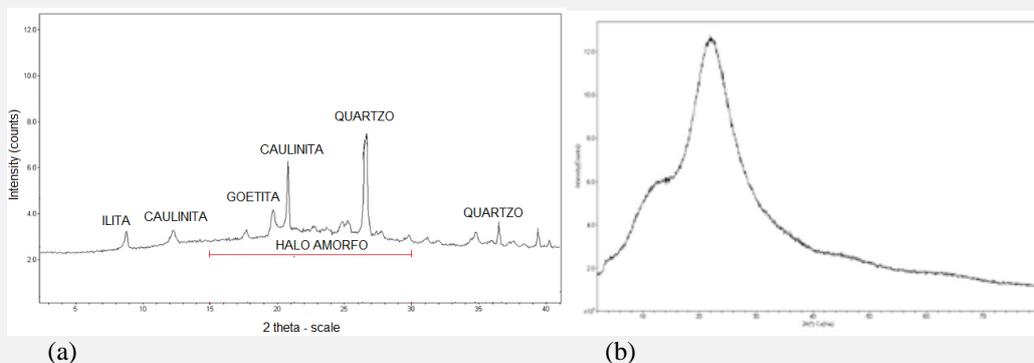
Tabela 4 - Componentes químicos do metacaulim e do cimento CPII-F32 obtidos por fluorescência de raios X.

Componentes químicos		Metacaulim	Cimento CPII-F32
Perda ao fogo		2,89	6,14
Resíduo insolúvel		-----	1,49
trióxido de enxofre (SO ₃)		-----	2,67
Óxido de magnésio (MgO)		1,51	1,50
Dióxido de silício (SiO ₂)		57,43	18,75
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)		2,08	2,88
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)		32,58	4,37
Óxido de cálcio (CaO)		0,07	63,45
Óxido de cálcio livre (CaO)		-----	0,89
Álcalis totais	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,04	0,04
	Óxido de potássio (K ₂ O)	0,33	0,31
	Equiv. Alcalino	0,26	0,29
Álcalis solúveis em água	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,00	0,00
	Óxido de potássio (K ₂ O)	0,14	0,17
	Equiv. Alcalino	0,14	0,13
Sulfato de cálcio (CaSO ₄)		-----	5,62

Fonte: Andrade D.S. et al.

O ensaio de difração de raios X foi realizado na nanossílica e no metacaulim com o intuito de identificar estruturas cristalinas presentes nas amostras. Quanto menor a presença de material cristalino, maior o teor de material amorfo e maior a reatividade do material. A Figura 3 ilustra os difratogramas obtidos com a difração de raios-X (DRX) da nanossílica coloidal e do metacaulim utilizados nesta pesquisa. O difratograma da nanossílica coloidal mostra que não foram identificados picos de materiais cristalinos, ou seja, apresenta-se completamente amorfa.

Figura 3: Difratograma de raios-X do metacaulim (a); e da nanossílica (b).

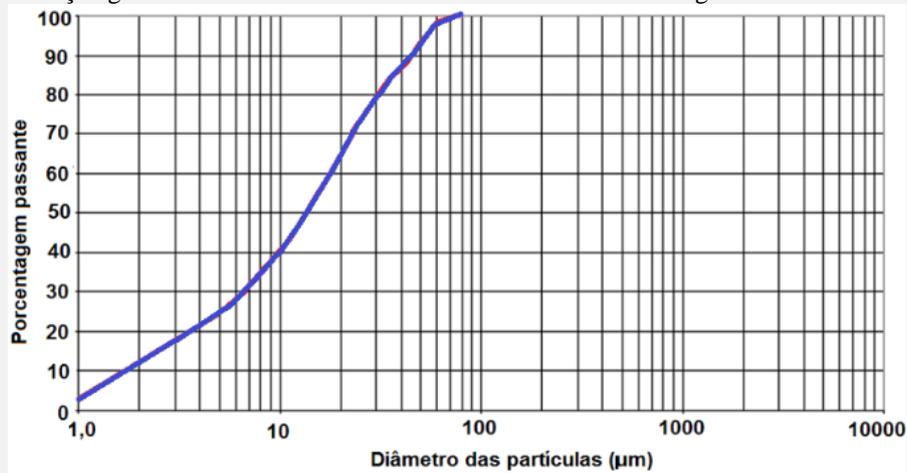


Fonte: Andrade D.S. et al.

A estrutura do metacaulim, quando sujeita ao tratamento térmico, em temperatura entre 400 °C e 550 °C, tem o seu arranjo estrutural modificado pela retirada dos íons de hidroxilas, que também é denominado de desidroxilação. O material formado é denominado de metacaulinita, apresentando perante a difração de raios X uma estrutura amorfa. Entretanto, os picos apresentados no difratograma (Figura 3a) indicam que a argila não sofreu total calcinação para a formação do metacaulim. Estes indicam a presença de estruturas cristalinas, correspondentes, possivelmente, ao quartzo, caulinita, goetita e ilita. Embora se tenha evidenciado a presença de picos no difratograma de raios X do metacaulim, observa-se que este apresenta um halo amorfo correspondente ao desvio da linha base entre os ângulos de 15 e 30 graus (2θ), indicando a amorficidade do material.

A granulometria das adições minerais interfere diretamente na sua atividade pozolânica. A distribuição granulométrica do metacaulim, obtida pelo ensaio de granulometria a laser, é apresentada no gráfico da Figura 4. Ao analisar a distribuição granulométrica do metacaulim verificou-se um Diâmetro médio de 29,07 μm , $D_{10} = 2,27 \mu\text{m}$ e $D_{90} = 59,01$.

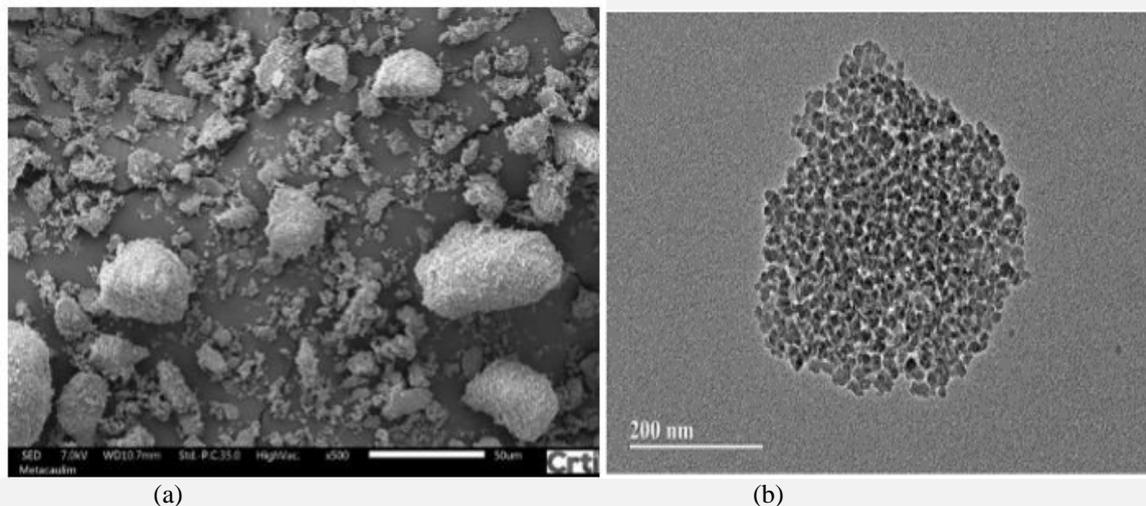
Figura 4 - Distribuição granulométrica do metacaulim obtida com o ensaio de granulometria a laser.



Fonte: Andrade D.S. et al.

A Figura 5 apresenta micrografia do metacaulim obtida por microscopia eletrônica de varredura onde se pode observar aglomerados de partículas de morfologia e tamanho variados e micrografias da nanossílica coloidal obtidas com a microscopia eletrônica de transmissão, sendo possível observar aglomerados de SiO_2 , com partículas apresentando formato esférico e com pouca variação de tamanho.

Figura 5 – MEV de aglomerados de partículas de metacaulim (a); MET da nanossílica coloidal (b).



Fonte: Andrade D.S. et al.

Resistência à compressão das misturas de solo-cimento

Os resultados de resistência à compressão e índice de desempenho aos 28 dias das misturas de solo-cimento podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados de índice de desempenho e resistência à compressão das misturas de solo-cimento aos 28 dias.

Misturas	Resistência à compressão média (MPa)	Índice de desempenho
REF	2,70	100
NS3	3,51	130
Mk5	3,98	147
Mk5-NS3	5,20	193
Mk10	4,10	152
Mk10-NS3	5,33	197
Mk15	5,00	185
Mk15-NS3	6,95	257

Fonte: Andrade D.S. et al.

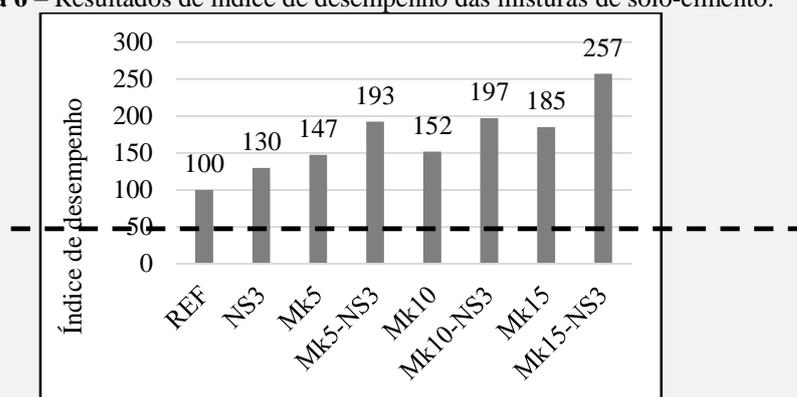
Observa-se na Tabela 5 o aumento dos resultados de resistência à compressão média e do índice de desempenho com o aumento do teor de metacaulim, e o aumento destes parâmetros nas misturas ternárias, contendo metacaulim e 3% de nanossílica coloidal. As misturas ternárias, com metacaulim e nanossílica coloidal, foram as que apresentaram os maiores resultados de índice de desempenho e resistência à compressão, sendo que, a mistura com 15%

Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 18, n. 1, edição extra, p. 65-82, jun. 2025. ISSN 1981-4089 de metacaulim e 3% de nanossílica coloidal apresentou o maior resultado de resistência à compressão e índice de desempenho, dentre as misturas estudadas.

O fato destas misturas, com substituição de cimento Portland por metacaulim e/ou nanossílica coloidal, apresentarem o aumento da resistência à compressão e índice de desempenho, está relacionado com a atividade pozolânica e o efeito filler proporcionados por estes materiais. Ressalta-se que a adição de nanossílica, apresenta grande potencialidade em aumentar a resistência e a compacidade das misturas devido ao tamanho de partícula muito reduzido, bem como a sua elevada amorficidade. Além disso, observa-se um efeito sinérgico nas misturas ternárias, que apresentaram resultados mais elevados de resistência à compressão.

A Figura 6 apresenta um gráfico com o índice de desempenho das misturas.

Figura 6 – Resultados de índice de desempenho das misturas de solo-cimento.



Fonte: Andrade D.S. et al.

Análise estatística dos resultados

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos na análise de variância para as médias de resistência à compressão das diferentes misturas de solo-cimento produzidas neste trabalho. Como dito, foi considerado um nível de significância de 5% ($\alpha=0,05$), com isto, o P-valor (probabilidade de significância) mostra a que nível os resultados são estatisticamente significativos.

Analisando a Tabela 6 verifica-se que as médias de resistência à compressão apresentam diferenças significativas, retratando que a utilização da nanossílica, individualmente ou em conjunto com metacaulim, em substituição parcial ao cimento Portland, exerce influências significativas na resistência à compressão das misturas. A Tabela 7 mostra os grupos de valores

Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 18, n. 1, edição extra, p. 65-82, jun. 2025. ISSN 1981-4089
de resistência à compressão das misturas definidos pela comparação múltipla entre médias através do teste Duncan.

Tabela 6 - Resultados da análise de variância para verificação das diferenças entre as médias de resistência à compressão obtidas com as diferentes misturas.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	585,57	7	169,66	26,59031	0,000032	2,37
Dentro dos grupos	47,63	22	6,727586			
Total	633,20	29				

Onde:

GL= graus de liberdade;

SQ = soma dos quadrados;

MQ = média quadrática;

P-Valor = probabilidade de as diferenças entre as médias serem significativas;

R^2_{mod} = coeficiente de determinação do modelo.

Fonte: Andrade D.S. et al.

Tabela 7 - Grupos de valores de resistência à compressão das misturas pela comparação múltipla de médias através do teste de Duncan.

Misturas	Resistência à compressão média (MPa)	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D
REF	2,70	X			
NS3	3,51		X		
Mk5	3,98		X		
Mk5-NS3	5,20			X	
Mk10	4,10		X		
Mk10-NS3	5,33			X	
Mk15	5,00			X	
Mk15-NS3	6,95				X

Fonte: Andrade D.S. et al.

Analisando a Tabela 7 percebe-se que as médias de resistência à compressão dividem-se em quatro grupos distintos, levando-se em consideração as diferenças estatísticas entre estas medias obtidas a partir do teste Duncan. Deve-se ressaltar que as variações na microestrutura dos materiais cimentícios ocasionadas pela adição de nanossílica, individualmente e em conjunto com metacaulim, proporcionam significativas mudanças na sua resistência à compressão. Observa-se que a mistura Referência foi a única que ficou no grupo A, ou seja, o grupo de menor resistência, enquanto a mistura Mk15-NS3 foi a única que ficou classificada no grupo D, o de maior resistência. As demais misturas enquadram-se nos grupos B e C,

Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 18, n. 1, edição extra, p. 65-82, jun. 2025. ISSN 1981-4089 apresentando um ganho de resistência à compressão significativo em relação à mistura referência.

Considerações Finais

As misturas com adição de metacaulim apresentaram resistência à compressão e índice de desempenho maiores que a mistura Referência.

Ao aumentar o teor de metacaulim observou-se o aumento do índice de desempenho, porém as misturas Mk5 e Mk10 não apresentam diferenças significativas de resistência à compressão entre si de acordo com o teste Duncan.

A mistura com 3% de nanossílica coloidal também apresenta resistência à compressão e índice de desempenho maiores que a mistura Referência, sendo que as misturas ternárias, contendo metacaulim e nanossílica, apresentaram resistência à compressão e índice de desempenho maiores que as misturas binárias, o que demonstra um efeito sinérgico proporcionado por estes materiais.

Destaca-se a mistura Mk15-NS3 com o maior valor de resistência à compressão (6,95 MPa), bem como índice de desempenho (257 %), apresentando um valor de resistência maior que o dobro em relação à resistência da mistura Referência, que apresentou 2,70 MPa de resistência à compressão.

A nanossílica, utilizada individualmente e em conjunto com o metacaulim, exerceram influências relevantes na resistência à compressão das misturas, demonstrando grande potencialidade para a utilização destes materiais em alvenarias de tijolos prensados ou painéis de paredes monolíticas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Bolsas de Iniciação Científica da Universidade Evangélica de Goiás, Universidade Estadual de Goiás, Akzo Nobel LTDA e a Metacaulim do Brasil.

Referências

ANDRADE, D. S.; RÊGO, J. H. S.; MORAIS, P. C.; ROJAS, M. F., **Chemical and Mechanical Characterization of Ternary Cement Pastes Containing Metakaolin and Nanosilica**, Construction and Building Materials, V. 159, 2018, pp. 18-26.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6457: **Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização – método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 11578: **Cimento Portland composto**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 3432: **Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 5739: **Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 5752: **Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 6459: **Solo - Determinação do limite de liquidez – método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 6508: **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - determinação da massa específica – método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7180: **Solo - Determinação do limite de plasticidade - método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7181: **Solo - Análise granulométrica - método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7215: **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR NM 65: **Cimento Portland - Determinação do tempo de pega**. Rio de Janeiro, 2003.

COSTA, E.; PIMENTEL, A. **Cidades inteligentes e sustentáveis: desafios para o urbanismo contemporâneo**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2020.

Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 18, n. 1, edição extra, p. 65-82, jun. 2025. ISSN 1981-4089
FARIA, J. R. G. **Unidade de Produção de Tijolos de Solo Estabilizado. Dissertação de Mestrado.** São Carlos – SP: Escola de Engenharia de São Carlos - EESC, Universidade de São Paulo - USP, 1990.

MALHOTRA V. M.; MEHTA P. K. **Pozzolanic and cementitious materials** – advances in concrete technology, vol.1, Gordon and Breach, Amsterdam, Holanda, 1996.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo, 2014.

SANTIAGO, C. C. **O solo como material de construção.** 2. ed. Salvador: Ed. UFBA, 2001.