XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8815

Potencial de utilização de metacaulim obtido de caulim do Seridó Paraibano como substituição mineral em sistemas cimentícios

Potential use of metakaolin obtained from kaolin from the Seridó region of Paraíba as a mineral replacement in cementitious systems

Diego de Paiva Bezerra
Universidade Federal de Campina Grande | Campina Grande | Brasil | diegop.bezerra@hotmail.com
Aline Figueirêdo da Nóbrega
Universidade Federal de Campina Grande | Campina Grande | Brasil | aline.figueiredo@professor.ufcg.edu.br
Adriano da Silva Félix
Universidade Federal de Campina Grande | Campina Grande | Brasil | adriano.s.felix@hotmail.com
Raphaele de Lira Meireles de Castro Malheiro
Universidade do Minho | Guimarães | Portugal | raphaelemalheiro@civil.uminho.pt
Guilherme dos Santos Teles
Universidade Federal de Campina Grande | Campina Grande | Brasil | guilherme.santos@professor.ufcg.edu.br

Resumo

As emissões de CO_2 estão associadas a produção do cimento, impulsionando o uso de materiais cimentícios suplementares. O Seridó paraibano destaca-se pela produção de caulim, cujo beneficiamento pode gerar metacaulim com potencial aplicação em sistemas cimentícios. Este estudo avaliou o uso de metacaulim obtido por calcinação do caulim regional a 700 °C por 2 horas, incorporado em pastas cimentícias nos teores de 10% e 20% por substituição parcial do cimento. O desempenho mecânico foi analisado por ensaios de resistência à flexão e compressão aos 7, 28 e 63 dias. Os resultados indicaram ganhos de resistência, com incrementos de até 10% aos 63 dias, evidenciando o potencial do material como adição mineral.

Palavras-chave: Metacaulim. Materiais cimentícios suplementares. Sustentabilidade. Economia circular.

Abstract

CO_2 emissions are strongly associated with cement production, driving the use of supplementary cementitious materials. The Seridó region of Paraíba, Brazil, stands out for its kaolin production, whose processing can generate metakaolin with potential applications in cementitious systems. This study evaluated the use of metakaolin produced by calcining locally sourced kaolin at 700 °C for 2 hours, incorporated into cement pastes at replacement levels of 10% and 20% by partial substitution of cement. Mechanical performance was assessed through flexural and compressive strength tests conducted at 7, 28, and 63 days. The results demonstrated strength

improvements, with increases of up to 10% at 63 days, highlighting the potential of the material as a supplementary cementitious material.

Keywords: Metakaolin. Supplementary cementitious materials. Sustainability. Circular economy.

INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil desempenha papel fundamental no desenvolvimento socioeconômico, porém está associada a impactos ambientais significativos, especialmente devido ao elevado consumo de cimento Portland. Em 2024, o consumo mundial atingiu aproximadamente 4,0 bilhões de toneladas, sendo cerca de 68 milhões no Brasil [1]. A produção desse material é responsável por cerca de 8% das emissões globais de dióxido de carbono (CO_2), o que tem impulsionado a busca por alternativas que reduzam o teor de clínquer em sistemas cimentícios [2].

Nesse contexto, os materiais cimentícios suplementares têm sido amplamente estudados como estratégia para mitigação desses impactos. Entre eles, o metacaulim destaca-se por suas características físico-químicas e potencial de atuação na matriz cimentícia, contribuindo para a melhoria de propriedades mecânicas e de durabilidade [3]. Além disso, o aproveitamento de matérias-primas regionais para sua produção representa uma oportunidade relevante sob a perspectiva da sustentabilidade.

O Seridó paraibano destaca-se pela expressiva produção de caulim, cuja calcinação pode viabilizar a obtenção de metacaulim com potencial aplicação em sistemas cimentícios. No entanto, a etapa de beneficiamento térmico ainda é, em muitos casos, realizada fora da região, limitando a agregação de valor local e o fortalecimento de cadeias produtivas.

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo avaliar o potencial de utilização de metacaulim obtido a partir da calcinação controlada de caulim do Seridó Paraibano como adição mineral em pastas cimentícias. Para isso, foram analisadas misturas com diferentes teores de incorporação, visando investigar sua influência no desempenho mecânico ao longo do tempo. Busca-se, assim, contribuir para a valorização de recursos minerais regionais e para o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis na construção civil.

MATERIAIS E MÉTODOS

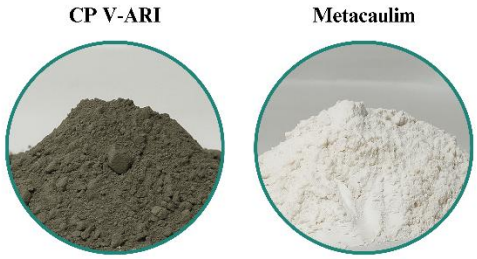
O procedimento metodológico foi estruturado em três etapas principais: (i) seleção, preparação e caracterização dos materiais; (ii) definição das composições das pastas cimentícias; e (iii) avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido. A análise estatística dos resultados foi realizada por meio de ANOVA, visando verificar a significância das diferenças observadas.

MATERIAIS

Foram utilizados cimento Portland CP V-ARI, metacaulim (MK) obtido a partir da calcinação de caulim do Seridó Paraibano e água deionizada. O metacaulim foi

produzido por calcinação do caulim a 700 °C por 2 horas, após beneficiamento prévio (secagem, moagem e peneiramento) (Figura 1).

Figura 1: Materiais utilizados nas misturas de pastas



Fonte: o autor.

A caracterização dos materiais incluiu análises químicas (FRX), mineralógicas (DRX) e físicas.

COMPOSIÇÕES DAS MISTURAS

Foram produzidas pastas cimentícias com relação água/finos de 0,30, considerando uma mistura de referência (REF) e misturas contendo metacaulim em teores de 10% (MK10) e 20% (MK20). A incorporação foi realizada por substituição parcial do cimento e em relação à massa de cimento.

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

As misturas foram preparadas em argamassadeira planetária, com homogeneização prévia dos materiais secos nas composições contendo metacaulim. O processo de mistura seguiu etapas padronizadas, sendo elas: homogeneização prévia entre o cimento e o metacaulim, seguido da colocação de 50% de água e mistura na argamassadeira por um minuto; em seguida foi feita a limpeza das partes aderidas à argamassadeira e colocado mais 50% de água, misturando por dois minutos.

No estado fresco, avaliou-se a consistência por meio do ensaio de espalhamento (mini slump), conforme a NBR 13276 [4].

Foram moldados corpos de prova prismáticos (40 × 40 × 160 mm), conforme adaptação da NBR 13279 [5]. Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e submetidos à cura úmida até as idades de 7, 28 e 63 dias.

No estado endurecido, foram realizados ensaios de resistência à flexão e à compressão, utilizando máquinas universais de ensaio, conforme os procedimentos normativos da NBR 13279 (Tabela 1) [5]. Os resultados obtidos permitiram analisar a evolução do desempenho mecânico das pastas ao longo do tempo.

A Tabela 1 sintetiza os métodos e ensaios, as normas correspondentes e a quantidade de corpos de prova prismáticos (CPP) empregados nas pastas cimentícias.

Tabela 1: Métodos e ensaios, normas e quantidade de corpos de prova empregados nas misturas de pastas estudadas.

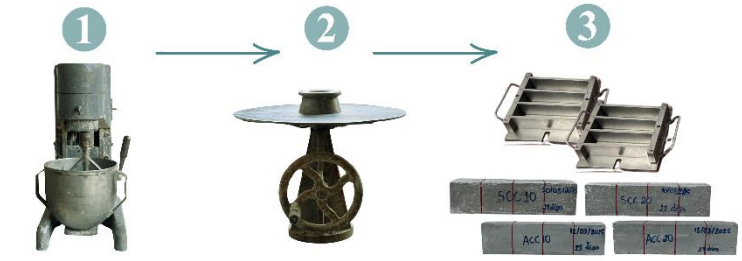
Método	Norma	Quantidade de corpos de prova prismáticos (CPP)
Trabalhabilidade e moldagem	NBR 13276 [4]	-
Resistência à flexão	NBR 13279 [5]	4 CPP por idade e por mistura (7, 28 e 63 dias), totalizando 60 CPP
Resistência à compressão		Metades remanescentes do ensaio de flexão, totalizando 120 CP

Fonte: o autor.

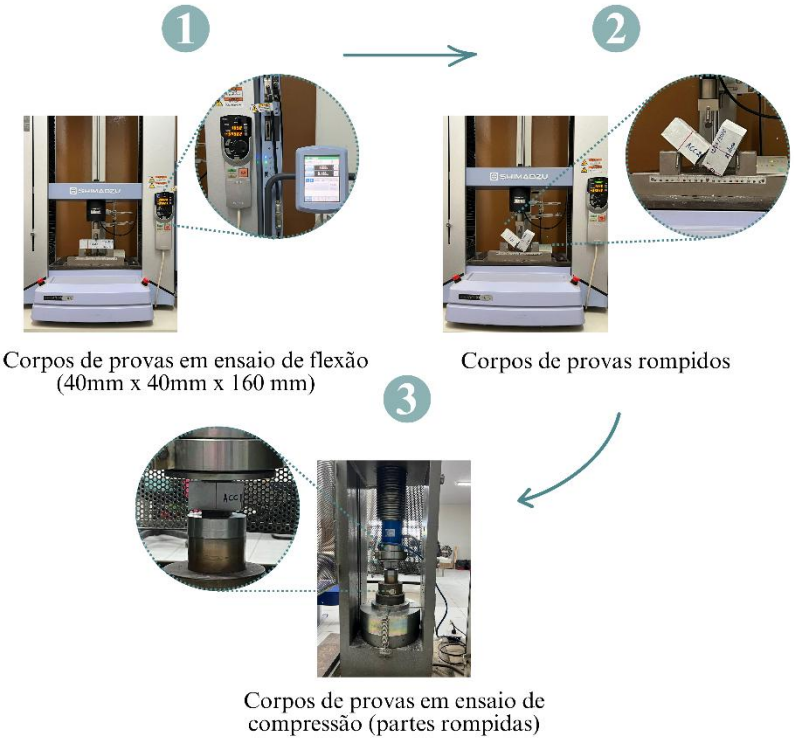
A Figura 2 apresenta o método de ensaio adotado no estado fresco e endurecido.

Figura 2: Métodos de ensaio das pastas nos estados (a) fresco e (b) endurecido

(a)



(b)



Fonte: o autor.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8815

RESULTADOS E DISCUSSÕES

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A composição química do cimento Portland CPV-ARI e do metacaulim (MK), determinada por fluorescência de raios X (FRX), está apresentada na Tabela 2. Observa-se a predominância de CaO no cimento, característica típica de materiais à base de clínquer, enquanto o metacaulim apresenta elevados teores de SiO_2 e Al_2O_3, associados à sua origem argilosa e ao processo de calcinação.

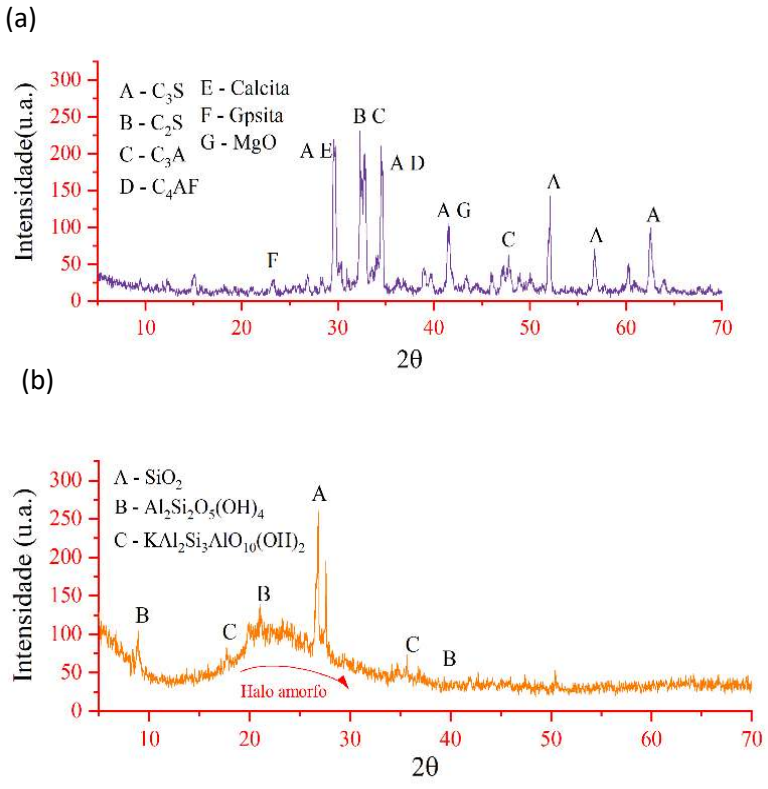
Tabela 2: Métodos e ensaios, normas e quantidade de corpos de prova empregados nas misturas de pastas estudadas.

Composição química	CP V-ARI	MK
CaO	71,68%	0,475%
SiO_2	11,23%	54,63%
Al_2O_3	2,16%	38,23%
K_2O	1,76%	1,98%
SO_3	5,35%	1,74%
P_2O_5	2,053%	1,01%
Fe_2O_5	3,40%	0,494%
BaO	-	-
TiO_2	0,296%	-
Perda ao fogo	2,07%	1,44%

Fonte: o autor.

Os resultados da difratometria de raios X (DRX), ilustrados na Figura 3, evidenciam diferenças marcantes entre os materiais.

Figura 3: Difrometria de raios X (DRX): a) CPV ARI e b) MK



Fonte: o autor.

O CPV-ARI apresenta fases cristalinas bem definidas, como alita (C_3S), belita (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferrita (C_4AF), além de fases secundárias como calcita e gipsita.

Por sua vez, o metacaulim apresenta padrão predominantemente amorfo, caracterizado por um halo difuso na faixa de 20° a 25° (2θ), resultante da desestruturação da caulinita durante a calcinação. Ainda assim, são identificados picos residuais de quartzo e traços de fases como caulinita e muscovita, indicando possíveis heterogeneidades do material ou desidroxilação parcial. Essa predominância de fase amorfa está associada ao comportamento reativo do material, enquanto as fases residuais podem influenciar propriedades no estado fresco, como a viscosidade.

A Tabela 3 apresenta os resultados de massa específica e massa unitária dos materiais finos, evidenciando menor densidade do metacaulim em comparação ao cimento, o que pode influenciar o empacotamento das partículas e o comportamento das misturas cimentícias.

Tabela 3: Resultados da massa específica e da massa unitária do MK e CP V-ARI.

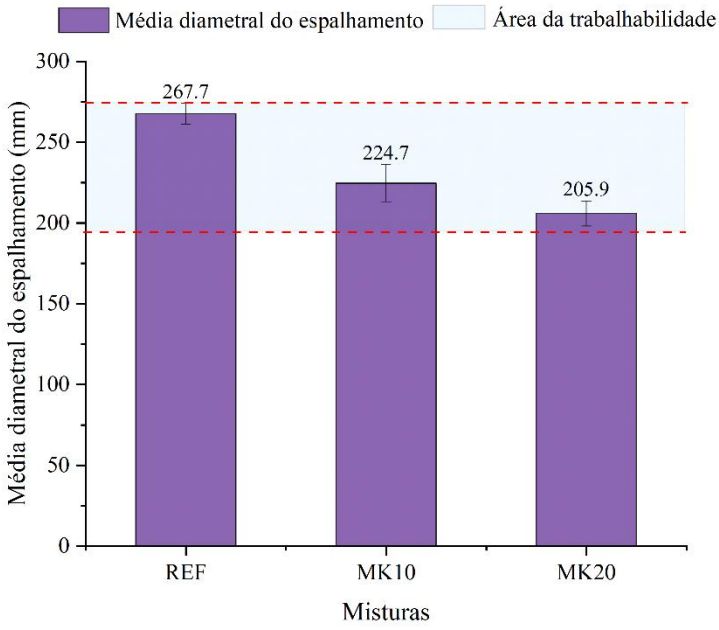
Ensaio	Norma	MK	CP V-ARI
Massa específica (g/cm^3)	NBR NM 53 [6]	2,59	2,99
Massa unitária (g/cm^3)	NBR 16972 [7]	0,52	0,97

Fonte: o autor.

TRABALHABILIDADE DAS PASTAS NO ESTADO FRESCO

A Figura 4 reúne os resultados do ensaio de espalhamento das pastas cimentícias, obtidos por meio do *mini slump flow test*, considerando um fator água/finos constante de 0,30. Essa análise teve como propósito investigar o efeito da substituição de metacaulim (MK) em relação ao cimento sobre a trabalhabilidade das pastas.

Figura 4: Média diametral do espalhamento das pastas no estado fresco



Fonte: o autor.

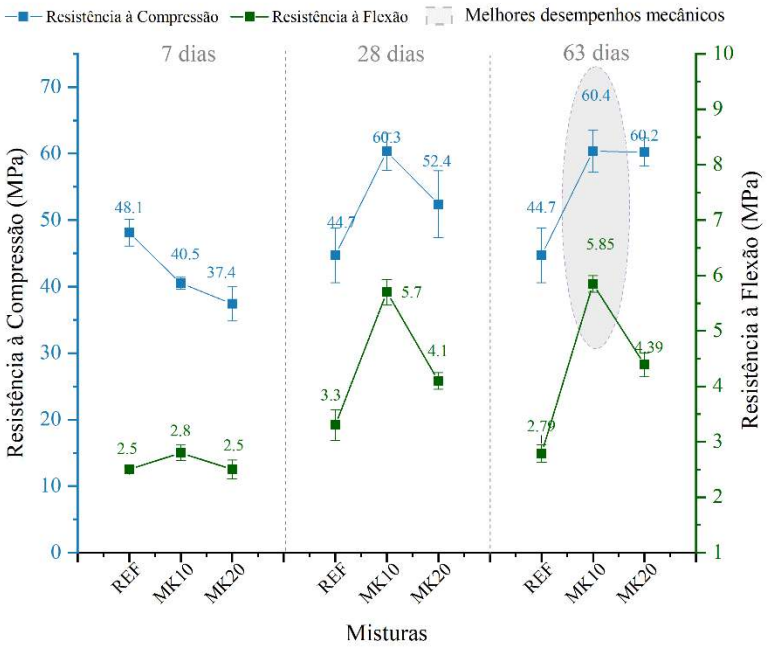
A partir do gráfico da Figura 4, verifica-se que a pasta de referência (REF) apresentou o maior valor médio de espalhamento (267,7 mm), indicando maior fluidez e melhores condições de trabalhabilidade. Esse comportamento pode ser explicado pela menor área superficial específica do sistema, associada à ausência de partículas ultrafinas, provenientes do MK, o que reduz a demanda de água. Tendência semelhante foi relatada por Liu et al [8], que observaram maiores valores de espalhamento em misturas compostas exclusivamente por cimento Portland, em comparação àquelas contendo metacaulim.

Observa-se ainda que a incorporação de MK, resultou na redução do espalhamento, essa diminuição ocorreu de forma progressiva, com valores médios de 224,7 mm e 205,9 mm, respectivamente. Esse comportamento está relacionado ao aumento da finura e da área superficial específica, o que reduz a quantidade de água livre disponível e, consequentemente, a mobilidade das partículas.

RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS PASTAS NO ESTADO ENDURECIDO

Após a análise da trabalhabilidade, avançou-se para a avaliação do comportamento mecânico das pastas no estado endurecido, por meio dos ensaios de resistência à flexão e à compressão, conduzidos aos 7, 28 e 63 dias de cura úmida submersa. Essa etapa teve como finalidade examinar os efeitos da substituição e da adição parcial de cimento por metacaulim (MK). Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 5.

Figura 5: Resistência à compressão e à flexão das pastas (7, 28 e 63 dias)



Fonte: o autor.

A partir da Figura 5 pode ser observado que de forma geral, a pasta de referência (REF) apresentou maiores resistências nas idades iniciais, enquanto as misturas com MK apresentaram ganhos mais expressivos ao longo do tempo. A mistura SMK10 destacou-se, atingindo os maiores valores de resistência à compressão e à flexão, comportamento associado às reações pozolânicas tardias e ao refinamento da microestrutura.

Quanto à análise estatística, os dados de compressão apresentaram distribuição normal (Shapiro–Wilk, $p > 0,05$), permitindo o uso de ANOVA de medidas repetidas. O efeito isolado do tempo não foi significativo, porém a interação tempo × mistura foi significativa ($p < 0,001$), indicando que o ganho de resistência depende da composição. O efeito entre misturas, isoladamente, não foi significativo. A regressão linear múltipla (63 dias) apresentou ajuste moderado ($R^2 = 23,4\%$), sendo o teor de água o único parâmetro significativo ($p < 0,05$), com efeito negativo na resistência.

Para a resistência à flexão, os dados também atenderam à normalidade, e a ANOVA indicou efeitos significativos do tempo, da mistura e da interação entre ambos ($p < 0,001$). As comparações de Tukey mostraram superioridade das misturas com substituição, especialmente SMK10. A regressão aos 63 dias apresentou bom ajuste ($R^2 = 63,0\%$), com efeito negativo significativo do teor de cimento.

Com base nesses resultados, a mistura MK10 foi considerada a que obteve melhor desempenho mecânico, especialmente em idades mais avançadas, identificando a potencialidade do metacaulim como pozolana.

CONCLUSÕES

As principais conclusões deste estudo são:

• A análise mineralógica confirmou que o caulim calcinado apresenta estrutura amorfa, decorrente da desorganização da caulinita, indicando seu potencial pozolânico;

• A incorporação de metacaulim (MK) reduziu a trabalhabilidade das pastas, sendo essa redução mais pronunciada nas misturas com substituição do cimento, em função do aumento da finura e da área superficial do sistema;

• Os maiores valores de resistência à compressão e à flexão foram obtidos nas misturas com MK, com destaque para a MK10, evidenciando o efeito positivo das reações pozolânicas e do refinamento microestrutural;

• O ganho de resistência ao longo do tempo foi mais significativo aos 63 dias, confirmando a atuação das reações pozolânicas tardias;

• O metacaulim produzido a partir do caulim regional mostrou-se uma alternativa técnica e ambientalmente viável, contribuindo para a redução do consumo de cimento e para o aproveitamento de recursos locais.

DECLARAÇÃO DE USO DE IA

Durante a preparação deste artigo, o primeiro autor utilizou a ferramenta Grammarly para a revisão, melhoria de coesão e geração de imagens do texto. Após a utilização da ferramenta, os autores revisaram e editaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] GLOBAL CEMENT. **Global Cement top 100 2025**. Global Cement Magazine, 24 nov. 2025. DOI: https://www.globalcement.com/magazine/articles/1390-global-cement-top-100-2026.

[2] HABERT, G.; MILLER, S. A.; JOHN, V. M.; PROVIS, J. L.; FAVIER, A.; HORVATH, A.; SCRIVENER, K. L. **Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries.** Nature Reviews Earth & Environment, 1, 559–573, 2020. DOI: https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3

[3] WEISE, K.; ENDELL, L. M.; UKRAINCZYK, N.; KOENDERS, E. **Pozzolanic metakaolin reactivity: time-dependent influence of calcium hydroxide, alkali hydroxides, and sulfates**. Construction and Building Materials, V. 431, p. 136534, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136534.

[4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

[5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

[6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53: Agregados – determinação da massa específica de agregados graúdos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

[7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972: Agregados – determinação da massa unitária e do índice de vazios**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

[8] LIU, H.; WANG, Z.; TIAN, Z.; BU, J.; QIU, J. **Effect and mechanism of metakaolin powder (mp) on rheological and mechanical properties of cementitious suspension**. Materials, V. 15, n. 16, p. 5797, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/ma15165797.